

Punktwolkenbasierte Bestimmung von starkregeninduzierten Bodenabträgen

Corinna Harmening | Simone Ott | Ramon Butzer |
Bastian Steinhoff-Knopp | Jens-André Paffenholz

1 Einleitung

Durch die landwirtschaftliche Nutzung sind Böden anfällig gegenüber Erosion durch Wind und Wasser. Erosion führt dauerhaft zu einer Degradation von Böden und minimiert damit die Fähigkeit von Böden Ökosystemleistungen bereitzustellen. Ernsthafte Folgen von Bodenerosion können sowohl auf den ackerbaulich genutzten Flächen (z. B. reduzierte Fruchtbarkeit, Missernten) als auch abseits von ihnen (z. B. Nährstoffeinträge in Gewässer, Verschmutzung von Infrastruktur) beobachtet werden. Der deutschen Welthungerhilfe zufolge ist bereits 23 % des kultivierten Bodens in Deutschland durch Bodenerosion degradiert (Welthungerhilfe 2022).

Die Überwachung des Ausmaßes von Bodenerosionsereignissen inklusive der steuernden Faktoren ist ein wichtiges Werkzeug im Bodenschutzvollzug und in der Planung von Maßnahmen in der Landwirtschaft (Abergel et al. 2008). Die klassischen Verfahren zur Beobachtung von Bodenerosionsprozessen wie beispielsweise der Einsatz von Erosionspins (Haigh 1977, Zhang und Rutherford 2020) oder Profilmetern (Hegazy 2013) sind in der Regel invasiv, da die entsprechenden Instrumente in den zu beobachtenden Flächen installiert werden (Afana et al. 2010). Gleichzeitig handelt es sich um lokale Messverfahren, sodass eine flächendeckende Erfassung von Erosion eine Vielzahl von Messstellen bzw. Messplots benötigt (Abergel et al. 2008). Letztere Eigenschaft sowie die Tatsache, dass es sich üblicherweise um manuelle Messverfahren handelt, führen dazu, dass die Beobachtung von Bodenerosion arbeits- und zeitintensiv ist (Schmid et al. 2012).

Mit dem terrestrischen Laserscanning (TLS) ist eine alternative Messtechnik verfügbar, mit deren Hilfe große Messbereiche schnell, effizient und kontaktlos erfasst werden können. Die resultierenden Daten sind von hoher räumlicher Auflösung und geben eine quasi-kontinuierliche Beschreibung der erfassten Szene. Aufgrund dieser Eigenschaften hat sich das TLS in den letzten Jahren als Messtechnik für das Erfassen von Bodenerosion etabliert (Eltner et al. 2013).

Beispielsweise untersuchen Asensio et al. (2019) die Einsatzmöglichkeiten von TLS, um den von Wind verursachten Bodenabtrag auf Ackerflächen zu bestimmen, während Cao et al. (2021) durch Niederschlag verursachte Bodenerosion von unbefestigten Straßen überwacht. Weiterhin wird das TLS für die Bestimmung von Bodenerosion an Hängen (Li et al. 2021) oder für die Quantifizierung des regeninduzierten Bodenabtrags auf Ackerflächen (Eltner und Baumgart 2015) eingesetzt.

In einem Großteil der in der Literatur zu findenden Anwendungen von TLS zur Erfassung von Bodenerosion werden die generierten Punktwolken zunächst gerastert, sodass anschließend digitale Geländemodelle (DGMs) abgeleitet werden können (Cao et al. 2021, Eltner und Baumgart 2015, Asensio et al. 2019). Durch die Differenzbildung zweier DGMs wird dann beispielsweise der erosionsbedingte Bodenabtrag zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten bestimmt. Charakteristisch für diese Vorgehensweise ist, dass für die Berechnungen die gemessenen Punktwolken direkt verwendet werden und somit das Messrauschen in seinem ganzen Ausmaß in die Bestimmung des Bodenabtrags einfließt. Eine Filterung der Punktwolken zur Reduktion des Messrauschens ist nur in seltenen Fällen implementiert (Eltner und Baumgart 2015, Li et al. 2021).

