

Methoden zur skalenübergreifend hochaufgelösten Erfassung und Quantifizierung von Bodenerosion durch Wasser

DR. BASTIAN STEINHOFF-KNOPP, DR. ANETTE ELTNER, FREDERIC HAKE, M.Sc. & DR. JENS-ANDRÉ PAFFENHOLZ

Bodenerosion durch Wasser ist ein weltweit auftretendes Phänomen und beschreibt den durch menschliche Bewirtschaftung ausgelösten oder verstärkten Bodenabtrag auf landwirtschaftlichen Flächen durch oberflächlich abfließendes Wasser. Die Quantifizierung des abgetragenen Bodenmaterials ist eine methodische Herausforderung an der Schnittstelle zwischen den Fachbereichen Geographie und Landschaftsökologie sowie Geodäsie und Photogrammetrie. Abschätzende Methoden bilden die Grundlage für Monitoringprogramme mit einer Flächenabdeckung von mehreren 100 ha.

Moderne Methoden zur Generierung von hochaufgelösten dreidimensionalen (3D)-Punktwolken ermöglichen die mikroskalige Erfassung der Bodenoberfläche und damit auch die hochgenaue Abbildung von Erosionsformen. Zur Datenaufnahme werden terrestrische Laserscanner und unmanned aerial vehicles (UAV)-gestützte photogrammetrische Methoden eingesetzt.

In diesem Beitrag werden auf verschiedenen Skalen anwendbare Methoden zur Erfassung von Erosionsformen und der anschließenden Quantifizierung des Bodenabtrags vorgestellt. Herausforderung und Nutzen einer hochauflösenden und mm-genauen Vermessung der Bodenoberfläche zur differenzierten Betrachtung verschiedener Erosionsprozesse werden aufgezeigt. Besondere Betrachtung finden hier die Herausforderungen durch Maskierung durch andere Bodenprozesse sowie die Rolle und der Einfluss der Geo-Referenzierung der 3D-Punktwolken unterschiedlicher Standpunkte des Laserscanners bzw. der geflogenen Trajektorie bei der UAV-Photogrammetrie. Abschließend werden verschiedene (halb-)automatisierte Verfahren zur Bestimmung von Ausräumvolumina auf der Basis von 3D-Punktwolken, erzeugt mittels Laserscanner und UAV-Photogrammetrie, diskutiert.

Schlüsselwörter – Bodenerosion, terrestrisches Laserscanning, UAV-Photogrammetrie, 3D-Punktwolken

1. Einleitung und Problemstellung

Als Bestandteil terrestrischer Ökosysteme sind Böden an der Bereitstellung einer Vielzahl von Ökosystemleistungen beteiligt (ADHIKARI & HARTEMINK 2016) und sind als bedeutendster landwirtschaftlicher Produktionsfaktor weltweit die maßgebliche Grundlage für die Versorgung der Menschheit mit Nahrungsmitteln. Essentiell dafür ist der gute ökologische Zustand der Böden, der durch eine Vielzahl von Degradationsprozessen gefährdet wird. Die Europäische Kommission benennt in ihrer thematischen Strategie zum Bodenschutz acht Prozesse die Böden langfristig gefährden (EUROPEAN COMMISSION 2006). Bodenerosion - und im besonderen Bodenerosion durch Wasser - ist dabei der

bedeutendste Degradationsprozess und bezeichnet im engeren Sinne den durch die landwirtschaftliche Nutzung beschleunigten Bodenverlust. Die jährlichen ökonomischen Verluste durch Bodenerosion in der Europäischen Union werden auf 0,7 bis 14 Mrd € geschätzt (EUROPEAN COMMISSION 2006). Dabei geht ein Anteil von jährlich 1,25 Mrd € direkt auf den Verlust in der landwirtschaftlichen Produktion durch Bodenerosion durch Wasser zurück (PANAGOS ET AL. 2018).

Grundlage für Aussagen auf dieser Maßstabebene sind Modellierungen mit empirischen Modellen zur Höhe des Bodenabtrags wie z. B. die Universal Soil Loss Equation (USLE) (WISCHMEIER & SMITH 1978) bzw. ihre für Deutschland gültige Adaption als Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG) (SCHWERTMANN ET AL. 1990; DIN 19708 2017). Diese Modelle liefern durch die Kombination verschiedener Einflussfaktoren (Erodibilität des Bodens, Erosivität des Niederschlagsgeschehens, Topographie und Bodenbearbeitung sowie angebaute Ackerkulturen) flächenhaft-differenzierte Aussagen über den langfristigen mittleren Bodenabtrag auf Ackerflächen.

Dem gegenüber steht das in der Landschaft bzw. auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen real ablaufende Erosionsgeschehen bei dem es nach einzelnen Starkniederschlägen zu Bodenabtrag kommt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Bodenerosion durch Wasser ein komplexer Prozess aus Ablösung, Verlagerung und Wiederanlagerung von Bodenpartikeln ist, der sich in Abhängigkeit des dominanten Wirkmechanismus sowie der entstehenden Schadformen in vier Erosionstypen gliedert: Spritz- oder Plansch-

erosion (engl. Splasherosion), flächenhafte Erosion, Rillen- und Rinnenerosion sowie Gully- oder Grabenerosion (MORGAN 2006). Die Intensität des Abtrags, die Reichweite des Verlagerungsprozesses und die Größenordnung der entstehenden Schadformen steigt in der zuvor genannten Reihenfolge an. Während Planscherosion die kleinräumige Verlagerung von Bodenpartikeln durch das Auftreffen einzelner Regentropfen auf die Bodenoberfläche bezeichnet, führt bei den weiteren Erosionstypen oberflächlich abfließendes Wasser zu Loslösung und Transport des Materials. Rillen- und Rinnen verlagern auch auf mitteleuropäischen Ackerflächen zum Teil größere Mengen Bodenmaterial über mehrere hundert Meter. Dauerhaft bestehenden Gräben (bzw. Gullies) sind Phänomene des Mittelmeerraumes und der Subtropen: hier werden in unregelmäßigen Abständen große Sedimentmengen befördert.

Die Quantifizierung des abgetragenen Bodenmaterials stellt eine methodische Herausforderung an der Schnittstelle zwischen den Fachbereichen Geographie und Landschaftsökologie sowie Geodäsie und Photogrammetrie dar. In Abhängigkeit der angestrebten Genauigkeit sowie räumlichen und zeitlichen Zielskala stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung.

