

Digitale Nahbereichsphotogrammetrie zur Erstellung von Oberflächenmodellen für Bodenerosionsversuche

H. Wegmann¹, D. Rieke-Zapp², F. Santel¹

Kurzfassung: Für die Konzeption von Maßnahmen zum Erosionsschutz ist die Beschaffenheit des Bodens ein wesentlicher Aspekt. Digitale Modelle von Bodenoberflächen mit bis zu 1 mm Grundauflösung (Mikrorelief) werden benötigt, um Bodenerosionsprozesse zu visualisieren und zu quantifizieren.

Die Verwendung photogrammetrischer Verfahren, z.B. Laserscannertriangulation- bzw. Stereophotogrammetrie, bieten hierbei den Vorteil der flächenhaften und berührungslosen Messung.

Bei der Laserscannererfassung werden unter hohem Zeitaufwand rasterförmig angeordnete Punktkoordinaten gewonnen. Zum besseren Verständnis von Bodenerosionsprozessen wird eine Technik benötigt, die schnell auch größere Flächen in hoher Auflösung aufnehmen kann, was mit der Laserscannermethode nicht möglich ist.

Der Einsatz der Stereo- bzw. Mehrbildphotogrammetrie scheint hier aufgrund der schnellen Datenerfassung und der Möglichkeit der flexiblen Aufnahmekonfiguration, die praktikabelste und effizienteste Messmethode zu sein. Am National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL) wird deshalb in Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen (IPI) eine photogrammetrische Methode entwickelt, mit der routinemäßig aus zwei oder mehr Bildern Bodenoberflächenmodelle erstellt werden können. Erste Erfahrungen werden in diesem Artikel vorgestellt.

1. Einführung

Bodenerosion ist ein allgegenwärtiges Phänomen bei dem Bodenmaterial durch Wind und Wasser verlagert wird. Ertragseinbußen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, die Versandung von Bächen und Flüssen durch Sediment sowie der Eintrag von Agrarchemikalien in Oberflächengewässer sind direkte Folgen der Bodenverlagerung. Im National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL) wird die Bodenerosion durch Wasser untersucht.

Konzeptionell wird bei der Bodenerosion durch Wasser die Zwischenrillenerosion von der Rillenerosion unterschieden. Bei der Zwischenrillenerosion werden Bodenteilchen vornehmlich durch die kinetische Energie aufprallender Regentropfen (Splash-Erosion) aus dem Aggregatverband des Oberbodens gelöst. Wasser fließt flächenhaft ab und transportiert die erodierten Teilchen hangabwärts. Bei konzentriertem Abfluss kommt es zur Ausbildung von Rillen. In diesen Bereichen wird der Sedimenttransport durch die Sediment-transportkapazität (τ_c) des Abflusses bestimmt. Dabei können die Scherkräfte des Wassers zu einer zusätzlichen Mobilisierung von Bodenmaterial in den Rillen führen (fortschreitende Rillenvertiefung und -verbreiterung). Bei Überschreiten von τ_c erfolgt eine netto Ablagerung (Sedimentation). Eine Fläche kann somit unterteilt werden in Sedimentations- und Akkumulationsgebiete oder aber in Bereiche in denen Zwischenrillen- bzw. Rillenerosion vorherrschen.

¹ Helge Wegmann, Folke Santel, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover, Nienburger Str. 1, D-30167 Hannover (Deutschland), email: wegmann@ipi.uni-hannover.de

² Dirk Rieke-Zapp, USDA-ARS, National Soil Erosion Research Laboratory und Purdue University, 1196 Building SOIL, West Lafayette, IN 47907-1196 (USA), email: zapp@purdue.edu

Huang (1998) weist auf die Bedeutung der Mikrotopographie des Bodens für die Zwischenrillenerosion hin. Die Dimensionen von Regentropfen und Bodenmaterial, die in Abtragungs- und Transportprozesse involviert sind, liegen im Millimeterbereich. Betroffen sind die Infiltrationskapazität von Böden, das Wasserspeichervermögen von oberflächlichen Bodenvertiefungen, der Gasaustausch, die Evaporationskapazität und der Energiefluss.

