

Beobachtung und Rekonstruktion von Bodenerosionsprozessen mit permanenten Kamerastationen

OLIVER GROTHUM¹, LEA EPPLE², ANNE BIENERT¹ & ANETTE ELTNER¹

Zusammenfassung: Um Prozesse und Einflussgrößen der Bodenerosion besser verstehen und letztlich vorhersagen zu können, müssen der Verlust an Boden quantifiziert sowie die involvierten Prozesse betrachtet werden. Die räumlich-zeitlich hochaufgelöste Beobachtung ist insbesondere für die Kalibrierung und Validierung von physikalisch basierten Bodenerosionsmodellen wichtig. In diesem Kontext sind Zeitreihen kamerabasierter digitaler Geländemodelle bzw. deren Differenzenmodelle geeignet, um Erosionsprozesse hochaufgelöst zu quantifizieren. Im Folgenden wird ein Überwachungssystem und ein Vorgehen vorgestellt, welches autark und zeitsynchron Bilder erzeugt, sobald Regen einsetzt, sowie des Weiteren regelmäßig im 24-Stunden Rhythmus. Die über einen Zeitraum von einem Jahr gewonnenen Daten werden mit terrestrischen Laserscannerdaten und Daten von UAV-Befliegungen verglichen, um die Genauigkeiten der erzeugten DGMs zu überprüfen.

1 Einleitung

Um das Verständnis für Bodenerosionsprozesse und -mechanismen zu verbessern, sind die Quantifizierung des Bodenverlustes und die Erfassung der verschiedenen Prozesse auf unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Skalen wichtige Schritte (CÂNDIDO et al. 2020). Ein wertvolles Instrument, um Einblicke in Bodenerosionsprozesse zu gewinnen, ist bisher die künstliche Beregnung von Erosionsplots (HÄNSEL et al. 2016). Diese Methode ist zeitintensiv und Bodenverlustdaten werden auf einer begrenzten Fläche unter kontrollierten Regenbedingungen erfasst (MICHAEL 2000). Die ermittelten Daten werden für die prozessbasierte Modellkalibrierung und -validierung verwendet (SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2012). Am besten funktionieren diese Modelle für die Skalen, für die sie kalibriert und validiert wurden (BATISTA et al. 2019). Die zeitlich und räumlich hochaufgelöste Bewertung der Oberflächenveränderung auf der Feldskala ist notwendig, um die Prozesse der Bodenablösung, des Transports und der Deposition skalenübergreifend besser zu verstehen (ELTNER et al. 2018) und ein wichtiger Schritt, um die Modelle über die Skalen hinweg zu kalibrieren und zu validieren. 3D-Daten mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung, gewonnen mittels *Structure from Motion* (SfM, z.B. WESTOBY et al. 2012; ELTNER 2020) ermöglichen neue Einblicke in die Initialisierung und den Verlauf von Bodenerosionsprozessen (EPPLE et al. 2022).

In diesem Kontext sind kamerabasierte digitale Geländemodelle (DGM, engl. DTM) bzw. deren Differenzenmodelle in einer Zeitreihe (*Difference of DTM*; DoD) geeignet, um zeitlich hochaufgelöst Veränderungen im Erosionsprozess zu beobachten (ELTNER et al. 2017). Im Folgenden wird ein Überwachungssystem vorgestellt, welches autark und zeitsynchron Bilder erzeugt, sobald Regen einsetzt sowie einmal täglich zu einer festgelegten Zeit. Ein Vorgehen zur Verarbeitung der Bilder zu dichten Punktwolken und der weiteren Produktableitung wird vorgestellt. Die erzeugten Punktwolken werden anhand von Punktwolken, aufgenommen mittels

¹ Technische Universität Dresden, JProf. Geosensorsysteme, Helmholtzstr. 10, D-01069 Dresden, E-Mail: [oliver.grothum1, anne.bienert, anette.eltner]@tu-dresden.de

² Friedrich-Schiller-Universität Jena, Lehrstuhl für Physische Geographie, Löbdergraben 32, D-07743 Jena, E-Mail: lea.epple@uni-jena.de

terrestrischen Laserscannern (TLS) und Drohnen (*unmanned aerial vehicle*, UAV), validiert. Die abgeleiteten Genauigkeitskarten (*precision maps*; Standardabweichungen in Richtung der kartesischen Koordinatenachsen an den Verknüpfungspunkten) werden als Maß für die innere Genauigkeit betrachtet und hinsichtlich ihrer Variabilität über ein Jahr hinweg untersucht. Der Zeitraum erstreckt sich von Juni 2020 bis Mai 2021.

2 Daten und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Das ausgewählte Untersuchungsgebiet liegt auf den Testflächen ($51^{\circ}3'43''\text{N}$, $13^{\circ}15'36''\text{O}$) des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) bei Nossen, im Bundesland Sachsen. Auf diesem wurde ein Versuchsaufbau in Form von drei Monitoring-Posten, die jeweils fünf Kameras halten und mittels Microcontroller ausgelöst werden, aufgebaut. Der untersuchte Hang ist in Nord Nordost Richtung exponiert und weist eine Neigung von bis zu 14 % auf. In ihrer Ausdehnung hat die Testfläche eine Länge von 60 m und eine Breite von 12 m, von der 4 m tatsächlich untersucht wurden.

