
Fortschritte bei der automatischen Ableitung von Strukturlinien aus 3D-Punktwolken

Johannes OTEPKA¹, Gottfried MANDLBURGER¹, Christian BRIESE² und Nobert PFEIFER¹

¹TU Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Wien · johannes.otepka@geo.tuwien.ac.at

²EODC Earth Observation Data Centre for Water Resources Monitoring GmbH, Wien

Zusammenfassung

Es existieren verschiedene Algorithmen, um Strukturlinien aus 3D-Punktwolken abzuleiten. Diese stellen bisher aber keine automatisierbaren praxisreifen Lösungen dar. Im Rahmen einer Fachstudie wurde an der TU Wien in Zusammenarbeit mit dem EODC ein neuer Gesamtprozess entwickelt, welcher verschiedene existierende Methoden kombiniert bzw. Teilschritte verfeinert. Die damit abgeleiteten 3D-Strukturlinien erreichen ein neues Qualitätsniveau. Verbesserungen bei der Punktauswahl bzw. durch zusätzliche Ausgleichungsmodelle werden in diesem Artikel vorgestellt.

1 Einleitung

Topographische 3D Punktwolken, gewonnen durch Airborne Laserscanning (ALS) (SHAN & TOTH 2009; VOSSELMAN & MAAS 2010) oder mittels Dense Image Matching (DIM) (HIRSCHMÜLLER 2013; ROTHERMEL et al. 2015), stellen heutzutage die Datenbasis für zahlreiche rasterbasierte topografische Produkte (DGM, Oberflächenmodell, Gebäudemodelle, etc.) und Anwendungen dar. Linienhafte interaktive Aufnahmen finden zeit- und ressourcenbedingt nur noch punktuell Anwendung, obwohl 3D-Strukturlinien (3D-Bruch-/Geländekanten oder 3D-Formlinien) als Basisprodukt zur Bereitstellung hochwertiger geotopographischer Produkte gewünscht/benötigt werden:

- Erstellung hochwertiger Modelle z.B. DGM, Geländemodell des Wasserlaufs (DGM-W), hydrodynamisch-numerische Modellierung, etc.
- Optimierte Ableitung von Digitalen Orthophotos (DOP)
- Kartographische Ausgestaltungen. z.B ATKIS DTK-Reihe

In diesem Kontext ist nach wie vor keine automatisierte oder zumindest weitestgehend automatisierte praxisreife Lösung zur Ableitung von 3D-Strukturlinien aus 3D-Punktwolken verfügbar (MANDLBURGER et. al, 2016). Ausgehend von den bisherigen Erfahrungen und den Vor- und Nachteilen bestehender Ansätze wurde das Thema weiterführend untersucht. Eine neue umfangreiche Auswertestrategie wurde entwickelt, welche die Qualität und Vollständigkeit der automatisch abgeleiteten 3D-Strukturlinien auf ein bisher unerreichtes Niveau heben.

Die Fortschritte wurden einerseits durch die Verknüpfung verschiedener bereits existierender Ansätze, und andererseits durch Verfeinerungen einzelner Teilschritte erzielt. Während der Gesamtprozess in MANDLBURGER et. al (2016) beschrieben ist, behandelt dieser Artikel

vor allem die Adaptionen und Verbesserungen der 3D-Modellierung (Abschnitt 2), welche anhand von zwei Beispielen in Abschnitt 3 diskutiert werden.

1.1 Stand der Technik

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 oben angeführten Verfahren erfolgt die Modellierung bei BRIESE (2004) und BRZANK et al. (2009) ausgehend vom näherungsweise bekannten 2D-Strukturlinienverlauf direkt in der 3D-Punktwolke und basiert auf dem Konzept des Verschnittes von lokalen Ebenenpaaren. Die Bestimmung der Ebenen erfolgt dabei in regelmäßigen Teilstücken (im Folgenden: Patch) mittels Ausgleichsrechnung. 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 2 beschriebenen Strategien bauen auf der 3D-Modellierung von BRIESE (2004) auf. Neben dem Verschnitt von Ebenenpaaren (Standardmodell) werden nun bei Bedarf auch Flächen 2. Ordnung bzw. ein Kegel-Ebene-Modell eingesetzt. Die Kantendetektion und damit die Ableitung von 2D Näherungen der Strukturlinien erfolgt über einen rasterbasierten Ansatz ausgehend vom DGM.

