

Terrestrisches Laserscannen in der Bergbauplanung

3D-Laserbilder zur schnellen Generierung digitaler Oberflächenmodelle

Moritz Ostenrieder, Sven-Uwe Schulz

Im Rahmen computerunterstützter Bergbauplanung sind digitale Geländemodelle (DGM) eine wichtige Voraussetzung für alle nachfolgenden Prognosen und Projektschritte. Ihre Qualität hängt entscheidend von der Punktdichte der Rohdaten ab. Dieser Beitrag stellt die Technologie des terrestrischen 3D-Laserscannens als kostengünstige Alternative zur schnellen Gewinnung einer hinreichenden Menge dreidimensionaler Oberflächendaten vor. Anhand eines

Beispielprojektes wird die Verfahrensweise bis zur Entstehung eines DGM gezeigt, auch unter Berücksichtigung der Vorteile für kleinere Betriebe.

Schlüsselwörter:

Laserscanner - Digitales Geländemodell - DGM - Bergbauplanung

3D Laser Imaging for fast generation of digital terrain models in computer aided mine planning

Computer aided mine planning needs accurate digital terrain models (DTM). They are of importance for all further planning steps. The quality of such DTMs depends on the density of measured points in the raw data sets. This article is introducing the technology of terrestrial 3D Laser Imaging as a fast and accurate possibility to acquire 3D surface data. A case study describes the features of the system and

highlights especially the advantages of the technology for quarries.

Keywords:

Laser scanner – Digital terrain model – DTM – Mine planning

Balaye terrestre a laser dans a la planification minière – Image laser 3D la génération rapide de modèles de surface digitaux

Exploración terrestre por laser en la planificación de la minería – Imágenes tridimensionales por laser para la generación rápida de modelos digitales des superficies

Vortrag anlässlich der GDMB-Fachtagung „Computereinsatz in der bergbaulichen Betriebsplanung“ am 23. Oktober 2001 in Fulda

1 Rahmenbedingungen

Die Nutzung der am Markt verfügbaren Computersysteme für die Bergbauplanung und für die Qualitätssteuerung fußt wesentlich auf dem Vorhandensein geeigneter Daten zur Erzeugung digitaler Oberflächenmodelle. Die Qualität der Rohdaten beeinflusst maßgeblich die Aussagegenauigkeit aller nachfolgenden Prognosen hinsichtlich Masse, Volumen oder Qualität und somit den Erfolg des jeweiligen Projektes. Daher kommt es bei der Datenakquisition auf eine umfassende, schnelle und hinreichend genaue Erfassung der einzelnen Punktkoordinaten an.

Aufgrund des immer stärker werdenden Kostendruckes muss der technische und personelle Aufwand zur Beschaffung solcher Oberflächendaten möglichst gering gehalten werden. Dies gilt umso stärker, je kleiner eine zu untersuchende Betriebseinheit ist. Oftmals werden die Vermes-

sungsarbeiten bereits an externe Auftragnehmer vergeben. Die Hauptkosten werden hier durch die Phase der Datenaufnahme, d. h. die Stärke des Messtrupps und die Messdauer, bestimmt. Da für die Erstellung eines digitalen Geländemodells (DGM) je nach Objektgröße eine Vielzahl von Punkten in regelmäßigem Raster zu erfassen ist, erscheint die Datenakquisition mit tachymetrischen Messungen schnell unwirtschaftlich. Daneben muss gerade im Bergbau, dessen Tätigkeit u. a. durch erhebliche Volumenbewegungen gekennzeichnet ist, eine regelmäßige Aktualisierung eines DGM erfolgen. Dies ermöglicht einerseits die Kontrolle und Dokumentation des Abbaufortschritts und andererseits den Soll-Ist-Vergleich zwischen Planung und Produktion. Daneben lässt sich die mit dem Abbau einhergehende Landschaftsveränderung gut nachvollziehen.

