

# ASTER-Höhendaten im Nationalen und internationalen Vergleich

Peter DREXEL & Josef GSPURNING

Mag. Peter DREXEL, Landesvermessungsamt Feldkirch, [Peter.Drexel@vlr.gv.at](mailto:Peter.Drexel@vlr.gv.at)

Mag.Dr. Josef GSPURNING, IGR Universität Graz, [josef.gspurnin@kfunigraz.ac.at](mailto:josef.gspurnin@kfunigraz.ac.at)

## 1 GRUNDLAGEN UND MOTIVATION

Zahlreiche Applikationen aus Bereichen wie Hydrologie, Morphologie, Klimatologie aber auch der Pedologie oder der Biologie zeigen deutlich, dass der Nutzwert digitaler Höhendaten gerade im Kontext von Begriffen wie Biodiversität und nachhaltiger Entwicklung in nächster Zeit sogar noch eine Steigerung erfahren dürfte. Im Lichte dieser Entwicklung resultieren daraus wesentliche Charakteristika, die in drei kurzen Statements zusammengefasst werden können: DGM's sind wichtige Planungsgrundlage und gerade in einem zusammenwachsenden Europa sollten auch DGM's nicht an den nationalen Grenzen enden sondern idealer Weise in einem Datensatz mit quasi-globaler Coverage bei gleichzeitig annähernd gleicher Charakteristik. DGM's werden in den seltensten Fällen direkt verwertet sondern eher in ihrer Form als primäre oder sekundäre topographische Attribute. Durch die damit verbundene rechnerische Veredelung ist allerdings auch die Möglichkeit der Fortpflanzung von Fehlern gegeben, sodass dieser Frage ein über das übliche Maß hinausgehendes Augenmerk zukommen muss.

Datenquelle	Eigenschaften
Terrestrische Lage-Höhe-Aufnahmen	Klassisches bodengebundenes Aufnahmeverfahren mit Totalstationen auf Basis der amtlichen Festpunktfelder. Erzielbare Höhengenaugkeit in Abhängigkeit von der Genauigkeit des Festpunktfeldes bis besser 3 cm. Es werden nur wenige, klar identifizierte repräsentative Strukturelemente bestimmt.
Terrestrisches Laserscanning	Aktuelles Verfahren der flächigen Erfassung auf Basis der Laserdistanzmessung. Keine Erfassung von Strukturelementen, sondern sehr hohe, jedoch stark variable Punktdichten. Genauigkeit vergleichbar mit der klassischen terrestrischen Lage-Höhe-Aufnahme.
Photogrammetrische Auswertung von Stereo-Luftbildern	Traditionelle „Airborne“-Methode der Akquisition großflächiger Oberflächendaten. Erzielbare Höhengenaugkeit in starker Abhängigkeit von der Flughöhe und dem Anschluss an das Festpunktfeld ca. 5 – 50 cm.
Airborne-Laserscanning	Relativ neuer „Airborne“-Ansatz auf Basis von Laserdistanzmessungen. Verfahren derzeit bei noch relativ hohen Kosten in intensiver Erprobungsphase. „Blindes“ Messverfahren, Oberflächen werden ohne Aufnahme der Strukturelemente flächenhaft erfasst. Erzielbare Genauigkeiten: von ca. 20 - 100 cm
Satellitendaten (SPOT, IKONOS etc.)	Dem Vorteil der weiträumigen Abdeckung steht in erster Linie der Nachteil der relativ hohen Kosten gegenüber. Die erzielbare Genauigkeit liegt derzeit bei > 1 m
Radardaten (SRTM)	quasi – globaler Datensatz mit 90m Auflösung , allerdings gegenwärtig zumindest partiell noch in der Evaluierungsphase, für polnahe Gebiete nicht verfügbar (> 60° N und S)
digitalisierte Isolinen	Häufig verwendete, kostengünstig und weiträumig verfügbare, jedoch maximal sekundäre Quelle. In der Regel kaum dokumentierte und wenig gesicherte Ableitung aus photogrammetrisch erfassten Punkten mit anschließender Interpolation und Generalisierung. Sinnvoller Einsatz nur in Gebieten wo zwar topographische Karten jedoch keine DGM's vorliegen. Genauigkeit bestenfalls im Meterbereich, Abweichungen besonders im Gebirge oft im 100m-Bereich.

Tab.1: DGM-Daten nach Herstellungsmethode, Eigenschaften und erzielbarer Genauigkeit

Vergleicht man die Charakteristika der in Tab. 1 zusammengestellten Alternativen, so wird schnell klar, dass jede der dargestellten Methoden Schwächen im Sinne des oben skizzierten Anforderungsprofils aufweist, und zwar umso mehr je mehr die Kostenfrage in den Mittelpunkt der Betrachtung rückt.

Fazit der Betrachtung: Ein globaler digitaler Höhendatensatz mit einer Auflösung zwischen 30 und 50 m der zusätzlich noch beinahe kostenfrei verfügbar ist scheint in jedem Fall eine überdenkenswerte Alternative zu bestehenden Höhendatenquellen zu sein. Den potentiellen Anwender interessiert in diesem Zusammenhang vor allem die Frage, wie ein solcher Datensatz gegenüber nationalen

Datensätzen reüssieren kann, die - wohl nicht zuletzt aufgrund der Interessenslage – als qualitativ hochwertiger einzustufen sind als „fremde“ Datensätze? Diese Arbeit versucht Antworten auf diese Frage zu geben und konzentriert sich bei der Betrachtung auf drei Aspekte:

- Die Quantifizierung des Fehlers als Größe der Abweichung zwischen dem zu testenden Datensatz und einem nationalen Vergleichsdatsatz (wobei postuliert wird, dass der Vergleichsdatsatz fehlerfrei ist),
- die räumliche Verteilung der Abweichungen und
- möglicherweise bestehende Zusammenhänge zwischen anderen Reliefparametern und der räumlichen Fehlerverteilung

## 2 ASTER – DIE CHARAKTERISTIK EINES DATENSATZES

Das Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Sensor ist Teil der Terra – Instrumentenplattform, eines Erdbeobachtungssystems der NASA, das sich seit Februar 2000 in einer sonnensynchronen Polarumlaufbahn befindet. Versehen mit den Aufgabenbereichen Geologie, Hydrologie, Geomorphologie, Gefahrenmonitoring und Klimatologie werden diskontinuierlich (etwa 10 Minuten pro Umlauf) Daten der Erdoberfläche aufgezeichnet, sodass sich inzwischen (Stand: Mitte Dezember 2003) die beachtliche Menge von ca. 920.000 Bildern unterschiedlichster Sensoren angesammelt hat. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei der gegenwärtigen Bearbeitungsrate durch das EROS Data Center (ein 60km x 60km Stereopaar pro Tag) etwa 2006 die letzten Bilder des Bereichs zwischen 82° N und 82° S der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden können (Abrams & Hook 2003; ASTER 2002 ).