2 Methode

Die entwickelte Methode zur Ableitung von 3D-Strukturlinien ist zweistufig: Detektion und Modellierung. In der ursprünglichen Modellierung nach BRIESE (2004) wird jede Näherungslinie unabhängig ohne Einbeziehung anderer Linien verarbeitet. Die verbesserte Modellierungsstrategie berücksichtigt die Topologie des gesamten Näherungsliniennetzwerks in zweierlei Hinsicht: Einerseits wird die Selektion der Datenpunkte durch Nachbarlinien limitiert, andererseits bilden die Eingangslinien die Basistopologie (=Knoten-Kanten-Netzwerk) für die finalen Linien. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass die Detektion vollständige und topologisch korrekte Näherungslinien liefert. Die eingesetzte DGM basierte Strategie verwendet den Canny-Kantendetektions-Algorithmus und ist in MANDLBURGER et al. (2016) beschrieben.

Die eigentliche 3D-Modellierung der Strukturlinien erfolgt auf Basis der 3D-Punktwolke und der 2D-Näherungslinien. Der Modellierungsalgorithmus startet mit dem Einlesen aller Näherungslinien und baut dabei eine geeignete Datenstruktur auf, welche eine effiziente Abfrage von Nachbarlinien bzw. dem topologischen Liniennetzwerk ermöglicht. Diese Aufgabe kann grundsätzlich mit verschiedenen räumliche Indexstrukturen (Quadtree, R-Tree, etc.) oder - wie in diesem Fall - mit einer Delaunay Triangulierung mit Zwangskanten gelöst werden. Die Lösung über die Triangulierung hat den Vorteil, dass die Eingangslinien automatisch in ein topologisch korrektes Liniennetzwerk umgewandelt werden. D.h. Linienschnitte werden als Knoten in die Linien eingefügt. Anschließend werden sämtliche Kreuzpunkte (aus der Triangulierung) extrahiert und für die Topologiebereinigung nach der Modellierung gespeichert.

2.1 Patch-Bestimmung und Datenselektion

Die Modellierung erfolgt linienweise, wobei eine gesamte Linie in lokale, überlappende Patches dynamischer Länge und Breite aufgeteilt wird. Die Länge der Patches ergibt sich aus der abgeschätzten 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. Wie in Abbildung 1 dargestellt, erfolgt die Abschätzung der Linienkrümmung über die Berechnung der Fläche zwischen der Sehne und dem Linienverlauf innerhalb des Patches. Flächen links bzw. rechts der Sehne werden subtrahiert, sodass die Abschätzung bei einem „s-förmiger“ Linienverlauf eine geringe Krümmung liefert. Der entsprechende Radius bzw. die Krümmung lässt sich dann über die Näherungsformel für den Flächeninhalt eines Kreissegments (siehe Abbildung 1c bzw. Formeln 1 & 2) abschätzen.

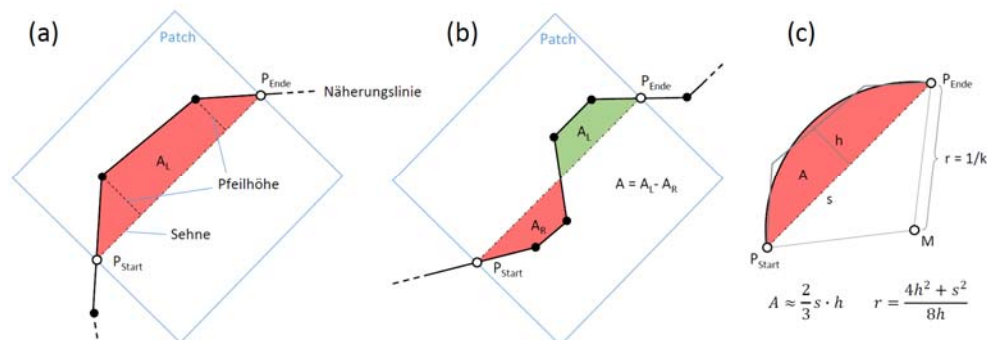


Abb. 1: Krümmungsabschätzung der Näherungslinie mittels Flächenbestimmung zwischen Sehne und Linie (a & b). Radiusberechnung über genäherte Kreissegmentformel (c)

$$h \approx \frac{3A}{2s} \quad (1)$$

$$k = \frac{1}{r} = \frac{8h}{4h^2 + s^2} \approx \frac{\frac{24A}{2s}}{\frac{36A^2}{4s^2} + s^2} = \frac{48 \cdot A \cdot s}{36A^2 + 4s^4} \quad (2)$$

Die Patchbreite wird generell vom Benutzer vorgegeben und ist zusätzlich bis maximal zur Nachbarlinie begrenzt (siehe Abbildung 2). Für den Fall, dass eine Nachbarlinie innerhalb

des Patchrechtecks endet, wird diese orthogonal zur Patchsehne zum Rechtecksrand verlängert (Abbildung 2b). Für den derart bestimmten Datenbereich werden alle Punkte aus der 3D-Punktwolke selektiert und über die Näherungslinie zur linken oder rechten Menge zugeordnet.