In Bereichen konzentrierten Abflusses wird die morphologische Zusammensetzung des Rillennetzwerkes untersucht. Zwischenrillengebiete können zu Einzugsgebieten zusammengefasst und einzelnen Rillenabschnitten zugeordnet werden. Aus Form, Länge und Hierarchie des Rillennetzwerkes lassen sich Rückschlüsse auf morphologische und hydrologische Verhältnisse im Untersuchungsgebiet schließen (Horton 1945, Strahler 1957). Querschnittsprofile der Rillen und ihre hydraulische Oberflächenrauigkeit können aus hochauflösenden Digitalen Oberflächenmodellen (DOM) entnommen und in prozessorientierten Erosions- und Abflussmodellen als Eingangsgrößen dienen (Elliot et al. 1997).

Mit der Hilfe von Differenz DOM können Abtragungs- und Sedimentationsgebiete ausgewiesen werden; sofern die Lagerungsdichte des Bodens bekannt ist, können auch Angaben über den Bodenabtrag von jeder einzelne DOM Zelle errechnet werden.

Besonders auf agrarisch genutzten Flächen verändert sich die Bodenoberfläche durch den Einfluss des Menschen und der Einwirkung des Wassers ständig. Temporäre Beobachtungen des Mikroreliefs von Bodenoberflächen sind rar (Eltz 1993) oder beziehen sich nur auf sehr kleinräumige Bereiche (Huang 1988), da hochauflösende Oberflächenmodelle von großflächigen Testgebieten noch nicht vorliegen.

2. Photogrammetrische Erfassung des Mikroreliefs

Mikrotopographieuntersuchungen fanden bisher nur auf kleineren Parzellen von wenigen Quadratmetern statt. Besonders auf Laborparzellen, auf denen einzelne Prozesse studiert werden sollen, wurden Untersuchungen des Mikroreliefs durchgeführt (Huang 1988, Helming 1993). Die erste Messmethode zur Erfassung der dazu notwendigen Bodenoberfläche waren mechanische Geräte mit auf einem Rahmen angeordneten Stahlnadeln, die auf die Bodenoberfläche abgesenkt wurden (Kuipers 1957). Diese sogenannte Pin-Drop-Methode lieferte zwar mit geringen Aufwand Reliefinformationen, hatte aber den großen Nachteil, dass der Boden mit den Nadeln berührt und somit das Mikrorelief gestört wurde. Es musste daher eine Messmethode gefunden werden, welche berührungslos die Bodenoberfläche erfassen kann. Dafür bieten sich photogrammetrische Methoden an.

Bei den photogrammetrischen Lasertriangulationsverfahren wird auf das Objekt ein Muster, z.B. ein Laserpunkt, auf die Oberfläche projiziert und mittels einer Kamera erfasst. Dieses Verfahren hat sich als geeignete Methode für Laboruntersuchungen mit hoher Messauflösung erwiesen (Huang 1988). Das Verfahren der Stereo- bzw. Mehrbildphotogrammetrie, bei der aus zwei oder mehreren Bildern ein beliebiges Objekt durch Bildmessungen in dessen Form und Lage bestimmt wird, ist dagegen für Oberflächenbestimmung bei Bodenerosionsuntersuchung bisher kaum eingesetzt worden. Erst durch die Verfügbarkeit von hochauflösenden Aufnahmesystem und automatischen Auswertelgorithmen, könnte diese Methode in der Bodenerosionsforschung immer mehr an Bedeutung gewinnen. Dies ist um so bedeutender für die Bodenerosionsforschung, da mit dieser Messmethode auch größere Untersuchungsgebiete praktikabel und effizient erfasst werden können. Das NSERL hat sich daher entschlossen diese Erfassungsmethode in Zusammenarbeit mit dem IPI zur Oberflächenbestimmung bei Laborexperimenten zu untersuchen.

