

# **ERMITTLUNG DER BODENEROSION MITTELS LASERSCANNING**

**Roland Weißmann**

## **1. BODENEROSION**

### **1.1 Allgemeines**

In weiten Teilen der Erde wird Jahr für Jahr durch Starkregenereignisse und die häufig damit verbundenen Überschwemmungen Boden erodiert. Allein in den USA sind nach offiziellen Berichten über 1 Million Quadratkilometer, die dreifache Fläche Deutschlands, durch Bodenerosion stark geschädigt (RICHTER, 1998). Dabei belaufen sich die jährlichen Schäden durch Bodenerosion in der USA auf rd. 44 Milliarden Dollar (PIMENTEL, 1995). Beide Zahlen belegen die Dringlichkeit, sich mit den Ursachen und Folgen sowie mit den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten der Eindämmung der Bodenerosion zu beschäftigen. Häufige Vorstufe der Bodenerosion ist die Zerstörung der dichten und damit schützenden natürlichen Vegetationsdecke infolge von Naturholzentnahme, Holzkohlegewinnung oder Beweidung. Der so freigelegte Boden kann austrocknen und besitzt dann eine geringere Widerstandsfähigkeit gegenüber dem überströmenden Wasser. Zum Lösen des Bodens muß die Scherfestigkeit des Bodens von der durch das überströmende Wasser verursachten Schubspannung in der Berührungsfläche überwunden werden. Besitzt nun das überströmende Wasser eine genügend große Transportkapazität, kommt es zu einer Bodenverlagerung. Dieser vom Wasser aufgenommene Boden wird bei Unterschreiten der Transportkapazität an anderer Stelle wieder abgelagert. Beides, die Bodenerosion wie die Ablagerung des Bodens, führt zu weiteren Problemen.

### **1.2 Einteilung der Erosion nach dem Erscheinungsbild**

Grundsätzlich läßt sich die Erosion aufgrund ihrer Ausprägung in Rillenerosion und in Flächenerosion unterscheiden. Dabei wird die Art der Ausprägung sowohl von der Art der Belastung als auch von der Widerstandsfähigkeit und Oberflächenbeschaffenheit des überstömten Bodens bestimmt. Ungünstigerweise beeinflussen sich die Art des Oberflächenabflusses und die Oberflächenbeschaffenheit während des Erosi-

onsprozesses durch den Abtrag, so daß eine zuverlässige Prognose über den Verlauf selbst bei vorgegebenem Wasserangebot nur schwerlich getroffen werden kann.

### 1.3 Bisherige Meßmethoden

Um quantitative Aussagen über das Erosionsverhalten bestimmter Böden treffen zu können, stehen bisher die folgenden Methoden zur Verfügung, die sich in ihrer Meßgenauigkeit sowie in ihren bevorzugten Einsatzmöglichkeiten unterscheiden. Zunächst lassen sich die Einsatzgebiete der quantitativen Bodenerosionsmessung in

- flächenhafte Gebietsmessungen
- quasiflächenhafte Feldmessungen und
- punktuelle Messungen

aufgliedern.

#### 1.3.1 Flächenhafte Gebietsmessung

Bei der *flächenhaften Gebietsmessung* sollen Abtragumlagerungen und –verluste für ein größeres Gebiet bestimmt werden. Dafür stehen *die komplexe Schadenskartierung* sowie die *Messung des Gebietsabflusses* zur Verfügung und ermöglichen eine flächendeckende Aussage bezüglich Erosion und Akkumulation, also Abtrag und Ablagerung. Ziele der komplexen Schadenskartierung sind die Bilanzierung der tatsächlichen Bodenverluste bzw. –gewinne, die Erlangung eines flächenhaften regionalen Überblicks über die Art und räumliche Verteilung der Bodenerosionsschäden und bei wiederholter Kartierung auch die Bestimmung möglicher Schwerpunktgebiete der Bodenerosion. Mit der Messung des Gebietsabflusses und des Gesamtaustrags wird ebenfalls eine Aussage bezüglich der Erosion des gesamten Gebiets ermöglicht. Eine Differenzierung der einzelnen Abtragsprozesse innerhalb dieses Gebietes ist dabei jedoch nicht möglich.

#### 1.3.2 Quasiflächenhafte Feldmessung

Die *quasiflächenhafte Feldmessung* berücksichtigt Bezugsflächen zwischen 50 m<sup>2</sup> und 150 m<sup>2</sup>, die ihrerseits ein ganzes Feld repräsentieren. Zur Messung stehen *Feldstation* und *Feldkasten*, die das erodierte Material auffangen sollen, sowie *Erosionsmeßstäbe*, mit deren Hilfe die Distanz zwischen dem Stabende und der Bodenoberfläche gemessen wird, zur Verfügung. Alle drei Feldmessungen haben den Vorteil, daß sie unter ackerbaulichen Bedingungen eingesetzt werden können.

### 1.3.3 Punktuelle Messungen

Zur Erfassung von Grundlagendaten wie dem Zusammenspiel einzelner, den Erosionsprozeß beeinflussender Parameter werden *punktuelle Messungen* an kleinen Testflächen bzw. Parzellen von 1 m<sup>2</sup> bis zu 50 m<sup>2</sup> durchgeführt. An diesen Testflächen können unter vorgegebenen Randbedingungen Teilbereiche des Bodenerosionsvorgangs erforscht werden. In diesen Testfeldern werden sowohl die Belastung durch das überstömende Wasser wie auch der Bodenabtrag durch Auffangen in Sammelbehältern und anschließendes Abfiltrieren gemessen. Ebenso können Bodenfeuchte und –temperatur sowie Saugspannungen in unterschiedlichen Tiefen gemessen werden. Durch die Variation von Einbauprozedur, Einbauwassergehalt, Bodenzusammensetzung sowie Veränderung der Überlaufwassermenge und der Hangneigung können quantitative Aussagen zu dem Einfluß des jeweiligen Parameters auf den Erosionsprozeß getroffen werden. Idealerweise finden solche Versuche unter Laborbedingungen statt, bei denen man die Belastungsrandbedingungen relativ genau steuern kann. Bei geringen Wassermengen läßt sich das Erosionsvolumen mit der oben geschilderten Vorgehensweise ermitteln. Jedoch ist auch dann das Abfiltrieren des erodierten Bodens eine aufwendige Angelegenheit, die zudem bei sehr feinkörnigen Böden entsprechend viel Zeit in Anspruch nimmt. Bei hohen Wassermengen versagt die angesprochene Methode, da die Auffangbehälter innerhalb Minutenfrist bereits gefüllt sind.