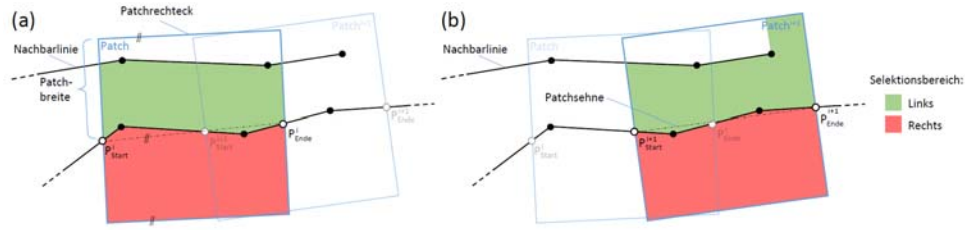


Abb. 2: Selektionsbereich wird durch das Patchrechteck bzw. die Nachbarlinien begrenzt. Die Zuteilung der Punkte in links (grün) und rechts (rot) erfolgt über die Näherungslinie.

In der ursprünglichen Implementierung nach BRIESE (2010) kommt das Ebene-Ebene-Modell zum Einsatz, welches im Normalfall zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Durch die großflächige Anwendung haben sich aber auch Problemstellen herauskristallisiert: Stark gekrümmte Strukturlinien oder ausgerundete Böschungsbereiche können durch Ebenen nur unzureichend repräsentiert werden. Mit komplexeren Modellen können diese Problemstellen besser modelliert werden, wobei der Beurteilung, wann welches Modell verwendet werden soll, große Bedeutung zukommt. Komplexere Modelle zeigen bei unzureichend gefilterten Bodenpunkten oder bei ungünstigen Punktverteilungen Extrapolationstendenzen.

Die drei im Nachfolgenden dargestellten Ausgleichmodelle minimieren jeweils die Quadratsumme der Vertikalabstände zwischen Datenpunkten und Geometrie-Primitiven. Neben den eigentlichen 3D-Punkten werden zusätzlich 2D-Punkte der Näherungslinie als Differenzbeobachtungen zwischen beiden Geometrie-Primitiven eingeführt.

$$0 = f_L(x, y) - f_R(x, y) \quad (3)$$

Neben den Beobachtungsgruppen für das linke bzw. rechte Geometrie-Primitiv führt diese dritte Beobachtungsgruppe zu einer Stabilisierung des Gleichungssystems in problematischen Fällen. Vollständigkeitshalber sei erwähnt, dass für jeden Punkt auf Basis seiner Lage innerhalb des Patches längs und quer zur Linienrichtung ein individuelles Gewicht berechnet wird (vgl. BRIESE 2004).

2.2 Model: Ebene-Ebene

Die linearen Beobachtungsgleichungen für eine ausgleichende Ebene sind hinlänglich bekannt. Für die drei Beobachtungsgruppen (linke Ebene, rechte Ebene bzw. Achspunktbeobachtungen) könnte diese wie folgt dargestellt werden:

$$z_L^i = a_L \cdot x^i + b_L \cdot y^i + c_L \quad i = 1 \dots n_{Links} \quad (4)$$

$$z_R^j = a_R \cdot x^j + b_R \cdot y^j + c_R \quad j = 1 \dots n_{Rechts} \quad (5)$$

$$0 = a_L \cdot x^k + b_L \cdot y^k + c_L - a_R \cdot x^k - b_R \cdot y^k - c_R \quad k = 1 \dots n_{Achspunkte} \quad (6)$$

Die Lösung des Systems erfolgt über die Ausgleichung vermittelnder Beobachtungen. Das Aufstellen der notwendigen Matrizen ist trivial und daher an dieser Stelle nicht ausgeführt.

Das finale Ergebnis des Modells ist die Schnittgerade t der beiden Ebenen. Doch für das Zusammenführen der Ergebnisse benachbarter Patches bzw. das Ableiten einer modellierten Strukturlinie benötigt man für jeden Patch einen repräsentativen Punkt (im Folgenden als Referenzpunkt bezeichnet). Der vorgeschlagene Algorithmus definiert den Referenzpunkt P über den Schnitt der Vertikalebene s mit den beiden ausgeglichen Ebenen e_L und e_R (Abbildung 3). Die Vertikalebene s enthält den Mittelpunkt S_M der beiden Schwerpunkte S_L und S_R und ist orthogonal auf die 2D-Projektion von t . Dadurch werden Extrapolationen bei ungünstigen Punktverteilungen verhindert.