Als alternative Vorgehensweise wird in diesem Beitrag eine B-Spline-basierte Bestimmung des Bodenabtrags vorgestellt, bei der auf eine Rasterung der Daten verzichtet werden kann. Indem die Punktwolken mit Hilfe von B-Spline-Funktionen approximiert werden, erfolgt zunächst eine Filterung des Messrauschens. In diesen ersten Untersuchungen wird die Punktwolke hierfür in Profile unterteilt, sodass für jedes Profil eine geschätzte B-Spline-Kurve resultiert. Aus dem Vergleich der geschätzten Kurven über die Zeit lässt sich anschließend der erosionsbedingte Bodenabtrag für jedes Profil quantifizieren. Eine besondere Herausforderung stellt die Tatsache dar, dass die Untersuchungen auf ackerbaulich genutzten Flächen durchgeführt werden und es somit zu partiellen Verdeckungen des Bodens durch Vegetation kommt.

Der Beitrag gliedert sich wie folgt: In Abschnitt 2 werden die methodischen Grundlagen vorgestellt, die für den präsentierten Ansatz benötigt werden. Die Datenerfassung und -vorverarbeitung wird in Abschnitt 3 beschrieben. Abschnitt 4 stellt die B-Spline-basierte Bestimmung des erosionsbedingten Bodenabtrags vor. Zudem werden in diesem Abschnitt die erzielten Ergebnisse analysiert und bewertet. Abschließend erfolgt in Abschnitt 5 eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf zukünftige Untersuchungen.

2 Punktwolkenapproximation mit B-Spline-Kurven

Eine B-Spline-Kurve vom Grad p ist definiert durch (Piegl und Tiller 1997):

$$\hat{C}(u) = C(u) + \varepsilon(u) = \sum_{i=0}^{n_p} N_{i,p}(u) P_i, \quad 0 \leq u \leq 1. \quad (1)$$

Ein Kurvenpunkt $\hat{C}(u)$ ergibt sich somit als das gewichtete Mittel der $n_p + 1$ Kontrollpunkte P_i . Die entsprechenden Gewichte werden durch die Funktionswerte der B-Spline-Basisfunktionen $N_{i,p}(u)$ definiert, die sich rekursiv berechnen lassen (Cox 1972, Boor et al. 1976). Der Parameterraum wird durch einen Knotenvektor $U = [u_0, \dots, u_r]$ in Knotenspannen unterteilt.

Werden B-Spline-Kurven zur Approximation von Punktwolken eingesetzt, werden üblicherweise ausschließlich die Positionen der Kontrollpunkte geschätzt. Diese Vorgehensweise führt zu einem linearen Zusammenhang zwischen den Beobachtungen $C(u) = [C_x(u), C_y(u), C_z(u)]^T$ und den unbekanntem Kontrollpunkten P_i . Die optimale Anzahl an Kontrollpunkten ist ein Modellselektionsproblem und kann mit klassischen Informationskriterien oder mit Hilfe der strukturellen Risikominimierung bestimmt werden (Harmening und Neuner 2016). Letzteres Verfahren erlaubt auch die Auswahl des optimalen Grades p (Harmening 2020). Alternativ werden häufig kubische B-Splines mit $p = 3$ eingesetzt, da sie die geometrischen Kontinuitätseigenschaften einer großen Anzahl von Strukturen widerspiegeln (Piegl und Tiller 1997). Eine weitere Voraussetzung für den Einsatz von B-Spline-Kurven zur Approximation von Punktwolken ist die Zuweisung von geeigneten Kurvenparametern u zu den Beobachtungen. Für geordnete Punktwolken werden drei Standardverfahren unterschieden: die uniforme, die chordale und die zentripetale Parametrisierung (Piegl und Tiller 1997). Auf Basis der zugewiesenen Kurvenparametern lässt sich abschließend der Knotenvektor U bestimmen. Ein vergleichsweise einfaches Verfahren für die Knotenbestimmung wird von Piegl und Tiller (1997) vorgeschlagen, eine ausgefeiltere Methode zur Bestimmung der Knoten findet sich beispielsweise in Bureick et al. (2019).

3 Datenerfassung und -vorverarbeitung

Die Messkampagne wurde in der Nähe der Ortschaft Lamspringe im südlichen Niedersachsen durchgeführt. Der durchschnittliche Jahresniederschlag in dieser Gegend liegt bei 800 mm und damit nah am Durchschnitt für Deutschland. Aufgrund der Eigenschaften des Oberbodens und der relativ hohen Reliefenergie ist dieses Gebiet anfällig für Bodenerosion durch Wasser und ist aus diesem Grund

bereits seit 2000 Bestandteil eines Langzeitmonitorings (Steinhoff-Knopp und Burkhard 2018).