Als Testfläche wurde eine Versuchparzelle (siehe Abb. 1) mit Ausmaßen von 2.24 m in der Breite und einer Länge von 4.18 m ausgewählt. Das Testobjekt ist ein Camdenboden (Parabraunerde aus Löß der Wisconsin Kaltzeit), dessen Bodenoberfläche zwischen den Beregnungen sowohl mittels Lasertriangulationsverfahren als auch durch Stereo- bzw. Mehrbildphotogrammetrie erfasst wurde



Abb. 1: Bodenerosionsmodell, Ausmasse der Box: 2.24 m breit und 4.18 m lang

2.1. Laserscannertriangulationsverfahren

Die bis dato am NSERL schnellste und genaueste verwendete Messmethode zur Bestimmung der Bodenoberfläche für Erosionsuntersuchungen ist ein Lasertriangulationsverfahren. Bei diesem photogrammetrischen Verfahren wird von einem Laser ein Punkt bzw. eine Linie auf der Bodenoberfläche erzeugt und von einer digitalen Kamera aufgenommen. Die Optik der Kamera steht dabei in einem festen Winkel und konstanten Abstand zur Laserquelle. Die Höhe der Bodenoberfläche wird durch eine veränderte Abbildungsposition des Laserlichtes auf dem Kamera-Sensor gemessen. Der Höhenmessbereich und die Auflösung des Messsystems werden durch Abstand und Winkel zwischen Kamera und Laser, Brennweite der Kameraoptik, Größe des Kamerasensors sowie Anzahl der Sensorelemente gesteuert (Huang et al. 1988).

Die notwendige Kalibrierung des Lasersystems erfolgt durch ein Referenz-Oberflächenprofil, bei der Laserpunktmethode z.B. mittels einer präzise gefertigten Stufenleiter mit 21 Stufen und einen jeweiligen Stufenabstand von 5 mm. Aufgrund der so ermittelten Kalibrierungswerte, die durch eine Regression bestimmt werden, kann für jede Position des erfassten Laserlichtes auf den Kamerasensor eine entsprechende Oberflächenhöhe bestimmt werden. Die Auflösung dieses Systems ist dabei deutlich besser als ein Millimeter.

Das Kamera-Laser-System wird an einem Rahmen angebracht und mittels zwei Motoren vertikal bewegt. Die flächenhafte Erfassung der Oberfläche findet durch eine mäanderförmige Bewegung des Messsystems über der Bodenmodellfläche statt. Die Oberfläche wird so vollautomatisch erfasst, und es entsteht ein digitales Oberflächenmodell mit sehr hoher Auflösung. Durch die Notwendigkeit eines Rahmens ist ein flexibler Einsatz in größeren Untersuchungsgebieten kaum möglich. Daneben benötigt diese Messmethode einen recht hohen Zeitaufwand für die Erfassung der Bodenoberflächen, so ist z.B. für das Erfassen einer Modellfläche von 1m x 1m mit dem Laserpunktverfahren, bei einem Messpunktabstand von 1mm, eine

Messzeit von ca. 7 Stunden notwendig. Da aber auch die Geschwindigkeit, mit der die Daten zur digitalen Oberflächenerstellung erfasst werden können, von Interesse ist, wurden am NSERL Versuche mit einem Linienlaserverfahren durchgeführt. Bei diesem Verfahren wird durch zwei Laserquellen eine Linie auf der Oberfläche erzeugt. Es ist somit möglich, einen Streifen von ca. 4 m Länge und einer Breite von ca. 0.6 m innerhalb von einer halben Stunde zu erfassen. Da bei diesem Verfahren deutlich weniger Aufnahmestandorte benötigt werden, ist eine deutlich schnellere Erfassung der Bodenmodelle möglich. Das Erosionsexperiment muss aber immer noch, bei der oben beschriebenen Testfläche, für mindestens 2 bis 3 Stunden unterbrochen werden. Um schnell und effizient im Gelände arbeiten zu können, bzw. die Veränderungen von Bodenoberflächen in Laborsimulationen in kurzen Zeitintervallen studieren zu können, ist daher eine schnellere und flexiblere Erfassungsmethode notwendig.

2.2. Stereo- bzw. Mehrbildphotogrammetrie

Die Stereo- bzw. Mehrbildphotogrammetrie, die dreidimensionale Erfassung von Objekten mit zwei oder mehr Bildern, ist schon seit langem als universell einsetzbares Verfahren für die berührungslose Messung mit hoher Genauigkeit bekannt. Sie wurde bisher aber routinemäßig kaum zur Messung von Oberflächen für Bodenerosionsversuche eingesetzt, da der Auswerteprozess, aufgrund von kaum vorhandenen automatischen Auswertelgorithmen, sehr zeitaufwendig und arbeitsintensiv war (siehe jedoch Welch und Jordan 1983, Kirby 1991). Erst die Entwicklung automatischer und zuverlässiger Algorithmen zur Bestimmung von digitalen Oberflächenmodellen aus Bildern führte zu erneuten Versuchen, die Photogrammetrie bei Bodenerosionsversuchen einzusetzen (Stojic et al. 1998).

