

Digitale Geländemodellierung aus flugzeuggetragener Laserscannermessung – eine Untersuchung zur Ableitung von hydrologischen Parametern für den Hochwasserschutz in bewaldeten Einzugsgebieten¹

Christoph STRAUB

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch das Programmkomitee als „reviewed paper“ angenommen.

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Generierung von digitalen Geländemodellen aus flugzeuggetragener Laserscannermessung. Auf Basis der berechneten, digitalen Geländemodelle wurden, anhand eines konkreten Beispiels, Untersuchungen zur Ableitung von hydrologischen Parametern für den Hochwasserschutz durchgeführt. Besondere Beachtung wurde der Ermittlung von kleinen, potenziellen Retentionsflächen geschenkt. Die Ergebnisse wurden durch eine Geländebegehung überprüft. Die Untersuchungen dieser Arbeit zeigen, dass ein digitales Geländemodell aus Laserscannerdaten sehr hochwertige hydrologische Analysen ermöglicht – auch unter den erschwerten Bedingungen vollständig bewaldeter Einzugsgebiete. Vergleiche der berechneten Abflusslinien mit dem Gewässersystem des DLM² und der digitalisierten TK25³ aus dem ATKIS⁴-Datenbestand zeigten sehr gute Übereinstimmungen. Von den insgesamt 16 ermittelten Retentionsflächen konnten 14 bei der Geländebegehung nachgewiesen werden. Selbst sehr feine Geländestrukturen werden im Geländemodell wiedergegeben.

1 Einleitung

In den Sommern 2002 und 2003 kam es in den Gemeinden Tübingen-Bühl, Rottenburg-Dettingen, Rottenburg-Bad-Niedernau und der Wochenendhaussiedlung „Martinsberg“ bei Rottenburg a. Neckar zu Hochwasserereignissen von bisher unbekanntem Ausmaß. Ursache der Hochwässer waren heftige Starkregenereignisse. Gleichzeitig wurde ein extremer, oberflächiger Abfluss des Regenwassers aus dem Waldgebiet „Rammert“ in die umliegenden Ortsteile beobachtet. Die Fachhochschule Rottenburg hat damit begonnen, das Wasserabflussverhalten aus dem Wald am Beispiel des „Rammerts“ zu untersuchen. Als

¹ Fachliche Betreuung durch Prof. Rainer Wagelaar.

² Digitales Landschaftsmodell.

³ Topographische Karte 1:25.000.

⁴ Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem.

Untersuchungsgebiet diente die Wochenendsiedlung „Martinsberg“ bei Rottenburg a. Neckar.

Als Bestandteil dieses Projektes wurden im Rahmen dieser Arbeit digitale Geländemodelle aus Laserscannerdaten berechnet. Die flugzeuggetragene Laserscannermessung ist ein modernes Fernerkundungsverfahren zur direkten Vermessung der topographischen Geländeoberfläche. Auf Basis der berechneten digitalen Geländemodelle wurden hydrologische Analysemöglichkeiten wie Abflussmodellierungen und die Bestimmung von Wassereinzugsgebieten untersucht. Als mögliche Strategie zur Verzögerung des oberflächigen Wasserabflusses aus dem Wald bei Starkregenereignissen, welche die Hochwasserschäden verursachen, wird die Anlage von dezentralen Retentionsmulden (Versickerungsmulden) gesehen. In diesem Zusammenhang wurde untersucht, ob kleine natürliche Senken, als sehr feine Strukturen der Geländeoberfläche, in einem digitalen Geländemodell aus Laserscannermessung identifiziert werden können und ob diese als potenzielle Retentionsflächen dienen können.

Die Geodaten für diese Arbeit entstammen dem Datensatz der Landesbefliegung von Baden-Württemberg zur Erstellung eines neuen hochgenauen Geländemodells. Die Laserscannerdaten stehen somit „Jedermann“ zur Verfügung. Für diese Arbeit wurden unprozessierte Rohdaten im Januar 2004 beim Landesvermessungsamt von Baden-Württemberg – Abteilung Geodäsie – in Karlsruhe bestellt.