Mit dem Ziel die erosionsbedingte Bodenveränderung unter Anbaubedingungen zu bestimmen, wurde eine mit Mais bewirtschaftete Anbaufläche als Untersuchungsobjekt gewählt. Im Mai und Juni, wenn die Niederschlagswahrscheinlichkeit recht hoch ist, weist Mais noch eine geringe Bodenbedeckung auf (Auerswald et al. 2019). Da dies das Auftreten von Erosionsereignissen begünstigt, wurden im Zeitraum vom 11. Mai 2022 (direkt nach Aussaat) bis zum 8. Juni 2022 im ausgewählten Gebiet wöchentlich 3D-Punktwolken mit einem terrestrischen Laserscanner erfasst.

Insgesamt wurden drei Plots in der Größe von 2 m × 3 m ausgewählt. Jeder dieser Plots wurde von zwei Seiten aus einer Distanz von ca. einem Meter und mit einem daraus resultierenden Einfallswinkel von etwa 50° gescannt. Der verwendete Laserscanner Zoller+Fröhlich (Z+F) IMAGER 5010X besitzt eine integrierte Kamera, die zusätzlich zu den geometrischen und radiometrischen Informationen aus der 3D-Punktwolke (3D-Punktpositionen und Intensitätswerte) auch RGB-Werte liefert.

Um die erfassten 3D-Punktwolken zu registrieren, wurden in einem Abstand von 1 m um jeden Plot sechs Referenzkugeln mit einem Durchmesser von 145 mm angeordnet (Abb. 1 rechts). Sowohl die Positionen der Kugeln als auch die Ecken der Plots wurden mit Hilfe von Bodenhülsen markiert, die 25 cm tief in den Boden eingeschlagen wurden und während der gesamten Feldkampagne an ihren Positionen verblieben (Abb. 1 links). Da Veränderungen der Hülsenpositionen aufgrund der Bewirtschaftung der Fläche nicht auszuschließen sind, wurden diese Positionen vor jeder wöchentlichen Erfassung mit Hilfe von dreiminütigen GNSS-RTK-Messungen kontrolliert. Für alle beobachteten Punkte liegen die Variationen der Koordinaten über die Zeit innerhalb der erzielbaren GNSS-RTK-Genauigkeit.



Abb. 1: Messkampagne. Links: Aufbau zwischen den einzelnen Messwochen. Rechts: Aufbau während des Scans

Entsprechend des oben beschriebenen Messaufbaus wurde die Registrierung der 3D-Punktwolken zunächst targetbasiert durchgeführt. Aufgrund der Bewirtschaftung des Bodens zwischen den Messepochen lassen sich Veränderungen der Targetpositionen, deren Größenordnungen unterhalb der GNSS-RTK-Messgenauigkeit liegen, jedoch nicht ausschließen. Aus diesem Grund wurde die targetbasierte Registrierung in einem zweiten Schritt durch einen ebenenbasierten Ansatz der Software Scantra (Version 3.0.1.256, www.technet-gmbh.com) verbessert. Die entsprechenden Ebenenkorrespondenzen wurden dabei nur dann hergestellt, wenn keine signifikanten Bewegungen der Ebenen festgestellt werden konnten. Unter diesen Voraussetzungen konnte die ebenenbasierte Registrierung auf 100 bis 250 Ebenen pro Standpunkt gestützt werden, was zu einer Verbesserung der targetbasierten Registrierung führte.

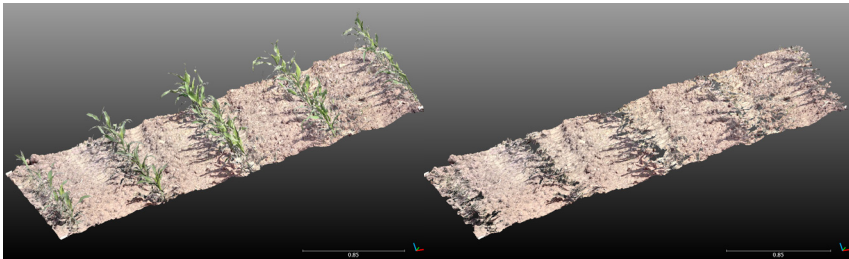


Abb. 2: Vegetationsfilterung. Links: Ungefilterte 3D-Punktwolke. Rechts: Gefilterte 3D-Punktwolke

Da die Messungen unter Feldbedingungen durchgeführt wurden und das Untersuchungsobjekt Bodenoberfläche somit während der vier Wochen der Datenerfassung stetig stärker durch Vegetation verdeckt wurde, ist außerdem eine Vegetationsfilterung der 3D-Punktwolken notwendig. Diese Trennung von Boden und Vegetation wurde mit Hilfe des CANUPO-Algorithmus (Brodu und Lague 2012) sowie des Cloth Simulation Filters (CSF) (Zhang et al. 2016) umgesetzt. Das entsprechende Ergebnis ist am Beispiel der fünften Messepoche in [Abb. 2](#) zu sehen. Obwohl ein Großteil der Vegetation entfernt werden konnte, sind in der als Boden klassifizierten 3D-Punktwolke weiterhin einige Punkte enthalten, die der Vegetation zugeschrieben werden müssen.