Die für diese Arbeit wichtigsten Komponenten des ASTER – Systems sind die beiden VNIR – Kanäle 3N und 3B. Mit ihrer Hilfe wird im visible near infrared – Bereich (0,78 – 0,86  $\mu$ ) entlang der Flugbahn mit einer Bodenauflösung von etwa 15 Metern sowohl nadir- als auch rückwärts gerichtet aufgezeichnet. Die daraus stereoskopisch abgeleiteten Höhendaten können – abgesehen von ihrer Verwendung als Grundlage für die atmosphärische und radiometrische Korrektur – auch in den traditionelleren Bereichen zum Einsatz gebracht werden. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der Systemkonfiguration prinzipiell 2 Varianten desselben Höhendatsatzes denkbar sind. Absolute DEM's nutzen zur Georeferenzierung externe, von Anwender bereitzustellende Ground Control Points (GCP's), bei den sogenannten relative DEM's wird auf diese Miteinbeziehung externer Referenzen (GCP) verzichtet. Für die Praxis bedeutet dies, dass sich die horizontale bzw. vertikale Abweichung von maximal 7 Metern auf maximal 10 Meter vergrößert, was beispielsweise noch immer innerhalb der Toleranzgrenzen für US – Kartenmaterial der Maßstabsbereiche 1:250000 bis 1:500000 liegt (ASTER 1999, ASTER 2001, USGS 2003).

Die Auslieferung der Daten erfolgt in etwa 25 Mb großen tiles, die bei einer Bilddimension von 2500 Zeilen und 2500 Spalten und einer Auflösung von 30m pro Pixel etwa eine Fläche von 60 x 60 km zu abdecken. Als Datenformat aller ASTER-Daten findet die EOS – Variante von HDF (hierarchical data format) Verwendung, wobei in zusätzlichen MET – Dateien ein erweiterter Metadatsatz mitgeliefert wird.

## 3 DIE TESTSZENARIEN

Wenn – wie im vorliegenden Fall – die Qualität von Digitalen Geländemodellen durch den Vergleich mit bestehenden, präziseren Modellen überprüft werden soll, so kann dies nur nach einem festgelegten Regelwerk durchgeführt werden, das die Vereinheitlichung der unterschiedlichen Datenquellen und Datenformate (Datenfluss), der Controlling – Methoden und selbst den orographischen Eigenheiten der ausgewählten Testgebiete erwachsenden Problemen in ausreichendem Maße Rechnung trägt.

### 3.1 Der Datenfluss

Die Abgleichung der verwendeten Datensätze fokussiert in drei Arbeitsschritten: Ein erster dient der Konvertierung der Aster-Sensordaten, wobei weniger das lesbar machen an sich im Vordergrund der Überlegungen steht sondern vielmehr die Umgehung der Nachteile des nur von den wenigsten Softwarepaketen direkt lesbaren HDF-Formates. Ein eher den verbreiteten Standards entsprechendes Rasterdatenformat wie etwa GeoTIFF oder ArcInfo GRID bietet neben dem Vorteil der leichter zu manipulierenden Georeferenz auch eine Mehrzahl von Verarbeitungs- und damit Analysemöglichkeiten. In einem zweiten Schritt erfolgt die (Um-) Projektion der zu vergleichenden Datensätze (Abgleichung der Georeferenz); dabei sind durch die verfügbaren Metainformationen zwar beiderseits kaum Probleme zu erwarten, zur Beibehaltung der Integrität des Referenzdatsatzes wurden jedoch jeweils die ASTER-Daten in das jeweilige nationale Referenzsystem projiziert, sodass eventuell auftretende Fehler keinesfalls im Vergleichsdatsatz wirksam werden konnten. Bei der abschließend vorzunehmenden Festlegung der geeigneten Testauflösung (Bestimmung der Testpunktdichte) wurde auf die Verwendung mehr oder weniger repräsentativer Samples verzichtet und stattdessen eine der Auflösung des ASTER-Datsatzes angepasste Testpunktmatrix definiert. Neben den präziseren Ergebnissen konnten dadurch auch flächendeckende Erkenntnisse über die Datenqualität gewonnen werden. Abb.1 liefert eine detaillierte Darstellung des Datenflusses und der dabei durchlaufenen Verarbeitungsschritte.

