

Untersuchungen zum Einsatz von Laserscanningverfahren beim Monitoring der Deichvorlandentwicklung



(Deichvorland der Insel Juist)

Diplomarbeit
von
Andrea Weitkamp



Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen
Universität Hannover

Diplomarbeit

**Untersuchungen zum Einsatz von Laserscanningverfahren beim
Monitoring der Deichvorlandentwicklung**



(Untersuchungen anhand der Insel Juist)

cand. geod. Andrea Weitkamp

10. Januar 2001

Danksagung

Für die freundliche Unterstützung bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit bedanke ich mich bei meinem Betreuer Herrn Dr.-Ing. Peter Lohmann und dem Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen der Universität Hannover.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Dr. Dr.-Ing. Wilfried Linder und Herrn Dr.-Ing. Emil Wild für die Bereitstellung ihrer Programme und ihre Auskünfte bei der Ausarbeitung.

Außerdem danke ich Herrn Dipl.-Ing. Holger Dirks vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz in Norden und den Mitarbeitern des Landesbetriebes für Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen für die zur Verfügung gestellten Daten und ihre Hilfestellung.

Erklärung

Hiermit versichere ich, daß ich diese Arbeit selbständig angefertigt habe. Zur Bearbeitung habe ich nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet.

Bielefeld, den 10. Januar 2001

Andrea Weitkamp

1	Einleitung	1
1.1	Einführung in das Thema	1
1.2	Inhalt dieser Arbeit	3
2	Projektdurchführung	6
2.1	Untersuchungsgebiet: Ostfriesische Insel Juist	6
2.2	Ausgangsdaten	7
2.3	Auswertungsprogramme	9
2.3.1	ArcView GIS 3.0	9
2.3.2	LISA (Land-Informationen-System für Alle)	9
2.3.3	HALCON 5.1/5.2	11
2.3.4	C+B-DHM-Laser Version 4.3	12
3	Grundlagen / Verfahren in der digitalen Bildverarbeitung zur Kantendetektion, - extraktion	15
3.1	Bildvorverarbeitung	15
3.1.1	Bildverbesserung	16
3.2	Kantendetektion	19
3.3	Skelettierung	22
3.4	Bildsegmentierung	22
3.5	Mustererkennung / Textur	22
4	Analyse der Laserscannerdaten mit C+B-DHM-Laser	24
4.1	Programmablauf	24
4.2	Kantenberechnung / Wahl der Parameter	24
4.3	Signifikanz-Prüfung	29
4.4	Probleme mit dem Algorithmus / Schwächen des Programms	31
4.5	Ergebnisse	32
5	Analyse der Laserscannerdaten mit HALCON	40
5.1	Überprüfung der Kantenoperatoren	40
5.2	Kantenextraktion	46

5.2.1	Visuelle Analyse der Originalgrauwertbilder	46
5.2.2	Programme in HALCON	48
5.2.3	Probleme mit dem Algorithmus	58
5.3	Überprüfung der extrahierten Kanten	60
6	<i>Vergleich der automatisch extrahierten Kanten und Kontrolle der Laserscannerdaten</i>	66
<hr/>		
6.1	Lagevergleich der extrahierten Kanten mit der DGK5	66
6.2	Kontrolle der Höhengenaugigkeit der Laserdaten durch GPS-Messungen	67
6.3	Vergleich der extrahierten Kanten mit einer Luftbilddauswertung	69
6.4	Vergleich mit terrestrischen Profilmessungen	73
6.5	Vergleich von zwei automatischen Kantenextraktionsverfahren	76
6.5.1	Vergleich der Deichkanten	77
6.5.2	Vergleich der Prielkanten	80
6.5.3	Vergleich der Gerippllinien bei den Gruppen	83
7	<i>Résumé und Perspektive</i>	86
8	<i>Literatur</i>	89
<hr/>		
Anhang I		92
<hr/>		
Anhang II		95
<hr/>		
Anhang IV		98

1 Einleitung

1.1 Einführung in das Thema

Um Veränderungen der Erdoberfläche zu registrieren (**Monitoring**), sind dreidimensionale Meßverfahren erforderlich. Sollen diese Messungen in bestimmten zeitlichen Abständen wiederholt werden, müssen vollautomatische, hochgenaue Verfahren gewählt werden, wie sie bei Überwachungsaufgaben nötig sind.

Die abbildende Laseraltimetrie als direktes, dreidimensionales Meßverfahren ist ein solches Verfahren und die bevorzugte Methode zur Gewinnung von Digitalen Geländemodellen (DGM) in vielen der unten aufgeführten Bereiche, da sie hohe vertikale Genauigkeiten bei geringem Meß- und Verarbeitungsaufwand bietet [www.geolas.com].

- Küsten- und Wattvermessung
- Strand und Dünen
- Wassertiefe in Flüssen und Küstengewässern
- Überwachung von Waldbeständen (Baumhöhen, Belaubungsdichte etc.)
- Erosion
- Eisflächen- und Gletscherbeobachtung

Im Vergleich mit den traditionellen Methoden der analytischen Photogrammetrie und Tachymetrie stellt die Laseraltimetrie eine kosten- und zeitsparende Alternative für die Erstellung digitaler Gelände- und Höhenmodelle dar [Brügelmann, 2000].

Durch dreidimensionale Visualisierungen von Geländeformen -wie z.B. DGM's- wird das Verständnis für die Wechselwirkungen zwischen Gelände und Ökosystem gefördert.

Die aus Laserscannerdaten erstellten Digitalen Höhenmodelle (DHM) / Digitalen Geländemodelle (DGM) geben die Erdoberfläche anhand einer reduzierten Datenmenge wieder.

Dabei sind die Hauptinformationen über die Geländeoberfläche in den Strukturlinien (z.B. Bruchkanten, Gerippllinien) enthalten.

Die Extraktion von Strukturlinien aus Laserscannerdaten im Bereich des Deiches und des Deichvorlandes soll zur Gewinnung von Erkenntnissen über die Dynamik im Deichvorland genutzt werden.

Die Filterung Digitaler Geländemodelle aus Laserscannerdaten kann über verschiedene Verfahren erfolgen:

- Morphologische Filter [ECKSTEIN u.a., 1995]: ‚dual rank‘, ‚gray opening‘
Der ‚dual rank-Filter‘, der eine Erweiterung des ‚gray opening‘ darstellt, wird dazu verwandt, „Nicht-Bodenpunkte, bzw. -objekte“ (Häuser, Bäume oder Brücken) aus Grauwertbildern durch den Vergleich zweier digitaler Geländemodelle zu extrahieren. Im Vergleich mit dem ‚gray opening‘ ist die Geländeoberfläche beim dual rank-Filter glatter mit weniger Rauschen behaftet und Hauswände sind steiler und besser ersichtlich.
Objekte, die in ihren Höhenwerten klar vom Boden zu unterscheiden sind, werden sehr präzise ermittelt. Problematischer ist die Extraktion von niedriger Vegetation, da eine alleinige Betrachtung der Höhenunterschiede von Vegetationspunkten zur Umgebung nicht ausreicht.
- Lineare Prädiktion [KRAUS u.a., 1997]: statistische Interpolationsmethode
Die Berechnung erfolgt iterativ. Die einzelnen Meßwerte können individuell gewichtet werden.
Die lineare Prädiktion ist nur bedingt für die Interpolation von Digitalen Geländemodellen bzw. Digitalen Oberflächenmodellen anwendbar, da Untersuchungen gezeigt haben, daß Punkte von markanten geomorphologischen Strukturen (z.B. Deiche) durch diese Art der Filterung eliminiert werden.
- Spline-Approximation [AXELSSON, 1999]: Interpolationsverfahren
Die Hauptaufgabe besteht auch hier in der Bestimmung der Geländeoberfläche und in der Separation von Objekten auf der Oberfläche. Die Spline Approximation verbindet die gemessenen Punkte durch zusammengesetzte Polynome zu einer Geländeoberfläche. Vereinfacht wird dies nur für eine Scanlinie und nicht für die gesamte Oberfläche durchgeführt. Die Oberfläche kann innerhalb festgesetzter Werte fluktuieren. Die Fluktuationen können über diese Methode kontrolliert werden.
- Generelle Digitale Bildverarbeitung [VON HANSEN u.a., 1999]:

Es werden zwei unterschiedliche Filteralgorithmen (Gleitendes Minimum und Konvex-Konkave Hülle) zur Extraktion der Geländeoberfläche (DGM) vorgestellt. Die Berechnung geht in beiden Fällen von den tiefsten Punkten innerhalb lokaler Bereiche der Höhenmatrix aus. Beide Verfahren lieferten in Waldgebieten gute Ergebnisse. In anderen Bereichen (Siedlungsflächen etc.) ist ihre Brauchbarkeit noch zu überprüfen.

Die Laserscannerdaten bestehen nicht nur aus den dreidimensionalen Koordinaten, sondern sie enthalten auch Strukturdaten (geomorphologisch prägnante Höheninformationen wie Gerippllinien, Bruchkanten etc.), die für eine korrekte Darstellung des Geländes in dreidimensionalen Modellen notwendig sind.

In dieser Arbeit wird für die Extraktion von geomorphologischen Strukturen im Deichvorland der mathematische Ansatz nach WILD [1999] untersucht und ein Ansatz mittels Algorithmen der Digitalen Bildverarbeitung mit dem Programmpaket HALCON entwickelt.

Das Ziel ist, zwei unterschiedliche Verfahren zur Extraktion morphologischer Elemente (Bruchkanten, Gerippllinien etc.) vorzustellen und die Ergebnisse aus den untersuchten Testgebieten zu erläutern.

1.2 Inhalt dieser Arbeit

Im Bereich des Insel-, Küsten- und Naturschutzes soll die Überwachung morphologischer Veränderungen im Deichvorland gewährleistet sein, um die Schutzmaßnahmen (Gruppen, Lahnungen etc.) zu kontrollieren.

Die Maßnahmen sind folgendermaßen definiert [geo.www.ewf.uni-kiel.de/]:

Gruppen bilden ein künstliches Entwässerungssystem in den Landgewinnungsfeldern. Sie werden in zeitlichen Abständen ausgehoben, wenn sie verlandet sind und die Entwässerung des Vorlandes zu den Prielen hin nicht mehr gesichert ist. Der Aushub erhöht die Flächen zwischen den Gruppen um ca. 10 Zentimeter pro Jahr.

Lahnungen bestehen aus Doppelpfahreihen, deren Zwischenräume mit Reisig gefüllt sind.

Sie wirken strömungsberuhigend, so daß der Absatz von Schlick gefördert wird.

Die Aufgabe des Küstenschutzes beinhaltet sowohl den Erhalt von Vorlandflächen als auch die Gewinnung von Neuland.

Der Gegenstand dieser Diplomarbeit ist die Extraktion morphologischer Elemente im Deichvorland und am Deich aus Laserscannerdaten, d.h. visualisieren der Geländelinien mittels digitaler Bildverarbeitung. Es ist zu überprüfen, ob und wie genau Strukturen in diesem Testgebiet aus dem Datensatz herausgefiltert werden können, um Veränderungen erfassen zu können.

Zur automatischen Extraktion stehen die Programme HALCON der Firma MVTEC und C+B-DHM-Laser der Firma C+B-Technik zur Verfügung. Das Programm C+B-DHM-Laser wird

vom Landesbetrieb für Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) bereitgestellt.

Die so gewonnenen Ergebnisse sollen mit Ergebnissen aus den bisher üblichen Verfahren verglichen werden.

Tachymetrische Profilmessungen -die bisher übliche Methode zur Überwachung- sollten zuzüglich zur stereoskopischen, topographischen Luftbildauswertung für den Ergebnisvergleich hinzugezogen werden.

Zusätzlich habe ich im Laufe dieser Arbeit noch GPS-Daten nahe des Hafens auf Juist von der LGN hinzugezogen, da sonst nur ein relativer Vergleich möglich gewesen wäre.

Ziel dieser Arbeit ist es, Aussagen hinsichtlich der Qualität der Laserscannerdaten zu machen:

- Ableitung morphologischer Informationen aus den Laserdaten,
- Optimierung der Datenerfassung (Aufnahmeparameter) und der Datenverarbeitung,
- Kombinationsmöglichkeiten der Laserscannerdaten mit anderen Datenquellen (z.B. Luftbildauswertung, GPS-Messungen etc.), um die Ableitung morphologischer Elemente auszutesten,
- Verarbeitungsaufwand für die hier vorliegende Problemstellung

Zu Beginn dieser Arbeit erfolgt eine kurze Vorstellung des Testgebietes auf der ostfriesischen Insel Juist, der mitgelieferten Ausgangsdaten und der verwendeten Auswertungsprogramme (**Kapitel 2**). Im Anschluß werden die Grundlagen und der Verfahrensablauf einer digitalen Bildverarbeitung im Hinblick auf die Kantenextraktion aus Laserdaten erläutert (**Kapitel 3**).

Die automatische Extraktion von morphologischen Strukturen ist zum einen über die Berechnung von Kantenpunkten in dem Programm C+B-DHM-Laser der Firma C+B-Technik mbH realisiert (**Kapitel 4**). Hier werden die Kanten über einen fest implementierten mathematischen Ansatz ermittelt.

Zum anderen erfolgt die Entwicklung eines automatischen Verfahrens zur Kantenextraktion mit dem Programmpaket HALCON (**Kapitel 5**). Die Laserscannerdaten werden zuerst visuell auf morphologische Elemente analysiert und dann die Programme auf die Grauwertbilder angewendet. Sie bestehen aus Operatoren der digitalen Bildbearbeitung.

Die Ergebnisse der automatischen Extraktionen werden anhand von Profilen überprüft. Die Lage der bestimmten Strukturen im digitalen Geländemodell aus den Laserdaten wird festgestellt.

Abschließend werden die Ergebnisse mit anderen Datensätzen -DGK5, Luftbilddauswertung, Profilmessungen, GPS-Messungen- verglichen (**Kapitel 6**). Auch der relative Vergleich zwischen den unterschiedlichen Lösungsansätzen zur automatischen Extraktion von Kanten und anderen morphologischen Formen wird durchgeführt.

2 Projektdurchführung

2.1 Untersuchungsgebiet: Ostfriesische Insel Juist

Das Testgebiet auf der Insel Juist umfaßt einen 1,5km langen und 800m breiten Küstenstreifen. Dieser auf der Wattseite gelegene Abschnitt beinhaltet im Norden den Deich und vorgelagert die Wiesen, Salzwiesen und Priele.

Für die Bearbeitung mittels digitaler Bildverarbeitung wird dieses Gebiet in die drei Teilgebiete ‚Deich‘ (Grün), ‚Priel‘ (Rot) und ‚Gruppen‘ (Blau) unterteilt (**Abbildung 2.1**). Diese Aufteilung ist notwendig, um die charakteristischen Merkmale besser herausfiltern zu können, d.h. die kleinförmigen Strukturen im Deichvorland und daraus resultierende geringe Höhenunterschiede (<2m) erfordern eine differenzierte Betrachtung der Geländeoberfläche.

Als Kontrollfläche mittel GPS-Messungen ist das Gebiet Mole (Gelb) hinzugezogen worden.

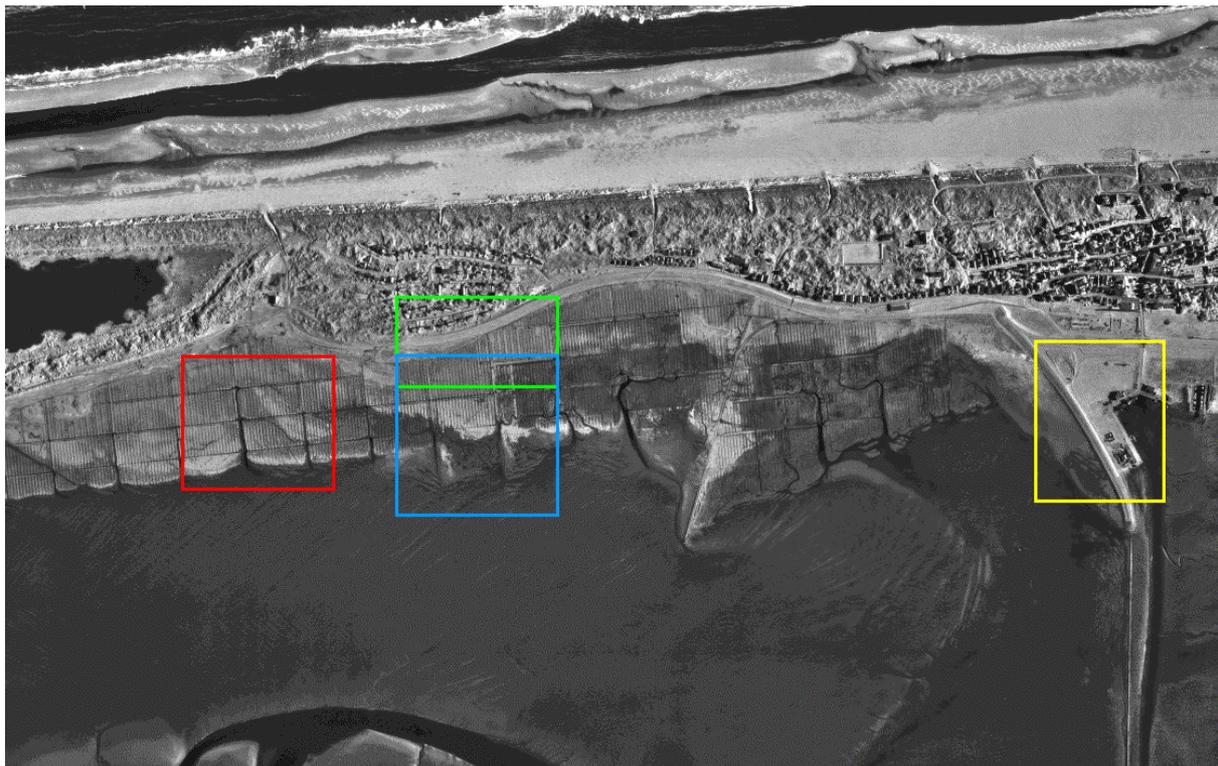


Abb. 2.1 Luftbild mit markierten Testgebieten

Die Koordinaten der Teilgebiete (linke untere Ecke und rechte obere Ecke des jeweiligen Gebietes), ihre Ausdehnung und die Anzahl der Laserpunkte im jeweiligen Gebiet sind in **Tabelle 2.1** zusammengestellt.

Teilgebiet	Rechtswert	Hochwert	Gebietsgröße m×m	Punktzahl
Deich	2563500	5949500	500×300	75 587
	2564000	5949800		
Priel	2562900	5949000	500×500	136 522
	2563400	5949500		
Gruppen	2563500	5949100	500×500	163 717
	2564000	5949600		
Mole (Kontrollfläche)	2565600	5949200	400×500	6763
	2566000	5949700		

Tab. 2.1 Testgebiete

2.2 Ausgangsdaten

Im Rahmen der Erstellung des Digitalen Geländemodells 1:5.000 (DGM 5) für das Land Niedersachsen wurde eine Laserscannerbefliegung der ostfriesischen Inseln vom Landesbetrieb für Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) beauftragt und durchgeführt.

Die Firma Topscan beflog die Insel Juist am 30.01.1999 mit dem ALTM 1020 von Optech in einer Höhe von 700 m. Die Befliegung war durch das Niedrigwasser auf ein Zeitfenster von 3,5 Stunden vor bis 2 Stunden nach Ebbe begrenzt. Der mittlere Punktabstand der Laserpunkte sollte maximal 3m betragen und ergab sich schließlich mit 1,5m mittlerem Abstand im Gesamtgebiet.

Aus den Daten wurden die Vegetationspunkte und die Gebäudepunkte klassifiziert und separat als gefilterte Laserscannerdaten mitgeliefert.

Die Genauigkeitsanalyse der Laserpunkte ($\Delta H = H_{\text{Laser}} - H_{\text{Soll-DHM}}$) lieferte als Standardabweichung der Höhendifferenz 6,3cm für die Absolutgenauigkeit.

Für die Datenanalyse (Kapitel 4 und 5) werden die gefilterten Laserscannerdaten als Rohdaten, d.h. nicht in einem Raster vorliegend, verwendet.

Für die Stereoluftbildauswertung liegen zum einen Schwarz/Weiß- Infrarot Luftbilder im Maßstab 1:28.000 vom 18. Mai 1999 sowie zum anderen Color- Infrarot Luftbilder im Maßstab 1:10.000 vom 25.9.1997 vor.

Die Analyse der Luftbilder wurde am Institut für Photogrammetrie (IPI) in Hannover am analytischen Auswertesystem Planicomp P1 der Firma Zeiss vorgenommen.

Es stellte sich heraus, daß für den gewünschten Vergleich nur die SW-IR Luftbilder zur Auswertung geeignet waren aufgrund der Aufnahmeparameter und den dadurch bedingten erreichbaren Genauigkeiten.

Die Flughöhe bei der Aufnahme der SW-IR-Luftbilder betrug ungefähr 3000m. Es war eine Kamera mit einer Kammerkonstante von 305,024mm gewählt worden.

Lagegenauigkeit:

$$s_x = m_b \cdot \delta_0 = 28.000 \cdot 5 \mu m = 14 cm$$

m_b : Bildmaßstabszahl

δ_0 : Genauigkeit für klar identifizierbare Punkte

Höhengenauigkeit:

$$s_z = m_b \cdot \delta_0 \cdot \frac{h_g}{b} = m_b \cdot \delta_0 \cdot \frac{c}{b'} = 28.000 \cdot 5 \mu m \cdot \frac{305,024 mm}{3,32} = 0,464 m$$

$$b' = (1 - p) \cdot s' = (1 - 0,6) \cdot 23 cm = 9,2 cm$$

c : Kammerkonstante

b' : Basis im Bild

p : Längsüberdeckung

s' : Bildkantenlänge

Daraus errechnet sich eine Lagegenauigkeit von 14cm und eine Höhengengenauigkeit von 46,4cm für klar identifizierbare Punkte.

Zusätzlich gibt es aus dem Jahr 1995 tachymetrische Profilmessungen (Vermessungsprofile Nr. 142 und 148) im Abstand von 50m und eine Geländeaufnahme vom September 1998 zur genaueren Betrachtung der Abbruchkante.

Für einen qualitativen Vergleich notwendige GPS-Messungen am Hafen vom Dezember 1997 kamen noch hinzu. Diese sind mit Real-Time-Kinematik auf einen Zentimeter genau gemessen worden und werden als Kontrollfläche verwendet.

Als Kartengrundlage für den Lageplan des Testgebietes ist die digitale Deutsche Grundkarte 1:5.000 (DGK 5) vorhanden. Die Genauigkeit in der Lage beträgt bei der DGK 5 $\pm 3m$.

2.3 Auswertungsprogramme

Für die Bearbeitung der gestellten Aufgabe stehen mehrere Programme zu Verfügung.

- ArcView GIS 3.0
- LISA
- Halcon 5.1 /5.2
- C+B-DHM-Laser am LGN

2.3.1 ArcView GIS 3.0

Mit ArcView ist es möglich, raumbezogene Daten (Geodaten) zu erstellen, darzustellen, zu verändern, abzufragen, zu analysieren und auszugeben.

In diesem Fall wurde das Programm lediglich für die Bestimmung der Lagepaßpunkte anhand der DGK 5 verwendet.

2.3.2 LISA (Land-Informationen-System für Alle)

Das Programm LISA ist eine GIS- Software, die vor allem für Verarbeitung von Rasterdaten entwickelt wurde. An der Universität Düsseldorf -Fachbereich Physikalische Geographie- wird unter Leitung des Programmautors Wilfried Linder diese Software weiterentwickelt.

Ende der 80er Jahre entstanden in Hannover am IPI DGM-Module als erste Teile unter dem Namen Modell. Mit dem Übergang auf Windows NT vor ca. 3 Jahren wurde wieder mit Versionsnummer 1 begonnen. Die momentan aktuelle Version ist 2.1.

Mit LISA können räumliche Daten erfaßt, aufbereitet, analysiert und entsprechend präsentiert werden, d.h. es werden dem Anwender verschiedene Module (z.B.: Formatkonvertierungen, Digitale Bildverarbeitung, Digitalisieren) zur Verfügung gestellt [Linder, 1999].

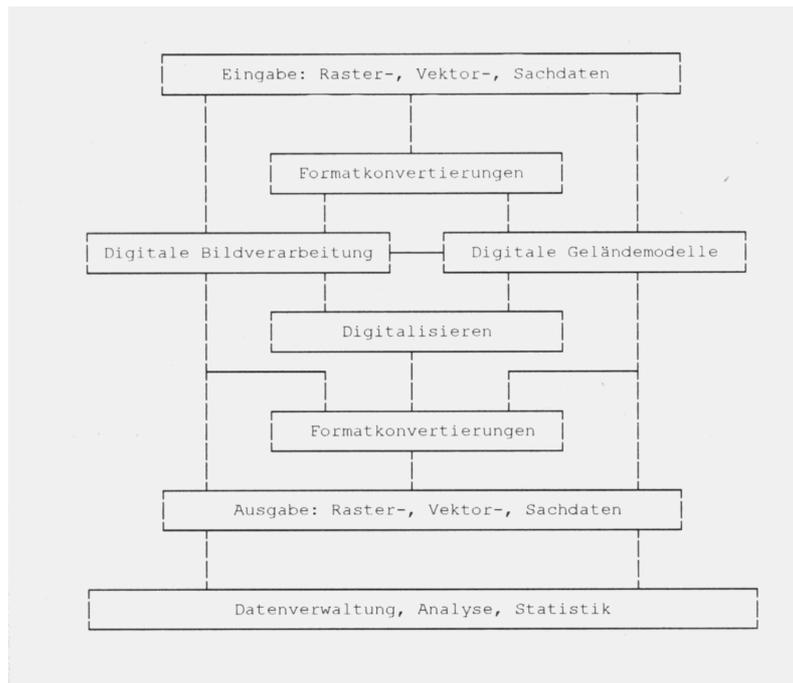


Abb. 2.2 Struktur des LISA-Basismoduls

Im Rahmen meiner Arbeit wurde LISA zunächst zur Bereichsbegrenzung der gelieferten Laserscannerdaten verwendet, d.h. zur Auswahl der drei Testgebiete Deich, Priel und Gruppen.

Der nun folgende Programmteil dient der Interpolation und Auswertung digitaler Geländemodelle, nachstehend als DGM bezeichnet.

Stereoskopisch ermittelte Bruchkanten aus Luftbildern werden importiert. Die Daten müssen als ASCII-Datei in der Anordnung Punktnummer, x, y, z vorliegen, um verarbeitet werden zu können.

Daraus wird ein digitales Geländemodell erstellt. Dazu werden die in Vektorform vorliegenden Daten in Rasterdaten umgewandelt, da in einem Geoinformationssystem (GIS) Geländemodelle standardmäßig als 16-Bit-Rasterbilder verarbeitet werden.

Die Interpolation erstellt aus den Eingabepunkten ein DGM in Form eines Rasterbildes, skaliert auf den Bereich 1...32767. Wählbar sind, je nach Verteilung der Stützpunkte oder Beschaffenheit des Geländes, verschiedene Interpolationsverfahren: Gleitender Mittelwert, Gleitende Flächen, Dreiecksvermaschung.

Über Mittelwertfilter variabler Fenstergröße (Standard = 5x5 Pixel) kann eine Glättung der Geländeoberfläche erreicht werden.

In der Eingabedatei können und werden Bruchkanten über Punktnummernzuordnung definiert.

Nach beendeter Interpolation kann noch eine Konvertierung von 16 nach 8 Bit durchgeführt werden, so daß zusätzlich zum eigentlichen DGM (GITT.IMA) -immer 16 Bit-Bild- noch ein 8 Bit-Bild (KONV.IMA) erzeugt wird. Weitere Verwendung findet das 8 Bit-Rasterbild als Ausgangsdaten in der Bildverarbeitung und in der Darstellungsweise (Blockbilder, Profildarstellungen).

2.3.3 HALCON 5.1/5.2

Das Softwarepaket zur Bildanalyse HALCON wurde ursprünglich an der Technischen Universität München von 1988 bis 1996 unter dem Namen HORUS entwickelt und seit Juli 1997 kommerziell als Version 5.0 von der Firma MVTec vertrieben. Weiterentwickelt wurden alle wesentlichen Hauptkomponenten, darüber hinaus ist das Programm nun auch unter anderen Betriebssystemen als Unix lauffähig (z.B. unter Windows 98).

Für die Bearbeitung der Laserscannerdaten wurden die Versionen 5.1 und 5.2 verwendet.

HALCON ist ein komplexes Bildanalysepaket für Produktentwicklung, Forschung und Bildung. Enthalten ist eine umfangreiche Bibliothek mit über 850 Operatoren, die ein weites Feld von Applikationen in der Bildanalyse und -bearbeitung abdeckt. So gibt es zum Beispiel Operatoren zur Bildverbesserung (Grauwertmanipulation, Histogrammdarstellung), Kantendetektion und Bildsegmentierung, um nur einige zu nennen.

Außerdem bietet das Programm die Möglichkeit, Operatoren in C- oder C++ -Programme einzufügen oder sie mit dem Rapid Prototyping Tool HDevelop, dem graphischen Anwender-Interface von HALCON, zu lauffähigen Programmen zusammensetzen. Mit dem Computer Aided Vision Engineering (CAVE) Werkzeug kann während der Programmierung die Auswirkung der verwendeten Operatoren und der Ablauf des Programms kontrolliert werden. Erstellte Programme können entweder direkt mit HDevelop benutzt werden, oder als C- oder C++ -Quellcode exportiert und dann zu einem C-Programm compiliert werden.

Von Vorteil bei der Verwendung einer fertigen Software Bibliothek wie HALCON ist die fehlende Implementierung von Standardoperatoren. Die Wirkungsweise der Operatoren muß dem Anwender selbstverständlich bekannt sein.

Die Verwendung von HALCON im Rahmen dieser Arbeit zur Analyse der Laserscannerdaten und die erstellten Programme werden im Kapitel 5 ausführlich erläutert.

2.3.4 C+B-DHM-Laser Version 4.3

Mit diesem Programm wurde am LGN in Hannover gearbeitet. Die gewonnenen Ergebnisse werden später mit denen aus HALCON verglichen.

Das Softwarepaket der Firma C+B Technik Gesellschaft für Computer und Bürotechnik mbH zielt auf die optimale Berechnung von digitalen Höhenmodellen (DHM) aus Laserscannerdaten.

Erstellt mit der Entwicklungsumgebung Visual C++ von Microsoft, handelt es sich um ein Windowsprogramm zur graphisch – interaktiven Darstellung und Bearbeitung.

Das Hauptaugenmerk ist auf die Berechnungsmodule gerichtet, die mit graphisch-interaktiver Unterstützung unter Windows und auch ohne diese Unterstützung als reines Batch-Programm unter Unix als C++ -Version arbeiten.

Als Ausgangsdaten erwartet das Programm klassifizierte Laserscannerdaten oder mit anderen Aufnahmetechniken gewonnene Daten. Klassifiziert bedeutet, daß eine Unterscheidung in für die DHM-Berechnung verwendbare (Bodenpunkte) und nicht verwendbare Punkte (Vegetationspunkte) erfolgt ist.

Das Kernstück des Programmpaketes C+B-DHM-Laser stellt das Berechnungsmodul zur automatischen Berechnung von Geländekanten dar. Ausgegeben werden die Rechenergebnisse als ASCII-Dateien.

Im folgenden werden die Berechnungsschritte und -varianten kurz beschrieben, bevor die Berechnungsmethodik erläutert wird.

Die Laserscannerdaten liegen in ASCII-Dateien vor, deren Klassifizierung durch Trennung in Dateien oder durch Punktcodierung vorgenommen wurde.

Nach dem Einlesen der Daten:

- kann ein Raster-DHM mit 1m Rasterweite bei Laserscannerdaten berechnet werden,
- wird die Abweichung der Vegetationspunkte von der definierten Sollhöhe der Bodenpunkte überprüft,
- **werden die Geländekanten automatisch berechnet,**
- können die Boden- und Vegetationspunkte überprüft werden bzw. die Höhenglättung der Bodenpunkte unter Berücksichtigung der berechneten Geländekanten durchgeführt werden,
- und das DHM-Raster in eine ASCII-Datei ausgegeben werden.

Für die Berechnung des DHM-Rasters aus Punkt- und Linien-Daten werden Pixel-Algorithmen verwendet, die auf der Dreiecksvermaschung aufbauen. Pro Stützpunkt des

Rasters wird die Tangentialfläche aus den umliegenden Punkten ermittelt, die die Geländeoberfläche neigungsmäßig beschreibt. Die Geländeoberfläche wird also durch Punkthöhe und Tangentialebene genähert.

Die automatische Berechnung von Geländekanten erfolgt in mehreren Schritten: Kantenerkennung, Kantenberechnung, Signifikanz-Prüfung und Kantenausgabe. Es können Parameter gesetzt werden, die sowohl der Punktdichte und Topographie Rechnung tragen als auch die Kanteneigenschaften steuern.

Bei der Kantenerkennung werden ausschließlich Bodenpunkte benutzt. Dagegen berücksichtigt die Kantenberechnung auch Vegetationspunkte aus dem Kantenbereich oder zur Kantenform passende Punkte. Um klare durchgängige Kanten erzeugen zu können, müssen die Kriterien zur Kantenerkennung genau und sorgfältig gewählt werden, da die punkthafte Erfassung von Formen zur deren Verwischung führt.

Die Kantenerkennung gliedert sich in die Suche nach Knicklinienpunkten, die zu Knick-Profilen und dann schließlich zu Linienzügen verbunden werden.

Zum Erkennen von Knickpunkten werden die umliegenden Punkte und die für sie ermittelten Tangentialebenen herangezogen. Da zu dicht liegende Punkte das Ergebnis verfälschen würden, wird ein Minimalradius gesetzt, in dem Punkte nicht berücksichtigt werden. Knickwinkel, als ein Kriterium für die Knickpunkterkennung, ergeben sich entweder aus den Höhendifferenzen der Laserpunkte oder aus den Winkeln zwischen den ermittelten Tangentialebenen. Eine Klassifizierung in Ober- und Unterkante ist möglich.

Aus den Punkten werden senkrecht zur Kantenrichtung verlaufende Profile gebildet. Je größer die Punktdichte, desto mehr Punkte werden zu einem Profil verbunden. Werden Profile desselben Typs (Ober-, Unterkante) verknüpft, entstehen Linienbänder, die in Kantenlinien überführt, eine erste Näherung der Geländekanten darstellen. Diese Linienzüge haben zunächst die Form von mehr oder weniger ausgeprägten Zickzack-Linien. Durch ausgleichende Rechenoperationen werden daraus lage- und höhenmäßig ausgeglichene Geländekanten berechnet. Dabei werden die Knickpunkte entlang der Linien sequentiell abgearbeitet und für jedes Profil die Kantengeometrie bestimmt.

Da aufgrund hoher Punktdichten aber auch bei größeren Punktabständen oft kürzere oder nicht signifikante Linien entstehen, wird eine Signifikanz-Prüfung durchgeführt, so daß nur Kanten ab einem zu setzenden Signifikanz-Niveau ausgegeben werden. Für jede Kantenlinie wird ein Signifikanzwert ermittelt.

Wesentlich ist hierbei der Kantenwinkel, der das Abknicken der Geländeform senkrecht zur Kante angibt.

Die Linien werden für die Ausgabe aufbereitet, indem die dichte Punktfolge durch Berücksichtigung eines minimalen und maximalen Punktabstandes in eine gleichmäßige Punktfolge umgewandelt wird. Der Linienverlauf wird durch eine Pfeilhöhenprüfung in Lage und Höhe fixiert. Außerdem kann der Ausgabebereich frei definiert werden.

Die Wahl der Parameter und eine graphische Erläuterung einzelner Parameter folgen in Kapitel 4.

3 Grundlagen / Verfahren in der digitalen Bildverarbeitung zur Kantendetektion, -extraktion

Digitale Bildverarbeitung bedeutet die Verarbeitung digitaler Bilder im Rechner zum Ziel der besseren Darstellung und im weiteren die Extraktion bestimmter Eigenschaften oder Strukturen. Die Auswahl der Verarbeitungsschritte richtet sich immer nach dem Ziel der Bildverarbeitung.

