Brandenburgische Geowiss. Beitr.	Kleinmachnow	**10** (2003), 1/2	S. 1-6	3 Abb., 10 Lit.

Airborne Laserscanning für geologische Detailuntersuchungen und Abwehr bergbaubedingter Gefahren im Muskauer Faltenbogen, Südost-Brandenburg

Airborne Laserscanning used for geological detail studies and warding off of mining induced risks in the push moraine Muskauer Faltenbogen, southeastern Brandenburg

WERNER STACKEBRANDT, mit einem Beitrag von SVEN JANY

Einführung

Neue Einsichten in geologische Strukturen und Prozesse sind häufig mit der Entwicklung und Verfügbarmachung neuer Untersuchungsmethoden einhergegangen. In der Vergangenheit waren dies in der Regel verbesserte Möglichkeiten zum Blick in die tieferliegenden Schichtenfolgen durch Fortschritte in der Tiefbohrtechnik und der indirekten, vorwiegend geophysikalischen Untersuchungsverfahren sowie eine moderne Landschaftsanalyse durch Nutzung der Fernerkundungstechnik. Die Fernerkundungsmethoden haben uns hervorragende neue Einsichten in oberflächennahe regionalgeologische Baupläne und tektonische Strukturen besonders in ariden und halbariden Gebieten gewährt. Areale mit dichter Pflanzendecke dagegen erwiesen sich in der Regel als nur eingeschränkt geowissenschaftlich und praxisrelevant interpretierbar.

Mit dem Airborne Laserscanning-Verfahren (ALS) können geomorphologisch hochauflösende Oberflächenmodelle generiert werden, die dem Nutzer nach entsprechender Bildbearbeitung auch in humiden, waldreichen Gebieten durch spezielle Eliminierungsverfahren des Baumbewuchses gute geomorphologische Daten liefern können. Diese „rückgeführten" Geländemodelle sind besonders dort sinnvoll einsetzbar, wo für das Verständnis der zu untersuchenden Prozesse die Kenntnis der natürlich oder anthropogen gestalteten Oberflächenmorphologie erforderlich ist. Dies ist insbesondere bei gestaltungsintensiven geogenen oder anthropogenen Prozessen zu erwarten, wie bei oberflächennahen Kompressions- und Dehnungsbeanspruchungen, bei Umlagerungsprozessen