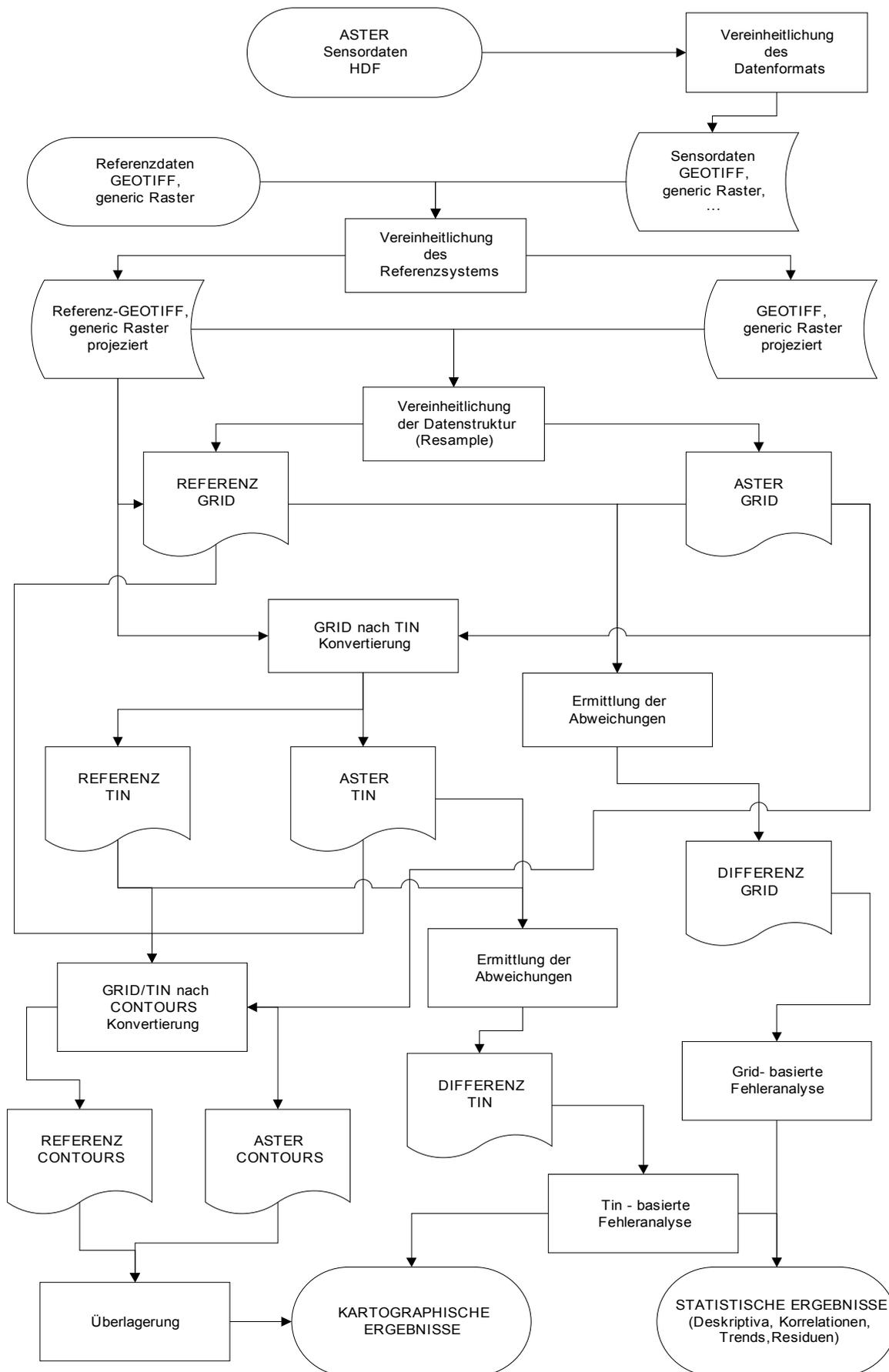


Abb.1: Die Verarbeitungsschritte im Testszenario

### 3.2 Methodische Überlegungen zur Evaluierung

Nicht zuletzt infolge der Aktualität der Problematik finden sich in der einschlägigen Literatur zahlreiche Hinweise und Vorschläge zur Evaluierung von Höhenmodellen (Monckton 1994, Barringer & Lilburne 1997, Li 1998, Carlisle 2000, King & Closs 2003 und Hirano et. Al. 2003 um nur einige zu nennen). Die simpelste ist wohl der meist mit einer Rekonvertierung verbundene Vergleich des Isolinienabbildes, eine Methode, die immerhin den Vorteil der problemlosen Erstellung mit der leichten Interpretierbarkeit der Ergebnisse verbindet. Die Möglichkeit Fehler auch lokal zuzuordnen zu können wird allerdings um den Preis der (in den meisten Fällen) zweifachen Interpolation mit einer fast zwangsläufigen Vergrößerung des Modellfehlers erkauft. Darüber hinaus lässt sich der Gesamtfehler nicht sauber in seine einzelnen Komponenten zerlegen, sodass eine betragsmäßige Aufteilung auf X-, Y- und Z-Anteile unterbleiben muss.

Im Gegensatz zum Isohypsenvergleich erfolgt die Abschätzung des Fehlers bei der Passpunkt- oder (als Variante davon) der Profillinienmethode über die Höhendifferenzen zwischen Test- und Vergleichsmodell. Beide Methoden sind mit einer Viel-zahl von Softwarepaketen zu realisieren und besitzen zusätzlich den Vorteil der relativ leichten Interpretierbarkeit der Ergebnisse. Die Nachteile der Methoden resultieren aus einem statistischen Problem: Wo bzw. wie dicht müssen die Passpunkte liegen um das Testgebiet mit all seinen orographischen Besonderheiten ausreichend genau beurteilen zu können? Mit anderen Worten: Die Anzahl der üblicherweise aus Koten oder GPS-Messungen gewonnenen Kontrollpunkte reicht selten aus um das zu untersuchende Gebiet im statistischen Sinne repräsentieren zu können (Kumar Ghosh, J. & Appa Rao 2003).

Gestützt auf diese Erkenntnisse scheint nur ein vollflächiger Vergleich von Test- und Kontroll-Modell den Ansprüchen einer qualitativen und quantitativen Beurteilung des Gesamtverhaltens bei gleichzeitiger Möglichkeit zur Lokalisierung bestehender Fehler zu genügen. Dabei stehen prinzipiell sowohl TIN- als auch GRID – Strukturen zur Verfügung. Erstere unterliegen dabei nicht der stringenten Organisation regelmäßiger Gitter und den daraus resultierenden Nachteilen, letztere besitzen den Vorzug, dass die überwiegende Mehrzahl der verfügbaren Höhendaten entweder sensorgestützt akquiriert wurden und damit nativ als Raster vorliegen oder von den jeweiligen Produzenten als GRID geliefert werden. Eine Umwandlung in TINs würde einen weiteren Konvertierungsprozess und damit eine zusätzliche Fehlerquelle bedeuten. Diese Überlegungen und die bereits in Abschnitt 3.1 angedeutete größere Flexibilität hinsichtlich der weiteren Verarbeitung und Analyse ließen das GRID – Modell für diese Untersuchung als geeignet erscheinen.

Erfahrungsgemäß erschöpft sich die Nutzung von digitalen Geländemodellen selten in der Auswertung des Attributs Höhe; in den meisten praxisnahen Analyseszenarien werden zusätzlich noch weitere aus der Höhe abgeleitete Kenngrößen (Derivative) berücksichtigt (Desmet 1997). Diesem Umstand Rechnung tragend werden in dieser Studie neben der Z-Komponente mit der Hangneigung und der Exposition auch die beiden meist genutzten höhenabhängigen Attribute in die Betrachtung mit einbezogen. Dies macht insofern auch Sinn als sich Fehler im Höhenmodell selbstverständlich auch die Güte der Derivative und damit die Analyseergebnisse beeinflussen können. Aus statistischer Sicht konzentriert sich die Studie auf drei Werkzeuge, deskriptive Methoden zur Quantifizierung von Zentraltendenz und Streuung der Abweichung zwischen Test- und Kontrolldatensatz, die Analyse der Korrelation zwischen ausgewählten GRID - Parametern und der Feststellung von Trends innerhalb der untersuchten Gebiete.

### 3.3 Die Testgebiete

Die Auswahl der Testgebiete erfolgte in erster Linie unter dem Gesichtspunkt der landschaftlichen Vollständigkeit, d.h. es wurden vorzugsweise solche Gebiete ausgewählt, die sich neben der Reliefenergie auch durch eine möglichst ausgeprägte Formenwelt auszeichneten. Nicht minder wichtiges Kriterium war die Verfügbarkeit von Kontroll- und Testdatensätzen entsprechender Güte, wobei bei den ASTER-Daten auch wegen der weitaus größeren Abdeckung die Relativvariante verwendet wurde. Allfällige Probleme durch vereinzelt auftretende „Datenlöcher“ (sogenannte missing values innerhalb eines Tiles) konnten durch die geeignete Auswahl der Testgebiete ausnahmslos umgangen werden. Abb.2 zeigt die Lage der unter diesen Gesichtspunkten ausgewählten Gebiete in der slowakischen Teil der Hohen Tatra bzw. im Vorarlberger Montafon. Das dargestellte Gebiet entspricht dem Bereich von 8° E bis 21°30' E bzw. 43°30' N bis 51°30' N.



