

Analyse systematischer TLS-Messabweichungen bei der Erfassung natürlicher Oberflächen

Jan RABOLD¹, Lars WERNY¹ & Corinna HARMENING¹ ([ORCID](#))

¹ Karlsruher Institut für Technologie – Geodätisches Institut, rabold@kit.edu (corresponding Author)

DOI: [10.3217/978-3-99161-070-0-011](https://doi.org/10.3217/978-3-99161-070-0-011), CC BY 4.0

1 Motivation und Zielsetzung

1.1 Terrestrisches Laserscanning in der Ingenieurgeodäsie

Das Terrestrische Laserscanning hat sich als Messverfahren in der Ingenieurgeodäsie durchgesetzt. Aufgrund der zeiteffizienten, non-taktilen und hochauflösten 3D-Datenerfassung wird TLS sowohl in klassischen ingenieurgeodätischen Anwendungen, etwa im Structural Health Monitoring, als auch bei der Bearbeitung geowissenschaftlicher Fragestellungen eingesetzt (Lipkowski et al. 2019; Teng et al. 2022). Spezielles Interesse fällt dabei auf die Erfassung und Analyse geomorphologischer Prozesse wie Erosion, Sedimentumlagerungen oder die Ableitung von Oberflächenrauheiten natürlicher Böden (Eltner 2013; Kenner et al. 2014; Harmening et al. 2022; Czerwonka-Schröder et al. 2025).

Insbesondere im Kontext der Erfassung natürlicher Oberflächen mit TLS ist dabei mit systematischen Messabweichungen zu rechnen; so können bspw. materialabhängige Effekte sowie die Interaktion zwischen Laserstrahl und Objektoberfläche zu systematischen Distanzabweichungen führen (Linzer et al. 2022). Weiterhin spielt die Größe des Laserfootprints eine zentrale Rolle, denn die resultierende Entfernung bei der reflektorlosen Distanzmessung repräsentiert nicht einen diskreten Punkt, sondern ein intensitätsgewichtetes Mittel innerhalb des Footprints. Treten innerhalb des Footprints Höhenunterschiede auf, wie das bei natürlichen rauen Oberflächenflächen der Fall ist, kann dies zu Glättungseffekten führen (Brown et al. 2013; Wieser et al. 2019). Frühere Untersuchungen zeigen, dass TLS vornehmlich für die Erfassung von Rauheitsstrukturen im Zentimeterbereich geeignet ist, da der Einfluss des Laserfootprints bei zunehmender Feinheit der untersuchten Strukturen zu deutlichen Glättungseffekten führt (Milenković et al. 2015). Weisen natürliche Oberflächen eine variierende Kornstruktur sowie diffuse Reflexion auf, können diese Effekte zu einer systematischen Unterschätzung der Oberflächenrauheit führen (Linzer et al. 2022).

1.2 Forschungsfragen und Struktur des Papers

Im Fokus der Arbeit stehen zwei Fragestellungen: Zum einen wird analysiert, wie sich die Größe des Laserfootprints auf die erfassbaren Rauheitsstrukturen unterschiedlicher Bodenproben auswirkt. Zum anderen wird die Leistungsfähigkeit verschiedener TLS-Systeme mit unterschiedlich umgesetzten Streckenmessverfahren hinsichtlich der Abbildung feiner

Oberflächenstrukturen untersucht. Die Analyse erfolgt durch einen qualifizierten Vergleich von TLS-Daten mit hochauflösenden Referenzmessungen eines industriellen Lichtschnittsystems unter kontrollierten Laborbedingungen. Ziel ist es, die beobachteten Abweichungen mit relevanten Bodeneigenschaften sowie instrumentellen Parametern in Beziehung zu setzen und daraus Erkenntnisse für die TLS-basierte Erfassung natürlicher Oberflächen abzuleiten.

Kapitel 2 führt in die theoretischen Grundlagen ein und beleuchtet dabei insbesondere die Rolle des Footprints. Kapitel 3 gibt einen Überblick über den Versuchsaufbau und die eingesetzten Messsysteme. In Kapitel 4 wird die Weiterverarbeitung und Auswertung der erfassten Messdaten ausgeführt. Anschließend gehen Kapitel 5 und Kapitel 6 näher auf die Ergebnisse ein und diskutieren diese kritisch. In Kapitel 7 folgt eine Schlussfolgerung sowie ein Ausblick auf weitere Arbeiten.

2 Theoretische Grundlagen

Die Erfassung natürlicher Oberflächen mit terrestrischen Laserscannern unterliegt systematischen Einflüssen, welche einerseits aus dem zugrundeliegenden Messverfahren und andererseits aus der Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Objektoberfläche resultieren (Schwarz 2018; Wieser et al. 2019). Die in TLS eingesetzten elektrooptischen Distanzmessverfahren unterscheiden sich hinsichtlich Reichweite, Messrauschen und Signalverarbeitung (Joeckel et al. 2008; Möser 2000).

2.1 TLS-Distanzmessverfahren

Charakteristisch für das Phasenvergleichsverfahren ist die vergleichsweise hohe Messgenauigkeit und der vergleichsweise kleine Footprint (Joeckel et al. 2008; Zoller+Fröhlich 2024). Scanner, die auf Grundlage des Impulslaufzeitverfahrens arbeiten, erzielen größere Reichweiten und höhere Messgeschwindigkeiten bei gleichzeitig erhöhtem Messrauschen (Riegl 2024). Systeme, die auf Leicas Waveform Digitizing Technologie basieren, messen die Distanz grundsätzlich mit dem Impulslaufzeitverfahren, akkumulieren aber über die Dauer der Messung viele Pulse, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Um resultierende Mehrdeutigkeiten aufzulösen wird – analog zum Phasenvergleichsverfahren – mit verschiedenen Messfrequenzen gearbeitet (Leica Geosystems 2014).