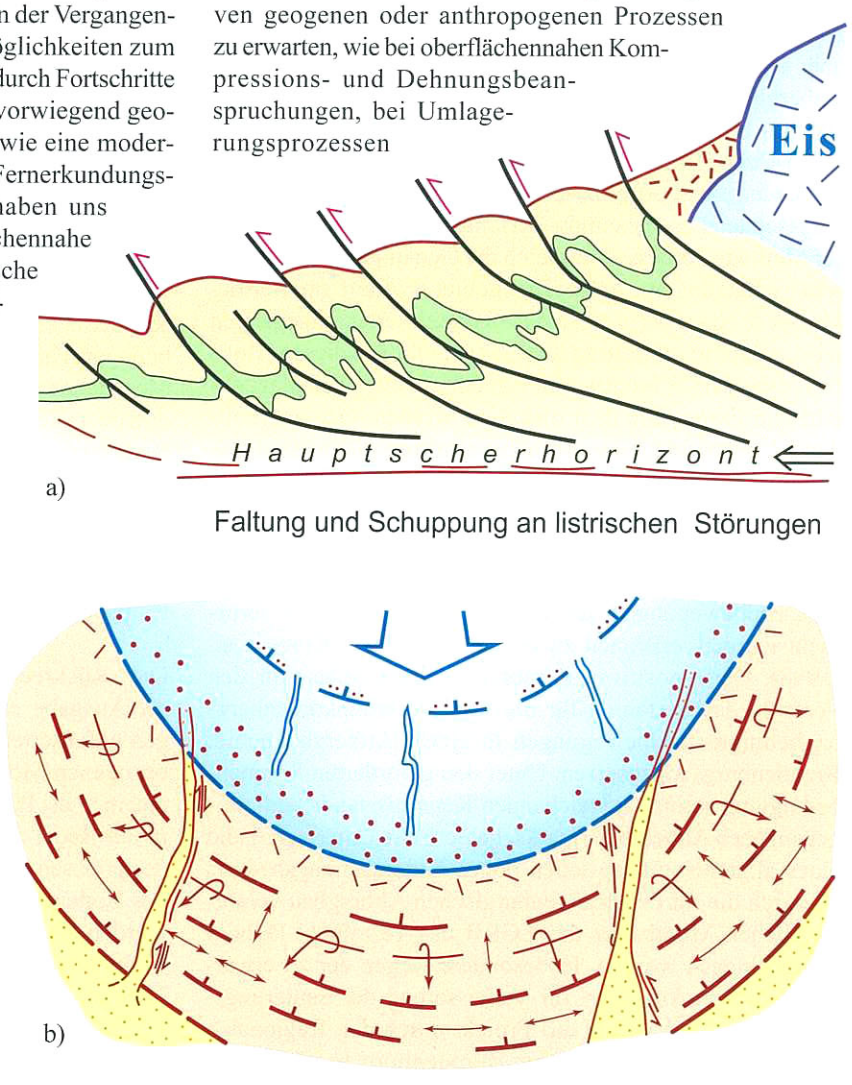

Abb. 1
Zusammenhang von Morphologie und innerer Struktur in Stauchmoränen
a) vereinfachtes Profil , b) Prinzipskizze

Fig. 1
Connection of morphology and inner structure within push moraines
a) simplified tectonic section, b) sketch map

bzw. den bergbaulich bedingten Eingriffen in die oberflächennahen Schichtenfolgen. Die Abbildung der hochauflösenden Oberflächengestalt liefert daher über den eigentlichen Detailbefund hinaus die Möglichkeit, prozessorientierte Vorstellungen zur Landschaftsgenese zu entwickeln.

Der enge Zusammenhang von Landschaftsgenese und Oberflächenmorphologie wird in Norddeutschland exemplarisch an glazigenen Stauchungsstrukturen sichtbar, wie sie in Endmoränen vorliegen (Abb. 1). In nicht bestockten Gebieten Norddeutschlands liefern in der Regel Geländearbeiten einen ausreichenden Kenntnisstand. In waldbestandenen Gebieten sind bei erforderlicher Einbeziehung der konkreten morphologischen Ausprägung jedoch weitere Untersuchungsmethoden hinzuzuziehen, wie das Airborne Laserscanning-Verfahren. Angewandt wurde dieses auf Bereiche des NW-Teils des Muskauer Faltenbogens, weil hier neben dem Aspekt der Erarbeitung verbesserter geowissenschaftlicher Vorstellungen zur Genese der glazigenen Großstruktur Aussagen zu den oberflächennahen Auswirkungen des hier über viele Jahrzehnte umgehenden untertägigen Braunkohlenbergbaus zu erwarten waren. Die durch das Zubruchgehen des hangenden Deckgebirges sich bis zur Oberfläche durchsetzenden Senkungsstrukturen sind mit herkömmlichen Methoden nicht so präzise zu erfassen, wie mit dem hier eingesetzten Laserscanning-Verfahren. Die Anwendung dieser Methode verbessert zugleich die Genauigkeit der Gefahrenabschätzung im Altbergbaugebiet, worauf im Beitrag MÜNCH & NESTLER (in diesem Heft) detaillierter eingegangen wird, während im Beitrag KUPETZ (ebenfalls in diesem Heft) die verbesserten Interpretationsmöglichkeiten für glazitektonische Fragestellungen diskutiert werden. Der in Abbildung 2 abgebildete Tagesbruch vermittelt einen Eindruck vom möglichen Gefährdungspotenzial der ca. 274[1] ehemaligen untertägigen Braunkohlengruben Brandenburgs.

