

Entwicklung eines neuen Dichtemessverfahrens unter Verwendung von Lasertechnik

FA 5.137

Forschungsstelle: Technische Universität Bergakademie
Freiberg, Institut für Bergbau und Spezial-
tiefbau (Prof. Dr.-Ing. W. Kudla)

Bearbeiter: Gaßner, W. / Szczyrba, S. /
Schönstädt, F.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und
Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: März 2007

taugliche Straßenkonstruktionen. Maßgebliches Prüfmerkmal für die Bestimmung der Verdichtung im Erdbau ist der Verdichtungsgrad, der als Quotient aus der Trockendichte im Feld und der im Labor bestimmten Proctordichte definiert ist.

Für die Bestimmung der Dichte im Feld stehen einige Standardverfahren (Ausstechzylinderverfahren, Ballonverfahren (Densitometer), Sandersatzverfahren, Flüssigkeitersatzverfahren, Gipsersatzverfahren, Isotopeneinstichsonde) zur Verfügung, die teilweise in der DIN 18125 genormt sind. Von der Bundesanstalt für Straßenwesen wurde eine Ringanalyse zur Bestimmung der Prüffehler bei den verschiedenen Dichtemessverfahren durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Ringanalyse zeigen, dass die zufälligen Messfehler bei den hauptsächlich angewandten Verfahren (Ballonverfahren, Sandersatzverfahren und auch Ausstechzylinderverfahren) relativ hoch sind. Zudem dauert die Versuchsdurchführung bei einigen Verfahren relativ lang (ca. 15–60 min) und das Prüfvolumen bei den Standardverfahren ist relativ klein. Die ausgehobene Prüfgrube hat meist

1 Aufgabenstellung

Eine ausreichende Verdichtung von Schüttmaterialien im Erdbau ist die grundlegende Voraussetzung für eine ausreichende Standsicherheit und weitgehende Setzungsfreiheit von Dämmen. Die Setzungsfreiheit von Dämmen ist wiederum Voraussetzung für langfristig qualitativ hochwertige und gebrauchts-

einen Durchmesser von 20 cm und eine Tiefe von ca. 10–20 cm. Das Sandersatzverfahren ist bei grobkörnigen Böden wenig geeignet, das Ballonverfahren ist ungeeignet bei scharfkantigen Körnern und wenig geeignet bei sehr grobkörnigem Material.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es deshalb, ein neues Verfahren zur Ermittlung des Volumens beim Dichtemessverfahren zu entwickeln, das folgende Anforderungen erfüllt:

- ausreichende Wiederholgenauigkeit,
- kurze Prüfzeit und
- großes Prüfvolumen für steinige Böden.

Das neue Verfahren zur Ermittlung eines Volumens (siehe Bild 1) basiert auf Laserscantechnik.

Es handelt sich um ein Verfahren zum genauen Ausmessen von Prüfgruben. Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wird die prinzipielle Funktionsfähigkeit des neuen Verfahrens erforscht. Die Messung der Dichte mit dem neu entwickelten Verfahren läuft wie folgt ab:

- 1) An der Stelle der vorgesehenen Prüfgrube wird die Oberfläche mittels Laser abgetastet (Nullscan) (siehe Bild 2). Vorteilhafter Weise wird die Versuchsstelle durch einen aufgelegten Aluminiumring eingegrenzt.
- 2) Eine Prüfgrube wird ausgehoben und der entnommene Boden in einen Eimer gefüllt.
- 3) Der Wassergehalt und die Masse des Bodens werden wie bisher im bodenmechanischen Labor bestimmt.
- 4) Der Laserscanner wird über die Prüfgrube gestellt. Der Laserscanner tastet danach die unebene Oberfläche der Prüfgrubenwandung in einem sehr engen Raster ab und misst dabei den Abstand zwischen der Laserquelle und der Oberfläche der Prüfgrube. Aus diesen Abstandsmessungen wird mittels eines Computerprogramms das Volumen der Prüfgrube errechnet.
- 5) Die Dichte ergibt sich aus der im Labor bestimmten Masse und dem Prüfgrubenvolumen.