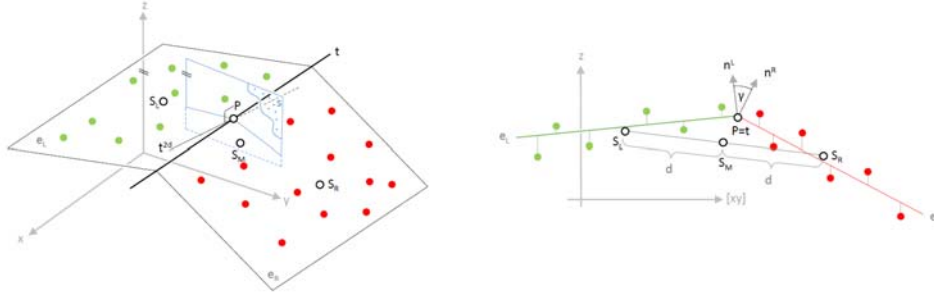


Abb. 3: Standardmodell Ebene-Ebene

Mit Hilfe der beiden Flächennormalen n_L und n_R kann der Richtungsvektor t der Schnittlinie berechnet werden:

$$n_L = (a_L \quad b_L \quad -1)^T \quad (7)$$

$$n_R = (a_R \quad b_R \quad -1)^T \quad (8)$$

$$t = n_L \times n_R \quad (9)$$

Der Normalvektor n_s bzw. das Absolutglied c_s der Vertikalebene s ergibt sich aus

$$S_M = \frac{1}{2}(S_R + S_L) \quad (10)$$

$$n_s = (b_R - b_L \quad a_L - a_R \quad 0)^T \quad (11)$$

$$c_s = -n_s \cdot S_M \quad (12)$$

Die Koordinaten von P lassen sich durch Umformung der Beobachtungsgleichung

$$-c_i = a_i \cdot x + a_i \cdot y - z \quad (13)$$

bzw. die Kombination der drei Ebenengleichungen wie folgt berechnen

$$P = M^{-1} \cdot c \quad M = \begin{pmatrix} a_L & b_L & -1 \\ a_R & b_R & -1 \\ b_R - b_L & a_L - a_R & 0 \end{pmatrix} \quad c = \begin{pmatrix} -c_L \\ -c_R \\ n_s \cdot S_M \end{pmatrix} \quad (14)$$

Wichtige Qualitätsparameter für das ausgeglichene Modell sind der Schnittwinkel der Ebenen (=Winkel zwischen n_L und n_R) bzw. die Genauigkeit des Referenzpunktes, der mittels Fehlerfortpflanzung der Qxx-Matrix berechnet wird. Dazu benötigt man linearisierte Funktionsgleichungen, welche die Koordinaten von P in Abhängigkeit der Unbekannten ($a_L, b_L, c_L, a_R, b_R, c_R$) darstellen. Dies ist in Gleichung (9) angegeben, wobei man M algebraisch invertieren müsste. Dieser aufwändige Schritt kann durch Anwendung des totalen Differenzials der Ursprungsgleichung umgangen werden:

$$\begin{aligned}
c &= M \cdot P \quad \rightarrow \quad \partial c = \partial M \cdot P + M \cdot \partial P \quad | \cdot M^{-1} \\
M^{-1} \cdot \partial c &= M^{-1} \cdot \partial M \cdot P + \partial P \quad | - M^{-1} \cdot \partial M \cdot P \\
\partial P &= M^{-1} \cdot \partial c - M^{-1} \cdot \partial M \cdot P
\end{aligned} \tag{15}$$

Die Linearisierung von c und M ist trivial und man erhält die finale Funktionsmatrix mit

$$\begin{aligned}
F(\partial a_L, \partial b_L, \partial c_L, \partial a_R, \partial b_R, \partial c_R) &= \\
&= \begin{pmatrix} m_{11}^{inv} \cdot x^P & m_{11}^{inv} \cdot y^P & m_{11}^{inv} & m_{12}^{inv} \cdot x^P & m_{12}^{inv} \cdot y^P & m_{12}^{inv} \\ m_{21}^{inv} \cdot x^P & m_{21}^{inv} \cdot y^P & m_{21}^{inv} & m_{22}^{inv} \cdot x^P & m_{22}^{inv} \cdot y^P & m_{22}^{inv} \\ m_{31}^{inv} \cdot x^P & m_{31}^{inv} \cdot y^P & m_{31}^{inv} & m_{32}^{inv} \cdot x^P & m_{32}^{inv} \cdot y^P & m_{32}^{inv} \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{16}$$

wobei gilt

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} m_{11}^{inv} & m_{12}^{inv} & m_{13}^{inv} \\ m_{21}^{inv} & m_{22}^{inv} & m_{23}^{inv} \\ m_{31}^{inv} & m_{32}^{inv} & m_{33}^{inv} \end{pmatrix} \tag{17}$$

Die Kovarianzmatrix Q_{FF} des Referenzpunktes berechnet sich schließlich aus

$$Q_{FF} = F \cdot Q_{XX} \cdot F^T \tag{18}$$

womit Genauigkeitswerte für alle 3 Koordinaten gegeben sind.