2 3D-Laser-Bilderzeugung

Neben den herkömmlichen Messverfahren bietet die Erzeugung von 3D-Laserbildern vom Boden aus eine leistungsfähige und kostengünstige Alternative bei der Generierung digitaler Geländemodelle. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf das sogenannte terrestrische Laserscannen, das im Vergleich zu den Messverfahren vom Flugzeug aus zwar geringere Reichweiten, dafür aber höhere Genauigkeiten und eine größere Punktdichte aufweist. Es ermöglicht die wirtschaftliche Aufnahme auch kleiner Geländeausschnitte.

Beim terrestrischen Laserscannen wird zunächst das Messobjekt mittels eines Laserstrahls abgetastet, woraufhin die Daten der einzelnen Punkte noch im Feld in den Computer übernommen werden. Bei größeren Geländeausschnitten, die mehrere Aufstellungen notwendig machen, erfolgt anschließend die lagemäßige Positionierung der Aufnahmen.

Im folgenden werden das Messprinzip sowie die Hard- und Software, die hier zur Anwendung kommen näher beschrieben. Der Verfahrensablauf zur Aufnahme und Erstellung eines DGM werden anschließend anhand eines Beispielprojektes erläutert.

2.1 Messprinzip

Das hier beschriebene Verfahren zur Bestimmung von Punktkoordinaten beim Laserscannen beruht auf der Methode der Laufzeitmessung infraroten Laserlichtes (Abbildung 1). Der Laserstrahl wird von einer Senderdiode emittiert und auf das Zielobjekt gelenkt. An dessen Oberfläche findet eine diffuse Reflexion statt, die dafür sorgt, dass ein Teil der ausgesandten Strahlung mit Hilfe der Empfängerdiode detektiert werden kann. Die Zeitmesseinheit bestimmt die Laufzeit des Laserstrahls und ermöglicht auf diese Weise die Bestimmung der Entfernung des Zielpunktes zum Messgerät. Während des Empfangs des Messstrahls erfolgt neben der Laufzeitmessung die Bestimmung der Reflexionsintensität. Diese wird als zusätzliche Information zur weiteren Verarbeitung bereitgestellt.

Um ein möglichst großes Winkelfenster in der Vertikalen zu überstreichen, lenkt ein sich kontinuierlich drehender Spiegel den Laserstrahl ab. Die Position des Drehspiegels zum Emissionszeitpunkt und seine Lage im Empfangsmoment lassen die Bestimmung des gesuchten Winkels zu. Die Bestimmung der horizontalen Richtung erfolgt durch die Drehung des Scannerkopfes mit Hilfe von Schrittmotoren.

Damit ist die Lage des Punktes, an dem der entsprechende Laserstrahl reflektiert wurde, räumlich eindeutig bestimmt. Seine Koordinaten liegen zunächst in polarer Form vor. Im Microcomputer des Scanners erfolgt anschließend die Transformation in kartesische Koordinaten, die dann zum Export an eine Verarbeitungssoftware bereitstehen. Jeder Punkt wird somit durch vier Werte charakterisiert (x-Koordinate, y-Koordinate, z-Koordinate, Intensitätswert).

Gleichzeitig mit der Bestimmung der Intensität und der Koordinaten der einzelnen Messpunkte werden deren RGB-Farben erfasst. Dies erfolgt mittels eines 1-Pixel-RGB-Sensors, der dem Laserstrahl koaxial überlagert ist. Da jeder Punkt neben seiner Koordinate im Raum über eine solche Farbinformation verfügt, sind die aus den Rohpunktwolken kreierte Modelle automatisch mit einer Textur versehen. Auf diese Weise werden fotoähnliche Darstellungen erreicht. [1]

2.2 Messgerät und Software

Das Ingenieurbüro M. Ostenrieder verwendet ein System bestehend aus einem Laserscanner der Laserklasse 1, einem Laptop (Abbildung 2) und einer Akquisitions- und Bearbeitungssoftware.

