

Datenreduktion dichter Laser-Geländemodelle

Christian Briese und Karl Kraus

Zusammenfassung

Das flugzeuggetragene Laserscanning ermöglicht eine sehr detaillierte Abtastung von Oberflächen. Mit Hilfe von automatischen Verfahren zur Elimination der Nicht-Geländepunkte können großräumige digitale Geländemodelle (DGMe) mit einem verhältnismäßig geringen manuellen Aufwand abgeleitet werden. Die sehr große Punktdichte, die das Laserscanning liefert, ist ein sehr großer Vorteil für die Genauigkeitssteigerung und für die Elimination der Nicht-Geländepunkte, aber andererseits ein großer Nachteil für das Datenmanagement. Für viele weiterführende Analysemethoden (z. B. in der Hydrologie) ist eine qualifizierte Reduktion der Daten notwendig. Diese Datenreduktion sollte allerdings nicht mit den Originaldaten erfolgen, sondern erst nach der Ableitung des (geglätteten) Geländemodells vorgenommen werden.

Der Schwerpunkt dieser Publikation liegt in der Präsentation einer Methode zur Datenreduktion dichter rasterförmiger Geländemodelle. Es werden jene Rasterpunkte ausgewählt, die zur Oberflächenbeschreibung mit einer gewünschten Approximationsgenauigkeit notwendig sind. Zur Lösung dieser Aufgabenstellung existieren bereits Verfahren auf Basis von Triangulierungen, die aber sehr rechenintensiv sind. Mit dieser Publikation wird ein weniger aufwendiges rasterbasiertes Verfahren vorgestellt, das an die in der Photogrammetrie be-

nutzte stufenweise Datenerfassung (*progressiv sampling*) angelehnt ist. Die relevanten Punkte werden – auf Basis einer lokalen Krümmungsanalyse – nach einer vom Benutzer vergebaren Approximationsgenauigkeit ausgewählt. Anhand praktischer Beispiele werden die Ergebnisse der Datenreduktion vorgestellt und diskutiert.

Summary

Airborne laserscanning allows a very detailed sampling of surfaces. With the help of automatic procedures for the elimination of off-terrain points spacious digital terrain models (DTMs) can be derived with a relatively small manual interaction. Laserscanning provides a very high point density, which is a great advantage for the accuracy and for the elimination of off-terrain points, but on the other hand a big disadvantage for the data management. For many further analysis methods (e.g. in the hydrology) a qualified reduction of the data is necessary. However, this data reduction should take place not with the original data, but after the computation of a (smooth) terrain model.

The emphasis of this publication lies in the presentation of a method for the data reduction of dense raster terrain models. For the description of the surface those raster points are selected, which are necessary for the desired approxima-

tion accuracy. For this aim computationally intensive procedures based on triangulations do exist. With this publication a less intricate raster based method is presented, which is comparable to the step wise data recording procedure (progressive sampling) used in photogrammetry. The relevant points are selected considering a user defined approximation accuracy on the basis of a local curvature analysis. The results of this data reduction procedure are presented and discussed with the help of practical examples.

1 Einleitung

Das flugzeuggetragene Laserscanning hat die topographische Geländeaufnahme in den letzten Jahren revolutioniert. Man bekommt Geländemodelle mit einer Genauigkeit im Dezimeterbereich, unter gewissen Voraussetzungen sogar im Zentimeterbereich. Die Vegetation kann im Vergleich zur Stereophotogrammetrie, dem bisherigen Standardverfahren der topographischen Gelände-Erfassung, wesentlich leichter ausgeschaltet werden. Die sehr große Punktdichte, die das Laserscanning liefert, ist einerseits ein großer Vorteil für die Genauigkeitssteigerung, aber andererseits ein großer Nachteil für das Datenmanagement. Es sind daher Methoden zur qualifizierten Datenreduktion gefragt.

2 Analyse der Lenk'schen Publikation

Vor kurzem hat Lenk (2003) in dieser Zeitschrift eine umfassende Darstellung zur Ausdünnung unregelmäßig verteilter Massenpunkte auf der Grundlage von Triangulationen veröffentlicht. Lenk entwickelt seinen Vorschlag aus den vielseitigen Methoden der algorithmischen Geometrie heraus. Er kritisiert an den Methoden der algorithmischen Geometrie, dass sie die Charakteristika der Datenerfassung mit dem Laserscanner und mit dem Fächer-Echolot (Flusssohlenvermessung) nicht berücksichtigen und daher zu sehr langen Rechenzeiten führen. Die adaptive Triangulation, die Lenk favorisiert, nimmt darauf Rücksicht und erzielt ein ansprechendes Ergebnis in einer verhältnismäßig kurzen Zeit. Aus der Sicht der Autoren dieses Beitrages gibt es aber zum Lenk'schen Vorschlag folgende Einwände:

