

# Automatische Ableitung von Strukturlinien aus 3D-Punktwolken

**GOTTFRIED MANDLBURGER<sup>1</sup>, JOHANNES OTEPKA<sup>1</sup>, CHRISTIAN BRIESE<sup>2</sup>, WERNER MÜCKE<sup>2</sup>,  
GERHARD SUMMER<sup>1</sup>, NORBERT PFEIFER<sup>1</sup>, SVEN BALTRUSCH<sup>3</sup>, CARSTEN DORN<sup>4</sup> &  
HERBERT BROCKMANN<sup>5</sup>**

*Zusammenfassung: Eine Methode zur automatischen Ableitung von 3D-Strukturlinien auf Basis von 3D-Punktwolken wird vorgestellt. Aufbauend auf einem Digitalen Geländemodell wird der 2D-Verlauf der Strukturlinien mittels des Canny Algorithmus näherungsweise ermittelt. Die detaillierte 3D-Modellierung erfolgt anschließend durch den Schnitt von elementaren Teilflächen (Ebene, Kegel, Polynomialer Zylinder), die aus den originalen 3D-Punkten abgeleitet werden. Das Verfahren wurde auf sechs Testgebiete mit Daten unterschiedlicher Messmethode (Airborne Laserscanning, Bildmatching) und Punktdichte (1-16 Punkte pro m<sup>2</sup>) angewendet. Bereiche mit ausgeprägtem Steigungswechsel (>8°) werden zuverlässig rekonstruiert. Manuelle Nachbearbeitung ist in Gebieten mit geringer Ausgeprägtheit und Datendichte erforderlich.*

## 1 Einleitung

Ein modernes Digitales Geländemodell (DGM) repräsentiert die reale Geländeform objektiv auf Grundlage von möglichst homogen verteilten Messwerten ohne Hervorhebung oder Generalisierung. Auf Grund des großen, universell nutzbaren Informationsgehalts und der resultierenden hohen Wirtschaftlichkeit, ist Airborne Laserscanning (ALS) (SHAN & TOTH 2009; VOSSELMAN & MAAS 2010) das Standardaufnahmeverfahren im Sinne der anerkannten Regeln der Technik. Daneben gewinnt in letzter Zeit auch die Geländeerfassung durch Bildkorrelation (Dense Image Matching, DIM) zunehmend an Bedeutung (HIRSCHMÜLLER 2013; ROTHERMEL et al. 2015). In beiden Fällen ist das Ergebnis eine dichte Menge an 3D-Datenpunkten (3D-Punktwolke). Linienhafte interaktive Aufnahmen (Höhenlinien und/oder 3D-Strukturlinien) finden ressourcenbedingt nur noch punktuell Anwendung und sind eine Ausnahme bei speziellen Anforderungen.

Allerdings werden für vielfältige Aufgaben 3D-Strukturlinien (3D-Bruch/-Geländekanten oder 3D-Formlinien) als ein Basisprodukt zur Bereitstellung nutzerorientierter geotopographischer Produkte gewünscht/benötigt. U.a. zur:

---

<sup>1</sup> Technische Universität Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Gusshausstr. 27-29, A-1040 Wien, E-Mail: [gottfried.mandlburger, johannes.otepka, norbert.pfeifer]@geo.tuwien.ac.at

<sup>2</sup> EODC Earth Observation Data Centre for Water Resources Monitoring GmbH, A-1040 Wien, E-Mail: [christian.briese, werner.mücke]@eodc.eu

<sup>3</sup> Amt für Geoinformation, Vermessungs- und Katasterwesen, Postfach 12 01 35, D-19059 Schwerin, E-Mail: sven.baltrusch@laiv-mv.de

<sup>4</sup> Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation, Schaperstraße 16, D-65195 Wiesebanden, E-Mail: carsten.dorn@hvbh.hessen.de

<sup>5</sup> Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, D-56068 Koblenz, E-Mail: Brockmann@bafg.de

- Vervollständigung des Grunddatenbestandes im Sinne der GeoInfoDok (AdV 2016) unter Beachtung des AAA-Standards,
- topographischen Modellierung im ATKIS Basis-DLM,
- kartographischen Ausgestaltung der ATKIS DTK-Reihe,
- optimierten Ableitung von Digitalen Orthophotos (DOP),
- Modellierung von Digitalen Geländemodellen des Wasserlaufs (DGM-W),
- hydrodynamisch-numerischen Modellierung.

In diesem Kontext ist nach wie vor keine automatisierte oder zumindest weitestgehend automatisierte praxisreife Lösung zur Ableitung von 3D-Strukturlinien aus 3D-Punktwolken, aus hoch aufgelösten ALS- oder Bildkorrelationsdaten verfügbar. Eine adäquate Lösung wird aber aus fachlichen und wirtschaftlichen Gründen benötigt, da ressourcen- und zeitbedingt rein interaktive Erfassungen von 3D-Strukturlinien nicht mehr realisierbar sind. Im Zuge dessen wurde die TU Wien mit der Lösung dieser Fragestellung in Form einer Fachstudie beauftragt, die gemeinsam mit dem Earth Observation Data Centre for Water Resources Monitoring (EODC) durchgeführt wurde. Im vorliegenden Artikel werden die Ergebnisse dieser Studie präsentiert.

Der weitere Artikel ist wie folgt gegliedert. Abschnitt 2 enthält einen Abriss bestehender Ansätze. In Abschnitt 3 werden die Datensätze vorgestellt, auf denen die in Abschnitt 4 erläuterte Verfahrenslösung exemplarisch angewandt wurde. Die Präsentation und Diskussion der Ergebnisse erfolgt Abschnitt 5 und im Abschnitt 6 werden die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst.