2.2 Footprinteigenschaften

Als zentraler Einflussfaktor auf die Abbildung von Feinstrukturen lässt sich der Laserfootprint identifizieren, welcher sich aus den Strahlparametern des Instruments und der Messdistanz ergibt. Nach Eichler et al. (2004) ist der Gauß-Strahl (vgl. Abb. 1) eine häufig herangezogene Modellierung des TLS-Laserstrahls. Unter Berücksichtigung der Strahldivergenz θ im Fernfeld, der Wellenlänge λ und des Strahltaillendurchmessers $d_0 = 2w_0$ ist die entfernungsabhängige Modellierung des Footprints möglich. Der Strahlradius $w(z)$ in Ausbreitungsrichtung z in Abhängigkeit der Wellenlänge λ unter Berücksichtigung des Strahltaillenradius w_0 berechnet sich nach Wieser et al. (2019) zu:

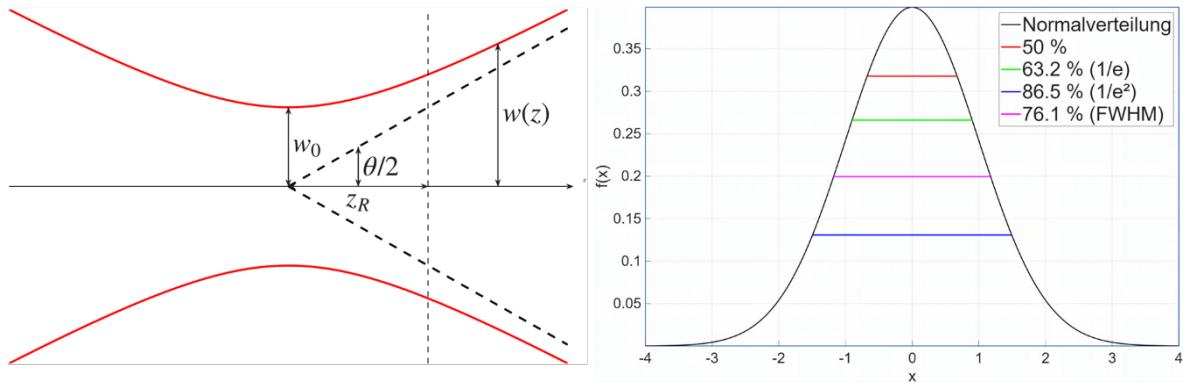


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Gauß-Strahls (links) sowie Darstellung der Definitionen des Strahldurchmessers (rechts) (eigene Grafik nach Self 1983; Werny 2025).

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{4\pi w_0^2} \right)^2} \text{ mit } \frac{\lambda}{\pi w_0} = \theta. \quad (1)$$

Der Bereich, in welchem der Laserstrahl aus dem Nahfeld ins Fernfeld übergeht, wird als Rayleighlänge z_R bezeichnet. Sie definiert den Abstand von der Strahltaille, an dem der Strahldurchmesser um $\sqrt{2}$ vergrößert ist. Für deutlich größere Abstände stellt sich für den Strahldurchmesser ein linearer Zusammenhang in Abhängigkeit des Strahldivergenzwinkels ein (Eichler et al. 2004). Hinsichtlich der Definition des Strahldurchmessers und damit des Footprints existiert keine eindeutige Vorgabe. Es ist sinnvoll den Bereich so zu wählen, dass die Energie außerhalb des Footprints vernachlässigbar ist. Da die rückgestreute Energie nicht ausschließlich von der Strahlgeometrie, sondern auch von der Reflektanz der Objektoberfläche abhängt (Wieser et al. 2019), haben sich bei Instrumentenherstellern unterschiedliche Definitionen für den Strahldurchmesser bzw. den Footprint durchgesetzt (vgl. Abb. 1, rechts). Die Angabe *Full Width at Half Maximum (FWHM)* definiert den Schwellwert an der Stelle, an welcher die Intensität die Hälfte ihres Maximums beträgt. Die Bezeichnung *Full Width Half Power* definiert einen Bereich innerhalb dessen 50% der Energie liegen. Die Definitionen 1/e und 1/e² repräsentieren die Bereiche, in denen 63% bzw. 86% der Energie innerhalb des spezifizierten Strahldurchmessers liegen.

Die mit Hilfe des Laserstrahls ermittelte Distanz repräsentiert keine punktbezogene Distanz, sondern resultiert aus einer intensitätsgewichteten Mittelbildung aller innerhalb des Footprints liegenden Rückstreuungen (Wieser et al. 2019). Inhomogenitäten der Oberfläche innerhalb des Footprints führen zu Distanzmessungsabweichungen gegenüber der Strahlmitte und somit zu einer Mittelbildung, die nicht die exakte Struktur der abgetasteten Oberfläche widerspiegelt. Besonders Strukturen, deren charakteristische Größe kleiner oder vergleichbar mit dem Footprintdurchmesser sind, werden fehlerhaft abgebildet.

2.3 Algorithmische Grundlagen

Die Detailuntersuchung lokaler Rauheitsstrukturen und systematischer Distanzabweichungen basiert unter anderem auf Berechnungen nach dem Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2)-Algorithmus (Lague et al. 2013). Der Algorithmus ermöglicht eine

normalenbasierte Distanzmessung zwischen zwei Punktwolken und berücksichtigt explizit die lokale Rauheit der Oberflächen.