## 2. LASERSCANNING

### 2.1 Allgemeines

Eine neue Meßmethode, das Laserscanning, ist erst seit kurzem verfügbar. Es ermöglicht die quantitative Erfassung der Erosion auf größeren Flächen auch bei großen Wassermengen. Das Laserscanning ermöglicht die berührungslose Messung der Bodenoberfläche und über den Vergleich der Messungen zu verschiedenen Zeiten eine Aussage über die Veränderung der Erosion bzw. die Bestimmung der zu einem bestimmten Oberflächenabfluß gehörenden Erosionsrate. Gerade im Nahbereich bis zu 10 m Entfernung liefert die Messung im Raster von rd. 1 cm x 1 cm ein sehr genaues Abbild der jeweiligen Oberfläche. Dabei kann jeder Meßpunkt als Mittelwert aus z. B. 100 Einzelmessungen bestimmt werden. Da der eingesetzte Laserscanner der Firma Callidus<sup>®</sup> Precision Systems mit diffusem Laserlicht betrieben wird, besteht auch bei unmittelbarer Sicht in den Meßstrahl ab 1,0 m Abstand keine Gefahr für das Augenlicht. Mit Hilfe dieser Meßmethode ist es auch möglich, die zeitliche Entwicklung von Erosionsnestern quantitativ zu verfolgen und damit erstmalig auch lokale Erosionsprozesse berührungsfrei untersuchen zu können.

## 2.2 Meßprinzip

Der Laserscanner arbeitet nach dem Prinzip der *Pulslaufzeitmessung*. Ein extrem kurzer Lichtimpuls wird vom Scanner ausgesendet, trifft auf ein Hindernis, wird von diesem reflektiert und ein Teil vom Scanner wieder empfangen. Die aus der Zeitdifferenz errechnete Laufzeit verhält sich proportional zur Entfernung zwischen Scanner und Hindernis.

## 2.3 Meßgenauigkeit

Grundsätzlich kann der Laserscanner während des Meßvorgangs im Meßkopf um  $360^\circ$  (Schrittweite  $0.0625^\circ$ ,  $0.125^\circ$ ,  $0.25^\circ$ ,  $0.5^\circ$ ,  $1.0^\circ$ ) in der Horizontalen gedreht werden. Mittels eines rotierenden Drehspiegels wird der Laserstrahl fächerförmig aufgespreizt und überstreicht einen Bereich von  $180^\circ$  in der Vertikalen, wobei Auflösungen von  $0.25^\circ$ ,  $0.5^\circ$  oder  $1.0^\circ$  eingestellt werden können. Je nach Einstellung des Laserscanners und Entfernung der zu vermessenden Oberfläche variieren die Abstände zwischen den einzelnen Meßpunkten. So kann im Nahbereich ein tangentialer Rasterabstand von wenigen Millimetern realisiert werden, der bei Anwachsen der Entfernung zum Meßobjekt bis auf rd. 10 cm zunimmt. Aufgrund der geringeren vertikalen Auflösung variiert der radiale Rasterabstand je nach Neigung der einzumessenden Fläche und ihrer Entfernung zum Laserscanner von rd. 1 cm bis rd. 10 cm. Die Genauigkeit der Entfernungsmessung liegt üblicherweise bei  $\pm 0.1$  mm. Da der Laserstrahl diffus ist, unterliegt er einer Strahlaufweitung. Die Messung ergibt sich so aus der durchschnittlichen Entfernung aller in diesem diffusen Lichtkegel befindlichen Flächen. Die Häufigkeit der zu einem Meßwert gehörenden Einzelmessungen kann zwischen 1 und 200 eingestellt werden. Aus all diesen Messungen wird dann ein Punkt der Oberfläche ermittelt und in 3D-Koordinaten abgespeichert. Ausreichende Mittelung wird bereits bei 25 Messungen je Punkt erreicht. In Abhängigkeit von Winkelauflösung und Zuschaltung der eingebauten CCD-Kamera erhält man in vergleichsweise kurzer Zeit das komplette Aufmaß des Raums inklusive Bildmaterial.