2.2 Experimentaufbau

Zur Überwachung des Feldhanges wurden drei Monitoring-Posten in einem Abstand von 16,2 m und 21,6 m zueinander aufgebaut. Die Monitoring-Posten sind Holzgestelle, die jeweils an vier Fußpunkten fixiert sind und in ca. 4 m Höhe eine horizontale Konstruktionstraverse tragen. Die Höhe der Monitoring-Posten wurde so gewählt, dass das Blickfeld der Kameras den Bereich zwischen zwei Posten abdeckt und dass die Bearbeitung der beobachteten Bodenoberfläche durch einen Traktor mit Grubber weiterhin gegeben ist. Die Fußpunkte liegen auf begehbaren Randstreifen, die nicht Teil des Beobachtungsbereichs sind und daher nicht in der Erosionsüberwachung berücksichtigt werden. Auf diesen Randstreifen befinden sich zudem Batterien mit ca. 70 Ah zur Versorgung der Masterstationen, die die Datenaufnahme der Kameras sowie die Aufzeichnung weiterer Umweltdaten steuern.

Die Kameras wurden in wasserdichten Gehäusen platziert. Jeweils fünf Kameras wurden pro Monitoring-Posten montiert. Die Kameras werden über eine Regenwippe je 0,2 mm Niederschlag ausgelöst. Die eingesetzten Kameras sind über ein Kabel innerhalb eines Postens miteinander und mit der jeweiligen Masterstation verbunden und werden somit gleichzeitig ausgelöst. Zudem ist jede Kamera einzeln mit einem Microcontroller (Arduino) verbunden, welcher als Backup eine tägliche (mit den anderen Kameras nur grob synchronisierte) Datenaufnahme (10 Uhr) steuert. Je Kamerabox ist ein Energiesystem (Batterie, Wechselrichter, Solarpanel) verbaut, das Strom für die Kamera und das Backup-Auslösesystem liefert.

Zur Skalierung und Transformation der berechneten Punktwolken in ein übergeordnetes Koordinatensystem wurden Passpunkte auf den Randstreifen platziert. Diese wurden mit einem Tachymeter Leica TCRM 1102 eingemessen und ermöglichen die Übertragung der Messungen in ein lokales Koordinatensystem.

Für einen Zeitraum von einem Jahr wird eine Zeitreihe von täglich aufgenommenen DGMs generiert. Dabei werden aus dem kompletten Datensatz die Bilder, die unabhängig von Regenerereignissen aufgenommen wurden, gesammelt und entsprechend ihrer Zeit als Bildverband zur jeweiligen Epoche abgelegt.

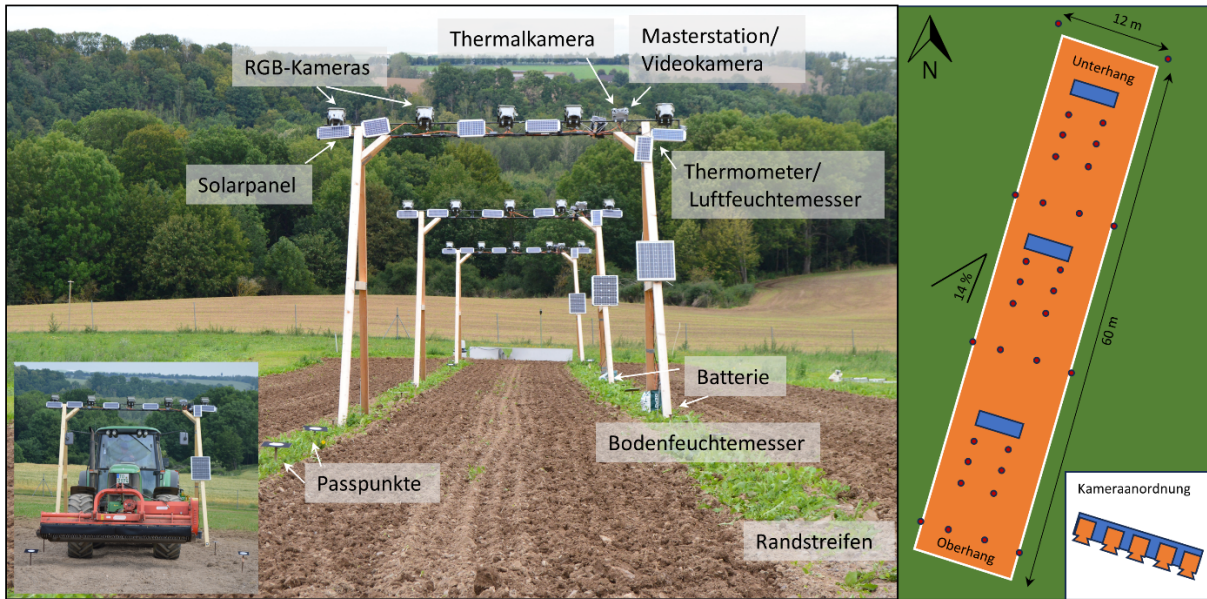


Abb. 1: Installation der Monitoring-Posten für eine hangweite Überwachung (links). Schematische Darstellung der Monitoring-Postenkonfiguration (blaue Balken) mit der Passpunktplatzierung (rote Punkte) (rechts)