Die Berechnungen erfolgen auf Basis sogenannter *Core Points* i , in denen jeweils ein lokaler Normalenvektor berechnet wird (Lague et al., 2013). Die Größe der dafür herangezogenen Nachbarschaft wird durch den Parameter *Normal Scale D* definiert. Bei der Berechnung wird die Standardabweichung $\sigma_i(D)$ der lokalen Nachbarpunkte zur geschätzten Ebene bestimmt. Diese Standardabweichung stellt ein lokales Maß für die Rauheit dar. Basierend auf dem berechneten Normalenvektor wird ein Zylinder mit dem Durchmesser d , der *Projection Scale*, konstruiert. Der Zylinder schneidet beide Punktwolken und definiert dadurch zwei Punktmengen, welche auf die Achse des Zylinders abgebildet werden. Die Mittelwerte i_1 und i_2 der beiden projizierten Verteilungen stellen die Durchschnittspositionen der Punktmengen entlang der Normalenrichtung dar. Die zugehörigen Standardabweichungen $\sigma_i(d)$ repräsentieren eine Schätzung der lokalen Rauheit entlang der Normalenrichtung. Aus den beiden Mittelwerten der projizierten Verteilungen lässt sich die lokale Distanz $L_{M3C2}(i)$ der betrachteten Punktwolken bestimmen. Beide Parameter d und D sind vom Anwender geschickt zu wählen. (Lague et al., 2013)

3 Versuchsaufbau und Datenerfassung

Die Untersuchungen erfolgen unter kontrollierten Laborbedingungen, um atmosphärische Einflüsse zu minimieren. Ziel ist es, systematische Messabweichungen gezielt in Abhängigkeit von Footprintgröße, Messverfahren und Oberflächenrauheit zu analysieren.

3.1 Untersuchte Bodenproben und Messaufbau

Als Untersuchungsobjekte dienen die in Abbildung 2 aufgeführten repräsentativen Bodenproben: eine feinkörnige sandige Probe mit geringen Verklumpungen im Bereich von 0,5 cm, eine mittelkörnige lehmhaltige Bodenprobe mit Rauheitsstrukturen im Bereich 0,5-2 cm sowie eine Grobkiesprobe mit Korngrößen zwischen 1,5-12 cm. Die Proben decken ein Spektrum von Rauheitsstrukturen von wenigen Millimetern bis in den zweistelligen Zentimeterbereich ab und ermöglichen so die Analyse auftretender Footprint-bedingter Effekte.

Um geometrische Einflüsse zu minimieren, werden alle Scans von einem konstanten Instrumentenstandpunkt in ca. 3 m Entfernung zur Probe durchgeführt. Wie in Abbildung 2, rechts, erkennbar, werden die Proben in Plastikcontainern aus der Horizontalen verkippt aufgebaut, um einen nahezu orthogonalen Einfallsinkel sicherzustellen.



Abb. 2: Ausgewählte Bodenproben. V.l.n.r. feinkörnige Probe, mittelkörnige Probe grobkörnige Probe, Realisierung eines möglichst orthogonalen Auf treffwinkels (Fotos: Werny, Rabold).

3.2 Eingesetzte Messsysteme

Die Erfassung der Proben erfolgt mit den in Tabelle 1 aufgeführten drei Systemen. Zum Einsatz kommen ein Z+F Imager 5016, ein Riegl VZ-2000i sowie eine scannende Totalstation Leica MS60. Die Systeme spiegeln dabei die typischerweise in der Ingenieurgeodäsie eingesetzten Distanzmessverfahren wider und unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Strahldurchmesser sowie dem Messrauschen. Die abzubildenden Rauheitsstrukturen bewegen sich zwischen wenigen Millimetern und wenigen Zentimetern. Diese Größen tragen maßgeblich zur Auswahl der Scanauflösung der Instrumente bei (vgl. Brown et al. 2013). In der Studie erfolgen die Scans mit einem Punktabstand von 1 mm, 5 mm und 10 mm, um den Einfluss der Abtastdichte in Relation zur Footprintgröße zu untersuchen. Die höchste Auflösung liegt dabei unterhalb des jeweiligen Footprintdurchmessers, während die geringeren Auflösungen in der Größenordnung des Footprints rangieren oder diesen überschreiten.

Zusätzlich werden die Proben mit einem hochauflösenden Referenzsystem bestehend aus einem taktilen Gelenkmessarm Nikon-Metris MCA II und einem Lichtschnittscanner Nikon MMDx100 erfasst. Der Scanner erreicht eine Messgenauigkeit von $10 \mu\text{m}$ bei einer maximalen Datenrate von 150 Hz (Nikon Metrology 2014).

Tabelle 1: Eingesetzte Instrumente und deren für die Studie relevante Kenngrößen (Zoller+Fröhlich 2024; Riegl 2024; Leica Geosystems 2024; Nikon Metrology 2014).

Instrument	Messverfahren	λ in nm	θ in mrad	Messrauschen Nahfeld in mm	Footprint \varnothing @3m in mm
Z+F Imager 5016	Phasenvergleich	1500	0,6	0,2 bis 0,3	3,4 ($1/e^2$)
Riegl VZ-2000i	Impulslaufzeit	1532	0,27	3,0	7,2 ($1/e^2$)
Leica MS60	Waveform-Digitizing	658	0,4 (x) 0,16 (y)	0,4 bis 2,0	5,2 (x) ($1/e$) 2,2 (y) ($1/e$)
Nikon MMDx100	Lichtschnitt	660&635	-	-	-

4 Datenverarbeitung und Analysemethodik

Die Auf- und Weiterverarbeitung der TLS-Daten zielt darauf ab, systematische Messabweichungen und Rauheitsdifferenzen zwischen den TLS-Punktwolken und den Referenzpunktwolken reproduzierbar und quantitativ zu erfassen. Sie umfasst die Registrierung und Segmentierung sowie die Ableitung lokaler und globaler Rauheitsmaße.