2. Methoden zur Erfassung von Bodenerosion durch Wasser

Der komplexe Vorgang der Bodenerosion durch Wasser führt zu verschiedenen Erosionsprozessen und somit Erosionsformen, die auf bestimmten Maßstabebenen besonders wirksam sind. Eine Vielzahl von Qualifizierungs- und Quantifizierungsmöglichkeiten des abgetragenen Bodenvolumens existieren (MORGAN 2006). Jedoch sind die jeweiligen Methoden meist nur für bestimmte räumliche und zeitliche Beobachtungsskalen optimiert und erfassen somit verschiedene Prozesse des Bodenabtrags. Dies erlaubt es nicht, gemessene Bodenverluste einer Skala auf andere Maßstabebenen zu übertragen. Messungen auf kleinen Erosionsplots können somit nicht auf ganze Einzugsgebiete oder Landschaftsräume hochgerechnet werden (z. B. BOARDMAN 2006). Berührungslose Messmethoden der Geodäsie, wie die UAV-gestützte Photogrammetrie und das terrestrische Laserscanning, können die Einschränkung der quantitativen skalen-übergreifenden Erosionserfassung teilweise überwinden, während komplexe Schadkartierungen für qualitative Aussagen skalen-übergreifend genutzt werden.

2.1. Komplexe Schadkartierung

Zur Untersuchung des Erosionsgeschehens in einem größeren Landschaftsraum eignet sich die komplexe Schadkartierung. Mit ihr werden innerhalb eines zuvor abgegrenzten Untersuchungsgebietes



Abbildung 1: Erosionsformen: Linienhafte Erosion (Rinne, links), flächenhafte Erosion (oben rechts), flächenhaft-linienhafte Erosion (unten rechts).

(z. B. ein hydrologisches Einzugsgebiet, die Ackerflächen eines Betriebes oder die landwirtschaftlich genutzten Flächen einer Landschaftskammer) Erosions- und Akkumulationsformen sowie den Erosionsprozess beeinflussende Randbedingungen (u. a. Bodenbedeckung und -bearbeitung) erfasst. Hierzu werden bei einer Begehung der Untersuchungsflächen zumindest die Lage und der Typ aller aufgetretenen Erosions- und Akkumulationsformen dokumentiert. Grundlage der Schadkartierung ist eine Klassifikation der durch Bodenerosion entstehenden Schadformen, wie sie mit der DVWK-Kartieranleitung vorliegt (DVWK 1996). Nach dieser werden flächenhafte, flächenhaft-linienhafte und linienhafte Erosionsformen (Rillen, Rinnen und Gräben) unterschieden (siehe Abbildung 1).

Bei linienhaften und flächenhaft-linienhaften Erosionsformen kann die Höhe des ausgetragenen Bodenmaterials (das Ausräumvolumen) durch Bestimmung der Länge und Querschnittsfläche der in den Boden eingetieften Formen (Rillen und Rinnen) ermittelt werden. Bei flächenhaften Abspülungen kann die Höhe des Bodenabtrags klassifiziert abgeschätzt werden (LEDERMANN ET AL. 2008). Die zur Kartierung einsetzbaren Vermessungsverfahren richten sich nach der angestrebten Genauigkeit bzw. dem Zielmaßstab. Da in der Regel Erfassungen auf der Ackerschlag- bis Landschaftsskala vorgenommen werden, muss zudem zwischen Arbeitsaufwand und Aussagegenauigkeit abgewogen werden. Für die meisten praktischen Anwendungen reichen differentielle Globale NavigationsSatellitenSystem (GNSS)-Messungen mit Meter- bis Submetergenauigkeit aus.

Ziel der komplexen Schadkartierung kann die einmalige Erfassung von Erosionsformen nach einem intensiven Niederschlagsereignis oder die langfristige Erfassung von Schadmustern und Abtragsmengen in einer Dauerbeobachtung bzw. einem Monitoring sein, wie sie u. a. in Niedersachsen, Baden-Württemberg und dem Schweizer Mittelland etabliert sind (PRASUHN 2011; STEINHOFF-KNOPP 2018; STEINHOFF-KNOPP & BURKHARD 2018). Wichtige Elemente in den Langfristbeobachtungen sind die Erstellung von schlag-, untersuchungsgebiet-, und ackerkulturbezogenen Abtragsraten und die Generierung von Karten zu Auftrittshäufigkeiten und typischen Schadmustern.

Die Genauigkeit in den Aussagen zur Höhe des Bodenabtrags auf der Basis der komplexen Schadkartierung hängt neben der korrekten Ansprache der Erosionsformen durch die Kartierenden von der Genauigkeit des Aufnahmeverfahrens ab. Erfahrene Kartierende können demnach eine Fehlerrate von etwa 15 % erreichen (LEDERMANN ET AL. 2010), Abweichungen von bis zu 30 % sind wahrscheinlich (EVANS 2002). STEINHOFF-KNOPP & BURKHARD (2018) nutzen in der niedersächsischen Erosionsdauerbeobachtung die mobile Geoinformationssystem (GIS)-Applikation EroPAD (STEINHOFF ET AL. 2013) zur Kartierung von Bodenerosionsformen auf der Basis von GNSS-Daten mit Metergenauigkeit und rechnen mit einer Ungenauigkeit in der Quantifizierung des Bodenabtrags von etwa 15 %.

2.2. UAV-gestützte Photogrammetrie



Abbildung 2: UAV Einsatz - Befliegung eines Feldes mit einem Oktokopter.

Innerhalb des letzten Jahrzehntes ist die Nutzung von UAVs - insbesondere die Anwendung von Mikrodrohnen - in den Geowissenschaften sprunghaft angestiegen. Aufgrund der technischen Fortschritte können UAVs heute sehr flexibel, kostengünstig und schnell eingesetzt werden, um Ackerflächen nach Regenereignissen zu kartieren. Dies ermöglicht die störungsfreie Beobachtung der Bodenoberfläche (siehe Abbildung 2).

Bei niedrigen Flughöhen können digitale Oberflächenmodelle (DOM) bis zu ha-großer Flächen berechnet werden (ELTNER ET AL. 2018). Dazu wird lediglich eine mit Kamera und GNSS-Empfänger

ausgestattete UAV benötigt. Der GNSS-Empfänger unterstützt die automatische Befliegung des Untersuchungsgebietes unter Verwendung vorher erstellter Flugpläne. Während der Befliegung muss die Kamera auf der UAV so ausgelöst werden, dass die Oberfläche mit überlappenden Fotos erfasst wird, denn diese Fotos können dann mittels Photogrammetrie zur Berechnung von DOMs genutzt werden.