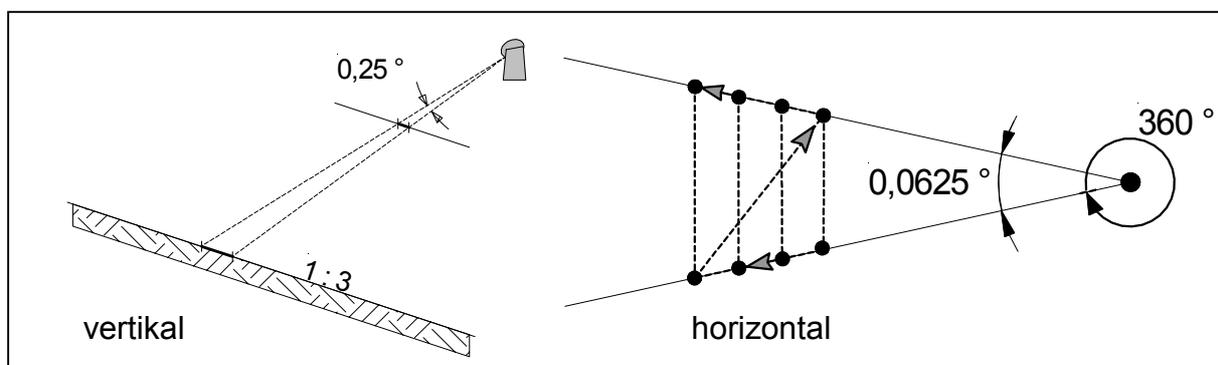


Abbildung 1: Höchste Winkelauflösung des Laserscanners

### 3. EROSIONSVERSUCHE

#### 3.1 Allgemeines

Im folgenden werden einige am Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Essen, durchgeführte Erosionsversuche vorgestellt, in denen die Erosionsraten verschiedener Kleiböden mit Hilfe des Laserscannings bestimmt wurden. Diese Untersuchung wurde im Rahmen eines durch das BMBF geförderten Forschungsvorhabens zur Belastung von Seedeichbinnenböschungen infolge von Wellenüberlauf unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. W. Richwien durchgeführt. Ziel der im großen Wellenkanal (GWK) des Franzius-Instituts in Hannover durchgeführten großmaßstäblichen Versuche ist die Bestimmung der Wechselwirkungen zwischen dem Wellenüberlauf bei Deichen und der bodenmechanischen Reaktion des als Abdeckschicht eingebauten Kleibodens (RICHWIEN / WEISSMANN, 2001).

#### 3.2 Versuchsböden

Die hier vorgestellten Versuche wurden als Vorversuche mit den insgesamt drei für den Einsatz im GWK vorgesehenen Kleiböden, davon zwei aus Elisabethgroden (Entnahmestellen bei Deichkilometer (Dkm) 9,0 und Dkm 3,5) und einer aus Cäcilienroden, im Labor in Essen durchgeführt.

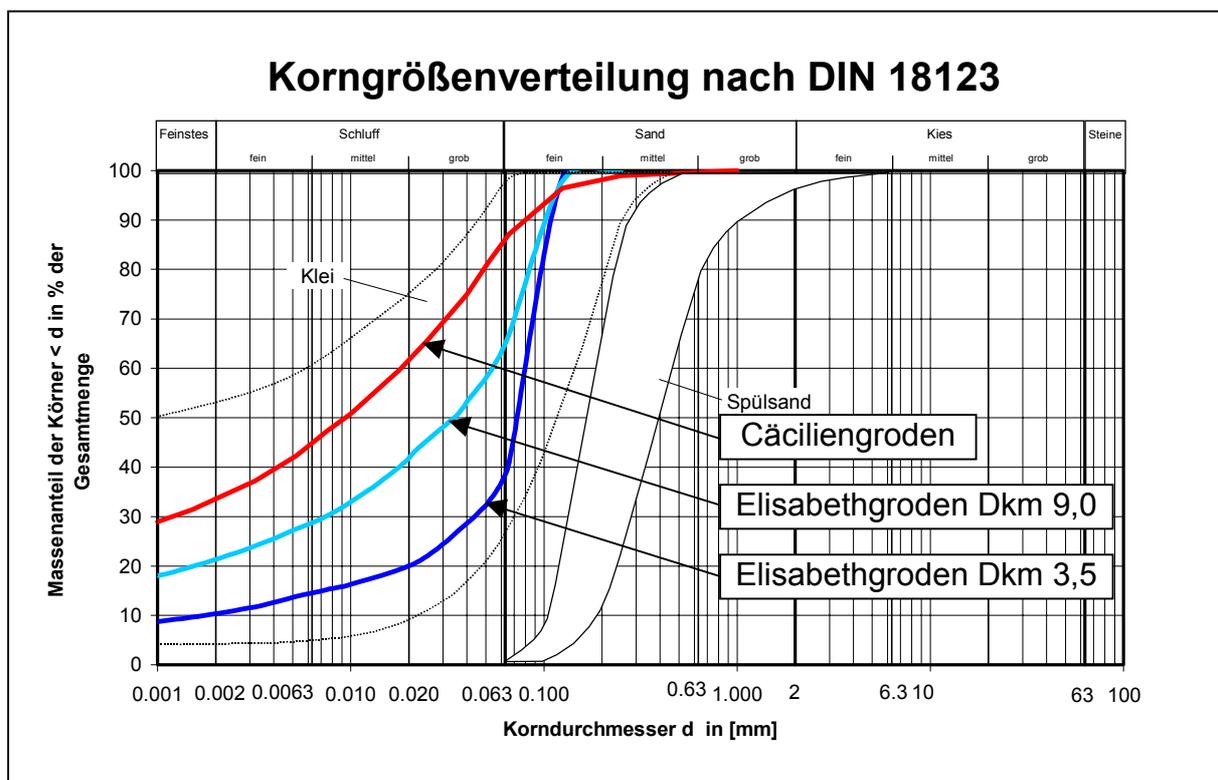


Abbildung 2: Korngrößenverteilung der Versuchsböden

Ein gut als Abdeckboden tauglicher Klei besitzt wie der Boden aus Cäciliengroden einen Tonanteil von rd. 30 % und einen Sandanteil von weniger als 40 %. Mit der Erhöhung des Sandanteils nimmt auch die Erosibilität zu. Wie Abb. 2. entnommen werden kann, besitzt der Boden aus Elisabethgroden Dkm 9,0 rd. 20 % Ton und der Klei aus Elisabethgroden Dkm 3,5 einen Anteil von rd. 10 % Ton. Damit läßt der Versuchsboden 3 aus Elisabethgroden Dkm 3,5 aufgrund der Korngrößenverteilung die höchste Erosionsrate erwarten.

Der gestrichelt umrandete Bereich in Abb. 2 begrenzt den Bereich der an der deutschen Nordseeküste eingesetzten Kleiböden und belegt zugleich deren Vielfalt. Die rechte Fläche kennzeichnet die Kornverteilungen der in den Deichkernen eingesetzten Spülsande (RICHWIEN / WEISSMANN, 2000).