- Es werden Originalmessungen ohne eine Verwertung für das Endergebnis eliminiert. Dadurch verschenkt man jene beachtliche Genauigkeitssteigerung, die mit redundanten Messungen erreicht werden kann. Die Datenreduktion sollte daher nicht mit den Originaldaten erfolgen.
- Die Redundanz der Originalmessungen ist auch die Voraussetzung für die Elimination (Filterung) der Nicht-Geländepunkte (Bäume, Gebäude etc.). Viele Filterverfahren, die sich inzwischen bewährt haben

(z. B. Kraus 2000), sind umso leistungsfähiger, je mehr redundante Messungen vorliegen. Punkte mit identischen bzw. nahezu identischen XY-Koordinaten – keine Seltenheit in den Überlappungszonen der Laserscanner-Streifen – sind für die Filterung besonders wertvoll, da sie aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen wurden (in einer Richtung kann es ein Geländepunkt sein, in der anderen ein Vegetationspunkt). Die Datenreduktion sollte daher erst nach der Elimination der Nicht-Geländepunkte erfolgen.

- Den Geländekanten schenkt Lenk wenig Aufmerksamkeit, obwohl gerade die Geländekanten – z. B. für Überschwemmungssimulationen – eine große Bedeutung haben.

3 Datenreduktion im Geländemodell

Eine Alternative zum Lenk'schen Vorschlag ist die Verschiebung der Datenreduktion von den Originaldaten auf das daraus abgeleitete Geländemodell. Dieser alternative Ansatz setzt aber voraus, dass die zur Ableitung des Geländemodells verwendete Hard- und Software die große Menge der Originaldaten bewältigen kann.

Das Geländemodellprogramm SCOP (siehe die beiden in der Literatur angegebenen Homepages) ist speziell für die Bewältigung großer Datenmengen ausgelegt. Die beim Laserscanning anfallende große Datenmenge kann deshalb sowohl für die Genauigkeitssteigerung als auch für die Elimination der Nicht-Geländepunkte herangezogen werden. Eine Reduktion der Datenmenge wird erst am Ende des Auswertungsprozesses bei der Übergabe der Ergebnisse an andere Programmsysteme – zum Beispiel solche der Hydrologie – vorgenommen. In SCOP sind zur Bewältigung großer Datenmengen und zur Ausschöpfung der gesamten Information, die die Originaldaten enthalten, folgende Vorkehrungen getroffen:

- Mit den Originalpunkten – das sind die in das Landeskoordinatensystem transformierten Laserpunkte – erfolgt keine zeitaufwendige Triangulation. Sie werden vielmehr in stark überlappende Fassetten (Recheneinheiten) eingeteilt und für die Interpolation der Höhen eines Quadratgitters verwendet. Diese Quadratgitter werden für einen direkten Zugriff (*random access*) auf einem (hinreichend großen) Massenspeicher aufbereitet. Der Zugriff erfolgt über eine Datenpyramide (Köstli und Sigle 1986, Kraus 2000).
- Die Interpolation der Höhen eines Rasters, das wir in der Fortsetzung mit Gitter bezeichnen, erfolgt mit allen Originalpunkten einer Fassette mittels robuster linearer Prädiktion. Es wird in jeder Fassette eine eigenständige, schiefe und exzentrische Gewichtsfunktion verwendet. Mit der robusten linearen Prädiktion werden die Nicht-Geländepunkte eliminiert (Kraus 2000). Bei sehr großen Kunstbauten und sehr dichten Baumbeständen wird die robuste lineare Prädiktion in