Der Scanner weist eine Reichweite von 2 m bis etwa 350 m auf. Diese ist abhängig von der Reflektivität (den Oberflächeneigenschaften) des Zielobjektes. Der Scannerkopf ist in der Horizontalen um 336° drehbar. Der Laserstrahl kann in der Vertikalen mittels eines gleichförmig gedrehten Polygonspiegels einen Bereich von $\pm 40^\circ$ erfassen. Die Divergenz des emittierten Laserstrahls beträgt 3 mrad, das entspricht einer Strahlöffnungsweite von ca. 30 cm in einer Entfernung von 100 m. Die Messrate des Laserscanners

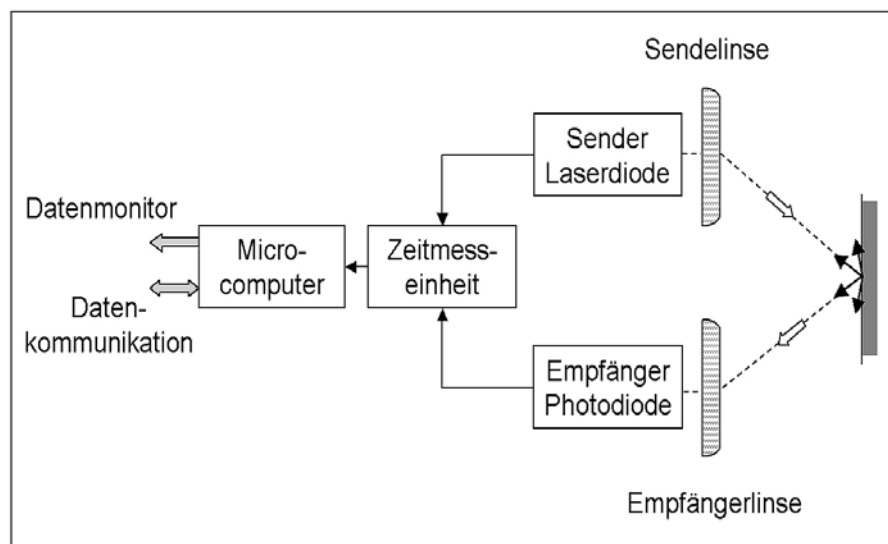


Abb. 1:
Prinzipskizze zur Laufzeitmessung,
nach [2]



Abb. 2: Meßsystem bestehend aus Laserscanner, Laptop und Software

liegt bei ca. 6000 Punkten pro Sekunde. [2]

Die zum Vermessungssystem gehörige I-SiTE Software steuert zum einen die Aufnahme der Rohdaten und bietet zum anderen die Werkzeuge zur Bearbeitung der Punktwolke an. Daneben sorgt sie für den Datenaustausch mit anderen Anwendungen.

Während der Steuerung des Scanners bei der Aufnahme erfolgt die in Abbildung 1 dargestellte Kommunikation zwischen Laptop und Scanner. Hier werden das gewünschte

Winkelfenster und der abzutastende Entfernungsbereich eingestellt. Die Auflösung des Zielobjektes hängt von der Entfernung zum Messgerät ab. Die Messung erfolgt in Linien, deren Winkel zueinander ebenfalls in der Software eingestellt werden kann. Der minimal wählbare Winkel zwischen 2 Messlinien beträgt $0,108^\circ$. Das Diagramm in Abbildung 3 macht deutlich, welche Punktabstände bei welchen Objektentfernungen zu erwarten sind.

Die drei Geraden stehen für unterschiedliche Auflösungen, die in der Software voreingestellt sind. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, den Winkelversatz der einzelnen Messlinien frei vorzugeben.

Das System ist in der Lage, bis zu 45 Linien pro Sekunde abzutasten. Eine Aufnahme in der größtmöglichen Auflösung bei vollem Winkelfenster ($80^\circ \times 336^\circ$) dauert ca. 6 Minuten, wobei etwa 2 Mio. Messpunkte erfasst werden können.