## 2 State-of-the-art

Existierende Ansätze für die Modellierung von Strukturlinien arbeiten entweder rasterbasiert oder direkt auf der 3D-Punktwolke. Zu Ersteren zählen u.a. die Arbeiten von BRÜGELMANN (2000), GOMES-PEREIRA & WICHERSON (1999) und SUI (2002). Typischerweise werden dabei, ausgehend von einem vorab erstellten DGM, durch die Anwendung unterschiedlicher Kantendetektionsalgorithmen (Sobel-Operator, Canny, etc.) 2D Linienpixel ermittelt, diese anschließend vektorisiert und die Höhe aus dem DGM übernommen. In WEHR & DUZELOVIC (2009) ist ein Verfahren beschrieben, welches die Detektion von Liniensegmenten anhand eines gefilterten TIN (Triangulated Irregular Network) vornimmt. Auch in diesem Fall erfolgt die Modellierung auf DGM-Basis. Bei allen gängigen DGM-Filterverfahren (PFEIFER & MANDLBURGER 2008) kommt es allerdings im Bereich von konvexen Geländekanten zum Ausrunden der in der Punktwolke relativ scharf abgebildeten Geländeunstetigkeiten (SITHOLE & VOSSELMANN 2004).

Im Gegensatz zu den o.a. Verfahren erfolgt die 3D-Modellierung bei BRIESE (2004) und BRZANK et al. (2009) ausgehend vom näherungsweise bekannten 2D-Strukturlinienverlauf daher direkt auf der 3D-Punktwolke und basiert auf dem Konzept des Verschnittes von lokalen Ebenenpaaren. Die Bestimmung der Ebenen erfolgt dabei für jedes Teilstück (im Folgenden: Patch) unter der Berücksichtigung von individuellen Punktgewichten. Das a-priori Gewicht eines Punktes ergibt sich aus seiner Lage im Bezug zur Näherungskante, wobei das Gewicht quer zur Kantenrichtung mit zunehmender Entfernung von der Näherung und in Längsrichtung mit zunehmendem Abstand

von der Mitte des Patches abnimmt. Im Zuge einer Ausgleichung werden die beiden Ebenen links und rechts der Kante derart bestimmt, dass die Quadratsumme der vertikalen Abstände zwischen den Datenpunkten und den Ebenen minimal wird. Die automatische Elimination von Vegetationspunkten gelingt dabei durch robuste Schätzung (d.h. iteratives Anpassen der a-priori Punktgewichte in Abhängigkeit der Verbesserungen). In BRIESE et al. (2010) ist dieser Ansatz zu einer vollautomatischen Methode weiterentwickelt worden, wobei die Kantendetektion durch Analyse der Hauptkrümmungen in den Datenpunkten erfolgt. Die Anwendung dieses Konzepts im hydraulischen Kontext ist in BROCKMANN et al. (2010) beschrieben. Die im Abschnitt 4 beschriebene Verfahrenslösung baut betreffend der 3D-Modellierung auf BRIESE (2004) auf und verwendet zur Kantendetektion einen rasterbasierten Ansatz ausgehend vom DGM.

### 3 Datensätze

Zur Erarbeitung der Verfahrenslösung für eine weitestgehend automatische Ableitung von 3D-Strukturlinien standen im Rahmen der in Abschnitt 1 erwähnten Fachstudie 3D-Punktwolken von 6 Testgebieten mit einer Fläche von jeweils 4 km<sup>2</sup> zur Verfügung. Die Datenerfassung erfolgte dabei für zwei Gebiete rein Luftbild-basiert mittels DIM (Punktabstand: 20-30 cm) und für drei Gebiete mittels ALS (Punktdichte: 1.5-9 Punkte/m<sup>2</sup>).

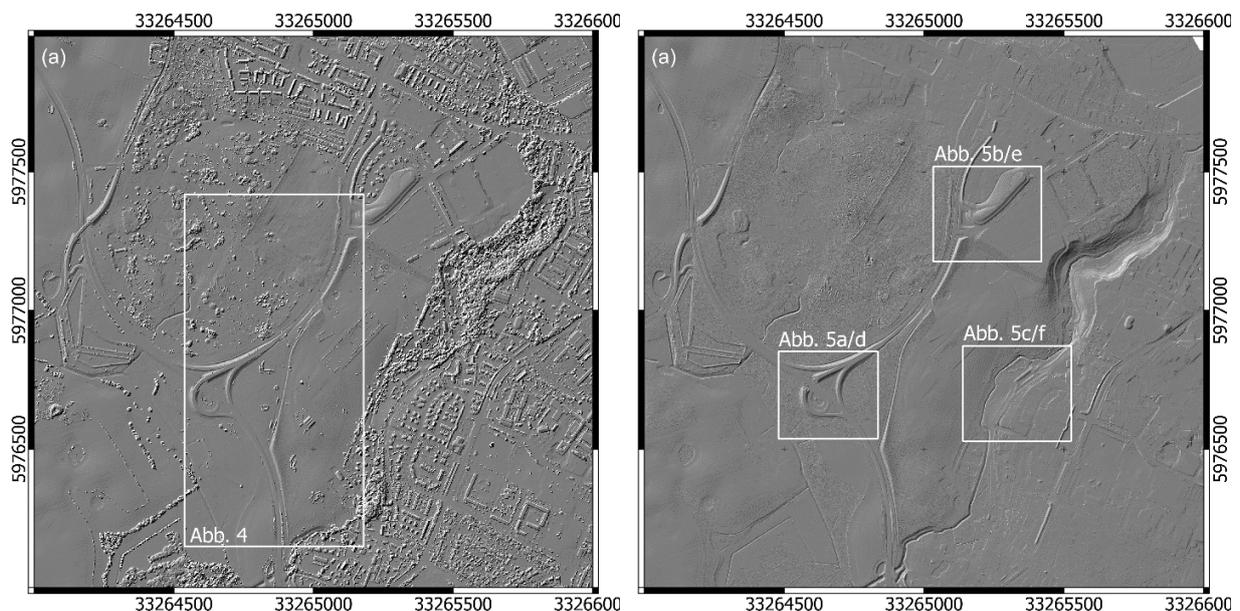


Abb. 1: Testgebiet Hansestadt Wismar; (a) Schummerung DIM-Oberflächenmodell; (b) Schummerung ALS-Geländemodell; Bezugssystem: ETRS89/UTM, Daten: AfGVK M-V

Für den vorliegenden Artikel wurde ein Datensatz aus dem Bearbeitungsgebiet Hansestadt Wismar (Abbildung 1) herangezogen, für den sowohl eine DIM- als auch eine ALS-Punktwolke vorlagen. Das dichte Matching wurde mit einem Bildmaterial aus dem Jahr 2012 (Überlappung: 80% längs, 60% quer; Ground Sampling Distance: 10 cm) durchgeführt, und die resultierende 3D-Punktwolke weist einen Punktabstand von 30 cm auf (Punktdichte: 11 Punkte/m<sup>2</sup>). Die ALS Daten stammen aus einer Befliegung aus 2014 mit einer mittleren Bodenpunktdichte von 16 Punkten/m<sup>2</sup>.