Abb.2: Die Lage der Testgebiete (ASTER-Szenen: schraffiert, Sternsymbol: Auswahlgebiete)

### 3.3.1 Tatra

Das für die Tatra verwendete etwa 10km mal 12,5km große Testgebiet liegt an der Südabdachung der Liptauer Tatra (westliche Hohen Tatra) etwa 5 km nordöstlich von Liptovsky Mikulas (ca. 600 m Seehöhe) bzw. südlich des Baranec (2184,0 m). Die verwendeten Korrekturdaten wurden dem Autor freundlicherweise von Tomas Cebecauer von der Firma GeoModel s.r.o. überlassen. Als Datengrundlage für dieses Modell dienen vornehmlich topographische Karten der Slowakei im Maßstab 1:50000, wobei in kritischen Bereichen zusätzliche Strukturinformationen (u.a. Terrassenkanten, Spothöhen) eingearbeitet wurden. Die Interpolation des GRIDs erfolgte über die „regularized spline with tension“ – Methode von Mitasova und Mitas (Mitasova & Mitas 1993). Das daraus entstehende DTM25-SK (Projektion: S-42, Zone 34) liegt gegenwärtig in der Version 2.1 vor und erreicht bei einer Nominalauflösung von 25 Metern RMSE – Werte von 1,1 bis 1,6 bzw. in den gebirgigen Teilen Werte unter 2,3 Meter (Cebecauer 2003).

### 3.3.2 Montafon

Für das Testgebiet Gargellental im Vorarlberger Montafon liegen für eine Fläche von 130 km<sup>2</sup> First Pulse-Airborne-Laserscannerdaten vor. Die Daten stammen aus einem Gemeinschaftsprojekt des Landesvermessungsamtes Feldkirch (<http://www.vorarlberg.at/lva>), mit der Wildbach- und Lawinerverbauung, dem Stand Montafon mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien, bei dem mit Hilfe eines GPS-IMU-positionierten flugzeuggestützten Laserscanners im Mittel eine Million Punkte pro km<sup>2</sup> bestimmt wurden. Die Befliegung wurde an zwei Terminen im Herbst 2002 sowie im Sommer 2003 durchgeführt. Das Testgebiet wurde aufgrund der besonderen topographischen Rahmenbedingungen (Hochgebirge von 800 bis über 2800m Seehöhe, starke Reliefenergien, komplexe Geländeformen) sowie des inhomogenen Bewuchses ausgewählt, um eine qualifizierte Aussage über die generelle Eignung des Verfahrens für die Erfassung von Höhendaten in Hochgebirgsregionen zu erhalten. Die im WGS84-System erfassten Daten wurden auf Basis lokal bestimmter Transformationsparameter in das Landeskoordinatensystem überführt und liegen nunmehr im System GK-M28 vor. Eine unabhängige Kontrolle der Daten auf Basis von 11 terrestrisch bestimmten Flächentrippeln ergab eine Höhengenaugigkeit der First-Pulse Daten von besser 1m.

Die Auswertung des Testprojekts ist noch nicht abgeschlossen, zusammenfassend kann jedoch bereits folgendes festgestellt werden:

- Airborne-Laserscanning ist ein geeignetes Verfahren zur flächenhaften Erfassung von Oberflächen mit einer Höhengenaugigkeit besser 1m sowohl in offenem als auch in bewaldetem Gelände.
- Die Komplexität des Messverfahrens erfordert eine umfangreiche Vorbereitung und eine sehr präzise Durchführung der einzelnen Arbeitsschritte. Zur Qualitätssicherung müssen in nicht unerheblichem Ausmaß begleitende terrestrische Vermessungen durchgeführt werden.
- Die elementare Bedeutung der Flugpositionsbestimmung mittels GPS stellt ein militärisches Verfahren dar, dessen zivile Verfügbarkeit theoretisch jederzeit beendet werden könnte.
- Das Messverfahren ist prinzipiell nicht überbestimmt, eine Kontrolle kann direkt nur durch deutliche Überlappung der einzelnen Flugstreifen, indirekt durch terrestrische Kontrollmessungen erfolgen.
- Das Verfahren ist insbesondere im Hochgebirge extrem witterungsabhängig. Sowohl Sicherheitsaspekte (aufgrund der geringen Flughöhen über Grund) als auch Methodikaspekte (Extinktion des Laserstrahls z.B. durch Nebel) werden schlagend.
- Um eine mit den klassischen Erfassungsverfahren (Terrestrische Vermessung, Photogrammetrische Auswertung) vergleichbare Informationsdichte zu erreichen ist eine um den Faktor 100 bis 1000 höhere Punktdichte notwendig.
- Das Verfahren ist „blind“, erst in der Zusammenschau mit bildgebenden Verfahren (z.B. Orthophotos) gelingt eine Zuordnung der Messpunkte zu unterschiedlichen Objekttypen.

## 4 DIE ANALYSEERGEBNISSE IM DETAIL

Die Fehleranalyse basiert auf dem Testgebiet „Tatra“ mit 334 Spalten und 418 Zeilen (rund 140000 Testpunkte auf ca. 125km<sup>2</sup>) und dem Testgebiet „Montafon“ mit 128 Spalten bei gleichzeitig 29 Zeilen (3712 Testpunkte auf einem 3,8km mal 0,87km großen Areal). Die offensichtliche Differenz der Testgebietgröße resultiert aus der geringen Überlappung zwischen Gebieten mit Laserscanning- und Asterdaten in Vorarlberg. Die dadurch zu erwartende Beeinträchtigung der Vergleichbarkeit der Analyseergebnisse musste in Ermangelung brauchbarer Alternativen in Kauf genommen werden.

Trotz der dieser Methode anhaftenden Schwächen sollen die Ergebnisse des Isolinienvergleichs zumindest für die Tatra an dieser Stelle präsentiert werden. Zum einen zeigt er die über weite Strecken gute Übereinstimmung zwischen den verglichenen Datensätzen (Korrelationskoeffizient: 0,997, für das Montafon: 0,998), zum anderen treten aber die Modellfehler der Beispielregion besonders deutlich hervor (Abb.3). Dabei handelt es sich keinesfalls um eine Folgewirkung der missing values sondern ganz offensichtlich um ein überraschend großes Artefakt innerhalb der ASTER-Daten.