2.3 Model: Verschnitt zweier allgemeiner Zylinderflächen

Wie bereits erwähnt soll dieses Ausgleichungsmodell gekrümmte Böschungen besser repräsentieren. Das entwickelte Model verwendet Polynomflächen, wobei Krümmungen nur quer zur Strukturlinie zugelassen werden. Damit sich keine komplexe Schnittfigur zwischen den beiden Flächen ergibt, wird eine weitere Einschränkung vorgenommen: Beide Flächen sollen durch Verschieben einer ebenen Kurve entlang einer Erzeugenden entstehen (allgemeinen Zylinderfläche). Die Erzeugende ist gleichzeitig die Schnittgerade der bei den Flächen (siehe Abbildung 4)

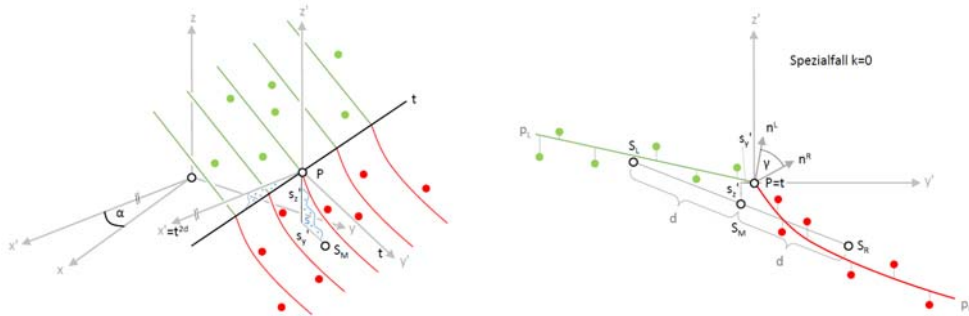


Abb. 4: Allgemeines Zylinderflächen-Modell

Durch geschickte Wahl eines lokalen Koordinatensystems kann das Flächenmodell auf ein Kurvenmodell reduziert werden, womit die Definition der zwei Polynomflächen sehr einfach gelingt:

$$p_L = a_1 y' + a_2 y'^2 + \dots + a_n y'^n + k \cdot x' \tag{19}$$

$$p_R = b_1 y' + b_2 y'^2 + \dots + b_n y'^n + k \cdot x' \quad (20)$$

Der Term $k \cdot x'$ ermöglicht eine Schrägstellung der Flächen und somit geneigte Schnittgeraden. Grundsätzlich könnte man diese Schrägstellung auch durch eine Rotation um die y' -Achse ermöglichen. Allerdings würden dann nicht mehr die Vertikalabstände (im übergeordneten System) minimiert werden. Auch in dieses Modell werden Differenzbeobachtungen für die 2D-Achspunkte eingeführt:

$$p_A = p_L - p_R \quad (21)$$

Der Übergang vom lokalen ins übergeordnete System und zurück erfolgt durch die folgenden Transformationen:

$$X = M_S + R \cdot (X' - s) \quad R = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad s = \begin{pmatrix} 0 \\ s_y \\ s_z \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$X' = R^T \cdot (X - M_S) + s \quad (23)$$

Es ist zu beachten, dass keine Unbekannte s_x in die Ausgleichung eingeführt werden darf. Nachdem die Flächen entlang der Schnittgerade in sich verschoben werden können, würde dieser Parameter zu einem singulären System führen.

Für die Ausgleichung nach vermittelten Beobachtungen ergeben sich schließlich folgende Linearisierung:

$$\frac{\partial p_L}{\partial y'} = a_1 + 2 \cdot a_2 y' + \dots + n \cdot a_n y'^{n-1} = h_L \quad (24)$$

$$\frac{\partial p_R}{\partial y'} = b_1 + 2 \cdot b_2 y' + \dots + n \cdot b_n y'^{n-1} = h_R \quad (25)$$

$$\partial p_L = y' \cdot \partial a_1 + y'^2 \cdot \partial a_2 + \dots + y'^n \cdot \partial a_n + x' \cdot \partial k + h_L \cdot \partial s_y + \partial s_z + (-x \cdot h_L + k(y' - s_y)) \cdot \partial \alpha \quad (26)$$

$$\partial p_R = y' \cdot \partial b_1 + y'^2 \cdot \partial b_2 + \dots + y'^n \cdot \partial b_n + x' \cdot \partial k + h_R \cdot \partial s_y + \partial s_z + (-x \cdot h_R + k(y' - s_y)) \cdot \partial \alpha \quad (27)$$

$$\partial p_A = y' \cdot \partial a_1 + y'^2 \cdot \partial a_2 + \dots + y'^n \cdot \partial a_n + (-y' \cdot \partial b_1 - y'^2 \cdot \partial b_2 - \dots - y'^n \cdot \partial b_n + (h_L - h_R) \cdot \partial s_y - x' \cdot (h_L - h_R)) \cdot \partial \alpha \quad (28)$$