## 4 Methode

Die Methode zur Ableitung von 3D-Strukturlinien ist zweistufig (Detektion/Modellierung) und ist in den folgenden Unterabschnitten beschrieben.

### 4.1 2D-Detektion von Strukturlinien

Aus der 3D-Punktwolke werden zunächst durch Anwendung geeigneter Filterverfahren (PFEIFER & MANDLBURGER 2008) die Bodenpunkte extrahiert und aus diesen mittels Flächeninterpolation (KRAUS 2000) ein DGM berechnet. Dieses DGM bildet die Basis für die Ableitung der 2D-Näherungen der Strukturlinien. Dazu wird zunächst ein Neigungsmodell in der Einheit [°] abgeleitet und darauf der aus der Bildverarbeitung bekannte Canny-Kantendetektions-Algorithmus (CANNY 1986) angewandt. Die resultierende binäre Rasterkarte wird vektorisiert und zusammenhängende Pixel zu Linienzügen zusammengefasst, die an Einmündungs- bzw. Kreuzungspunkten enden. In einem anschließenden Verarbeitungsschritt wird die Linientopologie automatisch überarbeitet mit dem Ziel, kleine Lücken im Linienverlauf zu überbrücken und ein Netzwerk möglichst langer Linienzüge herzustellen. Das Resultat ist ein topologisch korrektes Netz von 2D-Näherungslinien. Der gesamte Detektions-Workflow ist in Abbildung 2 dargestellt.

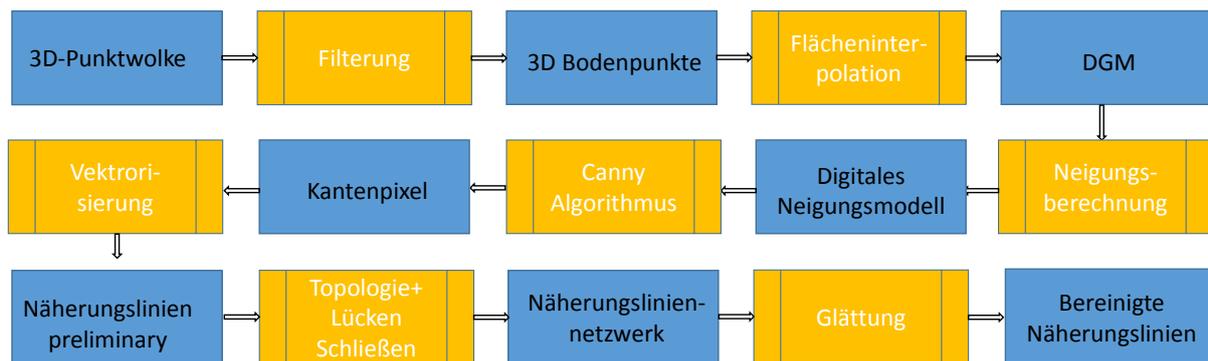


Abb. 2: Workflow zur Ableitung der 2D-Näherungslinien

Der Canny Algorithmus wird durch zwei Schranken gesteuert. Der obere Grenzwert gibt die Neigungsdifferenz an, ab der eine Kante detektiert wird und bestimmt die Anzahl der gefundenen Kanten. Der untere Schwellwert legt fest, bis zu welcher minimalen Neigungsdifferenz die Linie verfolgt wird und definiert daher die Länge der detektierten Kanten. Einerseits entstehen in Bereichen mit geringer Kantenausprägung Lücken im Liniennetz und andererseits kommt es bei komplexen Geländeformen zu Linienknoten, an welchen zusammenhängende Linien bei der Vektorisierung in Teilstücke aufgeteilt werden.

In einem Postprocessing-Schritt werden daher Linien innerhalb eines benutzerdefinierten Suchbereichs automatisch verbunden, sofern die Teillinien hinreichend gleich ausgerichtet sind. Befinden sich innerhalb des Suchradius mehrere Linienenden, dann wird die optimale Verbindung ausgewählt, wobei die Bewertung der Verbindungsgüte im Wesentlichen über den Abstand der Linienenden, sowie die Winkeldifferenz, die Gestrecktheit und die Länge der beteiligten Teillinien erfolgt. Um Unabhängigkeit von der Bearbeitungsreihenfolge zu erreichen wird die Suche der möglichen Verbindungen ausgehend von einem (primären) Linienende für alle gefunden

Linienenden in mehreren Generationen wiederholt. Das Verfahren liefert daher lokal optimale Linienverbindungen. Um den Berechnungsaufwand in Grenzen zu halten, kann die maximale Generationenanzahl vom Benutzer festgelegt werden. Darüber hinaus werden Teillinien, die in einem Linienknoten enden, durch die Anwendung des Kürzesten-Pfad-Algorithmus (Dijkstra 1959) zu möglichst langen Gesamtlinien zusammengesetzt.

## 4.2 3D-Modellierung von Strukturlinien

Die eigentliche 3D-Modellierung der Strukturlinien erfolgt auf Basis der 3D-Punktwolke und den 2D-Näherungslinien. Der Algorithmus startet mit dem Einlesen und dem Aufbau eines TIN aller Näherungslinien, wobei die Linien als Zwangskanten eingehen (Constrained Delaunay Triangulierung). Das TIN dient im Zuge der Modellierung als Begrenzung der Punktselektion auf maximal den Bereich bis zur benachbarten Linie. Außerdem werden aus dem TIN die Kreuzungspunkte extrahiert und für die Topologiebereinigung nach der Modellierung gespeichert. Die Modellierung erfolgt dann linienweise. Eine gesamte Linie wird in lokale, überlappende Patches dynamischer Länge und Breite aufgeteilt. Die Länge der Patches ergibt sich aus der Krümmung der Näherungslinie und der benutzerdefinierten minimalen/maximalen Patchlänge. Je geradliniger der Linienverlauf desto länger kann der Patch gewählt werden, ohne den Linienverlauf dabei zu generalisieren. Die Patchbreite wird generell vom Benutzer vorgegeben und zusätzlich über das TIN der Näherungslinien auf den Bereich bis maximal zur Nachbarlinie begrenzt. Für den derart bestimmten Patchbereich werden alle Punkte aus der 3D-Punktwolke selektiert. Eine weitere dynamische Patchlängenbeschränkung erfolgt noch auf Basis einer benutzerdefinierten maximalen Punktzahl.