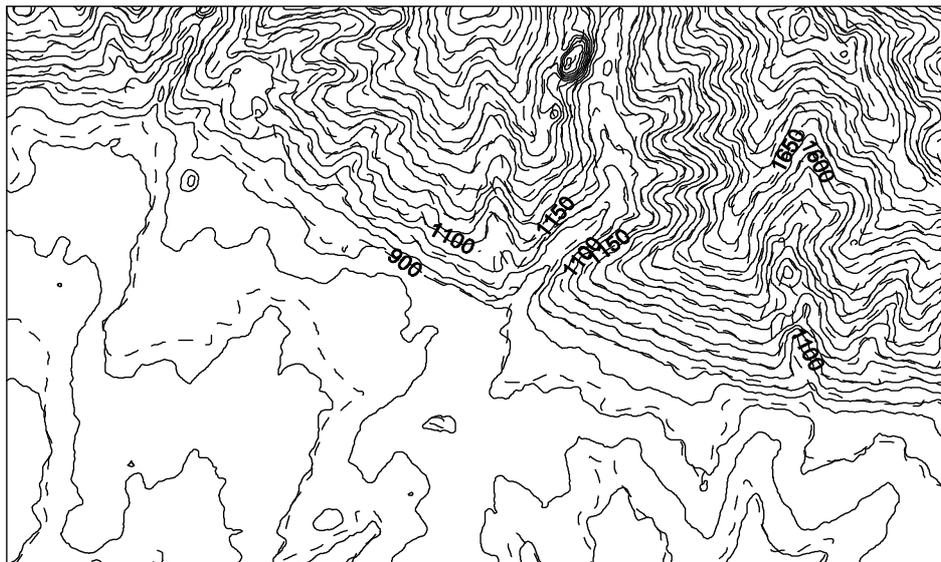


Abb.3: Isolinen - Vergleich von ASTER-DGM (durchgezogen) und Referenz-DGM (strichliert); das Artefakt erscheint als sogen. Bullauge am oberen Abbildungsrand.

### 4.1 Die Höhenabweichung

Die folgenden Abbildungen geben Aufschluss über die Verteilung der Abweichung der Z-Komponente, wobei der negative Anteil jene Bereiche beschreibt, in denen die ASTER-Oberfläche tiefer liegt als die Vergleichsoberfläche; positive Werte signalisieren demnach ein „Überzeichnen“ der tatsächlichen Oberfläche durch die ASTER-Daten. Zur Visualisierung des Einflusses der Ausreißer in der Tatra-Szene wurde in der Abb. 4 der vollständigen Verteilung (links) eine fehlerbereinigte Version (rechts) gegenüber gestellt. Zur Steigerung der Auflösung wurde dabei die Klassenbreite auf 2 Meter reduziert.

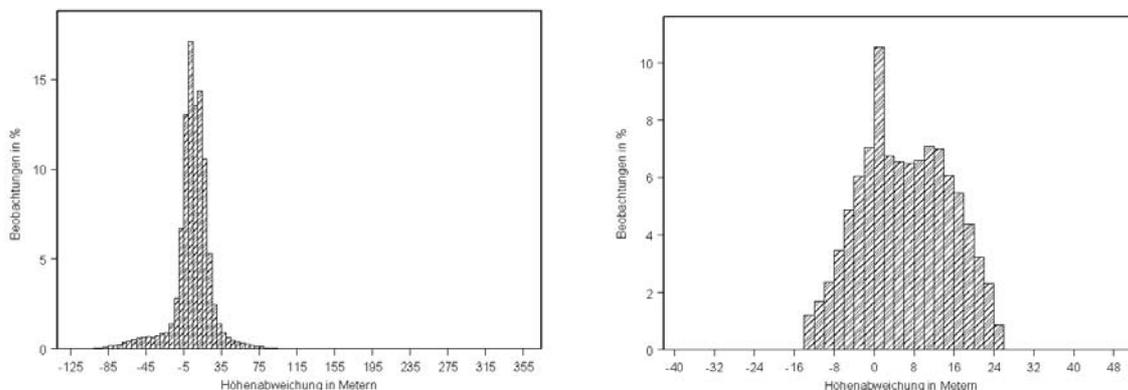


Abb. 4: Verteilung der Höhenabweichung im Testgebiet „Tatra“ (links: volles Spektrum, rechts: fehlerbereinigt)

Bemerkenswert neben der deutlichen Verringerung der Streuung ist die relativ symmetrische Verteilung insgesamt mit Maxima im Bereich +2m bzw. +5m; dies und die ausgeprägte Asymmetrie der Verteilung gegen Null weisen darauf hin, dass die ASTER-Daten die Testgebietoberfläche generell leicht überhöht wiedergeben. Dabei liegen 50 Prozent der Werte im Abweichungsbereich zwischen - 1m und 13m (Tab.2).

	Tatra-volles Spektrum	Tatra - fehlerbereinigtes Spektrum	Montafon
<b>Minimum</b>	-125,000	-14,000	-32,430
<b>1. Quartil</b>	-3,000	-1,000	-7,449
<b>Arith. Mittel</b>	4,463	5,653	-1,668
<b>Median</b>	5,000	5,000	-3,238
<b>3. Quartil</b>	14,000	13,000	3,721
<b>Maximum</b>	363,000	24,000	45,339
<b>Anzahl</b>	139612	115870	3712
<b>Standardabweichung</b>	22,669	8,929	10,133
<b>Schiefe</b>	1,429	0,024	1,429
<b>Kurtosis</b>	28,417	-0,838	28,417

Tab.2: Deskriptive Kennwerte der Höhenabweichung in den Testgebieten

Eine Untersuchung des koordinatenabhängigen Trends der Höhenabweichung ergab eine Trendfläche schwach von NW nach SE einfallende Neigung was auf einen weitgehend fehlenden Zusammenhang schließen lässt. Die niedrigen Korrelationskoeffizienten von -0,326 (gegen X) bzw. 0,0 (gegen Y) scheinen dies zu belegen. Ebenfalls kaum ausgeprägt ist der Zusammenhang zwischen der Höhenabweichung und dem Höhenwert (Koeffizient: -0,241 im ASTER-Datensatz bzw. -0,312 im Vergleichsmodell), sodass eine statistisch deutliche Höhenabhängigkeit des Fehlers nicht angenommen werden kann. Immerhin würde die in der Tatra tendenziell vorhandene Übereinstimmung mit dem Höhenwert des Vergleichs-DGM weitere Untersuchungen rechtfertigen.