2 Die flugzeuggetragene Laserscannermessung

Die flugzeuggetragene Laserscannermessung ist ein modernes Verfahren in der Fernerkundung zur direkten Erfassung der topographischen Geländeoberfläche und von Objektpunkten. Aus der Laserscannermessung können dreidimensionale Objektmodelle und digitale Geländemodelle abgeleitet werden. Flugzeuggetragene Laserscannersysteme (engl.: Airborne Laserscanner Systems) bestehen aus drei Hauptkomponenten:

- Lasersensor (bzw. Laserdistanzmesser mit Scanvorrichtung)
- GPS (Global Positioning System)
- INS (Inertial Navigation System)

Diese Kernbestandteile werden oft durch eine Video-Kamera oder einen RGB⁵-Scanner zur Visualisierung des Messgebiets ergänzt. Ein Kontrollsystem (Bordcomputer) überwacht die Funktionsweise der Einzelkomponenten und speichert die Daten zeitsynchronisiert ab. Als Trägerplattform für dieses System können Flugzeuge und Hubschrauber dienen. Als zusätzliche Komponente befindet sich eine GPS-Basisstation auf einem bekannten Standpunkt innerhalb des Befliegungsgebiets. Die Höhenmessung über dem Relief erfolgt durch ausgesendete Laserlichtimpulse, welche quer zur Flugrichtung abgelenkt werden. Dadurch wird die Geländeoberfläche innerhalb eines definierten Geländestreifens

⁵ RGB – red, green, blue, die Grundfarben der additiven Farbmischung, auf denen das Farbsehen (Farbmischung) beruht.

abgetastet. Die Distanz zur Erdoberfläche wird über Laufzeitmessung bestimmt (WEVER 1999).

Eine wesentliche Eigenschaft der Laserscannermessung ist die Aufzeichnung von Mehrfachreflexionen. Ein Laserlichtimpuls hat bei 1.000 m Flughöhe am Boden einen Durchmesser von ca. 25 cm. Ein solcher Impuls kann auf dem Weg zum Erdboden mehrmals auf unterschiedliche Objekte, z.B. in Waldgebieten auf einzelne Blätter treffen und von diesen reflektiert werden. Die ALTM⁶-Systeme sind in der Lage, diese Mehrfachreflexionen zu unterscheiden. Erste Reflexionen liegen in Waldgebieten meistens in der Vegetation. Für die letzte aufgezeichnete Reflexion kann dagegen mit hoher Wahrscheinlichkeit angenommen werden, dass es sich um einen Bodenpunkt handelt. Bei dichter Vegetation kann die letzte Reflexion allerdings auch innerhalb der Vegetationsschicht liegen (HANSA LUFTBILD 2003).

Die Aufzeichnung von Mehrfachreflexionen und die Ermittlung der tatsächlichen Bodenpunkte ermöglicht eine qualitativ hochwertige Generierung von digitalen Geländemodellen in Waldgebieten. Für Waldgebiete können, je nach Bestand, unterschiedliche Durchdringungsraten beobachtet werden. Diese ergeben sich, indem die Bodenpunkte zu allen restlichen Punkten ins Verhältnis gesetzt werden. Empirische Untersuchungen haben gezeigt, dass die Durchdringungen zwischen 31 % (Nadelbaumbestände) und 64 % (Mischwaldbestände) liegen (WEVER 1999).

Für die Messungen zur Bereitstellung des neuen digitalen Geländemodells für Baden-Württemberg verwendete die Firma TopScan das ALTM-System „1225“ der kanadischen Firma Optech Inc. Die wesentlichen Systemparameter werden in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Systemparameter des ALTM-Systems 1225

Messfrequenz:	25.000 Hz
Scanfrequenz:	25 Hz
Scanwinkel:	± 20°
Fluggeschwindigkeit:	80 m/sek.
Mittlere Flughöhe:	900 m
Streifenabstand:	300, 400, 450 m (je nach Reliefenergie)

(in Anlehnung an SCHLEYER 2001)