Die Photogrammetrie nutzt das geometrische Modell der Lochkamera, um 3D-Objektpunkte mit 2D-Bildpunkten mittels Kollinearitätsgleichungen in eine funktionale Beziehung zu bringen. Wenn die äußere Orientierung zweier Bilder (Lage und Orientierung des Projektionszentrums) bekannt ist, kann das Modell genutzt werden, um 3D-Koordinaten zu bestimmen. Umgekehrt können die Orientierungsparameter einer Kamera berechnet werden, wenn mindestens drei Zielmarken bekannt sind. Normalerweise sind die Orientierungsparameter eines Bildverbandes, aufgenommen mit einer UAV, nicht bekannt. Für diese Fälle hat die Photogrammetrie das Verfahren der Bündelblockausgleichung (BBA) entwickelt. Es werden dabei gleichzeitig die Orientierungsparameter sowie die 3D-Koordinaten der Objektpunkte für eine hohe Anzahl von Bildern berechnet. Eingangswerte in die BBA sind Bildpunktkoordinaten vieler Verknüpfungspunkte (identische Bildpunkte in mindestens zwei Bildern) sowie einer hinreichenden Anzahl von Passpunkten (z. B. mit Real Time Kinematic (RTK)-GNSS eingemessen) zur Geo-Referenzierung des Bildverbandes. Die Identifizierung und Zuordnung der homologen Bildpunkte wurde mittels Methoden der Computer Vision stark automatisiert. Im letzten Schritt, nachdem die Orientierungsparameter ermittelt wurden, kann mit Hilfe des Dense Matching für nahezu jedes Pixel eine korrespondierende 3D-Koordinate berechnet werden. Aufgrund der Entwicklungen in der Photogrammetrie und Computer Vision ist es inzwischen möglich, in wenigen Schritten (Bildzuordnung, BBA, Dense Matching) ein hochauflösendes DOM aus ausreichend überlappenden Bildverbänden zu berechnen, was zu einer breiten Wahrnehmung der Methode in den Geowissenschaften führte (ELTNER ET AL. 2013).

2.3. Terrestrisches Laserscanning



Abbildung 3: TLS Einsatz in Lamspringe - Links: Zoller+Fröhlich Imager 5010X und UAV Trimble ZX5 bei der Datenerfassung. Rechts: Statisch erfasste und colorierte 3D-Punktwolke

Das terrestrische Laserscanning (TLS) ist ein effizientes Verfahren zur Erfassung von 3D-Punktwolken von kleinen Objekten im industriellen Umfeld bis zu großräumigen Objekten wie Straßenzügen und landwirtschaftlichen Flächen. Das interessierende Objekt wird hierbei in Form von Millionen von einzelnen, räumlich eng benachbarten, grauwertcodierten 3D-Punkten, sogenannten 3D-Punktwolken, beschrieben. Zur Erfassung von 3D-Punktwolken kommen in diesem Beitrag terrestrische Laserscanner

zum Einsatz, die sich seit mehr als einer Dekade als effizientes Verfahren zur schnellen Erfassung der Geometrie von Objektflächen etabliert haben.

Der Laserscanner arbeitet unmittelbar dreidimensional, direkt zentrisch und mit hoher räumlicher Auflösung im Bereich weniger Millimeter. Zusätzlich werden Oberflächenremissionswerte (Intensitätswerte) aufgezeichnet. Als wesentliche Charakteristika der Laserscanner sind zu nennen: die prinzipiell flächenorientierte Objekterfassung, die Aufnahme unzugänglicher bzw. nicht oder schwach texturierter Objekte aufgrund der reflektorlosen Entfernungsmessung und die Objekterfassung in vergleichsweise kurzer Zeit. Somit steht dem Geodäten eine effiziente, flächenhafte Erfassungstechnologie neben den konventionellen punktbasierten Messmethoden, wie z. B. der Tachymetrie, dem Nivellement und dem GNSS für das geodätische Monitoring von künstlichen und natürlichen Objekten zur Verfügung. Insbesondere bei komplexen Objektflächen weist das TLS aufgrund der flächenhaften Erfassung sowie seiner hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung gegenüber der punktuellen Messtechnologie entscheidende Vorteile auf. Infolge der flächenhaften Abtastung und entsprechender Datenanalyse können Aussagen über die vollständige Verformung und Veränderung eines Objektes getroffen werden. Sodass auch kleinere strukturelle Veränderungen detektiert werden, die mit reinen punktuellen Messmethoden nicht aufdeckbar sind. Dadurch entsteht ein klarer Mehrwert bei der Beurteilung von Veränderungen eines Objektes gegenüber den konventionellen Messverfahren. Eine kurze allgemeine Einführung in das TLS sowie einen Überblick über die drei verschiedenen Messmodi des Laserscanners geben u. a. KUTTERER ET AL. (2009).

In diesem Beitrag kommt das klassische, statische TLS zum Einsatz, vgl. Abbildung 3 links. Dies ist charakterisiert durch eine hinreichende Anzahl von Standpunkten des Laserscanners zur vollständigen Erfassung des interessierenden Objektes. Abbildung 3 rechts zeigt das Ergebnis eines Standpunktes in Form der colorierten 3D-Punktwolke. Die Erfassung von TLS-basierten 3D-Punktwolken aus der Bewegung heraus, wie beim kinematischen TLS oder Mobile Mapping ist nicht Gegenstand dieses Beitrages. Für die im statischen TLS notwendige Geo-Referenzierung - die Überführung der einzelnen lokalen Standpunkte in ein gemeinsames Koordinatensystem mit bekanntem geodätischen Datum - wird in diesem Beitrag auf die klassische, indirekte Geo-Referenzierung über Zielzeichen (vgl. Abbildung 3 rechts) zurückgegriffen. PAFENHOLZ (2013) gibt einen Überblick über die verschiedenen Methoden der Geo-Referenzierung von 3D-Punktwolken.

3. Anwendungsbeispiele zur Quantifizierung der Ausräumvolumina von Erosionsformen

3.1. UAV-gestützte Quantifizierung in einem Feldversuch

Die Eignung von UAV-Photogrammetrie zur Quantifizierung von Bodenerosion wurde in einer Beobachtungsreihe im sächsischen Lößhügelland getestet (ELTNER ET AL. 2015). Es konnte ein wesentlicher Informationsgewinn für die Bodenerosionsforschung aufgezeigt werden.

