

## Beiträge zur Extraktion von Felskanten aus Airborne Laser Scanner Daten am Beispiel der Elbsandsteinformationen im Nationalpark Sächsische Schweiz

ELMAR CSAPLOVICS, Dresden, KATHLEEN NAUMANN, Wien & STEFAN WAGENKNECHT, Dresden

**Keywords:** topography, airborne laser scanner data, extraction of rock edges, Elbe sandstone formations in Saxony

**Zusammenfassung:** Die topographische Modellierung von Felsgebieten mit hoher Reliefenergie und dichter Bewaldung ist mit traditionellen Methoden nur unter großem Aufwand und mit entsprechend großen Ungenauigkeiten möglich. Airborne Laser Scanner erfassen sowohl die Vegetationsoberfläche (Kronendach) als auch die Geländeoberfläche durch Laserpunkte mit hoher Lage- und Höhengenaugigkeit. Durch die große Punktdichte können auch Brüche und Kanten im bewaldeten Gelände in guter Näherung dokumentiert werden. Die Grenzen der Effizienz von Laserdaten zur Beschreibung zerklüfteten Terrains in Waldgebieten liegen jedoch einerseits in der Undurchdringbarkeit des Kronendaches sehr dichter Bestände, andererseits in der eingeschränkten Unterscheidbarkeit von Fels- und Kronenreflexion im Falle ähnlicher Höhenverhältnisse. Diese Einschränkungen liegen im Falle der Elbsandsteinlandschaft des Nationalparks Sächsische Schweiz vor. Im Rahmen eines übergeordneten transnationalen Projektes befasste sich daher eine Teilstudie mit der Untersuchung von Möglichkeiten, durch semi-automatische Ansätze der Laserdatenbearbeitung sowohl ausreichend genaue Terrainmodelle im Allgemeinen als auch weitestgehend exakte Dokumentation von solitären Felsformationen im bewaldeten Umfeld im Speziellen zu erreichen. Insbesondere durch Methoden der digitalen Bildverarbeitung von Laserdatensätzen lassen sich Felskanten mit sehr guter Genauigkeit extrahieren und können in Folge in die topographische Modellierung des Terrains integriert werden.

**Summary:** *Contributions to the Extraction of Rock Edges from Airborne Laser Scanner Data – Case Study of Elbe Sandstone Formations in the National Park Saxon Switzerland.* Traditional methods of topographic modelling meet their limits if applied to rock formations in forested areas. Airborne laser scanning collects densely distributed data of the reflecting surfaces with highest spatial accuracies. Forest canopies as well as ground surfaces can be detected. Thus morphological edges of the terrain are detectable as well. Airborne laser scanning meets its limits, if the terrain is covered by very dense forest stands, as penetration of the canopy will not be possible even under very high laser pulse frequencies. On the other hand, similar surface heights of forest canopies and adjacent rock surfaces create problems of classification. The region of the limestone landscapes along the Elbe river, protected by the National Park Sächsische Schweiz, represents the perfect real-world example of these terrain conditions. As one of many other multithematic activities in the frame of a complex transnational project, the presented study focussed on the analysis of possibilities to extract rock formations from laser scanner data by applying methods, which take into account the specific constraints and at the same time allow for highest accuracies of the digital documentation of the rock formations. It was learned that semi-automatic approaches to laser data specification and representation supported by topographic information systems and digital image analysis show quite remarkable results. Especially the application of methods of digital image filtering proved for a high efficiency in extracting edges of rock formations, which can then be integrated with over-all topographic modelling.

## 1 Einleitung

Die Elbsandsteinlandschaft ist eine von der Elbe und deren Nebenflüssen geformte Erosionslandschaft der Kreidezeit. Mächtige Sandablagerungen wurden durch tektonische Bewegungen in ein System sich kreuzender und paralleler Klüfte gegliedert (Quadersandstein). Die Landschaft gliedert sich in drei Stockwerke, denen sich charakteristische Formengruppen wie Tafelberge, Einzelfelsen, Riffe, Ebenheiten, Täler und Gründe zuordnen lassen. Die Schroffheit der Felsstandorte und die Vielzahl der Formen auf engstem Raum begründen die Einzigartigkeit der Landschaft und schaffen die Voraussetzungen für hochspezialisierte Tier- und Pflanzengesellschaften (RIEBE et al. 1999) (Abb. 1).

Aufgrund der unverwechselbaren naturräumlichen Ausstattung bestehen seit über 100 Jahren intensive Naturschutzbestrebungen. Sowohl die Sächsische Schweiz als auch

die Böhmisches Schweiz sind mittlerweile zu Nationalparks erklärt worden. Der 93 km<sup>2</sup> große Nationalpark Sächsische Schweiz besteht aus zwei räumlich getrennten Teilgebieten, welche in das 275 km<sup>2</sup> umfassende Landschaftsschutzgebiet Sächsische Schweiz eingebettet sind. Landschaftsschutzgebiete und Nationalparke auf deutscher und tschechischer Seite definieren zusammen die Nationalparkregion Sächsisch-Böhmische Schweiz mit einer Fläche von insgesamt ca. 700 km<sup>2</sup> (WÄCHTER 1998, Nationalparkverwaltung Sächsische Schweiz 1999).