2.3 Kamera-Daten

Zur Aufnahme wurden Spiegelreflexkameras (DSLR) des Typs Canon EOS 2000D installiert. Diese wurden zuvor mit Hilfe eines temporären, näherungsweise eingemessenen Koordinatenfeldes kalibriert. Um eine geometrische Stabilität über den Zeitraum der Datenaufnahme gewährleisten zu können, wurde der Aufnahmemodus auf *aperture priority* gesetzt. Dies resultiert in einer konstanten Blendenöffnung bei variierender Belichtungszeit. Aufgrund der festen Kamerainstallation ist dieses Vorgehen möglich. Die aufgenommenen Bilder werden automatisch anhand der Zeitstempel in Gruppen gleicher Aufnahmezeit eingeteilt.

2.4 TLS-Daten

Das gesamte Feld wurde mit einem Riegl VZ-400i Laserscanner aufgenommen. Der Scanner wurde an sechs Positionen mit gleichen Abständen entlang der länglichen Seiten des Feldes aufgestellt sowie an je einem Standpunkt an den kurzen Stirnseiten. Zur späteren Transformation ins lokale Koordinatensystem des Hanges wurden retro-reflektierende Zylinder auf den Passpunkten platziert. Die Rohdaten wurden mit der Scanner-eigenen Software RiSCAN PRO (Version: 2.8) verarbeitet und in kartesische Punktwolken überführt. Die Registrierung der Teilpunktwolken zu einer gesamten Punktwolke wurde über den *iterative closest point* Algorithmus (ICP, BESL & MCKAY 1992) realisiert. Im Anschluss erfolgte die Transformation der Gesamtpunktwolke in das lokale Koordinatensystem. Dabei wurden die Zylinder detektiert, ein Zylinderprimitiv eingepasst und der Fußpunkt der Zylinderachse als Passpunkt für die Transformation verwendet. Die Punktwolke weist eine Dichte von 67.000 Punkte pro m^3 an den TLS-Standpunkten und 2.300 Punkte pro m^3 in der Mitte des Feldes auf.

2.5 UAV-Daten

Zur Validierung der SfM-basierten DGMs (Abb. 2, rechts) werden bild-basierte Punktwolken aus UAV-Befliegungen herangezogen. Dazu wurde die Drohne Phantom 4 RTK von DJI verwendet. Um bodennahe Befliegungen in Höhen von 10-20 m durchzuführen, wurde die Drohne

im manuellen Modus bedient. Dabei wurde ein Überdeckungsgrad der Bilder von 80 % in Längs- und Querrichtung angestrebt. Zudem wurde ein zusätzlicher Streifen in konvergenter Aufnahme seitlich zum Feld durchgeführt, um eine stabile Bestimmung der äußeren und inneren Orientierung des Bildblocks zu gewährleisten. Die Bilder wurden in Metashape (Version 1.8.3) verarbeitet. Für die UAV-Kamera wurde ein einheitlicher Satz an Parametern der inneren Orientierung (Kamerakonstante c , Bildhauptpunktlage x_c , y_c sowie Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung k_1 , k_2 , k_3 , k_4 und der asymmetrischen Verzeichnung p_1 und p_2) bestimmt. Die Skalierung und Orientierung des Bildverbandes und letztlich der Punktwolke erfolgte über die Einführung der Passpunkte in die Bündelblockausgleichung. Die Punktwolke zeigt über das Testgebiet eine homogene Punktdichte.

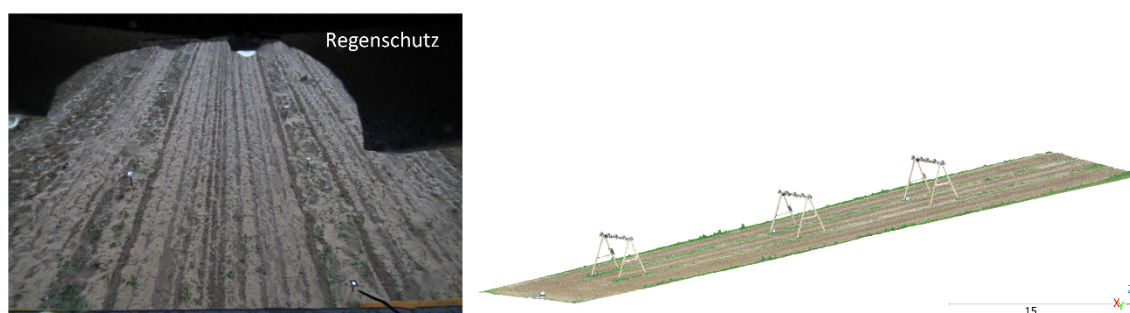


Abb. 2: Blickfeld einer RGB-Kamera auf den Hang mit Regenschutz und Tropfen auf dem Glashäuserkennbar als unscharfe Bereiche (links); Eingefärbte UAV-Punktwolke des Gesamthanges mit Monitoring-Posten (rechts)