Im Unterschied zur Ebene ist der Normalvektor für gekrümmte Flächen positionsabhängig. Durch Ableitung der Fläche in zwei Richtungen können zwei Tangentenvektoren und über deren Kreuzprodukt der Normalvektor an der entsprechenden Stelle berechnet werden:

$$r_{X'} = (1 \quad 0 \quad k)^T \quad (29)$$

$$r_{y'_{L/R}} = (0 \quad 1 \quad h_{L/R})^T \quad (30)$$

$$n'_{L/R} = r_{X'} \times r_{y'_{L/R}} = (-k \quad -h_{L/R} \quad 1)^T \quad (31)$$

Dieser muss anschließend noch ins übergeordnete System transformiert werden:

$$n_{L/R} = R \cdot n'_{L/R} \quad (32)$$

Vollständigkeitshalber sei auch der Richtungsvektor t der Schnittlinie angegeben:

$$t = (\cos\alpha \quad \sin\alpha \quad k)^T \quad (33)$$

Die Genauigkeit des Referenzpunktes lässt sich aufgrund der speziellen Lagerung des Modells vergleichsweise einfach mittels Fehlerfortpflanzung (siehe Gleichung 18) berechnen. Die notwendige F-Matrix ergibt sich zu

$$F(\partial\alpha, \partial s_y, \partial s_z) = \begin{pmatrix} \cos\alpha \cdot s_y & \sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha \cdot s_y & -\cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (34)$$

Die ursprüngliche Überlegung Polynomkoeffizienten bis Grad 3 zu verwenden, hat sich in der praktischen Anwendung als nicht zielführend erwiesen. Die aktuelle Strategie verwendet nur lineare und quadratische Koeffizienten für beide Flächen und führt nach erfolgreicher Ausgleichung einen Signifikanztest für die quadratischen Koeffizienten durch. Nicht signifikante Koeffizienten werden deaktiviert und die Ausgleichung wiederholt.

2.4 Model: Kegel-Ebene

Dieses Modell ist für Bereiche geeignet, in denen die Strukturlinie starke (horizontale) Krümmungen aufweist. z.B. am Ende von Dämmen, an Ecken von künstlich aufgeschütteten Plätzen, etc. Wie in Abbildung 5 ersichtlich wird ein Doppelkegel mit vertikaler Achse und kreisförmigem Querschnitt verwendet. Die Schnittfigur (Ergebnisfigur) zwischen Kegel und Ebene ist ein Kegelschnitt (d.h. Kreis, Ellipse, Parabel oder Hyperbel).

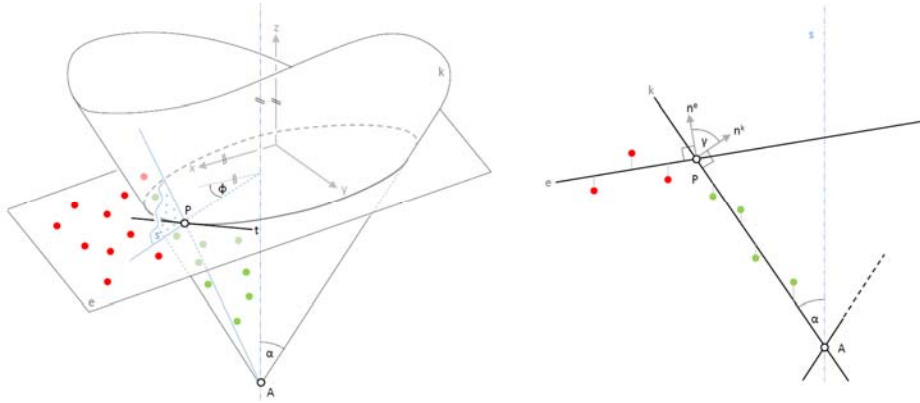


Abb. 5: Kegel-Ebene Modell

Der Kegel lässt sich wie folgt parametrisieren

$$P = A + \lambda \cdot r \quad A = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \quad r = \begin{pmatrix} \sin\alpha \cdot \cos\phi \\ \sin\alpha \cdot \sin\phi \\ \cos\alpha \end{pmatrix} \quad (35)$$

Daraus kann die Beobachtungsgleich für den Kegel abgeleitet werden

$$k = a_z + \frac{sh}{\tan\alpha} \quad sh = \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad dx = x - a_x \quad dy = y - a_y \quad (36)$$

Linearisierung für die Ausgleichung nach vermittelten Beobachtungen ergibt

$$\partial k = -\frac{dx}{sh \cdot \tan\alpha} \cdot \partial a_x - \frac{dy}{sh \cdot \tan\alpha} \cdot \partial a_y + 1 \cdot \partial a_z - \frac{sh}{\sin^2\alpha} \cdot \partial\alpha \quad (37)$$