Nach der Aufnahme des Messobjektes, für die in der Regel mehrere Aufstellungen erforderlich sind, müssen die einzelnen Scans zueinander positioniert und gegebenenfalls georeferenziert werden. Dies lässt sich durch einfache Menüs in der Software durchführen. Anschließend können verschiedene Filter- und Analysefunktionen zur Bearbeitung der Punktwolke eingesetzt werden. Diese ermöglichen zum einen die Reduktion der Daten auf wesentliche und vom Anwender geforderte Aussagen. Zum anderen wird die Datenmenge auf eine Größenordnung reduziert, die sie auch in Anwendungen außerhalb des Vermessungssystems handhabbar macht. Einzelheiten zu den Filter- und Bearbeitungsfunktionen werden im Abschnitt 3 Beispielprojekt Tontagebau erläutert.

2.3 Vorteile des Verfahrens

Die Vorteile des beschriebenen Messverfahrens liegen zunächst in der gleichzeitigen Erfassung der Koordinaten und der Farbinformation der einzelnen Messpunkte. Es schafft eine enorme Zeitersparnis bei der Kompletterfassung 3-dimensionaler Messobjekte, wie zum Beispiel Tagebauöffnungen. Neben der schnellen Datenakquisition stellt die

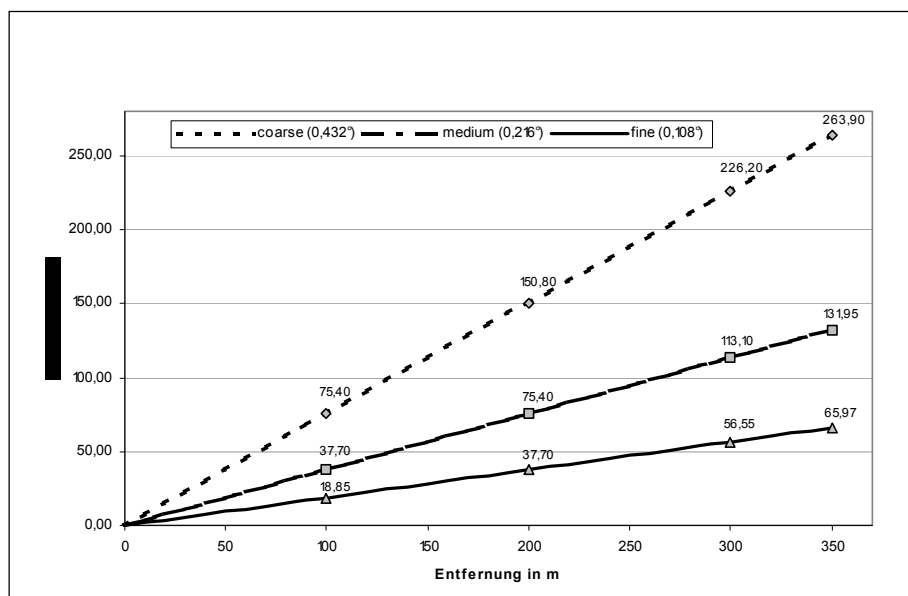


Abb. 3:
Abstand der Meßpunkte bei unterschiedlichem Winkelversatz

Sicherheit von Personal und Messgerät einen entscheidenden Vorteil dar. Die Aufnahme gefährdeter oder unzugänglicher Bereiche ist aufgrund der verhältnismäßig großen Reichweite des Messgerätes möglich. Alle Schritte von der Datenaufnahme bis zur Erzeugung eines DGM finden in einem Softwarepaket statt. Darüber hinaus gewährleistet die Software die Übernahme der aufgenommenen Daten in jedem Bearbeitungsstatus in alle gängigen CAD Applikationen und Bergbauplanungsprogramme.