Der großflächige schutzbedürftige Landschaftsraum ist vielfältigen Belastungen ausgesetzt.

Grundbaustein für eine multithematische und multitemporale Datenauswertung zur Lösung vielschichtiger Nutzungskonflikte mit dem Ziel, bedrohte Naturräume vor jeglicher Beeinträchtigung zu schützen, ist eine hochgenaue räumliche Bezugsebene. Dieses



**Abb. 1:** Typische Landschaft in der Sächsischen Schweiz (aus HANLE 1992).

Erfordernis gewinnt um so mehr an Bedeutung, wenn man sich den Einfluss der Geländemorphologie auf eine Vielzahl biotischer und abiotischer Faktoren verdeutlicht. Die Herausbildung eines spezifischen Mikroklimas, kleinräumiger Biotopwechsel, vielfältige Flora und Fauna und nicht zuletzt Waldstufeninversion stehen in direktem Zusammenhang mit der markanten Zerklüftung des Geländes. Der Aufbau eines exakten digitalen Geländemodells (DGM) war deshalb mit vorderster Priorität voranzutreiben (WAGENKNECHT & CSAPLOVICS 2000).

## 2 Laser Scanner Daten des Nationalparks Sächsische Schweiz

Airborne Laser Scanning ist eine Technologie zur Erfassung dreidimensionaler Koordinaten von Punkten der Erdoberfläche. Das flugzeuggestützte Verfahren arbeitet mit gepulstem Laserlicht. Es zeichnet sich insbesondere durch eine hohe Dichte (bis zu 25 Punkte/m<sup>2</sup>, vgl. BALTSAVIAS 1999) und eine gute Lage- und Höhengenaugkeit der Aufnahmepunkte sowie die Fähigkeit aus, Vegetation in gewissem Maße zu durchdringen. Das Prinzip des Airborne Laser Scanning soll nachfolgend kurz vorgestellt werden. Das Messsystem besteht im Wesentlichen aus einer GPS-Einheit, einem Inertialsystem (INS) sowie dem eigentlichen Lasersensor. Der Lasersensor sendet kontinuierlich gepulstes Laserlicht hoher Energie aus. Die Laserpulse werden an der Geländeoberfläche reflektiert. Gemessen wird die Laufzeit der Laserpulse zwischen dem Aussenden und dem Eintreffen am Messsystem. Über die Laufzeit sind somit die Distanzen zwischen dem Reflexionsort und dem System im Flugzeug bestimmbar. GPS-Einheit und Inertialsystem (INS) bestimmen durch hochfrequente Messungen die Position und Orientierung des Lasersensors im Raum und erlauben dadurch eine Rekonstruktion der Flugbahn zur Zeit der Laserimpulsmessungen. Die Koordinaten der Reflexionspunkte erhält man schließlich durch Einbeziehung und Auswertung der GPS- und INS-Messungen.

Nicht alle Laserpunkte repräsentieren die Geländeoberfläche. Ein Anteil der Punkte wird in bzw. an der Vegetation (z.B. in den Baumkronen), aber auch an Gebäuden, Brücken und anderen Objekten reflektiert. Diese im Allgemeinen als Oberflächenpunkte bezeichneten Messungen sind für die Berechnung von digitalen Modellen zur mathematischen Beschreibung der Geländeoberfläche nicht relevant, wohl aber für die Ableitung von digitalen Oberflächenmodellen (z.B. Kronendachmodelle von Waldbeständen).

Untersuchungen zur Qualität und thematischen Anwendbarkeit von Laserscannerdaten sind zahlreich (WEHR & LOHR 1999, KRAUS 2001, SCHENK & CSATHO 2001).

Ebenso ist man bestrebt, hochqualifizierte Klassifikationsalgorithmen zu entwickeln, die in der Lage sind, Oberflächenpunkte, insbesondere Vegetationspunkte, und Bodenpunkte aus den Datensätzen mit größtmöglicher Genauigkeit zu extrahieren. Auf das Problem der Klassifizierung des Datensatzes und die damit verbundene Zuordnung der Punkte zu bestimmten Objektgruppen (Bodenpunkte, Vegetationspunkte etc.) soll nicht im Detail eingegangen werden (z.B. VOSSELMAN 2000, KRAUS & PFEIFER 2001).

Die den Untersuchungen zu Grunde liegenden Laserscannerdaten wurden im März 1997 aufgenommen und überdecken eine Fläche von 497 km<sup>2</sup> mit einem mittleren Punktabstand von 3,0 m. Das entspricht einer Gesamtanzahl von etwa 56 Mill. Laserpunkten. Es handelt sich dabei ausschließlich um last-pulse-Messungen, d.h. um Registrierungen der jeweils letzten Reflexion jedes Laserstrahls (CSAPLOVICS & WAGENKNECHT 1999).

Zur Genauigkeitsanalyse wurde für mehrere Kontrollflächen ein „Soll-DGM“ aus terrestrisch gemessenen Aufnahmepunkten berechnet. Für alle Laserpunkte im Bereich der Kontrollflächen wurden dann an den korrespondierenden XY-Positionen im „Soll-DGM“ die interpolierten Höhen bestimmt. Die Standardabweichung der Höhendifferenzen beträgt – je nach Kontrollfläche – zwischen  $\pm 10,8$  cm und  $\pm 12,6$  cm (Projektbericht 1997).