Für jeden Patch liegen dann die 3D-Punkte aufgeteilt in zwei getrennte Mengen links und rechts der Näherungslinie vor. Für die nachfolgende Modellierung wird für jeden Punkt auf Basis seiner Lage innerhalb des Patches längs und quer zur Linienrichtung ein individuelles Gewicht berechnet (vgl. BRIESE 2004). Die Bestimmung der 3D-Lage und Orientierung des Patches erfolgt schließlich durch simultane Ausgleichung der folgenden Geometrie-Primitive: (i) Ebene, (ii) Kegel mit vertikaler Drehachse, (iii) polynomialer Zylinder, wobei jeweils die Quadratsumme der Vertikalabstände zu den Datenpunkten minimiert wird. Welche Flächenpaar-Kombination zum Einsatz kommt, hängt von der Krümmung der Näherungslinie und von der Böschungsform ab. Bei gestrecktem Verlauf kommt gemäß BRIESE (2004) das Ebenenpaar zum Einsatz. Weist die 2D-Näherungslinie gleichförmige Krümmung auf, bietet sich darüber hinaus das Ebene-Kegel Modell an, da dadurch Richtungsänderungen im Linienverlauf besser berücksichtigt werden können. Ist hingegen die Böschungsform durchhängend oder bauchig gewölbt, liefert ein polynomialer Zylinder bessere Ergebnisse, da die Krümmung der Böschung durch eine entsprechende Krümmung der Basispolynomkurve  $n$ -ten Grades erfasst werden kann. In der Praxis beschränkt man sich dabei auf Polynome des Grades  $n=2$  (quadratische Parabel, kein Krümmungswechsel) und  $n=3$  (kubische Parabel, z.B. S-Bogen). Falls der Schnitt über die o.a. Geometrieprimitive nicht erfolgreich durchgeführt werden kann (zu geringe Genauigkeit, zu geringer Schnittwinkel, zu wenige Punkte...), bleibt die Lage unverändert und die Höhe wird aus unabhängigen Ebenen links bzw. rechts der Näherung bestimmt. Ist auch das nicht möglich, erfolgt die Höhenschätzung aus nur einer (einseitigen) Ebene. Wenn alle genannten Ansätze fehlschlagen, wird der Patch als ungültig markiert. Für jeden gültigen Patch werden schließlich ein repräsentativer 3D-Punkt und dessen 3D-Richtung sowie weitere Metadaten (Standardabweichung der Modelleinpassung, Schnittwinkel, Berechnungsmethode, Krümmung, Punktzahl, etc.) gespeichert.

Nachdem alle Patches auf die oben beschriebene Art prozessiert wurden, erfolgt das Zusammensetzen der Patches zu einer Gesamtlinie. In diesem Zug erfolgt auch eine Prüfung aufeinander folgender Patches hinsichtlich Konsistenz der Fortschreitungsrichtung, etc., und eine Homogenisierung des Punktabstandes durch Einrechnen von möglichst gleichabständigen Zwischenpunkten entlang von stückweisen Bezierkurven dritten Grades. Ungültige Patches führen zu einem Aufspalten der modellierten 3D-Linie in mehrere Teile. Die Qualitätsbeurteilung der Gesamtlinie erfolgt durch statistische Analyse der Patch-Metadaten in Form eines Schulnotensystems (sehr gut bis nicht genügend). Vor dem abschließenden Export wird das Netz der unabhängig modellierten Kanten einer globalen Analyse und Korrektur der Linientopologie unterzogen. Dabei werden vor allem die aus dem TIN der Näherungskanten ermittelten Bereiche mit V-, T- und X-förmigen Netzknoten auf etwaige Klaffungen an Knoten bzw. auf windschiefe Linienkreuzungen hin untersucht und (i.d.R. durch Mittelbildung) automatisch korrigiert. Der gesamte Ablauf der 3D-Linienmodellierung ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt.