3.1.1. Versuchsaufbau

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich 30x40 m im Oberhangbereich eines gestreckten Hanges einer größeren Ackerparzelle (siehe Abbildung 4). Die Testfläche wurde vor der ersten Befliegung im Herbst 2012 frisch gespflügt und danach bis zum Sommer 2013 nicht weiter bearbeitet, lediglich von Vegetation frei gehalten. Des Weiteren wurden witterungsbeständige und stabile Passpunkte in regelmäßigen Abstand um sowie in der Mitte der Testfläche verteilt. Die Fläche wurde insgesamt viermal befliegen, um Bodenveränderungen während des Winters sowie nach lang anhaltendem Regen im Frühjahr und nach einem Starkregenereignis zu detektieren. Die Flughöhe betrug zwischen 10 und 15 m und es

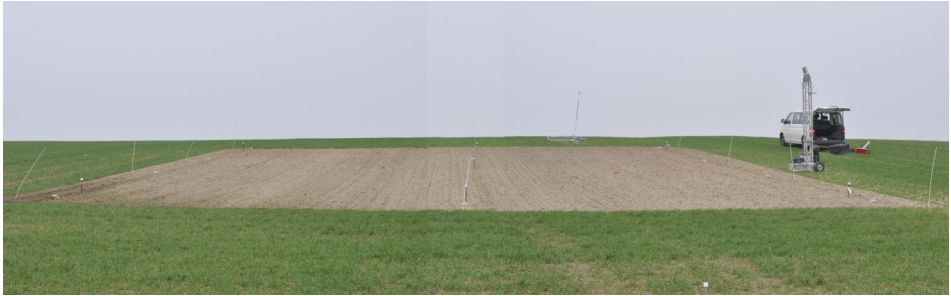


Abbildung 4: UAV-Befliegungsfläche in der fragilen sächsischen Lößlandschaft

wurden während des ersten Einsatzes die Kompaktkamera Panasonic Lumix DMC-LX3 mit Zoomobjektiv und während der weiteren Flüge die Systemkamera Sony NEX-5N mit Festbrennweite zur Fotoaufnahme genutzt. Die Überlappung betrug 80 bzw. 60 % in bzw. quer zur Flugrichtung.

3.1.2. Methodik

Die mittels UAV akquirierten Bilder wurden in photogrammetrischer Software verarbeitet, um DOM für jede Feldkampagne zu berechnen. Die dichten Punktwolken wurden zu Raster interpoliert, die eine Auflösung von 1 cm aufweisen. Einerseits wurden die DOM genutzt, um Höhenänderungen des Bodens mittels Differenzbildung der Raster der verschiedenen Zeitscheiben zu messen. Andererseits konnten aus den DOM bodenerosionsrelevante Parameter automatisch abgeleitet werden. Es wurden Rillen automatisch extrahiert, um Bodenverlust durch Interrill- von Rillenerosion zu trennen. Des Weiteren wurden Rillenparameter (Rillentiefe, -breite, querschnitt) betrachtet, um die zeitliche Veränderung der Rillen und ihre Bedeutung für das gesamte Erosionsgeschehen zu beurteilen. Zusätzlich wurden isotrope und anisotrope Rauigkeitsmaße für die Bodenoberfläche ermittelt, damit die Veränderung der lokalen Höhenunterschiede und ihre Bedeutung für das Abfluss- und somit Erosionsgeschehen über die Zeit untersucht werden können.

3.1.3. Ergebnisse

Während des gesamten Untersuchungszeitraumes kommt es zu bedeutenden Höhenänderungen des Bodens (siehe Abbildung 5). Im Durchschnitt senkt sich der Boden um 15 mm innerhalb der 10-monatigen Beobachtung. Dabei sind jedoch nicht alle Veränderungen der Bodenerosion zuzuordnen. Senkungsvorgänge des frisch gepflügten Bodens während der Wintermonate um ca. 5 mm maskieren die Erfassung möglicher Bodenverluste. Nach dem Winter reduzierte sich die Bodenrauigkeit wesentlich aufgrund der Ausbildung einer Bodenkruste. Die Verkrustung begünstigt die Abflussbildung und es kommt im Frühling, während einer langen Regenzeit mit hohen Niederschlagssummen, neben flächenhafter Erosion zur Bildung von Erosionsrillen. Während des Starkregenereignisses im Sommer erfolgt weitere Erosion fast ausschließlich in den Rillen, welche sich stark vertiefen. Es konnte erstmalig der Einfluss der Winderosion gesehen werden, denn die Rillen verlagern sich überwiegend in östlicher Richtung auf dem Nord-Süd exponierten Hang in einer von Westwinden dominierten Region.

3.2. TLS-gestützte Quantifizierung in einem Versuchsaufbau

Die direkte TLS-gestützte Quantifizierung von Ausräumvolumina von Erosionsformen beschränkt sich in der Regel auf große Formen (Gräben, Gullies). So vergleichen CASTILLO ET AL. (2012) den Einsatz

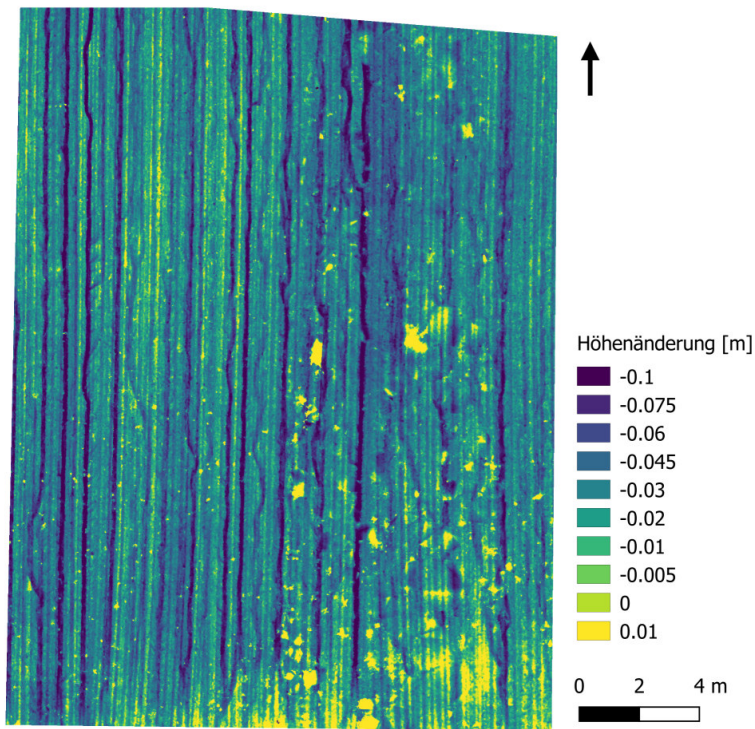


Abbildung 5: Höhenänderung der Hangfläche innerhalb von 10 Monaten

eines Laserscanners mit alternativen Methoden zur Bestimmung der Geometrien von Erosionsgullies in Spanien. Alternativ werden terrestrische Laserscanner, ähnlich wie UAVs (vgl. Abschnitt 3.1.), zur multi-temporalen Erfassung der Bodenoberfläche, und damit zur Bestimmung des Bodenabtrages eingesetzt (ELTNER ET AL. 2013). Ein vergleichbarer Einsatz des TLS findet beispielsweise im Zuge der Volumenbestimmung von Mülldeponien oder der Haufwerksanalyse in untertägigen Systemen (DONNER ET AL. 2019) statt.