Genauer erklärt werden vor allem die Abschnitte, die für die Auswertung unter HALCON verwendet werden.

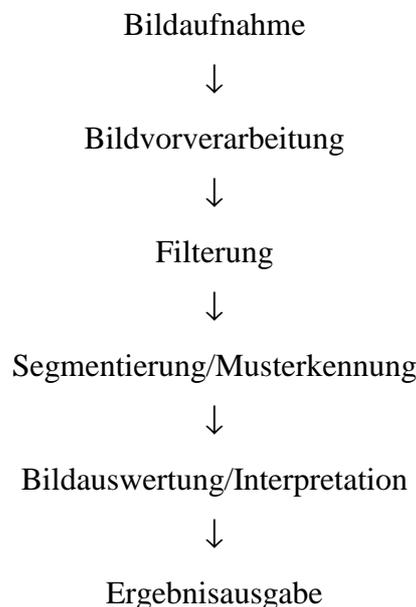


Diagramm 3.1 Ablauf der digitalen Bildbearbeitung

3.1 Bildvorverarbeitung

Die Bildvorverarbeitung gliedert sich in drei Bereiche: *Geometrische Entzerrung, Bildrestaurierung und Bildverbesserung*.

Ziel der Vorverarbeitung ist es, ein Bild zu erstellen, in dem der Bildbereich hervorgehoben ist, der die später zu gewinnenden Daten enthält. Nach der Vorverarbeitung muß sich dieser Datenbereich in der Helligkeit von der Umgebung deutlich unterscheiden.

Geometrische Entzerrung findet sich beispielsweise in der Kartographie bei der Datenaufbereitung für GIS-Anwendungen. Während die Bildrestaurierung eventuelle

Störungen der Bildaufnahme korrigiert, kommt die Bildverbesserung bei der Kompensation von Kamera-Inhomogenitäten zum Einsatz. Der Datenumfang der Bildmatrix bleibt von der Bearbeitung nahezu unbeeinflusst.

Notwendige Operatoren hierfür sind:

- Punktoperatoren, bei denen der neue Grauwert eines Pixels nur vom alten abhängt (z.B. Histogrammodifikation, Schwellwertoperator)
- lokale Operatoren, bei denen alle innerhalb eines Fensters um das aktuelle Bildelement liegenden Pixel zu dessen neuem Wert beitragen (z.B. Gradientenoperator und Glättungsoperator) und
- globale Operatoren, bei denen der neue Grauwert jedes Pixels von allen anderen Bildelementen abhängt (z.B. Fourier-Transformation).

3.1.1 Bildverbesserung

Bildverbesserungsverfahren werden -ebenso wie die Bildrestaurierungsverfahren- zur Aufbereitung von Bildsignalen genutzt, um die wichtigen Merkmale hervorzuheben.

Folglich werden gering ausgeprägte Strukturen betont, während redundante oder gar störende Bildinformationen unterdrückt werden.

Dies kann auf verschiedene Weise erreicht werden (**Kapitel 3.1.1.1 bis 3.1.1.5**).

3.1.1.1 Grauwertmanipulation

Sie ist notwendig, wenn die aufgenommenen Bilder nicht den gesamten darstellbaren Grauwert- / Farbbereich ausnutzen, da diese Bilder zu hell, zu dunkel oder zu kontrastarm erscheinen.

Denkbar ist eine Spreizung der Grauwerte auf den maximalen Wertebereich von 0 bis 255.

Dazu werden Minimum und Maximum des Bildes berechnet und auf den Gesamtbereich gestreckt.

$$h(p) = \begin{cases} 0 & \text{für } f(p) < u_1 \\ \frac{f(p) - u_1}{u_2 - u_1} & \text{für } u_1 \leq f(p) \leq u_2 \\ G - 1 & \text{für } f(p) > u_2 \end{cases}$$

$[u_1, u_2]$: Grauwertintervall mit $u_1 = \text{Minimum}$ und $u_2 = \text{Maximum}$

$[0, G - 1]$: gesamter Grauwertbereich

Es gilt außerdem $u_1 \triangleleft u_2$ und $0 \leq u_1, u_2 \leq G-1$.

Dadurch wird die Anzahl der Grauwertstufen nicht verändert, aber die Qualität und der Kontrast des Bildes werden verbessert.

Transformationen können Grauwerte auf den ganzen Bereich skalieren. Dabei ist zu beachten, daß der neue Grauwert noch im darstellbaren Bereich liegt. Durch die Skalierung kann der darstellbare Grauwertbereich über- oder unterschritten werden. Dies kann durch ‚Klipping‘ verhindert werden: Überschreiten Grauwerte den Bereich, werden sie auf den größten Grauwert abgebildet, unterschreiten sie den Bereich, so erfolgt die Abbildung auf den kleinsten Grauwert. Bei nicht linearen bzw. stückweise linearen Grauwertskalierungen kann dies zu gewollten Informationsverlusten führen, um unnötige Bildinformationen zu entfernen oder eine Kontrasterhöhung in relevanten Grauwertbereichen zu erhalten.

In der Praxis werden sogenannte Look-Up-Table (LUT) aufgebaut, deren Grauwertanzahl der des Originalbildes entspricht. Die unterschiedlichen Grauwerte der einzelnen Einträge überdecken dann den gewünschten Zielbereich, so daß eine gezielte Beeinflussung bestimmter Grauwertbereiche möglich ist.

3.1.1.2 Grauwertquantisierung

Die Grauwertquantisierung ist eine Reduzierung der Anzahl von Graustufen, um eine Platzersparnis bei der Speicherung des Bildes oder eine vereinfachte Berechnung von Filterungen zu schaffen.

Zur Transformation wird eine Look-Up-Table berechnet, die je nach Anzahl der Quantisierungsstufen mehrere identische Einträge enthält. Wichtig ist allerdings, daß Schwarz auf Schwarz und Weiß wieder auf Weiß abgebildet wird.

3.1.1.3 Histogrammdarstellung

Die Auswertung eines Histogramms ist sinnvoll, wenn die Maximalwerte oder Verschiebungs-, bzw. Skalierungsfaktoren für die Grauwertmanipulation bestimmt werden sollen.

Für die Segmentierung günstige Schwellwerte lassen sich häufig aus der Form eines Histogramms ersehen (**Kapitel 3.4 Segmentierung**).

Für die Kontraständerung und die Histogrammeinebnung ist das kumulative Histogramm von Bedeutung, in dem die relativen Häufigkeiten der Grauwerte aufsummiert werden, beginnend mit der Häufigkeit von Schwarz.

$$f(g) = 255 \sum_{x=0 \dots g} h(x)$$

$f(g)$: Grauwerttransformation

$h(x)$: relative Häufigkeit des Grauwertes x

Bei gleichmäßiger Grauwertverteilung ergibt sich eine diagonale Kurve von links unten (Schwarz) bis oben rechts (Weiß), die nur zur optischen Aufbereitung von Bildern Verwendung findet, da aufgrund lokaler Kontrastpreizung in der nachfolgenden Kantendetektion Scheinkanten auftauchen könnten.

3.1.1.1 - 3.1.1.3 sind bildpunktbezogene Methoden der Histogrammanipulation. Nun folgen (digitale) Filter im Ortsbereich, die auch die Punktumgebung berücksichtigen.

3.1.1.4 Medianfilter

Der einfachste Filter zur Glättung der Grauwerte im Ortsbereich ist der Mittelwertfilter, da jeder Grauwert eines Punktes durch den Mittelwert seiner Umgebungspunkte ersetzt wird.

Der Medianfilter ist ein Rangordnungsfiler, d.h. die Eingangsdaten werden sortiert und der Wert in der mittleren Position der aufsteigenden Folge wird als Funktionswert -als der Median- genommen.

Vorteile:

- Erhalt scharfer Kanten, gute Unterdrückung von Störimpulsen
- einfache, aber zeitaufwendige Berechnung

Beseitigt werden Strukturen und Störungen -wie Rauschen- bis zu einer Größe von n Pixel ($n=1,2,\dots$).

Nachteilig ist die laufend notwendige Einsortierung der Eingangswerte.

3.1.1.5 Kantenverstärkung

Ein einfacher örtlicher Differenzoperator $A'(i, j) = \frac{A(i, j) - \alpha \bar{A}(i, j)}{1 - \alpha}$ kann für die

Kantenverstärkung und somit allgemein zur Bildverschärfung verwendet werden.

Mit $0 \leq \alpha < 1$ als Verstärkungsfaktor und $\bar{A}(i, j)$ als Mittelwert.

Für $\alpha=0$ bleibt das Bild unverändert. Je größer α , desto stärker werden mögliche Kanten betont. Je näher α an 1, desto verrauschter ist das Ergebnis. Werte zwischen 0,6 und 0,9 haben sich als optimal herausgestellt.

Eine ähnliche Berechnung erfolgt unter HALCON beim Operator *emphasize*. Dort wird allerdings erst eine Glättung durch Mittelwertbildung durchgeführt und anschließend das Maß der Kontraststeigerung über einen Parameter gesetzt.

$res = \text{round}((orig - mean) \cdot Factor) + orig$

res : Ergebnisgrauwerte

orig : Originalgrauwerte

mean : Grauwerte der Tiefpaßfilterung

Factor : Maß für die Kontraststeigerung

3.2 Kantendetektion

Kanten / Konturen sind wesentliche Elemente im Hinblick auf eine spätere Bildsegmentierung, Objekterkennung und schließlich die Bildinterpretation. Die Qualität der Kantendetektion hängt von der Bildqualität, der Kantenart und dem verwendeten Algorithmus ab. Je nach Einsatzgebiet liefert der eine oder andere Operator ein besseres Ergebnis.

Kanten werden im Bild als Grauwertunterschiede wahrgenommen, die im zugehörigen Grauwertprofil als Stufe, Rampe etc. auftauchen. Gefordert wird allgemein für eine als ideal erkannte Kante eine möglichst geringe Fehlerrate, außerdem soll die Lokalisation der Kanten an ihrer wirklichen Position erfolgen und das Verschmieren von Kanten ist zu vermeiden. Rein numerische Kriterien sind schnelle Berechenbarkeit, ganzzahlige Arithmetik.

Bei den real vorkommenden Kanten besteht die Schwierigkeit in der Unterscheidung der zufälligen Signalfluktuationen, die durch Rauschen verursacht werden, von den gesuchten Grauwertdiskontinuitäten, die mit realen Kanten zusammenhängen.

Zur korrekten Kantenbestimmung sollte erst eine Filterung erfolgen, um Rauschen und feine Details zu unterdrücken. Dabei ist Vorsicht geboten, weil dadurch Kanten verschmieren können und die Güte der Lokalisation verschlechtert wird.

Deshalb bestehen Kantendetektoren meist aus einem Glättungsteil (Tiefpaßfilter) und einem Verstärkungsteil (Hochpaßfilter). Der Filter erhält dadurch Bandpaßcharakter.



Diagramm 3.2 Ablauf der Kantenextraktion aus einem Grauwertbild

Um die Qualität der Operatoren zu beurteilen, kann das Ergebnis visuell bewertet werden, indem der Bearbeiter entscheidet, ob die detektierten Kanten mit den von ihm als Kanten wahrgenommenen Bildteilen übereinstimmen (**Kapitel 6.3**). Für die weitere Verarbeitung kann die Geschlossenheit von Kanten -zum Beispiel bei der Segmentierung- ein entscheidendes Bewertungskriterium sein. Außerdem ist ein qualitativer Vergleich von Kantenpunkten möglich, wenn deren korrekte Absolutwerte aus anderen Quellen vorliegen (**Kapitel 6.2**).

Es gibt zwei Arten von Kantendetektoren: die parallelen Verfahren und die sequentiellen Verfahren, die meist auf den Parallelverfahren aufbauen und somit eher als Kantennachbearbeitung verstanden werden.

Die parallelen Verfahren bestimmen lokal einen Eigenvektor, der Informationen über Kantenstärke und -richtung enthält. Er hängt nur von der lokalen Bildfunktion ab, so daß er für alle Bildpunkte parallel berechnet werden kann. Je nach Verfahren werden die einzelnen Eigenschaften als Kriterium für das Vorliegen eines Kantenpunktes verwendet. Vorwiegend geht die Kantenstärke in ein Schwellwertverfahren (Binärisierung) ein.

Parallele Verfahren sind:

- Einfache lokale Operatoren: Approximation der 1. oder 2. Ableitung der Bildfunktion mit einer Glättung (*Roberts, Prewitt, Sobel*)
- Template-Matching: Verwendung von Musterkanten in Form von unterschiedlichen Filtermasken, d.h. die Maske, die am besten mit Bildfunktion übereinstimmt, beschreibt die Kantenform an dieser Stelle (*Kirsch*)
- Optimale Operatoren: Großer Einzugsbereich, Bezeichnung ‚optimal‘ basiert auf der Herleitung, die sich auf Beobachtungen und Modellvorstellungen gründet (*Marr-Hildreth (LOG), Canny, Deriche-Weiterentwicklung von Canny*)
- Parametrisierte Kantenmodelle: Masken können über Parameter variiert werden
- Morphologische Operatoren: Wissen über die Objektform ausnutzend

Sequentielle Verfahren:

Ausgehend von einem mit Kantenoperatoren gefundenen Anfangspunkt, werden Nachfolgebunkte gesucht, die eine Grauwertkante oder Linie bestimmen. Probleme bei dieser Linienverfolgung sind das Finden von Ansatzstellen und das Auffinden nachfolgender Punkte bei schon erkannter Linie.

- Non-Maxima-Suppression (NMS): Beseitigung der Nicht-Kantenpunkte; dabei wird der zentrale Gradientenwert der Bildfunktion mit zwei angrenzenden Gradientenwerten verglichen, die in Gradientenrichtung, aber auf verschiedenen Seiten des zentralen untersuchten Punktes liegen, d.h. alle Punkte, die in einer 8-Punkte-Umgebung kein lokales Maximum besitzen, werden unterdrückt und die Anzahl der potentiellen Kantenpunkte wird reduziert.

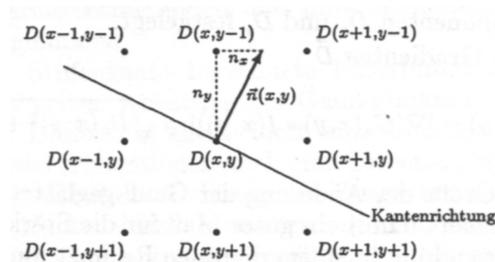


Diagramm 3.3 Suche nach dem lokalen Maximum in Gradientenrichtung

$$\text{Betrag des Gradienten: } D(x, y) = \sqrt{D_x(x, y)^2 + D_y(x, y)^2}$$

Da in einem diskreten Gitter die Gradientenrichtung meist nicht in Richtung eines Gitterpunktes der 8-Punkte-Umgebung zeigt, wird sie angenähert über die zwei Punkte aus den 8, die der Gradientenrichtung am nächsten liegen (Verfahren ‚nms‘ unter HALCON-Operator ‚nonmax_suppression.dir‘).

Unter HACON sind verschiedene NMS-Verfahren implementiert.

- Hysteresis-Threshold: Durch ein Schwellwertverfahren wird -aufgrund der Gradientenwerte der Punkte- entschieden, ob ein Kantenpunkt vorliegt. Das hier genannte Verfahren verwendet ein Schwellwertintervall, um Kanten über längere Strecken zu erkennen und von Rauschen und schwachen Kanten zu unterscheiden. Punkte, an denen der Gradientenbetrag den oberen Schwellwert des Intervalls überschreitet, werden verwendet, um neue Kanten zu beginnen; während Punkte mit Gradientenbeträgen zwischen den beiden Schwellwerten der Fortsetzung von begonnenen Konturen dienen. Als ‚sichere‘ Kantenpunkte gelten die Punkte mit einem Gradientenbetrag größer als der obere Schwellwert.

3.3 Skelettierung

Die Skelettierung gehört zu den topologischen Operatoren. Kennzeichen für Topologie sind die Zusammenhangseigenschaften von Bildsegmenten, deren Anzahl ein simples topologisches Merkmal ist. Die Erzeugung von Skelettlinien ist eine topologische Abbildung, die keine Veränderung in den Merkmalen hervorruft.

Im Fall von Grauwertbildern entsteht aus den Mittellinien hellerer Bildbereiche das Skelett, das heißt, es bleiben nur die hervorgehobenen Käme im Grauwertgebirge erhalten. Eine Rekonstruktion des Eingabebildes ist danach nicht mehr möglich.

3.4 Bildsegmentierung

Bildsegmentierung steht für den Übergang von numerischer zu symbolischer Darstellung der Bilder, genauer gesagt, es werden einfache Objekte (Linien, Flächen...) ermittelt, aber noch nicht mit weitreichender Semantik (Dachkante, Hausumriß etc.) belegt. Ziel der Segmentierung ist die Einteilung des Bildes in homogene und voneinander getrennte Bereiche mit einheitlichen Bildeigenschaften, am einfachsten erreichbar über Schwellwerte, die das Grauwertbild in ein Binärbild umwandeln.

$$\min_grau \leq g \leq \max_grau$$

untere und obere Grauwertschwelle
g : Grauwerte

Dies ist jedoch nur sinnvoll, wenn sich das gewünschte Objekt deutlich vom Bildhintergrund abhebt. Ist statt dessen die Form des zu extrahierenden Objektes bekannt, bietet sich eine Segmentierung über Schablonen -sogenannte *Templates*- an, die über das Bild gelegt und gedreht werden, bis eine Übereinstimmung erfolgt. Aber auch die zuvor beschriebenen Kantendetektoren können bei der Bildsegmentierung eingesetzt werden. Sie liefern Objektumrandungen und keine Flächen.

3.5 Mustererkennung / Textur

Die im Anschluß an die Vorverarbeitung, Verbesserung, Kantendetektion und Segmentierung erhaltenen extrahierten Objekte können nun über ihre berechneten Merkmale wie beispielsweise Flächeninhalt, Umriß, mittlerer Grauwert klassifiziert werden.

Die Texturanalyse ist entschieden komplexer, da allein schon keine eindeutige Definition für Textur vorliegt, die für alle Fachbereiche gültig ist.

Allgemein soll die Oberflächenbeschaffenheit (Strukturierung) der Grauwerte im Bild klassifiziert werden, die meist aus verschiedenen Texturen aufgebaut ist, damit ein semantischer Bezug hergestellt werden kann.

Aufgrund des Erscheinungsbildes und der Art der Erzeugung sind zwei Texturgruppen zu unterscheiden: regelmäßige und statistische Texturen, die lokal, global oder hierarchisch aufgebaut sein können. Zu den statistischen Verfahren gehören die Grauwertabhängigkeitsmatrizen (Cooccurrence-Matrizen), die zur Beschreibung der Grauwertverhältnisse in der Bildpunktumgebung dienen. Je nach Matrizenbelegung lassen sich Rückschlüsse auf das Aussehen des Ausgangsbildes ziehen.

Schließlich soll die Texturanalyse Muster bestimmter Größe mit einigen wenigen Parametern, z.B. aus Cooccurrenz-Matrizen gefunden, beschreiben. Weitere Parameter zur Merkmalsbestimmung sind statistische Größen, die rein mathematisch sind und für eine sinnvolle Bildinterpretation nicht verwendet werden. Je nach Einsatzgebiet werden die einzelnen Zahlenwerte als Merkmale verwendet. Annahme ist, daß die Textur über das ganze Bild bzw. Objekt verteilt ist. Der Textur-Vektor ist die mit den Werten berechnete gespeicherte Referenztextur. Dieser Vektor wird als Vergleichsgröße bei der Untersuchung unbekannter Texturen verwendet. Der Analyse-Vektor enthält die Werte der zu klassifizierenden Texturen und wird dem ihm am ähnlichsten Textur-Vektor zugeordnet. Eventuell muß ein Bild, das aus mehreren Strukturbereichen zusammengesetzt ist, segmentiert werden und die Analyse-Vektoren für jeden Bereich berechnet werden.

Eingesetzt wird dieses Verfahren dort, wo klassische Segmentierungsverfahren wegen der spezifischen Strukturierung der einzelnen Gebiete nur begrenzt einsetzbar sind.

Literatur in Kapitel 3:

- KLETTE, 1995
- STEINBRECHER, 1993
- JÄHNE, 1989
- HDevelop Refrence Manual, 2000

4 Analyse der Laserscannerdaten mit C+B-DHM-Laser

In diesem Kapitel wird die mit dem Programm C+B-DHM-Laser durchgeführte Analyse der Laserscannerdaten dargestellt. Der Programmablauf wird nur kurz skizziert und dann die Wahl der Parameter zur Kantenberechnung erläutert, sowie schließlich die gewonnenen Ergebnisse vorgestellt.

Beim Programmstart öffnet sich ein Protokollfenster, das den Programmablauf in Ausschnitten protokolliert (**siehe Anhang I**).

4.1 Programmablauf

- Anlegen eines neuen Projektes
- Einlesen der Punktdaten (Laserbodenpunkte und Vegetationspunkte) im ASCII-Format
- DHM-Definition und Erzeugung
- Punktprüfung und geprüfte Punkte einlesen
- **Kanten-Berechnung**
- DHM-Berechnung mit oder ohne Berücksichtigung der Kanten
- DHM und Kanten in Raster-Netzdarstellung

Anschließend werden die erzeugten Bruchkanten über Profile, die in MS-EXCEL erstellt wurden, auf ihre Lagerichtigkeit überprüft.

4.2 Kantenberechnung / Wahl der Parameter

Die Projekte im Programm C+B-DHM-Laser sind auf die ausgewählten Testgebiete Deich, Priel und Gruppen abgestimmt.

Bei der Kantenberechnung, anhand von Tangentialebenen, können ebenso wie bei Kantenfiltern Parameter gesetzt werden, die das Auffinden von Kanten im Grauwertbild beeinflussen.

Die Wirkungsweisen der einzelnen Parameter und ihre Festlegung durch den Anwender werden im folgenden beschrieben.

Um in diesem Kapitel 4.2 eine Trennung zwischen eigener Arbeit und Grundlagenarbeit zu dokumentieren, ist die eigene Arbeit in Kursivschrift gesetzt.

Nach der Berechnung von Tangentialebenen in den Laserscannerpunkten, kommt der Abschnitt in dem Programm, wo die weitere Kantenberechnung gesteuert und verändert werden kann (**Abbildung 4.1**).

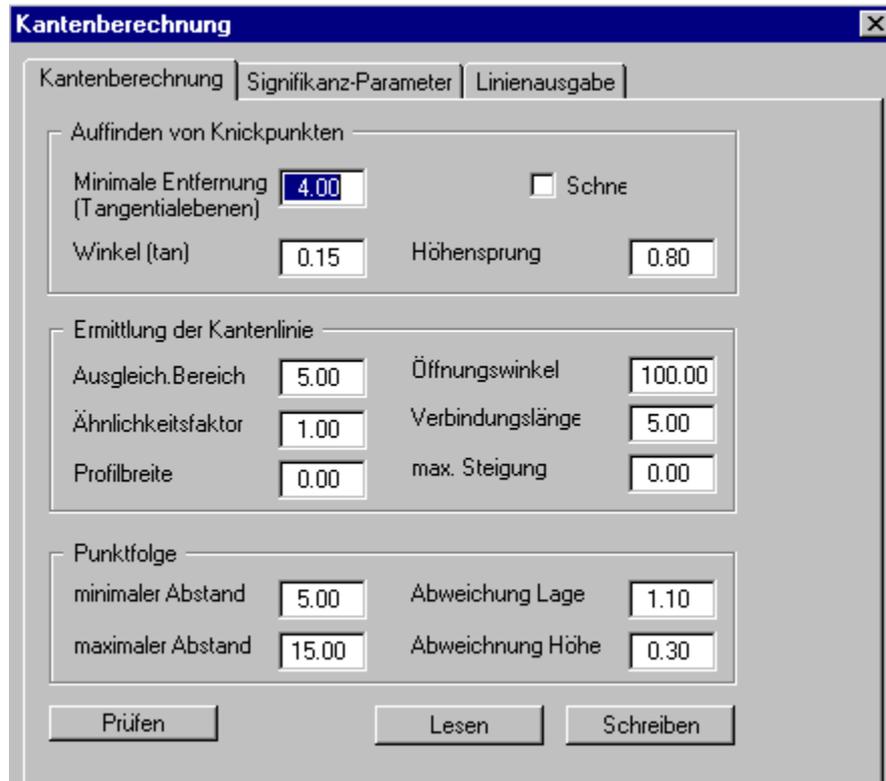


Abb. 4.1 Maske der Kantenberechnung

Anschließend an die Tangentialebenenberechnung in jedem Punkt wird nach Knickpunkten gesucht.

Kriterien für das Auffinden von Knickpunkten sind die minimale Punktdistanz, der Winkel zwischen den Tangentialebenen oder den Höhendifferenzen gegenüberliegender Punkte und der Höhengsprung zwischen Tangentialebenen.

Minimale Entfernung:

Um einen zentralen Punkt i werden im Mindestabstand Punkte gesucht, wobei der in der jeweiligen Richtung nächstliegende Punkt zur weiteren Ableitung von Knickpunkten verwendet wird (**Abbildung 4.2**).

Dann werden zu den gefundenen Punkten (Punkt 1) gegenüberliegende Punkte (Punkt 2) gesucht, das heißt, entweder findet das Programm automatisch einen Punkt oder es erfolgt eine Interpolation aus Punkten rechts und links vom optimalen Gegenüber.

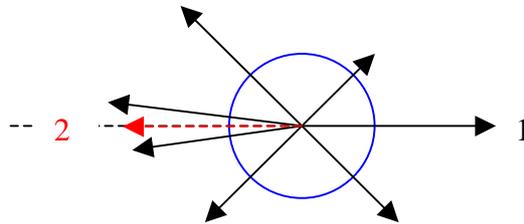


Abb. 4.2 Auswahl von Punkten

Die minimale Entfernung ist auf 3m gesetzt, weil so eine Ergebnisverfälschung durch zu dicht beieinanderliegende Punkte verhindert wird. Dies ist erforderlich wegen der hohen Punktdichte und den ungerastert vorliegenden Punkten.

Damit wird versucht, der Geländerauhigkeit und dem Signalrauschen Rechnung zu tragen.

Knickwinkel:

Der hier angesetzte Wert ist der Grenzwert für die Entscheidung, ob ein Knickpunkt vorliegt oder nicht.

Er kann aus den Höhendifferenzen von Punkt 1 und Gegenpunkt 2 ermittelt werden (Abbildung 4.3) oder aus dem Schnitt der Tangentialebenen dieser Punkte.

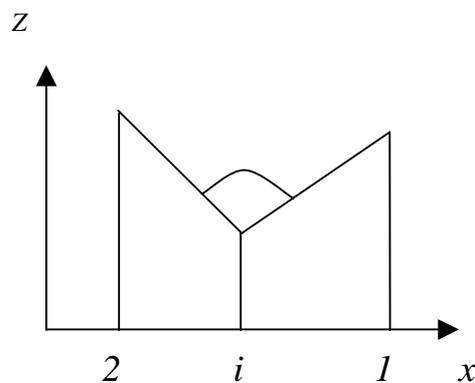


Abb.4.3 Knickwinkel

Der Wert für den Grenzwert des Knickwinkels beträgt $\tan(0,15)$.

Der Knickwinkel wird errechnet aus der Differenz der beiden Höhenwinkel auf den Punkten 1 und 2.

$$\tan_{1,2} = \frac{h}{s}$$

$$\Rightarrow \text{Knickwinkel} = \tan_1 - \tan_2$$

h : Höhenunterschied

s : horizontale Entfernung zum zentralen Punkt i

Ist die Differenz positiv und größer als 0,15, so gehört der Knickpunkt zu einer Unterkante, bei negativem Wert kleiner als -0,15 zu einer Oberkante.

Bei dichten Punktaufnahmen kann die Ermittlung von Knickpunkten aus den Punkthöhen ausreichend sein, wenn der Höhenunterschied größer als 2 Meter ist. Es wird auf die Tangentialebenenberechnung mit der Einstellung ‚SCHNELL‘ verzichtet, so daß der Rechenaufwand geringer wird.

Höhensprung:

Ein Höhengsprung tritt ein, wenn die Tangentialebenen von Punkt und Gegenpunkt sich nicht im zentralen Punkt i schneiden, sondern nahezu parallel verlaufen, doch in der Höhe versetzt. Da auch diese Situation einen Knickpunkt kennzeichnen kann, wird eine maximale Höhenabweichung um i festgesetzt (**Abbildung 4.4**).

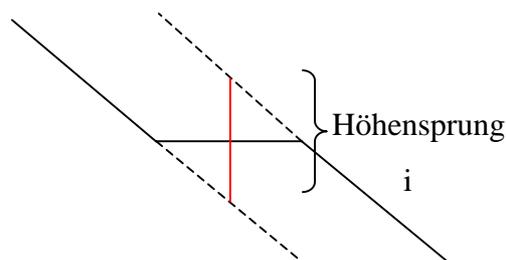


Abb. 4.4 Höhengsprung

Der Höhengsprung wurde aufgrund von Erfahrungswerten mit 80cm gewählt.

Bevor die Knickpunkte zu Linien/Kanten verbunden werden, müssen sie erst aufgrund ihrer Form in Ober- bzw. Unterkante unterteilt werden (siehe Knickwinkel) (**Abbildung 4.5**).

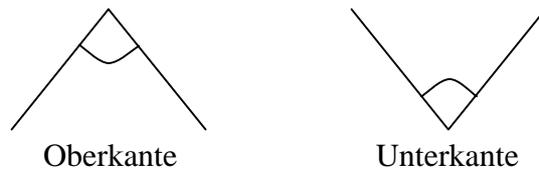


Abb. 4.5 Kantenformen

Diese Knickpunkte werden zu senkrecht zur Kantenrichtung verlaufenden Profilen verknüpft, die miteinander verknüpft eine Profilverfolgung ergeben. Diese Profilverfolgung ist nicht eine glatte Linie, sondern verläuft in einem Zickzackkurs. Um daraus eine zentrale Linie -eine Kante- zu ermitteln, wird ein Ausgleichsbereich festgelegt, der die Punkte der Profilverfolgung mittelt und somit die Achse glättet (**Abbildung 4.6**).

Dieser Bereich sollte mindestens drei Profile vor und hinter dem Knickprofil umfassen, das betrachtet wird. Punkte innerhalb dieses Bereiches werden entsprechend gewichtet.

Der Ausgleichsbereich beträgt daher 5m.

Je größer der Wert für den Ausgleichsbereich ist, desto stärker ist die Glättung.

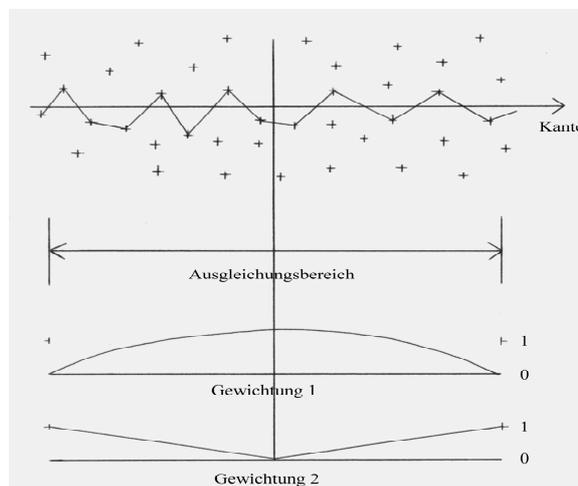


Abb. 4.6 Ausgleichsbereich

Wenn die Profilverfolgung durch die Punktverteilung unterbrochen ist, entscheidet der Öffnungswinkel und die Verbindungslänge, ob Linienteilstücke zusammengesetzt werden. Der Öffnungswinkel gibt den Kegel entlang der Kantenrichtung am Linienende vor, indem nach anderen losen Linienenden gesucht wird. Die Verbindungslänge beziffert den maximalen Abstand zweier Enden, damit sie noch verbunden werden können.

Also wurde die Verbindungslänge in diesem Fall mit 5m relativ kurz gewählt, da sonst zwei verschiedene Oberkanten oder auch Unterkanten aufgrund der räumlichen Nähe verbunden worden wären.

Damit nicht wahllos Enden miteinander verbunden werden, so z.B. Ober- und Unterkantenenden, wird über den Ähnlichkeitsfaktor entschieden, ob Kantenformen zusammenpassen. Beim Zusammentreffen zweier Kanten gibt es Höhenneigungen (Steigungsänderungen), Abweichungen in Lage und Höhe, die für einen Ähnlichkeitsvergleich herangezogen werden.

Der Ähnlichkeitsfaktor war mit dem voreingestellten Wert 1 schon optimal gesetzt.

Die Parameter ‚Profilbreite‘ und ‚maximale Steigung‘ der Kante sind nur für eine unterstützende Ausbildung von Doppelkanten im steilen Gelände von Nutzen, wo größere Punktabstände vorliegen (4-5m).

Die Kantenlinien werden durch die Punktfolge repräsentiert, deren Punktabstand über zwei Grenzwerte (minimaler und maximaler Abstand) gesteuert wird. Innerhalb der Grenzen wird die Punktfolge dem Linienverlauf angepaßt.

Ein Punktabstand zwischen 5 bis 15 Metern liegt den berechneten Kanten zugrunde.

Abweichungen in Lage und Höhe werden bei der Punktfolge aufgrund der Genauigkeitsangaben der Laserpunktaufnahme und der gewählten Rasterweite des DGM getroffen. Es wird eine Höhenabweichung von 0,3m und eine Lageabweichung von 1,1m zugelassen.

4.3 Signifikanz-Prüfung

Die Signifikanz-Prüfung überprüft die Kantenformen (Oberkante, Unterkante). Aufgrund sehr hoher Punktdichten können Kanten falsch erkannt werden. Deshalb werden Kanten ab einer zu setzenden Mindestlänge bis zur gesetzten Maximallänge kontrolliert. Kanten, die kürzer als das Intervall sind, werden ausgesondert und längere Kanten auf jeden Fall ausgegeben.

Im Intervall liegende Kanten werden über den Kantenwinkel -die Veränderung der Geländesteigung senkrecht zur Kante- überprüft.

Der Knickwinkel ist mindestens doppelt so groß wie der Winkel zum Auffinden der Knickpunkte anzusetzen, weil die Erfahrung gezeigt hat, daß bei gleich großen Winkeln alle Kanten signifikant sind.

Da der Schnittpunkt zwischen Profil und Kanten den realen Knickpunkt angibt, die zuvor bestimmten Knickpunkte aber aus den Originallaserscannerdaten bestimmt wurden und somit nur der Realität angenähert sind, können die Winkel bei der Signifikanz-Prüfung größer angesetzt sein, um die Kantenform zu kontrollieren.

Eine andere Möglichkeit Kanten auf ihre Anpassung an die Originallaserscannerdaten zu überprüfen, liefert ein Grenzwert für die Höhe, der die zulässige Abweichung zwischen Kantenflächen und Punkthöhe beschreibt (**Abbildung 4.7**). Die zulässige Abweichung wird durch Zuschläge in Steigung und Abstand erhöht. Aus der Lage eines Laserscannerpunktes ergibt sich der Abstand von der Kante und die Seitenlage rechts oder links. Die seitlich geneigte Kantenfläche erhöht den Toleranzwert um den gesetzten Höhengrenzwert pro 0,1 Tangenswert. Der Abstand zur Kantenlinie erhöht den Toleranzwert um den gesetzten Höhenwert pro 1m Abstand.

Im Mittel erwiesen sich für 10% Steigung mehr ein Zuschlag von 5% größeren Abweichungen als sinnvoll.

