

# Qualitätsmaße für digitale Geländemodelle am Beispiel eines Photogrammetrie- und eines Laserscannerprojektes

KARL KRAUS<sup>1</sup>, MARIA ATTWENGER<sup>1</sup>, CHRISTIAN BRIESE<sup>1</sup>, GOTTFRIED MANDLBURGER<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Digitale Geländemodelle (DGMe) sind in den letzten Jahren wieder in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Sie sind für die Modellierung von hochwassergefährdeten Bereichen und für das Management tatsächlicher Hochwässer unentbehrlich. DGMe sind außerdem ein wichtiger Basisdatenbestand für vielseitige Aufgabenstellungen, die mit Geo-Informationssystemen (GISen) gelöst werden. Gegenwärtig werden in vielen Ländern große Datenbestände aufgebaut, aber sehr selten detaillierte Qualitätsmaße beigelegt. In diesem Beitrag werden praxisbezogene Qualitätsmaße präsentiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Originaldaten und das DGM – unabhängig von der angewendeten Interpolationsmethode – zur Verfügung stehen. Die erwähnten Qualitätsmaße wurden für DGMe ermittelt, die einerseits aus photogrammetrischen Daten und andererseits aus Laserscanner-Daten abgeleitet wurden. Aus diesem Vergleich ergeben sich interessante Empfehlungen für die Praxis.*

## 1 Vorbemerkungen

Digitale Geländemodelle (DGMe) wurden vor nahezu 50 Jahren von C. Miller, Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA, „erfunden“. Die folgenden Jahrzehnte waren vor allem von der Entwicklung der (photogrammetrischen) Datenerfassungstechniken und der adäquaten Software geprägt. Heutzutage spielen DGMe als Basisdatenbestand für Geo-Informationssysteme (GISe) eine große Rolle. In den letzten Jahren etablierte sich eine neue Datenerfassungstechnik, das flugzeuggetragene (*airborne*) Laserscanning (ALS).

Um der großen Bedeutung der DGMe Rechnung zu tragen, benötigt man Qualitätsmaße für DGMe. Faustformeln zur groben Genauigkeitsabschätzung sind für die Planung von DGM-Projekten von großer Bedeutung. Sie sind in einer mehr oder weniger ausgereiften Form vorhanden (z.B. KRAUS, 2004). Wenn die Modellbildung mit Kleinste-Quadrate-Ansätzen erfolgt, kann – entsprechende Software vorausgesetzt – die Genauigkeit der aus den erfassten Originaldaten interpolierten Punkte mittels des Fortpflanzungsgesetzes von Varianzen und Kovarianzen berechnet werden. Das Fortpflanzungsgesetz von Varianzen und Kovarianzen hat aus der Sicht des Anwenders aber den Nachteil einer sogenannten Blackbox. Der Anwender bekommt zwar detaillierte Genauigkeitsmaße, er erfährt aber nicht die einzelnen Einflussfaktoren.

Es gibt noch sehr wenig Literatur darüber, wie für DGMe im *Postprocessing* detaillierte Genauigkeitsangaben gefunden werden können. Im Folgenden werden in Stufen Genauigkeitsmaße abgeleitet. Ihre Entstehung ist leicht nachvollziehbar und sehr transparent. Die Ergebnisse können attraktiv visualisiert werden. Die vorgeschlagenen Methoden können auch für DGMe angewendet werden, die bereits – mit unterschiedlicher Software – gebildet wurden. Bei der Beschreibung der Methode unterstellen wir allerdings ein hybrides DGM, das aus einem regelmäßigen Raster mit eingeketteten Geländekanten besteht (KRAUS, 2000).

---

<sup>1</sup> Alle am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der TU Wien, Gußhausstraße 27-29, e-mails: [kk@ipf.tuwien.ac.at](mailto:kk@ipf.tuwien.ac.at), [ma@ipf.tuwien.ac.at](mailto:ma@ipf.tuwien.ac.at), [cb@ipf.tuwien.ac.at](mailto:cb@ipf.tuwien.ac.at)

<sup>2</sup> Christian Doppler-Labor am I.P.F., e-mail: [gm@ipf.tuwien.ac.at](mailto:gm@ipf.tuwien.ac.at)

## 2 Theorie

Wir gehen davon aus, dass die Stützpunkte, aus denen das DGM abgeleitet wurde, noch verfügbar sind. Bei photogrammetrischen Daten sollen etwaige grobe Messfehler bereits eliminiert sein. Bei ALS-Daten sollen die Nicht-Bodenpunkte, das sind Punkte auf Bäumen und Häusern, bereits herausgefiltert sein. Die Genauigkeiten der Stützpunkte werden empirisch aus dem Datenmaterial bestimmt; zusätzlich ist aber eine grobe Schätzung der Höhengengenauigkeit für die Stützpunkte, die mit  $\sigma_{a\text{ priori}}$  bezeichnet wird, wertvoll.

Im Folgenden werden ein empirisch-stochastischer Ansatz und ein geometrie-basierter Ansatz vorgestellt.