Die statistischen Kennwerte (Tab.2 bzw. Abb.5) weisen auch für die Höhenabweichung des Testgebiets „Montafon“ eine symmetrische Verteilungskurve aus, wobei jedoch der Negativteil der Verteilung markant umfangreicher ausfällt. Im Gegensatz zur Tatra liegen hier 50 % der Beobachtungen im Bereich zwischen 7,449 m und 3,722 m tiefer als die Oberfläche des Testgebiets, was einer generellen Absenkung um rund 4 m gleichkommt.

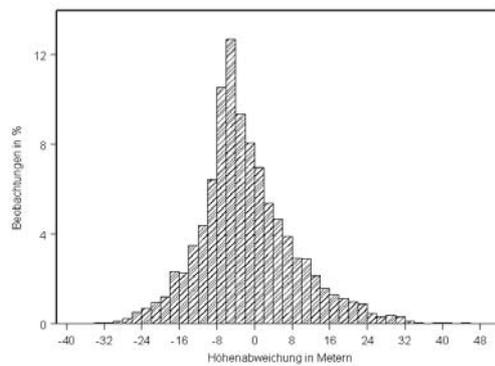


Abb. 5: Verteilung der Höhenabweichung im Testgebiet „Montafon“

Auch im Falle des Montafoner Testgebiets lässt sich im Hinblick auf die räumlichen Koordinaten kein eindeutiger Zusammenhang erkennen (Korrelationskoeffizient gegen X: 0,391 bzw. gegen Y: 0,235); der Vollständigkeit halber soll jedoch darauf hingewiesen werden, dass die berechnete lineare Trendfläche im flachen Winkel von NE gegen SW einfällt. Ähnlich wie in der Tatra findet sich allerdings auch hier keine sichtbare Übereinstimmung mit den orographischen Gegebenheiten. Dies gilt auch für die Seehöhe. Wie in der Tatra konnte auch im Montafon mit einem Koeffizienten von -0,283 kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Seehöhe des Vergleichsmodells und der Veränderung der Hangneigung nachgewiesen werden.

#### 4.2 Die Hangneigungsabweichung

Gefälledaten stellen vielfach die Ausgangsbasis für detailliertere Untersuchungen besonders in Bereichen der Klimatologie, des Bodenschutzes, der Hydrologie oder ähnlich gelagerter Fachschwerpunkte. Dies verleiht ihnen eine Bedeutung, die über jene eines DGM-Derivates hinaus geht. Damit wird gleichzeitig nicht nur die Frage nach der Qualität des DGM's an sich in den Mittelpunkt gerückt, sondern auch in wie weit sich Fehler in die Neigungsdaten fortpflanzen. Die vorliegende Studie konzentrierte sich auf eine Auswertung der Absolutbeträge der Abweichungen, da eine Berücksichtigung der Richtung der Gefälleänderung innerhalb des gesteckten Rahmens als nicht opportun erachtet wurde.

	<b>Tatra</b>	<b>Montafon</b>
<b>Minimum</b>	0,000	0,000
<b>1. Quartil</b>	1,032	1,169
<b>Arith. Mittel</b>	3,893	3,372
<b>Median</b>	2,463	2,630
<b>3. Quartil</b>	5,066	4,759
<b>Maximum</b>	50,450	19,193
<b>Standardabweichung</b>	4,475	2,883
<b>Schiefe</b>	2,726	1,390
<b>Kurtosis</b>	10,715	2,341

Tab.3: Deskriptive Kennwerte der Neigungsabweichung in den Testgebieten

Die Informationen in Tab.3 weisen darauf hin, dass sich eine durch die Verwendung eines alternativen Geländemodells verursachte Gefälleänderung in den ausgewählten Gebieten in sehr engen Grenzen hält. Rund 75% der Beobachtungen für das Tatra-Testgebiet wies eine Neigungsdifferenz von 5° oder weniger auf. Erweitert man die Klasse auf 10° Abweichung so erfüllen etwa 98% aller Testpunkte diese Kriterien. Ähnliches ist mit marginalen Abweichungen auch für Vorarlberg gültig (Abb.6). Nach diesem Befund wirkt sich die Verwendung von ASTER-Daten bei gefällebasierten Analysen weniger negativ aus als es die simple Betrachtung der Höhenabweichung vermuten lässt. Tendenziell treten zwar in Tatra-Testgebiet im SE geringere Abweichungen auf als im NW, eine klare Abhängigkeit von einer Raumrichtung ist jedoch genauso wenig nachzuweisen wie ein Zusammenhang mit der Höhenabweichung. Im Montafon konnte der Korrelationskoeffizient in keinem Fall größere Werte als 0,144 erreichen. Für die Tatra gilt dies nur bedingt, obwohl Koeffizienten von 0,506 (gegen die Hangneigung des Kontrollmodells) und 0,405 (gegen die Seehöhe des Kontrollmodells) wahrscheinlich eher als Manifestation des Wirkungskomplexes größere Höhe – steilere Flanken – mehr Neigungsabweichung denn als Ausdruck eines direkten Zusammenhangs gewertet werden müssen.

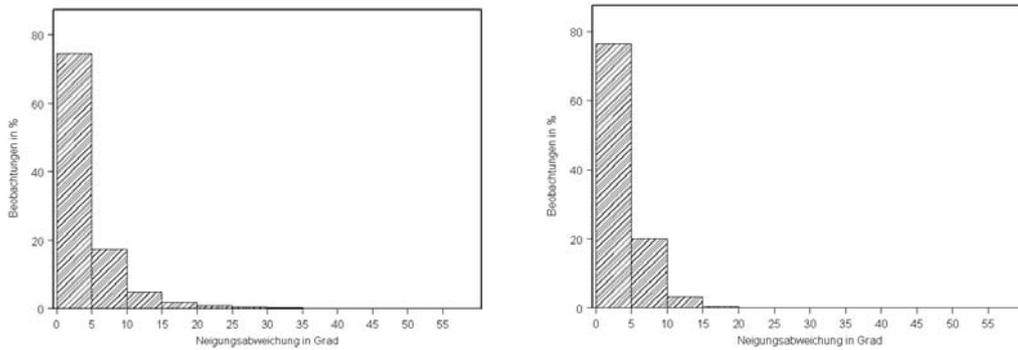


Abb.6: Verteilung der Neigungsabweichung in den Testgebieten (rechts: Tatra, links: Montafon)

### 4.3 Die Expositionsabweichung

Wie bereits im Falle der Neigungsabweichung zwischen ASTER-basierten und nationalen DGM's wurde auch im Falle der Exposition versucht, die Expositionsänderung als Absolutbetrag und unabhängig von der – u.U. auch stärker von lokalen Gegebenheiten abhängigen – Richtung der Ausrichtungsänderung zu beschreiben. Die deskriptiv-statistische Auswertung (Tab.4) erbrachte für die Tatra nicht nur überraschend hohe Werte sondern auch eine wesentlich breitere Streuung (nur etwa 50% der Werte haben weniger als 50° Abweichung) als für das Vorarlberger Testgebiet (Abb.7). Interessant wäre in diesem Zusammenhang eine Quantifizierung des Beitrages der tatsächlichen Exposition zu diesem Ergebnis gewesen, sie hätte allerdings den Rahmen dieses Beitrags gesprengt und musste ebenso unterbleiben wie die Untersuchung, ob bzw. wie Einzelzellen und Rasterzellverbände von dieser Änderung betroffen wurden. Besonders letzter Information wäre von entscheidender Bedeutung etwa für die Bearbeitung klimatologischer Fragestellungen (z.B. für die Sonneneinstrahlung) gewesen.