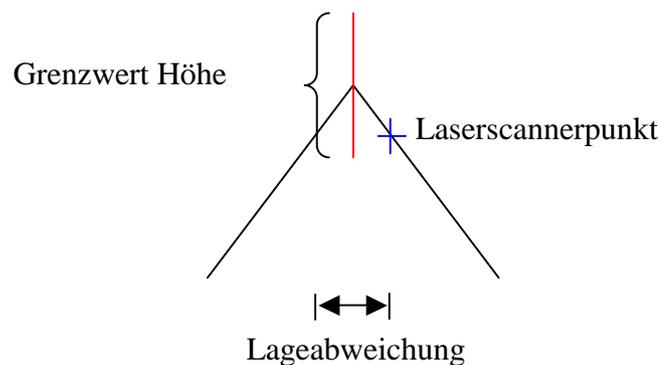


Abb. 4.7 Höhengrenzwert

Als Doppelkanten ermittelte Kanten können auch als Einfachkanten ausgegeben werden. Doppelkanten -größer als die maximale Länge- sind automatisch dargestellt. Wenn der Doppelkantenabstand die Mindestbreite unterschreitet, wird eine Einfachkante ausgegeben.

Die oben gewählten Parameter stellen Erfahrungswerte aus der Programmanwendung oder plausible Ableitungen aus den Ansätzen und Wirkungsweisen der Parameter dar, die sich durch die speziellen Probleme des Geländes herauskristallisierten.

4.4 Probleme mit dem Algorithmus / Schwächen des Programms

Das Programm C+B-DHM-Laser folgt keinem stringenten mathematisch strengen Ansatz.

Zuerst wird überlegt, wie das Ergebnis aussehen soll und dann erfolgt die rechnerische Überlegung, wie zu diesem Ergebnis gelangt werden kann.

Es wird nicht mit einem Punktraster gearbeitet, sondern mit umliegenden Punkten: sowohl bei der Bestimmung von Knickpunkten, den Profifolgen als auch der abschließenden Glättung durch den Ausgleichsbereich.

Der Algorithmus für die Knickpunktbestimmung weist Unzulänglichkeiten und Schwächen bei der Suche nach gegenüberliegenden Punkten auf. Er kann Fehler durch die Rauigkeit des Geländes, z.B. durch kleine Hügel, Bewuchs oder durch Meßfehler der Laseraufnahme beinhalten, die nicht berücksichtigt werden können.

Dabei ist die Interpolation gegenüberliegender Punkte kritisch zu sehen, da dann oben genannte Fehlereinflüsse wirksam werden.

Die Knickpunktbestimmung und die Profile bedeuten nur eine erste Annäherung an die realen Knickpunkte. Erst durch den Schnitt von Profil und ermittelter Kante werden die realen Knickpunkte gefunden.

Außerdem sind einige weitere Parameter mit größter Vorsicht zu setzen, da falsch abgeschätzte Parameter nicht nur zu einer Verschlechterung, sondern auch zu fehlerhaften Ergebnissen führen.

Zum Beispiel ist die Verbindungslänge zwischen zwei Kanten und der Öffnungswinkel im Bezug auf das Deichvorland sehr klein anzusetzen, weil im Fall zu großer Werte zwei nicht zusammengehörige Kanten gleicher Kantenform miteinander verbunden werden, wenn keine andersgeartete Kante mehr zwischen ihnen liegt. Das kann zu einer Zick-Zack-Linie zweier verbundener Oberkanten führen, die über eine nicht erkannte Unterkante hinweg verbunden wurden (**Abbildung 4.8**).

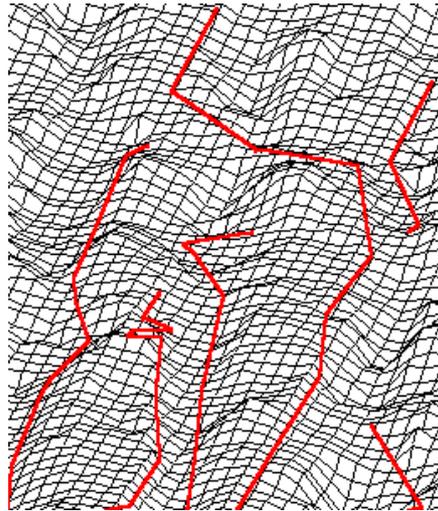


Abb. 4.8 Fehlerhafte Grüppenkante

Deutlich erkennbar sind am Deich die Ausrundungen von Unterkante und Oberkante. Aufgrund von Erosionseinflüssen kommt es zur Verflachung der Kanten.

Der gewählte Punktabstand innerhalb einer Kante ist ein Qualitätsmaß für die detektierten Kantenformen. Je größer der Abstand für die Kantendarstellung, desto mehr verschwinden die detaillierteren Strukturen.

Erst nach der Bearbeitung wurde bekannt, daß das Programm für topographische Zielsetzungen implementiert wurde. Demzufolge sollten nur Höhenunterschiede größer als zwei Meter bei der Kantenberechnung und Kantenausgabe berücksichtigt werden. Feinere Strukturen (z.B. Grüppen) können nur über die Tangentialebenen der Punkte bestimmt werden. Also darf bei der Knickpunktbestimmung in derartig strukturierten Gebieten nicht auf die Tangentialebenenberechnung verzichtet werden, auch wenn die Punktdichte groß genug erscheint (siehe Kapitel 4.3: Knickwinkel).

4.5 Ergebnisse

Im folgenden werden jeweils exemplarisch die Graphiken der Testgebiete Deich, Priel und Grüppen gezeigt. Die extrahierten Bruchkanten sind dem DHM (Grau) überlagert, dann schließt sich ein Ausschnitt aus der Raster-Netzdarstellung an und als Drittes kommt ein Profil, daß zur Lageüberprüfung der Bruchkanten erzeugt wurde.

Weitere erstellte Graphiken sind im **Anhang II** beigefügt.

Die Kantenberechnung wurde ausführlich in Kapitel 4.2 geschildert. Mittels Profilen wurden diese Kanten auf ihre Richtigkeit bezüglich der Lage im Gelände kontrolliert.

Dazu wurde das Profil des Geländes aus den Originallaserpunkten im digitalen Geländemodell gemessen und dann die Schnittpunkte der Bruchkanten mit dem Profil in MS-Excel ausgegeben. Die roten Kreuze markieren die Bruchkanten im Profil.

Gebiet Deich:

Als Ausgangsforderung für die Kantenberechnung am Deich stand die Bestimmung der Deichkrone und des Deichfußes zu beiden Seiten. Die Deichkrone und die Deichlinien wurden durchgängig zum Wattenmeer hin extrahiert; zur anderen Seite ist sie teilweise unterbrochen.

Auslöser kann das unruhigere Gelände zwischen Deichkrone und den erhöht liegenden Häusern mit ihren vorgelagerten bewachsenen Wällen sein.

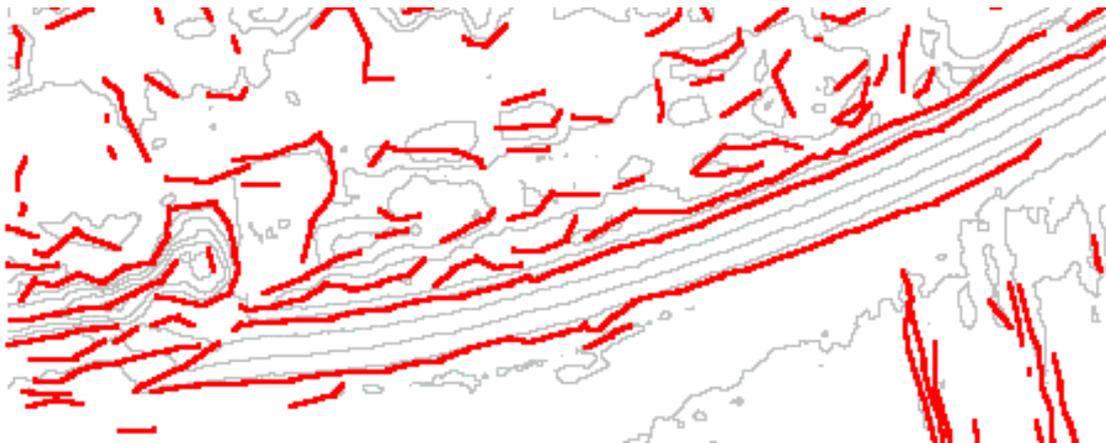


Abb.4.9 Extrahierte Bruchkanten

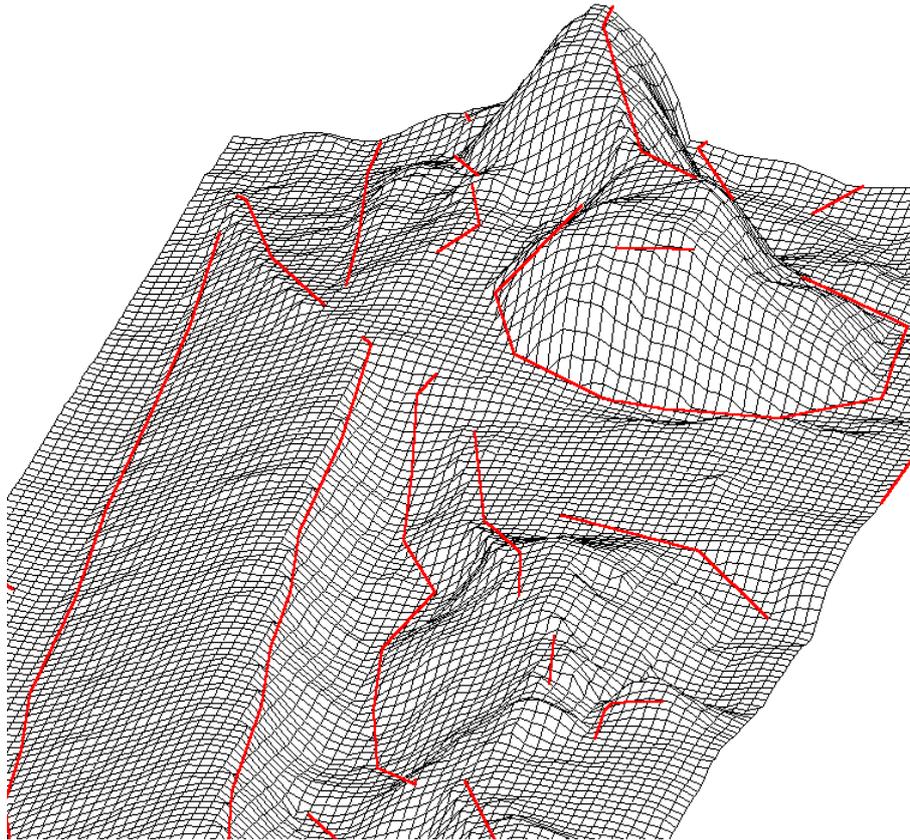


Abb. 4.10 Raster-Netz-Darstellung Deich

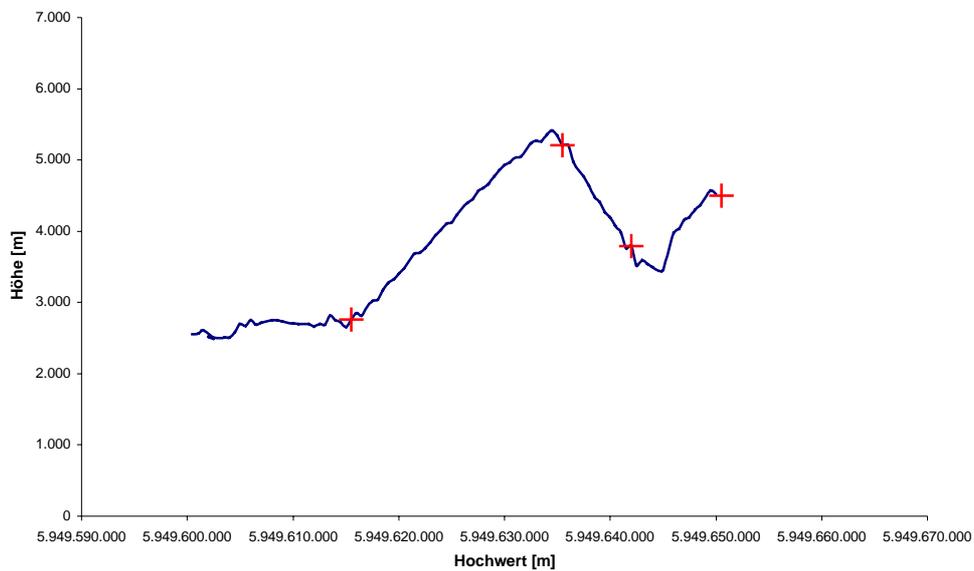


Diagramm 4.1 Deichprofil

Im Durchschnitt lagen die überprüften Bruchkanten zwischen 0 und 1m neben den aus dem Geländeprofil (**Diagramm 4.1**) ersichtlichen und meßbaren Kanten. Dies entspricht bei einer

Auflösung von einem Meter pro Pixel genau diesem einen Pixel an Abweichung. Diese Abweichung kann schon teilweise durch ein fehlerhaftes Digitalisieren des Profils aus den DGM's in LISA geschehen sein.

Gebiet Priel:

Im Deichvorland -besonders hier im Teilgebiet Priel- kam es darauf an, den Übergang von den Salzwiesen zum eigentlichen Wattgebiet zu detektieren. Dabei handelt es sich um die Abbruchkante, die einen Höhenunterschied von 1 bis 2 Metern darstellt. Dazu kommen noch die großen Entwässerungsadern wie Priele oder künstlich angelegte Gräben.



Abb. 4.11 Extrahierte Bruchkanten

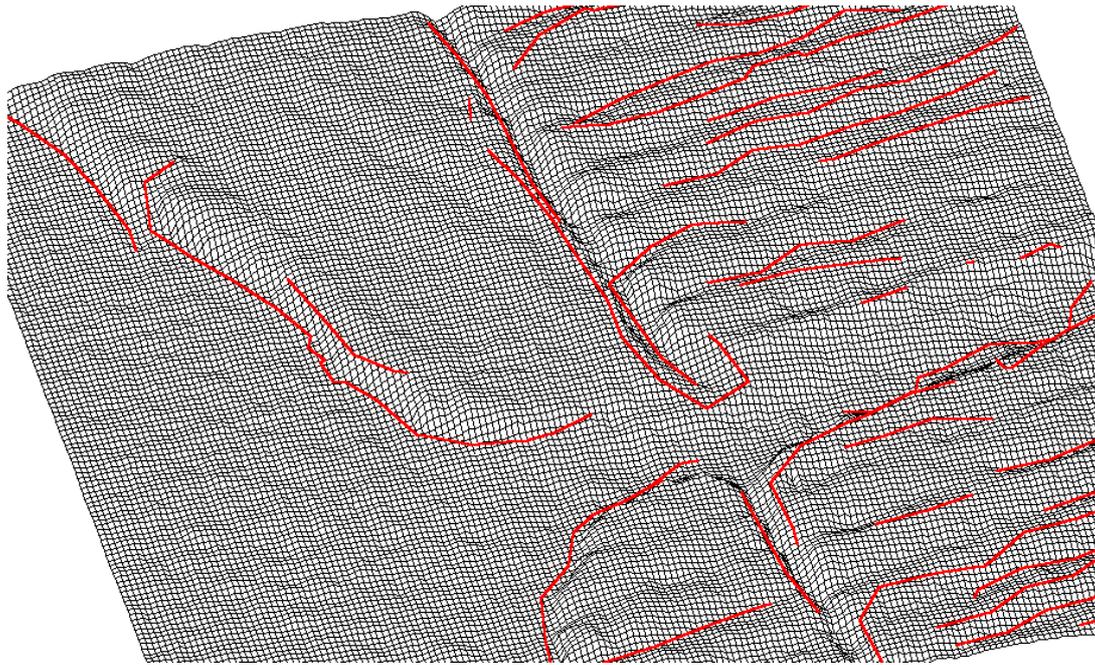


Abb.4.12 Raster-Netz-Darstellung Priel

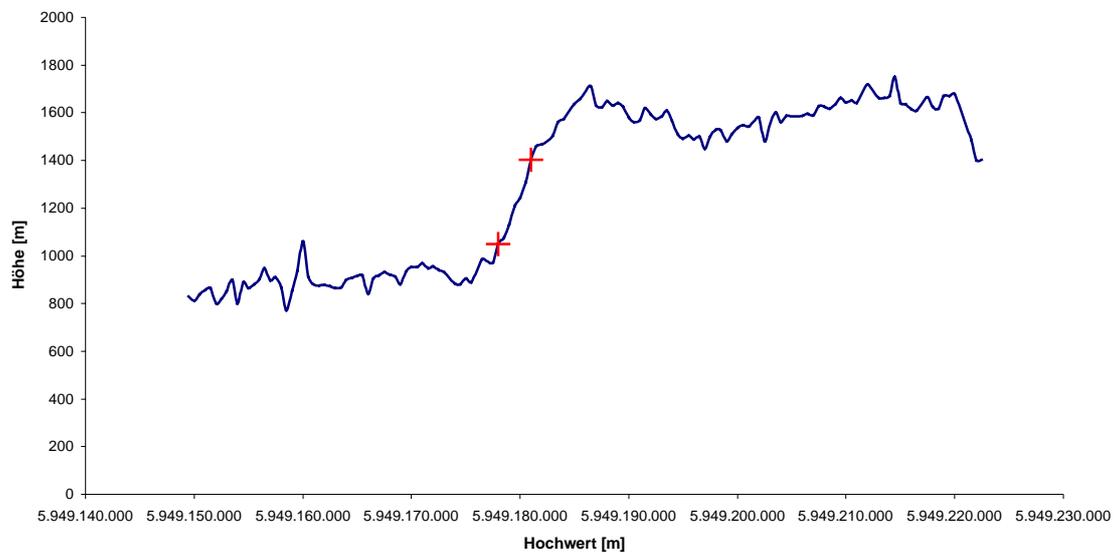


Diagramm 4.2 Abbruchkantenprofil2

Die Abbruchkante wurde zwar erkannt, aber nicht durchgängig mit Ober- und Unterkante, dasselbe gilt für den Priel (**Abbildung 4.11 und 4.12**). Die Oberkanten und die Muldenlinie sind nur teilweise richtig bestimmt worden. Es hätte bei einem breiten Priel auch durchaus zwei Unterkanten geben können.

Das nur eine Kante -anstelle von zweien- an der Abbruchkante erkannt wurde, hat zwei Ursachen:

- a) Es wurden nicht genügend Zwischenpunkte auf der steilen Rampe der Abbruchkante erfaßt. Notwendig für eine korrekte Erfassung von Ober- und Unterkante wären mindestens zwei, besser drei Punkte.
- b) Dieses spezielle Problem wurde mit dem momentanen mathematischen Ansatz nicht erfaßt. Steile Anstiege auf kurzen Entfernungen sind in diesem Algorithmus nicht implementiert, da die Zielsetzung eine topographische Standarderfassung für Bruchkanten vorsieht, wo Höhenunterschiede kleiner als 2m nicht in Karten ausgegeben werden.

Aber wenn die Kanten vorliegen, weichen auch sie von Kanten im Gelände maximal 2m in der Lage ab.

Gebiet Gruppen:

Das Gebiet mit den eindeutig kleinformatigsten Strukturen -den Gruppen- sollte zumindest eine generalisierte Oberkante und jeweils rechts und links eine Unterkante liefern.

Erschwert wird dies durch die Geländeform zwischen den Gruppen, die im Querschnitt eher bogenförmig als eckig sind. Die Geländelinien sind hier also besser als Geripplinien denn als Bruchkanten anzusehen. Die Oberkanten werden in diesem Gebiet besser als Rückenlinien (Wasserscheiden), die Unterkanten als Muldenlinien (Wassersammler) bezeichnet.

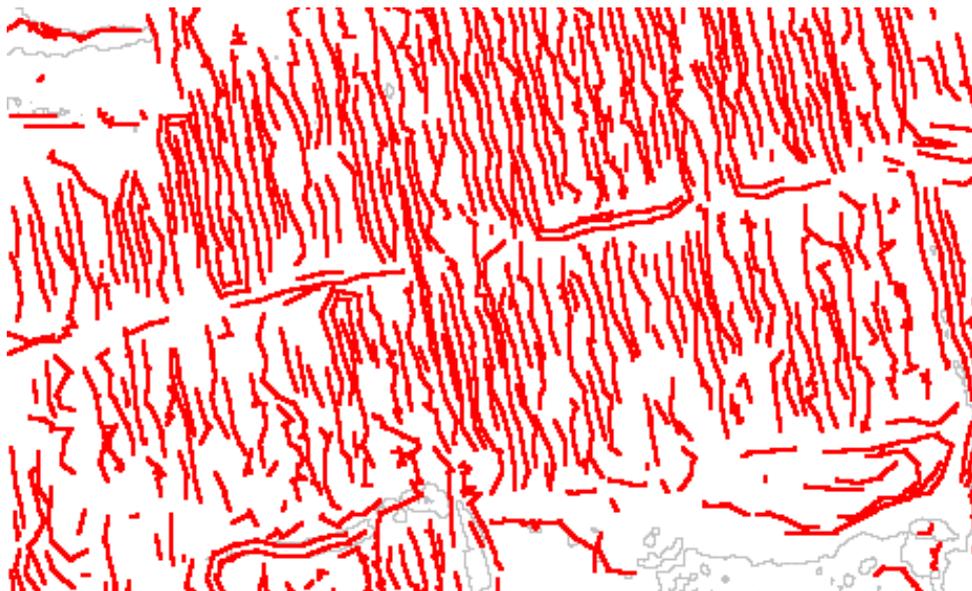


Abb. 4.13 Extrahierte Geripplinien

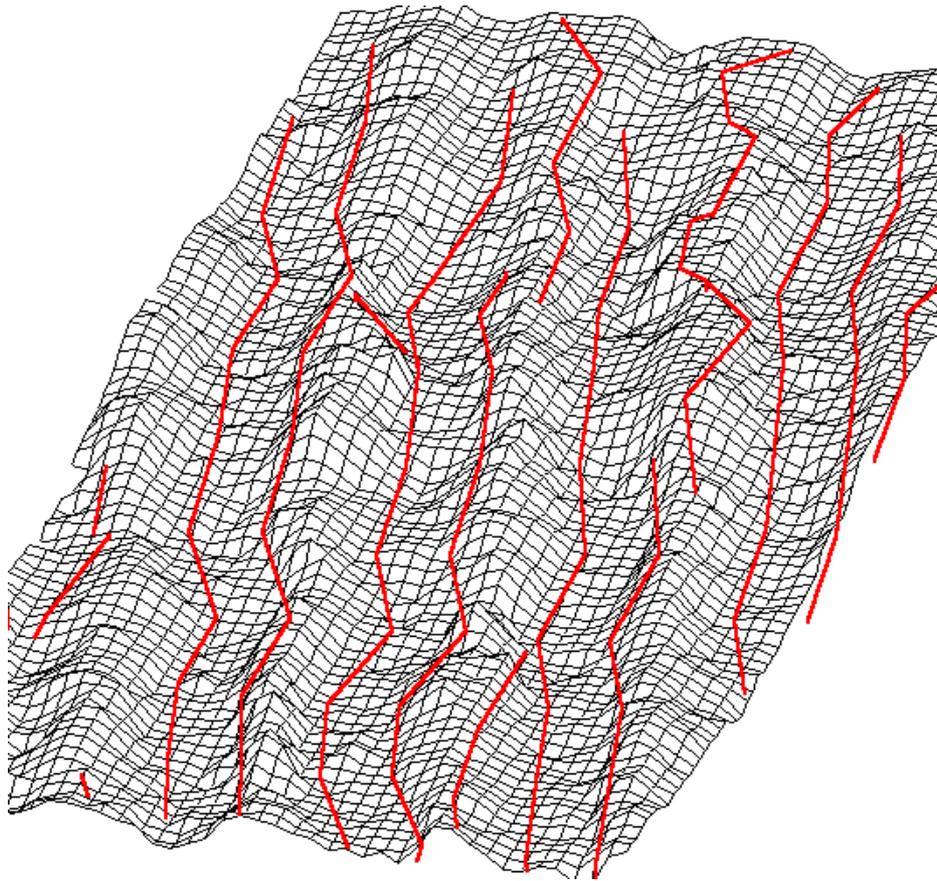


Abb. 4.14 Raster-Netz-Darstellung Gröppen

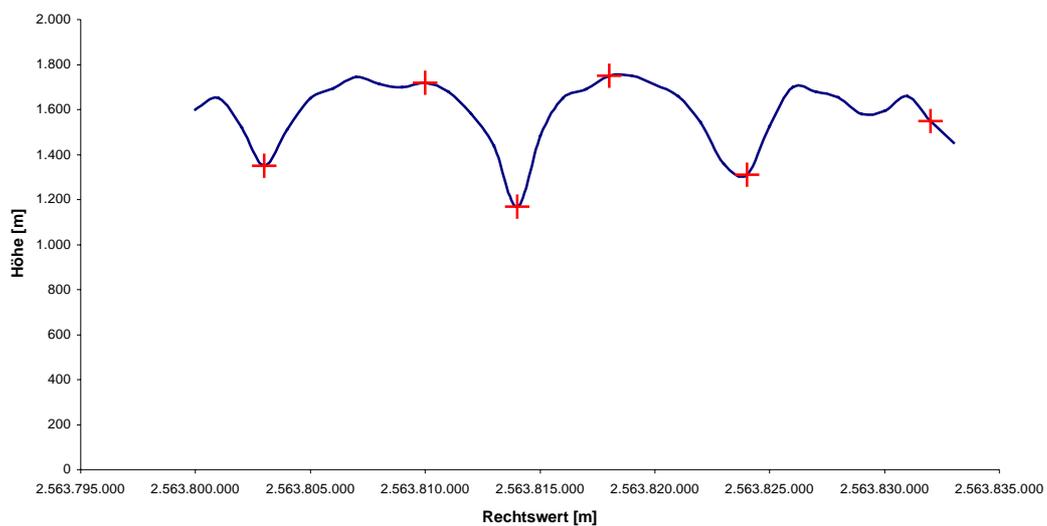


Diagramm 4.3 Gröppenprofil3

Sehr gut wurden hier die Rücken- und Muldenlinien detektiert, obwohl die Rückenlinie durch die Rundungen schwieriger an der richtigen Position festzulegen ist (**Diagramm 4.3**).

Außerdem sind die Gruppen maximal 10 Meter voneinander entfernt (von Muldenlinie zu Muldenlinie), so daß teilweise gleiche Kantenformen (zwei Rückenlinien z.B.) nur drei Meter voneinander entfernt liegen. Dort müssen die Parameter sehr klein gewählt werden, um falsche Linienverbindungen zu vermeiden.

Ermöglicht wird die Erfassung solcher Formen durch die Tangentialebenen rechts und links der Gruppen, die eine feinere Festlegung an die Strukturen liefert.

Die kontrollierten Gerippllinien wichen im Mittel nur um höchstens ein Pixel, also maximal einen Meter von der korrekten Lage der Kanten ab.

5 Analyse der Laserscannerdaten mit HALCON

Im vorangegangenen Kapitel wurde ein Verfahren zur automatischen Kantenberechnung gezeigt, welches die Kanten rechnerisch aus Steigungsänderungen ermittelt und für alle Punkte in einem Gebiet mit demselben rechnerischen Ansatz vorgeht.

Im Gegensatz dazu wird unter HALCON -anhand von ausgesuchten Operatoren- versucht, die für die Aufgabenstellung dieser Arbeit interessanten Bereiche über Grauwertunterschiede -Helligkeitsunterschiede- hervorzuheben und dann über Filter die Kanten zu lokalisieren.

5.1 Überprüfung der Kantenoperatoren

Entscheidend für die Qualität einer Kantenfilterung ist die Auswahl der Operatoren im Hinblick auf das gewünschte Ergebnis und die Topographie des Testgebietes.

Als topographische Strukturen im Testgebiet kommen sowohl steile Abbruchkanten als auch sanfte Anstiege und gerundete Formen vor.

Die gewünschten morphologischen Strukturen im Deichgebiet und Deichvorlandgebiet sind:

- Deich: Deichkrone und Deichlinien
- Entwässerungsgräben und Priele: Oberkante und Unterkante
- Grütppen: Mulden- und Rückenlinien
- Abbruchkanten im Deichvorland: Oberkante und Unterkante

Die in HALCON implementierten Kantenfilter sind mittels eines Testbildes auf ihre Wirkungsweise getestet worden.

Als Testbild wurde ein schwarz-weißes Rechteck generiert, daß über einen Tiefpaßfilter, den Mittelwertfilter, geglättet wurde, um so eine Grauertrampe am Übergang von Schwarz nach Weiß zu erzeugen.

Auf dieses Bild wurden dann die Kantenfilter angewendet und in ihren Parametern variiert, so daß die Fähigkeiten der einzelnen Filter besser abgeschätzt werden konnten.

Beim Testen der Filter wurde darauf geachtet, wie viele Kanten detektiert wurden, wo sie auf der Rampe erkannt wurden und im besonderen auf die Stellen, wo Kanten aufeinander treffen, um zu sehen, ob dort Lücken oder falsche Kanten, sogenannte Pseudokanten, entstehen.

Als Beispiel sei hier der Operator Difference-of-Gauß gezeigt (**Abbildung 5.1**):

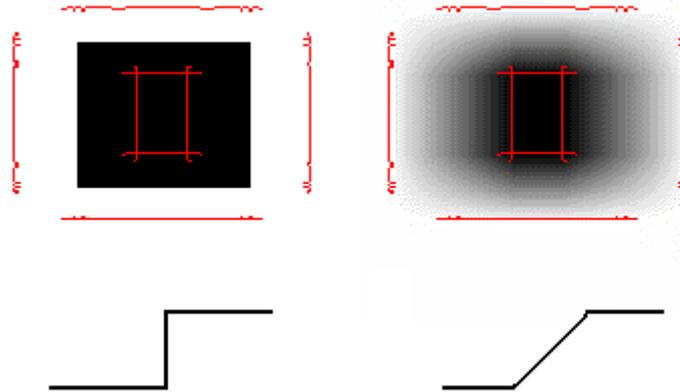


Abb. 5.1 Links: Kanten dem Original überlagert, Übergang von Schwarz nach Weiß als Stufenkante

Rechts: Kanten dem geglätteten Bild überlagert, Übergang von Schwarz nach Weiß als Rampenkante

Das linke Bild zeigt die detektierten Kanten und das schwarze Originalrechteck vor der Tiefpaßfilterung. Rechts sind dieselben Kanten und das Rechteck nach der Tiefpaßfilterung durch einen einfachen Mittelwertfilter (siehe Kapitel 3.1.1.4) zu sehen.

Das Originaltestbild stellt eine Stufenkante im Grauwertprofil dar. Das gefilterte Bild gibt eine Rampenkante wieder.

Da die meisten im Gelände vorkommenden Kanten schräg und nicht steil abfallen, interessiert also, ob der Algorithmus die Kanten am oberen und unteren Ende einer Rampe korrekt erkennt. Werden sie im stilisierten Testbild richtig erkannt, erfolgt im nächsten Schritt die Übertragung auf die Grauwertbilder der Testgebiete.

Die kleineren Störungen der Kanten zu den Ecken des Rechteckes hin resultieren aus den abgerundeten Ecken in der Grauwerttrampe.

Oberkante und Unterkante der Grauwerttrampe sind völlig korrekt erkannt, aber auch nur diese beiden Kanten und keine weiteren Zwischenkanten auf der Rampe selbst liegend.

Dies ist für die weitere Bearbeitung wichtig, weil viele sanft ansteigende Kanten im Gelände enthalten sind, deren Oberkanten und Unterkanten ermittelt werden sollen.

Zusätzlich zur Überprüfung durch das Testbild wurde entsprechende Literatur [KLETTE, 1995 und STEINBRECHER, 1993] für die Entscheidungsfindung hinzugezogen.

Am Ende dieser Testreihe waren aus 13 in HALCON eingeführten Operatoren 5 Filter für eine nähere Untersuchung mit den Originalbildern ausgewählt worden:

- Prewitt
- Sobel
- Deriche (implementiert in: Edge_image, Edge_sub_pix)
- Laplacian-of-Gaussian (LoG)
- Difference-of-Gaussians (DoG)

Der Prewitt-Operator berechnet eine Näherung der 1. Ableitung der Grauwertdaten. Er enthält sowohl eine rauschunterdrückende Glättung durch einfache Mittelwertbildung über eine 3x3 Nachbarschaft senkrecht zur Kantenrichtung als auch die Glättungswirkung des symmetrischen Gradienten.

Der Kontrast im Bild kann über diesen Filter gesteuert werden, das heißt, er kann nicht nur verstärkt sondern auch abgeschwächt werden. Demzufolge ist er von Bedeutung bei kontrastarmen Bildern, wie sie auch in den hier zu bearbeitenden Testgebieten vorkommen.

Der Sobel-Operator kann in vergleichbarer Weise wie der Prewitt-Operator zur Kantenwertbestimmung eingesetzt werden. Er arbeitet mit zwei Faltungskernen: einem für die horizontalen (A) und einem für die vertikalen Kanten (B).

$$A = \begin{matrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{matrix} \quad B = \begin{matrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{matrix}$$

Dabei entspricht jeder Kern einer Differentiation senkrecht zur Kantenrichtung und einer gewichteten Glättung in Kantenrichtung zur Rauschunterdrückung. Die Glättung erfolgt allerdings erst bei einer Filtergröße größer als 3.

Das Ergebnis ist die Summe der Beträge der Faltungsprodukte mit den zwei Kernen.

Vorteilhaft ist die schnelle Berechnung der Kanten, da nur zwei Faltungen durchgeführt werden und durch die Betragsbildung wird die Breite der Kanten auf wenige Bildpunkte beschränkt.

Im Testbild erscheinen klare genaue Kanten, die über die gesamte Grauwerttrampe verteilt sind.

Der Deriche-Operator ist eine Weiterentwicklung des Canny-Kantenoperators, der die optimale Kantendetektion nach mehreren Kriterien bewirkt.

Der Filter reagiert sensibel auf reale Kanten, das heißt, die Kantenlage und die Länge der Kanten werden korrekt erkannt. Darüber hinaus ist er unempfindlich gegenüber Rauschen.

Die Berechnung erfolgt in 8 Bilddurchläufen, 4 in horizontaler und 4 in vertikaler Richtung.

Die Zahl 8 ergibt sich wie folgt:

- Das Ergebnisbild setzt sich aus den Kantenbildern $H(x,y)$ der horizontalen Kanten und $V(x,y)$ der vertikalen Kanten zusammen,

$$h(x, y) = \sqrt{H(x, y)^2 + V(x, y)^2} \text{ oder } h(x, y) = \max\{|H(x, y)|, |V(x, y)|\}$$

- Jedes der zwei Teilergebnisbilder erhält man durch die Faltung mit einem separierbaren Faltungskern,

$$K_h(x, y) = k_1(x) \cdot k_2(y) \quad \text{für } H(x, y) \text{ und}$$

$$K_v(x, y) = k_2(x) \cdot k_1(y) \quad \text{für } V(x, y).$$

- Die Funktionen k_1 als auch k_2 sind rekursiv und nichtkausal. Sie lassen sich jedoch in jeweils zwei rekursive und kausale Faltungskerne mit entgegengesetzten Abtastrichtungen zerlegen, z.B. einmal von links nach rechts und einmal von rechts nach links. Die Ergebnisse dieser zwei Durchläufe werden addiert.