2.6 Methoden

2.6.1. Punktwolkengenerierung mittels Zeitrafferbilder

Die Bilder der Monitoring-Posten werden in Metashape mittels SfM relativ zueinander orientiert. Im ersten Schritt werden die Bilder der gleichen Epoche miteinander verknüpft. Dabei werden zwischen den Bildern Verknüpfungspunkte detektiert, die anschließend Eingang als Beobachtungen in die Bündelblockausgleichung finden, um den Bildverband zu orientieren und die Parameter der inneren Orientierung zu schätzen. Für die Parameter der inneren Orientierung werden hier lediglich die Kamerakonstante und Hauptpunktlage neu geschätzt. Die Verzeichnungsparameter können aufgrund der Vorkalibrierung konstant gesetzt werden. Im Zuge der Ausgleichung wurden die Passpunktkoordinaten mit einer Genauigkeit von 1 mm eingeführt, wodurch auch die Skalierung und Transformation in das Projektkoordinatensystem vollzogen wird. Die Punktwolke wird anschließend mittels *Multi View Stereo (dense matching, MVS)* verdichtet, um die Punktauflösung zu erhöhen.

2.6.2. Punktwolkenbearbeitung und -vergleich

Die Verarbeitung der Epochen erfolgt wiederkehrend in den gleichen Schritten, sodass ein automatisierter Ablauf möglich und notwendig ist. Dafür wird die Python Bibliothek *CloudComPy* (CLOUDCOMPY 2023) eingesetzt. *CloudComPy* setzt inhaltlich und syntaktisch an die Programmierstruktur von CloudCompare an und ermöglicht einen einfachen Umgang der C++ Implementierungen mittels Python.

Die Punktwolken werden auf ein kleineres Gebiet zugeschnitten, um Vegetationsflächen und den Randstreifen auszuschließen. Dazu werden die Punktwolken in die XY-Ebene projiziert. Auf Basis der ersten Punktwolke werden entsprechend Polylinien zur Maskierung des engeren

Interessengebietes erzeugt. Anschließend werden Ausreißer entfernt, die nach dem *dense matching* übrigbleiben. Dabei werden Punkte, die weit über oder unter der Fläche liegen, entfernt, indem in die Fläche eine Ebene eingepasst wird und basierend auf der Distanz der Punkte zu dieser Ebene die Löschungen vorgenommen werden. Danach werden die Punktwolken verebnet, indem sie in die XY-Ebene gedreht werden. Dabei wird der Normalenvektor der erneut bestimmten Ebene (basierend auf den gefilterten Punkten) so gedreht, dass dieser parallel zum Basisvektor der Z-Richtung liegt. Die erhaltenen Transformationsparameter werden dann auf die gesamte Punktwolke angewandt. Zuletzt werden die Punktwolken in ein Raster mit 1 cm Auflösung interpoliert. Darauf folgende Punktwolken innerhalb der Zeitreihe werden mit derselben Transformationsmatrix verebnet.

Um den Vergleich der Punktwolken durchführen zu können, wird die erste Punktwolke als Referenz betrachtet, womit alle folgenden Punktwolken verglichen werden. Sollte die Ackerfläche bearbeitet werden, dann wird die Referenz auf die Punktwolke nach der Bearbeitung gesetzt und somit eine neue Referenzepoche festgelegt.

Zum Vergleich zweier Punktwolken bietet sich der *Multiscale Model to Model Cloud Comparison* Algorithmus (M3C2) von LAGUE et al. (2013) bzw. dessen Erweiterung um die Nutzung von *precision maps* (M3C2-PM) von JAMES et al. (2017) an. Dabei wird regulär ausgehend von der Referenzpunktwolke für jeden Punkt die Normale bestimmt. Aufgrund der Verebnung im Vorfeld wird für die Normale der Basisvektor in Z-Richtung für jeden Punkt gesetzt. Die Normale definiert die Achse eines Zylinders mit einem festgelegten Radius, der beide Punktwolken durchstößt. Die Teilmengen der beiden Punktwolken, die im Zylinder liegen, werden auf die Zylinderachse projiziert und gemittelt. Zudem werden aus den Streuungen der Punkte um die Mittelwerte jeweils eine Standardabweichung geschätzt (M3C2) oder eine Standardabweichung aus den *precision maps* in Richtung der Normale über Varianzfortpflanzung abgeleitet (M3C2-PM). Die *precision maps* sind hierbei Standardabweichungen an den Verknüpfungspunkten, die auf die dichte Punktwolke interpoliert wurden. Die Standardabweichungen werden zur Bestimmung der Signifikanz einer Differenz genutzt, indem das *Level of Detection* (LoD) für ein Konfidenzniveau von 95 % bestimmt wird.