3.2.1. Versuchsaufbau und -durchführung

Für die Entwicklung eines geeigneten Arbeitsablaufes und zur Einschätzung der Genauigkeit der verwendeten Quantifizierungsverfahren wurde ein Versuchsaufbau gewählt. Hierzu wurden in einer mit Bodenmaterial befüllten Box zwei verschieden geformte künstliche Rillen angelegt:

- eine gerade Form mit einer angeschrägten Längsseite (Form 1, Abbildung 6, oben rechts) und
- eine gebogen angelegte Form (Form 2, Abbildung 6, unten rechts).

Die Formen wurden anschließend mit dem terrestrischen Laserscanner vom Typ Zöller+Fröhlich (Z+F) Imager 5010X (Abbildung 6, oben links) mit den Parametern "Auflösung High" und "Default noise"



Abbildung 6: Versuchsaufbau: Oben links: Z+F Imager 5010X, unten links: Verfüllung der künstlichen Formen mit Quarzsand, oben rechts: künstlich angelegte Erosionsform mit angeschrägter Längsseite (Form 1), unten rechts: künstlich angelegte, gebogene Erosionsform (Form 2)

erfasst. Zur Vermeidung von Schattenbereichen erfolgte die Erfassung der 3D-Punktwolken von zwei Standpunkten an den beiden Querseiten der Box. Die erfassten und über Zielmarken mit der Software Z+F LaserControl referenzierten 3D-Punktwolken dienen als Grundlage für die anschließende Bestimmung des Volumens der Rillen. Abschließend wurden die Formen mit Quarzsand mit einer bekannten Dichte von $1,5 \text{ g/ml}$ aufgefüllt (Abbildung 6, unten links). Die durch Rückwiegen ermittelten Volumina dienen als Referenzwerte zur Beurteilung der Genauigkeit der mittels 3D-Punktwolken bestimmten Volumina.

3.2.2. Auswertungsprozess

Die Auswertung der 3D-Punktwolken mit dem Ziel der Volumenbestimmung erfolgte zum einen manuell unter Nutzung der Open Source Software CloudCompare¹ und MeshLab² mit zahlreichen Nutzereingriffen und zum anderen automatisch durch Abbildung des Auswertungsprozesses mit Hilfe der Open Source Bibliothek Point Cloud Library³ (PCL).

Vor der eigentlichen Volumenbestimmung fand eine optionale Vorverarbeitung der 3D-Punktwolke statt. Zur Minimierung des Rauschens wurde eine räumliche Filterung und zur Datenreduktion mit Blick auf die Rechenzeit bei der manuellen Volumenbestimmung ein Downsampling der original 3D-Punktwolke durchgeführt. Für einen aussagekräftigen Vergleich zwischen der manuellen und auto-

¹ Eingesetzte Version CloudCompare v2.9, verfügbar unter www.cloudcompare.org.

² Eingesetzte Version MeshLab v2016.12, verfügbar unter www.meshlab.net.

³ Eingesetzte Version PCL 1.8.0, verfügbar unter www.pointclouds.org.

matischen Volumenbestimmung wurde für beide Bestimmungen die identisch vorverarbeitete 3D-Punktwolke verwendet.

Manuelle Volumenbestimmung

Die manuelle Volumenbestimmung basiert auf einem vermaschten Modell (Mesh) der 3D-Punktwolke, dessen Volumen abschließend bestimmt wird. Der initiale Schritt, das Zuschneiden der 3D-Punktwolke auf den relevanten Teil der Erosionsstruktur, erfolgte mit CloudCompare. Der Zuschnitt wurde manuell entlang der Bruchkante zwischen Bodenoberfläche und Erosionsstruktur vorgenommen. Anschließend wurde die verbleibende 3D-Punktwolke mit der Funktion "Delaunay 2.5 (best fit plane)" in ein Mesh überführt. Die Funktion berücksichtigt bei der Vermaschung/Triangulation das Delaunay-Kriterium. Im Wesentlichen wird die 3D-Punktwolke auf eine bestangepasste Ebene projiziert, die Triangulation in 2D durchgeführt und anschließend erfolgt die Übertragung auf die 3D-Punktwolke. Das so erhaltene Mesh wird zur Volumenberechnung in MeshLab geladen. MeshLab setzt für die Berechnung ein geschlossenes ("wasserdichtes") 3D-Objekt voraus. Dies bedingt einen weiteren Berechnungsschritt zum schließen etwaiger Lücken in der Triangulation mit der Funktion "Close Holes". Die in MeshLab verwendete Methode basiert auf LIEPA (2003) und füllt Löcher in Meshs unter Berücksichtigung der Kriterien Winkel und Größe der umliegenden Teile des triangulierten Meshes (PÉREZ ET AL. 2016). Abschließend lässt sich das Volumen auf der Basis des geschlossenen Meshs berechnen.

Automatisierte Volumenbestimmung

Die automatisierte Volumenbestimmung bildet die notwendigen Berechnungsschritte mit Hilfe der PCL ab, so dass eine Bestimmung mit wenigen Nutzereingriffen zur Feinabstimmung von Parametern erfolgt.