In den folgenden Formeln sind die Zwischenergebnisbilder g_{v1} , g_{v2} , g_{h1} , g_{h2} und g_{hv} jeweils die Ausgänge von 8 eindimensionalen kausalen Rekursivfiltern der Länge 1×3 bzw. 3×1 . Die Werte der Koeffizienten a , a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , b_1 und b_2 sind Funktionen des Eingabeparameters α :

$$a = -(1 - e^{-\alpha})^2, \quad b_1 = -2e^{-\alpha}, \quad b_2 = e^{-2\alpha}, \quad a_0 = \frac{-\alpha}{1 - \beta b_1 - b_2}$$

$$a_1 = a_0(\alpha - 1)e^{-\alpha}, \quad a_2 = a_1 - a_0 \cdot b_1, \quad a_3 = -a_0 \cdot b_2.$$

Das Teilergebnis $H(x,y) = g_{h1}(x,y) + g_{h2}(x,y)$ mit den horizontalen Kanten resultiert aus:

$$(i) \quad g_{v1}(x, y) = f(x, y - 1) - b_1 \cdot g_{v1}(x, y - 1) - b_2 \cdot g_{v1}(x, y - 2),$$

$$(ii) \quad g_{v2}(x, y) = f(x, y + 1) - b_1 \cdot g_{v2}(x, y + 1) - b_2 \cdot g_{v2}(x, y + 2),$$

$$g_{hv}(x, y) = a \cdot (g_{v1}(x, y) - g_{v2}(x, y)),$$

$$(iii) \quad g_{h1}(x, y) = a_0 \cdot g_{hv}(x, y) + a_1 \cdot g_{hv}(x - 1, y) - b_1 \cdot g_{h1}(x - 1, y) - b_2 \cdot g_{h1}(x - 2, y),$$

$$(iv) \quad g_{h2}(x, y) = a_2 \cdot g_{hv}(x + 1, y) + a_3 \cdot g_{hv}(x + 2, y) - b_1 \cdot g_{h2}(x + 1, y) - b_2 \cdot g_{h2}(x + 2, y).$$

Bei Mehrfachbenutzung der gleichen Bildspeicher für Zwischenergebnisse resultiert das Teilergebnis $V(x,y) = g_{h1}(x,y) + g_{h2}(x,y)$ mit den vertikalen Kanten aus:

$$(v) \quad g_{v1}(x, y) = f(x - 1, y) - b_1 \cdot g_{v1}(x - 1, y) - b_2 \cdot g_{v1}(x - 2, y),$$

$$(vi) \quad \begin{aligned} g_{v2}(x, y) &= f(x+1, y) - b_1 \cdot g_{v2}(x+1, y) - b_2 \cdot g_{v2}(x+2, y), \\ g_{hv}(x, y) &= a \cdot (g_{v1}(x, y) - g_{v2}(x, y)), \end{aligned}$$

$$(vii) \quad g_{h1}(x, y) = a_0 \cdot g_{hv}(x, y) + a_1 \cdot g_{hv}(x, y-1) - b_1 \cdot g_{h1}(x, y-1) - b_2 \cdot g_{h1}(x, y-2),$$

$$(viii) \quad g_{h2}(x, y) = a_2 \cdot g_{hv}(x, y+1) + a_3 \cdot g_{hv}(x, y+2) - b_1 \cdot g_{h2}(x, y+1) - b_2 \cdot g_{h2}(x, y+2).$$

Das Resultatbild ist dann $h(x, y) = \sqrt{H(x, y)^2 + V(x, y)^2}$.

Der Bandpaßcharakter dieses Filters resultiert aus der Kantendetektion mittels Hochpaßfilter und der Glättung von Rauschen durch einen Tiefpaßfilter, die über den Parameter Alpha gesetzt wird.

Je kleiner Alpha gewählt wird, desto stärker wird die Glättung. Der Einflußbereich des Filters ist also über diesen Parameter beeinflussbar. Bei einem großen Einflußbereich -kleinem Alpha- ist die Glättung stark, so daß breite unscharfe Kanten entstehen, die aber dennoch relativ rauschfrei sind. Für schmale, lagegenaue Kanten muß der Einflußbereich klein -Alpha groß- sein, aber dadurch wird der Filter sehr rauschempfindlich.

Es werden Stufenkanten durch die erste Ableitung der Grauwertfunktion ermittelt.

Deshalb wird dieser Filter eher zur Ermittlung von Strukturen, wie der Abbruchkante, sinnvoll angewendet.

Der Laplace-of-Gaussian (LoG)-Operator, auch als Marr-Hildreth- oder Mexican-Hat-Operator bekannt, ist ein Differenzoperator zweiter Ordnung. Er wirkt, ebenso wie der zuvor beschriebene Deriche-Operator und der nachfolgende DoG-Operator, als Bandpaßfilter.

Über die 2. Ableitung der Grauwertfunktion mittels Laplace-Operator werden Nulldurchgänge im Grauwertbild gesucht und mit einer rauschunterdrückenden Glättung durch den Gaußfilter kombiniert.

Der ‚LoG-Operator‘ in HALCON berechnet den Laplace-Operator $\Delta g(x, y)$ für beliebige Glättungsparameter der Gaußfunktion σ . Die Formel dafür lautet:

$$\Delta g(x, y) = \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial y^2}.$$

Die Ableitungen bei dem LoG-Operator werden durch Ableitungen der Gaußfunktion $G_\sigma(x, y)$

$$G_\sigma(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right]$$

angenähert, wodurch sich folgende Formel für den Faltungsoperator ergibt:

$$\Delta G_\sigma(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^4} \left(\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} - 1 \right) \left[\exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \right].$$

Das Ergebnis einer Detektion einer idealen Kante liefert zwei Maxima (positiv und negativ) und dazwischen den Nulldurchgang, der den steilsten Anstieg der Kante wiedergibt.

Um die Grauwertbilder mit positiven Werten auszugeben, werden die Grauwerte skaliert oder dem Betrag nach abgebildet.

Vorteile dieses Operators sind die Unempfindlichkeit gegenüber Rauschen und die gute Detektion der Kantenlage auch bei geringen Kantenanstiegen, wenn eine Verschiebung der Kanten durch die Wahl des Glättungsparameters Sigma (σ) und der Größe der Filtermaske ausgeschlossen wurde.

Denn da Kanten nicht immer auf einem Gitterpunkt erkannt werden, wird der ermittelte Kantenpunkt auf den nächsten Bildpunkt verschoben. Also muß die Filtergröße auf die Rasterweite abgestimmt werden.

Im Testbild konnten Kanten durch eine genaue Wahl des Schwellwertintervalls an jeder beliebigen Stelle der Rampe erkannt werden.

Der Difference-of-Gaussians (DoG)-Operator stellt eine Annäherung an den LoG-Filter dar und kann in manchen Fällen als Alternative dazu verwendet werden.

Er wird als Differenz zweier Gaußfunktionen mit zwei Glättungsparametern ‚sigma1‘ und ‚sigma2‘ approximiert. Die Glättungsparameter ergeben sich nach [MARR, 1982] aus dem Parameter ‚Sigma‘ des Laplacefilters und dem Verhältnis der Standardabweichungen der beiden Gaußfunktionen ‚SigFactor‘ zueinander.

$$\sigma_1 = \frac{\text{Sigma}}{\sqrt{-2 \frac{\log\left(\frac{1}{\text{SigFactor}}\right)}{\text{SigFactor}^2 - 1}}} \quad \sigma_2 = \frac{\sigma_1}{\text{SigFactor}}$$

$$\text{DiffOfGauss} = (\text{Image} \cdot \text{gauss}(\sigma_1)) - (\text{Image} \cdot \text{gauss}(\sigma_2))$$

Die beste Annäherung an den LoG-Filter wird erreicht, wenn der Glättungsparameter des LoG nicht gleich dem ersten Glättungsparameter der Gaußfunktion des DoG ist. Nach MARR tritt dies bei einem SigFactor=1,6 ein.

Die erreichte Glättung ist etwas stärker als bei dem LoG-Fiter.

Wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist, werden Oberkante und Unterkante der Grauertrampe ermittelt. Die Oberkante wird bis in die Ecken genau erkannt.

Mit diesen Erkenntnissen wird die Bildbearbeitung in HALCON begonnen.

5.2 Kantenextraktion

Die Laserscannerdaten der drei Teilgebiete Deich, Priel und Gröppen werden in LISA aus dem Originaldatensatz ausgeschnitten und in HALCON als Grauwertbilder generiert.

5.2.1 Visuelle Analyse der Originalgrauwertbilder

Vor der eigentlichen Bildbearbeitung werden die Originalgrauwertbilder visuell auf erkennbare morphologische Strukturen untersucht.

Dabei fällt in allen drei Gebieten der schwache Kontrast in den Bildern auf, so daß nur starke Strukturen sich überhaupt von dem Hintergrundmuster abheben.

Die Grauwerte verteilen sich nur über einen kleinen Ausschnitt der Grauwertskala, weil der größtmögliche Höhenunterschied im Gebiet Deich bei knapp 7 Metern liegt.



Abb. 5.2 Deich

In **Abbildung 5.2** ist deutlich das helle Band des Deiches zu sehen, das wahrscheinlich die Deichkrone darstellt. Aussagen über den Deichfuß können aus dieser Abbildung nicht getroffen werden.

Hier ist der gefilterte Datensatz gezeigt, wie er von der Firma Topscan geliefert wurde. Die Gebäude sind in diesen Daten nicht mehr enthalten.

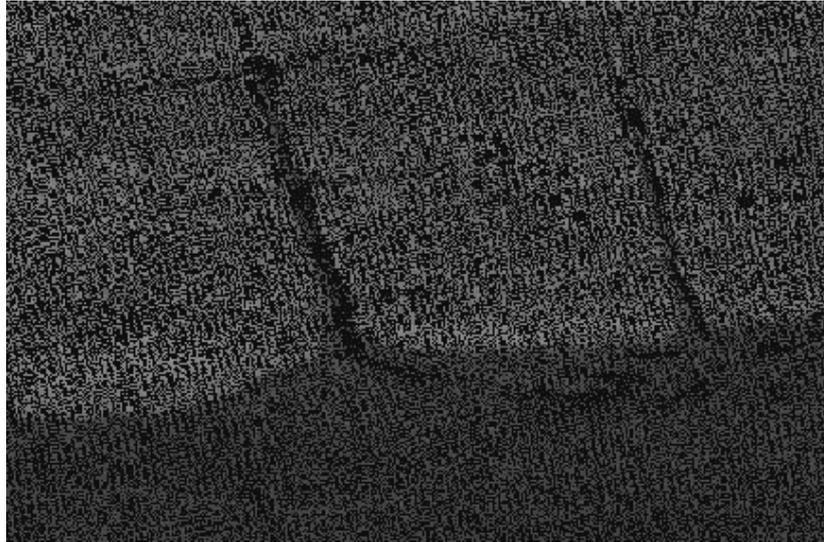


Abb. 5.3 Priel

Das Grauwertbild Priel (**Abbildung 5.3**) zeigt dem Betrachter vor allem die Abbruchkanten des Deichvorlandes zum Wattgebiet hin. Auch die Priele sowie teilweise die senkrecht dazu abgehenden Entwässerungsgräben sind zu erkennen.

Bei näherer Ansicht fallen auch die Datenlücken im Bereich der Priele auf, da dort auch bei Ebbe (Befliegung siehe Kapitel 2.2) noch Wasser in den Vertiefungen steht und somit dort keine Punkte gemessen wurden. Die nicht erfaßten Flächen sind aber relativ klein. Eventuell muß das Fehlen von Daten im Bereich der Prielmulden berücksichtigt werden, obwohl noch Punkte gemessen wurden. Diese allerdings mit einer geringeren Punktdichte.

Weitere geringfügige Datenlücken treten nur in den Übergangsbereichen zwischen zwei Flugstreifen auf.

Ein einfache visuelle Analyse des Gruppen-Originalbildes (**Abbildung 5.4**) erbrachte keine nennenswerten Ergebnisse, da die Strukturen zu fein sind, um aus diesen Daten ohne Bildverbesserung und Filterung erkannt zu werden.



Abb. 5.4 Gruppen

5.2.2 Programme in HALCON

Aufgrund der unterschiedlichen Strukturierung der einzelnen Gebiete und den zu extrahierenden Merkmalen, sind drei verschiedene Programme entwickelt worden.

Sie sind komplett in HALCON erstellt und werden mit ihren Ergebnissen im Anschluß erläutert. Der Programmquellcode in HDevelop-Syntax ist im **Anhang III** zu finden.

Extraktion im Gebiet Deich:

Das Programm Deich soll aus dem Grauwertbild die charakteristischen Strukturen des Deiches herausfiltern und als pixelbreite Kanten ausgeben.

Dazu wird das Bild zuerst einer Bildverbesserung im Bereich eines jeden Punktes unterzogen, die bei allen drei Teilgebieten in gleicher Weise vorgenommen wird. Im folgenden Abschnitt wird der vorliegende Grauwertbereich auf den gesamten möglichen Bereich skaliert (siehe Kapitel 3.1.1.1) und dann in ein anderes Bildformat konvertiert.

Die Programme unterscheiden sich mit dem Beginn der Bildverbesserung im Ortsbereich, das heißt, wenn die Umgebung eines Punktes in die Verbesserung mit einbezogen wird.

Im Klartext heißt das, wenn mit der Glättung des Bildes begonnen wird.

Zu Beginn der eigentlichen Analyse wird der Standardabweichungsfiler ‚deviation_image‘ auf das Originalbild angewendet. Dabei wird eine Filtermaske der Größe 3x3 Pixel über dem Bild verschoben, die Standardabweichungen der einzelnen Grauwerte innerhalb dieser Maske berechnet und das Ergebnis in einem neuen Bild im Schwerpunktpixel gespeichert. An den Bildrändern wird eine Spiegelung der Randpunkte durchgeführt.

Das zuvor generierte Bild wird mit einem nichtlinearen Glättungsfiler, dem Medianfilter, bearbeitet, um eventuelle lokale Störungen im Grauwertbild -also Rauschen- zu unterdrücken. Dabei soll das Bild nicht an Schärfe verlieren.

Zur Beseitigung von Rauschen wird der Medianfilter (siehe Kapitel 3.1.1.4) verwendet. Für jeden Bildpunkt werden die umliegenden Punkte nach ihren Grauwerten aufsteigend sortiert (Radius der Filtermaske =1), so daß die resultierende Sequenz ebenso viele Grauwerte wie die Filtermaske enthält. Die Punkte an den Bildrändern werden gespiegelt. Aus diesen Sequenzen wird der Median ermittelt und in das Ausgabebild eingetragen (**Abbildung 5.5**).

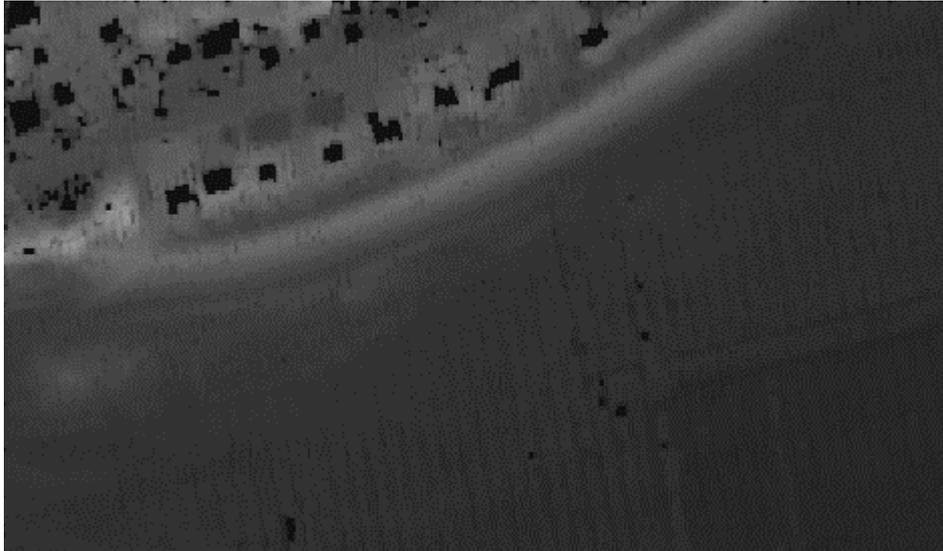


Abb. 5.5 Geglättetes Bild

Auf das geglättete Bild erfolgt die Anwendung eines Kantenfilters. In diesem Fall ist der Laplace-of-Gauß-Filter (siehe Kapitel 5.1) mit einer Standardabweichung Sigma des Gaußfilter=5 eingesetzt worden, weil er eventuellen rauschverstärkenden Effekten durch die Bildung der zweiten Ableitung der Gaußfunktion durch eine Gaußglättung entgegenwirkt. Die berechneten positiven Maxima und negativen Minima im Grauwertbild stehen für Bruchkantenpunkte.

Nulldurchgänge der zweiten Ableitung spiegeln Rampenkanten wider und geben die Position von Punkten auf der Rampe mit dem steilsten Anstieg wider.

Dadurch sind die Bereiche der Deichkrone und des Deichfußes vom Hintergrund abgehoben worden und können nun über Schwellwerte aus dem Bild (**Abbildung 5.6**) segmentiert werden.

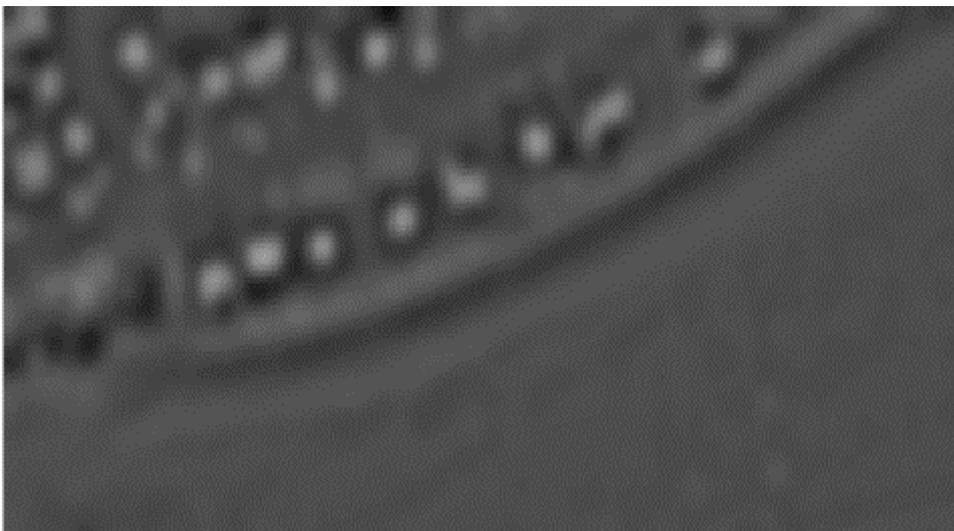


Abb. 5.6 Mit LoG gefiltertes Bild

Auf das gefilterte Bild werden nun Schwellwerte (siehe Kapitel 3.4) mittels eines Schwellwertoperators ‚Threshold‘ angesetzt, die für eine gewählte Region -den Deich- im Bild abgeschätzt wurden. Dazu werden aus dem absoluten Grauwert-Histogramm Schwellen für die Segmentation berechnet. Als Schwellen werden die Werte 0 bis 255 und alle Minima des Histogramms verwendet. Durch diese Segmentierung erhält man schließlich die Regionen, in denen sich die Kanten befinden (**Abbildung 5.7**).

Um sowohl Oberkanten als auch Unterkanten zu bestimmen, müssen zwei verschiedene Schwellwertintervalle gesetzt werden.

Dabei ist darauf zu achten, daß die Regionen durchgängig und ohne Lücken sind, da sonst die Kanten bei der Skelettierung (siehe Kapitel 3.3) in mehreren Teilen erkannt werden.

Innerhalb dieser beiden Regionen befinden sich alle für die Deichextraktion gewünschten morphologischen Strukturen.

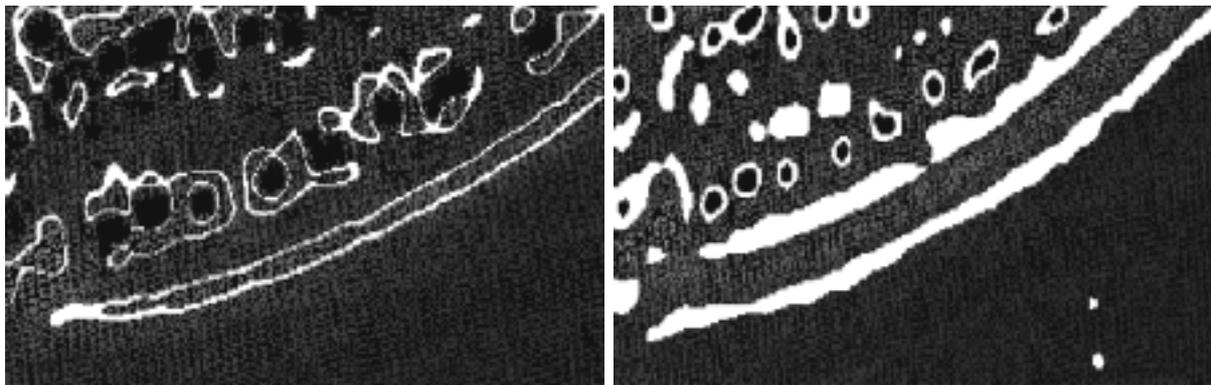


Abb. 5.7 Regionen der Deichkanten

Diese Regionen werden verdünnt, um pixelbreite Kanten zu erhalten. Mit Hilfe des Operators ‚Skeleton‘ wird das Skelett der eingegebenen Regionen berechnet (**Abbildung 5.8**). Die Grauwerte des Bildes bleiben dabei unverändert. Hierbei muß sichergestellt sein, daß die Regionen auch wirklich die gesuchten Kanten enthalten und nicht bei der Skelettierung eventuell zwei Kanten zu einer zentralen Linie verdünnt werden. Wenn dies nicht sichergestellt ist, können die Regionen zur Reduzierung des Definitionsbereiches des Bildes verwandt werden, der dann aufgrund der reduzierten Datenmenge differenzierter und schneller zu betrachten ist.

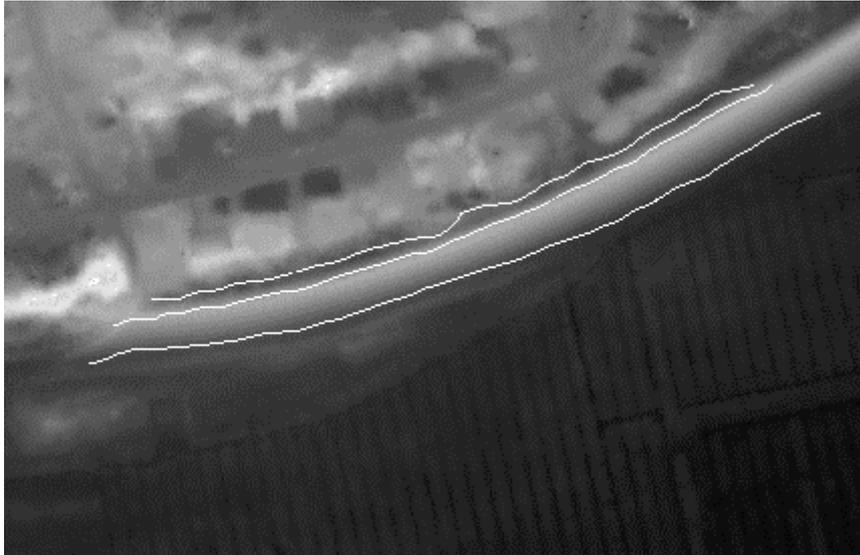


Abb. 5.8 Extrahierten Kanten dem DGM aus Laserdaten überlagert

Die so ermittelten Konturen werden -anhand von Profilen- auf ihr Lagerichtigkeit im Gelände überprüft (**Kapitel 5.3**).

Extraktion im Gebiet Priel:

Das Programm Priel dient zur Extraktion der Oberkanten und Unterkanten von Prielern sowie der Detektion der Abbruchkante zum eigentlichen Wattgebiet hin.

Die Bildanalyse startet mit einer Glättung des Bildes durch die Gaußfunktion

$$G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\left(\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right)\right],$$
 so daß die interessierenden Bildbereiche in ihrer

Helligkeit deutlich vom Hintergrund abgehoben erscheinen (**Abbildung 5.9**).

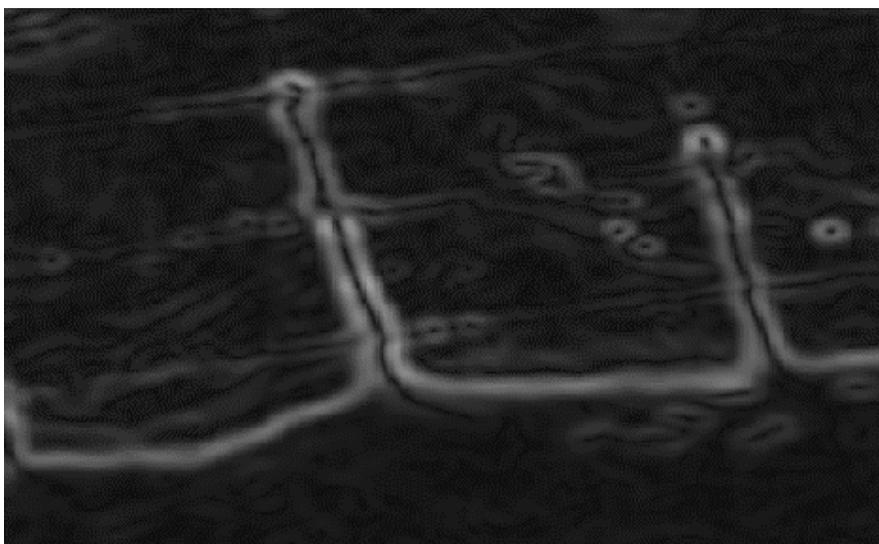


Abb. 5.9 Gauß-geglättetes Bild

Der Betrag des Gradienten der Gaußfunktion liefert hier ein Maß für Änderung der Bildfunktion an jedem einzelnen Punkt und somit auch ein Maß für die Stärke der Kante.

$$G'(x, y) = \sqrt{\frac{\partial g(x, y)^2}{\partial x} \frac{\partial g(x, y)^2}{\partial y}} \quad \text{Betrag des Gradienten}$$

Die Richtung des steilsten Anstieges wird durch den Gradienten angezeigt und er steht daher immer senkrecht zu Kantenrichtung.

Einzig veränderbarer Parameter bei diesem Bearbeitungsschritt ist die Standardabweichung der Gaußfunktion. Hier wurde der Parameter mit 5 relativ hoch angesetzt. Dies erklärt sich aus den Strukturen. Alle kleinförmigen Strukturen und das Rauschen sollen unterdrückt werden, damit die steilen Anstiege bzw. Abbrüche klar erkennbar werden.

Die Filterung soll also vor allem Stufenkanten aus diesem geglätteten Bild herausholen.

Dafür bieten sich rekursive Filter -wie zum Beispiel der Deriche-Filter- an (siehe Kapitel 5.1). Als Ergebnis werden Kantenamplituden und Kantenrichtungen zurückgeliefert, die schon mittels einer Non-Maximum-Suppression (NMS) und einer Hysterese-Schwellwertoperation (siehe Kapitel 3.2) weiterverarbeitet wurden, so daß die Kantenregionen schon zu Linien verdünnt erscheinen.

Durch die NMS werden Punkte aus dem Amplitudenbild und dem Richtungsbild unterdrückt, deren Grauwerte keine Maxima sind. Das Schwellwertintervall der Hysterese sorgt dafür, daß nur Punkte größer oder gleich diesem Intervall als Kantenpunkte übernommen werden.

Damit die Linien aus HALCON ausgelesen werden können, sind sie in XLD-Konturen (XLD: eXtended Line Description) durch den Operator ‚lines_gauss‘ umgewandelt worden (**Abbildung 5.10**). Der Operator steuert nach dem Erscheinungsbild der Kantenamplituden, ob helle oder dunkle Linien ausgelesen werden.



Abb. 5.10 Extrahierte Kanten1

Wie sich aber bei der später gezeigten Überprüfung der Kanten herausstellt hat, sind durch diese Kantenextraktion nicht alle geforderten Strukturen im Bereich der Prielkanten ermittelt worden. Es fehlte die linke obere Kante im Prielprofil. Da über nur eine Filterung nicht alle gewünschten Linien in ihrer Lage korrekt herausgefiltert werden konnten, sind die Ergebnisse von zwei Filtern kombiniert worden.

Als zweite Filterung ist der Filteroperator Deriche (siehe Kapitel 5.1) beibehalten worden, nur die vorherige Glättung und die Parameter des Filters wurden verändert. Der verwendete Filter ist auch in einem anderen Operator implementiert (`edge_sub_pix'`), der automatisch die ermittelten Kantenpunkte über ein Hystereseschwellwert-artiges Verfahren zu Kanten verknüpft.

Die Glättung erfolgt wieder über den Gradienten der Gaußfunktion, der hier quadriert als Maß für Homogenität des Grauwertbildes eingesetzt wurde, so daß sich homogene Bildbereiche mit gleicher Grauwertverteilung von nicht homogenen Bereichen in der Helligkeit unterscheiden (**Abbildung 5.11**).

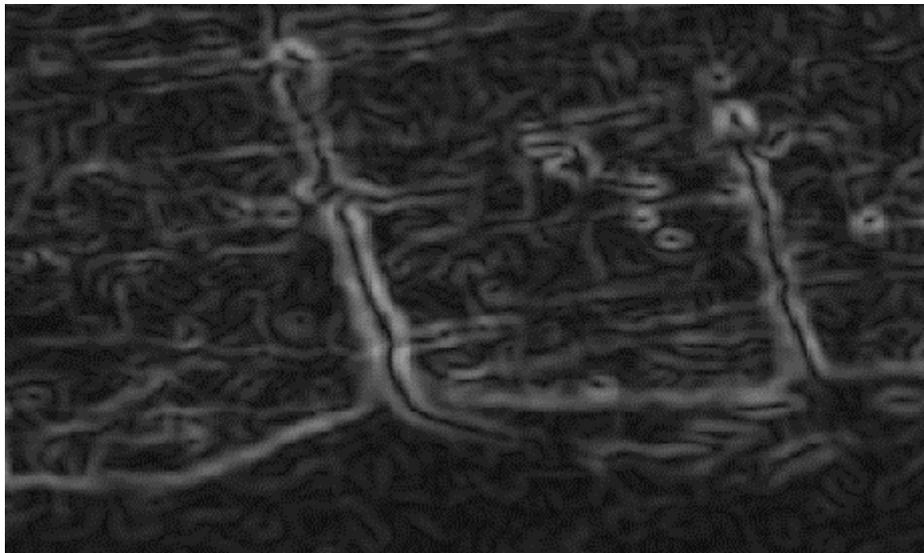


Abb. 5.11 Gauß-geglättetes Bild2

Anhand der Gradienten der Punkte wird entschieden, wann ein Kantenpunkt vorliegt. In diesem Fall ist der Glättungsparameter $\Sigma = 4$ etwas verkleinert worden, um mehr Formen zuzulassen und die Kanten zu verschmälern. Bei dem Deriche-Filter ist nur das Schwellwertintervall der Hysterese enger gesetzt worden, so daß mehr Punkte sofort als „sichere“ Kantenpunkte bei einem Grauwert größer als 35

übernommen, jedoch auch mehr Punkte durch die höhere untere Schwelle abgewiesen werden. Alle Punkte, die innerhalb des Intervalls liegen, werden als Kantenpunkte anerkannt, wenn sie durch „sichere“ Punkte miteinander verbunden werden können. ‚Sichere‘ Kantenpunkte sind Punkte mit einem Gradientenbetrag größer als der obere Schwellwert.

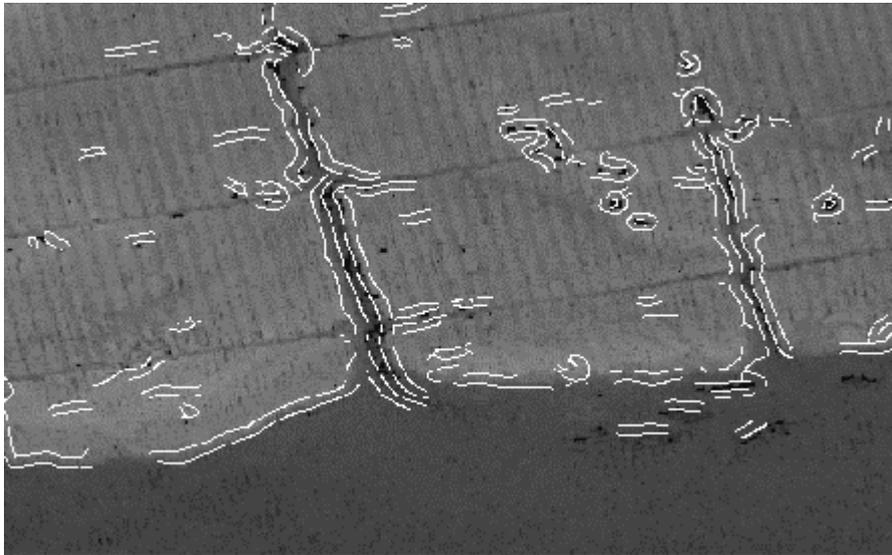


Abb. 5.12 Extrahierte Kanten2

Nach Abschluß dieses Verfahrens erbrachten die so ermittelten Kanten (**Abbildung 5.12**) die gesuchte linke obere Kante im Prielquerschnitt und ermöglichten eine Überprüfung der anderen schon vorher erzeugten Kanten.

Extraktion im Gebiet Gruppen:

Das dritte Gebiet Gruppen unterscheidet sich von den beiden vorhergehenden Gebieten durch noch geringere Höhenunterschiede, die räumliche Nähe der zu extrahierenden Strukturen und ihre vorherrschende Form. Beim Deich kann die Kantenform am ehesten durch eine Rampenkante, besser noch als Dachkante, beschrieben werden. Die Abbruchkanten und steilen Prielkanten entsprechen der Anschauung einer Stufenkante. Doch die ausgebaggerten Gruppen mit den aufgeworfenen Erdhügeln dazwischen haben wesentlich abgerundete Kanten, die am weitesten von einer idealen Kantenform entfernt sind.

Problem ist also die Bestimmung von Kanten auf einer gekrümmten Ebene. Wo die Muldenlinie und die Rückenlinie der Formen liegt, ist Frage der Definition durch den Bearbeiter.

Nach der Bildverbesserung wird das Bild der Standardabweichungen noch zusätzlich optisch aufbereitet, damit dem menschlichen Auswerter eine Abschätzung über die Güte der ermittelten Kanten ermöglicht wird. Zu diesem Zweck wird der Kontrast verstärkt, indem die Extremwerte des zugehörigen Grauwertistogramms gespreizt (Maxima) bzw. gestaucht (Minima) werden. Dieser Schritt dient nur der Kontrolle der Kanten durch den Bearbeiter während der Bildbearbeitung und hat keine weitere Auswirkung auf die ermittelten Kanten.

Gefiltert wird das Bild der Standardabweichungen mit dem Difference-of-Gauss- Filter (**Abbildung 5.13**).

Mit einem Glättungsparameter σ für den Laplace-Operator von 2 und dem Verhältnis der Standardabweichungen der eingesetzten Gaußfunktionen ‚SigFactor‘ mit 1,6, dem von [MARR, 1982] als beste Annäherung empfohlenen Wert, erfolgt die Kantenfilterung. Der Faktor 1,6 soll die Approximation des Laplace-of-Gauss -Operator erbringen. Genutzt wird die Differenz zweier Filterantworten, um räumliche Schwankungen in der Lichtintensität, d.h. in den Grauwerten, zu verstärken, damit vor allem die idealen Kanten detektiert werden. Ideale Kanten entsprechen den Modellvorstellungen für Kantenprofile (Stufenkante, Rampenkante etc.) z.B. beschrieben in [STEINBRECHER, 1993]. Die Kanten, die aufgrund leichter Variationen in den Grauwerten als solche erkannt werden, sollen keine Berücksichtigung mehr finden.