### 3.3 Versuchsaufbau

In Abb. 3 ist der Versuchsaufbau dargestellt, mit dem die Erosionsversuche durchgeführt wurden. Ebenso ist auch der Standort des Laserscanners eingezeichnet. Der Boden wurde in dem Erosionskasten in einer Stärke von 50 cm eingebaut und besaß damit nahezu die Minimalstärke an der Nordseeküste üblicher binnenseitiger Deichabdeckschichten aus Klei. Die Überlaufwassermenge kann bei diesem Versuchstand auf maximal 21 Liter pro Sekunde eingestellt werden. Eine Variation der Überstauhöhe in Form von Wellen war bei diesen Versuchen nicht vorgesehen, da

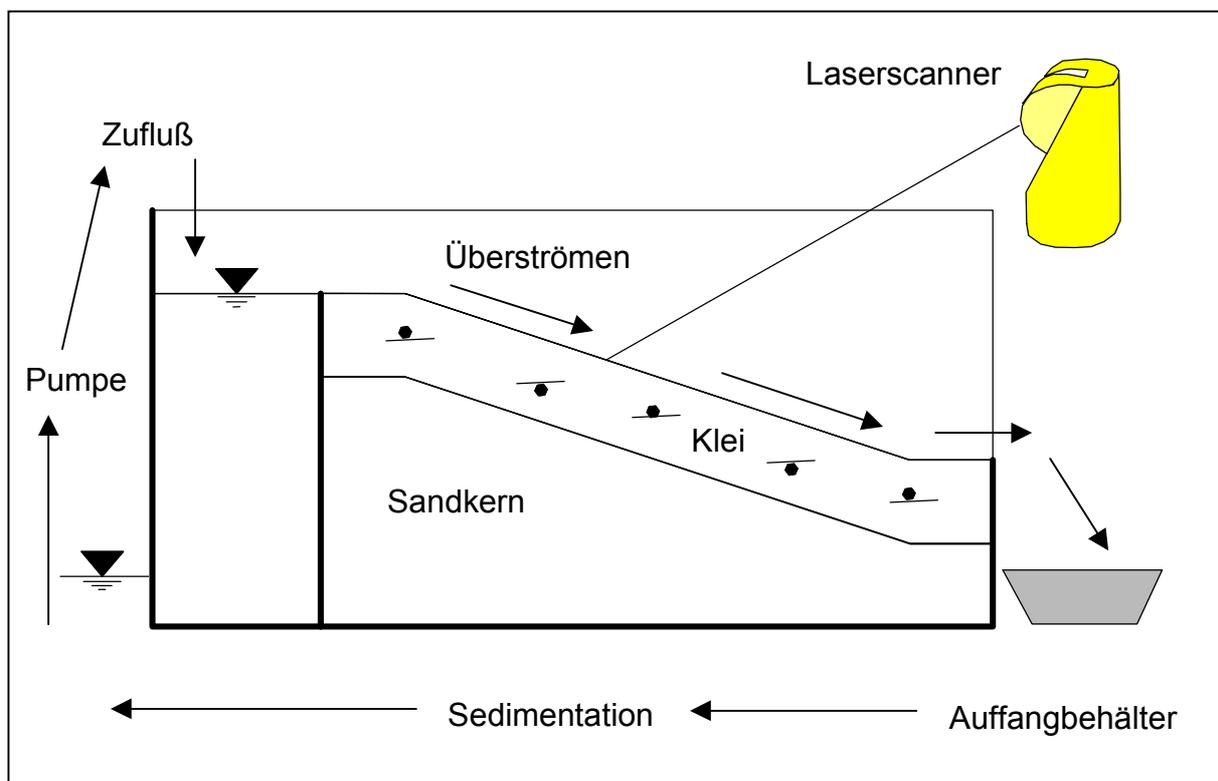


Abbildung 3: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Erosion

der stationäre Abfluß im Vergleich zu gleich hohen Wellen die größere Belastung darstellt. Das Wasser wird bei den Versuchen durch drei Pumpen im Kreislauf geführt. Damit der bereits erodierte Boden die Versuche nicht beeinflusst, nehmen zwei am Fuß des Erosionskastens befindliche Kübel den überwiegenden Teil des Bodens auf. Feine Bestandteile bleiben zunächst im Wasser, können sich unterhalb des Erosionskastens aber durch die dort langsamen Strömungsgeschwindigkeiten absetzen. Der Laserscanner wurde bei den Versuchen vor Kopf des Erosionskastens aufgestellt, um die Oberfläche voll erfassen zu können. Bei diesen Versuchen wurde der Scannkopf waagrecht aufgestellt und auf den linken Rand des Erosionskastens ausgerichtet. Um die beste Auflösung zu erzielen, wurden die kleinstmöglichen Winkeländerungen für den Scannvorgang eingestellt.

### **3.4 Versuchsdurchführung**

Zur Versuchsdurchführung wurde der jeweilige Boden in den Erosionskasten eingebaut, profiliert und planmäßig mit einem Stampfer von Hand verdichtet. Das Verdichtungsergebnis wurde anhand von Stechzylinderproben ermittelt. Nachdem die Entnahmestellen wieder verfüllt und verdichtet waren, wurde der erste Oberflächenscann durchgeführt. Er bildet den Ausgangszustand ab. Anschließend wurden die Pumpen eingeschaltet und somit der Überlauf gestartet. In Abb. 4 bis Abb. 6 ist beispielhaft die durch das überlaufende Wasser hervorgerufene Oberflächenerosion während eines Versuches, hier mit dem Boden aus Elisabethgroden Dkm 3,5, dargestellt. Dieser Boden neigt aufgrund seines geringen Tongehaltes zu starker Erosion. Schon nach wenigen Sekunden bildet sich an der linken Seite der Böschung eine bevorzugte Strömungsrinne aus, die bereits nach kurzer Zeit nahezu das gesamte überlaufende Wasser führt. Aufgrund der höheren Beanspruchung gräbt sich in der Folge dieser Kanal immer tiefer in die Abdeckschicht und weitert sich auf. Die restliche Oberfläche wird durch die geringer werdende Überströmung auch weniger belastet und bleibt deshalb über die gesamte Versuchszeit größtenteils erhalten.