2.6.3. Genauigkeitsbetrachtung

Um das Monitoring-System zu bewerten, wird eine Ergebnisbetrachtung nach äußerer und innerer Genauigkeit vorgenommen.

Äußere Genauigkeit: Bei der äußeren Genauigkeit wird die zeitnächste dichte Punktwolke des Monitoring-Systems mit den TLS- und UAV-Punktwolken einer Messung am 11.08.2020 verglichen. Lediglich der Offset, der sich aus der mittleren Abweichung beider Punktwolken ergibt, wird subtrahiert, um die relativen Differenzen zu erhalten. Als Vergleichsalgorithmus wird der M3C2 Algorithmus ohne *precision maps* verwendet, da das LoD in diesem Vergleich im Sinne einer Veränderungsdetektion nicht relevant ist.

Innere Genauigkeit: Die Auswertung der inneren Genauigkeit erfolgt über die Auswertung einer Jahresreihe von täglichen Punktwolken der Monitoring-Posten. Zur Evaluation der Variation und Entwicklung der *precision maps* im Rahmen des Untersuchungszeitraums werden in der ersten Punktwolke 1000 Kernpunkte (*core points*) mittels *farthest point sampling* (ELDAR et al. 1997) ausgewählt. Mit diesen werden über die Epochen hinweg die einzelnen *precision maps* linear interpoliert, sodass für jeden *core point* eine Zeitreihe der Standardabweichungen in den drei Koordinatenrichtungen berechnet werden kann. Dabei werden die Standardabweichung in X- und Y-Richtung (s_x und s_y) zu einer lateralen Genauigkeit zusammengefasst. Mit

Hilfe der M3C2-Ergebnisse wird eine Zeitreihenauswertung der räumlich verteilten LoD-Werte im gleichen Verfahren durchgeführt.

Für die Zeitreihen je Kernpunkt werden Statistiken, Mittelwert und Standardabweichung (als Maß für die temporale Streuung), berechnet und entsprechend diesem Wertepaar mittels *k-mean* Clustering gruppiert. Anhand der Gruppierung und deren räumlichen Verteilung werden Anomalien und Muster in der Punktverteilung sichtbar und bieten zusätzliche Informationen hinsichtlich der 3D-Rekonstruktionsgenauigkeiten und der räumlichen Korrelation.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Experimentaufbau – lessons learned

Eine große Schwierigkeit der Monitoring-Posten war deren Windanfälligkeit. Aufgrund der geplanten Beobachtung von Bodenerosion, welche v.a. bei Starkregen – also u.a. stürmischen Bedingungen – stattfindet, muss bei der Installation eine stabile Konstruktion die auch Stürmen standhält, berücksichtigt werden. Windige Versuchstage haben gezeigt, dass trotz Regenschutz Regentropfen das Glas der Kamergehäuse bedecken, was die Datenauswertung erschwert hat. Die Versuchsfläche wurde durch mechanische Bearbeitung von Vegetation freigehalten. Jedoch beeinträchtigen Insekten die Regenwippe im Frühjahr, indem sie die Kippvorrichtung häufig blockierten. Aufgrund der Passpunktconfiguration entlang der Randstreifen, konnten die Streifen nicht mechanisch bearbeitet werden, was zu erosionsbeeinflussenden Randeffekten aufgrund stehengebliebener Vegetation führte. Des Weiteren sollten zukünftige Experimente eine Infrarotkamera mit aktiver Beleuchtung integrieren, damit Regenereignisse, die während der Nacht stattfinden ebenfalls erfasst werden können.

3.2 Äußere Genauigkeit

Der Vergleich der SfM-Punktwolken aller drei Monitoring-Posten mit den TLS- und UAV-Punktwolken zeigt eine mittlere Höhenabweichung der gesamten Punktwolke zwischen 8 mm und 12 mm, welche auf Registrierungsfehler der einzelnen Systeme in das lokale Koordinatensystem zurückzuführen ist. Nach Anpassung der Höhe um diese Abweichung wurden die M3C2-Distanzen erneut berechnet, um die lokalen Differenzen zu betonen. Abb. 3 zeigt das Ergebnis dieser Differenzbildung des TLS-Systems (oben) und des UAV-Systems (unten). Die zentralen Flächen weisen die geringsten Distanzen (< 5 mm) auf und sind in der Fläche vergleichbar mit der inneren Genauigkeit der Vergleichssysteme. Auf den Randflächen nehmen die Distanzen zu (5 mm - 15 mm). Es gibt homogene Abschnitte (beispielsweise Abb. 3 – mittlere Abbildungen, rechte Fläche) sowie Abschnitte mit Distanzen unterschiedlicher Vorzeichen und stärkeren Gradienten zwischen verschiedenen Teilflächen (Abb. 3 – linke Abbildungen, linke Fläche). Bearbeitungsrillen sind im Differenzbild des TLS-basierten Vergleichs besonders sichtbar (Differenzen > 20 mm) und auch im UAV-basierten Vergleich wahrnehmbar (Differenzen ca. 10 mm).