	Tatra	Montafon
<b>Minimum</b>	0,000	0,000
<b>1. Quartil</b>	9,913	3,697
<b>Arith. Mittel</b>	37,541	12,644
<b>Median</b>	23,099	7,977
<b>3. Quartil</b>	49,458	14,829
<b>Maximum</b>	180,000	177,124
<b>Standardabweichung</b>	39,717	17,793
<b>Schiefe</b>	1,647	4,712
<b>Kurtosis</b>	2,197	29,640

Tab. 4: Deskriptive Kennwerte der Expositionsabweichung in den Testgebieten

Das Montafon-Testareal weist hinsichtlich der Expositionsabweichung ein insgesamt auffällig besseres Streuungsverhalten auf. Hier verbuchen etwa 60% der Messwerte eine Änderung der Ausrichtung unter als 10°. Die Standardabweichung von 17,793 gegenüber 39,717 scheint dieses Ergebnis zu stützen. Nicht unerwähnt bleiben sollte an dieser Stelle die Rolle des Zufalls in Gestalt der Geländebesonderheiten: Trotz des Versuchs einen möglichst repräsentativen Ausschnitt zu definieren musste der geringen Überdeckung Rechnung getragen und bezüglich der verwendeten Arealgröße Konzessionen gemacht werden. Solange dieses Phänomen also nicht auf breiterer Basis untersucht worden ist darf dieser Aspekt zumindest nicht ganz vernachlässigt werden.

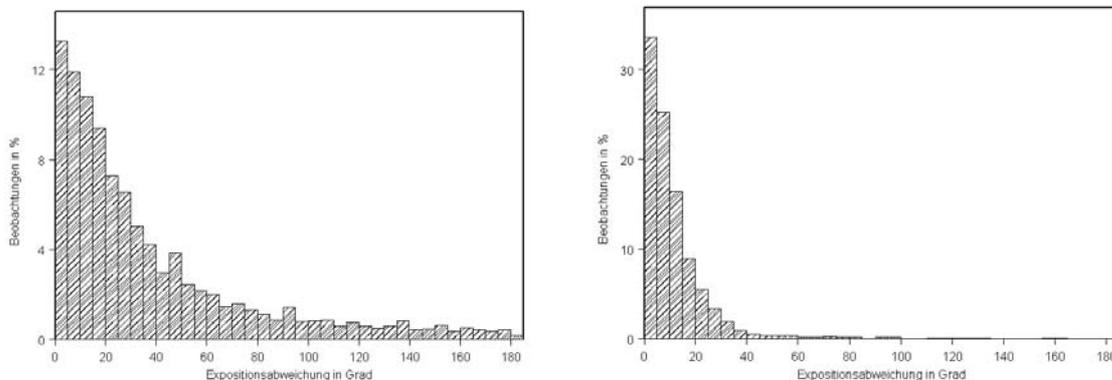


Abb. 7: Verteilung der Expositionsabweichung in den Testgebieten (rechts: Tatra, links: Montafon)

Im Rahmen der geprüften Zusammenhänge lassen sich in beiden Testgebieten mit statistischen Mitteln nur relativ schwache gegenläufige Zusammenhänge zwischen dem Ausmaß der Expositionsänderung einerseits und der Hangneigung des Test-DGM's (Tatra: -0,284; Montafon: -0,385) bzw. seiner Seehöhe (Tatra: -0,189; Montafon: -0,217) andererseits herausfinden. Neben dieser

Erkenntnis zeigte die visuelle Beurteilung, dass gleichförmig gestaltete Geländeteile (flache Hänge, ebene Rücken oder breitere Talböden) wenig bis gar nicht verfälscht wurden während beispielsweise tiefer eingeschnittene Bachläufe innerhalb dieser Verebnungen durch besonders hohe Abweichungen auffallen.

## 5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

### 5.1 Die abschließende Beurteilung

In der zusammenschauenden Beurteilung der Testergebnisse zur Verwertbarkeit relativer ASTER-DGM's präsentiert – möglicherweise auch infolge der geringen Anzahl von Beispielgebieten – neben dem Trennenden auch Gemeinsames:

- Auf Grund der Sensorcharakteristik existieren in den ASTER-DGM's in unterschiedlichem Ausmaß „Löcher“, die als nodata values kodiert ihren Niederschlag im Datensatz finden; dies und die für manche Bereiche der Erdoberfläche noch immer recht unvollständige Abdeckung schränkt den aktuellen Nutzwert der Daten in unterschiedlichem Maße ein.
- Als wesentlich störender erweist sich das offensichtliche Vorhandensein von Artefakten in scheinbar vollständigen Datensätzen; durch das Fehlen der entsprechenden Kodierung (und geeigneter Testdaten) bleibt es dem Benutzer und seiner Sach- bzw. Ortskenntnis überlassen, diese Problemzonen aufzufinden. Dies erhöht die Gefahr der Verwendung inkorrektur Daten namentlich bei weniger auffälligen Fehlern.
- Wiedergabetreue des Geländes und Höhenabweichung liegen innerhalb der spezifizierten Grenzen, wobei die in die nominell relativ hohe Horizontalauflösung gesetzten Erwartungen nicht erfüllt werden konnten; der Versuch Zusammenhänge zwischen den Abweichungen und als potentiell erachteten Einflussgrößen (Seehöhe, Hangneigung etc.) nicht die erhofften statistisch abgesicherten Ergebnisse erbracht hat.
- Für die Testgebiete hat sich gezeigt, dass die Exposition offenbar eher bzw. in stärkerem Maß negativ von einer Substituierung nationaler Datensätze durch ASTER-Daten beeinflusst wird als die Hangneigung.