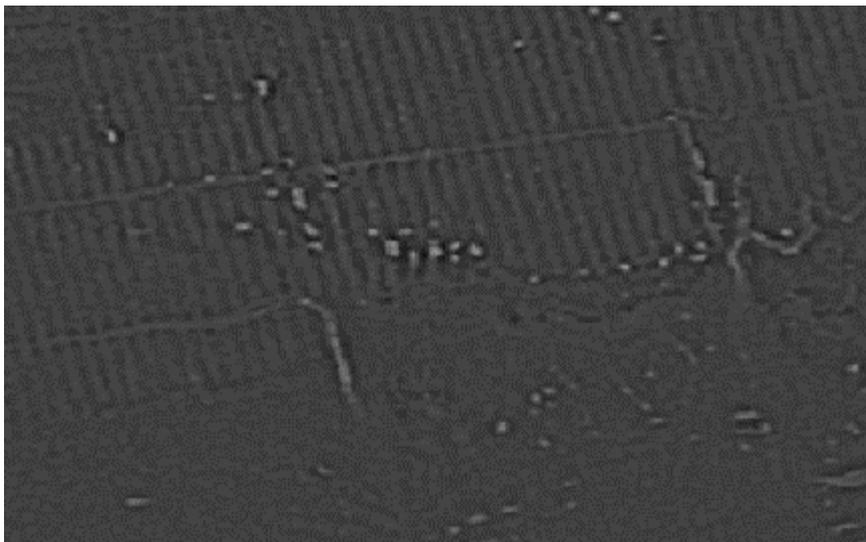


Abb. 5.13 Mit DoG gefiltertes Bild

Im Bild treten die Unterkanten der Gruppen dunkel hervor, die meisten Störungen durch Bewuchs sind eliminiert. Durch Reflektionen von einer Wasserfläche entstehen Datenlücken

sowohl in den Prielrinnen als auch zum Teil in den Entwässerungsgräben, die als helle Flecke im gefilterten Bild auftauchen. Der am häufigsten vorkommende Grauwert hat einen Wert nahe Null. Alle Grauwerte, die dunkler im Bild sind, haben negative Werte.

Deshalb wird das gefilterte Bild einem Schwellwertoperator für Bilder mit Vorzeichen übergeben (Dual_threshold) (**Abbildung 5.14**). Er segmentiert das Eingabebild in Teilregionen mit Grauwerten größer oder gleich dem Threshold (positive Bildbereiche) und in eine Region mit Grauwerten kleiner oder gleich dem negativen Threshold (negative Bildbereiche). Wenn diese Regionen eine gewisse Mindestfläche (MinSize) unterschreiten oder deren maximaler Grauwert dem Betrage nach kleiner als ein Mindestgrauwert (MinGray) ist, werden sie bei der Ausgabe unterdrückt.

Der Bereich zwischen dem positiven und dem negativen Schwellwert wird nicht beachtet. Über den Parameter ‚MinSize‘ steuert man die Empfindlichkeit gegenüber Rauschen und mit ‚MinGray‘ das Auflösungsvermögen der Kantendetektion.

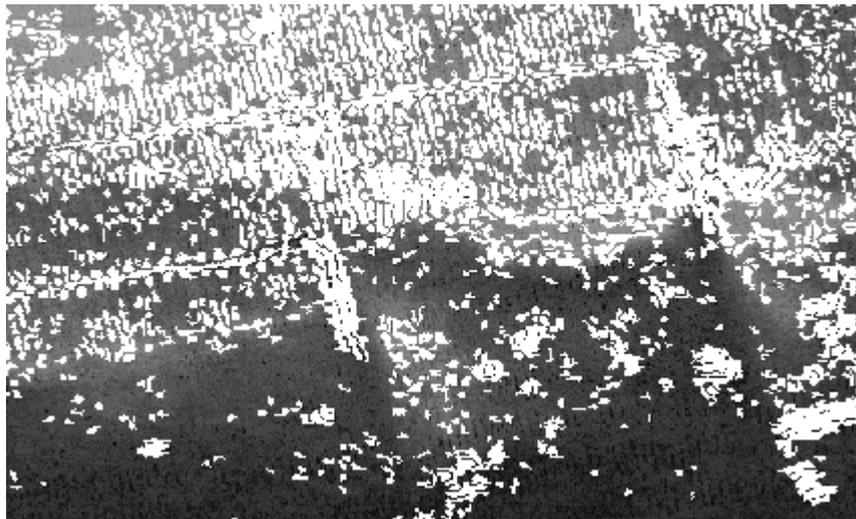


Abb. 5.14 Segmentierte Teilregionen

Aber durch diesen Schwellwert können nicht im kompletten Gebiet die Kantenbereiche ermittelt werden, da die Grauwerte (Höhen) innerhalb des Gebietes von Nord nach Süd sich in derselben Größenordnung ändern, wie der Höhenunterschied zwischen Muldenlinien und Rückenlinien im nördlichen Teil des Gebietes. Daher fehlen im südlichen Teil ermittelte Kantenbereiche. Im Nordosten sind die Gruppen von Pflanzen so zugewachsen, daß keine Kanten ermittelt werden können.

Der ‚Dual_Threshold‘ wird hier angewendet, weil sich die durch den Laplace-Operator bestimmten Nulldurchgänge, die die Kanten im Bild widerspiegeln, als Trennlinien zwischen den positiven und den negativen Bildbereichen bestimmen lassen.

Die Nulldurchgänge geben die Kanten mit dem steilsten Anstieg auf der Rampe an, aber die Teilbereiche enthalten dagegen die Geripplinien auf dem Rücken der Hügel und in den Mulden der Gruppen.

Aus den Teilbereichen werden nun Muldenlinien der Gruppen und Rückenlinien der Hügel zwischen den Gräben skelettiert (**Abbildung 5.15**).



Abb. 5.15 Extrahierte Geripplinien

Die Skelettierung muß unempfindlich gegen kleine Störungen am untersuchten Segment des Bildes sein, damit keine Verästelungen bei einem leicht ‚ausgefransten‘ Segmentrand entstehen. Der Algorithmus muß terminieren, das heißt, nach einer bestimmten Anzahl von Iterationen dürfen keine Änderungen am Skelett mehr auftreten.

Die Geripplinien sind nicht durchgängig erkannt. Dies kann mehrere Ursachen haben:

1. Einerseits sind die Linien unterbrochen, da aufgrund der gesetzten Schwellwerte die Grauwerte derselben Linien im südlicheren Bildbereich nicht miterkannt wurden.
2. Lücken in den Daten führten ebenfalls zu unterbrochenen Linien.
3. Das Hauptproblem innerhalb dieses Gebietes sind die geringen Höhenunterschiede, die nicht flächendeckend mit einem Schwellwertintervall abgedeckt werden können.

Daraus folgt für die Extraktion von Kanten in großflächigeren Gebieten, daß Gruppenstrukturen nur sehr eingeschränkt ermittelt werden können. Bei größeren Höhenunterschieden und anders angeordneten Formen, siehe Priel und Deich, sind die Bearbeitungsgebiete durchaus in größeren Ausschnitten zu bearbeiten.

5.2.3 Probleme mit dem Algorithmus

Die schon in Kapitel 5.2.2 erwähnte Bildverbesserung ist unter HALCON notwendig, da Bilder mit Fließkommazahlen als Grauwerte zwar erzeugt werden, aber leider von vielen der zur Bildbearbeitung ausgewählten Operatoren nicht verarbeitet werden können.

Außerdem ist der Kontrast in den Bildern sehr gering aufgrund nur kleiner Höhenunterschiede im gesamten Bild. Die Originalhöhen aus den Laserscannerdaten für das gesamte Gebiet beginnen bei 0,27m und enden beim größten Höhenwert mit 7,71m. Die Differenz zwischen maximalem und minimalen Grauwert beträgt nur 8,57, so daß bei der Umwandlung in ein ganzzahliges Bildformat der größte Teil der Grauwertunterschiede in den Nachkommastellen verlorengehe.

Für die Bestimmung auch dieser kleinen Höhenunterschiede werden die Grauwerte auf den gesamten möglichen Grauwertbereich gespreizt. Es wird der gesamte Wertebereich von 0 bis 255 ausgenutzt, aber die Anzahl der unterschiedlichen Graustufen ändert sich dadurch nicht.

Alternativ möglich wäre eine Neuimplementierung der Filteroperatoren, so daß in Zukunft auch Werte mit Nachkommastellen bearbeitet werden können.

Im Anschluß daran werden die Grauwerte in das in den meisten Operatoren gängigsten Bildformat ‚byte‘ konvertiert.

Das erstellte Bytebild wird nur für Operatoren verwendet, die ein Byteformat erwarten.

Problematisch ist auch die Ausgabe der erzeugten Konturen in einem Format, das die Weiterverarbeitung in LISA erlaubt.

Erforderlich für den Export der Kantenpunkte sind in HALCON XLD-Konturen. Im Fall des Prielgebietes liefern die verwendeten Kantenfilter automatisch XLD-Konturen als Ergebnisse. In den beiden anderen Gebieten müssen diese aus den pixelbreiten Skelettregionen erzeugt werden.

Der Operator ‚gen_contour_region_xld‘ wandelt die Segmentationsergebnisse in Konturen um. Die Punktzahl für die Berechnung der Regressionsgerade wird mit dem Parameter ‚NumRegrPoints‘ auf 5 gesetzt. Diese Punkte werden dann über eine Projektion auf die lokale Regressionsgerade geglättet.

Die Höhe z bzw. der zugehörige Grauwert ist bei der Erzeugung von XLD-Konturen nicht mehr mitabgespeichert worden. Es liegen nur Pixelkoordinaten für Zeilen und Spalten vor.

Die geglätteten Konturen liegen also in Bildkoordinaten vor und sollen -mit Gauß-Krüger-Koordinaten versehen- aus HALCON ausgelesen werden.

Die Transformation der Bildkoordinaten in Gauß-Krüger-Koordinaten erfolgt über zwei Schritte. Als erstes wird eine homogene Transformationsmatrix für eine zweidimensionale Abbildung erstellt. Dann wird dieser Matrix eine Translation hinzugefügt, die dem Bildursprung in HALCON, linke obere Ecke, die Koordinaten des Gebietes in der linken oberen Ecke hinzuaddiert.

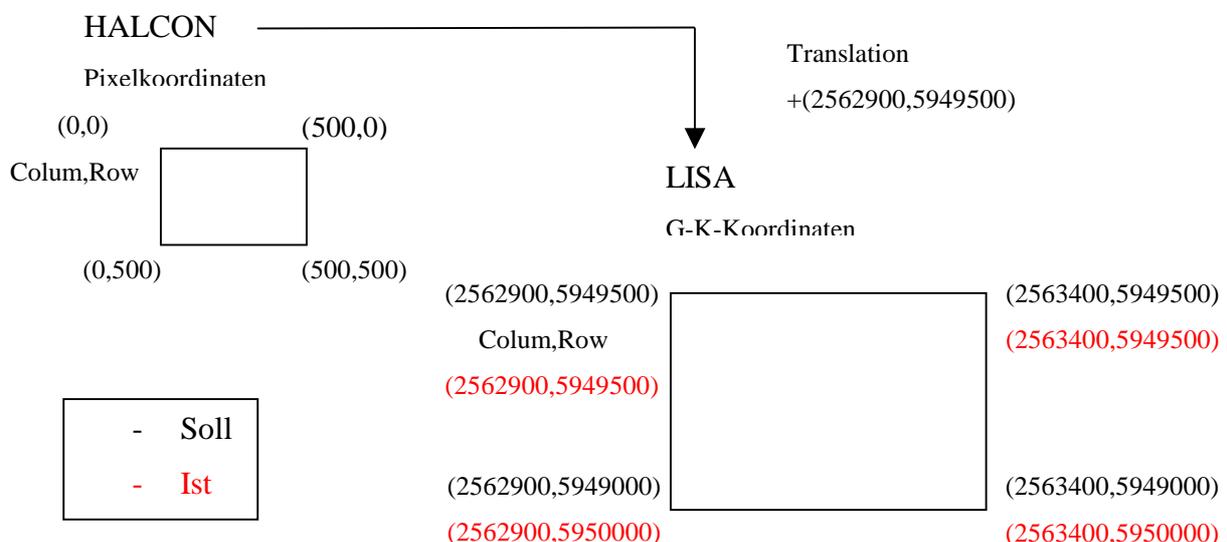
Zweitens wird dann eine affine Abbildung auf die XLD-Konturen angewendet, welche die zuvor erzeugte Transformationsmatrix als Prozedur zur Verschiebung in das G-K-Koordinatensystem benutzt. Zum Schluß erhält man eine ASCII-Datei mit x - und y -Koordinaten.

Die Höhenwerte können in LISA aus dem Originallaserscannerdatensatz wieder hinzugefügt werden.

5.3 Überprüfung der extrahierten Kanten

Damit die extrahierten Kanten in LISA weiterbearbeitet werden können, müssen sie in LISA importiert werden. Dabei ist zu beachten, daß HALCON und LISA unterschiedliche Bildursprünge haben.

Die daraus resultierende Spiegelung um die Achse der Rechtswerte wird herausgerechnet. Dazu werden die Hochwerte mit minus eins multipliziert und dann der doppelte Wert des kleinsten Rechtswertes des Gebietes addiert.



Skizze 5.1 Transformation von Pixelkoordinaten in G-K-Koordinaten

Bildursprünge: HALCON links oben, LISA links unten

Für die drei Teilgebiete werden die digitalen Geländemodelle (DGM) aus den Laserdaten berechnet. Das gerechnete DGM als Approximation des Reliefs liegt in gitterförmiger Punktanordnung mit einem Gitterpunktabstand von einem Meter vor.

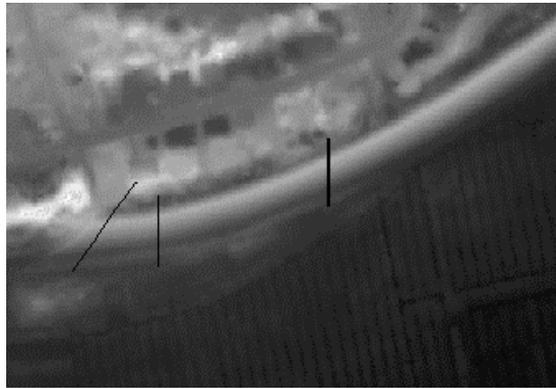
Die Bruchkanten werden dem jeweiligen DGM überlagert und an ausgesuchten Stellen Profile gelegt. Die Schnittpunkte der Profile mit den Bruchkanten werden separat gemessen und in Dateien gespeichert.

Die Schnittpunkte und die Geländeprofile werden unter MS-EXCEL zu einem gemeinsamen Diagramm zusammengeführt. Dort können dann über eventuelle Lageverschiebungen von Bruchkanten Aussagen gemacht werden. Die kleinstmögliche Abweichung, die bestimmt

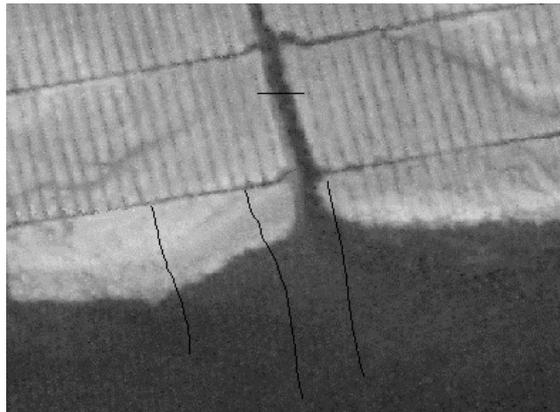
werden kann, hängt von der Punktdichte ab. Bei einem Punktabstand von einem Meter beträgt die minimalste Abweichung genau diesen Meter.

In den Testgebieten sind exemplarisch an den interessierenden Stellen Profile gelegt worden:

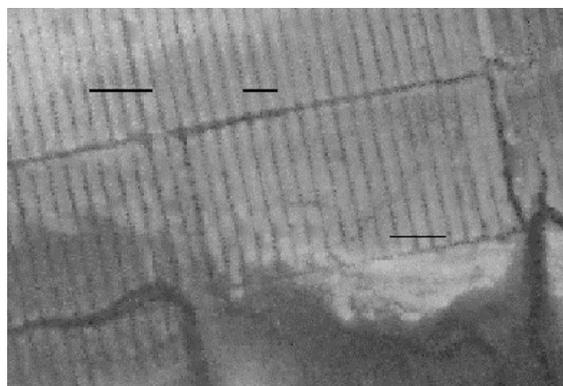
- Deich: 3 Profile über den Deich verteilt



- Priel: 3 Profile an der Abbruchkante zum Wattgebiet, 1 Prielquerschnitt



- Gruppen: 3 Gruppenquerschnitte



Zur näheren Erläuterung der Ergebnisse dieser Überprüfung werden dieselben Geländeprofile wie in Kapitel 4 herangezogen. Die weiteren Diagramme sind im **Anhang IV** aufgeführt.

Die Deichprofile liefern einen Querschnitt des Deiches, anhand dessen die Korrektheit in der Lage der zuvor ermittelten Kanten nachgewiesen werden soll. Die korrekte Lage ist beim Deich noch eindeutig an der Form festzumachen. Bei den anderen beiden Gebieten ist es eine Frage der Definition durch den Bearbeiter (siehe später: Gruppen).

Anhand des ersten Deichprofils (im Bild das linke Profil) wird kurz erläutert, was erreicht wurde, wo Problemstellen zu erkennen sind und mit welcher maximalen Abweichung.

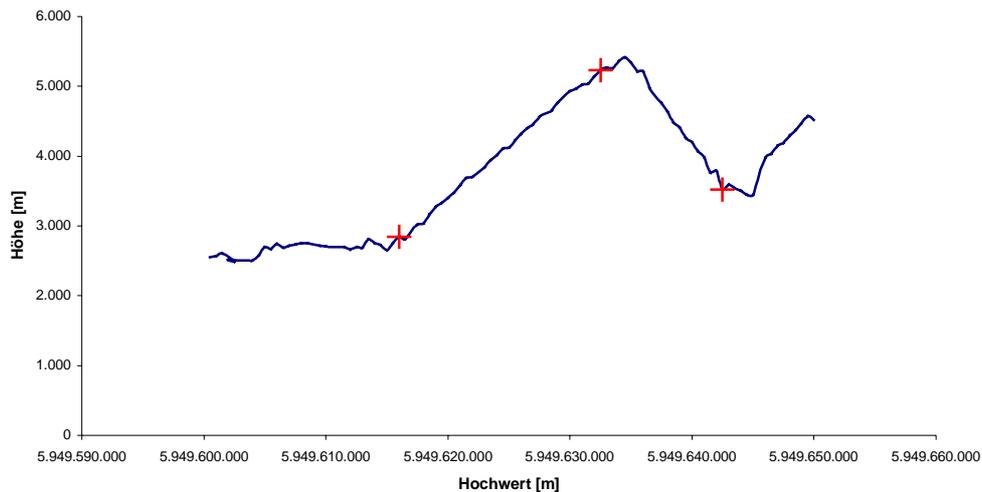


Diagramm 5.1 Deichprofil

Die Abweichungen in der Lage betragen maximal einen Meter. Es kommt bei den anderen Profilen, je weiter man sich ostwärts auf dem Deich entlang bewegt, zum Auseinanderdriften der Deichfußlinien, was durch Neubearbeitung des Gebietes in HALCON schon verbessert werden konnte. Der Grund liegt in dem gewählten Kantefilter LoG. Weil der Glättungsparameter Sigma der Gaußfunktion und die Größe der Filtermaske zu groß gewählt sind, treten Verschiebungen der detektierten Kanten gegenüber den tatsächlichen Kanten auf. Die Abweichungen konnten durch Verkleinern der Parameter von 5 Metern auf nur einen Meter maximal vermindert werden. Diese verbleibende Abweichung kann auch durch Bewuchs oder Störungen im Datenmaterial entstanden sein.

Festzuhalten ist außerdem, daß bei diesem Deich nur eine Kante auf der Deichkrone detektiert werden konnte. Da die Deichkrone nicht, wie im Idealfall, eben ist, sondern leicht gerundet und auch die Breite der Deichkrone mit durchschnittlich drei Metern sehr schmal ist, wird nur eine Kante ermittelt. Darüber hinaus konnten sehr viele Kanten in regelmäßigen Abständen auf den abfallenden Rampen des Deiches bestimmt werden. Im Diagramm ist auch zu erkennen, daß die zur Wattseite gelegene Deichhälfte -entsprechend ihrer Planung- sanfter

ansteigt als die zur Inselfseite, so daß eher die Kante zur steil abfallenden Seite als Deichkrone erkannt wurde.

Der Peek auf der Deichkrone tauchte nur in diesem Profil auf und kann eventuell auf Bewuchs, Zaun oder Bänke zurückzuführen sein, die an dieser Stelle, wo der Deich in den Fahrradweg übergeht, stehen. Die Abweichung in der Höhe an dieser Stelle mit bis zu 20 Zentimetern ist zu gering, um nicht durch zufällige Meßunsicherheiten entstanden zu sein.

Die Abbruchkanten im Testgebiet Priel (**Diagramm 5.2**) sind durch ihren steilen Verlauf gut zu definieren. Demzufolge können die Lageabweichungen mit bis zu anderthalb Metern maximal als gesichert angesehen werden. Die obere Bruchkante liegt einen Meter links neben der als obere Kante anzusehenden Kante, aber die Abweichungen in der Lage mit 1m und in der Höhe mit 5cm können aufgrund des Verfahrens und der gegebenen Daten mit einem mittleren Punktabstand von 1,5m (Angabe von Topscan) toleriert werden.

Der Höhenunterschied von Oberkante zu Unterkante liegt -wie bei den tiefen Prielen- zwischen einem halben und einem Meter.

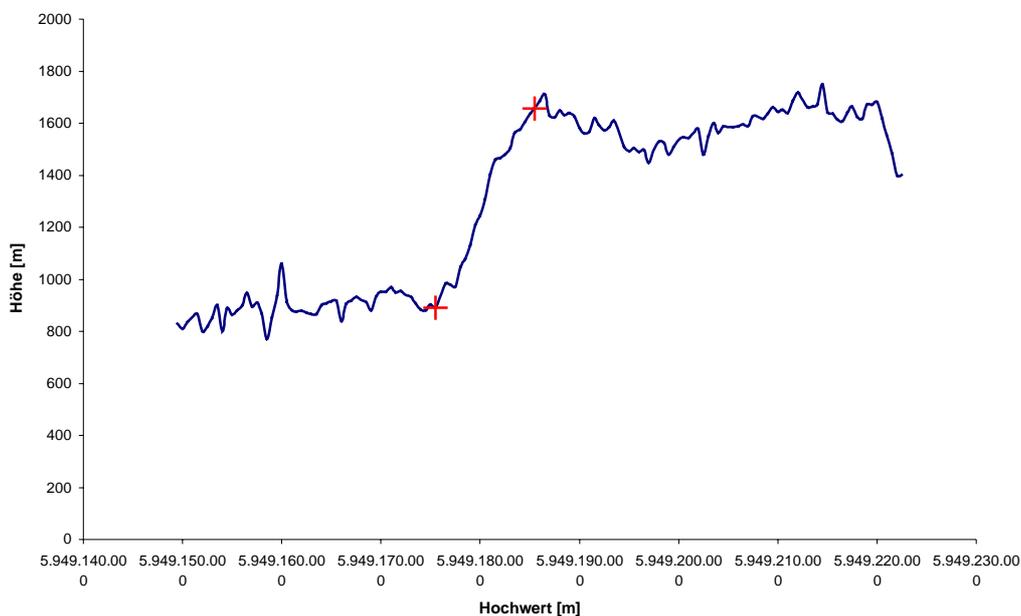


Diagramm 5.2 Abbruchkantenprofil2

Die Prielkanten unterscheiden sich von den Abbruchkanten dadurch, daß die Abbruchkanten über nur einen Operator, die Oberkanten und Unterkanten im Prielquerschnitt jedoch über zwei miteinander kombinierte Filter bestimmt worden sind. Für die Abbruchkanten reicht ein Filter aus, weil er speziell auf Stufenkanten hin ausgerichtet ist. Die Kanten in den Prielen

sind praktisch zwei Stufenkanten auf einmal, die bestimmt werden sollen. Ihre Kantenform ist auch runder im Bereich, wo Kanten ermittelt werden. Folglich hat der Deriche-Filter eine Stufenkante korrekt erkannt und dazu noch die zweite Unterkante. Es könnte an einer zu klein gewählten Filterbreite liegen, daß die zweite Oberkante nicht mehr miterkannt wird. Diese Breite ist aber erforderlich, um die Kanten auf diesem engen Terrain lagegenau zu erkennen. Deshalb sind besser zwei Filter miteinander kombiniert worden, als den Filterbereich zu vergrößern und dadurch unscharfe Kanten zu erzeugen.

Es sind Lücken in dem Datensatz enthalten, die aufgrund von stehendem Wasser in Prieln entstanden sind. Diese Lücken können nur die Bestimmung der Unterkanten beeinflussen. Da sie aber von ihrer Fläche sehr klein sind und eher in der Mitte der Priele zu finden sind, kann ihre Wirkung vernachlässigt werden.

Bei den Gerippllinien der Gruppen sind die Abweichungen in der Lage, die -wie zuvor festgestellt- nur in Meterschritten vorliegen können, schon gravierend bei Strukturen, die zwischen 2 bis 10m in der Breite betragen. Wegen der räumlichen Nähe und der geringen Höhenunterschiede zwischen Muldenlinien und Rückenlinien fehlt des öfteren eine von Beiden oder wurde nicht korrekt in Lage und Höhe erkannt. Dies kann an der Kantenextraktion liegen, läßt aber primär darauf schließen, daß nicht genügend Punkte in so begrenztem Raum für die Detektion von Ober- und Unterkanten vorlagen, bedingt durch die willkürliche Aufnahme von Punkten.

Störungen durch Bewuchs oder durch Meßfehler wirken sich in so kleinstrukturiertem Gelände mit einem Höhenunterschied von bis zu 1,30m insgesamt wesentlich schneller aus. Je mehr man sich dem Deich nähert, desto höher wird der Bewuchs auf den Hügeln und auch in den Gruppen.

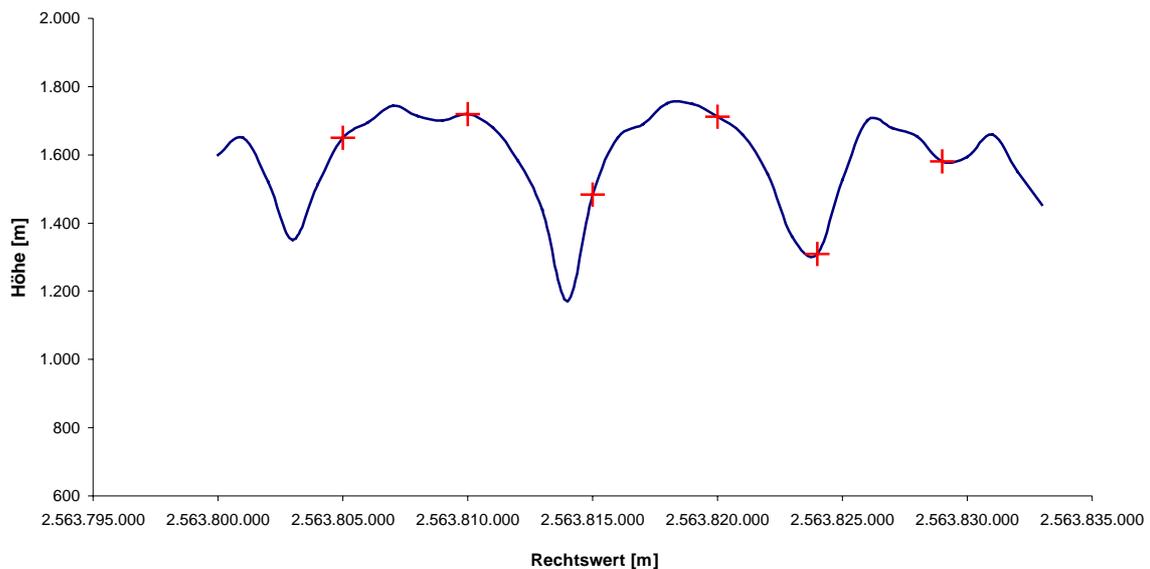


Diagramm 5.3 Gruppenprofil3

In dem **Diagramm 5.3** zeigt sich auch die Problematik der Definition, wo die Kanten liegen sollten. Am linken Hügel sind zwei Oberkanten bestimmt, aber dafür keine korrekten Unterkanten. Der rechte Hügel hat nur eine Rückenlinie, die um einen Meter verschoben ist. Beide Kuppen sind in etwa gleich breit, doch in ihrer Form unterschiedlich (Rechts: abgerundet, Links: eher gerade). Also sind die Kanten entweder aufgrund der Punktverteilung oder der verschiedenen Steigungsänderungen so erkannt worden. In den schmalen Grüppeneinschnitten ist die Punktdichte geringer. Durch Überlagerung der Originaldaten mit den erzeugten Kanten konnte der Zusammenhang von Punktdichte und der Mehranzahl von Rückenlinien gegenüber den Muldenlinien bestätigt werden.

Als Abschluß ist zu sagen, daß in den Gebieten Deich und Priel die Kanten fast vollständig und durchgängig erkannt wurden. Bei den Grüppen ist dies wegen des geringen Höhenunterschiedes, der Punktverteilung sowie der Problematik, daß das Gefälle in diesem Gebiet dieselbe Größenordnung wie die Strukturunterschiede hat, nicht gelungen. In Teilen desselben Höhenniveaus sind die Ergebnisse jedoch recht zufriedenstellend. Also muß das Gebiet in Regionen unterteilt werden. Die Regionen, die dasselbe Niveau aufweisen, werden dann zusammengefaßt.

Der Mehraufwand an Zeit, bis die richtige Abstimmung der Operatoren gefunden ist, lohnt sich dann, wenn das entsprechende Gebiet in bestimmten zeitlichen Abständen wiederaufgenommen wird.

6 Vergleich der automatisch extrahierten Kanten und Kontrolle der Laserscannerdaten

Um überhaupt Aussagen über die Qualität der Kantenextraktion und die Genauigkeit von Laserscannerdaten treffen zu können, müssen sie mit irgendeiner Form von Referenzdaten verglichen werden.

Es stehen hier mehrere Quellen zur Disposition:

- a) Digitale Deutsche Grundkarte 1: 5.000 (DGK 5)
- b) GPS-Messungen einer Kontrollfläche
- c) Stereoskopische, topographische Luftbildauswertung der SW-IR Stereoluftbilder 1:28.000
- d) Terrestrische Profilmessungen
- e) Relativer Vergleich zweier automatischer Extraktionen visuell und rechnerisch

6.1 Lagevergleich der extrahierten Kanten mit der DGK5

Die in den Kapiteln 4 und 5 gefundenen morphologischen Strukturen könnten der DGK5 überlagert werden, um Aussagen über die Lagegenauigkeit der Deichkanten, der Entwässerungsgräben, Priele und Abbruchkanten zu treffen. Denn diese Merkmale sind auch in der DGK5 eingetragen.

Jedoch wäre dieses Vorgehen nicht sinnvoll!

Zu diesem Schluß muß man kommen, wenn bedacht wird, daß die DGK5 laut Grundkartenerlaß mit einer Genauigkeit von ± 3 Metern zu führen ist. In bestimmten Fällen kann dieser Wert, aufgrund der Entstehungsgeschichte eines einzelnen Blattes, lokal auch größer sein. Die DGK5 ist als Referenz für einen Vergleich mit Laserdaten wegen der einzuhaltenden Lagegenauigkeit also nicht geeignet.

Damit fiel auch der Vergleich der Mole als Kontrollkante für die Laserscannerdaten aus.

Die aus Laserscannerdaten extrahierte Kante hätte, bis auf kleine Abweichungen durch die Filterung, mit der DGK5 überstimmen müssen, so daß damit die Laserscannermessung kontrolliert worden wäre. Dies konnte durch eine Überprüfung im Testgebiet Mole bestätigt werden.

6.2 Kontrolle der Höhengenaugigkeit der Laserdaten durch GPS-Messungen

Die Untersuchung der absoluten Genauigkeit der Laserpunkte basiert auf dem Vergleich der Lasermessungen mit der vom LGN höhenmäßig erfaßten Kontrollfläche in der Nähe des Hafens.

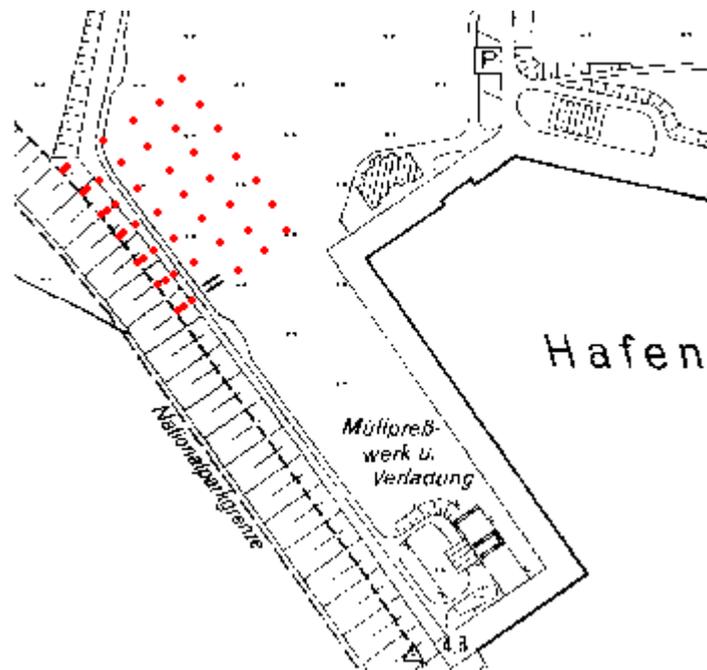


Abb. 6.1 GPS-Punkte am Hafen

Dazu wird für die Kontrollfläche aus den gemessenen Laserpunkten ein DHM mit einer Rasterweite von einem Meter gerechnet. Für alle GPS-Punkte, die auf dieser Kontrollfläche gemessen wurden, wird eine Höhe aus dem DHM interpoliert und mit der gemessenen GPS-Punkthöhe verglichen.

$$\Delta H = H_{GPS} - H_{Laser-DHM}$$

Ähnliches ist von der Firma Topscan, die die Befliegung durchgeführt hat, auch zur Überprüfung der Laserdaten gemacht worden. Allerdings wurde dort ein ‚Soll-DHM‘ aus den gemessenen Höhenpunkten berechnet und mit den gemessenen Laserpunkthöhen verglichen. In dem Projektbericht gab es keine weiteren Angaben über die gewählten Kontrollflächen. Beim LGN konnte in Erfahrung gebracht werden, daß die dort verwendeten Kontrollflächen nur ebene Flächen wie zum Beispiel ein Sportplatz waren.

Die hier gezeigte Kontrollfläche ist nicht rein eben, sondern enthält zusätzlich noch den Deich als unveränderliche Kontrollstruktur.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 6.1 zusammengefaßt:

Kontrollfläche	Juist-Hafen
Anzahl GPS-Punkte auf der Kontrollfläche	49
Maximum ΔH [m]	0,454
Minimum ΔH [m]	-0,452
Arithmetischer Mittelwert ΔH [cm]	2,4
Standardabweichung $\Sigma\Delta H$ [cm]	21,2
Anzahl Laserpunkte mit $ \Delta H \leq 30$ cm	39 = 79,59%

Tab. 6.1 Genauigkeitsanalyse der Laserpunkte

Daraus folgt also im Gegensatz zu den von der Firma Topscan überprüften Flächen, daß längst nicht alle Laserpunkte der Höhengenaugkeit von 30cm entsprechen.

Es kann aber auch zu einer Verschlechterung der Ergebnisse durch die verwendeten GPS-Punkte gekommen sein, falls es doch Veränderungen innerhalb dieser Fläche in einem Zeitraum von 2 Jahren gegeben hat. Denn die mir zur Verfügung gestellten GPS-Daten sind vom Dezember 1997 oder sie gründen sich auf Erstellungsfehler bei der DHM-Berechnung.

Des weiteren sind die GPS-Punkte für einen Vergleich mit Bruchkanten aus HALCON herangezogen worden. Dafür sind im Kontrollgebiet Mole die Kanten -wie im Testgebiet Deich- extrahiert worden. Als Ergebnis bekommt man auch hier die Deichkrone und beidseitig den Deichfuß. Für den Vergleich wird nur die Deichkrone (**Diagramm 6.1**) herangezogen, weil die Deichlinie zur Wattseite durch die GPS-Messung nicht miterfaßt wurde.