Über die Möglichkeit, mittels Laserscanning auch geringfügige Erdbewegungen, die durch Untertagebergbau verursacht wurden, erkennen zu können, berichtete KÜHN et al. (1998). Diese positiven Ergebnisse waren Anlass für den Versuch, das Verfahren für die Analyse braunkohlenbergbaubedingter Erdbewegungen in einem Altbergbaugebiet Brandenburgs einzusetzen. Unter den geforderten Rahmenbedingungen eines ausreichenden Kenntnisstands zum umgegangenen Altbergbau (markscheiderische Unterlagen) und eines allgemeingeologischen hohen Untersuchungsbedarfs ist durch die für den brandenburgischen Altbergbau verantwortlichen Mitarbeiter des LGRB das Testobjekt Döbern vorgeschlagen worden. Insbesondere wegen der zu erwartenden neuen Aussagen zur Verbesserung der Sanierungsvoraussetzungen wurde das Projekt durch den Regionalen Sanierungsbeirat des Landes Brandenburg bestätigt und über das Verwaltungsabkommen Bund/Länder zur Braunkohlensanierung finanziert. Mit der kommerziellen Abwicklung wurde der Sanierungsträger LMBV[2] beauftragt. Die Laserscan-Befliegung für den Ostteil des Gebiets erfolgte durch die eta-AG Schwarze Pumpe. Der Westteil sowie die Aufbereitung des gesamten Rohdatenmaterials wurde von der TopoSys GmbH Ravensburg ausgeführt.

Methodische Aspekte (Beitrag Sven Jany[3])

Über die methodischen Aspekte des ALS-Verfahrens und seiner Eignung für geologische Fragestellungen ist schon mehrfach berichtet worden: KÜHN et al. (1998), BALTSAVIAS (1999), WEHR & LOHR (1999) KÜHN et al. (2003) und andere. Daher konzentrieren wir uns hier auf einen kurzen methodischen Überblick und die Darstellung der technischen Parameter. Für das bewaldete Untersuchungsgebiet auf der Westflanke des Muskauer Faltenbogens bietet nach dem jetzigen Stand der Technik nur der Einsatz des ALS-Verfahrens die Möglichkeit der effizienten Erarbeitung eines waldfreien digitalen Höhenmodells.

Genutzt wurde der von der TopoSys GmbH entwickelte Glasfaserlaserscanner, der bei einer Messrate von 83 000 Herz eine mittlere Messdichte von etwa 5 Messwerten je m² erlaubt. Die Basisverarbeitung der Laserscannerdaten führt zu einem Höhenmodell, das präzis die Geländeoberkante (Oberkante der Vegetation, Dachhöhen der Häuser etc.) beschreibt. Ein derartiges Modell wird DSM, **D**igital **S**urface **M**odel genannt. In einem weiteren Arbeitsschritt können höhere Vegetation und auch Gebäude entfernt werden, so dass ein Höhenmodell der Erdoberfläche DTM, (**D**igital **T**errain **M**odel) berechnet wird. Die Lagegenauigkeit der so erzielten Höhenmodelle ist für jeden Rasterpunkt besser als 0,5 m und die absolute Höhengenauigkeit gegenüber dem lokalen Geoid ist besser als 0,15 m. Zur Ableitung von DSM und DTM wird das vorgesehene Untersuchungsgebiet mit einem Laserscanner in einzelnen parallelen, sich überlappenden Streifen beflogen. Parallel zum Laserscanner werden alle erforderlichen Messdaten synchron aufgezeichnet, wie GPS, Inertial Navigation System, RGB-Scanner. Zusätzlich registriert mindestens eine Bodenstation GPS-Daten für die spätere dGPS-Berechnung des Flugpfades, der wiederum nicht nur Voraussetzung für die Genauigkeit der Messwerte, sondern auch für die spätere Transformation in das vom Nutzer geforderte Koordinatensystem ist (z. B. Gauss-Krüger, Meridianstreifen 9°, Bessel-Ellipsoid, Datum Potsdam, Pegel Amsterdam).