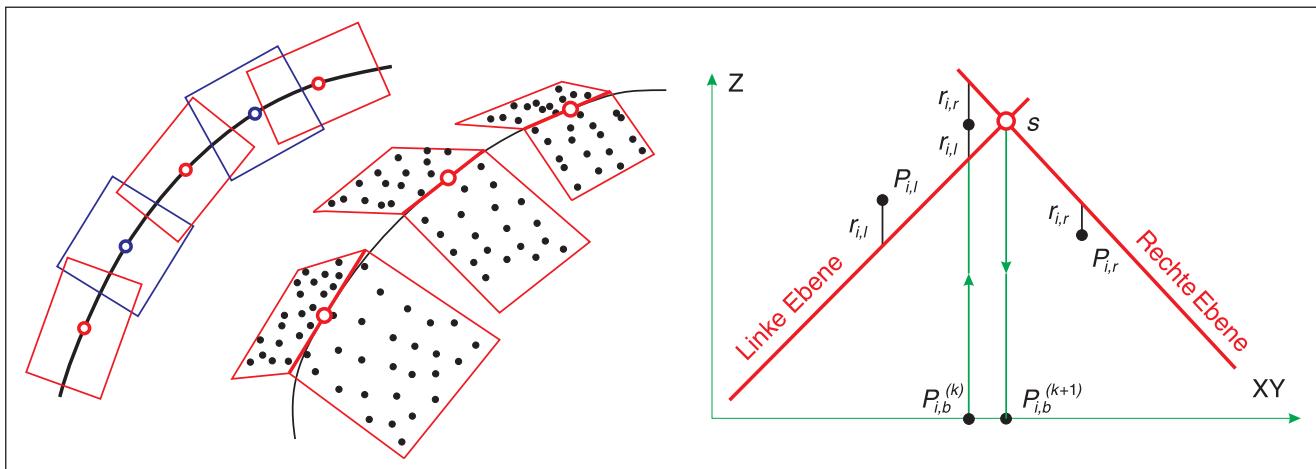


Abb. 1: Modellierung von Böschungskanten mit einem gleitenden Ebenenpaar (rechts) entlang der näherungsweise bekannten Grundrisslinie (links)

mehreren Hierarchiestufen durchlaufen. Die dabei erforderliche Reduktion der Originalpunkte erfolgt mit einer hinterlegten Zellenstruktur, wobei jeweils ein Punkt je Zelle nach verschiedenen Kriterien ausgewählt werden kann. In der feinsten Hierarchiestufe tragen aber alle Originalpunkte, die auf dem Gelände liegen, zur Interpolation der Gitterhöhen bei (Briese und Pfeifer 2001).

- c) Die Einbeziehung aller auf dem Gelände liegenden Originalpunkte nützt das gesamte Genauigkeitspotential der Messdaten aus. Insbesondere bei einfachen Geländeformen ergibt sich dadurch eine Genauigkeit der interpolierten Oberfläche, die deutlich höher als die Laser-Einzelmessung ist. Mit 816 Kontrollpunkten hat die Stadtverwaltung Wien (Magistratsabteilung 41) nachgewiesen, dass die interpolierten Straßenflächen eine Standardabweichung von etwa $\pm 1,0$ cm aufweisen. Die einzelne Lasermessung hat dagegen nur eine relative Höhengenauigkeit von etwa ± 6 cm. Die vielen redundanten Originalpunkte tragen sozusagen zu einem Mittelungsprozess innerhalb der Interpolation bei. (Bei einer Mittelung steigt bekanntlich die Genauigkeit mit der Wurzel der Anzahl der Beobachtungen.)
- d) Die für die Hydrologie besonders wichtigen Böschungsoberkanten sind in den ursprünglichen Laserpunktewolken nicht in ausgeprägter Form enthalten. Sie müssen extrahiert und in das Geländemodell eingebaut werden. Den genäherten Verlauf im Grundriss kann man aus Krümmungsanalysen finden, wobei eine sehr große Punktdichte sehr vorteilhaft ist (Rieger et al. 1999). Diesen genäherten Verlauf der Böschungskanten kann man durch eine dreidimensionale Modellierung – wie in der Abb. 1 angedeutet – verbessern (Briese et al. 2002). Dabei werden Ebenenpaare entlang der jeweiligen Geländekante verschoben und jeweils einer Kleinste-Quadrate-Ausgleichung unterzogen. In der jeweiligen Schnittgeraden wird die Information zusammengezogen, die in den Punkten nahe der Geländekante steckt. Die Schnittgerade des jewei-

ligen Ebenenpaares kann im Mittelpunkt als Tangente an eine Spline-Funktion interpretiert werden. Diese Spline-Funktionen werden in die Berechnung des Geländeoberflächenmodells als Geländekanten eingeführt. Das Ergebnis ist ein so genanntes hybrides Geländemodell, das aus Gitterlinien und (vektoriellen) Geländekanten aufgebaut und innerhalb der oben erwähnten Fassetten mit Zeigern effizient organisiert ist (Kraus 2000). Abb. 2 zeigt ein solches hybrides Geländemodell.