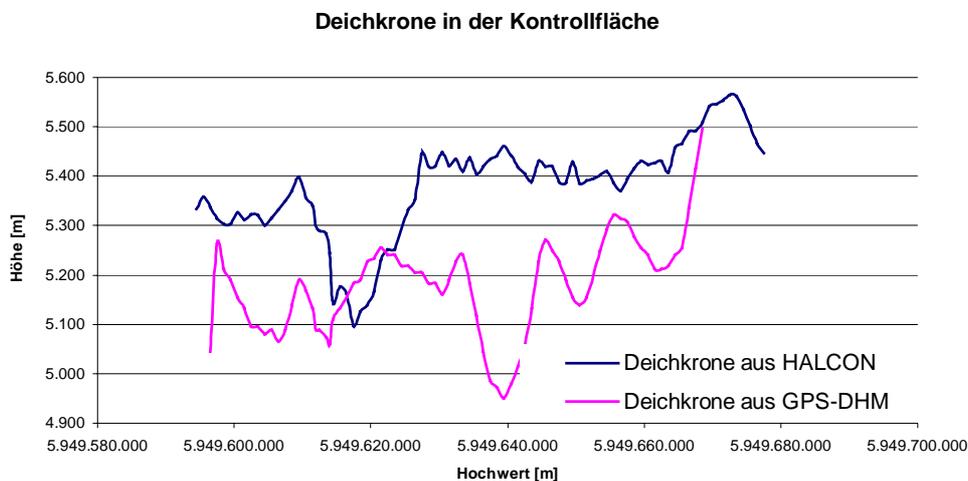


Diagramm 6.1 Höhenverlauf der Deichkrone

Die Kanten sind separat noch mal überprüft worden, um festzustellen, ob sich die Abweichungen anders als im ebenen Bereich der Kontrollfläche verteilen.

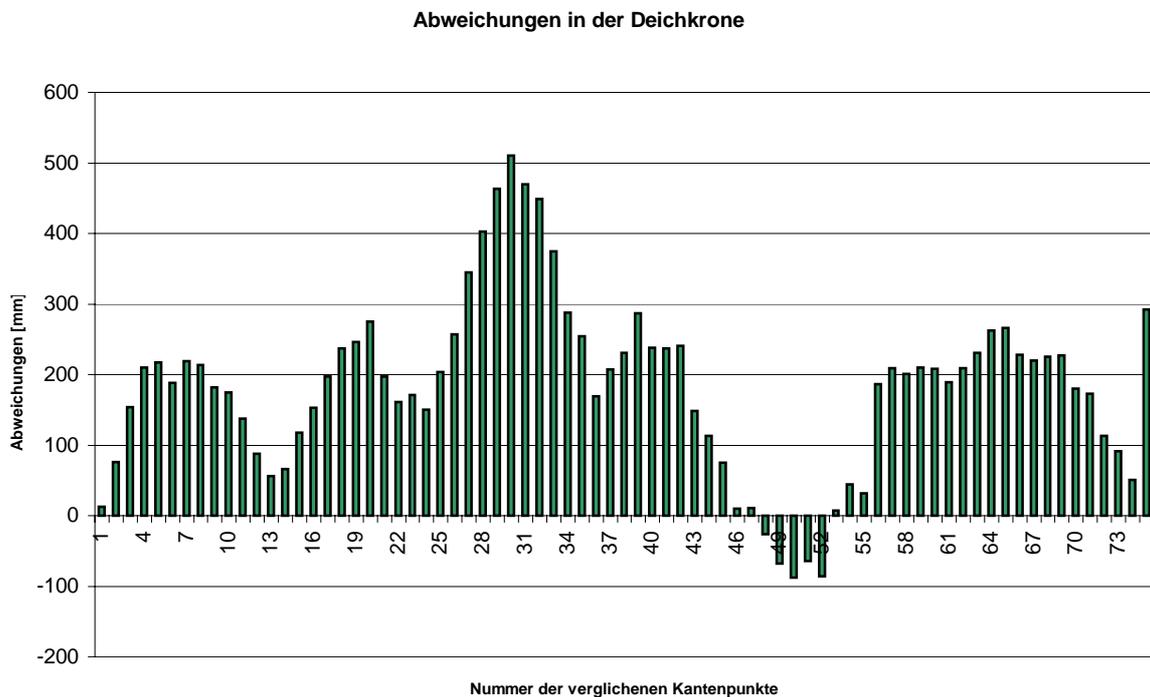


Diagramm 6.2 Abweichungen der Deichkrone aus Laserhöhen und GPS-Höhen

Die maximale Abweichung in der Deichkrone (**Diagramm 6.2**) liegt bei 51cm. Die 30cm-Grenze wird insgesamt von nur 7 Werten (9,3%) von 75 getesteten Werten überschritten und fällt damit noch unter den Durchschnitt des gesamten Testgebietes.

6.3 Vergleich der extrahierten Kanten mit einer Luftbildauswertung

Die stereoskopische, topographische Luftbildauswertung ist von vornherein nur anhand der SW-IR Stereoluftbilder 1:28.000 vom 18.5.1999 durchgeführt worden, da die Color-IR Stereoluftbilder 1:10.000 schon im September 1997 (im Vergleich: Laserscannerdaten im Februar 1999) aufgenommen wurden.

Im weiteren Verlauf erwies sich auch diese analytische Auswertung als Referenz für einen Vergleich mit den automatisch extrahierten Bruchkanten als nicht geeignet.

Bei den SW-IR Luftbildern ist es nicht der zeitliche Abstand zu den Lasermessungen, sondern die eigentliche photogrammetrische Auswertung an sich, die einen Lage- und / oder Höhenvergleich qualitativ nicht erlaubt. Wegen des schmalen Gebietes, in dem Paßpunkte für

die Rekonstruktion der Orientierung der Luftbilder gemessen werden können, ist eine analytische Auswertung schwierig. Die Abweichungen in den Paßpunkten betragen im Quadratmittel :

$$SX = \pm 2.079m$$

$$SY = \pm 3.131m$$

$$SZ = \pm 1.101m$$

Sowohl die Genauigkeiten aus der analytischen Auswertung als auch die erreichbaren Genauigkeiten aufgrund der Aufnahmekonfiguration der Luftbilder (Kapitel 2.2) lassen einen qualitativen Vergleich nicht zu.

Wozu die Luftbildauswertung aber dennoch herangezogen werden kann, ist der quantitative Vergleich dessen, was der menschliche Betrachter unter morphologischen Gesichtspunkten aus den Luftbildern erkennen und somit extrahieren kann. In LISA können sie mit den Bruchkanten aus den automatischen Extraktionen überlagert werden, so daß sofort ein visueller Vergleich möglich ist.

Der visuelle Vergleich wird mit den aus HALCON stammenden Ergebnissen durchgeführt. Als Beispiel (**Abbildung 6.2**) wird hier erst mal das übersichtlichste Testgebiet -der Deich- gezeigt, dessen Anzahl an Strukturen auf wenige Kanten begrenzt ist.

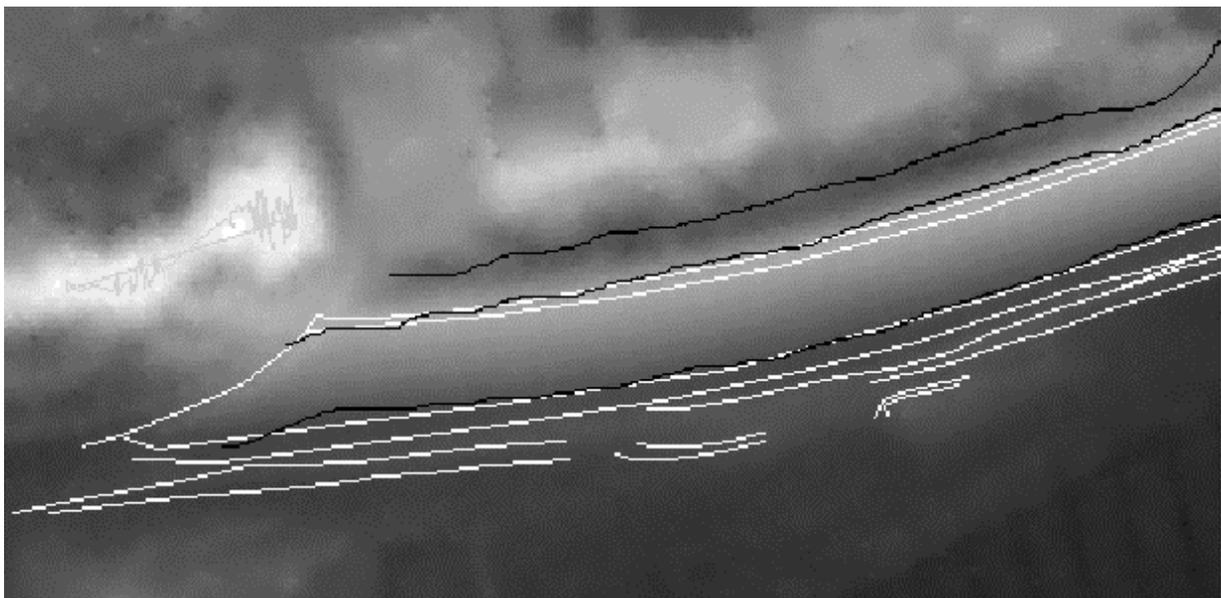


Abb. 6.2 Bruchkanten aus Luftbildern (Weiß) aus Laserdaten (Schwarz)

Selbst bei wenigen Strukturen sind vom menschlichen Betrachter feinere Unterschiede wahrgenommen worden. So ist auf der Deichkrone die zweite Kante des 3,5 Meter breiten Weges ebenso wie der am Deichfuß zur Wattseite hin (im Bild unten) verlaufende Pfad vor dem Deich identifiziert worden.

Es fehlt leider in der Luftbildauswertung die zweite Deichlinie zur Inselseite. Wahrscheinlich ist sie nicht mitbearbeitet worden, da das Hauptaugenmerk auf das Deichvorland gerichtet sein sollte.

Welche feinen Unterschiede das menschliche Auge wahrnehmen kann, wird in den anderen Gebieten noch deutlicher.

Als zweites Beispiel wird nun ein Ausschnitt der Abbruchkante gezeigt (**Abbildung 6.3**).

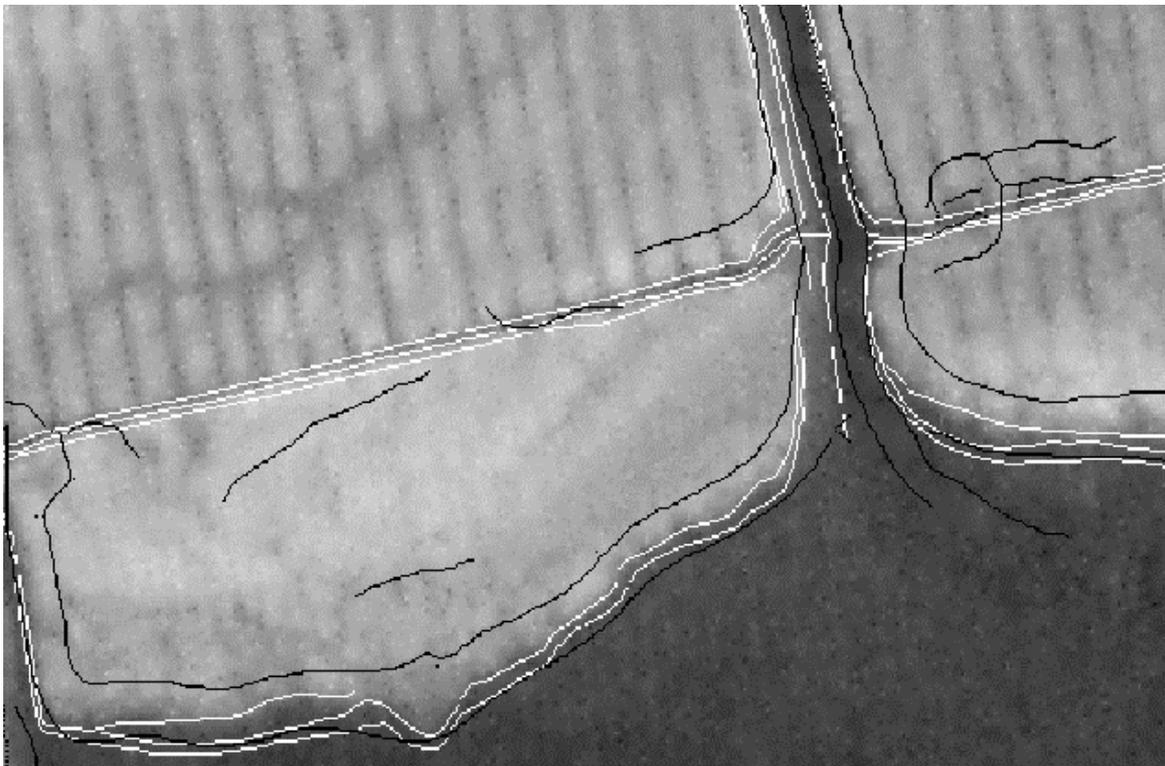


Abb. 6.3 Bruchkanten aus Luftbildern (Weiß), aus Laserdaten (Schwarz)

Die Abbruchkante wird in der Luftbildauswertung als der steil senkrecht abgebrochene Teil definiert (siehe Diagramm 5.2) und verläuft wesentlich geschwungener. Dagegen liefert die automatische Extraktion den Verlauf der Abbruchkante geglätteter und setzt Ober- und Unterkante weiter auseinander. Es werden weniger Informationen über die Form der Kante erfaßt. Im Bereich des Priels und der Entwässerungsgräben sind die Strukturen in ihrer groben Anordnung automatisch richtig erkannt, das heißt, Oberkanten und Unterkanten wurden

ermittelt. Feinheiten bei der Einmündung von Entwässerungsgräben bzw. die Gräben selbst werden jedoch größtenteils nicht durch die automatische Extraktion berücksichtigt.

Bei den Gruppen liefert die Luftbildauswertung eine Vielzahl an Bruchkanten. Es werden die Oberkanten der Gräben sowie zwei Unterkanten in den Mulden bei ausreichender Breite durchgängig erkannt. Der automatischen Extraktion war es dagegen nur möglich, eine Unterkante zu ermitteln und auch nur eine Rückenlinie auf den langgestreckten Hügelformationen zwischen den Gruppen. Im Bereich dieser Formen ist die automatische Extraktion den Störungen durch Bewuchs besonders ausgesetzt.

Für die Ermittlung feiner Unterschiede in den Strukturen (Krümmungen, Verästelungen) ist die Luftbildauswertung der automatischen Extraktion in diesem Fall noch überlegen. Es kommt aber darauf an, inwieweit das Erkennen solcher Unterschiede für die Veränderungen im Deichvorland relevant sind. Morphologische Veränderungen an sich -Verschiebung der Abbruchkante bzw. der Prielränder- können auch durch automatische Extraktion bestimmt werden, wenn die Veränderungen größer als die Abweichungen bei der Extraktion sind. Dies dürfte bei den Gruppen eine zusätzliche Analyse erforderlich machen, da dort die Veränderungen im Submeterbereich liegen.

Die sehr zeitaufwendige manuelle Bearbeitung kann durch eine gut an die Aufgabe angepaßte automatische Extraktion eingeschränkt werden, da dann wesentlich weniger Strukturen vom Bearbeiter bestimmt werden müssen.

Eine Kombination von Luftbildauswertung mit automatischer Extraktion ist sinnvoll unter der Voraussetzung, daß die Luftbilder im selben Zeitraum wie die Laserbefliegung gemacht werden.

Zweitens sollten die Luftbilder in einem größeren Maßstab (mindestens 1:10.000) geflogen werden, um den hier erforderlichen Genauigkeiten in Lage und Höhe zur Extraktion von sehr geringen Höhenunterschieden und sehr nah beieinanderliegender Strukturen zu genügen.

Das LGN in Hannover sieht für derartige Anwendungen sogar einen Maßstab von 1:12.000 in der Lage und 1:8.000 in der Höhe vor.

6.4 Vergleich mit terrestrischen Profilmessungen

Für den Vergleich terrestrischer Geländeprofile mit denselben Profilen aus Laserscannerdaten liegen hier Geländeaufnahmen vom September 1998 vor. Die vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz (NLWK) mitgelieferten tachymetrischen Profilmessungen fanden keine Anwendung, da sie 1995 gemessen wurden.

Von den zuvor ermittelten morphologischen Strukturen kann nur die Abbruchkante verglichen werden, da die Geländeprofile zur Überwachung dieses Phänomens im Deichvorland erstellt wurden. Es soll abgeschätzt werden, ob die Abbruchkante aus den Laserscannerdaten ebenso genau in Lage und Höhe bestimmt werden kann wie durch eine herkömmliche Geländeaufnahme. Dadurch können der Arbeitsaufwand und die Kosten für die Überwachung solcher Strukturen verringert werden, indem die Abbruchkanten bei kommenden Überwachungsmessungen mittels Laserscannermessungen kontrolliert werden.

Die automatisch detektierte Abbruchkante ist schon zuvor -in zwei Profilen- auf ihre korrekte Lage im Gelände überprüft worden (Diagramm 4.2 und 5.2). Jetzt wird ihre Lage und Höhe gegenüber dem terrestrischen Geländeprofil näher betrachtet sowie die Profile untereinander verglichen (**Diagramm 6.3 und 6.4**).

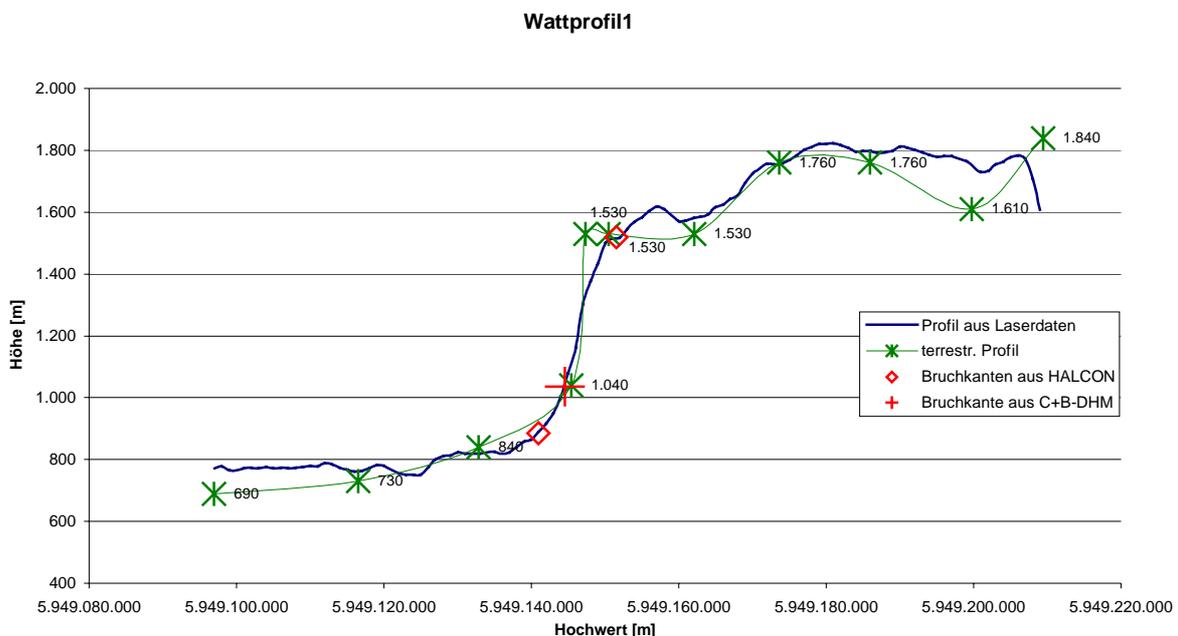


Diagramm 6.3 Gemessene Wattprofile1 und erstellte Bruchkanten

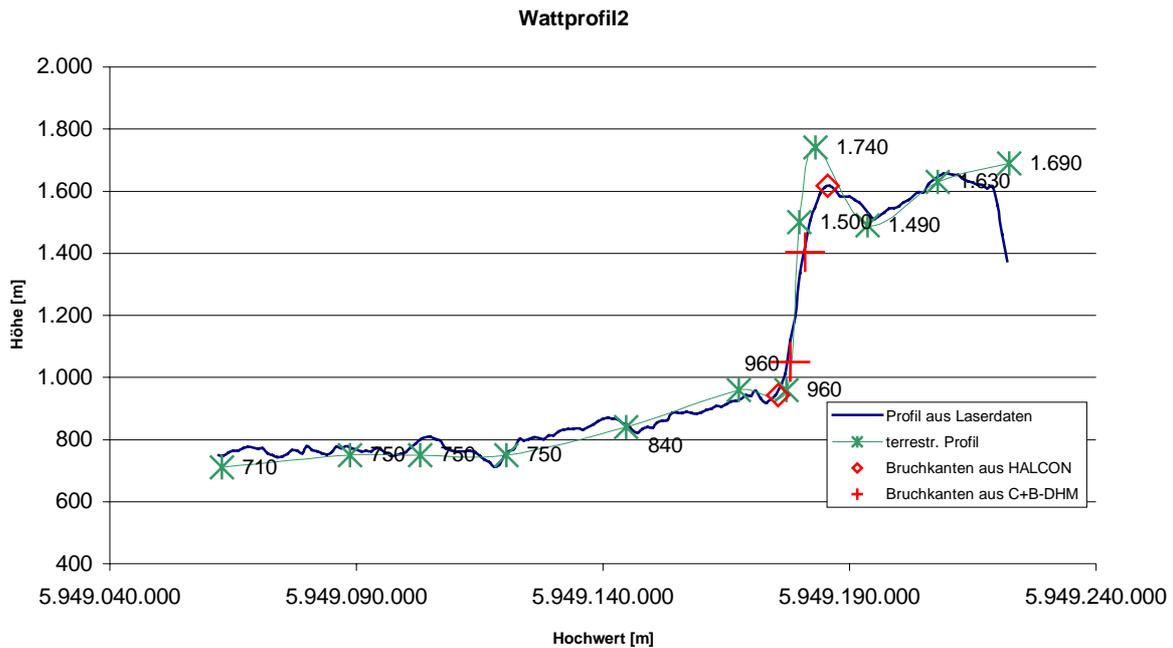


Diagramm 6.4 Gemessene Profile und extrahierte Bruchkanten

Die Betrachtung der Profile untereinander ist eine reine Anschauung der Abweichungen in der Höhe, da in LISA die terrestrischen Geländeprofile für die Bestimmung derselben Profile in der Lage aus Laserscannerdaten verwendet werden, um einen Vergleich zu ermöglichen.

Die Höhenabweichungen zwischen den Profilen sind in den **Diagrammen 6.5 und 6.6** dargestellt.

Bei den 11 verglichenen Geländepunkten im Wattprofil1 liegt das Maximum der Höhendifferenz bei 23,2cm und das Minimum bei 0,3cm, im Wattprofil2 sind es 12 Punkte mit Abweichungen zwischen 31,6 und 0,2cm.

Die Abweichungen können teilweise durch die Berechnung der Differenzen zustande kommen, da sich die Punkte aus den Geländeprofilen nicht exakt mit den gemessenen Laserpunkten im Rechtswert und im Hochwert überlagern.

Es tauchen dort schon Unterschiede bis zu maximal einem halben Meter auf, so daß auch die resultierende Höhendifferenz durch die Veränderungen im Gelände auf einen halben Meter Strecke eine größere Differenz aufweist, als wenn sie aus Punkten an derselben Stelle berechnet würde.

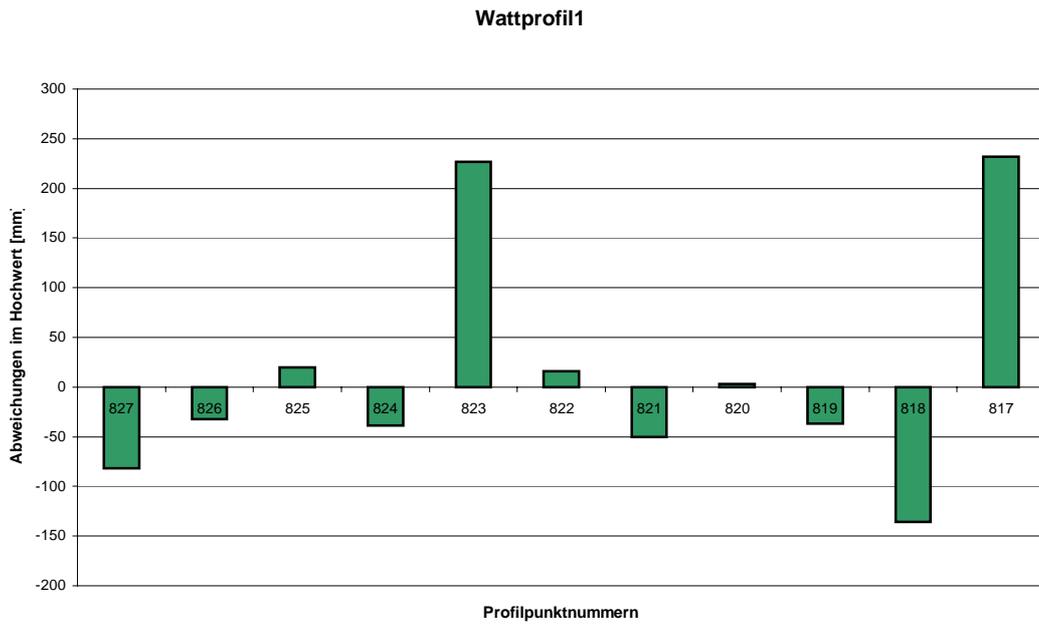


Diagramm 6.5 Höhenabweichungen in den Geländeprofilpunkten

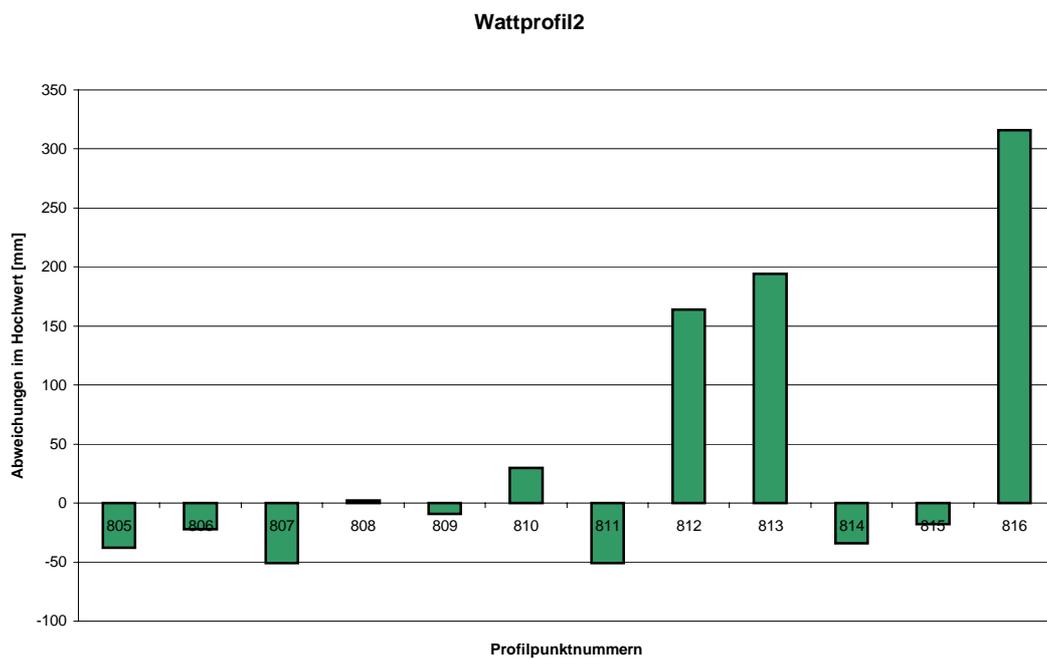


Diagramm 6.6 Höhenabweichungen in den Geländeprofilpunkten

Der halbe Meter Abweichung in der Lage kann durch das 1m-Punktraster, in dem die Laserscannerprofile registriert wurden, erklärt werden, da der naheliegendste Punkt zum aufgenommenen Geländepunkt für den Höhenvergleich gewählt wird.

Sowohl aus der willkürlichen Aufnahme der Punkte, die nicht immer Punkte für eine Überdeckung mit den terrestrisch aufgenommenen Punkten liefern, als auch aus der Lagegenauigkeit bei der Laserscannermessung von 0,5m können Abweichungen in der Höhe entstehen.

Unabhängig von der Bestimmung der Punkte ist auch die natürliche Veränderung des Geländes innerhalb der fünf Monate zwischen den Aufnahmen als Faktor zu bedenken.

Leider lagen keine Informationen über die Stärke der Veränderungen während eines Winters vor (Winterstürme etc.), da bisher keine so regelmäßigen Untersuchungen gemacht wurden.

Erst dann kann beurteilt werden, ob naturbedingte Einflüsse derartige Veränderungen in der Höhe bewirken können.

Die extrahierten unteren Bruchkanten stimmen mit den beiden Geländeprofilen in der Lage und in der Höhe überein. Nur die obere Kante aus beiden Extraktionen weicht in der Höhe bis zu 12cm beim Wattprofil2 und im Hochwert bis zu 4m bei Wattprofil1 ab.

Die Abweichungen in Lage und Höhe bei der oberen Abbruchkante weisen auf eine wirkliche Veränderung hin. Insgesamt ist die Abbruchkante von der terrestrischen Aufnahme zur Laseraufnahme abgeflacht, falls die Punkte auf der vordersten Kante bei der Laseraufnahme nicht miterkannt wurden und so die Verschiebung im Hochwert zustande kommt.

6.5 Vergleich von zwei automatischen Kantenextraktionsverfahren

Im folgenden werden die Ergebnisse der beiden Kantenextraktionen aus C+B-DHM-Laser (im folgenden abgekürzt mit C+B) und aus HALCON relativ miteinander verglichen. Dabei wird sowohl auf die Anzahl der ermittelten Strukturen geachtet als auch die Lage derselben Strukturen aus beiden Verfahren zueinander betrachtet.

Die Anzahl der ermittelten Kanten für sich ist ein Entscheidungskriterium, ob ein Vergleich überhaupt sinnvoll ist.

Wenn der Vergleich durchgeführt ist, werden die berechneten Abweichungen in den Hochwerten (Deichkanten) und in den Rechtswerten (Prielkanten und Grüppengerippllinien) in Diagrammen zusammengestellt. Die Abweichungen werden berechnet mit den Werten der Bruchkanten aus C+B-DHM-Laser minus den Werten aus Kanten von HALCON.

Die Kanten, die betrachtet werden können, weil dazu entsprechende Kanten durch das jeweils andere Verfahren ermittelt wurden, sind unter LISA von den restlichen Kanten separiert worden.

Dabei stellte sich heraus, daß der bestmögliche Vergleich auch hier am Deich gegeben ist, da dort in beiden Verfahren die drei Kanten (Krone und zweimal Deichfuß) durchgängig vorliegen (**Diagramm 6.7**).

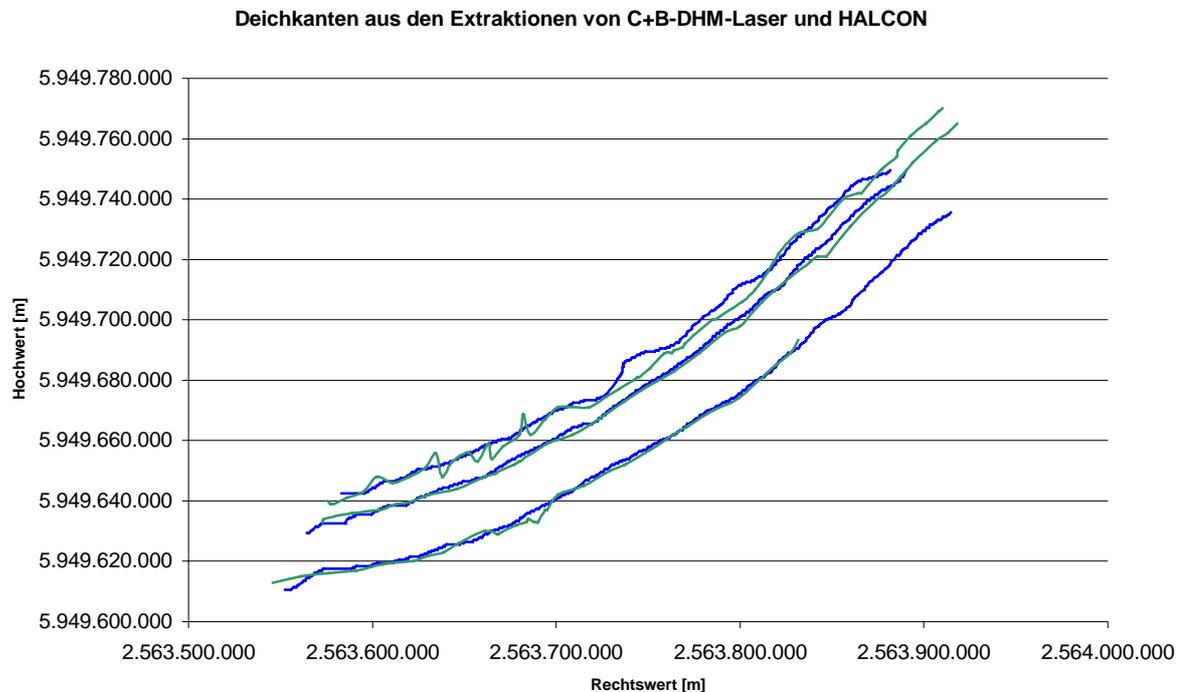


Diagramm 6.7 Deichkanten aus C+B-DHM-Laser (Grün) und HALCON (Blau)

In den anderen Gebieten sind Ausschnitte gewählt worden, so daß eine gewisse Mindestanzahl von Kanten abgedeckt ist, damit das Ergebnis repräsentativ für die untersuchten Strukturen ist.

6.5.1 Vergleich der Deichkanten

Im Testgebiet Deich sind außer den eigentlichen Deichkanten auch Strukturen wie Dünen erkannt worden, die aber bei der hier gestellten Aufgabe nicht berücksichtigt und aus den Bildern herausgefiltert wurden.

In beiden Verfahren ist nur eine Kante auf der Deichkrone und jeweils eine Kante rechts und links am Deichfuß ermittelt worden. Vor dem Deich zur Wattseite hin ist der dort verlaufende Weg nur in der Luftbildauswertung zu sehen.

Die Abweichungen (**Diagramm 6.8**) belaufen sich bei der Deichkrone auf maximal -4,75m, minimal 0m. Es ist eine eindeutige Tendenz in den Differenzen festzustellen. Diese äußert sich in einer Verschiebung der mit C+B detektierten Kanten nach Süden.

Die Kantenabweichungen schwanken nur am westlichen Ende der Deichkrone geringfügig, so daß der Mittelwert der Abweichungen bei -1 Meter liegt.

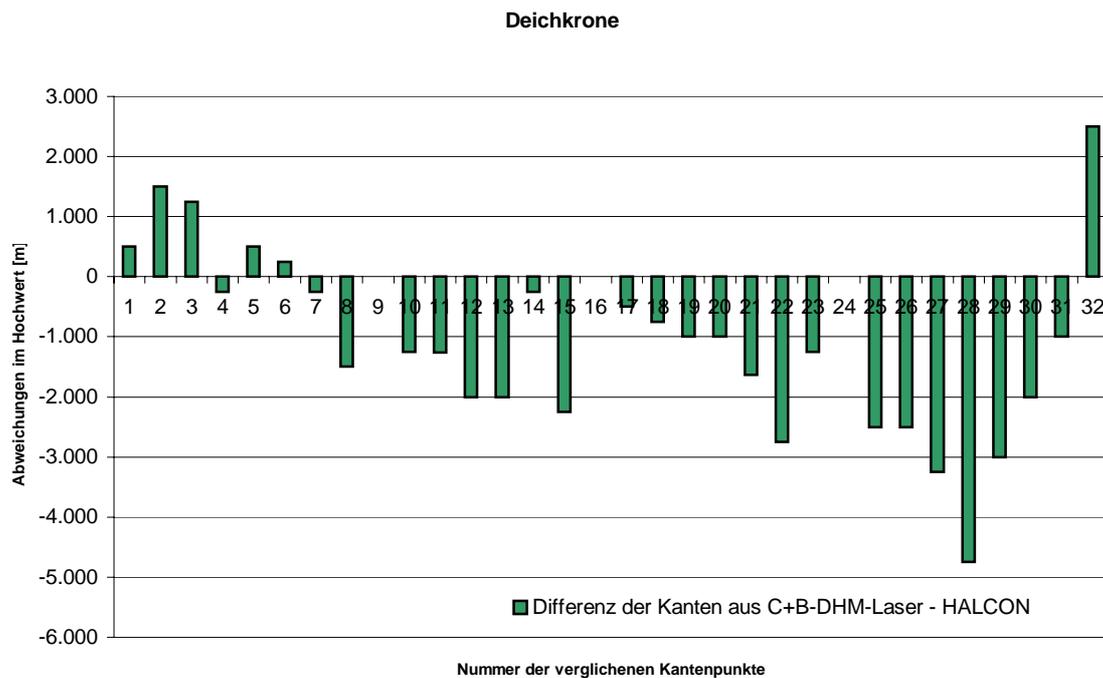


Diagramm 6.8 Abweichungen der Deichkronen voneinander

Die Differenzen können aus der Kantenerkennung kommen, da sich unter HALCON die Kantendetektion auf die Bestimmung von deutlichen Grauwertunterschieden gründet, so daß dadurch die Deichkrone eher zum Rand hin verschoben ist. Bei dem Verfahren nach Wild wird die Kante über Tangentialebenen ermittelt. Dadurch wird die obere Kante des Deiches in vielen Fällen in die Mitte der Deichkrone gerückt.