Die „Rückrechnung" von z. B. aufgewachsenem Wald für die Ausgabe eines für geowissenschaftliche Fragestellungen geforderten DTM besteht vereinfacht in der Messspotbezogenen Möglichkeit, zwischen einem „First Pulse" und einem „Last Pulse" zu unterscheiden, wobei der „Last Pulse" in der Regel dem Waldboden entspricht. Für die Wandlung des präzisen Oberflächenmodells DSM in ein hochauflösendes Bodenmodell DTM sind mehrere Verfahren entwickelt worden, die je nach lokaler Gegebenheit eingesetzt werden. Problematisch ist die rechnerische Entfernung von niedriger Vegetation (kleiner 1,5 m). Im Allgemeinen können mit den Filteralgorithmen ca. 80% der Vegetation herausgefiltert werden, der Rest wird interaktiv nachbearbeitet.

Für das waldbestandene Untersuchungsgebiet Döbern wurde nicht nur die Vegetation erfolgreich herausgerechnet, sondern das DTM konnte auch die durch den Braunkohlentiefbau verursachten Bruchstrukturen messtechnisch signifikant erfassen und bildet damit eine exzellente Grundlage für Aussagen zur bergbaubedingten Gefahrenbewertung.

Abb. 2
Tagesbruch im Bereich der Grube „Conrad"; der Bruch (Durchmesser ca. 3 m) entstand 1999, Foto: H. Vöhl

Fig. 2
Collapse sinkhole on top of „Conrad-pit"; the 3 m hole sunk down in 1999, photo: H. Vöhl

Geologischer Bau und bergbauliche Nutzung des Untersuchungsgebiets im DTM

Das Untersuchungsgebiet liegt im Südosten Brandenburgs, im Braunkohlenrevier der Lausitz. Der regionalgeologische Bau des Gebiets ist u. a. in der Geologischen Karte Blatt CC 4750 Cottbus im Maßstab 1 : 200 000 dargestellt. Ein Ausschnitt dieser Karte bildet die Grundlage für Abbildung 3, die den Muskauer Faltenbogen als glazitektonische Großstruktur mitsamt der in Sachsen und Polen liegenden Faltenbogenanteile zeigt. Dabei umschreibt die gepunktete Linie die äußere Begrenzung des Muskauer Faltenbogens, während das eigentliche Untersuchungsgebiet – Testobjekt Döbern – auf der Westflanke des Faltenbogens eingetragen ist. Für die vollständige Legende aller am Schichtenaufbau beteiligten Einheiten wird auf die geologische Karte verwiesen.

Eine moderne Interpretation des geologischen Baus des Muskauer Faltenbogens als glazigene Großstruktur mit Integration der jüngeren tertiären Schichtenfolge in die vorwiegend elsterzeitliche glazitektonische Deformation (Wolf & Schubert 1992) hat u. a. Kupetz (1996, 1997 und in diesem Heft) vorgenommen. Schon die Ausmaße dieser Struktur mit einer WNW–ESE orientierten Lobenbreite von mehr als 20 km belegt die herausragende Bedeutung dieser glazitektonischen Struktur, für deren Genese ein hohes Deformationspotenzial vom vorstoßenden (surgenden) Gletscher zu fordern ist. Aus der Bogenform lässt sich eindeutig die NNE–SSW gerichtete Vorstoßrichtung ermitteln. Satellitenbildinterpretationen (Kupetz 1996) belegen eine Differenzierung der komplexen Stauchungsstruktur in mindestens drei Einzelbögen, die stapelartig ineinander sitzen und mit ihrer nur geringen Varianz in der räumlichen und glazitektonischen Strukturierung auf eine Genese unter vergleichbaren Bedingungen und vermutlich ohne größere Hiaten sprechen.

Die Einbeziehung der Braunkohlenflöze in die Faltung und Schuppung durch das am weitesten nach Süden vorstoßende Elster-Eis bis in eine Teufe von mehr als 150 m bildete zugleich die Grundlage für ihren Abbau, der sich von der Oberfläche über 22 Sohlen bis in ca. 107 m unter Gelände fortsetzte (Grube Conrad) und deren bruchbedingtes Gefährdungspotenzial als Spätfolgen-Analyse u. a. Gegenstand der Ausführungen von Münch & Nestler in diesem Heft ist.