- e) Sowohl die Originaldaten als auch die hybriden Geländemodelle werden im Rahmen von SCOP mit dem Modul TopDM verwaltet. TopDM baut auf der objekt-relationalen Datenbank TopDB, einer Eigenentwicklung des I.P.F. (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung), auf. Inzwischen ist auch der Anschluss an Oracle verwirklicht (Dorninger et al. 2003).

4 Der Reduktionsprozess

Die Gitterweite der Lasergeländemodelle schwankt in Abhängigkeit von der Dichte der erfassten Originaldaten zwischen 0,5 m und 3 m. Auf diese Datendichte ist bei größeren Gebieten die Software anderer Disziplinen häufig nicht ausgelegt. Sie hätten gerne die Quintessenz des genauen hybriden Geländemodells. Es ist daher eine Approximation mit einem kontrollierten Genauigkeitsverlust gefragt.

Eine solche Approximation, die auch zur gewünschten starken Datenreduktion führt, soll zunächst anhand eines reinen Gittermodells erläutert werden. Abb. 3 zeigt einen kleinen Ausschnitt der Gitterlinien eines Geländemodells und die gesuchten Gitterpunkte, die das Geländemodell mit genügender Genauigkeit approximieren.

Die Datenreduktion, die an die in der Photogrammetrie benutzte stufenweise Datenerfassung (*progressiv sampling*, Makarovic 1976, Kraus 2000) angelehnt ist, erfolgt in folgenden Schritten:

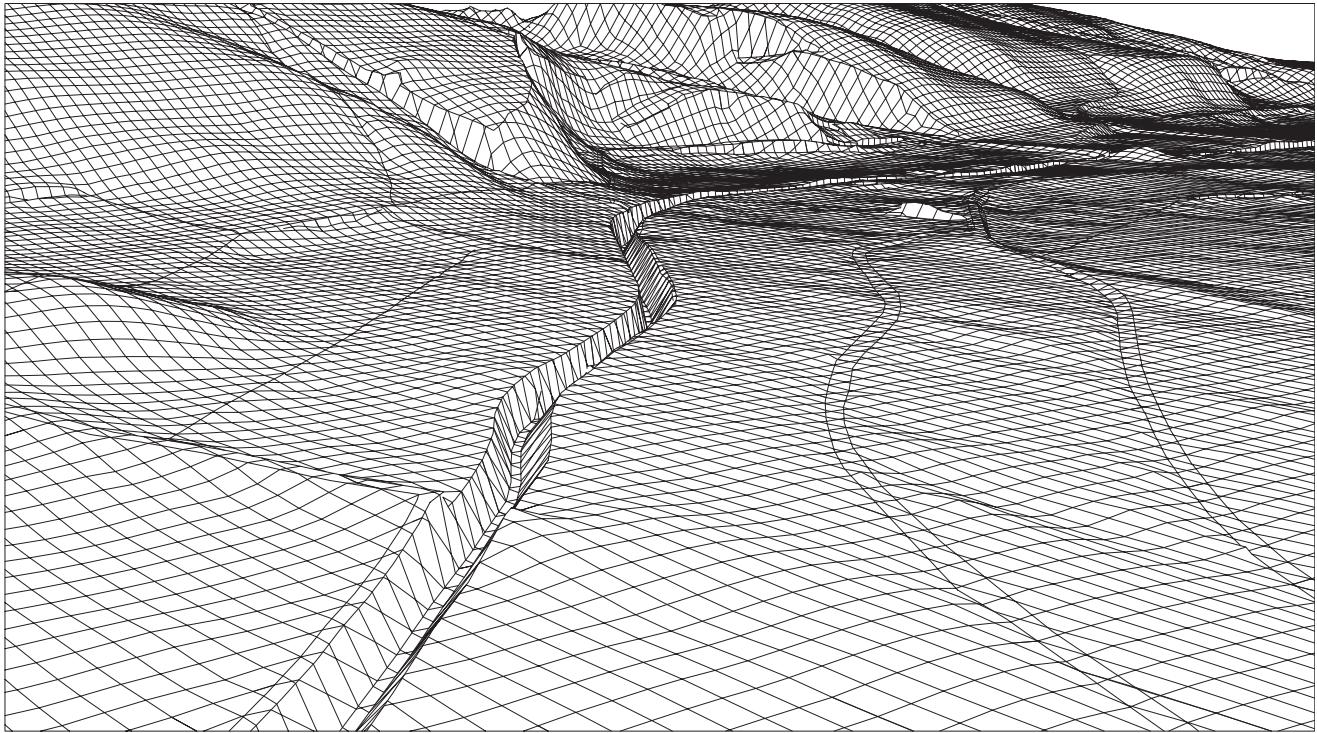


Abb. 2: Hybrides Geländemodell bestehend aus Gitterlinien und integrierten Geländekanten