a) Oberfläche vor Versuchsbeginn



b) Beginn des Überströmens



c) Ausweitung der überströmten Fläche



d) rd. 45 sec nach Beginn des Versuches



e) rd. 60 sec nach Beginn des Versuches



f) rd. 90 sec nach Beginn des Versuches

Abbildung 4: Erosionsversuch mit Boden aus Elisabethgraden Dkm 3,5



a) rd. 2 min. nach Beginn des Versuches



b) 3 min. nach Beginn des Versuches



c) rd. 4 min nach Beginn des Versuches



d) rd. 5 min nach Beginn des Versuches



e) 10 min nach Beginn des Versuches



f) 15 min nach Beginn des Versuches

Abbildung 5: Erosionsversuch mit Boden aus Elisabethgroden Dkm 3,5 - Teil 2

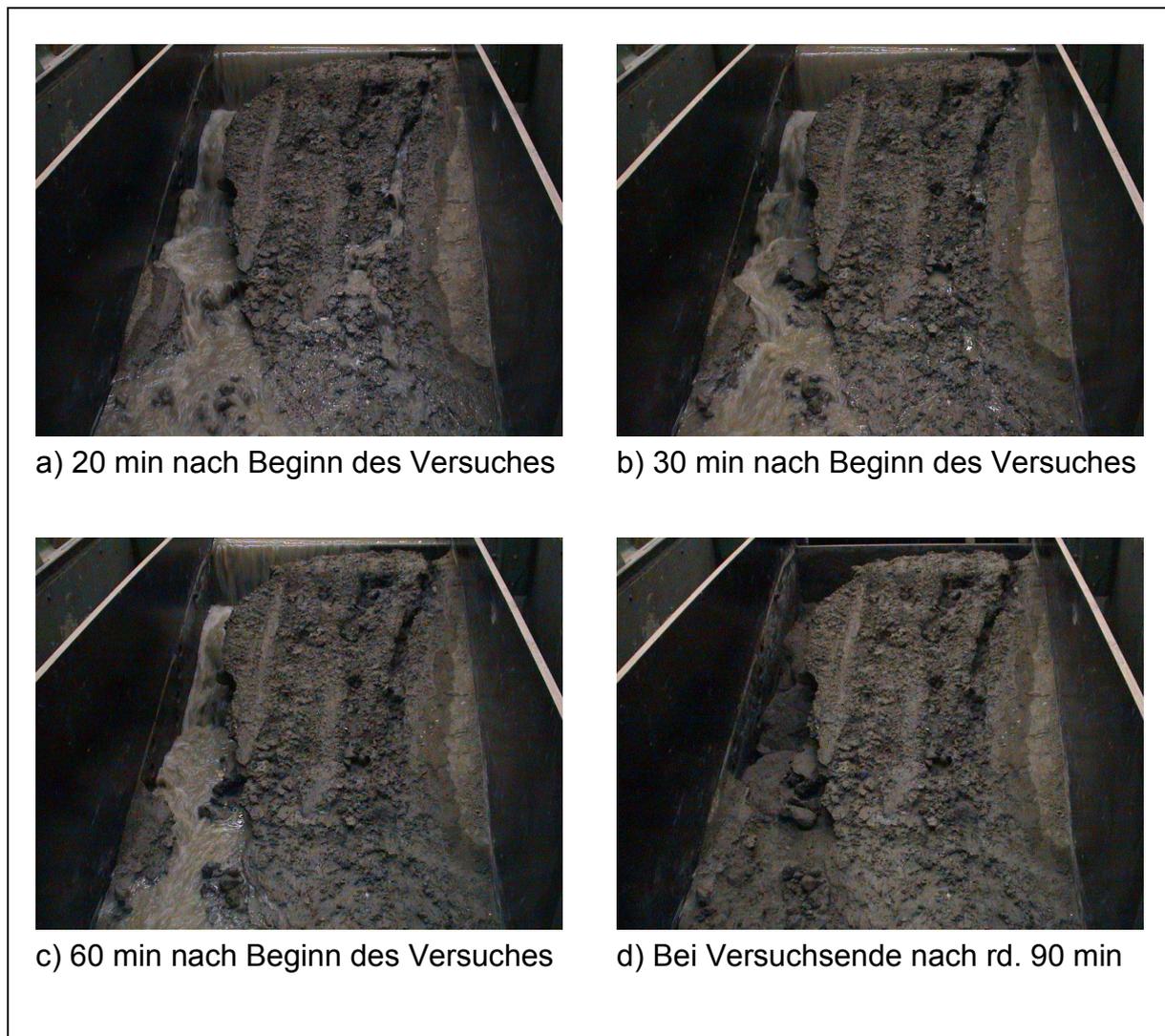


Abbildung 6: Erosionsversuch mit Boden aus Elisabethgroden Dkm 3,5 – Teil 3

### 3.5 Ergebnisse des Laserscannings

Als Ergebnis des Laserscannens erhält man eine Datei, in der die 3D-Koordinaten der einzelnen Punkte enthalten sind. Ursprung des Koordinatensystems ist der Scannmittelpunkt. Diese 3D-Koordinaten können visualisiert und anschließend bearbeitet werden. In Abb. 7 sind zwei Messungen des Versuches mit dem Boden aus Elisabethgroden Dkm 3,5 wiedergegeben. Der erste Scann gibt den Ausgangszustand wieder, der zweite den Endzustand. Anhand der Scans ist die starke Erosion auf der linken Seite der Böschung sehr gut zu erkennen. Ein Teil der rechten Hälfte der Böschung ist in dieser Darstellung durch die Seitenwand des Erosionskastens verdeckt. Ebenfalls deutlich zu erkennen ist die hohe Punktdichte bei diesen Nahbe-

reichsscans. Je nach Winkeländerung beim Scannen erhält man 8000 bis rd. 16000 Punkte bzw. 3D-Koordinaten.