Die gerätetechnische Entwicklung erfolgte von der Fa. Schnie-ring Ingenieurgesellschaft, Essen im Auftrag und nach den Vorgaben der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. Alle nachfolgend genannten Prüfform- und Prüfgrubenmessungen wurden von der TU Freiberg vorgenommen.

Vor Beginn der Arbeiten erfolgte eine Literaturrecherche zum Entwicklungsstand und den Anwendungsgebieten der Lasertechnik.

2 Systembeschreibung des neu entwickelten Laserscanners

Herzstück des neuen Dichtemessverfahrens ist der Scanner zur Aufmessung des Prüfgrubenvolumens. Bei dem hier beschriebenen Gruben-Volumen-Scanner handelt es sich um einen voll funktionsfähigen Prototypen.

Die Scanneinheit besteht aus dem Trägergestell, das den Scankopf über der zu messenden Grube positioniert. Mittels des Trägergestells kann die Höhe des Scankopfes über der Grube eingestellt werden. Die Höheneinstellung des Kopfes dient zur Anpassung des maximalen Messbereichs an die Grubentiefe.

Zu Beginn ist ein Oberflächenscan (Nullscan), der die Oberfläche der Prüfgrube vor dem Aushub der Grube abtastet (siehe Bild 2), durchzuführen. Danach folgt der Grubenscan, der die Oberfläche nach dem Aushub abtastet. Die maximale Größe

der Grube wird maßgeblich durch den Messbereich des Laserdistanzsensors bestimmt. Derzeit können Gruben bis zu einem Durchmesser von etwa 42 cm und einer Tiefe von 26 cm abgetastet werden. Die Abtastung von Prüfgruben mit 60 cm Durchmesser und 30 cm Tiefe ist ebenfalls möglich, allerdings misst der Laser dann nicht mehr in seinem optimalen Bereich. Dies kann dazu führen, dass die Anzahl der "ungültigen Punkte" stark erhöht ist. Die ungültigen Punkte werden vom Programm angezeigt.

Der Scankopf besteht aus einem elektromotorischen Antrieb, der den Laserdistanzsensor horizontal und vertikal bewegen kann. Mithilfe des Antriebs kann die Grube in Form einer Spirale abgetastet werden. Bei der Abtastung wird der Abstand von der Grubenoberfläche zum Lasersensor gemessen. Die jeweilige Position des Laserdistanzsensors wird mit zwei Winkelsensoren erfasst. Je ein Winkelsensor ermittelt die horizontale bzw. die vertikale Position des Lasersensors. Zur Scanneinheit gehört eine Steuereinheit (siehe Bild 1). Die Steuereinheit übernimmt die Ansteuerung der Antriebsmotoren, das Auslesen der Messwerte sowie die Aufnahme der Winkelstellungen. An die Steuereinheit kann ein Messrechner, der über eine USB oder serielle Schnittstelle verfügt, angeschlossen werden. Die aufgemessene Prüfgrube kann am Laptop durch das integrierte 2,5D-Tool dargestellt werden (siehe Bild 3).

Bei dem entwickelten Gerät handelt es sich um einen Prototypen. Für ein serienreifes Gerät müssen noch einige Anpassungen erfolgen. Derzeit werden je nach Prüfgrubengröße etwa 12–18 Minuten für einen Scannvorgang benötigt. Für einen praxiserfahrenen Einsatz sollte die Messzeit weniger als 5 Minuten betragen.