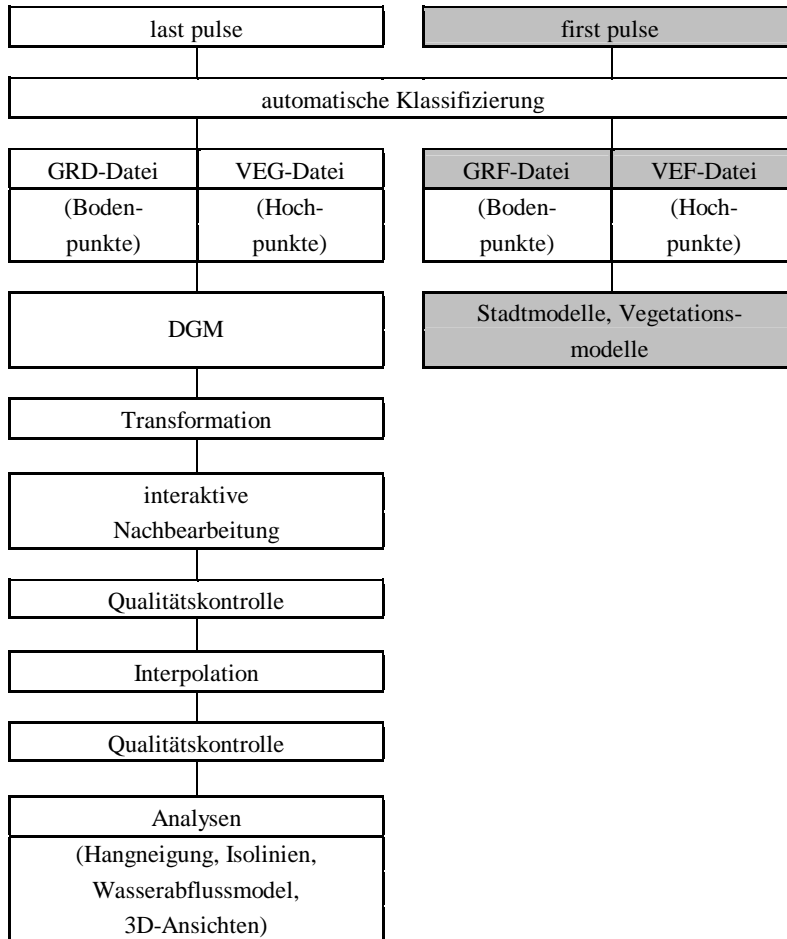
3 Digitale Geländemodelle aus Laserscannermessung

Für die Prozessierung der Laserscannerdaten stellte die INPHO GmbH die Geländemodellierungssoftware SCOP++ (Stuttgart Contour Program) zur Verfügung. SCOP++ ist eine Gemeinschaftsproduktion der INPHO GmbH und dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität in Wien. Die Methodik zur Erstellung des

⁶ Airborne Laser Terrain Mapper.

digitalen Geländemodells orientierte sich im Wesentlichen an der Vorgehensweise der Landesvermessungsverwaltung von Baden-Württemberg. Tabelle 2 beschreibt die einzelnen Arbeitsschritte:

Tab. 2: Arbeitsschritte zur Erstellung eines digitalen Geländemodells aus Laserscannerdaten (von den Rohdaten bis zum Endprodukt)



(in Anlehnung an SCHLEYER 2001)

Die Höhengenaugigkeit des digitalen Geländemodells liegt bei $<\pm 0.5$ m, d.h. dass die Höhen des Geländemodells im Mittel um maximal 0.5 m von tatsächlichen Höhen abweichen. Dies gilt auch für topographisch schwieriges Gelände (HOSS 1997). Vergleiche der berechneten Geländehöhen dieser Arbeit mit trigonometrischen Punkthöhen können diese Aussage bestätigen. Weiterhin hat sich gezeigt, dass mit diesem Verfahren in Waldgebieten sehr gute Ergebnisse erzielt werden können. In diesen Bereichen hat die Laserscannermessung erhebliche Vorteile gegenüber der terrestrischen und photogrammetrischen Datenerhebung (KRAUS et al. 1997).

4 Hydrologische Analysen

Traditionellerweise wurden die Abflusszusammenhänge für ein topographisches Gelände aus einer Interpretation der Höhenlinien einer topographischen Karte abgeleitet. So wurde beispielsweise die Fließrichtung, dem steilsten Gefälle folgend, durch rechtwinklige Pfeile zu den Konturlinien eingezeichnet. Mithilfe von Geographischen Informationssystemen können derartige Zusammenhänge, auf Basis eines digitalen Geländemodells, automatisch abgeleitet werden (MAIDMENT 2002).

Für die Berechnung der hydrologischen Parameter wurde die „ARC HYDRO“-Extension der Software ARC GIS 8.3 von ESRI⁷ verwendet. Die „ARC HYDRO TOOL“-Funktionen bieten Werkzeuge zur Rasteranalyse, welche die Berechnung von Fließrichtungen, Abflusskonzentrationen, Abflusslinien und Wassereinzugsgebieten ermöglichen. Auf Basis der Rasteranalyse können Vektordarstellungen von Drainagelinien und Wasserscheiden abgeleitet werden. Als Grundlage für die Berechnungen diente das mit SCOP++ berechnete Geländemodell aus Laserscannerdaten. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die berechneten Abflusslinien und das Gesamteinzugsgebiet für das Testgebiet „Martinsberg“ in der Ansicht mit SCOP++.