4 B-Spline-basierte Bestimmung des Bodenabtrags

4.1 Punktwolkenmodellierung

Der erste Schritt für die Bestimmung des Bodenabtrags zwischen den erfassten Messepochen ist die Modellierung der bereinigten Punktwolken mit Hilfe von B-Splines mit dem Ziel, das Messrauschen zu reduzieren.

Hierfür erfolgt zunächst eine Unterteilung der 3D-Punktwolken in jeweils 20 Punktwolkenstreifen mit einer Breite von $dx = 10,5$ cm. Die Punkte jedes Streifens werden anschließend in eine mittlere senkrechte Ebene projiziert, sodass 20 2D-Punktwolkenprofile entstehen. Für eine möglichst repräsentative Darstellung der gesamten Szene durch Profile werden die Profilrichtungen quer zu den Strukturen gewählt, die sich durch die Bewirtschaftung des Bodens ergeben (siehe [Abb. 3](#) für eine beispielhafte Darstellung der Epoche 1).

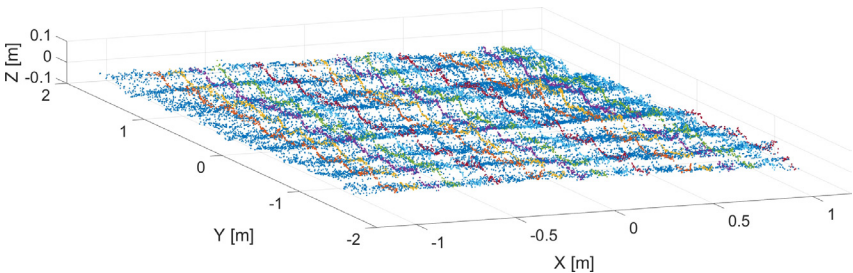


Abb. 3: Unterteilung der 3D-Punktwolke (blau) in Profile (bunt)

Die projizierten Punkte bilden die Grundlage für die Bestimmung von zwei-dimensionalen kubischen B-Spline-Kurven, deren Kontrollpunkte im linearen Gauß-Markov-Modell geschätzt werden (vgl. Abschnitt 2). Die optimale Anzahl der Kontrollpunkte wird mit Hilfe des Bayes'schen Informationskriteriums (Schwarz 1978) bestimmt und für die Bestimmung der Kurvenparameter wird die zentripetale Parametrisierung gewählt (vgl. Piegler und Tiller 1997). Darauf aufbauend wird der Knotenvektor nach Piegler und Tiller (1997) bestimmt.

[Abb. 4](#) zeigt beispielhaft das Ergebnis einer solchen Schätzung. Die in blau dargestellten Datenpunkte erhalten deutlich erkennbares Messrauschen, das durch die rot dargestellte B-Spline-Kurve erfolgreich reduziert wird.

Die geschätzten Kurven repräsentieren somit die Mikrotopographie der entsprechenden Bodenprofile, die in dieser Anwendung durch einige lokale Minima und Maxima charakterisiert werden, und bilden die Grundlage für die Bestimmung des Bodenabtrags.