Für die Messung der Bodenoberflächen während der Bodenerosionsversuche wurde die digitale Kamera Kodak DCS 1m verwendet, die zu der Familie der hochauflösenden Still-Video-Kameras gehört. Die DCS 1m ist mit dem Kodak KAF 6303 Sensor mit 3060 x 2036 Pixel bestückt und besitzt eine Pixelgröße von $9 \times 9 \mu\text{m}^2/\text{Pixel}$. Bei einer Farbtiefe von 8 bit pro Pixel wird somit ein Speicherplatz von ca. 6 MB pro Bild benötigt. Durch die Speicherung der Bilder auf sog. PCMCIA-Karten ist es möglich, mehrere Bilder pro Karte zu erfassen. Dadurch, und durch die Verwendung einer externen Batterie, steht somit eine äußerst flexibles Aufnahmesystem zur Bestimmung der Bodenoberflächen zur Verfügung.



Abb. 2: Photogrammetrisches Aufnahme- und Auswertesystem

Aufgrund der bekannten instabilen Inneren Orientierung dieser Kameras (Maas 1999) deren Ursache in einer recht instabilen Verbindung zwischen dem hochwertigen CCD-Sensor und dem Kameragehäuse zu suchen ist, wurde eine zusätzliche Modifikation am Aufnahmesystem durchgeführt. Diese Modifikation bestand in einer Chipfixierung, um eine stabilere Innere

Orientierung sicherzustellen. Die regelmäßige Kalibrierung des Aufnahmesystems erfolgt durch die Aufnahme eines ca. 2.6 m x 2.1 m x 0.5 m großen Testfeldes und der am IPI entwickelten Mess- und Auswertesoftware DPLX (Pollak et al. 2000) und BLUH (BundLe block adjustment University of Hannover) (Jacobsen 2000). Hiermit ist es möglich, die notwendigen regelmäßigen Kalibrierungen des photogrammetrischen Aufnahmesystems automatisiert durchzuführen.

Die photogrammetrische Erfassung des Bodenmodells, und damit die Unterbrechung der Erosionsversuche, dauert aufgrund der nur wenigen Aufnahmestandorte (insgesamt 7 Kameraposition zur Erfassung der Box) ca. 30 Minuten. Sie ist damit eine deutlich schnellere Erfassungsmethode als die bisherigen verwendeten Laserverfahren.

3. Automatische Bestimmung der Oberfläche zur Erfassung des Rillennetzwerkes

Bei dem Lasertriangulationsverfahren wird die Oberfläche des Bodens voll automatisch bestimmt. Nach der Abtastung der Bodenoberfläche in der gewünschten Schrittweite steht das Oberflächenmodell in digitaler Form zur Verfügung.

Für die Bestimmung der digitalen Oberfläche aus den Bildmessungen aus zwei oder mehr Bildern ist dagegen noch eine Nachbearbeitung notwendig, die aber die Versuchsdurchführung nicht weiter behindert. Diese Nachbearbeitung war in der Vergangenheit ein entscheidender Nachteil für die photogrammetrische Erfassung der Bodenoberflächen für Erosionsuntersuchungen. Bei der untersuchten Bodenmodellfläche von ca. 8 m² und einem geforderten max. Punktabstand von wenigen Millimetern werden Millionen von Punkten pro Bodenerosionsversuch benötigt. Eine manuelle Messung dieser Punkte war daher sowohl aus zeitlichen Aspekten als auch aus Kostengründen nicht praktikabel.