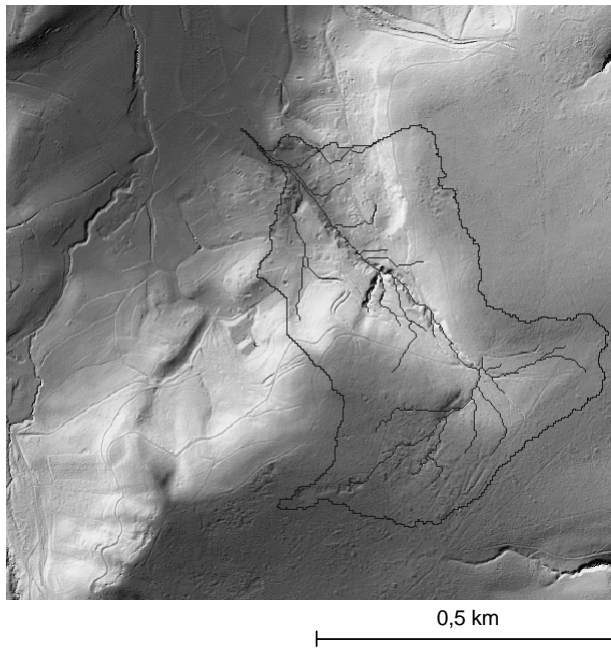


Abb. 1: Digitales Geländemodell aus Laserscannerdaten (in der Ansicht mit SCOP++)

⁷ Environmental Systems Research Institute.

Wie bereits einleitend erwähnt, wurden Untersuchungen durchgeführt zur direkten Bestimmung von potenziellen Retentionsmulden aus dem „Laserscan-DGM“. Die Anlage von Retentionsmulden sollte den Gegebenheiten des Geländes angepasst werden. Ziel soll es sein, bereits natürlich vorhandene Senken im Gelände auszunutzen. Vor diesem Hintergrund wurde überprüft, ob kleine, natürliche Senken aus einem „Laserscan-DGM“ abgeleitet werden können. Weiterhin wurde überprüft, ob eine näherungsweise Quantifizierung von Wassermengen durchgeführt werden kann, welche durch eine geeignete Auswahl von Retentionsmulden zurückgehalten bzw. gestaut werden kann.

Zur Identifizierung von „hochwasserrelevanten Senken“ im digitalen Geländemodell wurden verschiedene Kriterien festgelegt:

- Lage der identifizierten Senken innerhalb des Gesamteinzugsgebiets zur Wochenendhaussiedlung „Martinsberg“
- Die Muldentiefe > 0.5 Meter
- Lage der Mulden in der Nähe von Fahrwegen, Maschinenwegen oder Rückegassen (um eine künstliche Erweiterung und regelmäßige Pflege (Reinigung) zu erleichtern).

Anhand dieser Kriterien konnten, mithilfe von mehreren GIS-Analysen, einige natürliche Senken im Wassereinzugsgebiet zur Wochenendhaussiedlung „Martinsberg“ ausgewählt werden. Abbildung 2 zeigt alle identifizierten Senken (Depressionen) im Testgebiet „Martinsberg“. Es werden alle Zellen dargestellt, welche von höher gelegenen Zellen umgeben sind. Theoretisch würde sich in einer solchen Zelle Wasser stauen. Insgesamt wurden im Untersuchungsgebiet 355 Senken ermittelt. Innerhalb des dargestellten Gewässereinzugsgebiets zur Wochenendhaussiedlung „Martinsberg“ befinden sich 97 Senken. Abbildung 3 zeigt alle „hochwasserrelevanten“ Senken, welche die oben genannten Kriterien erfüllen. Anhand dieser Kriterien konnten 16 natürliche Senken ausgewählt werden.

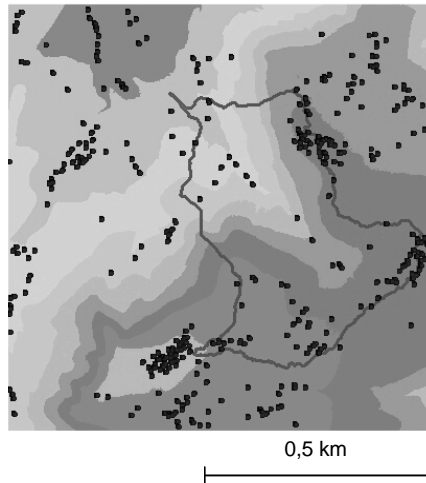


Abb. 2: Berechnete Depressionen im Testgebiet „Martinsberg“ (mit hinterlegtem DGM-Raster)