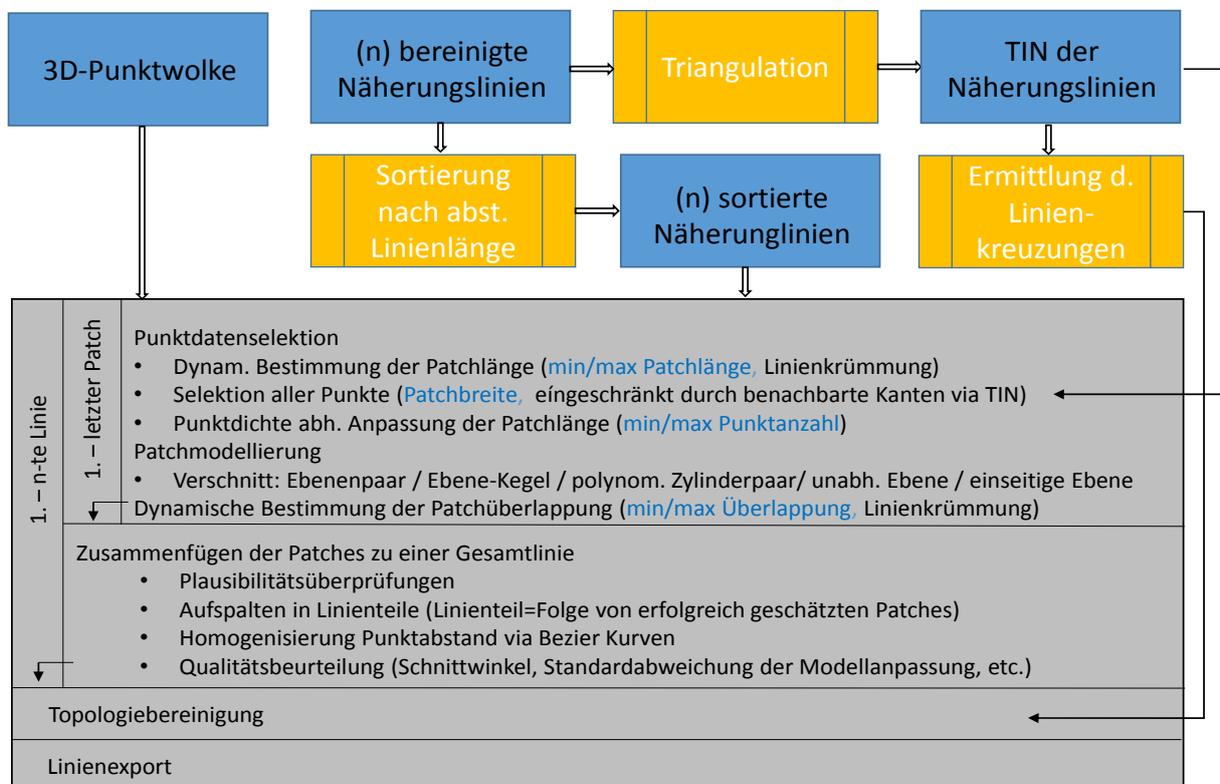


Abb. 3: Workflow zur Modellierung von 3D-Strukturlinien

## 5 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der automatischen Detektion und Modellierung von 3D-Strukturlinien präsentiert und einer kritischen Diskussion unterzogen. Dazu wurde an der TU Wien das im Abschnitt 4 beschriebene Verfahren in Form einer Prototypsoftware in der Programmiersprache C++ implementiert (Vektorisierung des Linienrasters, Nachbearbeitung des 2D-Liniennetzes, 3D-Modellierung). Für den Canny Algorithmus wurde auf das open-source

Programmsystem Fiji/ImageJ (SCHINDELIN et al. 2012; SCHNEIDER et al. 2012) zurückgegriffen. Eine Implementierung des gesamten Workflows in der wissenschaftlichen Laserscanning Software OPALS (PFEIFER et al. 2014) ist in Arbeit.

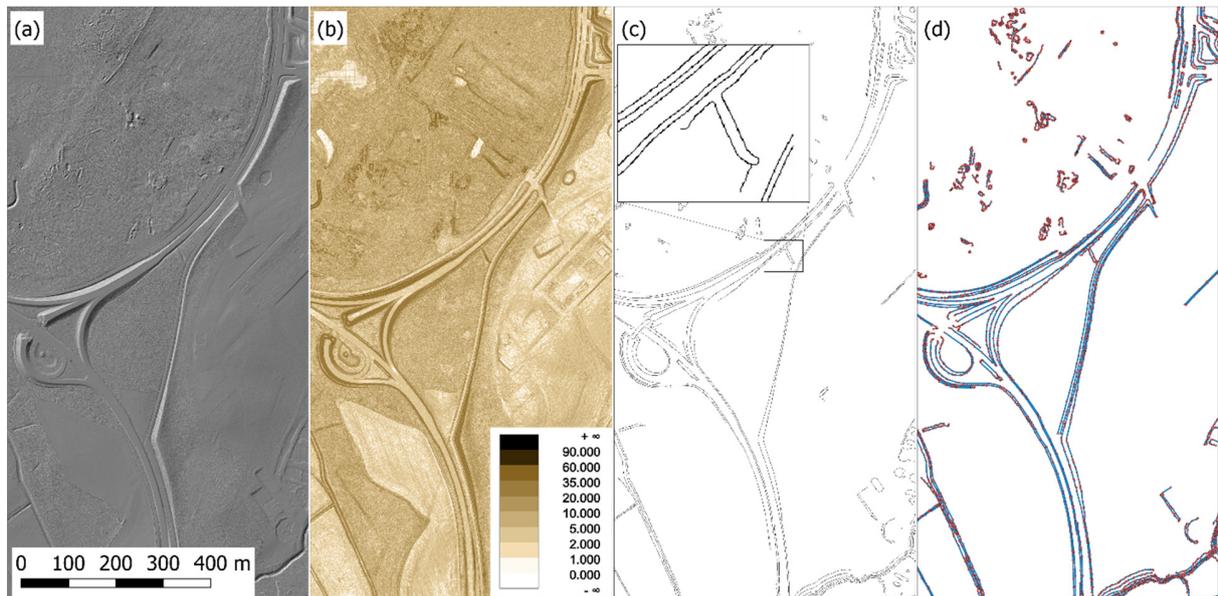


Abb. 4: Strukturliniendetektion; (a) DGM Schummerung; (b) Höhenkodierung des Neigungsmodells [°]; (c) binäre Rasterlinien-Karte (Canny Algorithmus); (d) Vektorisiertes, automatisch und teilweise manuell nachbearbeitetes 2D-Liniennetzwerk

Abbildung 4 zeigt die detektierten 2D-Näherungslinien für den ALS-Datensatz, wobei für den Canny Algorithmus als obere und untere Schranke Neigungsdifferenzen von  $4^\circ$  bzw.  $1^\circ$  verwendet wurden. Die resultierende binäre Rasterkarte ist in Abbildung 4c dargestellt. Die Vorgabe für die Ausweisung einer Strukturlinie liegt bei einem Steigungswechsel von mindestens  $10^\circ$ . Die Wahl des deutlich niedrigeren Wertes für die obere Schranke ist darin begründet, dass bei einem rein aus Massenpunkten berechneten DGM der Steigungswechsel nicht abrupt ausgeprägt ist. Beim ALS-DGM kommt darüber hinaus noch der Umstand zum Tragen, dass praktisch alle Filteralgorithmen zum Ausrunden vor allem der konvex gekrümmten Kantenbereiche neigen (SITHOLE & VOSSelman 2004). Die Ableitung von DGMen aus DIM-Punktwolken hingegen ist in Vegetationsbereichen wegen der mangelnden Durchdringung generell problematisch (RESSL et al. 2016). Es kann festgehalten werden, dass eine automatische Ableitung von 3D-Strukturlinien auf Basis von DIM-Punktwolken derzeit nur in offenen Bereichen zuverlässig gelingt, was die Möglichkeiten einer vollautomatischen Ableitung einschränkt. Für die weiter unten präsentierten DIM-basierten 3D-Strukturlinien Ergebnisse diente jedenfalls ein ALS-DGM für die Detektion der 2D-Näherungen.