Zunächst wird die Punktwolke mit Hilfe eines Voxelgrid-Filters mit einer Leaf Size von 2 mm gefiltert. Durch die gefilterte Punktwolke wird mittels RANSAC eine Ebene geschätzt, mit der die Erosionsstruktur von der Umgebung getrennt wird (vgl. Abbildung 7a). Die verbleibenden und zur Erosionsstruktur gehörenden 3D-Punkte werden anschließend mit einem EuclideanClusterExtraction-Verfahren segmentiert (vgl. Abbildung 7b). Unter der Annahme, dass das größte Cluster die Erosionsstruktur repräsentiert, wird nur dieses für die weiteren Berechnungen verwendet. Die Punktzahl des Clusters variiert je nach Punktzahl der originären Punktwolke zwischen 37000 Punkten für Form 2 und 95000 Punkten für Form 1. Die so erhaltene Punktwolke wird mit einer Rasterweite von $w = 1\text{ mm}$ und $b = 1\text{ mm}$ gerastert (vgl. Abbildung 7c) und für jede Rasterzelle der Abstand in Z-Richtung zu der Ebene berechnet. Durch Aufsummieren der Rasterzellen ergibt sich das Volumen entsprechend Gl. (1).

$$V = \sum_i ((w \cdot b) \cdot (\bar{Z}_{Raster_i} - \bar{Z}_{Ebene})) \quad (1)$$

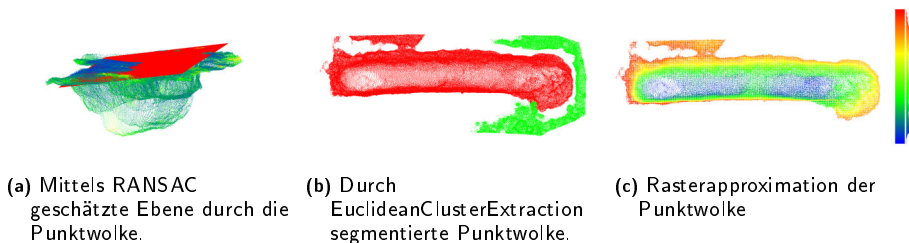


Abbildung 7: Ablauf der automatischen Volumenbestimmung

3.2.3. Ergebnisse

Als Ergebnisse aus den beiden Verfahren liegen Werte für die ermittelten Volumina der beiden künstlichen Erosionsformen und als Referenzwert die mittels Verfüllung bestimmten Volumina vor (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Ermittelte Volumina der künstlich angelegten Erosionsformen und deren Abweichung zur Referenz aus der Verfüllung mit Quarzsand.

Form	Methode	Volumen [ml]	Abweichung
Form 1	Verfüllung mit Quarzsand	2185,14	-
	3D-Punktwolke - manuell	2104,00	-3,71 %
	3D-Punktwolke - automatisiert	2099,00	-3,94 %
Form 2	Verfüllung mit Quarzsand	1477,37	-
	3D-Punktwolke - manuell	1532,00	+3,70 %
	3D-Punktwolke - automatisiert	1249,00	-15,46 %

Die Abweichungen vom Referenzwert liegen bei Form 1 für beide Methoden unter 4 %. Bei Form 2 kommt es in der automatisierten Berechnung zu einer größeren Abweichung. Der Grund für die größeren Abweichungen kann auf Bereiche mit geringer Datendichte im Scan zurückgeführt werden (siehe Abbildung 8). Die automatisierte Volumenbestimmung ist im jetzigen Entwicklungsstand nicht robust gegenüber Lücken in den Daten. Dies kann perspektivisch durch eine Interpolation der Lücken gelöst werden.

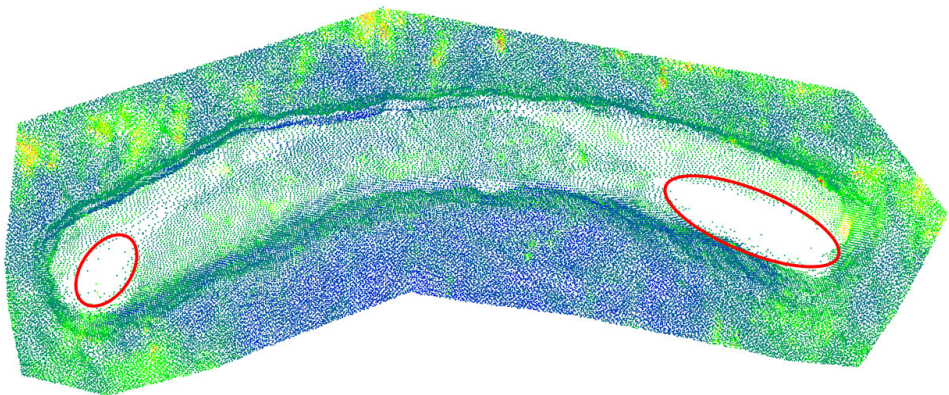


Abbildung 8: Scan der Form 2 mit rot markierten Bereichen mit geringer Datendichte im Scan.

4. Diskussion

4.1. Einsatzfelder komplexe Schadkartierung

Die komplexe Schadkartierung ist eine Methode mit hoher Flächenleistung und schafft es damit einen flächenhaft-differenzierten Überblick über das Erosionsgeschehen und die Größenordnung der Bodenabträge in einem größerem (mehrere 10er bis 100 ha) Untersuchungsgebiet zu liefern. Nach einmaligen Erosionsereignissen durchgeführte Kartierungen erlauben die Analyse der räumlichen Wirkzusammenhänge, geben einen guten Überblick über das grundsätzliche Prozessgeschehen und können für die Planung von Maßnahmen zur Verhinderung von Erosionsschäden genutzt werden. Zusätzlich bildet die komplexe Schadkartierung den Kern von langfristigen Monitoringprogrammen. Mit diesen können über viele Jahre hinweg durch Bodenerosion hervorgerufene Schäden auf den Ackerflächen und angrenzenden Flächen erfasst werden. Zusätzlich sind Aussagen zur Höhe der Bodenabträge verschiedener Anbaukulturen und Bodenbearbeitungsmethoden möglich. Entsprechende Programme werden aktuell in Niedersachsen (STEINHOFF-KNOPP & BURKHARD 2018), Baden-Württemberg (STEINHOFF-KNOPP 2018) und dem schweizer Mittelland (PRASUHN 2011) betrieben. Nicht geeignet ist das Verfahren zur Generierung von hochgenauen Aussagen zur Höhe des Bodenabtrags einzelner Erosionsformen.

4.2. UAV-gestützte Photogrammetrie und terrestrisches Laserscanning

Wie anhand der Beispiele gezeigt wurde, besitzen die UAV-gestützte Photogrammetrie und das terrestrische Laserscanning ein großes Potential Veränderungen der Bodenoberflächen skalenübergreifend und berührungslos zu erfassen. Methodische Herausforderungen liegen in der Geo-Referenzierung sowie in der Genauigkeitsbeurteilung der im Feld erfassten Daten.