Der Normalvektor des Kegels ist durch

$$\mathbf{n}_k = (\cos\alpha \cdot \cos\phi \quad \cos\alpha \cdot \sin\phi \quad -\sin\alpha)^T \quad (38)$$

gegeben. Die Bestimmung des Referenzpunktes wurde für dieses Modell leicht adaptiert, wobei wiederum eine Vertikalebene s mit der Ergebniskurve geschnitten wird. Die Vertikalebene wird so gewählt, dass sie die beiden Schwerpunkte S_L und S_R enthält. Die folgende Lösung projiziert beide Schwerpunkte vertikal auf die ausgeglichene Ebene und definiert durch diese Punkte eine Gerade, welche mit dem Kegel geschnitten wird.

$$S_L^P = \begin{pmatrix} s_x^L \\ s_y^L \\ a \cdot s_x^L + b \cdot s_y^L + c \end{pmatrix} \quad S_R^P = \begin{pmatrix} s_x^R \\ s_y^R \\ a \cdot s_x^R + b \cdot s_y^R + c \end{pmatrix} \quad \mathbf{r} = S_R^P - S_L^P \quad (39)$$

$$\mathbf{P} = S_L^P + \mu \cdot \mathbf{r} = \mathbf{A} + \lambda \cdot \mathbf{r} \quad \mathbf{v} = S_L^P - \mathbf{A} \quad (40)$$

Damit lässt sich eine quadratische Gleichung in μ aufstellen

$$0 = (r_x^2 + r_y^2 - r_z^2 \cdot \tan^2\alpha) \cdot \mu^2 + 2(v_x r_x + v_y r_y - v_z r_z \cdot \tan^2\alpha) \cdot \mu + (v_x^2 + v_y^2 - v_z^2 \cdot \tan^2\alpha) \quad (41)$$

welche keine (Gerade läuft an Kegel vorbei), eine (Gerade berührt Kegel) oder zwei Lösungen (Gerade schneidet Kegel in zwei Punkten) hat. Im Standardfall (zwei Lösungen) muss die richtige Lösung z.B. anhand der Näherungslinie ausgewählt werden. Die Ableitung der Genauigkeit des Referenzpunktes gelingt wie in 2.2 über das totale Differenzial der Geradengleichung (40) bzw. Gleichung (41).

3 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden wird an Hand von zwei Beispielen die ursprüngliche Modellierung (ausschließlich Ebene-Ebene-Modell) qualitativ der erweiterten Modellierung mit Verwendung aller vorgestellten Modelle gegenübergestellt. Die Strategie wann, welches Modell verwendet wird, wurde mit Hinblick auf unerwünschte Extrapolationseffekte sehr konservativ implementiert. Das Kegel-Ebene-Modell wird erst ab einer bestimmten Krümmung der Näherungslinie berechnet und die Ergebnisse nur dann übernommen, wenn σ_0 a-posteriori kleiner als σ_0 des Ebene-Ebene-Modells ist. Das allgemeine Zylindermodell wird nur dann berechnet, wenn der Referenzpunkt aus dem Ebene-Ebene-Modell eine deutliche 2D-Abweichung zur Näherungslinie aufweist und die Krümmung der Näherungslinie nicht zu stark ist. Die Ergebnisse aus dem Zylindermodell werden wiederum nur dann übernommen, wenn σ_0 a-posteriori und die Höhengenaugkeit des Referenzpunktes besser sind. D.h. im Zweifelsfall wird immer auf das Ebene-Ebene-Modell zurückgegriffen.

Bei den Beispieldaten handelt es sich um ALS-Punktwolken mit einer Punktdichte von ca. 9 Punkten/m². In Abbildung 6 ist eine Situation mit einer gekrümmten Böschung dargestellt. Obwohl die geradlinige Strukturlinie sehr deutlich ausgeprägt ist, erscheint es zunächst verwunderlich warum das Ebene-Ebene-Modell (rot) im mittleren Bereich deutlich ausschwingt (ca. 1 m). Die Visualisierung der Punktwolke in 3D offenbart den gekrümmten Charakter der Böschung und es ist gut zu erkennen, dass das Zylindermodell (grün) ein deutlich besseres Ergebnis liefert.