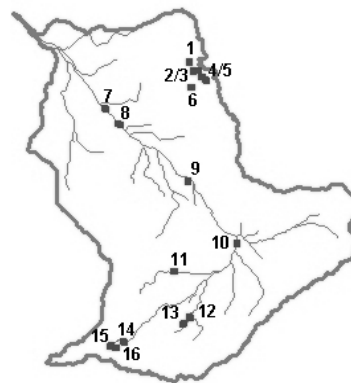


Abb. 3: Ausgewählte, natürliche Senken

Um eine Genauigkeitsvorstellung der berechneten Parameter und Senken zu erhalten, wurde eine Geländebegehung durchgeführt. Hierfür wurden die 16 „hochwasser-relevanten“ Senken mit dem GPS-Messgerät Pathfinder Pro XR im Gelände aufgesucht. Von den insgesamt 16 berechneten und ausgewählten Depressionen konnten 14 als tatsächliche Senken im Gelände bestätigt werden. Die berechneten Senken mit den Bezeichnungen Nr. 7 und Nr. 8 konnten im Gelände nicht nachgewiesen werden (siehe Abbildung 3). Depressionen sind mitunter dadurch definiert, dass sich an diesen Stellen Wasser staut bzw. der Abfluss unterbrochen ist. An sechs aufgesuchten Standorten konnten stehende Wasserflächen fotografiert werden.

5 Beurteilung der Ergebnisse

Die Untersuchungen dieser Arbeit zeigen, dass ein digitales Geländemodell aus Laserscannerdaten sehr hochwertige hydrologische Analysen ermöglicht. Vergleiche der berechneten Abflusslinien mit dem Gewässersystem der ATKIS-Daten und der digitalisierten TK25 zeigten sehr gute Übereinstimmungen. Von den insgesamt 16 ermittelten Retentionsflächen konnten 14 bei der Geländebegehung nachgewiesen werden.

Die Ermittlungen der potenziellen Stauvolumina basieren, ebenso wie die Ableitung der hydrologischen Parameter, auf einer reinen Rasteranalyse. Die Größe der einzelnen Rasterzellen hängt von der Auflösung ab, mit welcher das DGM berechnet wurde. Ein Zellraster ist eine abstrakte Wiedergabe der Realität und kann die tatsächliche Geländeoberfläche nur näherungsweise wiedergeben. Umso kleiner die Rastergröße gewählt wird, umso realitätsgetreuer wird das Gelände abgebildet. Da die flugzeuggetragene Laserscannermessung extrem hohe Messpunktdichten liefert, ist die Berechnung von sehr kleinen Rasterweiten möglich. Im vorliegenden Fall wäre eine Rasterweite von bis zu 1×1 Meter möglich. Kleine Rasterweiten bewirken jedoch lange Rechenzeiten und hohe Speicherkapazitäten – insbesondere bei sich anschließenden Analysen. Deshalb müssen hierbei, je nach Software- und Hardware-Ausstattung, Kompromisse eingegangen werden. Die Berechnung von Stauvolumina auf Basis von Rasterzellen muss als eine rein näherungsweise Bestimmung von realen Werten angesehen werden.

Abschließend lässt sich sagen, dass ein digitales Geländemodell aus Laserscannerdaten den Planungsprozess für Hochwasserschutzmaßnahmen unterstützen kann. Das Auffinden von Retentionsflächen kann erleichtert werden. Dies gilt auch für bewaldete Einzugsgebiete. Selbst sehr feine Geländestrukturen werden in einem digitalen Geländemodell aus Laserscannerdaten wiedergegeben.

Literatur

HANSA LUFTBILD (2003): Produktinformationen – Airborne Laser Scanning. Hansa Luftbild S+P GmbH, Münster.

- HOSS, H. (1997): Einsatz des Laserscanner-Verfahrens beim Aufbau des Digitalen Geländemodells (DGM) in Baden Württemberg. In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 2/1997, 131-142.
- KRAUS, K., HYNST, E., BELADA, P. & T. REITER (1997): Topographische Daten in bewaldeten Gebieten – Ein Pilotprojekt mit Laser-Sanner-Daten. In: Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 3, 174-181.
- MAIDMENT, D. R. (2002): Arc Hydro – GIS for Water Resources. ESRI Press, Redlands, CA.
- SCHLEYER, A. (2001): Das Laserscan-DGM von Baden-Württemberg. Online im Internet. <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo01/phowo01.htm> (Stand: 16.1.2005)
- WEVER, C. (1999): Laserscannermessung – Ein Verfahren setzt sich durch. In: GIS – Geoinformationssysteme, 12/1999, 12-17.