Die eigentliche Quantifizierung des Bodenabtrags durch alle Erosionstypen (sowie die Wiederanlagerung von Bodenpartikeln) kann über die multi-temporale Erfassung und Auswertung von digitalen Geländemodellen der Bodenoberfläche gelöst werden (vgl. ELTNER ET AL. 2015). Die Methoden sind zumeist auf zuvor definierte Testflächen beschränkt und benötigen Zielzeichen, die mit geodätischen Methoden erfasst werden, um ein festes lokales Bezugssystem für hochgenaue multi-temporale Erfassungen zu definieren und somit die Detektierung von Bodenveränderungen im mm-Bereich zu ermöglichen. Dabei ist die Maskierung des Erosionsprozesses durch andere Bodenprozesse zu berücksichtigen: durch hydrostatische Effekte können insbesondere tonreiche Böden Quellen und Schrumpfen; durch Bodenbearbeitung aufgelockerte Böden setzen sich und verringern damit die Mächtigkeit der Bodensäule; die Rauigkeit der Bodenoberfläche nimmt nach der Bodenbearbeitung und bedingt durch niederschlagsinduzierte Verschlämmung im Jahresverlauf ab. KAISER ET AL. (2018) diskutieren detailliert die Probleme in der Interpretation von hochgenau erfassten Veränderungen der Bodenoberfläche.

Neben der multi-temporalen Erfassung und Analyse der Bodenoberfläche können nach einem Erosionsereignis vorgenommene Datenaufnahmen zur Bestimmung der Bodenverluste durch lineare Erosionsformen genutzt werden. Methodische Grundlage dafür sind Verfahren mit denen Rillenstrukturen aus den Geländemodellen der Bodenoberfläche extrahiert werden können, um anschließend deren Volumen zu bestimmen. Eine händische und eine automatisierte Lösung auf der Basis von 3D-Punktwolken wurde hier vorgestellt. Der Vorteil dieser Verfahren liegt in der flexiblen Einsetzbarkeit: unabhängig von räumlich klar zu definierenden Versuchsfächen, können einzelne Erosionsformen direkt nach ihrem Auftreten erfasst werden. Basis dafür ist bei der UAV- und TLS-Aufnahme eine stabile Geo-Referenzierung mit Bodenkontrollpunkten, die z. B. mit RTK-GNSS mm-genau eingemessen werden können. Zu berücksichtigen ist, dass mit festinstallierten Messplots erreichbare Genauigkeiten in diesem flexiblen Aufnahmeverfahren nicht erreicht werden können. Daneben muss der zeitliche Aufwand für die Extraktion der linearen Erosionsformen und Bestimmung der Volumina durch den bisher geringen Automatisierungsgrad als sehr hoch eingeschätzt werden.

Bei der primären Datenerfassung im Gelände mit TLS und UAV sind technische Beschränkungen zu berücksichtigen. Moderne (Rotor-)UAVs sind in Abhängigkeit von Modell und äußeren Bedingungen auf 20 bis 30 Minuten Flugzeit beschränkt. Starker Wind und Regen können die Erfassung unmöglich machen. Dabei setzt eine hohe Genauigkeit und Auflösung eine geringe Flughöhe des UAV voraus und geht daher mit einer geringen Flächenabdeckung einher. Im Praxisfall ist zwischen Genauigkeit und Flächenleistung abzuwägen.

Beim terrestrischen Laserscanning ist grundsätzlich von einer geringen Flächenabdeckung auszugehen. Durch flacher werdende Auftreffwinkel verringert sich die Qualität der Erfassung mit der Entfernung vom TLS. Wegen Abschattungseffekten müssen linienhafte Erosionsformen stets von mindestens zwei Seiten erfasst werden und die übliche Geo-Referenzierung über Zielzeichen ist aufwendig. Damit ist die statische TLS-gestützte Datenerfassung vorrangig für die hochgenaue Erfassung kleinerer Flächen und Erosionsformen geeignet. Schnellere Erfassungen mittels kinematischem Laserscanning auf mobilen Plattformen ist insbesondere auf Ackerflächen eine Herausforderung hinsichtlich der Referenzierung. Stop&Go-Verfahren als Kombination aus mobiler Plattform und fester Stationierung besitzen das Potential, die Ziele stabile Referenzierung und große Flächenleistung zu erfüllen (HOLST ET AL. 2015). Mit der direkten Geo-Referenzierung der Laserscannerpositionen besteht eine effiziente Alternative zur Verwendung von Zielzeichen (PAFFENHOLZ 2012). Aktuelle UAV-Entwicklungen mit integriertem RTK-GNSS zeigen zudem die Potentiale auf auch bei der UAV-gestützten Erfassung auf Zielzeichen zu verzichten (MULAKA 2019).

Problematisch für die Erfassung von Erosionsformen bleibt auf der Bodenoberfläche vorhandene Vegetation. Bei dichter Vegetation kann mit keinem der hier vorgestellten Verfahren eine zielführende Erfassung der Bodenoberfläche vorgenommen werden. Kleinere Vegetationsbereiche können auf der Grundlage von 3D-Laserscandaten ermittelt und in den Punktwolken eliminiert werden (vgl. BRODU & LAGUE 2012). Die Möglichkeiten und Vorteile der synergetischen Fusion von TLS- und UAV-Daten diskutiert (ELTNER ET AL. 2016).

5. Fazit

Zur Erfassung und Quantifizierung von Bodenerosion durch Wasser stehen für verschiedene Skalen optimierte Methoden bereit. Die komplexe Schadkartierung dient dabei vorrangig der qualifizierenden Aufnahme von Schadmustern in der Landschaftsskala. Moderne Primärerfassungsmethoden nutzen UAV-gestützte Photogrammetrie und terrestrisches Laserscanning zur Generierung hochgenauer digitaler Oberflächenmodelle. Mit den zur Verfügung stehenden Techniken kann durch multi-temporale Aufnahmen Bodenerosion durch Wasser im Grundsatz skalenübergreifend erfasst werden. Mit der einmaligen Erfassung der Bodenoberfläche nach Erosionsereignissen können die Ausräumvolumina linearer Erosionsformen quantifiziert werden.

Herausfordernd ist dabei grundsätzlich die Maskierung von bodenerosionsinduzierten Veränderungen der Bodenoberfläche durch andere Prozesse (z. B. Quellen, Schrumpfen) und die Überführung von auf fest installierten Testflächen etablierten Methoden in standortunabhängige Verfahren. Hierzu sind insbesondere effiziente Verfahren zur zielzeichenunabhängigen Geo-Referenzierung und Methoden zur Quantifizierung der Ausräumvolumina linearer Erosionsformen weiter zu entwickeln.

Literatur

- ADHIKARI, K. & HARTEMINK, A. E. (2016): Linking soils to ecosystem services — A global review. *Geoderma* 262, S. 101-111. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.08.009.
- BOARDMAN, J. (2006): Soil erosion science: reflections on the limitations of current approaches. *Catena* 68, S. 73-86.