Bei Berücksichtigung dieser doch gravierenden Nachteile können relative ASTER-DGM's nationale Höhendatensätze gegenwärtig nur schwerlich ersetzen, dies gilt vor allem für den Auflösungsbereich bis 30m Maschenweite, während der Datensatz vor allem im mesoskaligen Bereich seine unbestreitbaren Vorzüge (Kostengunst, problemloser Bezug und flächendeckende Verfügbarkeit für weite Teile der Erdoberfläche) voll zur Geltung bringen kann (vgl. dazu auch Toutin & Cheng 2001).

### 5.2 Aktuelle und zukünftige Impulse durch Airborne-Laserscanning

#### 5.2.1 Die Bedeutung des Airborne-Laserscanning für die Gewinnung metergenauer DHMs

Seit den späten 90er-Jahren des 20. Jahrhunderts stellt das flugzeuggestützte Laserscanning ein in der Praxis sehr effizientes Verfahren für die Erfassung von Oberflächen dar. Insbesondere für die Erfassung hochauflösender DHMs in Waldgebieten sowie auf kaum bzw. gar nicht zugänglichen Flächen (Hochgebirge, Gletscher, Fels, aber auch Dachlandschaften etc.) empfiehlt sich das Laserscanning als kosteneffizientes Verfahren. Die derzeit eingesetzten Sensoren erlauben in der Praxis mittlere Punktdichten von deutlich über einem Punkt pro m<sup>2</sup> bei Tageserfassungsleistungen von über 100 km<sup>2</sup>. Probleme ergeben sich gegenwärtig aufgrund der schiereren Datenmenge (ca. 1 bis 10 Mio. Einzelmessungen pro km<sup>2</sup>) sowie der noch in der Entwicklung stehenden Aggregations- sowie Filteralgorithmen (zusammenfügen der einzelnen Messstreifen, Elimination von Fehlpunkten, Filterung der Vegetation etc.). Für größerflächige Analysen praktikabel ist derzeit hauptsächlich der Einsatz von interpolierten regelmäßigen Gittermodellen mit Pixelgrößen vom 25 cm x 25 cm bis 5 m x 5 m.

#### 5.2.2 Versuch eines Ausblicks zur zukünftigen Bedeutung von Airborne-Laserscanning-Aufnahmeverfahren

Gegenwärtig können für den Bereich des flugzeuggestützten Laserscanning folgende Forschungsschwerpunkte benannt werden:

- Scanner: Erhöhung der Aufnahmezeit und der möglichen Flughöhe sowie Kombination mit bildgebenden Verfahren (Digitalaufnahmen im sichtbaren sowie im nahen Infrarotspektrum). Daraus resultierend eine deutliche Kostensenkung pro Messpunkt sowie pro Flug-km<sup>2</sup>.
- GPS-Positionierung / IMU: Erhöhung der Messrate von dzt. 1 Hz in Richtung 2 bis 5 Hz. Dies ermöglicht eine deutliche Verbesserung der Positions- und der Orientierungsbestimmung zu den jeweiligen Aufnahmezeitpunkten und resultiert in einer deutlichen Verbesserung der Punktlagebestimmung.
- Datenauswertung: Stetige Weiterentwicklung der eingesetzten Aggregations- und Filteralgorithmen. Kombination mit anderen Messverfahren insbesondere der klassischen Photogrammetrie sowie von terrestrischen Verfahren. Ziele sind in diesem Bereich der Forschung insbesondere die Reduktion der Datenmenge bei gleichzeitig steigender Qualität der Modelle.

### 5.2.3 Airborne-Laserscanning-Aufnahmeverfahren im Kontext mit bestehenden DHMs

- Auf Basis der Höhendaten aus Laserscanning-Befliegungen gelingt erstmals eine größerflächige Evaluierung der bestehenden DHMs.
- Laserscanning-Daten eignen sich besonders zur Qualitätsverbesserung von Strukturinformationen aus photogrammetrisch erfassten Oberflächenmodellen (z.B. BEV-Strukturlinienmodell). Diese sind in der Regel in der Lage sehr gut erfasst, weisen aber in der Höhe oft stark Fehler auf. Diese Höhenabweichungen können sehr effizient mit den insbesondere höhengenaue Laserscanningdaten kombiniert werden. Es entstehen sehr repräsentative 3D-Strukturlinien die bei gleichzeitig sehr geringen Datenmengen sehr hohe Signifikanzen erreichen.
- Das Verfahren kann aufgrund des gemeinsamen Koordinatensystems WGS84 problemlos in bi-/multilateralen Projekten eingesetzt werden.

## 6 LITERATUR

- Abrams, M., Hook, S.: ASTER User Handbook, Version 2, 2003.  
ASTER Higher Level Data Product Quality Assessment Plan, Version 2.0, 1999.  
ASTER LEVEL 1 DATA PRODUCTS SPECIFICATION (GDS Version), Version 1.3, 2001.  
ASTER Higher-Level Product User Guide, Version 2.0, 2002.  
Barringer, J.R.F., Lilburne, L.: An Evaluation of Digital Elevation Models for Upgrading New Zealand Resource Inventory Slope Data, GeoComputation, 1997, 15 – 22.  
Carlisle, B. H.: The highs and lows of Digital Elevation Model (DEM) error – developing a spatially distributed DEM error model, GeoComputation, 2000, 201 – 214.  
Cebecauer, T.: Digital terrain model of Slovak Republic with resolution of 25m (DTM25-SK). <http://www.geomodel.sk/projects/dtm25-sk.htm>, 2003.  
Desmet, P. J.J.: Effects of Interpolation Errors on the Analysis of DEMs, Earth Surface Processes and Landforms, Volume 22, 1997, 563 – 580.  
Hirano, A. et. al. : Mapping from ASTER stereo image data : DEM validation and accuracy assessment, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 57, 2003, 356 – 370.  
King, M.D., Closs, J.: EOS Data Products Handbook, Volume 1, 2003.  
Kumar Ghosh, J., Appa Rao, V.: Control point positioning using GPS, <http://gisdevelopment.net/technology/gps/techgp0030pf.htm>, 2003.  
Li, Z.: On the Measure of Digital Terrain Model Accuracy, Photogrammetric Record 72, 1988, 873 – 877.  
Mitasova, H., Mitas, L.: Interpolation by regularized spline with tension : I. Theory and implementation. Mathematical Geology 25, 1993, 641-655.  
Monckton, C.G.: An Investigation into the Spatial Structure of Error in Digital Elevation Data, Innovations in GIS I, 1994, 201 – 211.  
Toutin, Th., Cheng, Ph.: DEM Generation with ASTER Stereo Data. Earth Observation Magazine, June 2001, 1-5.  
USGS Map Accuracy Standards. Fact Sheet FS-171-99, <http://mac.usgs.gov/mac/isb/pubs/factsheets/factsheets/fs17199.html>, 2003