- a) Zunächst werden in jedem Punkt des engmaschigen Gitters aus den drei benachbarten Punkten – in X- und Y-Richtung getrennt – die Krümmungsradien R_x und R_y sowie die Geländeneigungen $\tan\alpha_x$ und $\tan\alpha_y$ berechnet.
- b) Anschließend wird mit den Krümmungsradien R_x und R_y sowie den Neigungswinkeln α_x und α_y berechnet, wie weit der nächste Oberflächenpunkt entfernt sein darf, um den Approximationsfehler kleiner als den Schwellwert dZ_{max} zu halten (in Abb. 4 wurde ein X-Profil gewählt). Diese Entfernung E_x und E_y bekommt man aus den folgenden Beziehungen (die Ableitung findet man unter anderem bei Kraus 2003):

$$E_x \approx \sqrt{dZ_{max} 8R_x \cdot \cos^3 \alpha_x}$$

$$E_y \approx \sqrt{dZ_{max} 8R_y \cdot \cos^3 \alpha_y} \quad (1)$$

- c) Für die Elimination der überflüssigen Punkte im dichten regelmäßigen Gitter wird die kleinere Entfernung E gewählt.
- d) Um eine Entfernungsobergrenze der verbleibenden Gitterpunkte zum nächsten Nachbarn zu garantieren, wird der Ausdünnungsprozess mit einer sehr groben Gitterweite begonnen.

Anhand des simulierten Beispieles der Abb. 3 soll der Ausdünnungsprozess des dichten regelmäßigen Gitters, das wir im Folgenden als Ausgangsgitter bezeichnen, erläutert werden. Für die Entfernungsobergrenze wurde die Gitterweite Δ^0 gewählt. Damit werden 9 Gitterpunkte festgelegt ($P_{1,1}, P_{1,9}, P_{1,17}, P_{9,1}, \dots$). In jeder Gittermasche (einschließlich der Begrenzungslinien der jeweiligen Git-

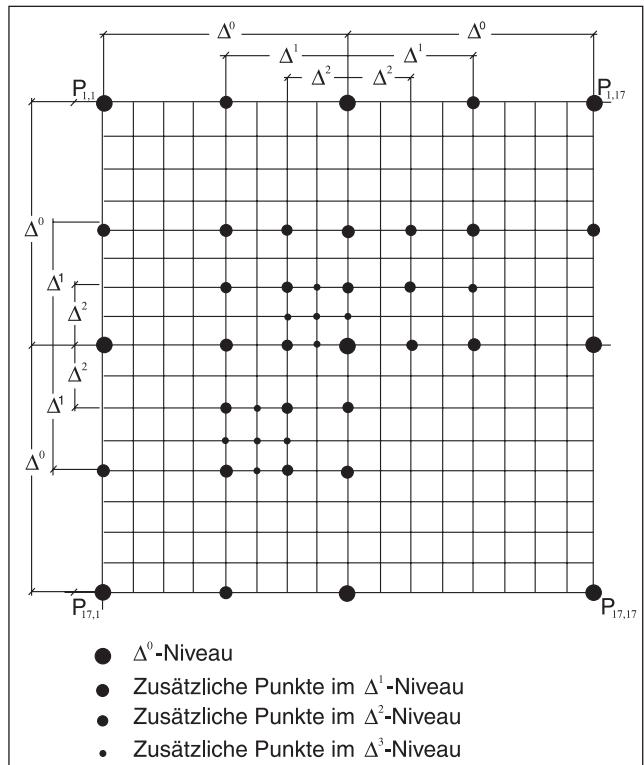


Abb. 3: Engmaschiges Ausgangsgitter und Markierung der Punkte nach der Ausdünnung

termasche) im Δ^0 -Niveau wird anschließend untersucht, ob es mindestens einen Punkt im Ausgangsgitter mit einer Entfernung E gibt, die kleiner als die Gitterweite Δ^0 ist. In unserem Beispiel trifft diese Aussage für die Gittermaschen Δ_{11}^0 , Δ_{12}^0 und Δ_{21}^0 zu; in diesen Gittermaschen ist deshalb das Δ^1 -Niveau einzuziehen und die Gitterpunkte $P_{1,5}, P_{1,13}, P_{5,1}, P_{5,5}, P_{5,9}, P_{5,13}, P_{5,17}, P_{9,5}$ etc. werden hinzugefügt.