Das mittels ALS-Verfahren abgeleitete DTM des Testobjekts ist als Gesamtübersicht auf der **großformatigen Beilage** abgebildet. Nach der virtuellen „Beseitigung" des Waldes wird ein morphologisches Feinmodell sichtbar, das das aus der bergbaulichen Nutzung abgeleitete tiefengeologische Modell um die bisher so nicht vorhandene Oberflächenausprägung optimal ergänzt. Wegen der räumlichen Erfassung der bergbaubedingten Bruchstrukturen können daher nicht nur Aussagen für die Ableitung der glazialen Landschaftsgenese bzw. der nachfolgenden periglaziären und warmzeitlichen Landschaftsüberprägung getroffen werden, sondern auch

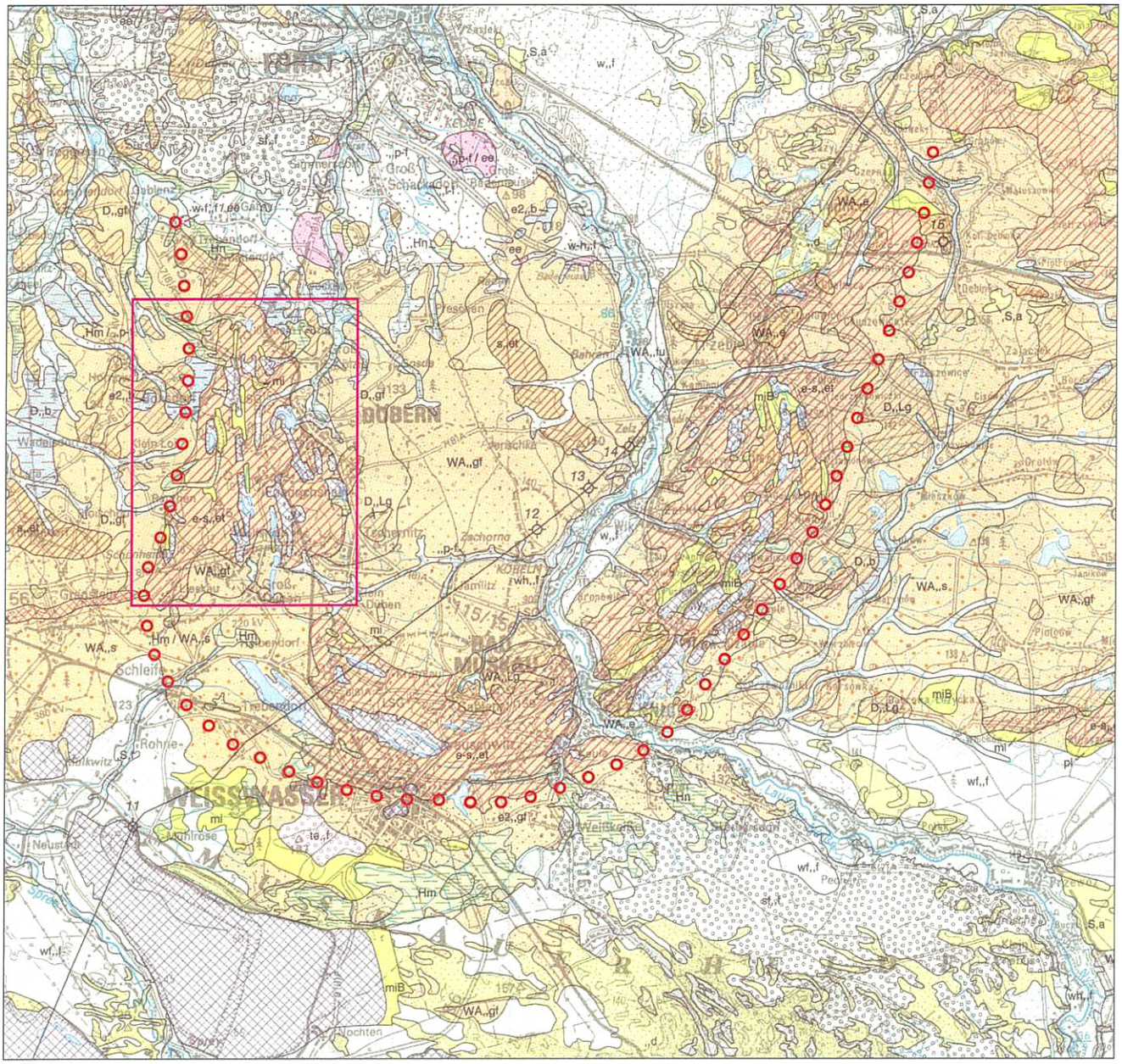

Abb. 3
Die Position des Untersuchungsgebietes an der Westflanke des Muskauer Faltenbogens