3.1. Automatische Bestimmung des digitalen Oberflächenmodells

Für die automatische Bestimmung der Bodenoberfläche wird das am IPI weiterentwickelte Programm DPCOR eingesetzt, welches ein sog. Region-Growing-Verfahren in Verbindung mit der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate (Otto 1989, Heipke und Kornus 1993) verwendet. Bei diesem Verfahren werden einige wenige homologe Startpunkte in einem digitalen Stereobilderpaar gemessen. Danach wird im linken Bild ein neuer Punkt in der Nachbarschaft eines Startpunktes gewählt, dessen Entsprechung dann im rechten Bild gesucht wird. Hierbei wird das „Vorwissen“ der Affinparameter aus dem Least-Square-Matching der Startpunkte verwendet. Bei einem erfolgreichen Ausbreiten wird so der gesamte Stereobereich des Bodenmodells erfasst. Bei einer vorhandenen Pixelgröße von ca. 1 mm auf der Bodenoberfläche ist es so möglich, ein hochauflösendes (im Millimeterbereich) Höhenmodell zu generieren.

Für den Testboden wurde das erzeugte hochauflösende (unregelmäßige, 1 bis 2 Millimeter Grundauflösung) Oberflächenmodell dann in ein regelmäßiges Oberflächenmodell mit einer Bodenauflösung von 1mm überführt (siehe Abb. 3).

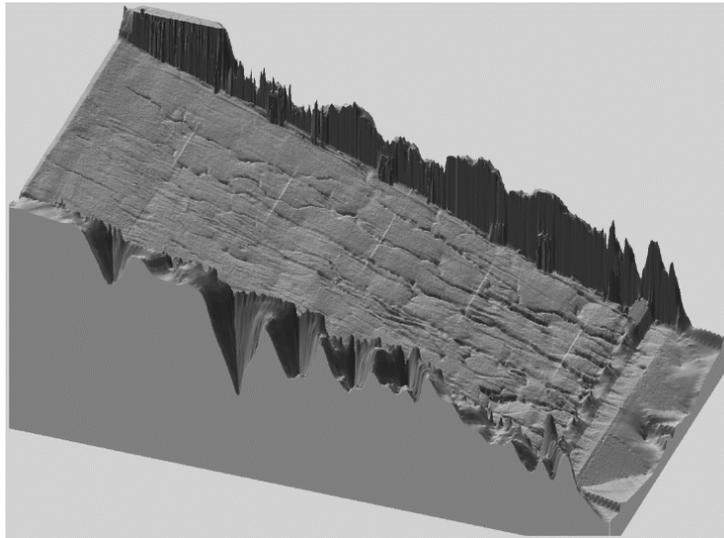
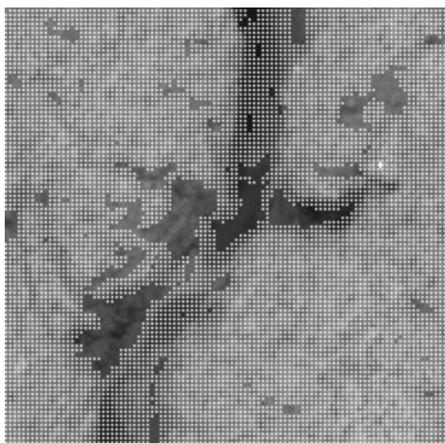


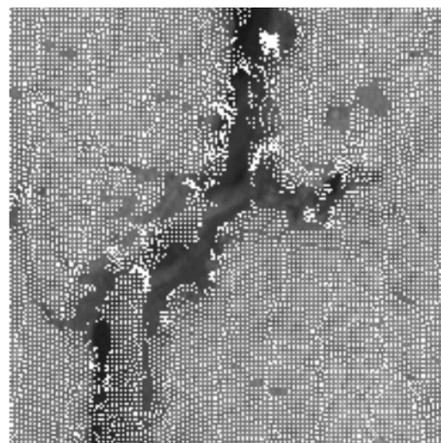
Abb. 3: Photogrammetrisch erfasstes Oberflächenmodell

Probleme treten an Unstetigkeitsstellen im Gelände (z.B. Geländekanten) und/oder Bildbereichen mit sehr schwachen Umgebungskontrast auf. In diesen Bereichen kommt es dann zu Fehlzuordnungen oder zu Bereichen die nicht automatisch erfasst werden können. Diese Probleme traten z.B. im Rillenbereiche auf.