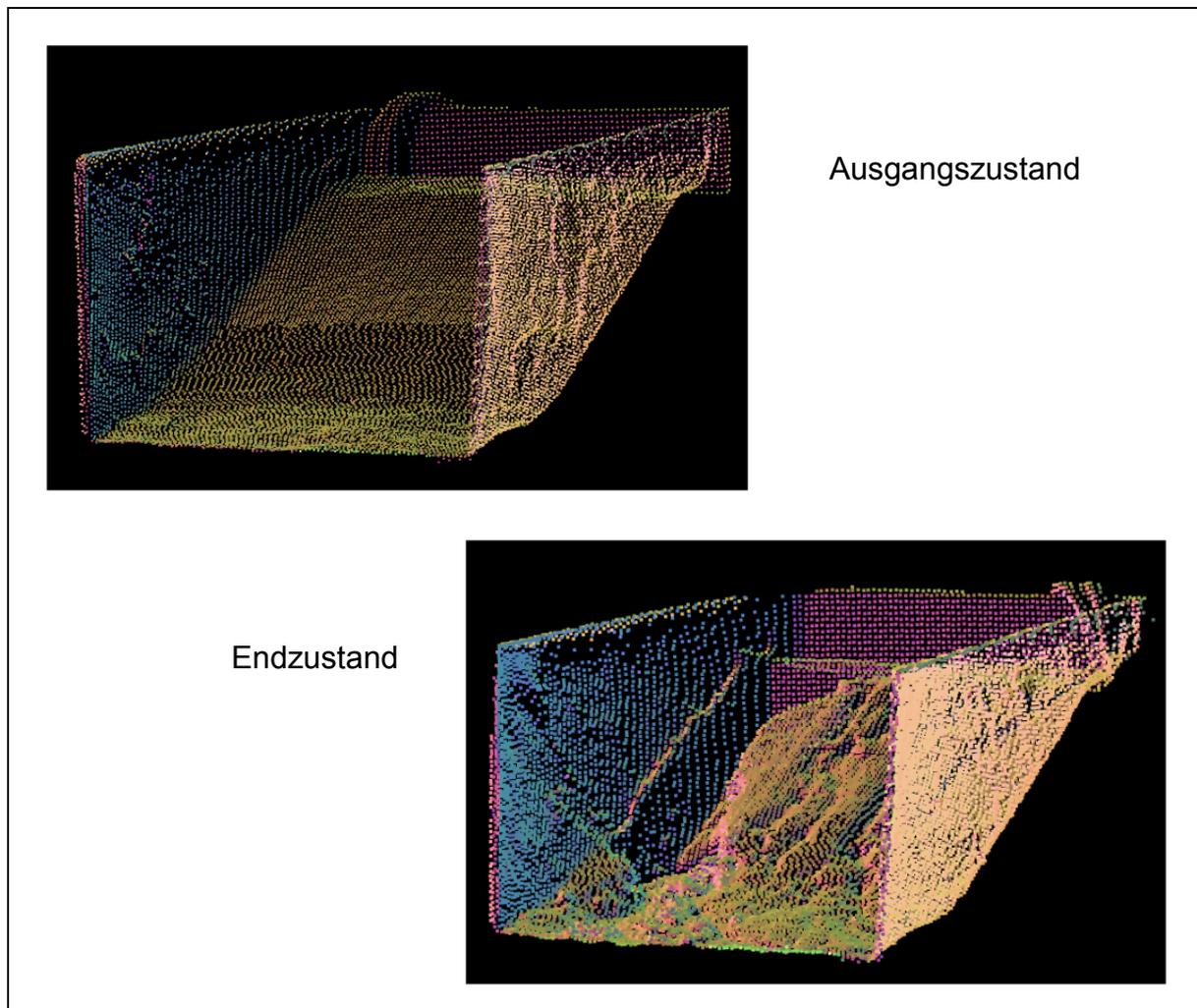


Abbildung 7: Punktoberfläche als Ergebnis des Laserscannings

### 3.6 Auswertung der Messungen

#### 3.6.1 Prinzipielles Vorgehen bei der Auswertung

Zur Auswertung der Messung werden zunächst alle Punkte, die nicht zu der zu vermessenden Oberfläche gehören, in der Bearbeitungssoftware „3D-Extraktor“ der Firma Callidus<sup>®</sup> Precision Systems entfernt. Anschließend werden parallel zu den Randpunkten senkrechte virtuelle Wände gesetzt, die die Oberfläche innerhalb des Meßfeldes schneiden. Damit befinden sich Punkte der Oberfläche auf beiden Seiten der virtuellen Wände. Nun werden die Meßpunkte zu Dreiecksflächen miteinander vermascht und die Schnittlinie mit den senkrechten Wänden ermittelt. In dem horizontalen Bezugsniveau oberhalb der Oberfläche wird eine weitere Wand eingerich-

tet, die das Volumen  $V_1$  abschließt. Nach der Umwandlung in reelle Wände kann das eingeschlossene Volumen ausgegeben werden. Diese Prozedur wird für jeden gemessenen Zustand des Erosionsversuches durchgeführt. Man erhält so weitere Volumina  $V_2, V_3 \dots$  bis  $V_n$ . Durch Differenzenbildung erhält man das erodierte Volumen  $V_E$  zwischen zwei Versuchszuständen bzw. bei

$$V_n - V_1 = V_{E(\text{gesamt})} \quad (\text{Gl. 1})$$

zwischen Anfang und Ende des Versuches. Die Erosionsrate  $E$  ergibt sich aus dem Quotienten des Erosionsvolumens zu der jeweiligen Wassermenge.

$$E = V_{E(\text{gesamt})} / Q \quad (\text{Gl. 2})$$

### 3.6.2 Auswertung des Erosionsversuches mit Boden aus Elisabethgroden Dkm 3,5

Die Entwicklung der Erosion während des Versuches kann aus Abb. 8 entnommen werden.