4.1 Registrierung und Segmentierung der Punktwolken

Die Registrierung der TLS-Daten erfolgt zielzeichenbasiert in den herstellerspezifischen Softwarelösungen und stellt sicher, dass allen Punktwolken ein einheitliches Koordinatensystem zugrunde liegt. Im Anschluss an die Registrierung erfolgt die Segmentierung der Punktwolken auf die jeweiligen Bodenproben. Ziel ist es, irrelevante oder verschattete Bereiche und artefaktbehaftete Punkte zu entfernen, um eine konsistente Grundlage für die Rauheitsanalyse zu schaffen. Wie in Abbildung 3 dargestellt, weist beispielsweise die Referenzpunktwolke der feinsandigen Bodenprobe Lücken auf den Vorder-

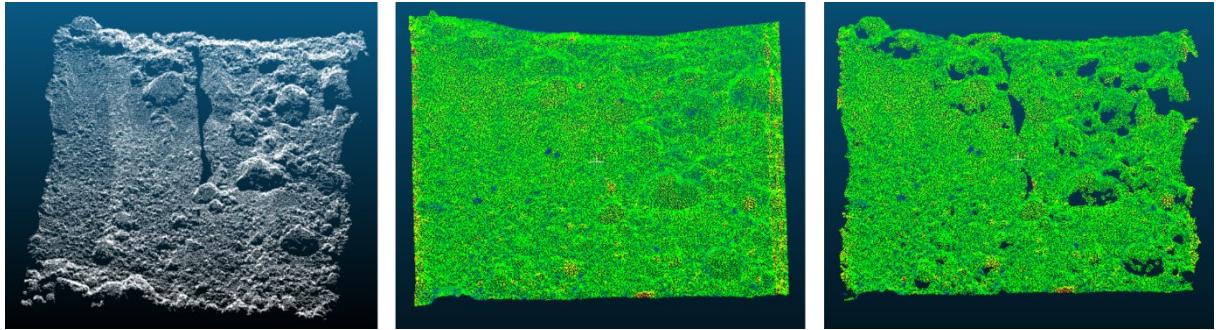


Abb. 3: Segmentierung der Punktwellen. Abgebildet sind die Punktwellen der feinsandigen Probe. Links: segmentierte Referenzpunktwolke, Mitte: unveränderte Punktwolke des Z+F Imager 5016, rechts: segmentierte Punktwolke des Z+F Imager 5016 (Werny 2025).

seiten gescannter grober Rauheitsstrukturen auf, da der Messarm einen eingeschränkten Messbereich von ± 50 mm hat. Liegen zu erfassende Oberflächen außerhalb dieses Bereichs, werden keine Punkte registriert. Um den Einfluss dieser Lücken auf die M3C2-Berechnungen zu minimieren, werden die Punktwellen der einzelnen TLS mittels CloudCompare so angepasst, dass die resultierenden segmentierten TLS-Punktwellen analoge Lücken wie die Referenz aufweisen. Diese Segmentierung erfolgt halbautomatisch.

4.2 Rauheitskenngrößen und Abweichungsanalytik

Zur Beschreibung der globalen Oberflächenrauheit wird für jede Punktwolke eine Referenzebene geschätzt. Die globale Rauheit wird anschließend als Standardabweichung der orthogonalen Punktabstände zur geschätzten Ebene berechnet. Dieses Maß erlaubt eine kompakte Charakterisierung der gesamten Oberflächenstruktur und wird häufig zur Bewertung von Rauheit eingesetzt (Heritage et al. 2009). Das globale Rauheitsmaß beinhaltet sowohl reale Oberflächenstrukturen als auch Anteile des instrumentellen Messrauschens. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den TLS-Systemen sowie dem Referenzsystem zu gewährleisten, wird die ermittelte Gesamtvarianz um die Varianz des Rauschens reduziert.

Zur Analyse der lokalen Rauheiten der Proben wird der in Kapitel 2.3 eingeführte M3C2-Algorithmus herangezogen. Entgegen der allgemeinen Empfehlung, D etwa 20-25-mal größer als die lokale Rauheit zu wählen (Lague et al. 2013), wird D in dieser Arbeit bewusst in Abhängigkeit von der charakteristischen Rauheitsgröße und der Scanauflösung gewählt. Dadurch wird eine Glättung der Rauheitsstrukturen vermieden und die tatsächliche Abbildungsleistung der Scanner analysierbar gemacht. Abhängig von der Scanauflösung wird D für die feinkörnige Probe zwischen 10 mm und 100 mm gewählt. Bei der mittelkörnigen Probe werden Werte zwischen 30 mm und 100 mm für D eingesetzt. Für die grobkörnige Probe bewegt sich D zwischen 50 mm und 200 mm. Je größer die Auflösung ist, umso größer wird D gewählt, um eine ausreichende Anzahl Punkte für eine statistisch gesicherte Schätzung einzuschließen. Um sicherzustellen, dass ein Minimum von 25 Punkten innerhalb des Projektionszylinders liegen, wird die *Projection Scale d* so gewählt, dass sie in etwa dem Zehnfachen der Auflösung entspricht.