Auf Grundlage der von KRAUS (1997) angegebenen Methode der Datenfilterung, welche die schiefe Fehlerverteilung der Laserdaten in bewaldeten Gebieten bezüglich der Geländeoberfläche durch Einführung einer asymmetrischen und um einen bestimmten (der charakteristischen Fehlerverteilung entsprechenden) Betrag verschobenen Gewichtsfunktion berücksichtigt, wurden die Original-Datensätze (raw data) bearbeitet. Die nach der Datenfilterung verbleibenden Bodenpunkte erlauben nunmehr, sehr genaue digitale Modelle der Geländeoberfläche zu berechnen, die auch Felsgebiete der Sächsischen Schweiz mit guter morphologischer Detailgenauigkeit darstellen können (CSAPLOVIC & WAGENKNECHT 2000).

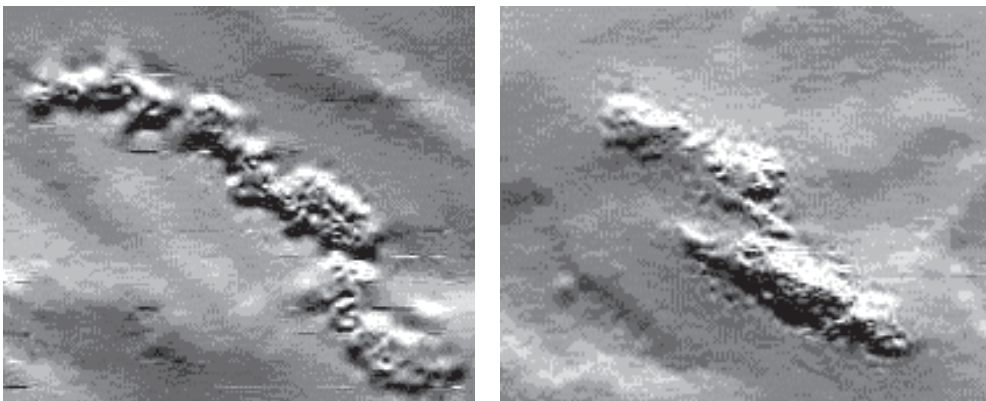
Bei außerordentlich dichtem Baumbestand, meist Fichte in Monokultur, wie er teilweise in der Nationalparkregion vorzufinden ist, werden aber oft nur sehr wenige oder im Extremfall gar keine Messungen den Waldboden repräsentieren. Weiterhin ist die Verteilung der Laserpunkte, welche über dichten Waldgebieten bereits in den Baumkronen reflektiert wurden, der Verteilung der Laserpunkte auf unbewachsenen Felsoberflächen sehr ähnlich. Selbst die zusätzliche first-pulse-Erfassung würde diesen Mangel nicht völlig beheben. Das angeführte Beispiel zeigt deutlich die Grenzen voll-

ständig automatisch ablaufender Filteralgorithmen. Ohne interaktiven Eingriff des Bearbeiters können Boden- und Felspunkte nicht von den übrigen Laserpunkten selektiert werden. Abb. 2 zeigt das Ergebnis einer automatischen Filterung. Im linken Bild sind nahezu alle Vegetationspunkte eines dichten Waldbestandes im Bodenpunkte-Datensatz verblieben.

### 3 Einfache Ansätze zur Extraktion von Felskanten

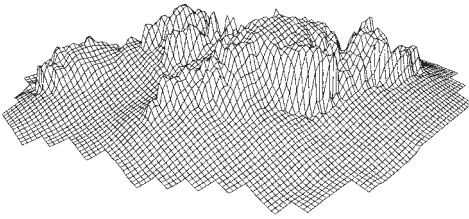
Unter Berücksichtigung der angedeuteten Schwierigkeiten sollten erste Untersuchungen der umfassenden Analyse der Effizienz der Laserdatensätze zum Aufbau genauer digitaler Geländemodelle der Nationalparkregion dienen. Von zentraler Bedeutung war die spezifische Betrachtung der für die Sandsteinlandschaft typischen stark gegliederten Oberflächenformen, insbesondere der markanten Felsformationen (CSAPLOVIC & WAGENKNECHT 2000).

Bei Beschränkung auf die Anwendung automatischer Filterung der Originaldaten in Gebieten mit hoher Reliefenergie (Felstürme, Felsabbrüche, Schluchten) konnten keine zufrieden stellenden Ergebnisse der Geländemodellierung erreicht werden. Ein limitierender Faktor ist in diesem Zusammenhang auch die relativ geringe Punkt-

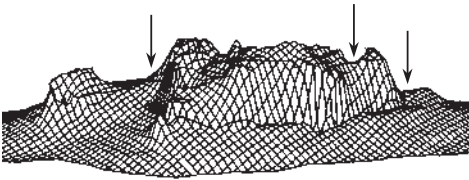


**Abb. 2:** Limitierte Anwendbarkeit ausschließlich automatischer Filterungen über dichten Wald- und Felsgebieten. Links: Vegetationspunkte (dichter Nadelwald), die fehlerhaft als Bodenpunkte klassifiziert wurden; Rechts: korrekt klassifizierte Bodenpunkte (Felspunkte der Felsformation „Gamrig“) (aus WAGENKNECHT & CSAPLOVIC 2000).