### 2.1 Empirisch-stochastischer Ansatz

Dem Abschnitt 2.1.2 über die Grundgedanken wird ein Abschnitt über die Krümmung vorgestellt.

#### 2.1.1 Krümmung $1/r$

Die Qualität von DGMen wird stark von der Krümmung des Geländes beeinflusst. Sie wird deshalb in jedem Gitterpunkt berechnet. Es wurde ein Algorithmus implementiert, der mit Hilfe der Differentialgeometrie die maximale Krümmung unter Beachtung der Geländekanten ermittelt (Details findet man im Appendix A der Veröffentlichung (KRAUS ET AL., 2004)).

Abb. 1 zeigt das auf diese Weise berechnete Krümmungsbild eines DGMs, das aus ALS-Daten gewonnen wurde. Die Gitterweite des DGMs beträgt 1m. Die Krümmung  $1/r_i$  ( $r \dots$  Krümmungsradius) variiert zwischen  $-0,61\text{m}^{-1}$  und  $0,78\text{m}^{-1}$ . Das Krümmungsbild veranschaulicht umfassend die Geomorphologie der Geländeoberfläche (Abb. 2 zeigt das dazugehörige Orthophoto). In den landwirtschaftlich genutzten Flächen ist die Krümmung sehr gering, in den besiedelten und bewaldeten Flächen deutlich größer. Die stärkste Krümmung tritt in der Umgebung der Geländekanten auf, die im ALS-DGM nicht explizit modelliert wurden.

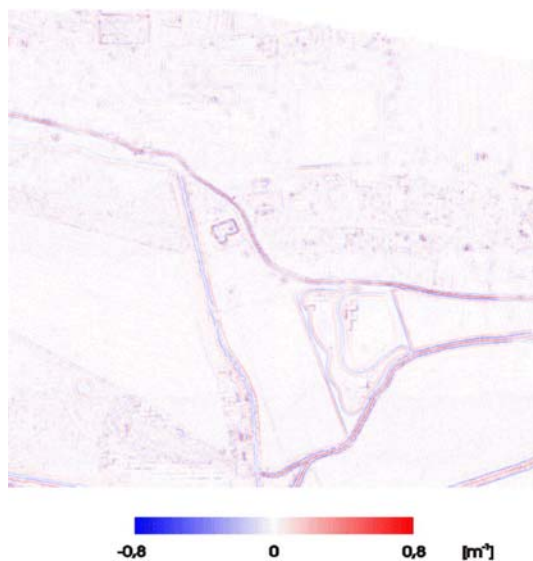


Abb. 1: Maximale Krümmung  $1/r_i$  in jedem Gitterpunkt eines ALS-DGMs



Abb. 2: Orthophoto

## 2.1.2 Grundgedanken

Viele empirische Untersuchungen haben in der Vergangenheit gezeigt, dass die Genauigkeit des DGMs nur unwesentlich von der Interpolationsmethode abhängig ist. Die unterschiedlichen Interpolationsmethoden wirken sich aber sehr auf die geomorphologische Qualität der interpolierten Oberfläche und auf die Qualität der mit der Interpolation in der Regel verbundenen Filterung aus.

Außerdem kann für die Genauigkeitsabschätzung durchaus ein einfacherer Algorithmus als für die Berechnung des DGMs gewählt werden. Wir wählen für die Genauigkeitsabschätzung die gleitende Schrägebene (KRAUS, 2000). In jeden Gitterpunkt des DGMs wird eine schräge Ebene gelegt (Abb. 3). Der Einflussbereich für jeden Gitterpunkt ergibt sich aus der Flächengröße  $A_i$ . Die Bereiche  $A_i$  werden mit Hilfe der Krümmung  $1/r_i$  so bestimmt, dass das ebene Flächenelement die gekrümmte Oberfläche in der Umgebung des jeweiligen Gitterpunktes innerhalb einer vorgegebenen Approximationsgenauigkeit  $dZ_{\max}$  annähert (z.B. BRIESE & KRAUS, 2003):<sup>1</sup>

$$A_i = dZ_{\max} 8r_i \cos^3 \alpha_i \quad (1)$$

$\alpha_i$  ... Geländeneigung im jeweiligen Gitterpunkt

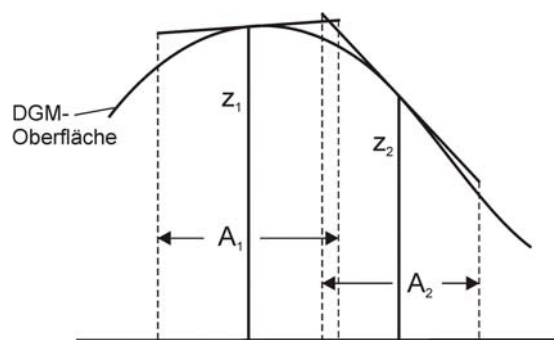


Abb. 3: Zwei DGM-Gitterpunkte mit approximierenden ebenen Flächenelementen  $A_i$