Für die Anwendung im Kontext der hydrodynamisch-numerischen Modellierung sowie für das ATKIS-DGM1 sollten Strukturlinien neben dem Mindeststeigungswechsel von  $10^\circ$  ab einem seitlichen Abstand von  $\geq 0.5$  m und einem Höhenunterschied von  $\geq 0.25$  m detektiert werden. Während der Steigungswechsel, wie oben erwähnt, über die Schranken bei der Anwendung des

Canny Algorithmus berücksichtigt wird, kann der geforderte Linienabstand nur durch eine entsprechende DGM-Auflösung erreicht werden. Der Canny Algorithmus liefert eine binäre Pixelkarte, wobei die Linien auf eine Breite von einem Pixel reduziert sind. Der Mindestabstand zweier benachbarter Linien beträgt daher zwei Pixel, und folglich ist für die o.a. formulierten Anforderungen eine DGM-Auflösung von 25 cm erforderlich. Der vorliegende ALS Datensatz erfüllt mit einer mittleren Bodenpunktdichte von 16 Punkten/m<sup>2</sup> diese hohen Anforderungen. Für die derzeit im Kontext der Landes- und der hydrographischen Vermessung übliche Punktdichte von 2-10 Punkten/m<sup>2</sup> ist dies aber nicht gegeben. Hier ist realistischer Weise eher von einer Trennbarkeit von individuellen Linien ab einem Abstand von 1 m auszugehen. Abbildung 4d zeigt das 2D-Liniennetzwerk nach der Vektorisierung, der automatischen und manuellen Nachbearbeitung. Gegenüber dem automatischen Ergebnis (Abbildung 4c) sind vor allem im Bereich der Straßenkreuzung manuell zusätzlich Linien ergänzt, die zwar in der Schummerung und im Neigungsmodell (Abbildung 4a und 4b) erkennbar sind, aber deren Ausprägung nicht den oben genannten Kriterien entsprechen. Aus Sicht der Geländemodellierung fehlen sie daher zurecht, aus Gründen der kartographischen Vollständigkeit wurden sie aber ergänzt.

Die Ergebnisse der 3D-Modellierung sind in Abbildung 5 für beide Erfassungsarten (DIM/ALS) und für drei Teilbereiche (Straßenkreuzung mit Unterführung, offenes Gelände, Gerinne mit Vegetation und Siedlungsbereich) dargestellt. Für beide Datensätze wurde dabei die maximale Patchbreite mit 2.5 m und die (variable) Überlappung der einzelnen Patches mit 15-75% festgelegt. Eine größere Überlappung ist in Bereichen mit geringer Datendichte (z.B. Vegetation) und stark gekrümmten Bereichen notwendig, um die erforderliche Mindestpunktzahl (10 Punkte) nicht zu unterschreiten. Auf Basis der Linienkrümmung wird die Patchlänge vom Algorithmus automatisch zwischen vorgegebenen Schranken (hier: 3-15 m) bestimmt. Der höheren ALS Punktdichte wurde durch eine höhere Obergrenze betreffend die maximale Punktzahl pro Patch Rechnung getragen (DIM: 180 Punkte; ALS: 250 Punkte). Des Weiteren wurde die Punktanzahl entlang der modellierten 3D-Strukturlinien durch Einrechnen von Zwischenpunkten im 1 m-Abstand homogenisiert und alle Linien mit einer Länge kleiner als 10 m verworfen.

Die Linienfarben in Abbildung 5 spiegeln die ermittelte Qualitätsstufe wider (grün=sehr gut bis rot=nicht genügend). Auffällig ist dabei das deutlich höhere Qualitätsniveau der ALS-Ergebnisse (Abbildung 5d-f) gegenüber dem Resultat auf Basis von DIM (Abbildung 5a-c). Der errechnete Durchschnitt liegt für den DIM Datensatz bei 3.0 (1=sehr gut, 2=gut, usw.) und für ALS bei 1.4. Dies ist einerseits auf die deutlich bessere Präzision der ALS-Höhen und andererseits auf die stärkeren Abrundungseffekte beim DIM in Folge der Glattheitsbedingung (RESSL et al. 2016) zurückzuführen. Die ALS-basierten Linien verlaufen auch ruhiger und sind besser imstande, komplexe Strukturen mit engem Kantenabstand widerzugeben (vgl. Abbildung 5a/d bzw. 5b/e). Die Abbildung 5c/f verdeutlicht ferner, dass die Modellierung von Strukturlinien im Vegetationsbereich wegen der Durchdringungsfähigkeit nur für ALS möglich ist, wobei auch hier Laubfreiheit gegeben sein muss. Aus Abbildung 5f ist zu erkennen, dass auch der ALS-basierten Strukturliniendetektion und -modellierung durch die Vegetationsabschattung Grenzen gesetzt sind, da das Gerinne stellenweise in der vollen Trapezform mit jeweils zwei Ober- und Unterkanten, oftmals aber nur durch die beiden Uferböschungsoberkanten repräsentiert ist.