**Abb. 3:** Perspektivansicht des aus Laserdaten abgeleiteten DGM der Felsformation „Gamrig“ nach SCOP-Filterung und zusätzlicher Interaktion im Felsbereich (aus WAGENKNECHT 1999).



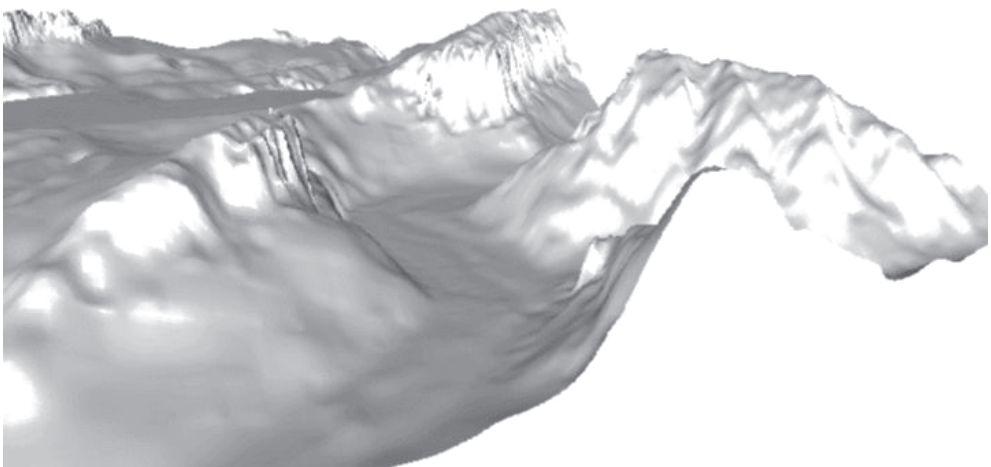
**Abb. 4:** Perspektivansicht des aus photogrammetrischen Messungen abgeleiteten DGM der Felsformation „Gamrig“ (aus RAUSCH 1994).

dichte der Laserdaten. Stark gegliederte Felsformationen werden durch den Filtervorgang geglättet. Markante Details des Felsreliefs, insbesondere Felskanten werden kaum oder gar nicht berücksichtigt. Eine

halbautomatische Methode der Bearbeitung sollte diese Nachteile minimieren (WAGENKNECHT 1999, CSAPLOVICS & WAGENKNECHT 1999). Auf Basis einer interaktiven Auswahl einzelner Felsformationen und mit Hilfe zusätzlicher Informationen aus topographischen Karten, Luftbildern sowie terrestrischen Messungen können repräsentative Ergebnisse erzielt werden.

Abb. 3 zeigt ein Laser-DGM der Felsformation „Gamrig“ im Nationalparkbereich „Vordere Sächsische Schweiz“. In diesem Fall waren – neben der automatischen Filterung – zusätzlich terrestrisch-geodätische Messungen sowie visuelle Interpretationen von CIR-Luftbildern zur koordinativen Festlegung des Verlaufes des Felsfußes durchgeführt worden. Das so berechnete Geländemodell der Felsformation ist durch eine hohe geomorphologische Detailgenauigkeit geprägt.

In Abb. 4 ist die Perspektivansicht des digitalen Geländemodells der Felsformation „Gamrig“ als Ergebnis einer photogrammetrischen Stereoauswertung eines CIR-Luftbildpaares (Bildmaßstab ca. 1: 10 400) dargestellt. Die Schwachstellen der Luftbildauswertung beruhen auf Problemen bei der Auswahl repräsentativer Felspunkte und



**Abb. 5:** Geschummerte Perspektivansicht des aus Laserdaten abgeleiteten DGM des Polenztales nach Integration von interaktiv ausgewählten Strukturlinien.

der eindeutigen Definition der Geländekanten. Schatten und Bewuchs limitieren die Repräsentativität der Erfassbarkeit von Felsbereichen in entscheidendem Maße (RAUSCH 1994). Die Pfeile in Abb. 4 deuten einige markante Differenzen beider Modelle an. Vergleiche vor Ort bestätigten, dass die Qualität der digitalen Geländemodellierung der Felsformation aus Laserdaten detailreicher und formtreuer und demzufolge wirklichkeitsnäher und umfassender ist.

Durch die starke Zergliederung der Felslandschaft sowie der häufig dichten Bewaldung ist eine Bestimmung von zusätzlichen Punkten am Felsfuß mit Hilfe terrestrischer Aufnahmeverfahren oft nicht oder nur mit hohem Aufwand möglich. Für das Testgebiet Polenztal wurde versucht, direkt Laserpunkte zu bestimmen, die die markanten Felsabbrüche gut charakterisieren. Die durch die Punkte so definierten Strukturlinien wurden als zusätzliche Forminformation in die abschließende Interpolation des Geländemodells einbezogen.