Mit Hilfe des jeweiligen Flächenelementes  $A_i$  kann aus dem Original-Datensatz der Bodenkpunkte die Anzahl  $n_i$  entnommen werden, die für die Interpolation der Gitterhöhe  $Z_i$  repräsentativ ist. Ein interessantes Zwischenergebnis ist die Punktdichte:

$$\bar{n}_i = n_i / A_i \quad (2)$$

Die Genauigkeit  $\sigma_{Z,\text{DGM}}$  einer Gitterhöhe  $Z_i$  folgt aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz (KRAUS ET AL., 2004):

$$\sigma_{Z,\text{DGM}} = \sigma_{Z,\text{Original},i} / \sqrt{n_i} \quad (3)$$

<sup>1</sup> Die Bereiche  $A_i$  können sehr aufwendig bestimmt werden. Die theoretisch beste Lösung wäre, aus den beiden Hauptkrümmungen und den Hauptkrümmungsrichtungen im jeweiligen Gitterpunkt ein ebenes Flächenelement  $A_i$  mit einer elliptischen Begrenzung zu ermitteln. Außerdem sollten die Bereiche, die – vom Gitterpunkt aus gesehen – auf der anderen Seite von Geländekanten liegen, nicht in die Flächengröße  $A_i$  eingehen. Im Abschnitt 3. wird die Implementierung diskutiert. Die praktischen Beispiele in diesem Aufsatz sind mit der Lösung entstanden, dass die Bereiche  $A_i$  quadratisch angenommen wurden.

$\sigma_{Z,Original,i}$  ist die repräsentative Höhengenaugigkeit eines Original-Bodenpunktes. Die Beziehung (3) ist für horizontale Flächen, wo die Interpolation nichts anderes als das arithmetische Mittel ist, unmittelbar einsichtig; sie gilt aber auch für ausgleichende Schrägebenen (KRAUS ET AL., 2004).

$\sigma_{Z,Original,i}$  wird aus den Original-Bodenpunkten empirisch bestimmt. Auf diese Weise geht die unterschiedliche Qualität der Original-Bodenpunkte und auch die Qualität des zu testenden DGMs in das Genauigkeitsmaß (3) ein.  $\sigma_{Z,Original,i}$  wird als RMS (*root mean square error*) aus den Diskrepanzen zwischen den Höhen der Original-Bodenpunkte und den an diesen Stellen interpolierten Höhen im DGM berechnet. Für jedes Flächenelement  $A_i$  bekommt man einen repräsentativen Wert  $\sigma_{Z,Original,i}$ . Sollte dieser Wert geringer als der im Abschnitt 2 erwähnte Wert  $\sigma_{a\text{ priori}}$  ausfallen, wird man ihn in der Formel (3) durch  $\sigma_{a\text{ priori}}$  ersetzen.

### 2.1.3 Beispiele

Für den Ausschnitt der Abb. 1 bzw. 2 variieren – bei Verwendung einer Approximationsgenauigkeit  $dZ_{\max}$  von 5cm – die Flächenelemente  $A_i$  zwischen  $2\text{m}^2$  und  $512\text{m}^2$ ; der quadratische Mittelwert beträgt  $36\text{m}^2$ .

Die Punktdichte  $\bar{n}_i$  (2) ist in der Abb. 4 dargestellt. Die maximale Punktdichte beträgt  $4,64$  Punkte/ $\text{m}^2$ . Die hohe Punktdichte tritt an den Überlappungszonen der ALS-Streifen auf. In den weißen Bereichen gibt es keine Bodenpunkte: Die Originalpunkte lagen dort auf Gebäuden und Bäumen (Vergleiche Abb. 2); sie wurden bei der Bildung des DGMs mit dem Programm SCOP herausgefiltert; außerdem gibt es kleine Wasserflächen, in denen der Laserstrahl nicht reflektiert wurde (<http://www.inpho.de>, [http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/scop/englisch/scop\\_e.html](http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/scop/englisch/scop_e.html)).

Die aus den Diskrepanzen zwischen den Höhen der Originaldaten und den an diesen Stellen interpolierten Höhen im DGM berechneten Werte  $\sigma_{Z,Original,i}$  sind für unser Test-ALS-DGM in der Abb. 5 dargestellt. Dieses Fehlermaß variiert vor allem abhängig von der Qualität der Datenerfassung.  $\sigma_{Z,Original,i}$  erreicht einen Maximalwert von  $\pm 52\text{cm}$ . Der quadratische Mittelwert beträgt  $\pm 5,1\text{cm}$ . In 64% der Fälle wurde der RMS durch die Standardabweichung  $\sigma_{a\text{ priori}}$ , die mit  $\pm 5\text{cm}$  angenommen wurde, ersetzt. In Bereichen ohne Bodenpunkte wurde kein  $\sigma_{Z,Original,i}$  angegeben; sie sind in schwarz markiert.

Das wichtigste Ergebnis sind die für jeden Gitterpunkt des DGMs geschätzten Standardabweichungen  $\sigma_{Z,DGM}$ , die mittels der Beziehung (3) berechnet wurden. Die Genauigkeit variiert zwischen  $\pm 4\text{mm}$  und  $\pm 2,15\text{m}$ . Der Medianwert beträgt  $2,1\text{cm}$ . Abb. 6 zeigt eine Visualisierung unseres Testgebietes.