5 Ergebnisse

5.1 Globale Rauheitsmaße

Die globalen Rauheitsmaße zeigen eine klare Abhängigkeit von Korngröße, Scanauflösung und Messsystem. Wie in Tabelle 2 aufgeführt, weist das Referenzsystem für alle Proben die höchsten Werte der globalen Rauheit auf. Bei der groben Bodenprobe unterscheiden sich die globalen Rauheitswerte der TLS-Systeme sowie die der Referenz nur im Bereich weniger 1/10 mm. Die ermittelten globalen Rauheiten der mittleren und feinen Bodenprobe weisen Abweichungen zur Referenz in der Größenordnung von ca. 1,5 mm auf. Die mittlere Probe zeigt für die TLS die größten globalen Rauheitswerte (bedingt durch größere Verklumpungen). Die ermittelten Rauheitsmaße der feinen Probe liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die der groben Probe. Die Unterschiede zwischen den jeweiligen Scanauflösungen variieren lediglich im Bereich weniger 1/10 mm.

Tabelle 2: Berechnete globale Rauheitsmaße bereinigt um die Varianz des Messrauschens. Angaben in mm.

Probe	Scanauflösung	Z+F Imager 5016	Leica MS60	Riegl VZ-2000i	Referenz
grobkörnig	hoch	6,77	6,68	5,96	6,88
	mittel	7,03	6,76	6,36	
	niedrig	6,68	6,74	6,16	
mittelkörnig	hoch	8,83	8,68	7,78	9,69
	mittel	8,87	8,24	8,16	
	niedrig	8,62	8,15	8,41	
feinkörnig	hoch	6,86	6,31	5,96	7,47
	mittel	6,85	6,18	6,06	
	niedrig	6,63	6,16	6,06	

5.2 Lokale Rauheitsanalyse und M3C2-Ergebnisse

Dieses Unterkapitel beschreibt die Ergebnisse der M3C2-Berechnungen für die in hoher Scanauflösung erfassten Punktfolgen. Abbildung 4 zeigt die Verteilungen der berechneten $\sigma_i(D)$ als Maß der lokalen Rauheit. Die Verteilung des Z+F Imager 5016 und die des Referenzsystems stimmen großteils überein. Die Verteilung der Leica MS60 weist bei der groben Probe einen ähnlichen Verlauf wie die Referenz auf. Weiterhin ist in Abbildung 4 ein deutlicher Unterschied der Verteilungen des Riegl VZ-2000i zu den anderen Instrumenten sowie zur Referenz zu erkennen. Die Visualisierung der berechneten $\sigma_i(D)$ der grobkörnigen Probe direkt auf der Punktfolge in Abbildung 5 zeigt, dass homogene Flächen, wie z. B. die großen Steine im vorderen Bereich der Probe kleine lokale Rauheitsmaße aufweisen (blaue Bereiche), die durch das Referenzsystem, den Z+F Imager 5016 sowie teilweise durch die Leica MS60 abgebildet werden. Der Riegl VZ-2000i erfasst die geringen Rauheitsunterschiede der Oberfläche der großen Steine nicht, sondern zeigt für diese Homogenbereiche und die restliche Grobkießprobe ähnliche Rauheitswerte. In Tabelle 3 sind ausgewählte Parameter der $\sigma_i(D)$ -Verteilungen der untersuchten Bodenproben aufgeführt. Für die mittelkörnige Probe zeigt der

Riegl VZ-2000i die deutlichsten Abweichungen im Vergleich zum Referenzsystem. Bei der feinkörnigen Probe zeigen sowohl der Riegl-Scanner als auch das Leica-System die größten Unterschiede zur Referenz. Die Verteilung des Z+F Imager 5016 stimmt qualitativ am ehesten mit der des Referenzsystems überein. Für die anderen Scanauflösungen weisen die lokalen Rauheiten ($\sigma_i(D)$) aus den M3C2-Berechnungen der TLS hohe Übereinstimmungen untereinander und zu der Referenz auf. Dieses Verhalten ist erwartbar, da der größere Punktabstand der Einzelpunkte innerhalb der Punktwolken eine Anpassung der M3C2-Parameter erfordert. Durch diese Anpassung wird die Mittelung zwangsläufig über größere Bereiche der Punktwolke durchgeführt, wodurch lediglich regionale Rauheitsstrukturen abgebildet werden können.

Tabelle 3: Ausgewählte Charakteristika der Verteilungen der $\sigma_i(D)$ aus der M3C2-Berechnung für die jeweiligen Proben bei hoher Scanauflösung. Angaben in mm.

Probe	Instrument	Mittelwert	Std.abw.
feinkörnig	Referenz	0,99	0,41
	Z+F Imager 5016	0,75	0,35
	Leica MS60	1,10	0,23
	Riegl VZ-2000i	1,06	0,24
mittelkörnig	Referenz	1,42	0,57
	Z+F Imager 5016	1,34	0,53
	Leica MS60	1,33	0,41
	Riegl VZ-2000i	0,86	0,53
grobkörnig	Referenz	1,52	0,70
	Z+F Imager 5016	1,72	0,65
	Leica MS60	1,57	0,58
	Riegl VZ-2000i	1,77	0,41

6 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen eine maßgebliche Beeinflussung der Punktwolken natürlicher Oberflächen durch das Zusammenspiel von Oberflächenrauheit, Laserfootprint und Auflösung.