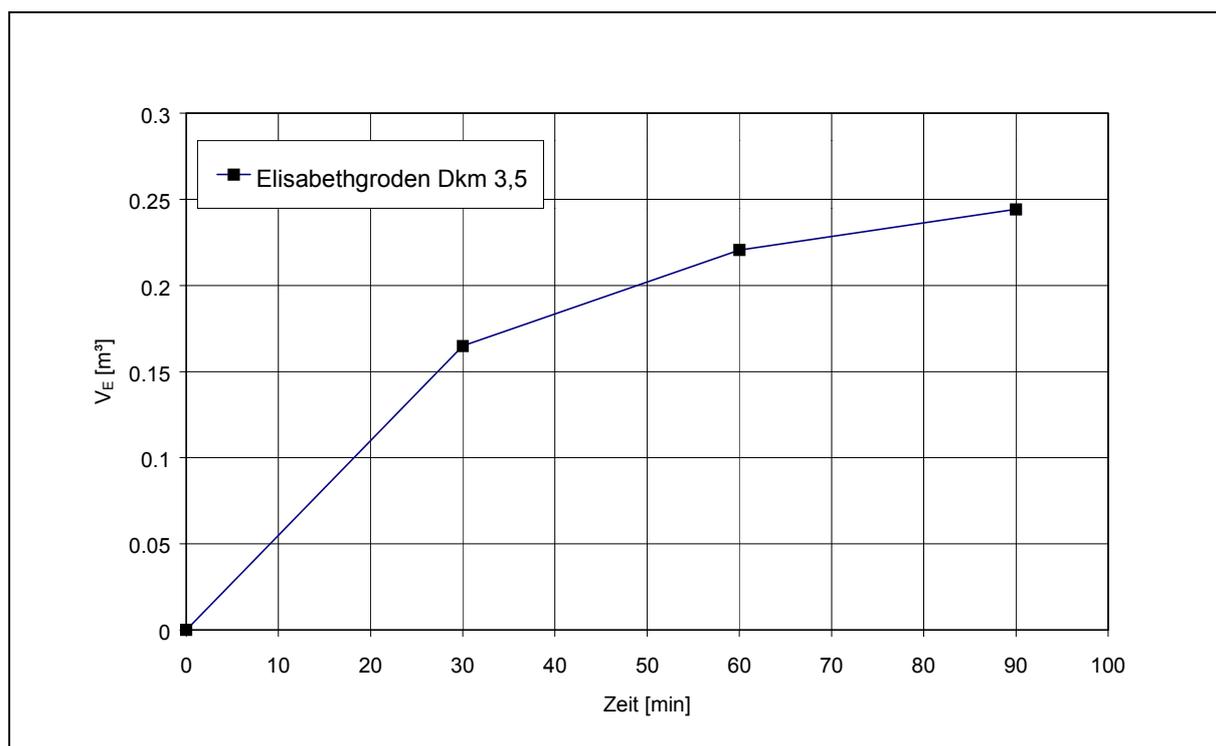


Abbildung 8: Entwicklung des Erosionsvolumens

Wahrscheinlich verläuft die Entwicklung des Erosionsvolumens in den ersten 20 Minuten noch steiler, als es der Abb. 8 zu entnehmen ist. Aber da die Messungen nur jede halbe Stunde durchgeführt wurden, konnte keine genauere Aussage gemacht

werden. Man erkennt aber deutlich die Abnahme der Erosion über die Versuchsdauer, was auch dem Eindruck des Versuchsverlaufes nach Abb. 4 bis Abb. 6 entspricht. Die Entwicklung der Erosion in diesem Versuch deutet auf das Erreichen eines stabilen Zustandes trotz andauernder Belastung durch überströmendes Wasser hin. Dieser Zustand hält aber bei andauerndem Überlauf nur bis zum Nachbrechen der durch die Erosion freigespülten und infolge von Wasseraufnahme aufgeweichten Erosionsrinnenwände an. Die herabgefallenen Bodenteile werden von dem Überlaufwasser erfaßt und abgetragen.

### 3.7 Probleme bei der Auswertung der Messungen

Bei der Auswertung der 3D-Koordinaten zeigte sich die Schwierigkeit, Flächen, die nicht durch den Laserscanner erfaßt werden konnten, sinnvoll zu ersetzen. Besonders Flächen, die im Schatten des Lasers lagen, konnten verständlicherweise nicht vermessen werden. Der hierdurch entstehende Fehler kann die Auswertung der gesamten Messung gefährden. Es ist daher erforderlich, die Oberfläche von einer besseren Position erneut einzuscannen, um bei der Auswertung genügend Oberflächenpunkte zur Verfügung zu haben. Das erneute Einscannen von einem anderen Standort aus erfordert nicht nur das Umsetzen des Scanners, sondern bedeutet auch eine Verlängerung der Versuchspause bzw. der gesamten Versuchszeit. Ein weiteres Problem ergibt sich bei größeren Rastermaßen durch die automatisierte Vermaschung der 3D-Koordinaten. Bei vier nebeneinanderliegenden Punkten, von denen zwei diagonal gegenüberliegende Punkte deutlich höher sind, als die anderen beiden Punkte, existieren zwei Möglichkeiten der Vermaschung.