Die „schwarzen“ Bereiche in der Abb. 6, das sind Bereiche mit größeren Datenlöchern, werden bei der DGM-Berechnung mehr oder weniger gut überbrückt. Die mit Überbrückungen verbundenen Gefahren sind mit Qualitätsparametern anzuzeigen. Der bisher besprochene empirisch-stochastische Ansatz ist dafür weniger geeignet. Er ist in den stützpunktlosen Bereichen durch einen geometrie-basierten Ansatz zu ersetzen.

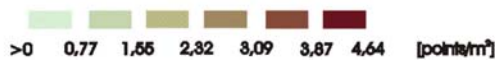
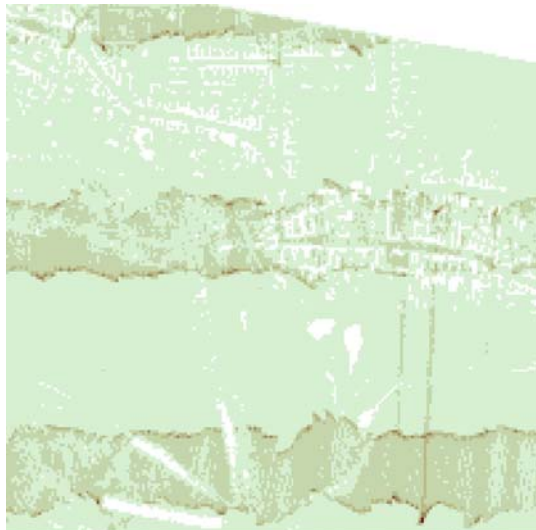


Abb. 4: Punktdichte  $\bar{n}_i$  der Original-Bodenpunkte, aus denen das ALS-DGM abgeleitet wurde<sup>1</sup>. In weiß markierten Bereichen gibt es keine Original-Bodenpunkte.

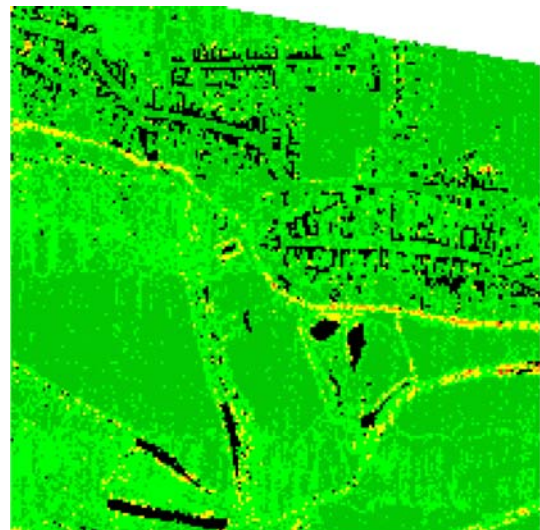


Abb. 5.: Empirische Genauigkeit  $\sigma_{z, \text{Original}, i}$  der Original-Bodenpunkte in Relation zum ALS-DGM<sup>2</sup>. In schwarz markierten Bereichen gibt es keine Bodenpunkte.

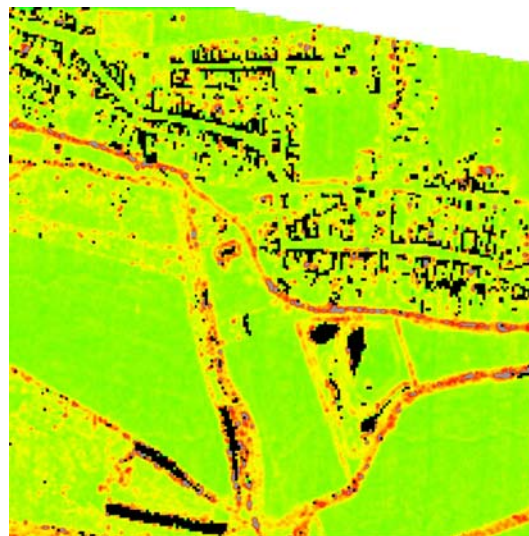


Abb. 6: Standardabweichungen  $\sigma_{z, \text{DGM}}$  in jedem Gitterpunkt des ALS-DGMs. Bereiche ohne Original-Bodenpunkte wurden schwarz markiert.

<sup>1</sup> Für die Berechnung der Punktdichte wurde eine Implementierung benutzt, die ein früheres Konzept verwirklicht hat. Es wurden über das gesamte Gebiet gleich große Flächenelemente von 25m<sup>2</sup> gelegt.  
<sup>2</sup> In Fortsetzung der Fußnote zur Abb. 4 wurde der RMS für die 25m<sup>2</sup> großen Flächenelemente ermittelt.

## 2.2 Geometrie-basierter Ansatz

Aus geometrischer Sicht ist zunächst von Bedeutung, wie weit der nächstliegende (Original-) Bodenpunkt vom jeweiligen interpolierten DGM-Gitterpunkt entfernt ist.