Einmal aufgenommen lassen sich die Rohdaten eines bestimmten Messzeitpunktes immer wieder zur Beantwortung verschiedenster Fragestellungen heranziehen, ohne zusätzliche teure Geländetage in Anspruch nehmen zu müssen.

3 Beispielprojekt Tontagebau

Zur Erläuterung der Bearbeitungsfunktionen der Scannersoftware und der Übernahme und Weiterverarbeitung in der Bergbauplanungssoftware dient im folgenden ein Tontagebau. Hier sollte das Gelände aufgenommen und in einem DGM dargestellt werden, um darauf aufbauend Volumen- und Massenberechnungen auszuführen sowie thematische Darstellungen zu kreieren.

Um den Tagebau mit einer Fläche von ca. 300 x 300 m in der gewünschten Genauigkeit abzubilden und um Schatten von Böschungskanten etc. vorzubeugen, wurden 2 Aufnahmen von 2 verschiedenen Standpunkten aus durchgeführt. Der gesamte Messeinsatz nahm eine Zeit von etwa 1 h in Anspruch und lieferte ca. 4,4 Mio. Punkte im Rohdatensatz.

Zur Positionierung der einzelnen Aufnahmen stehen softwareseitig grundsätzlich 2 Verfahren zur Verfügung. Entweder erfolgt die Messung von bekannten Aufstellungspunkten aus in bekannte Richtungen, oder die Scans werden anhand von Passpunkten zueinander orientiert. Im Falle des hier vermessenen Tontagebaus erfolgte die Positionierung der Aufnahmen aufgrund bekannter Aufstellungs- und Zielpunkte.

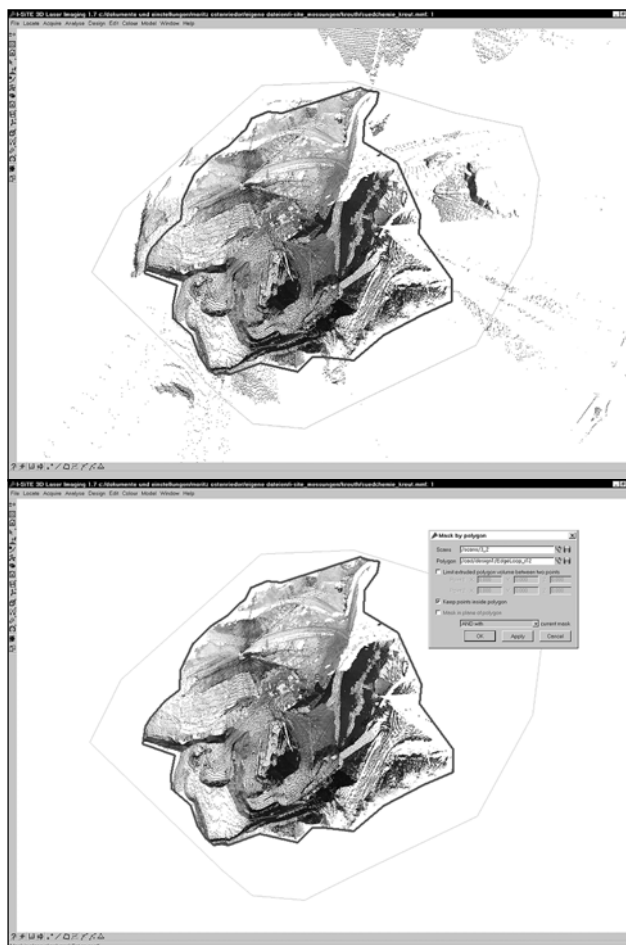


Abb. 5: Herausfiltern aller Punkte außerhalb eines bestimmten Randpolygons

Die Abbildung 4 zeigt den bereits orientierten Rohdatensatz in perspektivischer 3-dimensionaler Ansicht.

Unmittelbar auf die Messung folgend findet die Bearbeitung der Daten unter den speziellen Fragestellungen statt.