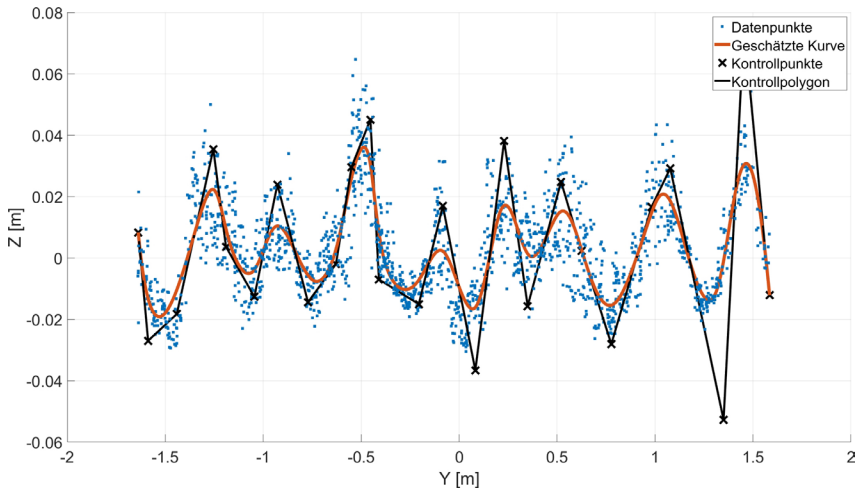


Abb. 4: Profilweise Punktwolkenmodellierung mit B-Spline-Kurven

4.2 Bestimmung des Bodenabtrags

Das Prinzip zur profilweisen Quantifizierung des Bodenabtrags ist in Abb. 5 beispielhaft für ein Profil skizziert. Zu sehen ist in blau die geschätzte B-Spline-Kurve der ersten Messepoche, die in diesem Fall als Referenzeпоche dient. Die rote B-Spline-Kurve repräsentiert die Mikrotopographie einer der nachfolgenden Epochen E_i .

Das Ziel ist die Bestimmung des profilweisen Bodenabtrags der i -ten Messepoche bezogen auf die Referenzeпоche E_1 und somit die Bestimmung des Flächeninhalts $A_{\Delta,i}$ der gestrichelt dargestellten Fläche.

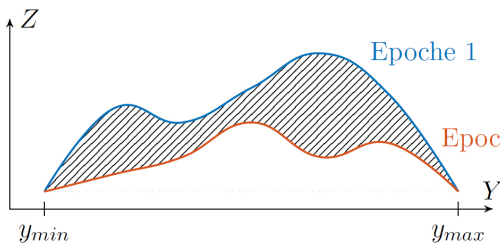


Abb. 5:

Bestimmung des Bodenabtrags. Blau: Kurve der ersten Messepoche; rot: Kurve einer der nachfolgenden Messepochen. Gesucht ist der Flächeninhalt der gestrichelt dargestellten Fläche.

Dieser gesuchte Flächeninhalt ergibt sich aus der Differenz der Flächeninhalte unter den beiden Kurven:

$$A_{\Delta,i} = A_{E_i} - A_{E_i}, \quad i = 2, \dots, 5 \quad (2)$$

mit:

A_{E_1} : Flächeninhalt unter der B-Spline-Kurve der ersten Messepoche

A_{E_i} : Flächeninhalt unter der B-Spline-Kurve der i -ten Messepoche

Die Flächeninhalte unter den B-Spline-Kurven lassen sich durch Integration der Kurven ermitteln:

$$A_{E_j} = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} C_j(u) du, \quad j = 1, \dots, 5. \quad (3)$$

Zu beachten ist hierbei, dass die Integralbildung nur dann den gesuchten Flächeninhalt unterhalb der Kurve liefert, wenn diese vollständig oberhalb von $Z = 0$ verläuft. Dies ist in den erfassten Daten zunächst nicht der Fall (vgl. Abb. 4). Da im Folgenden ausschließlich relative Größen betrachtet werden, werden alle Kurven eines Profils um denselben Wert nach oben verschoben, sodass die geforderte Bedingung erfüllt ist. Die Größe dieses Wertes ist aufgrund der Differenzbildung in Formel (2) ohne Auswirkungen auf die Bestimmung von $A_{\Delta,i}$.

Im letzten Schritt wird über den berechneten Flächeninhalt $A_{\Delta,i}$ und die bekannte Breite dx des entsprechenden Punktwolkenstreifens das Volumen $V_{\Delta,i}$ des Bodenabtrags innerhalb des Streifens bestimmt:

$$V_{\Delta,i} = A_{\Delta,i} \cdot dx, \quad i = 2, \dots, 5. \quad (4)$$

Diese Berechnungen werden für jeden der 20 Punktwolkenstreifen durchgeführt, wobei die Auswertung der Integrale in Formel (3) numerisch mit Hilfe der Trapezformel erfolgt.