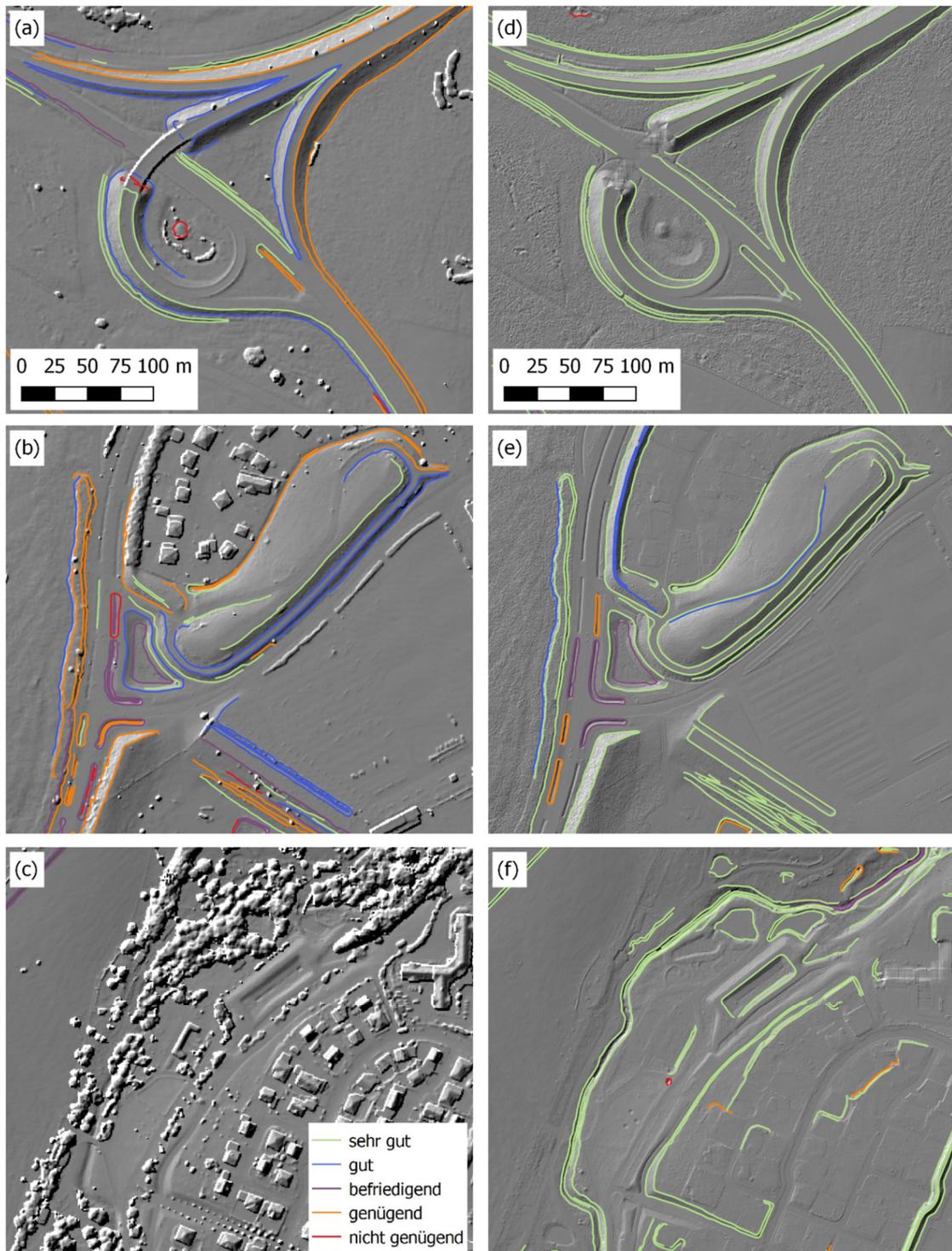


Abb. 5: Automatisch modellierte 3D-Strukturlinien; (a-c) Datenquelle: DIM, Bildhintergrund: DOM-Schummerung; (d-f) Datenquelle: ALS, Bildhintergrund: DGM Schummerung; Linienfarben entsprechen der Qualitätsstufe gemäß Legende in (c); (a+d) Straßenkreuzung mit Unterführung; (b+e) gemischtes, offenes Gelände; (c+f) Gerinne mit Vegetation und Siedlungsbereich

Unabhängig von der Datenerfassungsart werden nicht nur gestreckte Linienzüge sondern auch Stellen mit spitz zusammenlaufenden Linien (z.B. Straßenkreuzung in Abbildung 5a/d) oder engen Radien (z.B. Grabenstrukturen in Abbildung 5b/e) korrekt modelliert. Ermöglicht wird dies einerseits durch die konsequente Berücksichtigung von benachbarten Strukturlinien im Zuge der Datenselektion und andererseits durch die Erweiterung des Modellkatalogs (Kegel, polynomialer Zylinder). Obwohl die meisten Patches mit dem klassischen Ebenenpaar-Modell rekonstruiert wurden (DIM: 65%, ALS: 79%), liegt die Qualitätssteigerung bei der vorgestellten Verfahrenslösung vor allem in der Möglichkeit, komplexer geformte Geländebereiche besser rekonstruieren zu können. Eine manuelle Kontrolle und Überarbeitung bleibt zwar nach wie vor erforderlich, der Aufwand dafür konnte aber verringert werden. Bedarf für einen interaktiven Eingriff besteht vor allem bei der Bereinigung des 2D-Liniennetzwerkes, während sich die 3D-Modellierung auf Basis eines sauberen Gerüsts an Näherungen als robust und zuverlässig erwiesen hat.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein weitestgehend automatischer, zweistufiger Ansatz zur Ableitung von 3D-Strukturlinien auf Basis von 3D-Punktwolken vorgestellt. In einem ersten Detektionsschritt wird der genäherte 2D-Linienverlauf durch Anwendung des aus der Bildverarbeitung bekannten Canny Algorithmus ermittelt. Die Basis dafür stellt das aus dem DGM abgeleitete Neigungsmodell dar. Das resultierende 2D-Liniennetz wird zum Überbrücken kleinerer Lücken und zur Ableitung möglichst langer Linienzüge automatisch nachbearbeitet und im Bedarfsfall manuell editiert. Gemeinsam mit der 3D-Punktwolke stellen die 2D-Näherungen die Eingangsdaten für die 3D-Modellierung mittels Verschnitt von lokalen Flächenpaaren dar. Aufbauend auf der von BRIESE (2004) eingeführten Methode, die auf dem Verschnitt von Ebenenpaaren basiert, erfolgte eine wesentliche Weiterentwicklung durch die Einführung weiterer Geometrieprimitive (Kegel, polynomialer Zylinder), welche eine bessere Berücksichtigung von Krümmungen sowohl längs als auch quer zur Linie erlauben. Das Kegelmodell ermöglicht die Modellierung von abrupten lagemäßigen Richtungsänderungen, und der polynomiale Zylinder erlaubt die Rekonstruktion von durchhängend oder bauchig gewölbten Böschungen. Weitere Verbesserungen des originalen Ansatzes konnten durch die dynamische Festlegung der einzelnen Linienteilstücke (Patches) mittels Analyse der Flächenkrümmung und der Berücksichtigung von angrenzenden Strukturlinien erreicht werden. Dadurch wurde eine Optimierung der Punktauswahl erreicht, ohne das Ergebnis zu generalisieren. Durch die konsequente Erfassung und Speicherung von Metadaten wie Schnittwinkel, Genauigkeit der Modellanpassung, etc. konnte auch eine Qualitätsbeurteilung der einzelnen modellierten Linien im Sinne eines Schulnotensystems durchgeführt werden, was vor allem bei der Ergebnisbeurteilung und manuellen Kontrolle durch den Operateur hilfreich ist. Das Verfahren wurde von der TU Wien in einer Prototypsoftware in C++ implementiert und auf Testdatensätze verschiedener Datenerfassungsart (DIM/ALS) sowie Punktdichte (1-16 Punkte/m<sup>2</sup>) angewendet. Die Ergebnisse für den Datensatz „Hansestadt Wismar“ wurden präsentiert und bestätigen das Potenzial des vorgestellten Verfahrens insbesondere hinsichtlich der möglichen Erfassung von abrupten Richtungsänderungen (Grabenenden, spitz zu laufende Linien) und der verbesserten Rekonstruktion von parabolisch gekrümmten Böschungen. Aufgrund der besseren