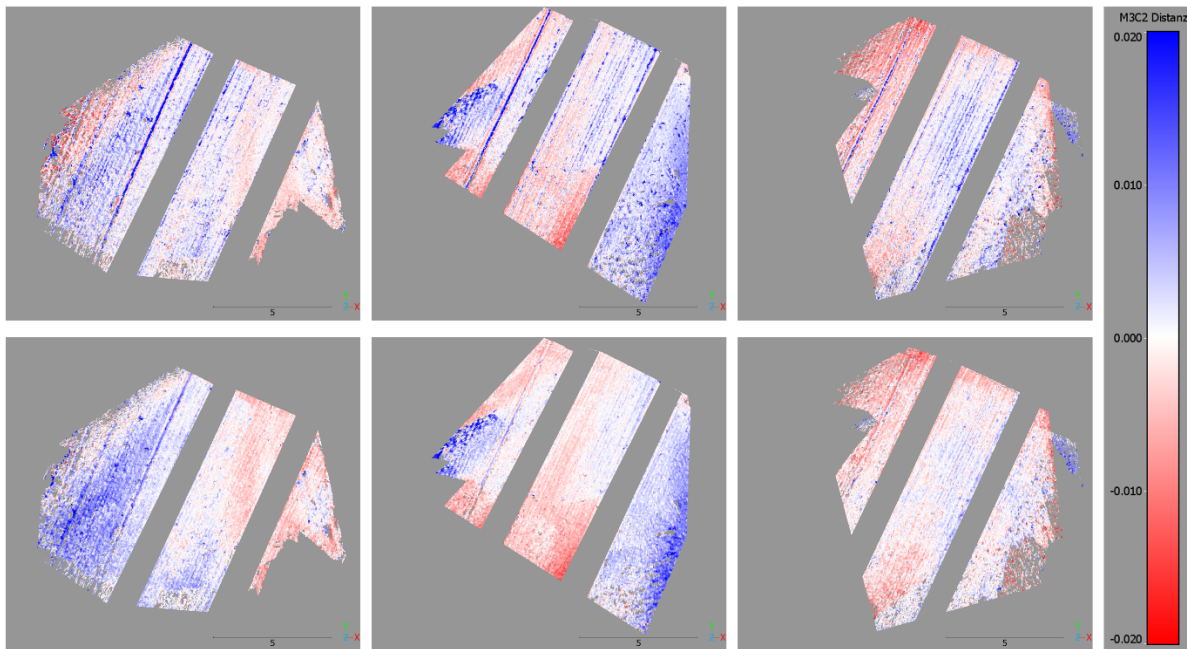


Abb. 3: M3C2-Vergleich der Punktwolken zwischen Monitoring-System und TLS (oben) und UAV (unten). Spaltenweise dargestellt ist der Vergleich von Oberhang, Mittelhang und Unterhang. Positive (blau) und negative (rote) Distanzen geben dabei Auskunft darüber, ob die Messungen des TLS- / UAV-System darüber bzw. darunter liegen

Die DSLR-basierte Rekonstruktion und Punktwolkengenauigkeit ermöglicht eine bessere Erfassung komplexerer Topografien im Nahbereich im Vergleich zu den TLS- und UAV-Daten. Insbesondere tiefere Rillen und Bearbeitungsspuren verursachen bei der TLS-Aufnahmekonfiguration Abschattungen, die zum einen Lücken in der Punktwolke zur Folge haben und zum anderen grobe Ausreißer (Geisterpunkte) oberhalb von Rillen und Spuren bedingen. Das UAV-System ermöglicht eine bessere Erfassung der Rillen aufgrund der Vogelperspektive. Aber auch hier wird die Topografie aufgrund des größeren Abstandes zur Interessensfläche weniger detailliert erfasst. Der Vergleich der Punktwolken zeigt, dass die mittlere Fläche eine bessere Übereinstimmung zu beiden Systemen (UAV und TLS) aufweist, auf den äußeren Flächen hingegen, bedingt durch die Kamerakonfiguration, stärkere Abweichungen und gar Richtungsänderungen der Abweichungen auftreten. Jedoch lassen sich diese systematischen Effekte bei der Differenzbildung reduzieren (BLANCH et al. 2021), unter der Annahme, dass die Systematik zwischen den zwei Epochen stabil geblieben ist.