Die Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt aus einem Rillenbereich des Bodenmodells (siehe Abb. 4.). Die weißen Punkte sind die dem Ausschnittsbild überlagerten, korrespondierenden Punkte. In den Bereichen mit schwächeren Relief ist hierbei eine sehr hohe Punktdichte erkennbar, während im Rillenbereich deutliche Lücken und Fehlzuordnungen zu verzeichnen sind. Vergleicht man nun die berechneten Objektkoordinaten in diesem Bereich mit denen aus einem überlappenden, benachbarten Stereobereich, so treten dort in der Höhe Abweichungen von über 4 bis max. 28 Millimeter auf, während die anderen Bereich der Bodenoberfläche deutlich geringere Abweichungen (ca. 1,5 mm) aufweisen (Santel 2001).



linkes Bild



rechtes Bild

Abb. 4: Probleme des Matchingalgorithmus im Rillenbereich

Auch bei dem Laserverfahren traten in diesen Rillenbereichen Probleme auf. Es kommt zu Abschattungen und dadurch zu Lücken im Oberflächenmodell. In Extremfällen treten Abweichungen in der Höhe von mehreren Zentimetern auf (Wegmann et al. 2001).

Inwieweit eine Verbesserung der automatischen Erfassung der Oberfläche in den Rillenbereichen, sowohl durch Laserscannerverfahren, als auch durch das photogrammetrische Messverfahren möglich ist, ist noch Gegenstand der Untersuchungen.

Diese Probleme treten bei tiefen und schmalen Rillen auf. Zur Bestimmung der Rillentiefen sind daher beide vorgestellten Verfahren derzeit nicht geeignet. Die Bestimmung der Lage der Rillen ist dagegen durch die photogrammetrischen Messmethoden noch in Millimetergenauigkeit möglich, was durch eine Überlagerung der Bildinformation über das Oberflächenmodell verifiziert wurde. Somit ist die Lage der Rillen im Rillennetzwerk aus den photogrammetrisch erzeugten Bodenoberflächenmodellen noch gut möglich.

3.2. Automatische Erfassung der Rillenveränderungen

Die Rillenbereiche sind für die Untersuchungen für Bodenerosion von großer Bedeutung. Dabei ist sowohl die Tiefe der Rille als auch die Lage bzw. das Netzwerk der Rillen für die Erosionsuntersuchung von Wichtigkeit. Während die photogrammetrische Bestimmung der Tiefe der Rillen noch ein Problem darstellt (s.o.), ist die Bestimmung der Lage von Rillen mit hoher Genauigkeit möglich.

Für die Bestimmung des Rillennetzwerkes werden Programmpakete angeboten, die dies automatisiert ermöglichen. Ein Programmmodul für das GIS-System ArcView, das sog. Hydro '99, wurde getestet und mit den zur Verfügung stehenden Bildinformationen verglichen.

Das aus der Stereo- bzw. Mehrbildphotogrammetrie erzeugte digitale Oberflächenmodell (DOM), bildet die Grundlage für die weiteren Auswertungen. Neben Quantifizierungen der Oberflächenrauigkeit (Kuipers 1957, Currence und Lovely 1970, Huang 1998) werden meist Bereiche der Zwischenrillen- von Gebieten der Rillenerosion unterschieden. Viele GIS Pakete bieten die Möglichkeit, Abflusslinien aus Oberflächenmodellen zu generieren. Cochrane (1999) beschreibt verschiedene Algorithmen und deren Anwendung im Bereich der Bodenerosionsforschung. Für die hier durchgeführte Analyse wurde die GIS Hydro '99 Extension von ESRI (Environmental System Research Institute) in ArcView™ GIS Version 3.2 verwendet. In einem ersten Verarbeitungsschritt werden in dem ursprünglichen DOM abflusslose Senken „gefüllt“, damit lokale Vertiefungen nicht zu einem spontanen Halt des Abflusses führen. In einem weiteren Schritt wird die Hangneigungsrichtung (Abflussrichtung) jeder einzelnen DOM Zelle ermittelt, wobei Fließrichtungen in Richtung der 8 benachbarten Zellen möglich sind. Der gesamte Abfluss einer Zelle wird einer dieser Richtungen zugeschlagen. Danach wird ein Gitter errechnet, das die Flußackumulation in jeder Rasterzelle darstellt. Die Werte entsprechen der Gesamtzahl (kumulativ) an Zellen, von denen Wasser in tiefer liegende Zellen fließt. Mit Hilfe des ursprünglichen DOM und einem Vergleich mit den aufgenommenen Photos wird dann iterativ nach einem Grenzwert für die Rillendefinition gesucht. In weiteren Schritten kann das Rillennetzwerk analysiert werden (Horton 1945, Strahler 1957). Weitere Auswertemöglichkeiten des Flußackumulationsrasters stellen Cochrane (1999) und Engel (1999) vor.