6.1 Einfluss der instrumentenspezifischen Eigenschaften

Die in Tabelle 2 aufgeführten globalen Rauheitswerte des Referenzsystems liegen für alle Bodenproben über denen der TLS-Systeme. Dies ist auf die deutlich höhere Abtastrate sowie die hohe Genauigkeit des eingesetzten Lichtschnittverfahrens zurückzuführen, welches auch feinste Rauheitsstrukturen zuverlässig erfasst (Joeckel et al. 2008; Nikon Metrology 2014). Liegen die berechneten globalen Rauheiten der TLS-Systeme näher an der Referenz, spricht dies für eine geringe Glättung. Die Unterschiede der globalen Rauheit fallen für die grobkörnige Probe am geringsten aus. Alle Instrumente erfassen die groben Strukturen detailliert und bilden nahe der Referenz ab. Bei Betrachtung der mittleren Probe treten unterschiedlich stark ausgeprägte Glättungseffekte auf, die sich durch die Ergebnisse der feinen Probe bestätigen. Nach Brown et al. (2013) tritt Glättung insbesondere dann auf, wenn der Punktabstand kleiner als der Durchmesser des Laserfootprints ist. Genau dieses Verhalten zeigt sich in den hochauflösten Scans der Bodenproben.

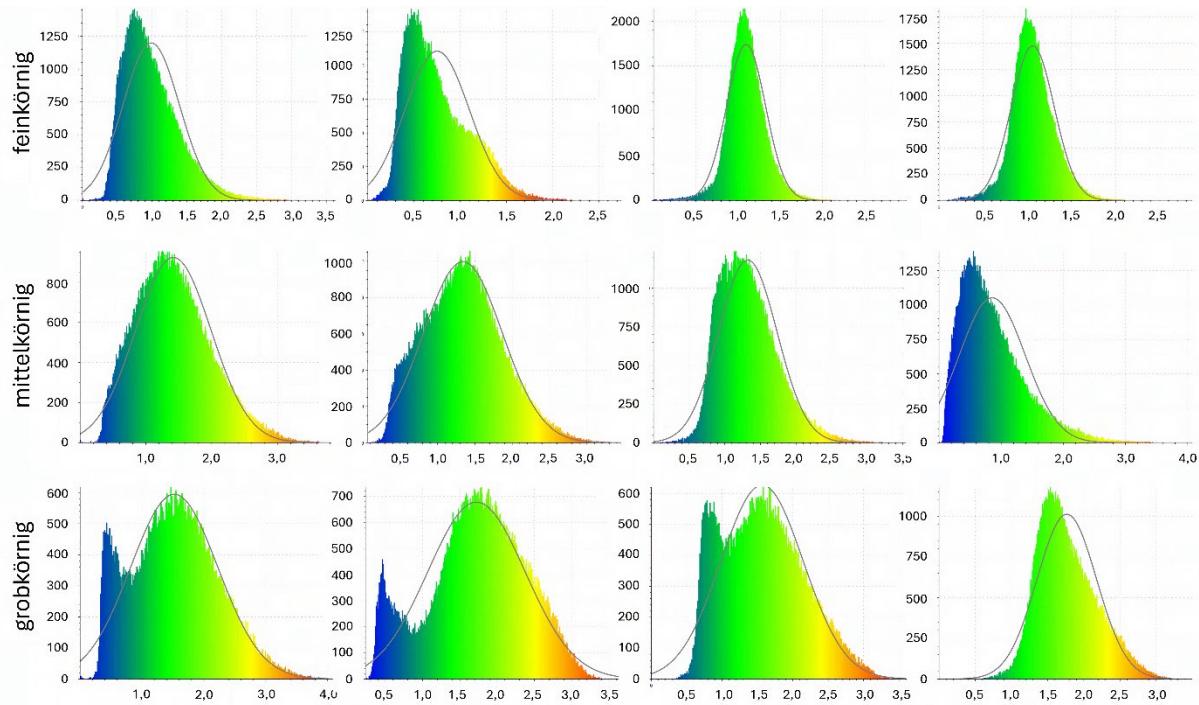


Abb. 4: $\sigma_i(D)$ -Verteilungen der Proben bei hoher Scanauflösung. V.l.n.r. Referenzsystem, Z+F Imager 5016, Leica MS60, Riegl VZ-2000i (Werny 2025).

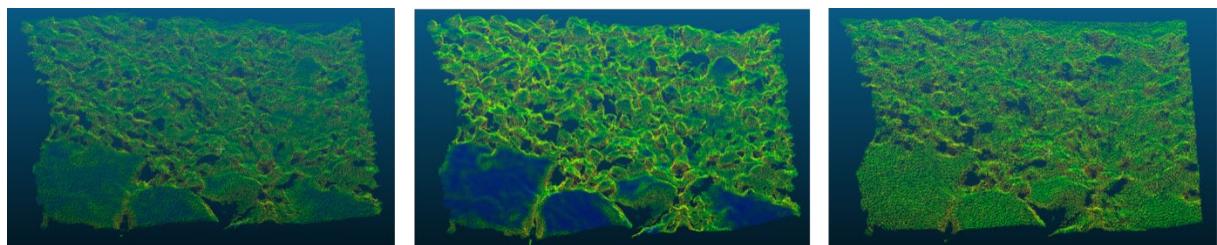


Abb. 5: Visualisierung der lokalen Rauheitsmaße $\sigma_i(D)$ auf den Punkt wolken der Grobkiesprobe. Blau entspricht kleinen Rauheiten, grün Rauheiten im mittleren Wertebereich und rot entspricht großen Rauheiten. V.l.n.r. Leica MS60, Z+F Imager 5016, Riegl VZ-2000i (Werny 2025).