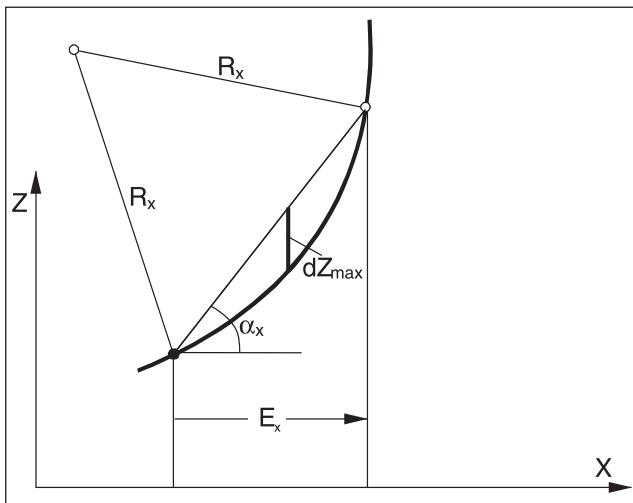


Abb. 4: Krümmungsradius und Approximationsfehler in einem ZX-Profil

gefügt. In den Gittermaschen des Δ^1 -Niveaus wird in der Fortsetzung untersucht, ob es mindestens einen Punkt im Ausgangsgitter mit einer Entfernung E gibt, die kleiner als die Gitterweite Δ^1 ist. In unserem Fall trifft diese Aussage für die Gittermaschen Δ_{22}^1 , Δ_{23}^1 und Δ_{32}^1 zu; in diesen Gittermaschen ist deshalb das Δ^2 -Niveau einzuziehen und die Gitterpunkte $P_{5,7}$, $P_{5,11}$, $P_{7,5}$ etc. werden hinzugefügt. In den Gittermaschen des Δ^2 -Niveaus wird zum Schluss untersucht, ob es mindestens einen Punkt im Ausgangsdatenmaterial mit einer Entfernung E gibt, die kleiner als die Gitterweite Δ^2 ist. In unserem Fall trifft diese Aussage für die Gittermaschen Δ_{44}^2 und Δ_{63}^2 zu; in diesen Gittermaschen sind jeweils fünf weitere Gitterpunkte hinzuzufügen. Insgesamt reduziert sich in diesem Ausdünnungsprozess die Anzahl der Gitterpunkte von 289 ($= 17^2$) auf 45.

Die Ausdünnungsrate könnte noch weiter erhöht werden, wenn man

- die ohnehin in beiden Koordinatenrichtungen anfallenden Entfernungen E_x und E_y auch für die Ausdünnung konsequent nutzte (eventuell auch mit den Hauptkrümmungsrichtungen) und
- eine Unterscheidung der Ausgangsgitterpunkte in Punkte, die in der jeweiligen Δ^i -Gittermasche oder auf ihren Begrenzungslinien liegen, mache.

Im Rahmen des Ausdünnungsprozesses kann auch eine Triangulation zum Beispiel nach den Delaunay-Kriterien vorgenommen werden. Eine solche Triangulation ist für das simulierte Beispiel in Abb. 5 dargestellt. Die Dreiecke sind relativ gut geformt. Da die Höhen der Dreieckspunkte weitgehend von den zufälligen Messfehlern im Rahmen der Interpolation befreit wurden, beschreiben diese Dreiecke eine in hohem Maße glatte Oberfläche.

Die Geländekanten, die im hybriden Geländemodell integriert sind (Abb. 2), können in die Dreiecksvermaschung (Abb. 5) nachträglich als Zwangskanten ein-