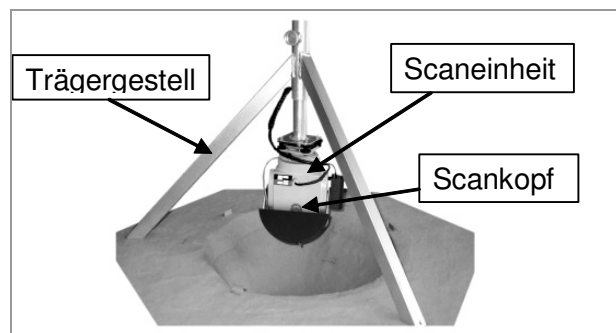


Bild 1: Prototyp des Gruben-Volumen-Scanners mit Steuereinheit und Laptop

3 Prüfformen

Zur Einschätzung der Messgenauigkeit aller Volumenermittlungsverfahren war es notwendig, Hohlräume zur Verfügung zu haben, deren Eigenschaften und vor allem deren genaues Volumen bekannt sind. Dazu wurden insgesamt zehn künstliche Prüffrüben (Prüfformen) aus Kunststoffbehältern, Montageschaum, Sand, Kies und Lack hergestellt. In Bild 1 steht der Laserscanner über einer solchen künstlichen Prüfform. Die Prüffrüben unterscheiden sich hinsichtlich der Rauigkeit der Oberfläche im Mikro- und im Makromaßstab und hinsichtlich der Größe der Prüffrüben.

Bei den Prüffrüben wurde durch Auslitern das Volumen exakt bestimmt. Dazu musste vorab die Oberfläche der Prüffrüben mit einem Lack versiegelt werden, damit das Wasser nicht in den Schaum der Prüffrübenwandung eindringt, in die die einzelnen Kies- und Sandkörner gesteckt wurden. Das Volumen der Prüffrüben lag zwischen $2\,300\text{ cm}^3$ und $26\,300\text{ cm}^3$.

4 Erste Messungen mit dem Laserscanner zur Einschätzung der Wiederholgenauigkeit

Im Laufe der Forschungsarbeit wurden 299 Messungen mit dem Laserscanner vorgenommen. Allerdings wurden bis zum Index 177 immer wieder Änderungen an der Messtechnik vorgenommen, sodass die Messergebnisse hier kaum vergleichbar sind. Erst ab Index 177 ist eine Vergleichbarkeit der Messungen gegeben.

Zur Einschätzung der Wiederholgenauigkeit der Messungen wurden zuerst Laserscans nacheinander auf ein und derselben Oberfläche durchgeführt. Danach wurde das Volumen von Prüffrüben mit dem Laser ausgemessen, wobei für den Nullscan die Prüffrüben mit einem Deckel verschlossen wurden. Bei vielen Messungen wurde für Parameterstudien die Aufstellung des Lasers variiert (Verdrehung des Grundgestells, Heben und Absenken des Laserkopfes, Unterlegen von Distanzstücken unter das Gestell und fallweise Verwendung von Passmarken).

5 Vergleichsmessungen des Lasermessverfahrens mit klassischen Dichtemessverfahren

Nachdem der Prototyp bis zu einem befriedigenden technischen Stand entwickelt war, erfolgten ab dem Index 177 (siehe Kapitel 4) 5 Versuchsreihen (3 im Feld und 2 an Prüffrüben) im Sand und Kies, bei denen die Ergebnisse des Lasermessverfahrens den Ergebnissen von klassischen Dichtemessverfahren (Densitometer, Sandersatzverfahren, Wasserersatzverfahren und teilweise Gipsersatzverfahren) gegenübergestellt wurden. Die Versuchsreihen bestanden jeweils aus mehreren Messreihen, bei denen mit demselben Dichtemessverfahren meist 3- bis 5-mal hintereinander die Prüffrübe ausgemessen wurde. Aus den Ergebnissen wurden die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Messreihen berechnet. In Bild 4 sind die Standardabweichungen (=Wiederholstandardabweichungen) der Messreihen mit dem Laserverfahren und der Messreihen mit dem Densitometer in Abhängigkeit vom Prüffrübenvolumen gegenübergestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Wiederholstandardabweichung des Laserverfahrens im Mittel bei 4 cm^3 und die Wiederholstandardabweichung des Densitometers im Mittel bei 10 cm^3 liegen. Die Wiederholstandardabweichung beim Sandersatzverfahren lag im Mittel bei 6 cm^3 und beim Wasserersatzverfahren bei 10 cm^3 . Das Laserverfahren hat damit die höchste Wiederholgenauigkeit bei der Volumenermittlung der Prüffrübe.