### 2.2.1 Entfernung $d_s$ des nächstliegenden Stützpunktes vom jeweiligen DGM-Gitterpunkt

Mit Hilfe der Chamfer-Funktion der digitalen Bildverarbeitung lassen sich diese kürzesten Entfernungen  $d_s$  rationell ermitteln (BORGFORNS, 1986). Für das eingeführte Testbeispiel zeigt Abb. 7 diese Information. In Bereichen, in denen Datenlöcher vorhanden sind, sind diese kürzesten Entfernungen  $d_s$  besonders groß. Die maximale kürzeste Entfernung beträgt 19m.



Abb. 7: Entfernungen des nächstliegenden Stützpunktes von den jeweiligen DGM-Gitterpunkten

### 2.2.2 Interpolationsfehler $dZ$ in stützpunktlosen Bereichen mit Beispielen

Eine der möglichen Konstellationen, die in stützpunktlosen Bereichen auftreten können, ist in der Abb. 8 skizziert: Der stützpunktlose Bereich wird von der DGM-Software mehr oder weniger geradlinig überbrückt. Tatsächlich soll das Gelände auf der linken Seite eine Krümmung  $1/r$  besitzen. Dadurch entsteht ein Interpolationsfehler  $dZ$  im DGM-Gitterpunkt, der vom nächstliegenden Stützpunkt um  $d_s$  entfernt ist:

$$dZ \approx \frac{d_s^2}{2r} \quad (4)$$

Mit der Krümmungsinformation (Abb. 1) und der  $d_s$ -Information (Abb. 7) erhält man mit der Beziehung (4) das in der Abb. 9 dargestellte Ergebnis. Der Interpolationsfehler variiert zwischen  $-8,5\text{m}$  und  $7,1\text{m}$ . In den Bereichen mit hoher Punktdichte, in denen die Stützpunkte Abstände von etwa  $1\text{m}$  besitzen, ist der Interpolationsfehler  $dZ$  völlig unbedeutend. In den stützpunktlosen Bereichen, in denen wir keine statistische Genauigkeit des DGMs erhalten

haben (Abb. 5), ist die Kenntnis des Interpolationsfehlers  $dZ$  von großer Bedeutung. Falls  $d_s$  größer als der Krümmungsradius  $r$  werden sollte, ist auf die Angabe eines Interpolationsfehlers zu verzichten. Diese Bereiche sind als völlig unbrauchbar zu markieren.

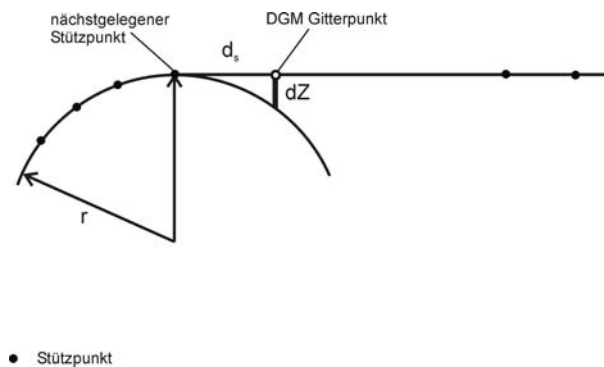


Abb. 8: Interpolationsfehler  $dZ$  im Stützpunktlosen Bereich

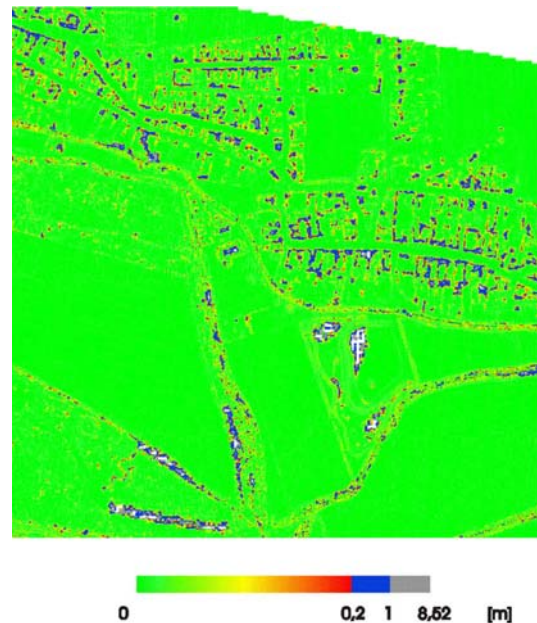


Abb. 9: Geometrische Genauigkeit eines ALS-DGMs. In den weißen (unbrauchbaren) Bereichen ist die kürzeste Entfernung  $d_s$  größer als der Radius der Krümmung.

### 3 Implementierung

Die in den vorangegangenen Abschnitten besprochenen Qualitätsmaße werden derzeit im DGM-Programmsystem SCOP++ umgesetzt. Dabei wurde generell eine Einteilung in Qualitätsmaße der Originaldaten und der daraus abgeleiteten DGMe vorgenommen. Grundsätzlich können alle Qualitätslayer einerseits als digitale Modelle im SCOP DGM-Format RDH (*Random Digital Height*) sowie als digitale Karten (Rasterbilder) abgelegt werden. Die beiden Begriffe werden daher im Folgenden als Synonym betrachtet. Vor allem im Hinblick auf eine Archivierung der einzelnen Qualitätslayer zusätzlich zum eigentlichen DGM in einer topographischen Datenbank ist eine Speicherung im DGM-Format von Vorteil.