Bei den beiden Deichlinien am Fuß des Deiches ist die Verschiebung der Kanten aus C+B nach Süden bis auf wenige Ausreißer ebenfalls zu erkennen (**Diagramm 6.9 und 6.10**). Auch hier können die Abweichungen über die verschiedenen Verfahren erklärt werden.

Sie betragen bei der inselseitigen Kante zwischen -22cm bis hinauf auf -7,5 Meter bei 48 überprüften Kantenpunkten.

Zum Wattgebiet hin sind die Differenzen von 0,1m bis zu -4,5 Metern kleiner, aufgrund der geringeren Höhenunterschiede auf dieser Seite sowie weniger Störungen durch den Bewuchs. Die stärkeren Abweichungen in der Deichlinie zur Inselseite -im Diagramm 6.7 das nördlichste (oberste) Kantenpaar- resultieren aus Fehlern bei der Zusammenführung von Kanten oder schon zuvor bei der Bestimmung von Kanten in der C+B-Auswertung.

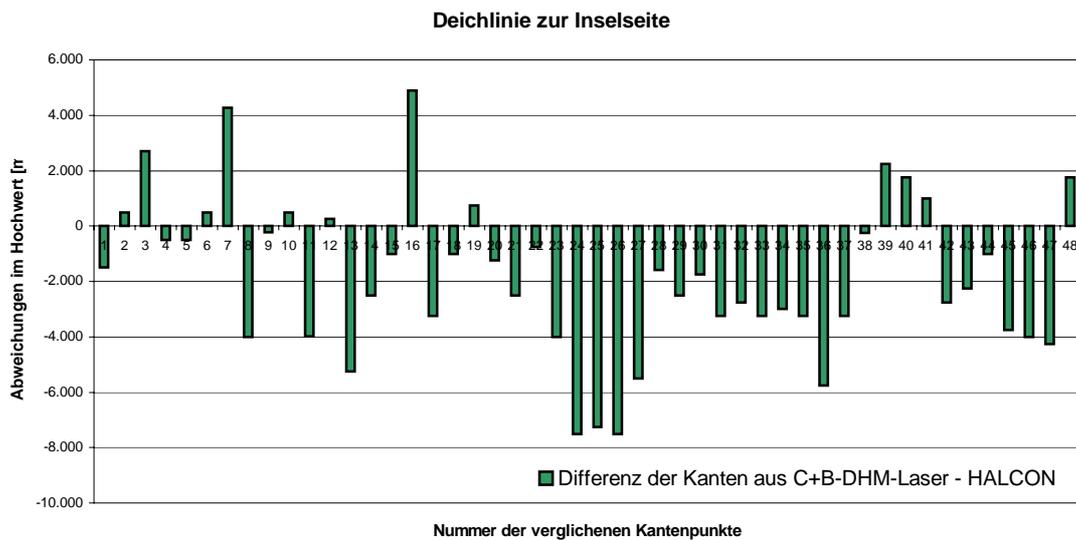


Diagramm 6.9 Abweichungen der Deichfußlinie

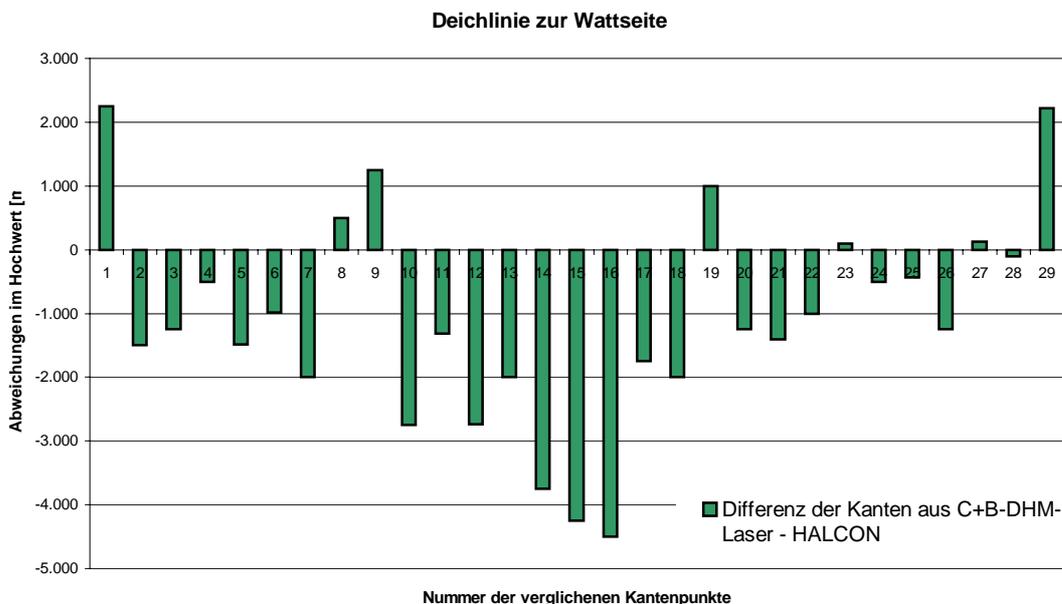


Abb. 6.10 Abweichungen der Deichfußlinie

Die Berechnung von Kanten mit diesem Programm liefert an dieser Stelle nicht eine durchgängige Kante.

Die Kantenenden der Teilstücke konnten nicht mit der nächsten Oberkante oder in diesem Fall Unterkante verbunden werden (siehe Abb. 4.9 und 4.10). Sie sind durch fehlende Punkte in der Aufnahme bzw. durch Störungen wegen Bewuchs in der Kantenrichtung fehlgeleitet worden.

Außerdem sind die Bruchkanten in HALCON über ein Schwellwertverfahren ermittelt worden, das auch noch Bestimmungsfehler bezüglich der Kantenlage beinhalten kann.

6.5.2 Vergleich der Prielkanten

Für einen Vergleich der Strukturen bieten sich sowohl die Prielkanten als auch die Abbruchkante zum Wattenmeer hin an.

Die Abbruchkante im Prielgebiet kann aber nicht vernünftig verglichen werden, weil die Kantenlänge und die Punktzahl innerhalb der Kanten bei der Auswertung mit C+B-DHM-Laser zu gering sind (siehe Abbildung 4.11). Eine repräsentative und aussagekräftige Analyse der Differenzen in den Kantenpunkten ist so nicht möglich, da nur die untere Kante des Abbruches kontinuierlich vorliegt.

Der Vergleich beschränkt sich hier auf eine Betrachtung der Oberkanten und Unterkanten der Priele. Wo keine Vergleichskanten vorliegen, sind die Punkte auch aus den Kanten der HALCON-Analyse herausgefiltert worden, um die Berechnung zu vereinfachen.

Aus den beiden großen Priele des Testgebietes sind zwei Abschnitte ausgewählt (Diagramm 6.11), bei denen rechts und links Oberkante und Unterkante ermittelt sind.

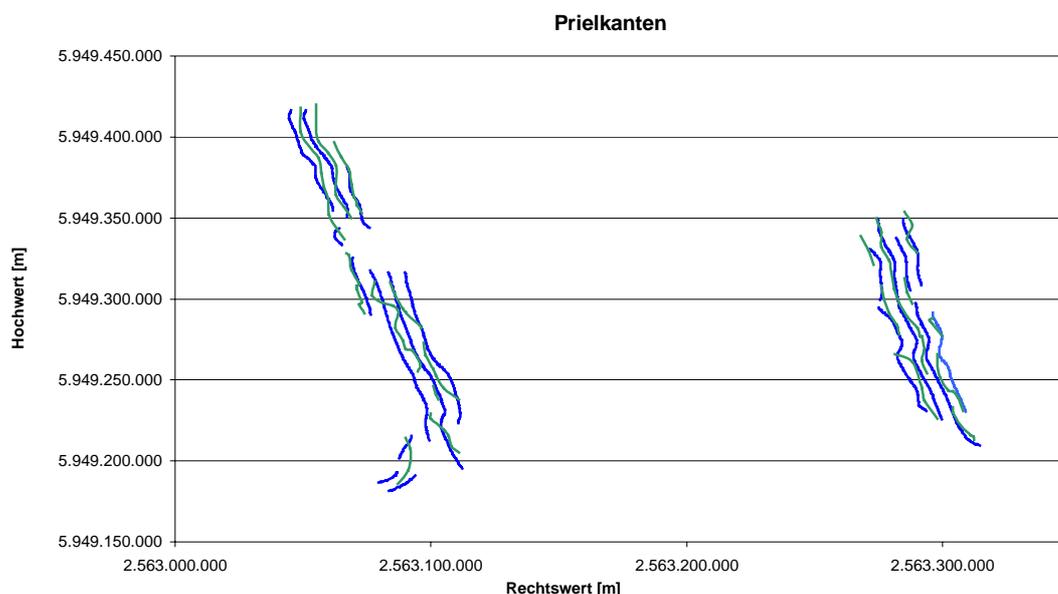


Diagramm 6.11 Prielkanten aus C+B-DHM-Laser (Grün) und HALCON (BLAU)

Die Kanten verlaufen meist nicht parallel, sondern sie pendeln umeinander oder die Bruchkanten aus der C+B-Analyse verlaufen zwischen zwei HALCON-Bruchkanten und nähern sich mal der einen mal der anderen Kante an. Dadurch ist die klare Zuordnung nicht immer gegeben, so daß diese Kanten mit beiden umliegenden Kanten verglichen werden müssen.

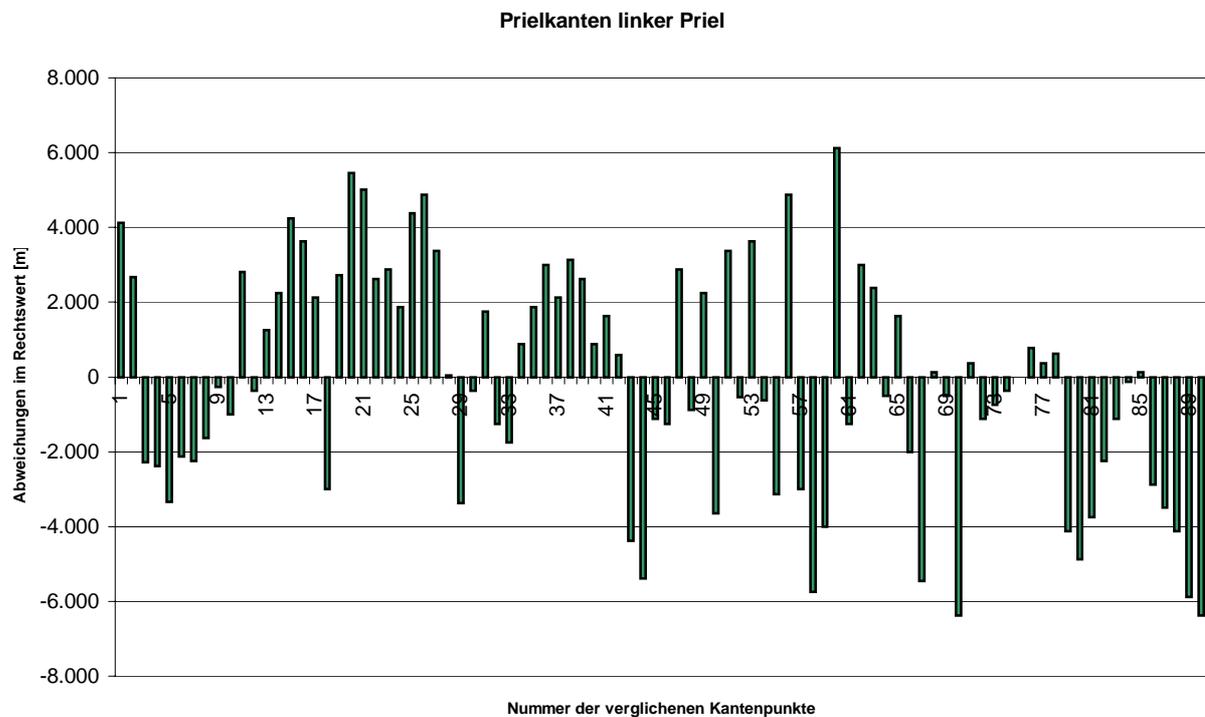


Diagramm 6.12 Abweichungen der Prielkanten voneinander

Das Pendeln um die Bruchkanten aus HALCON ist in dem **Diagramm 6.12** zu sehen. Die Differenzen liegen zwischen 4cm und $-6,37\text{m}$. Die doch sehr großen Abweichungen sind die Punkte, die eigentlich schon zur nächsten parallel verlaufenden Kante gehören, aber in der Kantenberechnung von C+B in einer Kante zusammengefaßt wurden. Das heißt, es werden dort die beiden Unterkanten in der Mulde des Priels miteinander verknüpft. Die Mulde des linken Priel ist bis zu 7 Meter breit, so daß Abweichungen dieser Größenordnung durch den Wechsel zwischen den Kanten durchaus möglich sind.

Bei dem zweiten Priel rechts im Diagramm 6.11 treten Differenzen von 0m bis zu einem vereinzelt Ausreißer mit $-7,27\text{m}$ auf (**Diagramm 6.13**). Der Ausreißer stammt aus der ersten Bruchkante aus C+B, die an ihrem oberen Ende von rechts nach links überwechselt und so einen derart großen Wert liefert. Im Gesamtüberblick sind die Abweichungen entweder rechts oder links der C+B-Kanten angesiedelt, d.h. sie kreuzen die HALCON-Bruchkanten in

ihrem Verlauf nicht so häufig wie im linken Priel zuvor. Hier wurden die Geländekanten in beiden automatischen Verfahren an denselben Positionen im Relief erkannt, wenn die wenigen Schwankungen der Kanten aus C+B-DHM-Laser einmal ausgeklammert werden. Auch müssen die Lageabweichungen von bis zu einem Meter in beiden Verfahren (**siehe Kapitel 4.5 und 5.3**) mit in die Beurteilung der Abweichungen einfließen.

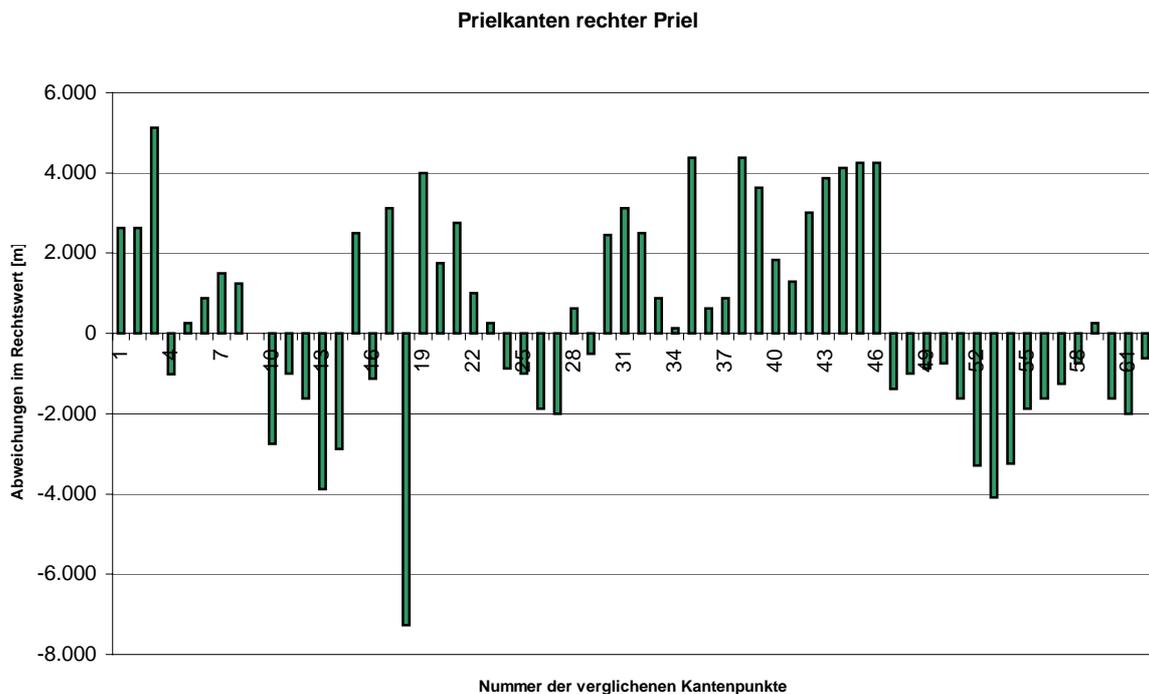


Diagramm 6.13 Abweichungen der Prielkanten voneinander

In dem Gelände liegen die unterschiedlichen Strukturen sehr eng beieinander, aber sie sind bei ihrer Überprüfung auf Lagerichtigkeit im Geländeprofil als korrekt bestimmt angenommen worden, da die Abweichungen maximal einen Meter betragen. Wenn man nun aber diese als tolerierbar angenommenen Abweichungen zu den tatsächlichen Differenzen zwischen den Extraktionen dazuaddiert, wird die Betrachtung verfälscht.

Insgesamt ist ein Lagefehler, der aus der Aufnahme der Laserscannerdaten resultiert, aufgrund des flachen Geländes mit wenigen markanten Steigungsänderungen schwierig zu ermitteln.

6.5.3 Vergleich der Geriplinien bei den Gruppen

In diesem Gebiet verstärken sich die Probleme, die zuvor schon bei den Prielkanten auftauchten. Die klare Zuordnung der extrahierten Kanten ist hier auch bei nur geringen Abweichungen durch die dicht beieinander liegenden Strukturen extrem erschwert.

Bei der Berechnung unter C+B-DHM-Laser ist die Punktfolge innerhalb der Kanten, die alle 5 Meter einen Punkt enthält, zu groß gewählt worden, so daß für den folgenden Vergleich maximal 7 Punkte pro Kante von 50 Metern Länge vorliegen.

Es werden Muldenlinien und Rückenlinien der Gruppenstrukturen (**Diagramm 6.14**) verglichen.

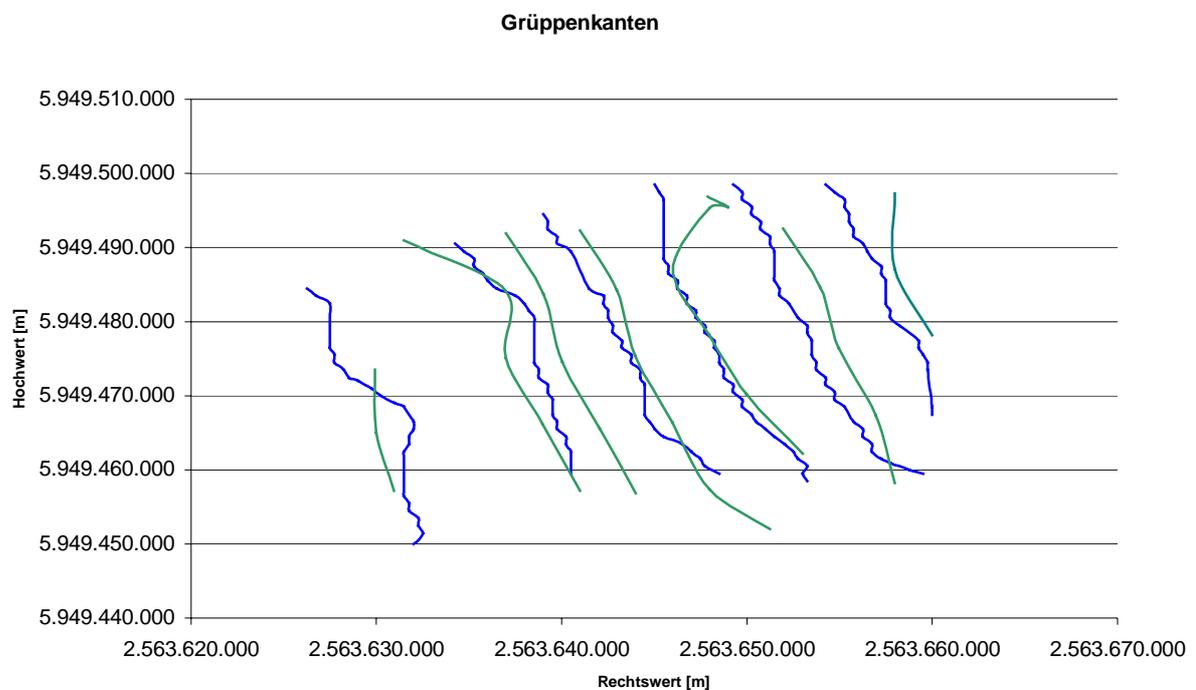


Diagramm 6.14 Geriplinien aus C+B-DHM-Laser (Grün) und HALCON (Blau)

Der gewählte Ausschnitt beinhaltet jeweils 6 Bruchkanten aus HALCON und 6 aus C+B-DHM-Laser. In dieser Abbildung sind schon die unterschiedlichen Verläufe und eines der Hauptprobleme mit der Analyse von C+B zu erkennen.

Die dritte C+B-Bruchkante von rechts ist ein Beispiel für die Problematik, wenn zwischendurch Punkte als Kantenpunkte erkannt wurden, die nicht in den allgemeinen Verlauf der Kante hineinpassen. Sie werden trotzdem automatisch mit in die Kante einbezogen. So entstehen diese falschen Zacken im Kantenverlauf. Eine weitere Problematik

sind die falsch miteinander verbundenen Kanten, die zwar von derselben Form, Mulden- oder Rückenlinie sind, aber nicht zu ein und derselben Kante gehören. Am Linienende wird die Kante einfach mit der nächstliegenden Kante gleicher Form verbunden, wenn sie einen bestimmten Höhenunterschied nicht überschreitet. Um dieses Phänomen zu unterdrücken, müßte der Wert für den Höhengsprung so gering angesetzt werden, daß auch viele reguläre Verbindungen ebenfalls nicht zustande kämen.

Im weiteren kann dieses Problem in der Berechnung über einen kleineren Öffnungswinkel und kleineren Radius bei der Suche nach Folgekanten verhindert werden. Dabei können dann aber ebenfalls mehr kürzere Kanten übrigbleiben, die nicht mit anderen Teilstücken verbunden werden.

Auch bei den Rückenlinien sind Schwankungen im Verlauf durch die Berechnung entstanden. Bei HALCON wird grundsätzlich nur eine Linie in der Mitte von Rücken oder Mulde erkannt, während bei C+B teilweise zwei Rücken- oder Muldenlinien bestimmt wurden, die nun beide mit der einen aus HALCON verglichen werden (siehe Diagramm 6.11: 2. und 3. Linie aus C+B von links mit der 2. Linie von HALCON von links). Bei HALCON werden also die Gruppen in der Form einer Dachkante (umgekehrte V-Form) abgebildet, während C+B-DHM-Laser die obere Kante zu einer Fläche mit zwei Kanten ausdehnt.

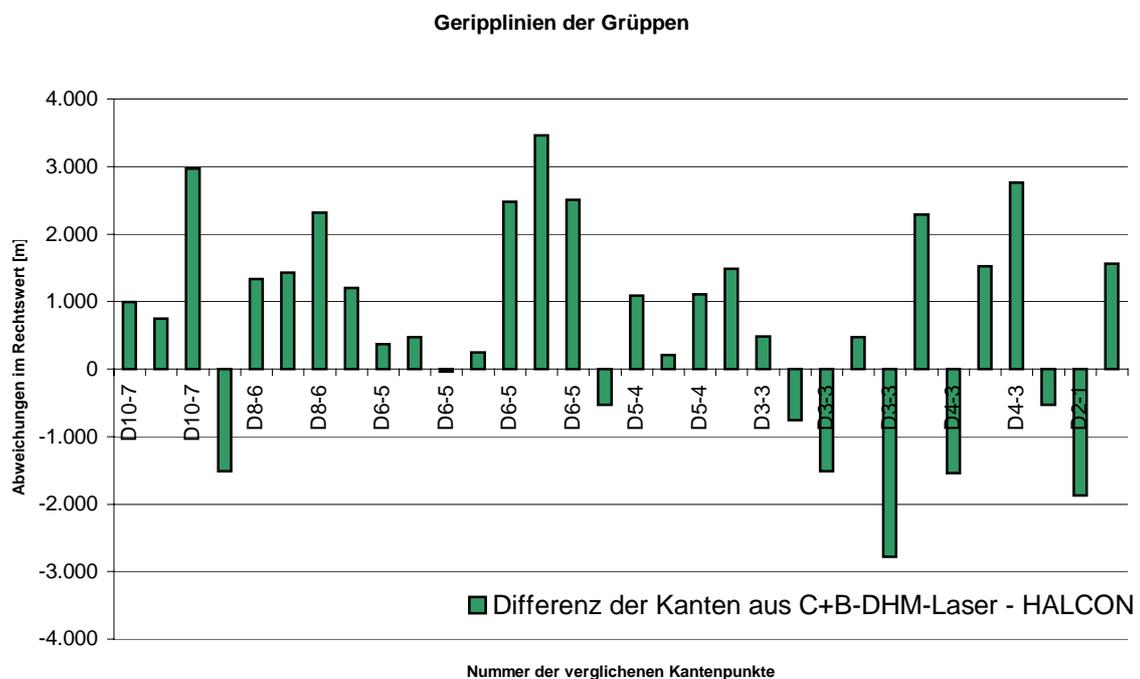


Diagramm 6.15 Abweichungen der Gruppenlinien

Vom Erscheinungsbild her verlaufen die Linien aus HALCON in sich wesentlich unruhiger. Dagegen erscheinen die anderen Linien aus C+B-DHM-Laser durch weniger Punkte auf gleicher Länge regelrecht geglättet.

Die Abweichungen in den Geripplinien (**Diagramm 6.15**) betragen – 4cm als kleinste Differenz der beiden Linien bis zu 3,46m.

Die Ausreißer in diesem relativen Vergleich zweier automatischer Extraktionen sind durch den Auswerter am einfachsten optisch zu erkennen und können dann gelöscht werden.

In diesem Fall sind sie zur Erläuterung im Datensatz beibehalten worden.

Insgesamt ist festzuhalten, daß die Analyse mit C+B-DHM-Laser wesentlich mehr Kanten erbracht hat, aber nicht unbedingt dort, wo sie im Gebiet von Interesse waren. Darüber hinaus sind Kanten falsch miteinander verbunden worden oder durch fehlendes Datenmaterial oder Bewuchs von der tatsächlichen Kantenrichtung bei der Berechnung abgelenkt worden.

Bei der Untersuchung des Prielgebietes sind zum Beispiel sehr viele Gruppenstrukturen erkannt worden und nicht alle gewünschten Kanten der Priele und der Abbruchkante. Im Deichgebiet sind auch die morphologischen Strukturen der Dünen miterfaßt, bei den Gruppen sind auch die Entwässerungsgräben zu den Prielen hin ermittelt worden.

Dieses Verfahren kann also umfassender eingesetzt werden, da es immer mehrere Strukturen erfaßt. Dafür läßt die Qualität an schwierigen Stellen nach.

Mit HALCON ist die Betrachtung des jeweiligen Gebietes kontrollierter abgelaufen. Es sind die Operatoren und Parameter auf die gewünschten Strukturen hin ausgewählt worden, so daß die übrigen vorkommenden Strukturen größtenteils nicht miterkannt wurden. Dadurch wird die Weiterbearbeitung der Kanten vereinfacht und verkürzt, da nicht relevante Kanten nicht mehr in einem zusätzlichen Arbeitsschritt herausgefiltert werden müssen.

Allerdings sind gerade im Bereich der Gruppen die Kanten nicht vollständig erfaßt worden.

Sollten alle morphologischen Strukturen in einem Gebiet mit größerer Fläche ermittelt werden, so kann unter HALCON, wie in den drei Teilgebieten geschehen, jede Kantenform einzeln über den günstigsten Operator ermittelt und dann die Teilergebnisse zusammengefügt werden. So werden alle Kanten bestimmt, aber eine Verschlechterung des Ergebnisses durch einen umfassenden Ansatz verhindert. Bei dem Versuch, das Gesamtgebiet mit nur einem Ansatz zu erfassen, konnten nie alle Strukturformen (Deich, Priel, Abbruchkante und Gruppen) gleich gut und umfangreich bestimmt werden.

7 Résumé und Perspektive

In dieser Arbeit ist das Laserscanningverfahren auf seine Eignung zur Extraktion von morphologischen Strukturen im Deichvorland untersucht worden. Nachdem im **Kapitel 2** das Testgebiet und die zur Verfügung gestellten Datensätze vorgestellt wurden, wird der Leser nun in die Grundlagen der Kantenextraktion mittels digitaler Bildverarbeitung eingeführt (**Kapitel 3**).

Die Untersuchung der Laserdaten erfolgte anhand von zwei Programmen:

- a) C+B-DHM-Laser (**Kapitel 4**)
- b) HALCON (**Kapitel 5**)

Beide automatischen Extraktionen lieferten die Bruchkanten des Deiches, der Priele und Entwässerungsgräben, die Geripplinien der Gruppenstrukturen sowie die Abbruchkante des Vorlandes zum Wattenmeer hin. Die Deichform wurde vollständig erkannt. Problematischer waren die Strukturen mit einem Höhenunterschied von weniger als 2m (Entwässerungsgräben, Prielkanten und die Geripplinien der Gruppen).

Bei beiden Verfahren war der geringe Höhenunterschied eine Ursache für die Probleme bei der Kantendetektion. Die Programmversion 4.3 von C+B-DHM-Laser ist für topographische Anwendungen mit Höhenunterschieden größer als 2m implementiert. Die topographische Implementierung kann durch Skalierung der Höhen vor der Kantenberechnung oder durch Berechnung der Kantenpunkte aus den Schnittwinkeln der Tangentialebenen an die Laserpunkte umgangen werden.

HALCON ermittelt die Kanten über Grauwertunterschiede, die mit den Steigungsänderungen im gesamten Gelände übereinstimmen. Zum Beispiel verläuft die Muldenlinie einer Gruppe von Nord nach Süd. Die Kante liegt im nördlichen Bereich zwischen dem Grauwert 90 und 100 und im südlichen Bereich zwischen 80 und 90. Wird das Schwellwertintervall so groß gewählt, das es die gesamte Kante umfaßt (Intervall von 80-100), wird mehr als nur die Kantenregion selektiert. Diese nicht gewünschten Linien müssen durch den Auswerter eliminiert werden.

Ein allgemeines Problem der Laserscanneraufnahme ist die Verflachung des Geländes durch die punktweise Erfassung von gekrümmten Linien. Da Sprünge oder kurze steile Anstiege im Geländeprofil, die zwischen zwei aufgenommenen Punkten liegen, nicht miterfaßt werden. Die Extraktion von Kanten aus den Laserdaten anhand einer bestimmten Anzahl von Punkten stellt eine Generalisierung der realen Kanten dar, das heißt, es erfolgt eine vereinfachte

Darstellung gekrümmter Linien durch Punkte in gewissen Abständen. Sind die gewählten Punkte (gemessene Laserpunkte) repräsentativ für das Gelände in Bezug auf Steigung, Morphologie, dann liefert eine automatische Extraktion ein gutes Ergebnis. Für stark gekrümmte Strukturen muß die Punktdichte auf der Kante wesentlich größer sein als bei einer Geraden. Die Bruchkanten und hier im besonderen die Abbruchkante im Gebiet Priel sind Beispiele dafür.

Durch einen stetigen Punktabstand können die Steigungsänderungen auf Zwischenpunkten nicht erfaßt werden. Die Steigungsänderung wird über den gesamten Anstieg gleichmäßig verteilt. Sprünge im Gelände können verloren gehen. Das heißt, bei einem 1m-Punktraster können bei diesem flachen Gelände mit kleinförmigen und nah beieinanderliegenden Strukturen Kanten nicht miterfaßt werden.

Im Anschluß an die Kantenbestimmung sind die Extraktionen auf ihre korrekte Lage im Geländeprofil überprüft worden.

Alle im Kapitel 2.2 aufgeführten Datensätze sind auf ihre Tauglichkeit bezüglich eines Vergleiches oder ihrer Verknüpfung mit Laserdaten getestet worden (**Kapitel 6**).

Eine Kombination der Ergebnisse mit den anderen bereitgestellten Datenquellen war qualitativ nicht möglich. Die DGK5 erfüllt nicht die Lagegenauigkeit und GPS-Messungen im Gebiet selbst standen nicht zur Verfügung. Die Luftbildaufnahmen sind im Fall der Color-IR-Bilder in einem zu großen Zeitabstand von den Laserdaten geflogen worden (1 Jahr und 4 Monate). Die SW-IR-Luftbilder sind ausgewertet worden, sie werden aber nur für einen optischen Vergleich herangezogen. Eine Luftbildauswertung ist bei einem sehr schmalen Gebiet schwierig, da die Paßpunkte für die Rekonstruktion der Orientierung nicht optimal über das Luftbild verteilt werden können. Über die in dem untersuchten Gebiet maximal 600m breite Insel Juist konnten die Paßpunkte nur schlecht verteilt werden, so daß die Genauigkeit der Luftbildauswertung einen qualitativen Vergleich nicht erlaubte.

Allgemein wären für den Vergleich zeitgleiche bzw. zeitnahe Aufnahmen von Luftbildern, GPS-Messungen und den Profilmessungen wünschenswert gewesen.

Zusätzlich zu den Koordinaten aus der Lasermessung könnten die Intensitätswerte des Laserimpulses während der Messung zu einer weiteren Verbesserung des Untersuchungsergebnisses beitragen.

Die Kontrolle der Küstenschutzmaßnahmen und der Veränderungen im Deichvorland können durch Laserscannermessungen erfolgen. Eine nähere Untersuchung der Genauigkeit der extrahierten Kanten -besonders im Bereich der Grüppen- erfordert einen qualitativen Vergleich zum Beispiel mit einer Luftbildauswertung. Durch die Aufteilung des gesamten Gebietes in drei Teilgebiete ist der Arbeitsaufwand minimiert worden, da vor allem relevante Strukturen erkannt wurden.

Wenn in der Zukunft die Veränderungen im Deichvorland kontinuierlich überwacht werden sollen, müssen sich die naturbedingten Abweichungen bzw. die von Menschen durchgeführten Schutzmaßnahmen (Grüppen, Lahnungen) in der Morphologie signifikant von den Meß- und Auswertegenauigkeiten unterscheiden.

Bei einer Höhengenaugigkeit der Laserscannermessung von 1-3dm und Bodenerhöhungen im Bereich der Grüppen von bis zu 1dm pro Jahr sind Folgemessungen alle 5 Jahre sinnvoll.