3.3 Innere Genauigkeit

Abbildung 4 zeigt den zeitlichen Verlauf der *precision maps* und der LoD-Werte auf den *core points*. Es ist zu beobachten, dass die Genauigkeiten insbesondere im mittleren Bereich, nah zur zentralen Kamera am höchsten sind und mit zunehmendem Abstand zu diesem Punkt konzentrisch abnehmen. Die laterale Genauigkeit beträgt im Nahbereich ca. 2 mm und kann bis zu 30 mm zunehmen. Die Standardabweichungen der Zeitreihe betragen im Nahbereich weniger als 1 mm, und steigen in den entfernteren Bereichen auf 3 mm an. Die Höhengenaugigkeit beträgt im Nahbereich 2 - 3 mm und nimmt in der Fläche lediglich bis zu 11 mm zu. Die Standardabweichung der Zeitreihen ist in der Fläche mit ca. 1 mm stabiler im Vergleich zur lateralen Genauigkeit. Die LoD-Werte werden aus den *precision maps* abgeleitet und haben somit das gleiche konzentrische Verhalten wie die *precision maps*. Das LoD im Nahbereich beträgt

ca. 5 - 8 mm, steigt aber mit zunehmender Entfernung (ab ca. 6 m) auf über 10 mm an. Die Standardabweichungen der LoD-Zeitreihen betragen über die Fläche 1 mm.

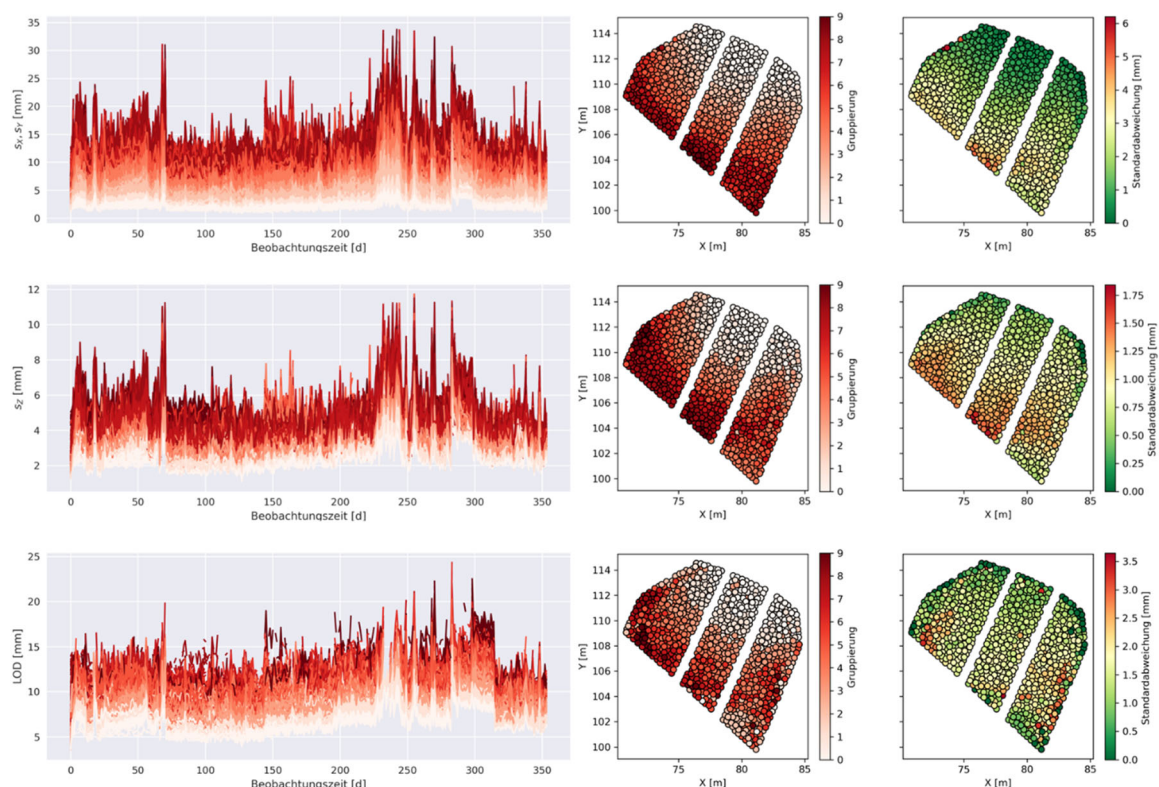


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der untersuchten *precision maps* (s_x , s_y , s_z) und dem LoD im Rahmen einer einjährigen, täglichen Beobachtung. Die Zeitreihen links entsprechen den jeweiligen *core points* der beiden rechten Grafiken. Die mittlere Grafik zeigt farblich die entsprechend dem Clustering zusammengefassten Gruppen und die rechte Grafik die Standardabweichung der dahinterliegenden Zeitreihe als Streumaß

Die Bildung der DoDs mit den entsprechenden LoDs ermöglicht eine Veränderungsdetektion ab 5 mm in Abhängigkeit zur Position zum Monitoring-Posten. Dadurch kann bereits u.a. die Beobachtung von Aggregatzerfall erfolgen und die Beobachtung von größeren Ereignissen (beispielsweise Rillenerosionen) ist möglich.