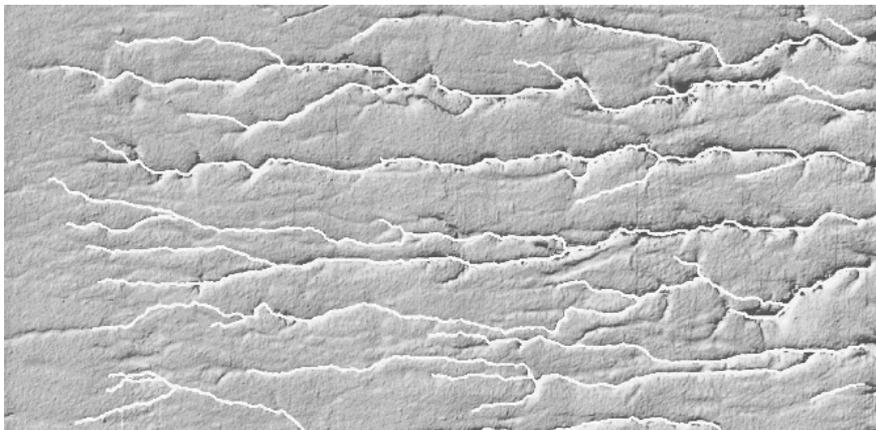


Abb. 5: Automatisch erfasstes Rillennetzwerk (weiß) aus dem DOM

Die so automatisch erfassten Rillen, können dann mit den aufgenommenen Bildern verglichen und anschaulich dokumentiert werden. Diese zusätzliche Kontroll-, Dokumentations- und Präsentationsmöglichkeit mit der Grauwertinformation des Bildes war mit den bisherigen Lasermessverfahren nicht möglich.

4. Zusammenfassung

Für Messungen auf größeren Flächen fehlte bislang eine geeignete Erfassungsmethode. Auch die Geschwindigkeit, mit der die Daten zur DOM Erstellung gesammelt werden können, ist wichtig, um schnelles und effizientes arbeiten im Gelände zu ermöglichen, bzw. die Veränderungen von Bodenoberflächen in Laborsimulationen in kurzen Zeitintervallen studieren zu können. Mit den bisherigen Laserverfahren ist dies aber kaum möglich. Es wurde daher nach einem Messverfahren gesucht, das sowohl die Erosionsversuche nur für kurze Zeit unterbricht, als auch für größere Untersuchungsgebiete unter vertretbarem Aufwand einsetzbar ist. Dieses Verfahren ist um so wichtiger, da die Entwicklung in der Bodenerosionsforschung zeigt, dass die Untersuchungsgebiete im Bereich der Mikoreliefforschung immer größer werden. Waren diese Untersuchungsgebiete in den Anfängen noch wenige Zentimeter groß, so sind derzeit schon Gebiete von einigen Quadratmetern für die Erosionsuntersuchung von Bedeutung; wobei der Wunsch der Wissenschaftler nach immer größeren Untersuchungsgebieten zur Erforschung der Erosionsprozessen im Mikorelief immer stärker wird. In diesem Zusammenhang ist die Stereo- bzw. Mehrbildphotogrammetrie aufgrund ihrer Flexibilität, Zuverlässigkeit und Genauigkeit selbst für große Testgebiete das geeignete Verfahren. Die bisherigen Probleme, wie z.B. die wenig automationsfreundigen Aufnahme- und Auswerteprozesse, die bisher dagegen sprachen, diese Methode für routinemäßig Boden-erosionsversuch einzusetzen, sind durch die Verwendung von digitalen Aufnahmesystem und der Verfügbarkeit von automatischen Algorithmen überholt. Daneben ist durch die Verfügbarkeit der Bilder eine bessere Überprüfung, Dokumentation und Präsentation von Unterschiedlichen Erosionsuntersuchungen, z.B. der Rillenentwicklung, möglich. Eine Möglichkeit, die mit den bisherigen Messmethoden in dieser Form nicht möglich war.