Die Beschaffenheit der Originaldaten kann durch Modelle der Datendichte (*density model*, Abb. 4) und des Stützpunktabstandes (*distance model*, Abb. 7) beschrieben werden. Ihre Ableitung erfolgt auf Basis eines regelmäßigen Rasters (Analyseeinheiten), wobei die Rasterweite unabhängig von der DGM-Gitterweite ist.

Die Qualität der abgeleiteten DGMe kann in Form von Modellen der inneren und äußeren Genauigkeit berechnet werden. Die Auflösung dieser Modelle entspricht dabei stets der Gitterweite des zu Grunde liegenden DGMs. Die innere Genauigkeit (*precision*) kann auf unterschiedliche Weise beschrieben werden. Einerseits kann für jeden Gitterpunkt der RMS, der Medianwert oder das maximale Residuum angegeben werden. Weiters stehen die im Abschnitt 2 vorgestellten Methoden (empirisch-stochastischer und geometrie-basierter Ansatz) zur Verfügung. Die Ableitung der äußeren Genauigkeit erfolgt durch Vergleich mit unabhän-

gigen Datensätzen, entweder modellhaft bezogen auf ein Referenz-DGM oder diskret auf Basis von beliebig verteilten Kontrollpunkten.

Der Einfluss der Originaldaten auf das Genauigkeitsmaß des einzelnen Gitterpunktes wird dabei stets durch die im Abschnitt 2.1.2 eingeführten Flächenelemente  $A_i$  begrenzt, wobei die Krümmungsellipse durch eine eingeschriebene Raute approximiert wird. Das Einsortieren der Originalpunkte in die Flächenelemente  $A_i$  läuft für jeden Punkt auf einen Point-In-Polygon-Test hinaus und kann daher nicht mit den sehr schnellen Algorithmen der rasterbasierten Bilddatenverarbeitung erfolgen. Dieser Einfluss auf die Rechenzeiten bleibt noch zu testen.

## 4 Anwendung

Am I.P.F. werden gegenwärtig mehrere Pilotprojekte bearbeitet. Die Anwender verlangen zunehmend die Qualitätsmaße. Wir beschränken uns in diesem Beitrag auf das Projekt Pulkatal in Niederösterreich. Das Projekt wurde zur Modellierung der Hochwassergefährdungszonen initiiert. Dieses Projekt ist für diese Veröffentlichung besonders interessant, weil von einem verhältnismäßig großen Gebiet sowohl ein ALS-DGM als auch ein photogrammetrisches DGM erstellt wurden.

### 4.1 Laserscanner-Projekt

Für DGMe, die aus ALS-Daten gewonnen werden, sind die vorgestellten Qualitätsmaße von besonderer Bedeutung. Das flugzeuggetragene Laserscanning liefert zwar eine sehr große Dichte von Bodenpunkten, es ist aber vieles dem Zufall überlassen. Es kommen auch sehr große Bereiche ohne Bodenpunkte vor. Eine nachträgliche Analyse der Daten und der daraus abgeleiteten DGMe ist unerlässlich.

Die Abb. 1, 2, 4, 5, 6, 7 und 9 sind Ausschnitte aus dem ALS-DGM Pulkatal. Die Flughöhe betrug 1000m. Für die Datenerfassung wurde ein Optech-Scanner verwendet. Das DGM wurde mit der in SCOP realisierten robusten Interpolation nach kleinsten Quadraten abgeleitet. Die Filterung wurde mit schiefer und exzentrischer Gewichtsfunktion durchgeführt (KRAUS & PFEIFER, 1998). An den Geländekanten wurde kein besonderes Modellierungsverfahren eingesetzt.

### 4.2 Photogrammetrie-Projekt

Der Flug wurde mit einer 15cm-Kamera in einem Bildmaßstab 1:7500 durchgeführt. Die Daten für das photogrammetrische DGM wurden mit analytischer Photogrammetrie erfasst. Der Operateur hat in einem 25m-Raster, das in besiedelten Gebieten und in Gebieten mit hoher Vegetation mehr oder weniger stark abgewandelt werden musste, die Geländehöhen gemessen. Zusätzlich hat er Geländekanten im Stereomodell digitalisiert. Die Faustformeln (z.B. KRAUS, 2004) zur Genauigkeitsabschätzung des photogrammetrischen DGMS liefern einen Wert für die Höhengenaugigkeit von  $\pm 17\text{cm}$ .