Abb. 5 zeigt das Ergebnis des Vorgehens. Zweifellos ist diese Art der Strukturliniendefinition lediglich ein rudimentärer Ansatz, führt jedoch – im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit – bereits zu deutlichen Verbesserungen in der Oberflächenbeschreibung im Felsbereich.

#### 4 Extraktion von Felskanten mit Hilfe von Bildverarbeitungsmethoden

Aufgrund der oben beschriebenen Schwierigkeiten bei der Felsabgrenzung wurde in weiterer Folge der Versuch unternommen, mit Hilfe von Bildverarbeitungsmethoden Geländekanten aus Laserdaten zu extrahieren.

Das mehrstufige Vorgehen beginnt mit der Berechnung von Kanten aus einem Graustufenhöhenbild mittels des Sobel-Operators. Diese werden danach in ein Binärbild überführt und ausgedünnt, um weniger relevante Information zu entfernen. Nach einer Verdickung der übrig gebliebenen Kanten werden diese halbautomatisch vektorisiert (NAUMANN 2000).

#### 4.1 Ableitung von Kantenbildern

Für das auch in diesem Abschnitt betrachtete Testgebiet Polenztal wurden die entsprechenden Punkte aus dem Originalpunkte-Datensatz entnommen. Mit Hilfe einer nichtlinearen TIN-Interpolation (Polynom 5. Grades) wurden daraus Graustufenbilder mit 1 m Pixelgröße erzeugt. Aus diesen Bildern wurden dann Kanten abgeleitet, wobei der Sobel-Operator zum Einsatz kam. Dies ist ein richtungsabhängiger Differenzenoperator zur Extraktion von Grauwertkanten und Linien aus einem Bild. Er besitzt zwei Masken, die jeweils Differenzen in horizontale bzw. in vertikale Richtung berechnen. In diesem Fall wurden Masken mit  $5 \times 5$  Elementen verwendet. Aus den beiden entstandenen temporären Bildern wurde dann der Betrag des Gradienten berechnet.

Das Ergebnis ist in Abb. 6 dargestellt. Das Kantenbild enthält neben den relevanten Informationen für die Extraktion von Felsabbrüchen auch Informationen über die Höhenvariationen der Bäume. Zum Teil sind Einzelbäume als kleine geschlossene Linienzüge erkennbar. Grauwertgradienten machen das Ausmaß dieser Differenzen sichtbar. Die Breite der Linien beschreibt die räumliche Ausdehnung der Höhendiffe-

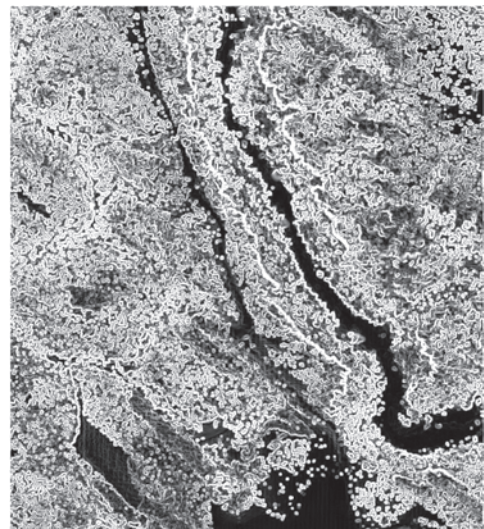


Abb. 6: Kantenbild (Sobel  $5 \times 5$ ), Bildausschnitt ca. 950 m  $\times$  1070 m (NAUMANN 2000).

renzen. Die „Strukturen“ sind lediglich überblicksartig wahrnehmbar. So sind durchaus Unterschiede zwischen verschiedenen Waldbeständen zu erkennen. Junger Nadelwald sowie wenig bewaldete Felsplateaus zeichnen sich z.B. durch eine dunklere Linienfarbe aus.

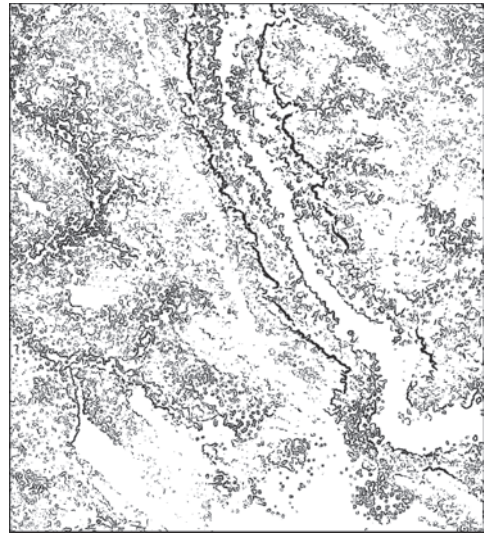
Je nach Höhenvarianz der umgebenden Flächen können Felsabbrüche gut, weniger gut oder gar nicht erkannt werden. Dies hängt stark davon ab, ob der Fels sich über den umgebenden Wald erhebt oder ob hohe Bäume bis an den Rand des Felsens heranwachsen und dann oftmals eine ähnliche Höhe wie der Fels selbst aufweisen. Weiterhin ist entscheidend, ob der Fels bewaldet ist oder nicht.