4.3 Ergebnisse

In Abb. 6 sind für einige ausgewählte Profile beispielhaft die Ergebnisse der Bodenabtragsbestimmung zu sehen. In den Profilen 11 bis 14 (Nummerierung von links nach rechts in Abb. 3) sind die berechneten Werte für $V_{\Delta,i}$ für alle Messepochen positiv (Abb. 6 links). Bezogen auf die erste Messepoche hat damit entsprechend der Formel (2) in allen vier Profilen ein Bodenabtrag stattgefunden. Beim Vergleich der vier Kurven untereinander ist zu erkennen, dass dieser Bodenabtrag über die Epochen 2, 3 und 5 größer wird, was den Erwartungen

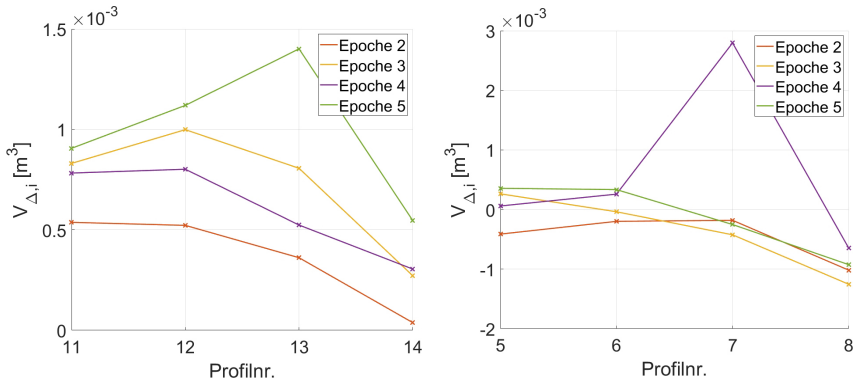


Abb. 6: Beispielhafte Ergebnisse der Bodenabtragsbestimmung. Links: Profile 11 bis 14. Rechts: Profile 5 bis 8

entspricht. Das vorgestellte Verfahren liefert somit plausible Werte für den profilweisen Bodenabtrag in diesem Bereich der Punktwolke.

Gleichzeitig fällt jedoch auf, dass sich die Kurve der Epoche 4 nicht entsprechend einordnet. Die berechneten Werte deuten vielmehr an, dass in der Epoche 4 im Vergleich zu der vorherigen Epoche 3 zunächst wieder eine Erhöhung des Bodens stattgefunden hat, bevor dieser in Epoche 5 wieder abgetragen wurde. Erklärt werden kann dies mit einer Quellung des Bodens durch Befeuchtung zwischen Epoche 3 und 4 und einem anschließenden Abtrag zwischen Epoche 4 und 5.

Noch stärker ist dieser Effekt in den Profilen 7 und 8 (Abb. 6 rechts) zu erkennen: In beiden Profilen ist für den Großteil der Messepochen der Bodenabtrag negativ. Entsprechend dieser Ergebnisse scheint in den Profilen 7 und 8 somit kein Bodenabtrag stattgefunden zu haben, sondern – im Gegenteil – es scheint eine Akkumulation aufgetreten zu sein. Theoretisch können Erosionsereignisse auch zur Umverteilung von Bodenmaterial im Bereich der beobachteten Plots führen, sodass ein Aufwuchs der Bodenoberfläche durch Ablagerung in bestimmten Bereichen auch bei Erosionsereignissen möglich ist. Eine genauere Untersuchung der entsprechenden Bereiche der Punktwolken zeigt jedoch eine andere Ursache für diese negativen Werte. In Abb. 7 sind beispielhaft für das Profil 8 die Punktwolken und die geschätzten Kurven der Epochen 1, 3 und 5 dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass in den Punktwolken der Epochen 3 (grün) und 5 (gelb) eine Reihe von Ausreißern in den Bereichen der lokalen Maxima vorhanden sind. Bei diesen Ausreißern handelt es sich um Fehlklassifizierungen in der Vegetationsfilterung: Punkte, die eigentlich Vegetation beschreiben, werden der Bodenklasse zugeordnet und verfälschen dementsprechend das Ergebnis der Kurvenschätzung. Infolgedessen beschreiben die resultierenden Kurven