TLS mit größerem Strahldurchmesser weisen systematisch kleinere Standardabweichungen auf (vgl. Tab. 3 und Abb. 4), was für eine stärkere Glättung der abgebildeten Strukturen spricht. Beispielsweise zeigt der Z+F Imager 5016 als der Scanner mit dem kleinsten Footprint sowie dem geringsten Entfernungsmessrauschen im Nahfeld (vgl. Tab. 1) die größte Übereinstimmung der globalen und lokalen Rauheit mit dem Referenzsystem (vgl. Tab. 2 und Abb. 4). Die beobachteten Glättungseffekte zeichnen sich besonders bei den beiden Systemen mit größerem Footprint ab. Am stärksten ist die Glättung bei dem Riegl VZ-2000i, dem Scanner mit dem größten Footprint, ausgeprägt. Dieses Verhalten ist insbesondere bei der Analyse der feinen Probe beobachtbar. Bei der mittleren und groben Scanauflösung treten keine deutlich erkennbaren Unterschiede in den Rauheitsverteilungen auf.

6.3 Lokale Rauheit und Grenzen der M3C2-basierten Analyse

Scans mit einer mittleren und niedrigen Scanauflösung sind unzureichend, um charakteristische Rauheitsstrukturen zuverlässig zu erfassen. Die Verteilungen der lokalen Rauheit unterscheiden sich lediglich qualitativ und bilden überwiegend regionale Rauheiten ab. Durch eine Steigerung der Scanauflösung und damit einhergehend einer Reduktion des Punktabstands können die M3C2-Parameter in der Größenordnung der Rauheitselemente gewählt werden. Somit lassen sich systematische Messabweichungen sowie lokale Feinstrukturen lediglich in hochauflösten Scans analysieren. Insbesondere bei der grobkörnigen Probe zeigen beispielsweise der Z+F Imager 5016 sowie die Leica MS60 ein besseres Auflösungsvermögen der lokalen Rauheit auf den Homogenbereichen der größeren Steine, wohingegen der Riegl VZ-2000i in diesem Bereich kein weiteres Maximum in der Verteilung aufweist (vgl. Abb. 4 und 5). Die Ergebnisse der mittleren Probe zeigen für den Riegl-Scanner eine Verschiebung der Verteilung hin zu kleineren Werten. Dieses Verhalten spricht dafür, dass der Riegl-Scanner die erfassten Rauheiten innerhalb des Footprints merkbar glättet. Wie in Abb. 4 und Tab. 3 gegenübergestellt, treten in den Verteilungen der feinen Bodenprobe die deutlichsten Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen auf. Die erfassbaren charakteristischen Rauheitsstrukturen in dieser Probe liegen mehrheitlich unter 3 mm und damit unter dem Footprintdurchmesser der Systeme. Dementsprechend weisen insbesondere TLS, deren Footprint im Nahfeld größer ausfällt, wie der Riegl VZ-2000i und die Leica MS60, eine deutliche Glättung der Feinstrukturen im Vergleich zum Referenzsystem auf. Der Imager 5016 ist in der Lage die Feinstrukturen weitestgehend abzubilden. Die berechnete Verteilung ähnelt der Referenz deutlich. Beide zeigen die Verschiebung ihres Maximums in den Bereich niedriger Rauheiten sowie eine vergleichsweise große Standardabweichung, die auf ein detailliertes Abbildungsverhalten der tatsächlichen Oberfläche schließen lässt. Die Ergebnisse der berechneten M3C2-Distanz zwischen den TLS sowie dem Referenzsystem bewegen sich im niedrigen Millimeterbereich bis ca. 2,5 mm. Die zugrundeliegende Registrierungsgenauigkeit liegt im Bereich 0,5 mm bis 1,5 mm. Damit bewegen sich die M3C2-Distanzen in der Größenordnung der Registrierungsunsicherheit. Eine Trennung der Ergebnisse der Registrierungsunsicherheit und der Distanzberechnungen ist entsprechend erschwert. Indem die Registrierungsunsicherheit minimiert wird, können die berechneten M3C2-Distanzen belastbarer in die Gesamtevaluation integriert werden.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Arbeit untersucht systematische Messabweichungen bei der TLS-gestützten Erfassung natürlicher Oberflächen durch den Vergleich mehrerer terrestrischer Laserscanner mit einem hochauflösenden Referenzsystem. Die Analyse globaler Rauheitsmaße nach Heritage et al. (2009) sowie lokaler Rauheitsmaße auf Basis des M3C2-Algorithmus zeigt, dass systematische Distanzmessabweichungen durch die Footprintgröße bedingt sind. Besonders in hochauflösten Scans treten deutlich feststellbare Glättungseffekte auf, wenn die charakteristischen Rauheitsstrukturen kleiner als der Footprintdurchmesser sind, wohingegen homogene Oberflächen geringere Abweichungen aufweisen. Die Ergebnisse bestätigen, dass alle untersuchten TLS für die zuverlässige Erfassung von Rauheitsstrukturen im Zentimeterbereich geeignet sind (vgl. Milenković et al. 2015). TLS mit einem kleinen

Footprintdurchmesser, wie z.B. der Z+F Imager 5016, sind am besten dazu in der Lage auch feinere Strukturen abzubilden.