Um zu den geforderten Ergebnissen zu kommen, stehen

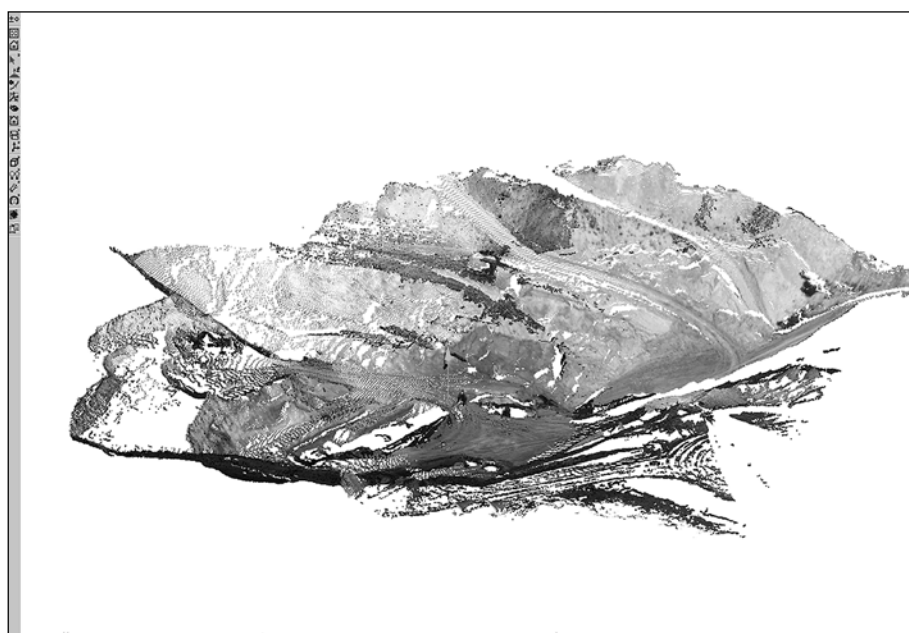


Abb. 4: Rohdatensatz - dreidimensionale Punktwolke der Messpunkte des Tagebaus

verschiedene Werkzeuge zur Verfügung, welche zunächst die Punktmenge reduzieren. Dabei ist das Herausfiltern in Abhängigkeit von geometrischen Formen und Beziehungen (Polygone, bestimmte Abstände vom Messpunkt aus etc.) hervorzuheben (Abbildung 5).

Darüber hinaus ist auch das Filtern nach der Reflexionsintensität möglich. Das heißt, Punkte mit bestimmten Intensitätswerten, oder solche, die bestimmte Grenzwerte überschreiten, können entsprechend koloriert oder gelöscht werden. Dies ist sehr sinnvoll zur Darstellung einzelner Objekte unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit oder auch zur Festlegung von Schichtgrenzen bei geologischen Aufgabenstellungen bzw. um Passpunkte zu definieren.

Alle Filterfunktionen lassen sich rückgängig machen, und jeder Bearbeitungsstatus ist sicherbar. Zur besseren Visualisierung der Ergebnisse sind Möglichkeiten zum Zeichnen von CAD-Objekten (Punkte, Linien, Polygone) gegeben. Diese eignen sich gut, um zum Beispiel erkannte Schichtgrenzen zu illustrieren.

Vegetation oder Tagebaugeräte sind zum einen aufgrund ihrer verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten, zum anderen aufgrund stark vom Gelände abweichender z-Werte, gute Erkennungsmerkmale, um aus dem DGM gefiltert zu werden. Über diese Werkzeuge hinaus gibt es die Möglichkeit der automatischen Kantenerkennung, welche die auf den Hauptstrukturen liegenden Messpunkte darstellt und den Rest verwirft. Dies ist ein äußerst hilfreiches Werkzeug, beispielsweise um Abbaukanten o. ä. schnell zu detektieren. Um die Punktmenge, vor allem in strukturell homogenen Gebieten zu minimieren, lässt sich die Punktdichte reduzieren. Dazu können von den einzelnen Messlinien nur mehr jeder 2., 3., 4. ... usw. Punkt betrachtet werden. Dieses Werkzeug sorgt für ein regelmäßiges und ausgedünntes Punktraster.