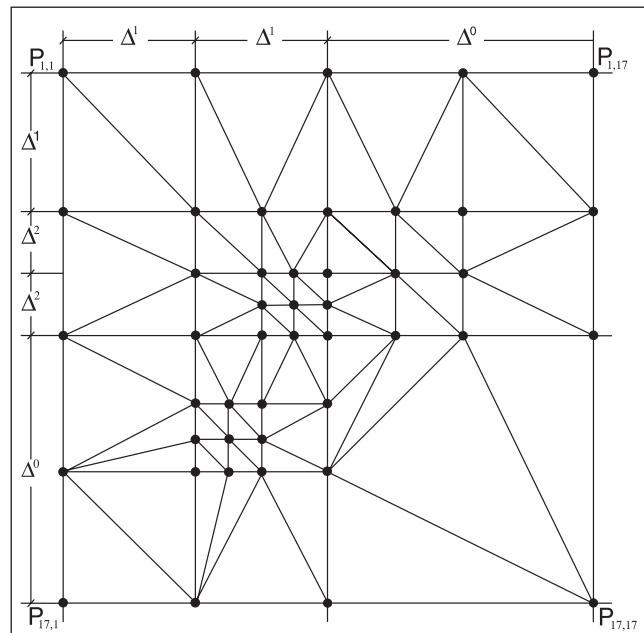


Abb. 5: Delaunay-Triangulation mit den ausgedünnten Punkten der Abb. 3

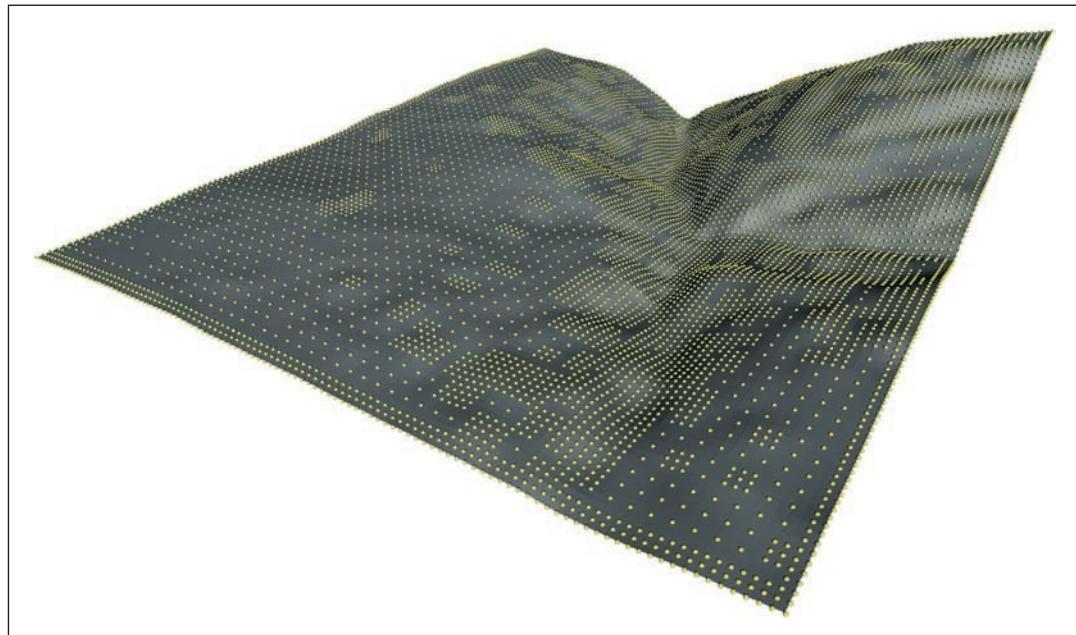
geführt werden. Vorher kann entlang der Geländekanten eine Reduktion der Punkte – sowohl in Lage als auch in Höhe – erfolgen. Damit an den Geländekanten keine schlecht geformten Dreiecke entstehen, sollte man mit einer Pufferfunktion Gitterpunkte im reduzierten Datensatz eliminieren, die innerhalb einer gewissen Bandbreite den Geländekanten benachbart sind. Für sehr hohe Qualitätsansprüche sollte man die erwähnte Bandbreite in Abhängigkeit von der Krümmung des Oberflächenmodells senkrecht zur Geländekante – auf beiden Seiten der jeweiligen Geländekante unterschiedlich – variieren.

5 Praktische Beispiele

Für einen kleinen Ausschnitt von $110 \text{ m} \times 130 \text{ m}$ wurde die vorgeschlagene Methode erprobt. Das Ausgangsgitter hat eine Weite von 1 m. Für die Entfernungsobergrenze wurde die Gitterweite $\Delta^0 = 4 \text{ m}$ gewählt. Das dazwischen liegende Δ^1 -Niveau beträgt 2 m. Der Schwellwert dZ_{\max} für die Approximation beträgt 25 cm. Abb. 6 zeigt das Ergebnis. In Bereichen mit geringer Krümmung – aus der Schummerung ersichtlich – ist die Punktdichte reduziert, in Bereichen mit starker Krümmung bleibt das Ausgangsgitter erhalten. Am Gebietsrand, an dem die Krümmung schwer abzuschätzen ist, belässt der implementierte Prozess das Ausgangsgitter.