Bei den 5 Versuchsreihen zeigte das Laserverfahren gegenüber den klassischen Dichtemessverfahren systematisch ein zu

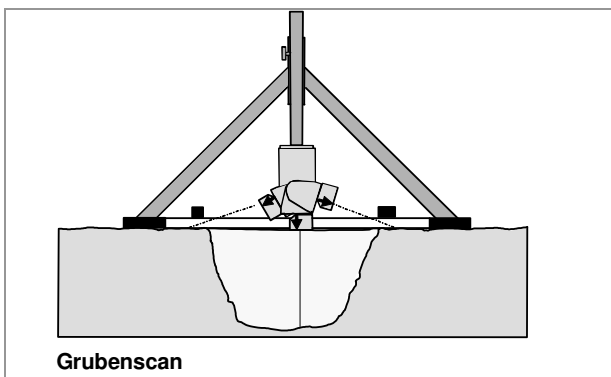
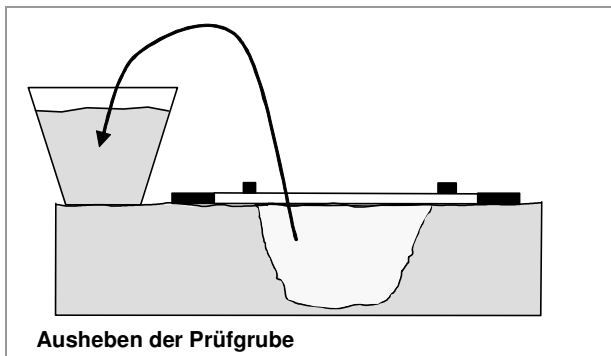
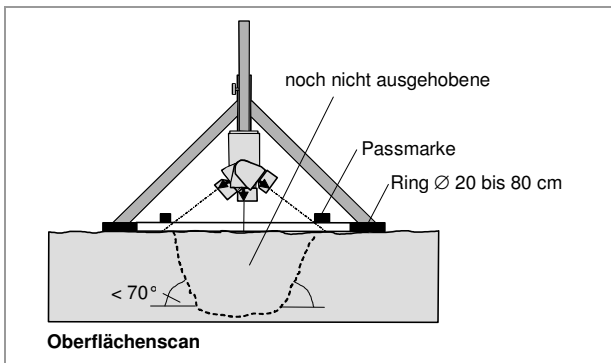


Bild 2: Oberflächenscan/Ausheben der Prüffrübe/Grubenscan

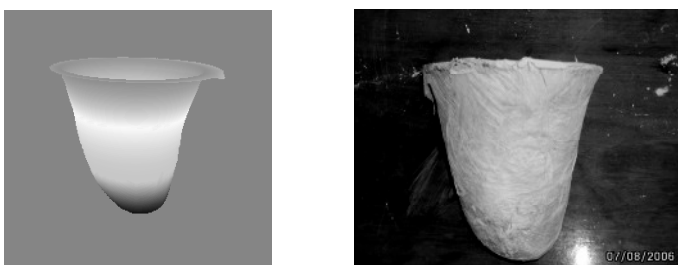


Bild 3: Darstellung der Prüffrübe und realer Gipskörper einer Prüffrübe

großes Volumen an. Nach Beendigung aller 5 Messreihen wurde der Laserscanner über die Software so eingestellt, dass der Laser zukünftig ein um 3 % geringeres Volumen als bei den Messreihen anzeigt. Unter Berücksichtigung dieser Umstellung und Rückübertragung auf die Ergebnisse der 5 Versuchsreihen weichen die Mittelwerte der Messreihen bei den einzelnen Dichtemessverfahren um meist weniger als 1 % voneinander ab (siehe Bild 5). Damit weist das Laserverfahren auch keinen systematischen Fehler auf.