Nach der Bearbeitung der Punktwolke erfolgt der Aufbau des DGM. Dies kann entweder noch in der Scannersoftware durchgeführt werden, oder es findet bereits in einem externen CAD-System statt. Der Austausch der Daten erfolgt je nach Wunsch und Datenmenge entweder im dxf-Format

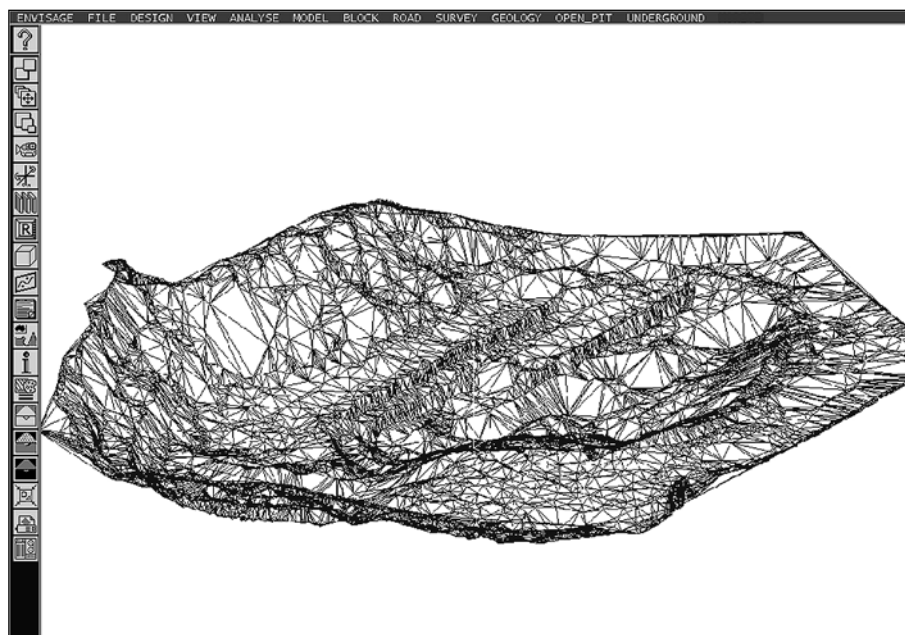


Abb. 6:
Triangulation der Punktwolke des
Tagebaus

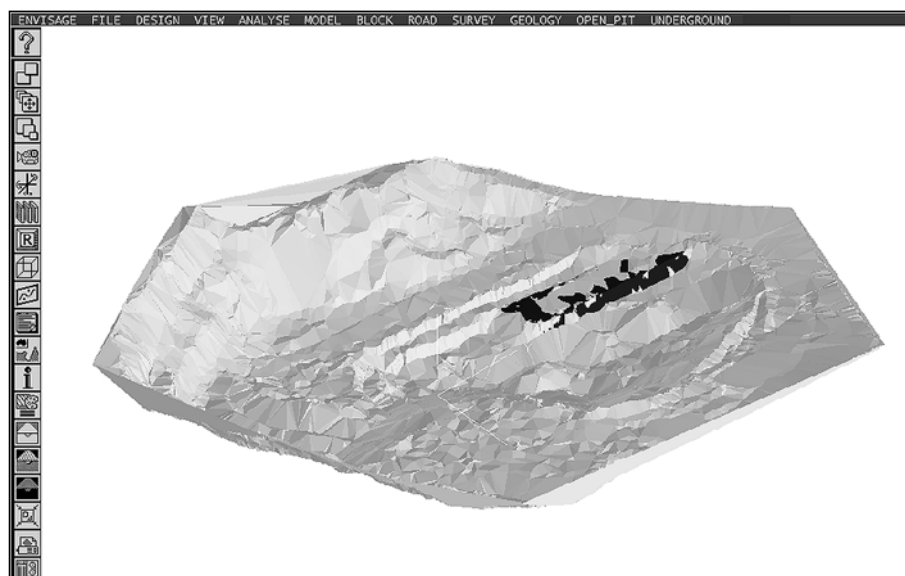


Abb. 7:
DGM mit Tonkörper zur Massen-
berechnung

oder als einfache ASCII-Datei. Die Abbildung 6 zeigt die Dreiecksvermaschung (Triangulation) der einzelnen Messpunkte. Diese liefert ein Oberflächenmodell, das für weitere Produktionsplanungen bzw. Volumen- und Massenberechnungen herangezogen werden kann. Abbildung 7 zeigt dieses DGM als geschlossene Fläche mit einem eingebetteten Tonkörper, wie sie als Ergebnis in der Bergbauplanungssoftware vorliegt.

4 Zusammenfassung

Die 3D-Laser-Bilderzeugung erlaubt die schnelle Aufnahme von 3-dimensionalen Punktwolken im Gelände. Dabei wird die Laufzeit eines emittierten und am Messobjekt reflektierten Infrarotlaserstrahls gemessen. Daraus können die Koordinaten der einzelnen Messpunkte bestimmt und an den Computer kommuniziert werden. Die hohe Messrate eines solchen Systems ermöglicht die Aufnahme von bis zu 6000 Punkten pro Sekunde. Die Analyse- und Filterwerkzeuge der Software ermöglichen die komfortable Bearbeitung der Rohdatensätze auch unter sehr speziellen Gesichtspunkten.