8 Literatur

- | | | | |
|----|--|--|---|
| 1 | <i>Axelsson, Peter</i> | Processing of laser scanner data-
algorithms and applications | ISPRS*53,
S.138-147,
1999 |
| 2 | <i>Brügelmann, Regine</i> | Automatic breakline detection from
airborne laser range data | IAPRS*, Band XXXIII,
Teil B3, S. 109 –114,
Amsterdam 2000 |
| 3 | <i>C+B-Technik mbH</i> | C+B-DHM-Laser Version 3.0 | Juli 1999 |
| 4 | <i>Eckstein, W. /
Munkelt, O.</i> | Extracting objects from digital
terrain models | Proc. SPIE, Vol. 2572,
S.43-51,
1995 |
| 5 | <i>Gomes Pereira,
L.M. / Wicherson,
R.J.</i> | Suitability of laser data deriving
geographical information | ISPRS** 54, S. 105-
114,
1999 |
| 6 | <i>Haberäcker, Peter</i> | Digitale Bildverarbeitung
-Grundlagen und Anwendungen- | Carl Hanser Verlag,
4. Auflage, 1991 |
| 7 | <i>Hake, Günter /
Grünreich, Dietmar</i> | Kartographie | de Gruyter, 7. Auflage,
1994 |
| 8 | <i>Huising, E.J. /
Gomes Pereira,
L.M.</i> | Errors and accuracy estimates of
laser data acquired by various laser
scanning systems for topographic
applications | ISPRS** 53, S.245-
261,
August 1998 |
| 9 | <i>Jähne, Bernd</i> | Digitale Bildverarbeitung | Springer-Verlag 1989 |
| 10 | <i>Klette, Reinhard /
Zamperoni, Piero</i> | Handbuch der Operatoren für die
Bildbearbeitung | Vieweg, 2. Auflage,
1995 |
| 11 | <i>Kraus, K. /
Pfeiffer, N.</i> | A new method for surface
reconstruction from laser scanner
data | IAPRS*, Band XXXII,
Teil 3-2W3, S.80-86,
Haifa, Israel 1997 |
| 12 | <i>Linder, Wilfried</i> | Geo-Informationssysteme
- Handbuch zum Programm LISA - | Springer-Verlag 1999 |

- 13 *Lohmann, Peter / Koch, Andreas* **Quality assessment of laser-scanner-data** IPI*** 1999
- 14 *Lohmann, Peter / Koch, Andreas / Schaeffer, Michael* **Approaches to the filtering of laser-scanner data** ISPRS**, Band XXXIII, Amsterdam 2000
- 15 *Marr, D.* **Vision: A computational investigation into human representation and processing of visual information** W.H. Freeman and Company, New York, 1982
- 16 *MVTec Software GmbH* **HALCON Version 5.2**
- HDevelop User's Manual 21.4.1999
- HDevelop Reference Manual 27.7.2000
- 17 *Petzold, Bettina / Reiss, Peter / Stössel, Wolfgang* **Laser scanning – surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models** ISPRS** 54, S.95-104, 1999
- 18 *Reiche, Andreas / Schönemeier, Peter / Washausen, Manfred* **Der Einsatz des Laserscannerverfahrens beim Aufbau des ATKIS-DGM 5** Nachrichten der Nds. Verm.+Kat.-Verw. Nr.2, 47. Jahrgang Hannover 1997
- 19 *Steinbrecher, Rainer* **Digitale Bildverarbeitung in der Praxis** Oldenbourg Verlag 1993
- 20 *Von Hansen, W. / Vögtle, T.* **Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laserscanner-Aufnahmen** PFG****, Heft 4, S.229-236, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung 1999
- 21 *Wild, Dietmar / Krzystek, Peter* **Automatic breakline detection using edge preserving filter** IAPRS*, Band XXXI, Teil B3, S. 946-952, Wien 1996

Internetadressen:

- <http://www.dagm.de>
- <http://fpk.tu-berlin.de>
- <http://www.geolas.com>
- <http://geowww.ewf.uni-kiel.de/forum>
- <http://www.isle-juist.com>
- <http://www.lpr.ei.tum.de>
- <http://mu.niedersachsen.de/Nationalparke/oekologie.html>
- <http://www.mvtec.com>
- <http://radig.informatik.tu-muenchen.de>
- <http://www.uni-duesseldorf.de/MathNat/Geo>

* IAPRS: Internationale Archive der Photogrammetrie und Fernerkundung

** ISPRS: Journal der Photogrammetrie und Fernerkundung

*** IPI: Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen

**** PFG: Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

Anhang I

Protokolldateien von C+B-DHM-Laser

C+B-DHM-LASER: Programm-Protokoll

==> Neues Projekt erzeugt

==> Einlesen von Ascii-Daten (Zeit= 9:41:9)

Ascii-Datei: C:\ANDREA\DATEN\25645948.GRD
Punkte-Datei: C:\ANDREA\DATEN\25625948.PKT

Ascii-Format: Code Linie Rechts Hoch Höhe
ab Spalte: 2 0 7 19 31
Länge: 3 0 10 10 10
Anzahl Zeilen überlesen: 1

Anzahl definierter Codes: 2

Code von / bis : gelesen Ausschnitt Anz.Linien
0 1 : 966059 966059

Bereiche:

Daten	Rechts	Hoch	Höhe
Minimum:	2564000.000	5948891.350	-1.280
Maximum:	2566000.000	5950000.000	14.350

Anzahl Punkte in Punkte-Datei= 2119853 (alt= 1153795)

Ende Einlesen (Zeit= 9:42:48)

==> Einlesen von Ascii-Daten (Zeit= 9:44:49)

Ascii-Datei: C:\ANDREA\DATEN\25645948.VEG
Punkte-Datei: C:\ANDREA\DATEN\25625948.PKT

Ascii-Format: Code Linie Rechts Hoch Höhe
ab Spalte: 2 0 7 19 31
Länge: 3 0 10 10 10
Anzahl Zeilen überlesen: 1

Anzahl definierter Codes: 2

Einlesen von Vegetationspunkten

Code von / bis : gelesen Ausschnitt Anz.Linien
0 1 : 37185 37185

Bereiche:

Daten	Rechts	Hoch	Höhe
Minimum:	2564000.020	5948915.140	-0.500
Maximum:	2565999.930	5949999.990	21.740

Anzahl Punkte in Punkte-Datei= 2157038 (alt= 2119853)

Ende Einlesen (Zeit= 9:45:8)

==> DHM-Datei erzeugt: C:\ANDREA\DATEN\25625948.DHM

Koord: R= 2562800.00 H= 5948900.00 Z= -100.50
Raster: dx= 1.00 dy= 1.00 dz= 0.02
Anz.Lin nx= 1601 ny= 1001

==> Ausgabe von geprüften Laserscanner-Punkten (Zeit= 9:57:12)

Punkte-Datei: C:\ANDREA\DATEN\25625948.PKX

Parameter:
Toleranz für Höhe = 0.30
Toleranz für Entfernung: Höhe pro m = 0.05
Toleranz für Neigung: Höhe pro 10 % = 0.15
erweiterte Toleranz für tiefere Punkte = 0.80
maximale Entfernung zum Nachbarpunkt = 20.00

Punktart: Anzahl aussort einsort +Abw. -Abw.
Bodenpkt: 787531 1281 0.77 1.25
Vegetat.Pkt: 37608 13265 0.41 0.08

Ende der Ausgabe (Zeit= 9:57:12)

==> Einlesen von geprüften Punkten (Zeit= 10:0:21)
mit Original-Höhen (Punkte)

Pkx-Datei: C:\ANDREA\DATEN\25625948.PKX
Punkte-Datei: C:\ANDREA\DATEN\25625948.PKT

Typ: gelesen gespeichert
Bodenpunkt: 786250 786250
einsort. Veget.Punkt: 13265 13265
Vegetationspunkt: 24343 24343
aussort. BodenPunkt: 1281 1281

Bereiche:

Daten	Rechts	Hoch	Höhe
Minimum:	2562800.000	5948900.000	0.240
Maximum:	2564400.000	5949900.000	15.880

Anzahl Punkte in Punkte-Datei= 825139 (alt= 0)

Ende des Einlesens (Zeit= 10:1:3)

==> DHM-Datei erzeugt: C:\ANDREA\DATEN\Gebiet1\25625948.DHM

Koord: R= 2563500.00 H= 5949500.00 Z= -100.50
Raster: dx= 1.00 dy= 1.00 dz= 0.02
Anz.Lin nx= 901 ny= 401

==> Rechnerische Ableitung von Geländekanten (Zeit= 10:28:5)

Anzahl Knickpunkte: 44539 von 154742 Punkten
Kriterium Winkel: 44468
Kriterium Höhengsprung: 71

Anzahl Vegetationspunkte = 0
Anzahl erzeugter Linienabschnitte = 5192
Anzahl Linien nach Integration = 2493

Linienausgleich 1:
Profilbreite = 0.00
Linienkombination: Abstand = 5.00 Öffnungswinkel = 100
Anzahl Linien nach Linienausgleich = 1579

Linienausgleich 2:
Anzahl Linien nach Kantenausgleich = 1419

Parameter Linienlängen: kurz < 10m lang > 50m
Zuschläge Kantenprüfung: pro Steigung= 0.10m pro Abstand= 0.05m

Anzahl Linien: kurz Prüfung lang
1419: 861 513 45

Parameter	Anzahl Linien mit Signifikanz				mittl. Sign. lange Linien	
	< 0.70	< 1.00	< 1.30	> 1.30		
Kantenwinkel=	0.30	174	94	65	109	1.39
Kantenform=	1.00	174	94	65	109	1.39
Steigung=	0.20	181	90	64	107	1.37
Punktprüfung=	0.50	181	90	64	107	1.37

Wandlung Doppelkante in Einfachkante: Anzahl Punkte= 16935
Parameter Breite= 2.0m gewandelt= 6661
Parameter Länge= 75.0m gewandelt= 1092
Anzahl Schnitte entfernt: 184 (0)
Linienausgabe: Anzahl Linien= 427
mittlere Anzahl Punkte= 3 mittlere Länge= 70.2m

Ende der Kantenableitung (Zeit= 10:29:9)

==> DHM-Berechnung: (Zeit= 10:29:49)

Punktemodell: Anzahl Punkte= 185766 (gelesen= 353139)
Entfernungsmodell: Maximalwert= 11
Tangentenpunkte: Anzahl= 147032
Verbindungslinien: Anzahl Punkte= 194213
Knoten-,Grenzpunkte: Anzahl= 72257, 0
Zwischenlinien: Anzahl Punkte= 82039
Zwischenräume: Anzahl Punkte= 1041
Ausdehnungsräume: Anzahl Punkte= 213

Ende DHM-Berechnung= (Zeit= 10:29:57)

==> Projekt gespeichert als: C:\Andrea\Daten\Gebiet1\proj_gebiet1.xhm

==> Protokoll gespeichert als: C:\Andrea\Daten\Gebiet1\prot_gebiet1.prt

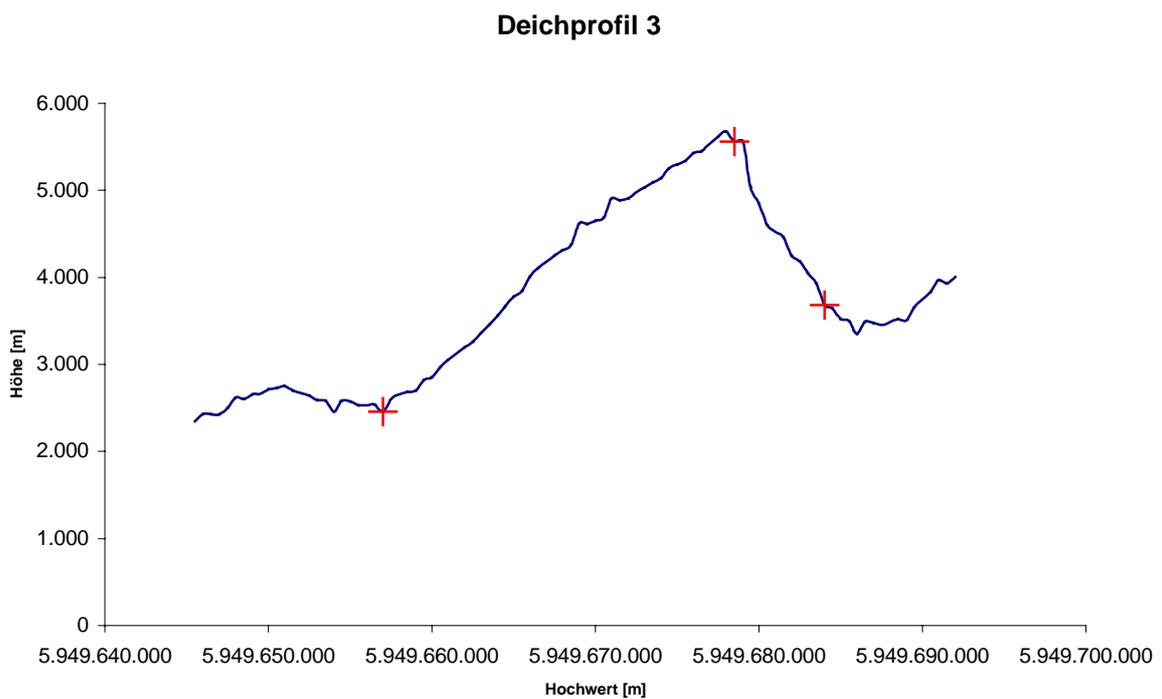
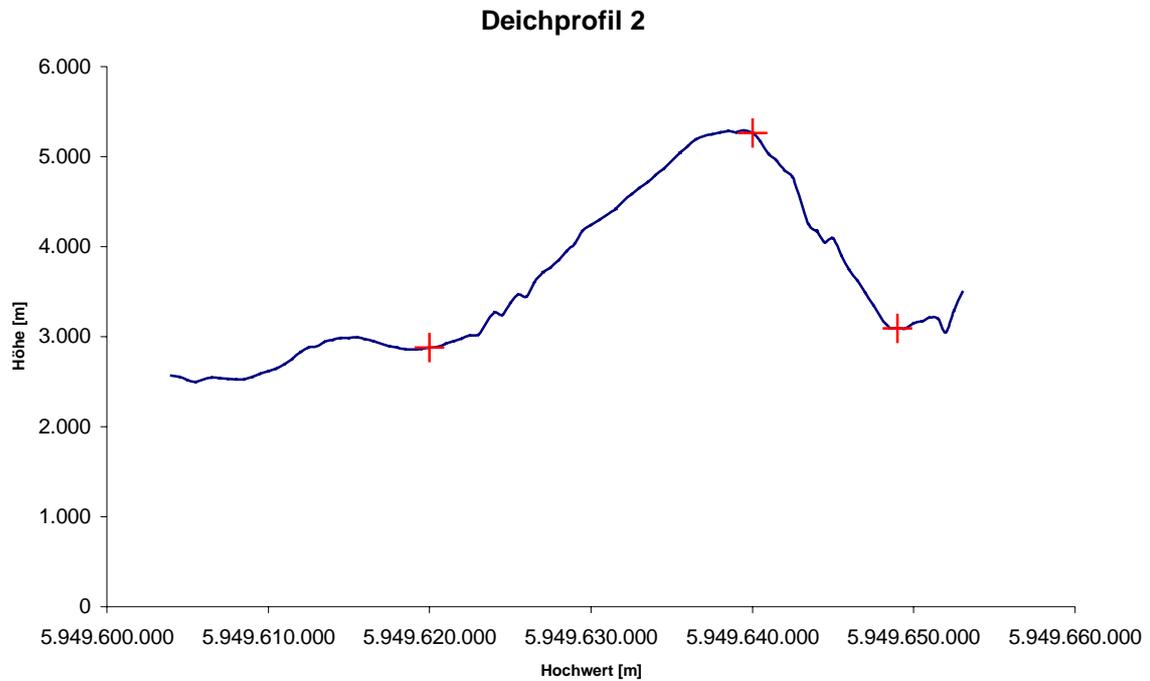
==> Fortsetzung

Protokoll: D:\Anhang\prot_gebiet1.txt

Anhang II

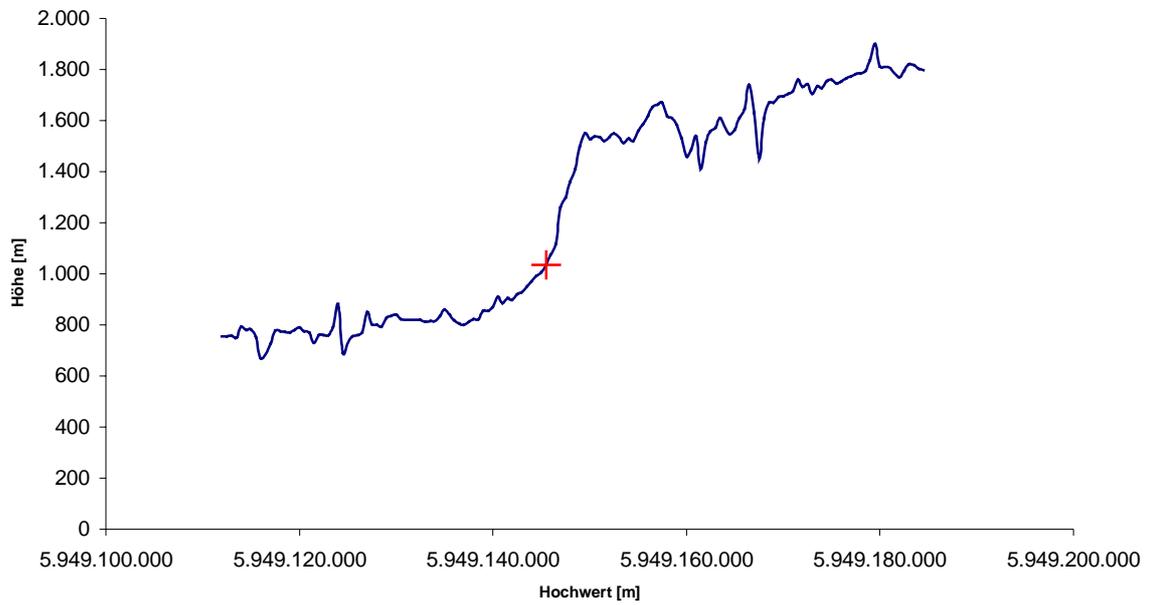
Weitere Profile zur Überprüfung der Kanten aus C+B-DHM-Laser

Deichprofile:

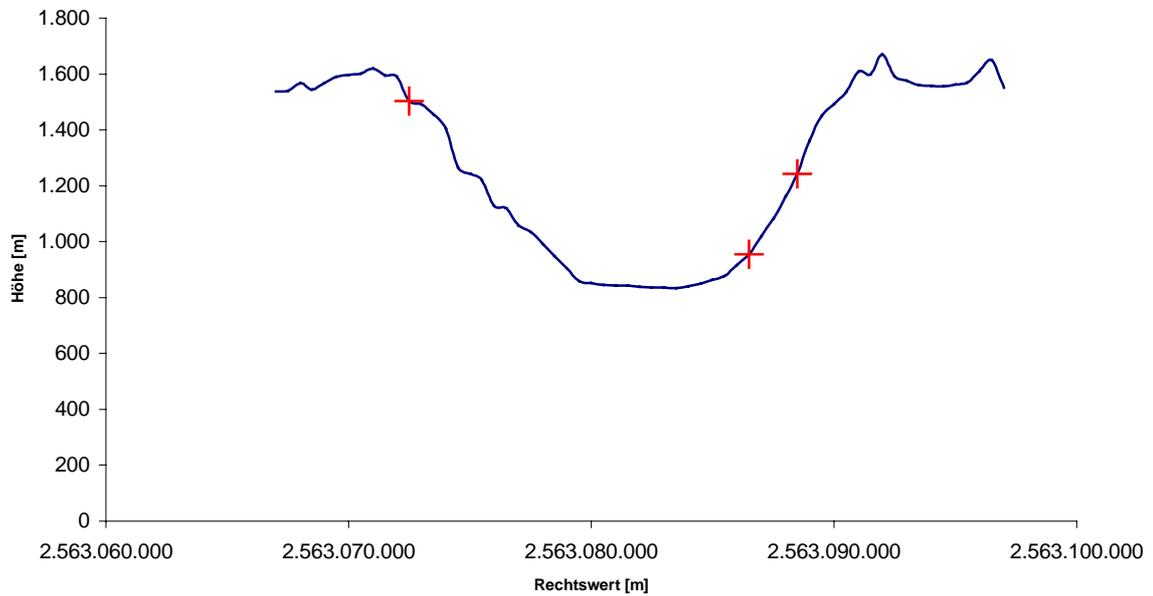


Prielprofile:

Abbruchkantenprofil 1

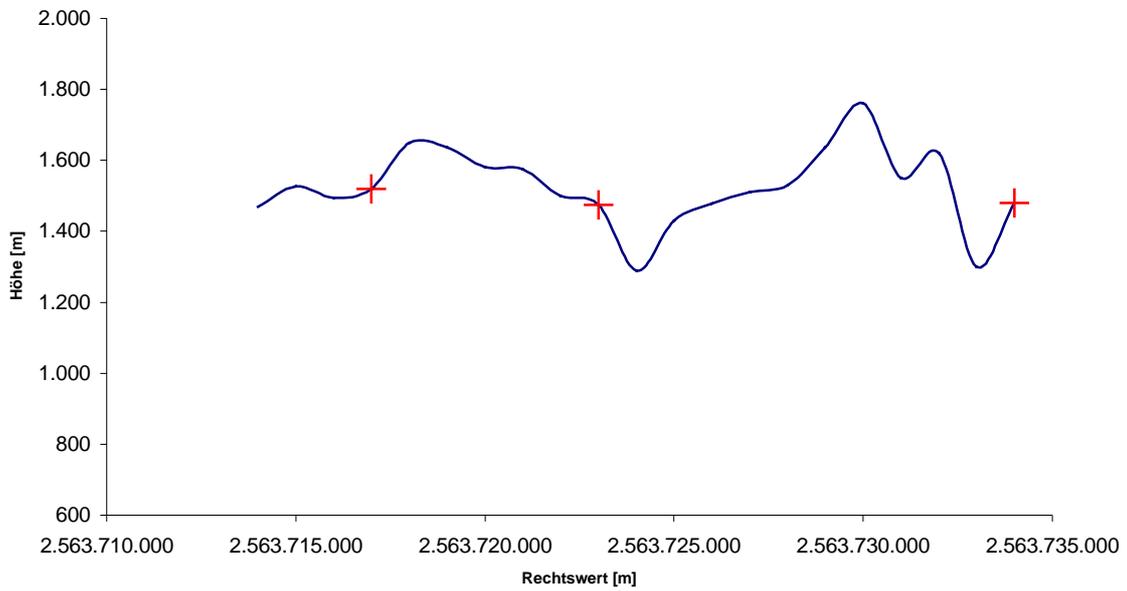


Prielquerschnitt

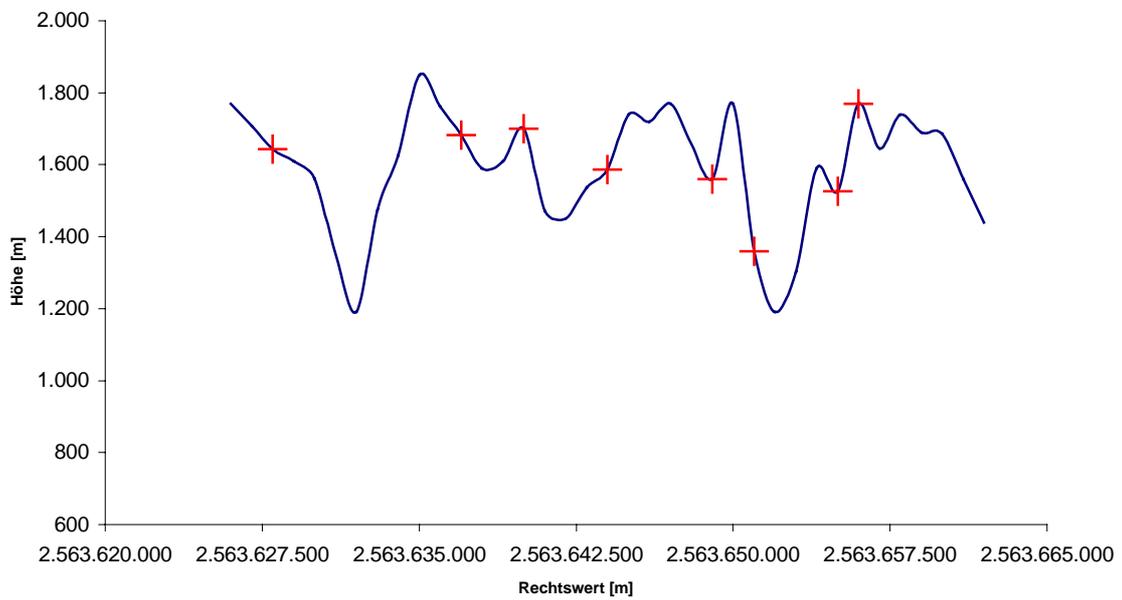


Gruppenprofile:

Gruppenprofil 1



Gruppenprofil 2

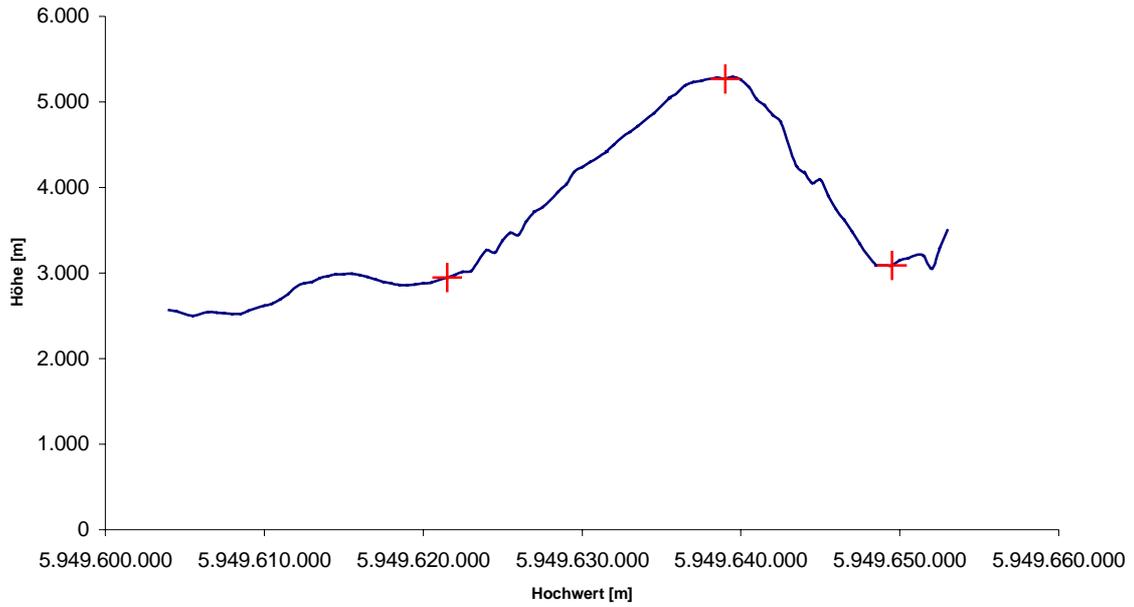


Anhang IV

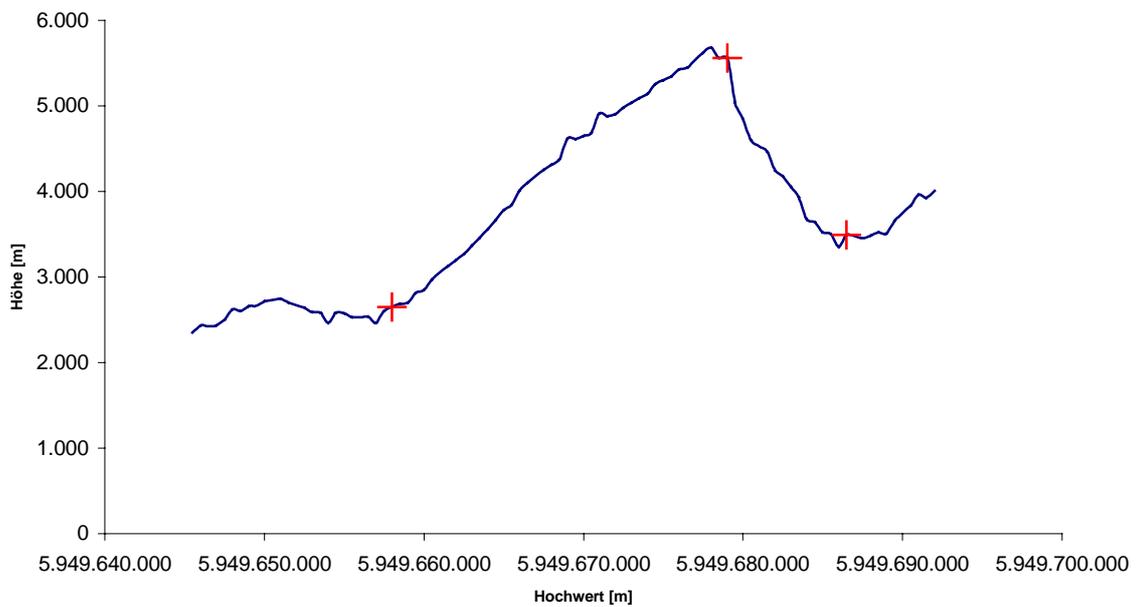
Weitere Profile zur Überprüfung der Kanten aus HALCON

Deichprofile:

Deichprofil 2

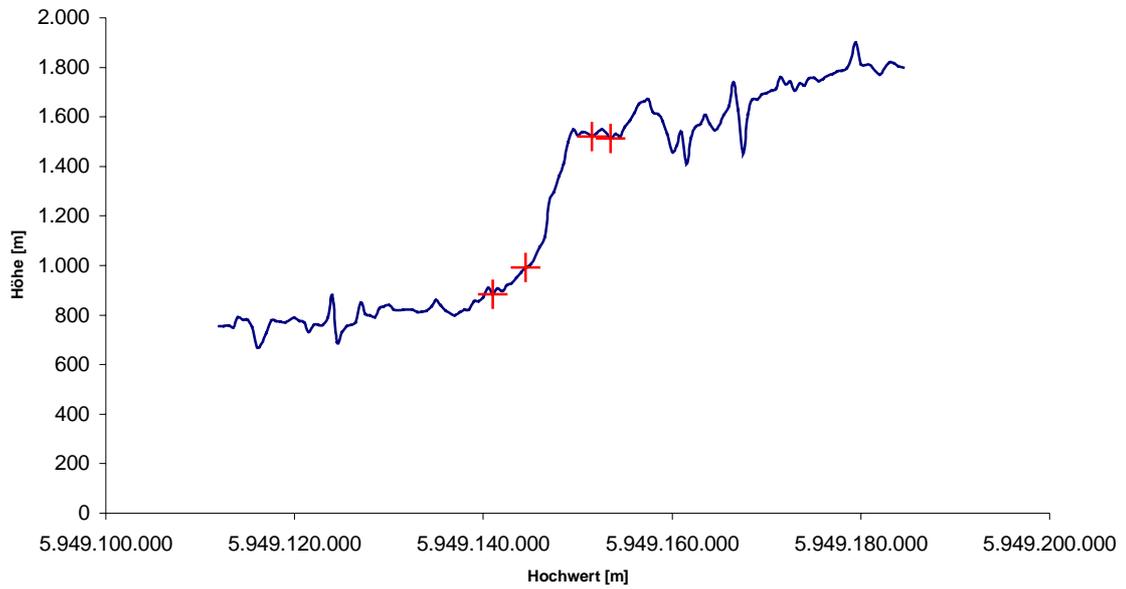


Deichprofil 3

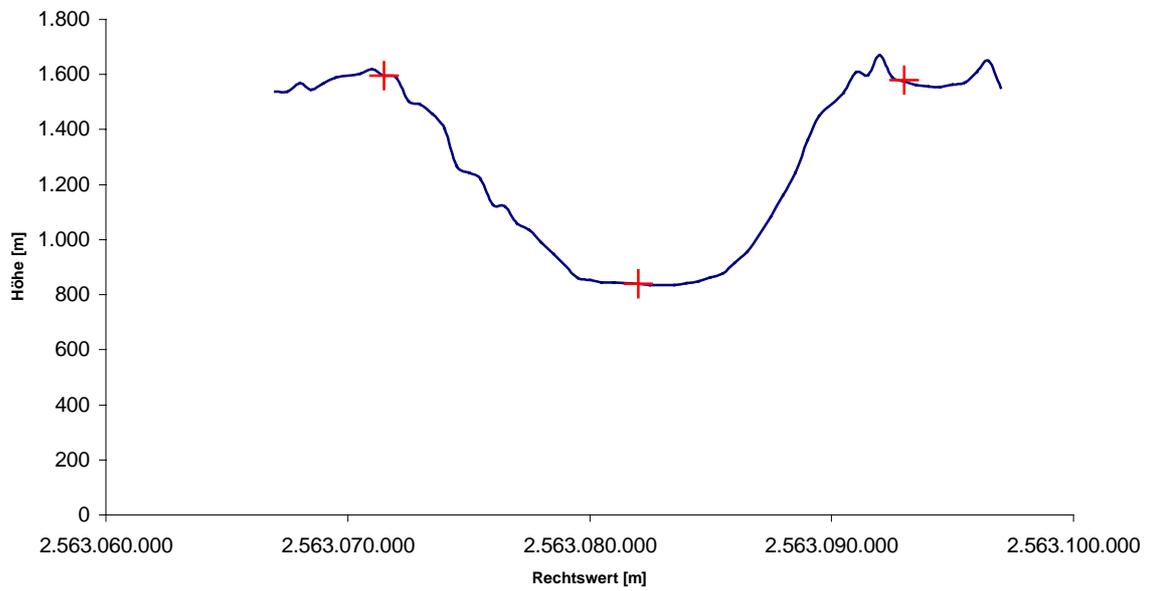


Prielprofile:

Abbruchkantenprofil 1

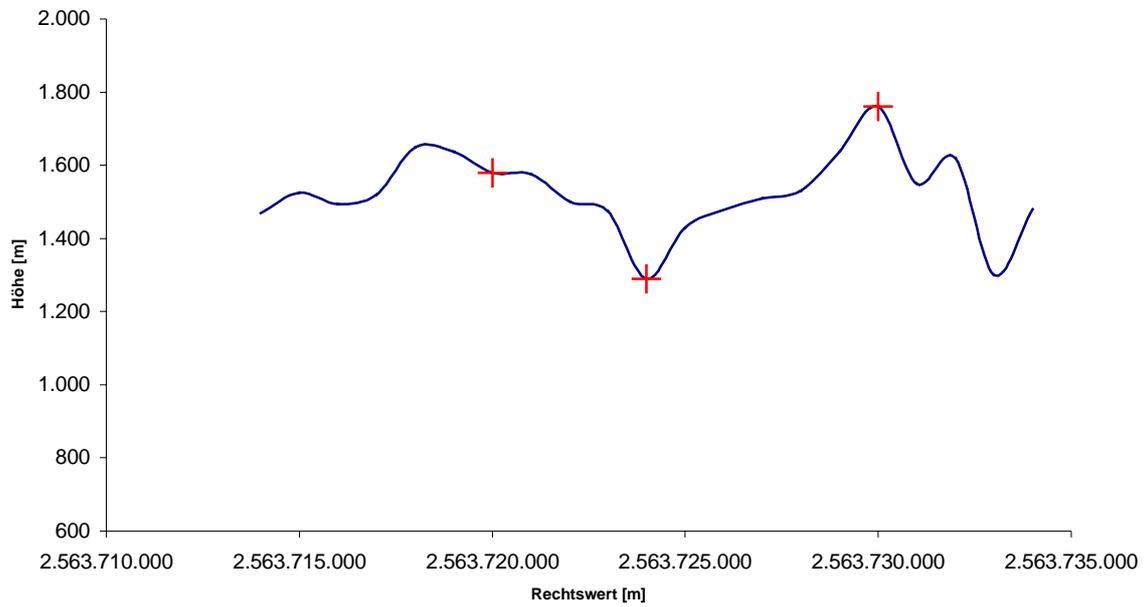


Prielquerschnitt



Gruppenprofile:

Gruppenprofil 1



Gruppenprofil 2