Das photogrammetrische DGM wurde in gleicher Weise wie das ALS-DGM analysiert. Die Punktdichte ist deutlich geringer als die Punktdichte der ALS-Daten (Abb. 4). Sie beträgt in den Bereichen mit reiner Rastermessung nur  $0,0016$  Punkte/m<sup>2</sup>. Die empirisch geschätzte Standardabweichung  $\sigma_{Z, \text{Original}, i}$  der Originaldaten, deren quadratischer Mittelwert bei den ALS-Daten  $\pm 5,1\text{cm}$  beträgt (Abb. 5), erreicht bei den photogrammetrischen Daten einen Wert von  $\pm 15\text{cm}$ . Aus dem photogrammetrischen DGM wurde auch die Krümmung abgeleitet. Die



Krümmungswerte des photogrammetrischen DGMs sind etwa um 20% geringer als die des ALS-DGMs: Die sehr hohe Punktdichte der ALS-Daten führt zu einem formreicheren DGM im Vergleich zum photogrammetrischen DGM.

Die mittels der Beziehung (3) geschätzte Standardabweichung  $\sigma_{Z,DGM}$  für jeden Gitterpunkt variiert zwischen  $\pm 2,1\text{cm}$  und  $\pm 1,9\text{m}$ ; der Medianwert beträgt  $14\text{cm}$ . Diese Werte sind deutlich schlechter als die entsprechenden Werte des ALS-DGMs. Ein Vergleich der Abb. 6 ( $\sigma_{Z,DGM}$  des ALS-DGMs) mit der Abb. 10 ( $\sigma_{Z,DGM}$  des photogrammetrischen DGMs) zeigt im Detail die schlechteren Genauigkeiten der analytischen Photogrammetrie im Vergleich zum flugzeuggetragenen Laserscanning.

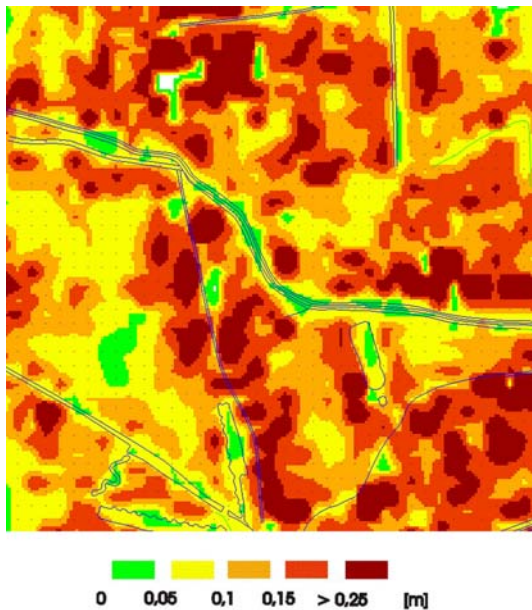


Abb. 10: Genauigkeit  $\sigma_{Z,DGM}$  des photogrammetrischen DGMs unter Einbeziehung der Geländekanten (weiße Bereiche: keine Originaldaten)

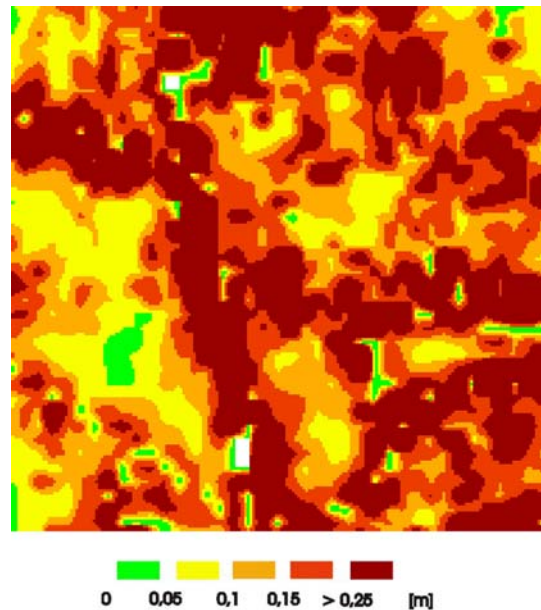


Abb. 11: Genauigkeit  $\sigma_{Z,DGM}$  des photogrammetrischen DGMs ohne Einbeziehung der Geländekanten (weiße Bereiche: keine Originaldaten)

Mit den im Abschnitt 2.1.2 vorgestellten Methoden zur Qualitätsüberwachung können auch interessante Detailfragen beantwortet werden. Mit dem Vergleich der Abb. 10 und 11 wurde zum Beispiel die Frage beantwortet, wie viel die manuell digitalisierten Geländekanten im optischen Stereomodell zur Genauigkeitssteigerung beitragen. Die Genauigkeitssteigerung ist beachtlich: die Extremwerte zwischen  $\pm 2,5\text{cm}$  und  $\pm 4,5\text{m}$  verbessern sich auf  $\pm 2,1\text{cm}$  und  $\pm 1,9\text{m}$ ; der Medianwert verbessert sich von  $18\text{cm}$  auf  $14\text{cm}$ .

Für das photogrammetrische DGM werden keine Interpolationsfehler  $dZ$  (Abschnitt 2.2.2) präsentiert. Ihre Angabe ist in der Regel bei photogrammetrischen DGMen nicht erforderlich, da in photogrammetrischen DGMen der Operateur die gefährlichen Datenlöcher, wie sie bei der ALS-Datenerfassung manchmal vorkommen, mehr oder weniger vermeiden kann.