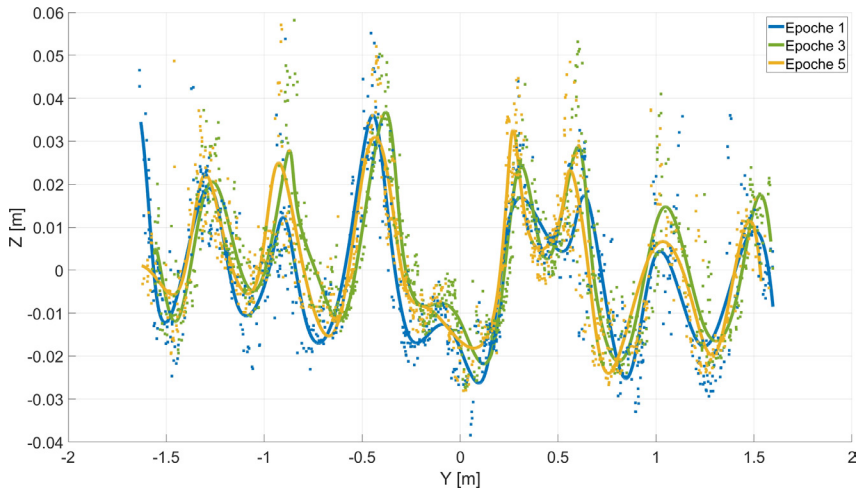


Abb. 7: B-Spline-Kurven unterschiedlicher Messepochen im Profil 8

nicht länger die reine Mikrotopographie des Bodens, sondern enthalten zusätzlich Einflüsse der Vegetation. Hierdurch entsteht der falsche Eindruck, dass sich über die Zeit Bodenmaterial angesammelt hat.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein punktwolkenbasiertes Verfahren zur profilweisen Bestimmung von erosionsbedingtem Bodenabtrag vorgestellt. Den Kern des Verfahrens stellt die profilweise Modellierung der erfassten Punktwolken mit Hilfe von B-Spline-Kurven dar. Durch Integration der entsprechenden B-Spline-Kurven und den Vergleich der jeweiligen Flächeninhalte lässt sich der erosionsbedingte Bodenabtrag für jedes Profil quantifizieren.

Obwohl die Anwendung des vorgestellten Ansatzes auf Messdaten sein Potenzial zeigt, wird vor allem eine Schwierigkeit deutlich: Dadurch, dass die Untersuchungen auf kultiviertem Boden durchgeführt wurden, wird bei der Datenerfassung nicht ausschließlich die relevante Bodenoberfläche erfasst, sondern zusätzlich die sich ständig verändernde Vegetation. Für die richtige Quantifizierung des Bodenabtrags ist eine vollständige und korrekte Trennung von Boden und Vegetation in den Punktwolken essentiell. Die in diesem Beitrag hierfür eingesetzten Verfahren zur Vegetationsfilterung, der CANUPO-Algorithmus sowie der Cloth Simulation Filter, zeigen zwar grundsätzlich Erfolg, können jedoch mit den gewählten Parametern und für die hier vorgestellten Untersuchungen den Vegetationsteil nicht zufriedenstellend entfernen.

Zukünftige Untersuchungen werden sich aus diesem Grund mit der Weiterentwicklung der Vegetationsfilterung beschäftigen. Die Implementierung einer robusten Schätzung der B-Spline-Kurven vermindert ebenfalls den Einfluss von nicht vollständig vermeidbaren Fehlklassifizierungen.

Weiterhin ist die Erweiterung der bislang rein profilweisen Betrachtungsweise auf eine flächenhafte angestrebt.

Literatur

- Abergel, S., Filin, S., Goldshleger, N. (2008): Measurement of Erosion in Agricultural Fields Using Monoscopic Photogrammetry. In: Proceedings of the FIG Working Week 2008, Stockholm, Sweden, 14–19 June 2008.
- Afana, A., Sole-Benet, A., Perez, J.L. (2010): Determination of Soil Erosion Using Laser Scanners. In: Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science, Brisbane, Australia, 1–6 August 2010.
- Asensio, C., Weber, J., Lozano, F., Mielnik, L. (2019): Laser-scanner used in a wind tunnel to quantify soil erosion. In: *Int. Agrophys.* 33 (2), 227–232. DOI: [10.31545/intagr/109424](https://doi.org/10.31545/intagr/109424).
- Auerswald, K., Fischer, F., Winterrath, T., Brandhuber, R. (2019): Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 23 (4), 1819–1832. DOI: [10.5194/hess-23-1819-2019](https://doi.org/10.5194/hess-23-1819-2019).
- Boor, Carl de; Lyche, Tom; Schumaker, Larry L. (1976): On Calculating with B-Splines II. Integration. In: L. Collatz, H. Werner und G. Meinardus (Hg.): *Numerische Methoden der Approximationstheorie/Numerical Methods of Approximation Theory*. Basel: Birkhäuser Basel, 123–146.
- Brodu, N., Lague, D. (2012): 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 68, 121–134. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006).
- Bureick, J., Alkhatib, H., Neumann, I. (2019): Fast converging elitist genetic algorithm for knot adjustment in B-spline curve approximation. In: *Journal of Applied Geodesy* 13 (4), 317–328. DOI: [10.1515/jag-2018-0015](https://doi.org/10.1515/jag-2018-0015).
- Cao, L., Wang, Y., Liu, C. (2021): Study of unpaved road surface erosion based on terrestrial laser scanning. In: *CATENA* 199, S. 105091. DOI: [10.1016/j.catena.2020.105091](https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105091).
- Cox, M. G. (1972): The Numerical Evaluation of B-Splines. In: *IMA J Appl Math* 10 (2), 134–149. DOI: [10.1093/imamat/10.2.134](https://doi.org/10.1093/imamat/10.2.134).
- Eltner, A., Baumgart, P. (2015): Accuracy constraints of terrestrial Lidar data for soil erosion measurement: Application to a Mediterranean field plot. In: *Geomorphology* 245, 243–254. DOI: [10.1016/j.geomorph.2015.06.008](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.008).
- Eltner, A., Mulrow, C., Maas, H.-G. (2013): Quantitative measurement of soil erosion from TLS and UAV data. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XL.
- Haigh, M. J. (1977): The use of erosion pins in the study of slope evolution. In: *Technical Bulletin 18*, British Geomorphological Research Group.