4 Fazit & Ausblick

Unser vorgestelltes Monitoringsystem ermöglicht im Vergleich zur TLS-Datenakquisition und zu UAV-Befliegungen die Berechnung von detaillierteren Modellen, die im Genauigkeitsbereich der UAV- und TLS-Daten liegen. Das System zeichnet seit über zwei Jahren autark Daten zu einem konstanten Zeitpunkt oder regenereignisgesteuert auf und ermöglicht die Erfassung von Bodenerosionsprozessen mit Genauigkeiten im sub-cm-Bereich. Künftige Validierungen mit Erosionsmodellen sollen untersuchen, inwieweit die Zeitreihen der kamerabasierten 3D-Modelle für die Erosionsmodellierung verwertbar sind.

5 Danksagung

Die gezeigte Forschungsarbeit wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, Projektnummer: 405774238). Weiterhin danken wir dem LfULG für die Bereitstellung und Bearbeitung der Testfläche.

6 Literaturverzeichnis

- BATISTA, P.V., DAVIES, J., SILVA, M.L. & QUINTON, J.N., 2019: On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough? *Earth-Science Review*, **197**, 102898, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102898>.
- BESL, P.J. & MCKAY N.D., 1992: A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **14**(2), 239-256, <https://doi.org/10.1109/34.121791>.
- BLANCH, X., ELTNER, A., GUINAU, M., & ABELLAN, A., 2021: Multi-Epoch and Multi-Imagery (MEMI) Photogrammetric Workflow for Enhanced Change Detection Using Time-Lapse Cameras. *Remote Sens.*, **13**, 1460, <https://doi.org/10.3390/rs13081460>.
- CÂNDIDO, B.M., QUINTON, J.N., JAMES, M.R., SILVA, M.L., CARVALHO, T.S. DE, LIMA, W. DE, BENIAICH, A. & ELTNER, A., 2020: High-resolution monitoring of diffuse (sheet or interrill) erosion using structure-from-motion. *Geoderma*, **375**, 114477, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114477>.
- CLOUDCOMPY, 2023: CloudCompy: Python wrapper for CloudCompare. release: 2023.07.05, <https://github.com/CloudCompare/CloudComPy>, letzter Zugriff 29.01.2024.
- ELDAR, Y., LINDENBAUM, M., PORAT, M. & ZEEVI, Y.Y., 1997: The farthest point strategy for progressive image sampling. *IEEE Transactions on Image Processing*, **6**(9), 1305-1315, <https://doi.org/10.1109/ICPR.1994.577129>.
- ELTNER, A., KAISER, A., ABELLAN, A. & SCHINDEWOLF, M., 2017: Time lapse structure-from-motion photogrammetry for continuous geomorphic monitoring. *Earth Surface Processes and Landforms*, **42**(14), 2240-2253, <https://doi.org/10.1002/esp.4178>.
- ELTNER, A., MAAS, H.-G. & FAUST, D., 2018: Soil micro-topography change detection at hillslopes in fragile Mediterranean landscapes. *Geoderma*, **313**, 217-232, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.034>.
- ELTNER, A. & SOFIA, G., 2020: Structure from motion photogrammetric technique. *Developments in Earth Surface Processes*, **23**, 1-24, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1>.
- EPPLE, L., KAISER, A., SCHINDEWOLF, M., BIENERT, A., LENZ, J. & ELTNER, A., 2022: A Review on the Possibilities and Challenges of Today's Soil and Soil Surface Assessment Techniques in the Context of Process-Based Soil Erosion Models. *Remote Sensing*, **14**(10), 2468, <https://doi.org/10.3390/rs14102468>.
- HÄNSEL, P., SCHINDEWOLF, M., ELTNER, A., KAISER, A. & SCHMIDT, J., 2016: Feasibility of High-Resolution Soil Erosion Measurements by Means of Rainfall Simulations and SfM Photogrammetry. *Hydrology*, **3**(4), <https://doi.org/10.3390/hydrology3040038>.
- JAMES, M.R., ROBSON, S. & SMITH, M., 2017: 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, **42**(12), 1769-1788, <https://doi.org/10.1002/esp.4125>.

- LAGUE, D., BRODU, N. & LEROUX, J., 2013: Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **82**, 10-26, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>.
- MICHAEL, A., 2000: Anwendung des physikalisch begründeten Erosionsprognosemodells EROSION 2D/3D: Empirische Ansätze zur Ableitung der Modellparameter. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- SCHINDEWOLF, M. & SCHMIDT, J., 2012: Parameterization of the EROSION 2D/3D soil erosion model using a small-scale rainfall simulator and upstream runoff simulation. *CATENA*, **91**, 47-55, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.007>.
- WESTOBY, M.J., BRASINGTON, J., GLASSER, N.F., HAMBREY, M.J. & REYNOLDS, J.M., 2012: 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, **179**, 300-314, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.