5. Literaturverzeichnis

- Chandler, J. (1999); Effective Application Of Automated Digital Photogrammetry For Geomorphological Research; *Earth Surf. Process. and Landforms*; 24:51-63.
- Cochrane, T. (1999); Methodologies for watershed modeling with GIS and DEMs for parameterization of the WEPP model; Dissertation; Purdue University; 198 S..
- Currence, H., and W. Lovely (1970); The analysis of soil surface roughness; *Trans. ASAE* 13: 710-714.
- Elliot, W., J. Laflen, A. Thomas und K. Kohl (1997); Photogrammetric And Rillmeter Techniques For Hydraulic Measurements In Soil Erosion Studies; *Trans. ASAE*; 40(1), 157-165.
- Engel, B. (1999); Estimating Soil Erosion Using RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) Using ArcView; <http://danpatch.ecn.purdue.edu/~engelb/abe526/gisrusle/gisrusle.html> (verifiziert am 15.12.2000).
- Eltz, F. (1993); Surface roughness as affected by tillage and rainfall erosivity; PhD Dissertation, Purdue University; 195 S..
- Heipke, C.; Kornus, W. (1993): Nicht-semantische photogrammetrische Auswertung digitaler Bilddaten. Praktische Durchführung am Beispiel einer Spot-Stereoszene. *ZPF* 3/93. Seite 120 – 130.

- Helming, K, C. Roth, R. Wolf und H. Diestel (1993); Characterization of rainfall – Microrelief interactions with runoff using parameters derived from Digital Elevation Models (DEMs); *Soil Technol.* 6: 273-286.
- Horton, R. (1945); Studies of the morphological activity and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Am. Bull.* 56: 275-370.
- Huang, C., I. White, E. Thwaite und A. Bendeli (1988); A Noncontact Laser System for Measuring Soil Surface Topography; *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 350-355.
- Huang, C (1998); Quantification of Soil Surface Microtopography and Surface Roughness; S. 153-168; In: Baveye, P., J.-Y. Parlange und B. Stewart (1998); *Fractals In Soil Science*; CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Jacobsen, K (2000): User Manual Program System BLUH, Institut for Photogrammetry and Engineering Surveys, University of Hannover, <http://www.ipi.uni-hannover.de/>;
- Kirby, R. (1991); Measurement of Surface Roughness in Desert Terrain by Close Range Photogrammetry. *Photogr. Rec.* 13(78); 855-875.
- Kuipers, H. (1957); A reliefmeter for soil cultivation studies. *Neth. J. of Agric. Sci.* 255-262.
- Maas, H-G. (1999); Ein Ansatz zur Selbstkalibrierung von Kameras mit instabiler innerer Orientierung, pp. 47-55, 18. Wissenschaftl. Techn. Jahrestagung der DGPF, 14. – 16. Oktober 1998, Hrsg. Jörg Albertz & Stefan Dech.
- Otto G.P., Chau T.K.W., (1989): 'Region-growing' algorithm for matching of terrain images, *Image and vision computing* (7) 2, 83-94.
- Santel F. 2000/2001: Erstellung von Oberflächenmodellen für Bodenerosionsversuche, Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover, unveröffentlicht.
- Stojic, M., J. Chandler, P. Ashmore und J. Luce (1998); The Assessment of Sediment Transport Rates by Automated Digital Photogrammetry; *PE & RS*; 64(5): 387-395.
- Pollak B., Jacobsen K., Automatic measurement of sewer man-HOLEs in large scale aerial images, *Proceedings, ISPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam, 2000*
- Strahler, A. N. (1957); Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans. Am. Geophys. Union* 38: 913-920.
- Wegmann, H. Rieke-Zapp, D. Folke S. (2001): Digital Photogrammetry for Measuring soil Surface Roughness, accepted paper, 2001 ASPRS Annual Conference, St. Louis, MO, USA
- Welch, R. und T. Jordan (1983); Analytical Non-metric Close-Range Photogrammetry for Monitoring Stream Channel Erosion; *PE & RS*; 49(3): 367-374.