Fig.3
The position of the study area on the western wing of the push moraine Muskauer Faltenbogen

einsturzgefährdete Gebiete ausgewiesen und damit ein geotechnischer Beitrag zur Erzielung von Planungssicherheit geleistet werden.

Die an der komplexen Landschaftsgenese beteiligten Faktoren wirkten sich in unterschiedlicher Intensität aus: Markante morphologische Negativformen sind die so genannten Gieser, jetzt teils wassererfüllt, die durch verwitterungsbedingten Volumenschwund der oberflächennahen Braunkohlenflöze entstanden sind. Sie unterstreichen zwar den glazitektonischen Bau, obwohl man davon ausgehen muss, dass das ursprüngliche Stauchmoränen-Amphitheater um ca. 50% abgetragen und eingeebnet wurde (KUPETZ 1996). Dennoch heben sich trotz intensiver Erosion der elsterzeitlichen Vollformen die glazitektonischen Falten- und Schuppenstrukturen aus dem gering strukturierten Umland heraus. Der im Gegensatz zu immer noch verbreiteten Vorstellungen über vermeintliche chaotische Lagerungsverhältnisse in Stauch-

moränen typische hohe Regelungsgrad wird eindrucksvoll durch das Gleichmaß der glazialen Falten und Schuppen unterstrichen. Da das Testgebiet auf der Westflanke der Stauchungszone liegt, weisen diese ein einheitliches, fast submeridionales Streichen auf. In die Schuppung und Faltung einbezogen sind altpleistozäne und jungtertiäre Schichtenfolgen, die als einseitig steile Falten mit WSW-Vergenz ausgebildet und an der Basis entlang listrischer Flächen abgeschert sind. Inwieweit die Hauptscherzone lithologisch vorgezeichnet oder (petro-)physikalisch definiert ist, ist noch nicht eindeutig geklärt. Aus aktuogeologischen Vergleichen lässt sich hierfür möglicherweise der Grad der schmelzwasserbedingten intensiven Durchfeuchtung der oberen känozoischen Schichtenfolge als deformationserleichternde Ursache vermuten. Der Falten- und Schuppenbau des Muskauer Faltenbogens lässt sich als ein Ergebnis einer surgenden Gletscherstirn erklären. Ergänzend hierzu hat KUPETZ (1997) für eine innere Deformationszone mit vorherrschend plastischer Deformation (Faltenbau) auch eine Genese als Grundbruchstaffel unter Eisauflastbedingungen wahrscheinlich gemacht.

Auf detaillierte Interpretationsmöglichkeiten zum Bau und zur bergbaulichen Nutzung des Muskauer Faltenbogens aus den DTM wird auf die Folgebeiträge in diesem Heft verwiesen. Generell kann eingeschätzt werden, dass das Airborne Laserscanning-Verfahren sowohl für die Interpretation oberflächengestaltender landschaftsgenetischer Prozesse als auch für Bewertung von Gefährdungen, die vom ehemaligen Braunkohlentiefbau ausgehen, gut geeignet ist.

Die Eignung der hochauflösenden DTM (digitalen Terrainmodelle) für geologische Detailuntersuchungen im Muskauer Faltenbogen, wie die Analyse des Falten- und Schuppenbaus und für die Abwehr bergbaubedingter Gefahren in Altbergbaugebieten zeigt die Beilage: „Digitales Geländemodell (DTM) vom Westteil der Stauchmoräne Muskauer Faltenbogen, Gesamtübersicht". Ein höhenkoloriertes Teilgebiet dieser Beilage ist auf dem Umschlagbild der Zeitschrift abgebildet, das sowohl die Höhendifferenzierung der glazigenen Deformationsstrukturen als auch eine NE-SW verlaufende Querstörung zeigt.