Weitere Versuche fanden bei trockener und feuchter Oberfläche der Prüfgruben statt. Dabei zeigte sich, dass das vom Laser berechnete Volumen durch eine feuchte oder auch nasse Prüfgrubenoberfläche praktisch nicht beeinflusst wird.

6 Folgerungen für die Praxis

Es sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, um den Einfluss anderer Parameter wie z. B. Staub und schräg einfallendem Sonnenlicht systematisch zu untersuchen. Zudem müssen weitere Messungen bei noch größeren Prüfgruben erfolgen.

Der Prototyp muss für ein serienreifes Gerät noch weiter verbessert werden, z. B. durch ein zusammenlegbares Gestell, eine Erhöhung der Scangeschwindigkeit auf weniger als 5 Minuten und eine Stromversorgung über Batterie.

Das Lasermessverfahren hat gegenüber den bisherigen Standardmessverfahren einige Vorteile. Beispielsweise kann die Prüfgrube am Rechner 2,5-dimensional graphisch dargestellt werden. Die Datengenerierung und die Protokollerstellung erfolgen weitgehend automatisch, sodass keine Falscheingaben möglich sind.

Die Tauglichkeit des Messprinzips (Laserstrahlabtastung der Prüfgrubenwandung mit anschließender Volumenberechnung) konnte zur Volumenmessung von Prüfgruben bei Dichtemessungen im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie nachgewiesen werden.

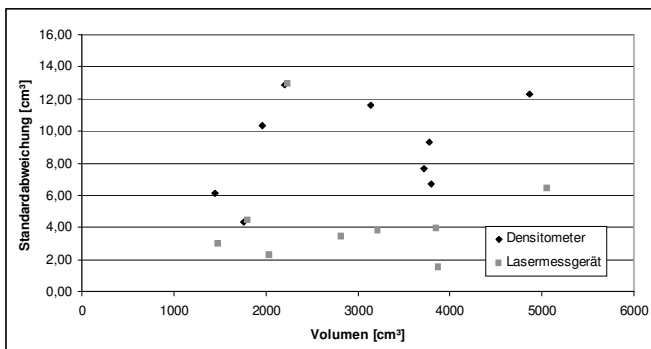


Bild 4: Standardabweichung der Messreihen mit dem Laserverfahren und der Messreihen mit dem Densitometer beim jeweiligen mittleren Prüfgrubenvolumen

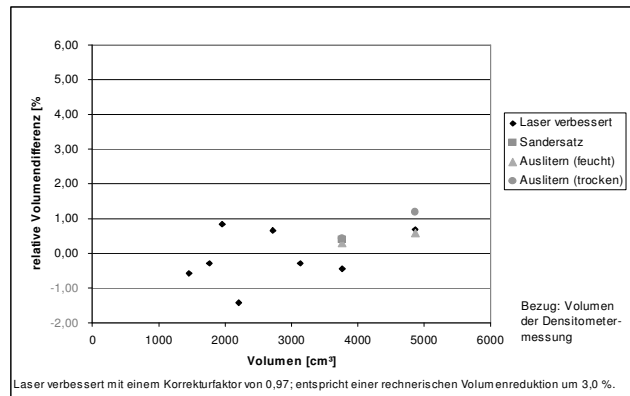


Bild 5: Relative Volumendifferenz zwischen dem Mittelwert der Densitometermessreihe und dem Mittelwert der Lasermessreihe bezogen auf den Mittelwert der Densitometermessreihe und dargestellt in Abhängigkeit vom Prüfgrubenvolumen (ermittelt mit dem Densitometer) nach Softwareänderung