### 4.3 Vergleich der beiden Projekte und der beiden konkurrierenden Technologien

Im vergangenen Abschnitt 4.2 wurden bereits sehr viele wertende Aussagen zu den beiden konkurrierenden Technologien, der Stereophotogrammetrie und dem flugzeuggetragenen

Laserscanning, gemacht. Abb. 12 zeigt die Differenzen zwischen dem ALS-DGM und dem photogrammetrischen DGM. Daraus und aus einigen grundsätzlichen Überlegungen können folgende zusätzlich wertende Aussagen gemacht werden:

- Das ALS-DGM weist in großen Bereichen eine wesentlich bessere Genauigkeit als das photogrammetrische DGM auf (Grund: Die ALS-Punktdichte ist sehr hoch, in landwirtschaftlich genutzten Flächen gibt es häufig sehr wenig Textur für das stereoskopische Messen).
- Die Geländekanten sind im photogrammetrischen DGM wesentlich besser modelliert als im ALS-DGM (mit einer besseren Modellierung der Geländekanten in den ALS-Originaldaten wird dieser Mangel bald behoben sein (BRIESE, 2004)).
- Im photogrammetrischen DGM treten Höhenversetzungen an den Grenzen der Stereomodelle auf, die von Restfehlern der absoluten Orientierung herrühren.
- Im ALS-DGM treten Höhenversetzungen an den Grenzen der verschiedenen Bewirtschaftungsarten auf (im dichten hohen Getreide wird nicht der Boden sondern die Oberfläche des Getreidefeldes modelliert).
- Im ALS-DGM gibt es hin und wieder unkontrolliert auftretende große Datenlöcher mit unbrauchbaren DGM-Ergebnissen.
- Im ALS-DGM gibt es unmotiviert wellenhafte Strukturen, die auf Unzulänglichkeiten des Aufnahmesystems hinweisen und die voraussichtlich in absehbarer Zeit behoben werden können.

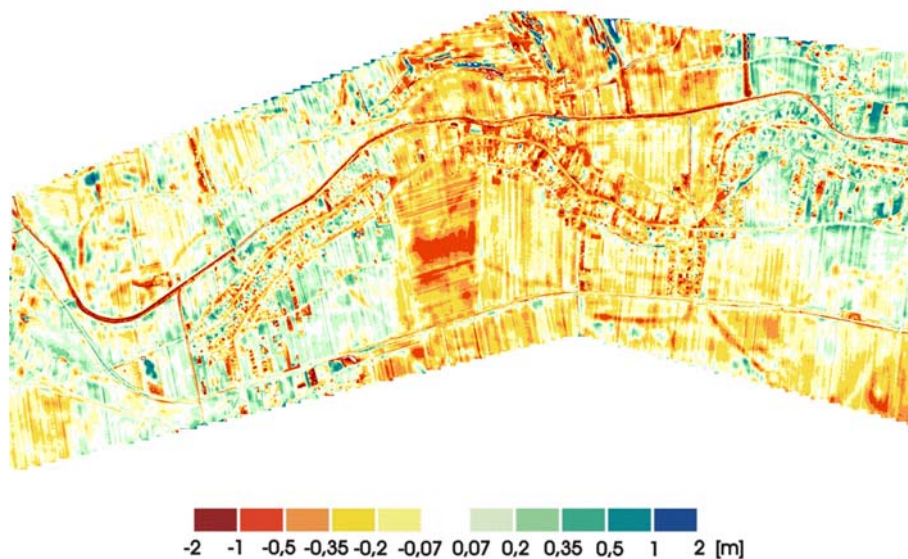


Abb.12: Differenz zwischen dem ALS-DGM und dem photogrammetrischen DGM

Die Qualität der DGMs muss in Zukunft im Detail überwacht und die Ergebnisse dieser Qualitätskontrolle müssen dem Anwender der DGMs adäquat zur Verfügung gestellt werden. Dieser Aufsatz wollte einen Beitrag dazu leisten.

## 5 Literaturverzeichnis

BORGEFORS, G., 1986: Distance Transformations in Digital Images. Computer Vision, Graphics and Image Processing, CVGIP 34 (3), S. 344-371.

- KRAUS, K., PFEIFER, N., 1998: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. ISPRS-Journal, Vol. 53, S. 193 - 203.
- KRAUS, K., 2000: Photogrammetrie, Band 3, Topographische Informationssysteme, 1. Auflage, Dümmler.
- KRAUS, K., 2004: Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, 7. Auflage, Walter de Gruyter.
- KRAUS, K., BRIESE, C., ATTWENGER, M., PFEIFER, N., 2004: Quality Measures for Digital Terrain Models. Proceedings of the XXth Congress of ISPRS in Istanbul, im Druck.
- BRIESE, C., KRAUS, K., 2003: Datenreduktion dichter Laser-Geländemodelle. zfv, Heft 5, 128. Jahrgang, S. 312-317.
- BRIESE, C., 2004: Three Dimensional Modelling of Break-Lines from Airborne Laser Scanner Data. Proceedings of the XXth Congress of ISPRS in Istanbul, im Druck.

## **Danksagung**

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