Zusammenfassung

Das Airborne Laserscanning-Verfahren hat im waldbestandenen Stauchmoränenkomplex Muskauer Faltenbogen (Testobjekt Döbern) die Ableitung von digitalen Geländemodellen (DTM) ermöglicht. Mit dem DTM können verbesserte Interpretationsmöglichkeiten für Morphologie-betonte geogene und anthropogene Strukturen gefunden werden. Im Testgebiet Döbern macht es den Falten- und Schuppenbau der Stauchmoräne sichtbar. Neben den Fortschritten in der Analyse des glazitektonischen Deformationsinventars konnten insbesondere die oberflächennahen Auswirkungen und Spuren des unterirdischen Bergbaus nachgewiesen werden.

Summary

By using of Airborne Laserscanning a digital terrain model (DTM) could be acquired from the forested Muskau pushmoraine (testing site Döbern). The DTM allows a better understanding of morphology-accented as well as anthropogenic induced structures. Within the testing site of Döbern a harmonic system of glaciotectonic folds and faults were visible as well as surface spurs of the former underground ongoing brown coal mining.

Literatur

BALTSAVIAS, E. P. (1999): A comparison between photogrammetry and laser scanning. - ISPRS, Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54, S. 83-94

Geologische Übersichtskarte i. M. 1 : 200 000, Blatt CC 4750 Cottbus. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland und benachbarter Staaten, Hannover 2003

KÜHN, F., HÖRIG, B. & D. BUDZIAK (2003): Detecting unstable ground by satellite and airborne remote sensing. - Proceedings of the 30th international symposium on remote sensing of environment, November 10th-14th, Honolulu, Hawaii

Fußnoten:

[1] Aus: Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg, Leistungsbilanz 2002; Kleinmachnow, April 2003

[2] Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft

[3] Sven Jany, vormals TopoSys GmbH Ravensburg, jetzt Milan Flug GmbH

KÜHN, F., TREMBICH, G. & B. HÖRIG (1998): Remote sensing for evaluating hazards caused by underground mining. - Z. angew. Geol. **44**, 3, S. 172 - 180, Hannover

KUPETZ, M. (1996): Der Muskauer Faltenbogen – ein Geotop von europäischem Bedeutung. - Brandenburg. Geowiss. Beitr. **3**, 1, S. 125-136, Kleinmachnow

KUPETZ, M. (1997): Geologischer Bau und Genese der Stauchendmoräne Muskauer Faltenbogen. - Brandenburgische Geowiss. Beitr. **4**, 2, S. 1-20, Kleinmachnow

KUPETZ, M. (2003): Glazialtektonische Deformationsformen im hochauflösenden digitalen Geländemodell, Beispiel Muskauer Faltenbogen. - Brandenburgische Geowiss. Beitr. **10**, 1/2, S. 19-28, Kleinmachnow

MÜNCH, U. & P. NESTLER (2003): Einsatz moderner optischer Verfahren zur Bewertung von Altbergbauobjekten am Beispiel der Braunkohlengrube „Conrad" bei Döbern. - Brandenburg. Geowiss. Beitr. **10**, 1/2, S. , Kleinmachnow

STACKEBRANDT, W., F. THIEDIG, H. U. THIEKE & N. HERMSDORF (1997): Glazialdynamik und Moränengenese – aktuogeologische Beobachtungen in Spitzbergen (Svalbard). - Brandenburg. Geowiss. Beitr. **4**, 1, S. 31-48, Kleinmachnow

WOLF, L. & G. SCHUBERT (1992): Die spättertiären bis elsterzeitlichen Terrassen der Elbe und ihrer Nebenflüsse und die Gliederung der Elster-Kaltzeit in Sachsen. - Geoprofil **4**, S. 1-43, Freiberg

Anschrift der Autoren:
Dr. W. Stackebrandt
Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Brandenburg
Stahnsdorfer Damm 77
14532 Kleinmachnow

Dipl.-Ing. Sven Jany
Milan Flug GmbH
Schäferweg
03139 Schwarze Pumpe

Mitteilung aus dem Landesamt No. 160