- Harmening, C. (2020): Spatio-temporal deformation analysis using enhanced B-spline models of laser scanning point clouds. Dissertation, TU Wien, Wien.
- Harmening, C., Neuner, H. (2016): Choosing the Optimal Number of B-spline Control Points (Part 1: Methodology and Approximation of Curves). In: Journal of Applied Geodesy 10 (3). DOI: [10.1515/jag-2016-0003](https://doi.org/10.1515/jag-2016-0003).
- Hegazy, R. (2013): Soil Surface Profile Computation Using Portable Profile Meter with Image Processing and Tracking Technique. In: Global Journal of Researches in Engineering 13 (3). DOI: [10.6084/M9.FIGSHARE.3189643](https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.3189643).
- Li, P., Hao, M., Hu, J., Gao, C., Zhao, G., Chan, F. et al. (2021): Spatiotemporal Patterns of Hillslope Erosion Investigated Based on Field Scouring Experiments and Terrestrial Laser Scanning. In: Remote Sensing 13 (9), 1674. DOI: [10.3390/rs13091674](https://doi.org/10.3390/rs13091674).
- Piegl, L. A., Tiller, W. (1997): The NURBS book. 2nd ed. New York: Springer (Monographs in visual communication).
- Schmid, T., Schack-Kirchner, H., Hildebrand, E. (2012): A case study of terrestrial laser scanning in erosion research: Calculation of roughness and volume balance at a logged forest site. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI, 114–118.
- Schwarz, G. (1978): Estimating the Dimension of a Model. In: Ann. Statist. 6 (2). DOI: [10.1214/aos/1176344136](https://doi.org/10.1214/aos/1176344136).
- Steinhoff-Knopp, B., Burkhard, B. (2018): Soil erosion by water in Northern Germany: long-term monitoring results from Lower Saxony. In: CATENA 165, 299–309. DOI: [10.1016/j.catena.2018.02.017](https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.017).
- Welthungerhilfe (2022): Bodenerosion – gefährlich und unterschätzt. www.welthungerhilfe.de/informieren/themen/klimawandel/bodenerosion, letzter Zugriff 20.09.2022.
- Zhang, N., Rutherford, I.D. (2020): The effect of instream logs on river-bank erosion: Field measurements of hydraulics and erosion rates. In: Earth Surf. Process. Landforms 45 (7), 1677–1690. DOI: [10.1002/esp.4838](https://doi.org/10.1002/esp.4838).
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., Yan, G. (2016): An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. In: Remote Sensing 8 (6), 501. DOI: [10.3390/rs8060501](https://doi.org/10.3390/rs8060501).

Kontakt

Corinna Harmening | Ramon Butzer
Geodätisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe
corinna.harmening@kit.edu | ramon.butzer@student.kit.edu

Simone Ott | Bastian Steinhoff-Knopp
Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie, Leibniz Universität Hannover
Schneiderberg 50, 30167 Hannover
ott@phygeo.uni-hannover.de | steinhoff-knopp@phygeo.uni-hannover.de

Jens-André Paffenholz
Institute of Geo-Engineering, Technische Universität Clausthal
Erzstraße 18, 38678 Clausthal-Zellerfeld
jens-andre.paffenholz@tu-clausthal.de