Höhengenauigkeit und Vegetationsdurchdringung konnten für den ALS Datensatz quantitativ und qualitativ bessere Ergebnisse erzielt werden. Für das 4 km<sup>2</sup> Testgebiet wurden auf Basis der ALS Punktwolke 1000 Strukturlinien mit einer Gesamtlinielänge von 90 km und einer durchwegs als „sehr gut“ eingestuften Qualität automatisch erfasst. Die DIM Punktwolke lieferte für dieselbe Fläche 500 im Mittel als „befriedigend“ eingestufte Linien mit einer Länge von 55 km. Zurzeit läuft die anwendungsbezogene Evaluierung durch den Auftraggeber der Fachstudie mit dem Ziel der Überführung der Ansätze und der Software in den Wirkbetrieb.

## 7 Literaturverzeichnis

- ADV 2016: Webseite der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland. <http://www.adv-online.de/AAA-Modell/Dokumente-der-GeoInfoDok/>, Letzter Zugriff: 29.04.2016
- BRIESE, C., 2004: Three-dimensional modelling of breaklines from airborne laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **35**, B3, Istanbul, Turkey.
- BRIESE, C., MANDLBURGER, G., MÜCKE, W., 2010: Maßstabsabhängige Modellierung von Strukturlinien aus Airborne Laser Scanning Daten. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, Band **19**, Wien, Österreich, 561-569.
- BROCKMANN, H., HAASE, A., MANDLBURGER, G., SCHRÖDER, M., 2010: LIDAR-Datenpotenziale für hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchungen. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, Band **19**, Wien, Österreich, 542-551.
- BRÜGELMANN, R., 2000: Automatic breakline detection from airborne laser range data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **33**, B3, Amsterdam, Netherlands, 109-115.
- BRZANK, A., HEIPKE, C., GÖPFERT, J. & SOERGEL U., 2009: Ableitung Digitaler Geländemodelle im Wattenmeer aus luftgestützten Laserscannerdaten. *Die Küste* **76**, 91-121.
- CANNY, J., 1986: A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **8** (6), doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851, 679-698.
- DIJKSTRA, E.W., 1959: A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik* **1**, 269-271.
- GOMES-PEREIRA L. & WICHERSON, R., 1999: Suitability of laser data for deriving geographical information – a case study in the context of management of fluvial zones. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54**, 105-114.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2008: Stereo processing by semi-global matching and mutual information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **30** (2), 328-341.
- KRAUS, K., 2000. *Photogrammetrie, Band 3, Topographische Informationssysteme*. Dümmler.
- PFEIFER, N. & MANDLBURGER, G., 2008: Filtering and DTM Generation. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, J. Shan, C. Toth (ed.); CRC Press, ISBN: 978-1-4200-5142-1, 307-333.

- PFEIFER, N., MANDLBURGER, G., OTEPKA, J. & KAREL, W., 2014: OPALS—A framework for Airborne Laser Scanning data analysis. *Computers, Environment and Urban Systems* **45**, 125-136.
- RESSL, C., BROCKMANN, H., MANDLBURGER, G. & PFEIFER, N., 2016: Dense Image Matching vs. Airborne Laser Scanning – Comparison of two methods for deriving terrain models. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, Heft 2, 57-73.
- ROTHERMEL, M., WENZEL, K., FRITSCH, D. & HAALA, N., 2012: Sure: Photogrammetric surface reconstruction from imagery. *Proceedings of the LC3D Workshop*, Berlin.
- SHAN, J. & TOTH C., 2009: *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, CRC Press, ISBN: 978-1-4200-5142-1.
- SCHINDELIN, J., ARGANDA-CARRERAS, I., FRISE, E., KAYNIG, V., LONGAIR, M., PIETZSCH, T., PREIBISCH, S., RUEDEN, C., SAALFELD, S., SCHMID, B., TINEVEZ, J., WHITE, D.J., HARTENSTEIN, V., ELICEIRI, K., TOMANCAK, P. & CARDONA, A., 2012: Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature methods* **9** (7), 676-682.
- SCHNEIDER, C. A., RASBAND, W. S. & ELICEIRI, K. W., 2012: NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature methods* **9** (7), 671-675.
- SITHOLE, G. & VOSSelman, G., 2004: Experimental comparison of filtering algorithms for bare-earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **59**, 85-01.
- SUI, L., 2002: Processing of laser scanner data and automatic extraction of structure lines. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **34** (Part 2), 429-435.
- WEHR, A. & DUZELOVIC, H., 2009: Bruchkantendetektion mit hochaufgelösten Laserscannerdaten, *Vermessung & Geoinformation* **4**, 408-415.
- VOSSelman, G. & MAAS, H.-G., 2010: *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, ISBN 978-1904445-87-6.