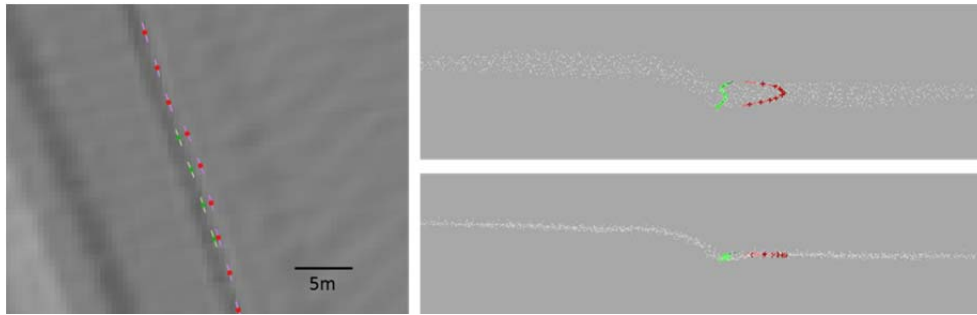


Abb. 6: Vergleich Ebene-Ebene-Modell (rot) und Zylindermodell (grün) bei gekrümmten Böschungen. Links: Referenzpunkte & Schnittlinienvektoren in 2D. Rechts: 3D Punktwolke mit fertig modellierten Linien

Die Modellierung einer stark gekrümmten Strukturlinie ist in Abbildung 7 dargestellt. Es handelt sich dabei um einen Entwässerungsgraben mit einer Breite von ca. 3 m. Im Endbereich des Grabens erkennt man, dass die Referenzpunkte des Ebene-Ebene-Modells (rot) zu weit außen liegen (ca. 50 cm) und die Schnittlinien, im Unterschied zum Kegel-Ebene-Modell (blau), unstetige Richtungsänderungen aufweisen. Diese führen schließlich zu einem „kantigen“ Verlauf der verdichteten Strukturlinie.

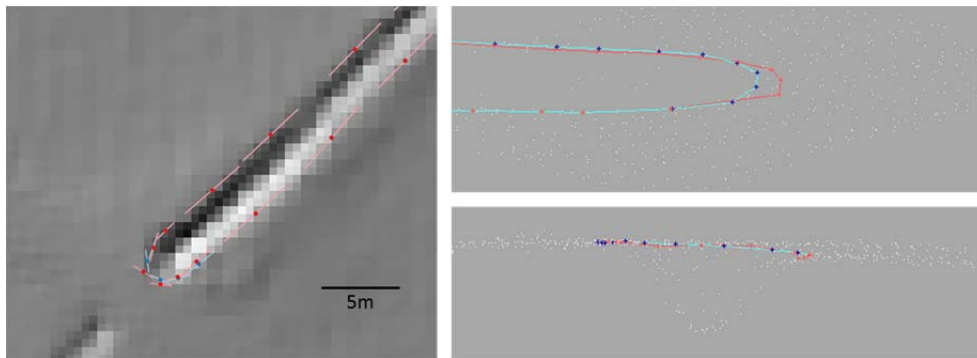


Abb. 7: Vergleich Ebene-Ebene-Modell (rot) und Kegel-Ebene (blau) bei stark gekrümmten Linienbereichen. Links: Referenzpunkte & Schnittlinienvektoren in 2D. Rechts: 3D Punktwolke mit fertig modellierten Linien

Die Modellierung der finalen Strukturlinie erfolgt durch Zusammensetzen der Patches zu einer Gesamtlinie. In diesem Zug erfolgt auch eine Prüfung aufeinander folgender Patches hinsichtlich Konsistenz der Fortschrittsrichtung, etc., und eine Homogenisierung des Punktabstandes durch Einrechnen von möglichst gleichabständigen Zwischenpunkten entlang von stückweisen Bezierkurven dritten Grades. Nach der Verdichtung aller Linien wird die Topologiebereinigung durchgeführt und gegebenenfalls Linienkreuzungen bzw. Einmündungen wiederhergestellt. Abschließend wird durch die Analyse diverser Parameter (Schnittwinkel, Höhengenaugigkeit der Referenzpunkte, etc.) eine Qualitätsbeurteilung der einzelnen Strukturlinien durchgeführt.

Durch die Beschränkung der Punktauswahl und verfeinerter geometrischer Modelle für den Verschnitt der lokalen Flächen links und rechts der Kante konnte sowohl Genauigkeit als

auch Automationsgrad der Strukturlinienableitung erhöht werden. Die großflächige Anwendung des neuen Modellierungsansatzes hat gezeigt, dass bei ALS-Daten ca. 80% aller Patches mit dem Ebene-Ebene-Modell berechnet werden, rund 15% mit dem Kegel-Ebene-Modell und 5% mit dem allgemeinen Zylindermodell.

Literatur

- 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.
- 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).
- MANDLBURGER, G., OTEPKA, J., BRIESE, C., MÜCKE, W., SUMMER, G., PFEIFER, N., BALTRUSCH, S., DORN, C. & BROCKMANN, H., 2016, Automatische Ableitung von Strukturlinien aus 3D-Punktwolken, Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Bern, Schweiz – *Publikationen der DGPF*, Band 25, 131-142
- 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.
- SITHOLE, G. & VOSSSELMAN, 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.