Eine Hauptanwendung der 3D-Laser-Bilderzeugung im Rahmen der computerunterstützten Bergbauplanung ist die Erstellung digitaler Geländemodelle. Diese sind aufgrund standardisierter Datenformate zur weiteren Verarbeitung in allen gängigen Bergbauplanungssystemen geeignet.

Schrifttum

- [1] ULLRICH, A. et. al (2001): Time-of-Flight 3-D Imaging Sensor with True-Color Channel for Automated Texturing. – In: GRÜN, A. & KAHMEN, H: Optical 3-D Measurement Techniques V – Applications in manufacturing, quality control, robotics, navigation, mobile mapping, medical imaging, animation. – Tagungsband – ISBN 3-9501492-0-1
- [2] Riegl Laser Measurement Systems (2001): Laser Mirror Scanner LMS-Z210, Technische Dokumentation, unveröffentlicht

Die Autoren



M. Ostenrieder studierte Bergbau an der TU Berlin und Betriebswirtschaft an der TU München. Bis 1995 war er bei der Sachtleben Bergbau GmbH angestellt und dort in der Planungsabteilung für Auslandsprojekte tätig. Seit 1996 ist er als beratender Ingenieur selbständig tätig und beschäftigt sich speziell mit Laservermessungen und der Einführung von Bergbauplanungssoftwaresystemen.



S.-U. Schulz studierte Geoingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften mit der Vertiefungsrichtung Entsorgungs- und Rohstofftechnik an der TU Berlin. Seit 2001 ist er als beratender Ingenieur für das Ingenieurbüro M. Ostenrieder tätig. Sein Arbeitsschwerpunkt liegt im Bereich der Laservermessung und der Einbindung der Daten in Bergbauplanungssysteme.

Dipl.-Ing. Moritz Ostenrieder
Dipl.-Ing. Sven-Uwe Schulz
Ingenieurbüro M. Ostenrieder
Auf der Eierwiese 1
82031 Grünwald
e-mail: ingbuero@ostenrieder.de

Manuskripteingang: 19. Juli 2002