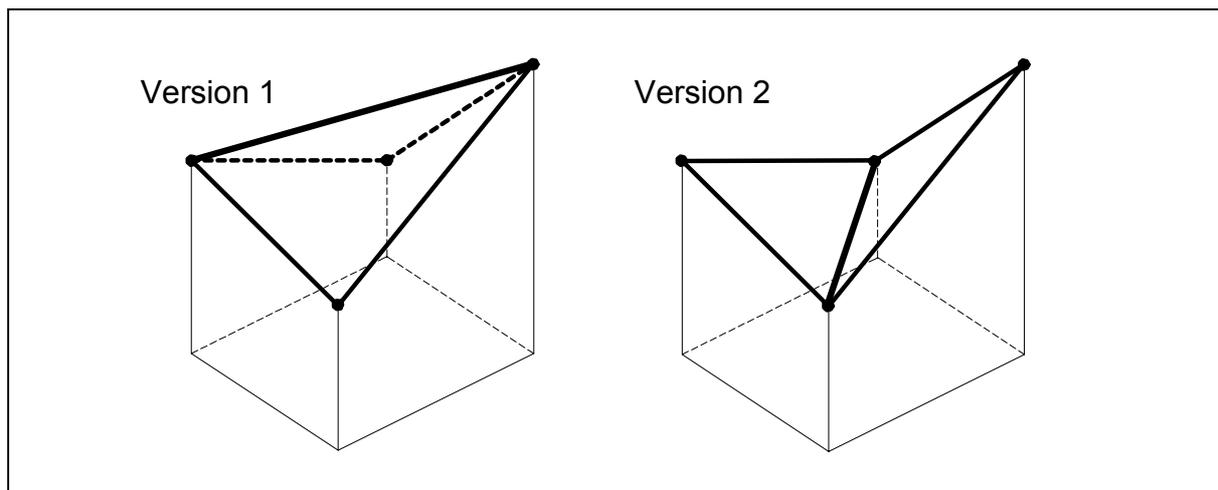


Abbildung 9: Volumen durch unterschiedliche Vermaschungsweise

Entweder werden die beiden hohen Punkte direkt miteinander verbunden und bilden mit den anderen tiefer liegenden Punkten die Oberfläche, oder die beiden tiefer lie-

genden Punkte werden verbunden und bilden mit den jeweils höher liegenden Punkten die Oberfläche. Durch die anschließende Volumenbildung bis zum Bezugsniveau ergeben sich unterschiedliche Volumina, die in der Summe einen größeren Interpretationsspielraum entstehen lassen. Diese Schwierigkeit wirkt sich aber nur bei großem Rasterabstand und starken Höhenunterschieden aus. Für kleine Rastermaße ergeben sich hierdurch nur geringe Abweichungen.

#### **4. ZUSAMMENFASSUNG**

Das Laserscannen stellt eine neue Möglichkeit dar, Oberflächenveränderungen infolge von Erosion zu erfassen. Es besitzt gegenüber herkömmlichen Meßverfahren viele Vorteile:

- Das Verfahren funktioniert berührungsfrei und ohne Meßmarken, d.h. es entsteht keine Störung des Erosionsprozesses durch die Messung.
- Das Verfahren ist auch bei großen Wassermengen bei der Erosionsmessung einsetzbar.
- Es besitzt im Nahbereich eine hohe Auflösung der Oberfläche, mit der auch lokale Erosionsereignisse erfaßt werden können.
- Es läuft automatisiert ab, d. h. es ist nur geringer Personaleinsatz erforderlich.
- Es werden direkt 3D-Koordinaten ermittelt.
- Es ist wenig störanfällig, selbst bei nassen Oberflächen.

Nachteile sind:

- die Dauer des Scannens, da während dessen der Versuch nicht fortgeführt werden kann.
- das Umsetzen des Laserscanners und mehrfache Scannen, welches bei tiefen Erosionsrinnen zur Erfassung der Rinnenwände erforderlich wird.

Gerade im Vergleich mit der Stereophotogrammetrie, die als Alternative zum Laserscannen in Erwägung gezogen wurde und ebenfalls berührungsfrei arbeitet, gaben der automatisierte Ablauf der Messung und die hohe Dichte der 3D-Koordinaten den Ausschlag zugunsten des Laserscannens. Der immer noch hohe Aufwand bei der endgültigen Auswertung der Daten läßt sich mit zunehmender Verbesserung der Auswertesoftware im Laufe der Zeit verringern, so daß mit dem Laserscannen eine gute Meßmethode zur Erfassung von Oberflächenveränderungen zur Verfügung steht.

## 5. LITERATUR

PIMENTEL, D. et al.: Environmental and economic cost of soil erosion and conservation benefits, Science, Vol. 267, 1995, S. 1117-1123

RICHTER, G.: Bodenerosion – Analyse und Bilanz eines Umweltproblems, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1998, S. 24

RICHWIEN, W.; WEISSMANN, R.: Belastung der Binnenböschungen von Seedeichen durch Wellenüberlauf- Teil I – Bodenmechanische Voruntersuchungen, März 2000, unveröffentlicht

RICHWIEN, W.; WEISSMANN, R.: Belastung der Binnenböschungen von Seedeichen durch Wellenüberlauf- Teil III – Abschlußbericht, in Vorbereitung (November 2001), unveröffentlicht

Weitere Informationen über den Laserscanner und seine Einsatzmöglichkeiten können der Homepage von callidus<sup>®</sup> precision systems unter [www.callidus.de](http://www.callidus.de) bzw. unserer Homepage unter [www.uni-essen.de/grundbau/](http://www.uni-essen.de/grundbau/) entnommen werden.

WEISSMANN, Roland, Dipl.-Ing.

Universität Essen – FB 10

Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau

Universitätsstraße 15

45141 Essen

Fon: 0201-183-2856

Fax: 0201-183-2870

Email: roland.weissmann@uni-essen.de