- BRODU, N. & LAGUE, D. (2012): 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Elsevier, 2012, 68, S. 121-134.
- CASTILLO, C., PÉREZ, R., JAMES, M. R., QUINTON, J. N., TAGUAS, E. V. & GÓMEZ, J. A. (2012): Comparing the Accuracy of Several Field Methods for Measuring Gully Erosion. *Soil Science Society of America Journal* 76. 4, S. 1319. DOI: 10.2136/sssaj2011.0390.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) (2017): DIN 19708: Bodenbeschaffenheit - Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. Beuth, Berlin, Ausgabedatum 2017-08.
- DONNER, R., RABEL, M., SCHOLL, I., FERREIN, A., DONNER, M., GEIER, A., JOHN, A., KÖHLER, C. & VARGA, S. (2019): Die Extraktion bergbaulich relevanter Merkmale aus 3D-Punktwolken eines untertagetauglichen mobilen Multisensorsystems. In: Alkhatib, H. & Paffenholz, J.-A. (Hrsg.), *GeoMonitoring 2019*, Hannover, S. 91-110. DOI: 10.15488/4515.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (DVWK) (1996): Bodenerosion durch Wasser. DVWK-Merkblatt 239. Bonn. 62 S.
- ELTNER, A., MULSCOW, C. & MAAS, H.-G. (2013): Quantitative Measurement of Soil Erosion from TLS and UAV Data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W2, S. 119-124.
- ELTNER, A., BAUMGART, P., MAAS, H.-G. & FAUST, F. (2015): Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. *Earth Surface Processes and Landforms* 40(6), S. 741-755.
- ELTNER, A., KAISER, A., CASTILLO, C., ROCK, G., NEUGIRG, F. & ABELLAN, A. (2016): Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments. *Earth Surface Dynamics* 4, S. 359-389.
- ELTNER, A., MAAS, H.-G. & FAUST, D. (2018): Soil micro-topography change detection at hillslopes in fragile Mediterranean landscapes. *Geoderma* 313, S. 217-232.
- EUROPEAN COMMISSION (2006): Thematic Strategy for Soil Protection. Commission of the European Communities, COM. Brussels. 231 S.
- LEDERMANN, T., HERWEG, K., LINIGER, H., SCHNEIDER, F., HURNI, H. & PRASUHN, V. (2008): Erosion Damage Mapping: Assessing Current Soil Erosion Damage in Switzerland. *Advances in geocology* 39, S. 236-283.
- EVANS, R. (2002): An alternative way to assess water erosion of cultivated land – field-based measurements. *Applied Geography* 22. 2, S. 187-207. DOI: 10.1016/S0143-6228(02)00004-8.
- HOLST, C., KUHLMANN, H., PAFFENHOLZ, J. A., & NEUMANN, I. (2015): *TLS im statischen, stop & go sowie kinematischen Einsatz..* Schriftenreihe DVW, Band 81, „Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS 2015)“, Wißner, S. 9-26
- KAISER, A., ERHARDT, A. & ELTNER, A. (2018): Addressing uncertainties in interpreting soil surface changes by multitemporal high-resolution topography data across scales. *Land Degradation & Development* 29. 8, S. 2264-2277. DOI: 10.1002/ldr.2967.
- KUTTERER, H., PAFFENHOLZ, J.-A. & VENNEGEERTS, H. (2009): Kinematisches terrestrisches Laserscanning. *zfv* 134. 2, S. 79-87.
- LEDERMANN, T., HERWEG, K., LINIGER, H., SCHNEIDER, F., HURNI, H. & PRASUHN, V. (2010): Applying erosion damage mapping to assess and quantify off-site effects of soil erosion in Switzerland. *Land Degradation & Development* 21. 4, S. 353-366. DOI: 10.1002/ldr.1008.

- LIEPA, P. (2003): Filling holes in meshes. SGP'03: Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing, San Diego, CA, USA, S. 200 -- 205.
- MORGAN, R. P. (2006): Soil erosion and conservation.. Malden, Mass. 304 S.
- MULAKA, J. (2019): Measurement Accuracy of the DJI Phantom 4 RTK & Photogrammetry. Whitepaper DroneDeploy & dji, 18 S.
- PAFFENHOLZ, J.-A. (2012): Direct geo-referencing of 3D point clouds with 3D positioning sensors. Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe C, Nr. 689.
- PAFFENHOLZ, J.-A. (2013): Effiziente Geo-Referenzierung von 3D Punktwolken und deren Nutzung für Monitoringaufgaben. In: Rüppel, U. (Hrsg.), 2. Darmstädter Ingenieurkongress. Bau und Umwelt. Darmstadt, Aachen, Shaker (Bauwesen), S. 581–588.
- PANAGOS, P.,STANDARDI, G.,BORRELLI, P.,LUGATO, E.,MONTANARELLA, L. & BOSELLO, F. (2018): Cost of Agricultural Productivity Loss due to Soil Erosion in the European Union. Land Degradation & Development. DOI: 10.1002/ldr.2879.
- PÉREZ, E.,SALAMANCA, S.,MERCÁN, P. & ADÁN, A. (2016): A comparison of hole-filling methods in 3D. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science 26. 4, S. 885-903. DOI: 10.1515/amcs-2016-0063.
- PRASUHN, V. (2011): Soil erosion in the Swiss midlands. Geomorphology 126. 1-2, S. 32-41. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.10.023.
- SCHWERTMANN, U.,VOGL, W. & KAINZ, M. (1990): Bodenerosion durch Wasser. Stuttgart. 64 S.
- STEINHOFF, B., BUG, J. & MOSIMANN, T. (2013): Einsatz eines mobilen GIS zur Kartierung von Bodenerosion durch Wasser. In: Bill, R., Flach, G., Korduan, P., Zehner, M. & Seip, S. (Hrsg.), Neue Horizonte für Geodateninfrastrukturen - Open GeoData, Mobility, 3DStadt. Berlin, S. 27 -- 32.
- STEINHOFF-KNOPP, B. (2018): Bodenerosionsmonitoring Baden-Württemberg. Unveröffentlicher Projektbericht. Hannover. 70 S.
- STEINHOFF-KNOPP, B. & BURKHARD, B. (2018): Soil erosion by water in Northern Germany: long-term monitoring results from Lower Saxony. CATENA 165, S. 299-309. DOI: 10.1016/j.catena.2018.02.017.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. (1978): Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. Washington. 69 S.