#### 4.2 Halbautomatische Extraktion von Felsabbruchlinien

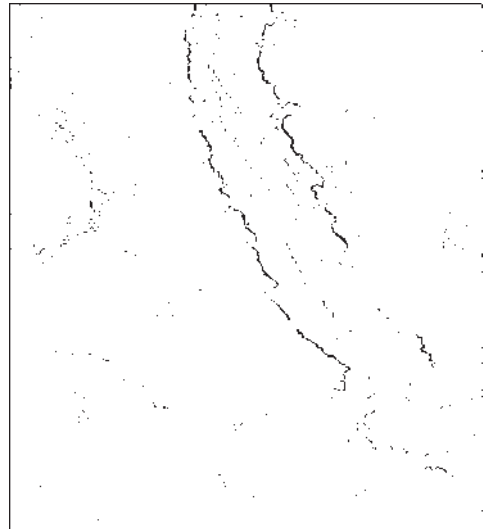
Im Folgenden wurde versucht, aus den Kantensbildern die sichtbaren Abgrenzungen der Felsabbrüche zu extrahieren. Dazu wurde zuerst das über den Sobel-Operator veränderte Bild in ein Binärbild überführt. Der Schwellwert wurde so festgelegt, dass nur Kanten mit großen Höhenunterschieden abgebildet werden.

Das Ergebnis ist in Abb. 7 ersichtlich. Die markanten Linien der Felsabbrüche sind gut zu erkennen. Weiterhin sind aber noch sehr viele weniger relevante Informationen enthalten. Das liegt daran, dass in dem mit dem Sobel-Operator bearbeiteten Bild bei Wald und Felsen z.T. ähnlich große Grauwerte (= ähnliche lokale Höhendifferenzen) auftreten, die über die Schwellwertbildung in das Binärbild gelangen. Durch Vergrößerung des Schwellwertes würden jedoch zu viele Pixel im Bereich der Felsen verloren gehen. Da die relevanten Felslinien meist breiter als die Grauwertkanten im Wald sind, wurde daraufhin eine Ausdünnung des Binärbildes auf Basis eines Maximumfilters durchgeführt.

In Abb. 8 ist das Ergebnis der Ausdünnung mit einer  $3 \times 3$ -Maske ersichtlich. Die breiten Linien sind dünner geworden, schmale Linien wurden ganz entfernt. Diese Methode hat die gleiche Wirkung wie die



**Abb. 7:** Binärbild nach Schwellwertbildung, Bildausschnitt ca. 950 m  $\times$  1070 m (NAUMANN 2000).



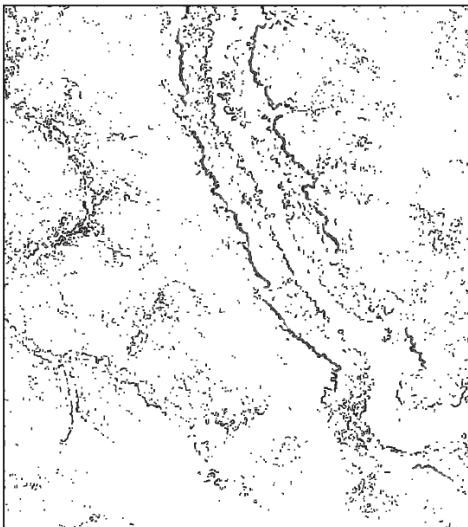
**Abb. 8:** Ausgedünntes Binärbild, Bildausschnitt ca. 950 m  $\times$  1070 m (NAUMANN 2000).

Anwendung des morphologischen Operators „Dilatation“ auf ein Binärbild, bei dem Objekte mit dem Wert 1 ausgedehnt werden, hier also der Hintergrund, der auf Kosten der Kanten im Bild vergrößert wird.

Um im weiteren Verlauf eine Vektorisierung der Felslinien durchführen zu können, ist es sinnvoll, die Lücken zwischen den Linien zu verkleinern. Das kann man durch die Anwendung eines Minimumfilters auf das ausgedünnte Bild erreichen. Dadurch werden die noch vorhandenen Objektpixel wieder ausgedehnt. Diese Filterung entspricht dem morphologische Operator „Erosion“. Eine Dilatation mit einer nachfolgenden Erosion wird als Closing (Schließen) bezeichnet.

Im nächsten Schritt werden die potenziellen Felskanten vektorisiert. Dazu stehen GIS-Werkzeuge zur Verfügung, die ein interaktives Festlegen des Anfangspunktes der zu vektorisierenden Linie zulassen und danach die Linie selbstständig verfolgen. Durch Auswahl geeigneter Werte für den Suchradius und für die zulässige Distanz ist es möglich, auch größere Lücken in den Linien zu überbrücken und damit eine interaktive Editierung durchzuführen.

Abb. 9 zeigt die vektorisierten potenziellen Felskanten für den ausgewählten Bereich des Polenztales (vgl. Abb. 5).