Ein zweites Beispiel stammt aus einem Pilotprojekt, das im Auftrag der Wasserstraßendirektion an der Donau bei Hainburg vom I.P.F. bearbeitet wurde (Kölbl et al. 2002). In einem Ausschnitt von $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ liegt ein Laser-Geländemodell mit einer Weite des Ausgangsgitters von 1 m vor, d.h. mit insgesamt ca. 4 Millionen Gitterpunkten. Diese Punktmenge wurde – unter Einhaltung

**Abb. 6: Geschum-
mertes Gelände mit
den ausgedünnten
Punkten**



eines Schwellwertes dZ_{\max} für die Approximation von 25 cm – auf ca. 1,3 Millionen Punkte reduziert. Beeindruckend ist, dass mit der verhältnismäßig großen Datensumme diese 68-prozentige Reduktion inklusive der ASCII-Datenausgabe mit einem 2GHz-Rechner in 4,75 Minuten erreicht werden konnte.

6 Schlussbemerkung

Der vorgestellte Prozess zur Ausdünnung sehr engmaschiger Geländemodelle setzt nach Ausschöpfung der gesamten Information ein, die in den Originaldaten einer Laserscanner-Aufnahme oder einem vergleichbaren Datenerfassungsverfahren enthalten ist. Der hier vorgestellte Datenreduktionsprozess liefert eine Punktverteilung in Abhängigkeit von der Geländekrümmung. Mit diesen Punkten kann man eine Triangulation aufbauen. Da die unregelmäßigen Höhenfehler der Originalpunkte im Rahmen der Interpolation herausgefiltert wurden, beschreiben die reduzierten Punkte in hohem Maße eine glatte Oberfläche. Führt man dagegen die Datenreduktion mit den Originaldaten durch und verwendet die reduzierten Punkte – wie in der Lenk'schen Veröffentlichung vorgeschlagen – für eine Triangulation, so überträgt man die unvermeidlichen zufälligen Höhenfehler in das Oberflächenmodell. Trotz dieser Kritik an den Lenk'schen Vorschlägen soll zum Schluss betont werden, dass in seiner Veröffentlichung äußerst wertvolle Anregungen für ein gegenwärtig sehr wichtiges Thema enthalten sind.

Danksagung

Das Projekt wird vom Österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung finanziell unterstützt (Projekt Nr. 15789).

Literatur

- Briese, Ch., Peifer, N.: Airborne Laser Scanning and Derivation of Digital Terrain Models. In: Optical 3-D Measurement Techniques V (Eds.: Grün/Kahmen), pp. 80–87, Wichmann-Verlag, 2001.
- Briese, Ch., Kraus, K., Pfeifer, N.: Modellierung von dreidimensionalen Geländecken in Laser-Scanner-Daten. Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. habil. Siegfried Meier, TU Dresden, Institut für Planetare Geodäsie, S. 47–52, 2002.
- Dorninger, P., Briese, Ch., Jansa, J., Mandlburger, G.: Modellierung der Marsoberfläche aus Laserscannerdaten. 12. Internationale Geodätische Woche Obergurgl, Herbert Wichmann Verlag, Hrsg. Chesi/Weinold, S. 21–30, 2003.
- <http://www.ipf.tuwien.ac.at> (22. Mai 2003)
- <http://www.inpho.de> (22. Mai 2003)
- Kölbl, Ch., Kraus, K., Oberhofer, A.: Hochgenaues Geländemodell aus Laser-Scanner-Daten: Aufbau und Anwendung. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 54. Jahrgang, Heft 1, S. 17–23, 2002.
- Köstli, A., Sigle, M.: Die Scop-Datenstruktur zur Verschneidung und Korrektur von Geländemodellen. BuL 54, S. 122–129, 1986.
- Kraus, K.: Photogrammetrie, Band 1 (Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen). 7. Auflage, Walterde-Gruyter-Verlag, voraussichtlich noch 2003.
- Kraus, K.: Photogrammetrie, Band 3 (Topographische Informationssysteme). Dümmler-Verlag, 2000.
- Lenk, U.: Triangulationen und Adaptive Triangulationen – ein Verfahren zur Ausdünnung unregelmäßig verteilter Massenpunkte in der Geländemodellierung. zfv 128, S. 47–56, 2003.
- Makarovic, B.: Digital terrain model system. ITC-Journal, Heft 1, pp. 57–83, 1976.
- Rieger, W., Kerschner, M., Reiter, T., Rottensteiner, F.: Roads and Buildings from Laser Scanner Data within a forest Enterprise. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Workshop, Vol. 32, Part 3-W14, S. 185–191, 1999.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Christian Briese

Prof. Dr. Karl Kraus

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien

Gusshausstrasse 27–29

A-1040 Wien

cb@ipf.tuwien.ac.at

kk@ipf.tuwien.ac.at