Mit dem umgesetzten Versuchsaufbau können belastbare Erkenntnisse zu systematischen Messabweichungen von TLS bei der Untersuchung natürlicher Oberflächen gewonnen werden. Zur Minimierung limitierender Faktoren wird in weiterführenden Untersuchungen eine Optimierung der Registrierung, beispielsweise durch den Einsatz von Kugeltargets, sowie die gezielte Variation der Messdistanz zur isolierten Analyse des Footprinteinflusses angestrebt. Ergänzend werden künstlich erzeugte, kontrollierte Rauheitsstrukturen auf Bodenproben eingesetzt, um das Auflösungsvermögen von TLS für definierte Rauheitsskalen systematisch zu evaluieren.

Literatur

- BROWN, O. & HUGENHOLTZ, C. (2013): Quantifying the effects of terrestrial laser scanner settings and survey configuration on land surface roughness measurement. In: *Geosphere* 9: S. 367-377.
- CZERWONKA-SCHRÖDER, D., SCHULTE, F., ALBERT, W., HOSSEINI, K., TABERNIG, R., YANG, Y., HÖFLE, B., HOLST, C., ZIMMERMANN, K. (2025): Almon5.0 - Real-time monitoring of gravitational mass movements for critical infrastructure risk management with AI-assisted 3D metrology. In: *Proceedings of the 6th Joint International Symposium on Deformation Monitoring - JISDM 2025*. Karlsruhe.
- EICHLER, J., DÜNKEL, L. & EPPICH, B. (2004): Die Strahlqualität von Lasern – Wie bestimmt man Beugungsmaßzahl und Strahldurchmesser in der Praxis? In: *Laser Technik Journal* 1: S. 63-66.
- ELTNER, A. (2013): Konzeption einer Methode zur quantitativen Erfassung von Bodenerosion durch integrierte Aufnahme mit einer Mikrodrohne und einem terrestrischen Laserscanner. In: *DGPF Tagungsband*, Band 22: S. 289-297.
- HARMENING, C., OTT, S., BUTZER, R., STEINHOFF-KNOPP, B. & PAFFENHOLZ, J. (2022): Punktwolkenbasierte Bestimmung von starkregeninduzierten Bodenabträgen. In: *Schriftenreihe des DVW* 104: S. 93-104.
- HERITAGE, G. & MILAN, D. (2009): Terrestrial Laser Scanning of grain roughness in a gravel-bed river. In: *Geomorphology* 113: S. 4-11.
- JANßen, J., KUHLMANN, H. & HOLST, C. (2023): Keypoint-based registration of TLS point clouds using a statistical matching approach. In: *Journal of Applied Geodesy* 18: S.267-284.
- JOECKEL, R., STOBER, M., HUEP W. (2008): Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren. 5. Auflage. Heidelberg: Wichmann.
- KENNER, R., BÜHLER, Y., DELALOYE, R., GINZLER, C. & PHILLIPS, M. (2013): Monitoring of high alpine mass movements combining laser scanning with digital airborne photogrammetry. *Geomorphology* 206: S. 492-504.
- LAGUE, D., BRODU, N. & LEROUX, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82: S. 10-26.

- LEICA GEOSYSTEMS (2014): White Paper: Wave Form Digitizer Technology (WFD).
- LEICA GEOSYSTEMS (2024): Leica Nova TS60/MS60/TM60 Gebrauchsanweisung – Version 6.1.
- LINZER, F. & NEUNER, H. (2022): Transferability of an estimation procedure for distance deviations of terrestrial laser scanners from laboratory to on-site conditions. In: Proceedings of the 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring - JISDM 2022. Valencia.
- LIPKOWSKI, S. & METTENLEITER, M. (2023): Terrestrische Laserscanner - Im Fokus der Genauigkeit. In: Schriftenreihe des DVW 96: S. 75-87.
- MILENKOVIC, M., PFEIFER, N. & GLIRA, P. (2015): Applying Terrestrial Laser Scanning for Soil Surface Roughness Assessment. In: Remote Sensing 7: S. 2007-2045.
- MÖSER, M., HRSG. (2000): Handbuch Ingenieurgeodäsie. 3. Aufl. Heidelberg: Wichmann.
- NIKON METROLOGY (2014): Mobile Messlösungen der Premiumklasse – Handgeführte Laserscanner ModelMaker MMDx – MMCx und MCAX Gelenkmessarme. Broschüre.
- RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS (2024): Riegl VZ-2000i technical Data. https://www.riegl.com/fileadmin/media/Products/01_Terrestrial_Scanning/RIEGL_VZ-2000i/RIEGL_VZ-2000i_Datasheet_2025-09-16.pdf (07.01.2026)
- SCHWARZ, W., HRSG. (2018): Ingenieurgeodäsie: Handbuch der Geodäsie. Berlin, Heidelberg: Springer.
- SELF, S. (1983): Focusing of spherical Gaussian beams. In: Applied Optics 22 (5): S. 658-661.
- TENG, J., SHI, Y., WANG, H. & WU, J. (2022): Review on the Research and Applications of TLS in Ground Surface and Constructions Deformation Monitoring. In: Sensors 22 (23): 9179.
- WERNY, L. (2025): Untersuchung von systematischen Messabweichungen bei der Erfassung natürlicher Oberflächen mit einem TLS. Unveröffentlicht.
- WIESER, A., PAFFENHOLZ, J. & NEUMANN, I. (2019): Sensoren, Features und Physik – Zum aktuellen Stand der Entwicklung bei Laserscannern. In: Schriftenreihe des DVW 96: S. 9-22.
- ZOLLER+FRÖHLICH (2024): Z+F IMAGER 5016|5016A|Z+F FlexScan 22. Technical Datasheet Version 01/2024.