**Abb. 9:** Vektorisierte potenzielle Felskanten auf dem Closing-Bild, Bildausschnitt ca. 950 m × 1070 m (NAUMANN 2000).

Somit liegen die abgeleiteten Kanten lagegenau vor. Für eine Verwendung als Bruch- oder Formlinien bei der Berechnung von Geländemodellen sind aber zusätzlich Höhenangaben erforderlich. Aus den geokodierten Rohdatensätzen können über die Lageinformationen die zugehörigen Laserpunkte referenziert und damit die Höheninformationen generiert werden. Auf diese Problemstellung soll im Rahmen dieses Beitrages nicht eingegangen werden.

## 5 Diskussion

Automatische Filteralgorithmen unterteilen die unregelmäßig verteilten Laserpunkte in für die Berechnung digitaler Geländemodelle relevante und nicht-relevante Punkte. Die Untersuchungen mit verschiedenen Testdatensätzen in der Sächsischen Schweiz haben gezeigt, dass gerade in den stark zerklüfteten Felslandschaften Probleme bei dieser Klassifikation in Boden- und Felspunkte sowie sonstige Punkte (in der Regel Vegetationspunkte) auftreten. Gerade die Berücksichtigung markanter Felskanten (z.B. dem Felsfuß) im Rahmen der Klassifikation bzw. der abschließenden Interpolation der Geländeoberfläche führt jedoch zu bemerkenswerten Verbesserungen der Oberflächenbeschreibung.

Die vorgestellten Ansätze beschreiben somit den Versuch, auf unterschiedliche Weise die notwendigen ergänzenden geomorphologischen Informationen aus den Laserscannerdaten selbst bzw. anderen geeigneten Quellen abzuleiten. Besondere Schwierigkeiten ergeben sich aus der Vielgestaltigkeit und aus der reliefbedingt bzw. naturschutzrechtlich eingeschränkten Begehbarkeit des Geländes. Während die Selektion von Felsbereichen mit Hilfe von terrestrischen Messungen aufgrund des hohen Aufwandes nur exemplarisch erfolgen kann, scheint die Felskantenextraktion mit Hilfe von Bildverarbeitungsmethoden auch für größere Bearbeitungsgebiete praktikabel und effizient. Die mit diesem Verfahren abgeleiteten Kanten sind nur der Lage nach bestimmt. Derzeitige Forschungen fokussieren auf die automatische Ableitung von Bruchlinien



aus Laserdaten. Voraussetzung dafür ist zunächst eine grobe lagemäßige Bestimmung der Bruchlinien, beispielsweise mit Hilfe des vorgestellten Ansatzes aus der Bildverarbeitung.

## 6 Ausblick

Im Umfeld der topographisch orientierten Auswertung von Laserscannerdaten liegt ein Hauptgewicht auf den Bestrebungen, eine automatische Extraktion von topographisch relevanten Bruchkanten zu erreichen (BRZANK 2001, BRIESE et al. 2002).

Die Heterogenität stark strukturierter Geländes mit hoher Reliefenergie und einer Vielzahl von Formlinien und Bruchkanten, verbunden mit dichter Waldbedeckung stark variierender Bestandesarten und Bestandesdichten, wird jedoch eine rein automatische Extraktion von Bruchkanten nicht möglich machen. Somit wird die projektorientierte Nutzung einer spezifischen Kombination der vorgestellten und derzeit in Entwicklung befindlichen Ansätze die günstigsten Ergebnisse erzielen. Die kombinierte Nutzung von Reliefinformationen aus großmaßstäbigen topographischen Karten sowie aus hoch auflösenden Orthobildern auf Basis flugzeug- oder satellitengestützter Fernerkundungsdaten (IKONOS, CIR-Luftbild) in Verbindung mit automatisch extrahierten Linienelementen wird zur Optimierung der erzielbaren Genauigkeiten führen. Eine ideale Variante werden integrative Ansätze der Nutzung von Intensitätsinformationen der Laserscanner sowie die simultane Aufnahme der Projektgebiete mit hochgenauen optischen Fernerkundungssensoren liefern. Pilotprojekte über große Aufnahmegebiete (Sächsisch-Böhmische Nationalparkregion, ca. 750 km<sup>2</sup>) sind geplant. Neue Erkenntnisse zur semi-automatischen hochgenauen topographischen und landnutzungsorientierten Kartierung von Regionen mit hoher Reliefenergie und dichter Bewaldung sind zu erwarten. Insbesondere transdisziplinäre Anwendungsfelder in Ökologie und Hydrologie werden die resultierenden hochgenauen digitalen Oberflächenmodelle mit Berücksichtigung von Bruchlinienver-

läufen wie auch die gleichzeitig erfassten ebenso hochwertigen Landnutzungs- und Landbedeckungsinformationen dringend benötigen (CSAPLOVIC & WALZ 2001).

## 7 Dank

Die Daten der ALS-Befliegung wurden vom Landesvermessungsamt Sachsen und der Landesanstalt für Forsten zur Verfügung gestellt. Die Bearbeitung der Daten erfolgte im Rahmen von übergeordneten Kooperationsprogrammen mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien.

## 8 Literatur

- BALSAVIAS, E.P., 1999: Airborne laser scanning – existing systems and firms and other resources. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **54**: 164–198.
- BRIESE, C., KRAUS, K. & PFEIFER, N., 2002: Modellierung von dreidimensionalen Geländekanten in Laser-Scanner-Daten. – Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. habil. Siegfried Meier, TU Dresden, Institut für Planetare Geodäsie, S. 47–52.
- BRZANK, A., 2001: Automatische Ableitung von Bruchlinien aus Laserscannerdaten. – Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden.
- CSAPLOVIC, E. & WAGENKNECHT, S., 1999: Airborne Laser Scanning zur topographischen Modellierung von Felsgebieten. – In: STROBL, J. & BLASCHKE, T. (Hrsg.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung* **11**: 108–119, Wichmann, Bonn.
- CSAPLOVIC, E. & WAGENKNECHT, S., 2000: High-resolution environmental monitoring of wooded mountainous regions supported by airborne laser scanning. – *Proc 19<sup>th</sup> ISPRS Congress, Amsterdam, Netherlands. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. **33** (Part B7/4): 1668–1673.
- CSAPLOVIC, E. & WALZ, U., 2001: Spatial information systems for national park regions in the Central European Space – GIS-concepts for monitoring and managing national park regions. – In: MANDER, Ü., PRINTSMANN, A. & PALANG, H. (Eds.): *Development of European landscapes. – Publicationes Institutis Geographici Universitatis Taruensis*, **92**: 433–437.

- HANLE, A., 1992: Elbsandsteingebirge. – Meyers Lexikonverlag, Mannheim.
- KRAUS, K., 1997: Eine neue Methode zur Interpretation und Filterung von Daten mit schiefer Fehlerverteilung. – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), **85** (1): 15–30.
- KRAUS, K., 2001: Laser-Scanning – Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie. – In: SEYFERT, E. (Hrsg.): 21. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF, Konstanz, Deutschland, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band **10**: 13–22.
- KRAUS, K. & PFEIFER, N., 2001: Advanced DTM generation from Lidar data. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Annapolis, Maryland, Vol. **34** (3/W4): 23–30.
- Nationalparkverwaltung Sächsische Schweiz (Hrsg.), 1999: Sächsisch-Böhmische Schweiz – České Svýcarsko. Schriftenreihe des Nationalparks Sächsische Schweiz, Heft 3, Königstein.
- NAUMANN, K., 2000: Die Bedeutung von Laser-scannerdaten zum Aufbau digitaler Geländemodelle für Nationalpark-Informationssysteme – zwei Fallstudien. – Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden.
- Projektbericht, 1997: Projektbericht zur Laser-scanner-Messaufnahme im Nationalpark Sächsische Schweiz
- RAUSCH, R., 1994: Konzeption und Aufbau eines digitalen Geländemodells für ein Test- und Übungsgebiet. – Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden.
- RIEBE, H., HÄRTEL, H., BAUER P. & BENDA, P., 1999: Die Naturausstattung der Sächsisch-Böhmischen Schweiz. – In: Nationalpark Sächsische Schweiz (Hrsg.): Sächsisch-Böhmische Schweiz – Ceskosaské Svýcarsko. Schriftenreihe des Nationalparks Sächsische Schweiz, Heft **3**: 20–57.
- SCHENK, T. & CSATHÓ, B., 2001: Modellierung systematischer Fehler von abtastenden Laseraltimetern. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, 2001, Heft 5: 361–373.
- VOSSelman, G., 2000: Slope based filtering of laser altimetry data. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, Netherlands, Vol. **33** (Part B3/2): 935–942.
- WÄCHTER, A., 1998: Sächsische Schweiz – vom Landschaftsschutzgebiet zum Nationalpark. – In: Institut für Umweltgeschichte und Regionalentwicklung (Hrsg.): Naturschutz in den neuen Bundesländern – ein Rückblick. Halbbd.2, BdWi-Verlag, Marburg, S. 627–648.
- WAGENKNECHT, S., 1999: Untersuchungen zum Aufbau digitaler Geländemodelle aus Laserdaten in der Sächsischen Schweiz. – Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden.
- WAGENKNECHT, S. & CSAPLOVICS, E., 2000: Geodaten aus Airborne Laser Scanning zur Schaffung einer topographischen Datengrundlage für ein raumbezogenes Informationssystem der Nationalparkregion Sächsisch-Böhmische Schweiz. – In: STROBL, J. & BLASCHKE, T. (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung **12**: 504–511, Wichmann, Heidelberg.
- WEHR, A. & LOHR, U., 1999: Airborne laser scanning – an introduction and overview. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **54**: 68–82.

#### Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr. techn. habil. Elmar CSAPLOVICS  
 Dipl.-Ing. STEFAN WAGENKNECHT  
 Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung  
 Mommsenstraße 13, D-01069 Dresden  
 Tel.: +49-351-463-33 680  
 Fax: +49-351-463-37 266,  
 e-mail: csaplovi@rcs.urz.tu-dresden.de  
 e-mail: Stefan.Wagenknecht@mailbox.tu-dresden.de

Dipl.-Ing. KATHLEEN NAUMANN  
 Technische Universität Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung  
 Gußhausstraße 27–29, A-1040 Wien  
 Tel.: +43-1-58801-12221,  
 Fax: +43-1-58801-12299,  
 e-mail: knaumann@ipf.tuwien.ac.at

Manuskript eingereicht: September 2002  
 Angenommen: Januar 2003