

Konzeption einer Methode zur quantitativen Erfassung von Bodenerosion durch integrierte Aufnahme mit einer Mikrodrohne und einem terrestrischen Laserscanner

ANETTE ELTNER¹

Zusammenfassung: Der Bodenabtrag aufgrund oberflächlich abfließenden Niederschlags wird durch komplexe Prozesse bestimmt. Zur non-invasiven Erfassung dieser Vorgänge eignen sich berührungslose Messverfahren. Bisher wurden photogrammetrische Methoden kaum eingesetzt, um Bodenerosion – außerhalb des Labors – hochaufgelöst zu messen. Im Rahmen des vorgestellten Projektes wird auf drei Testflächen in Andalusien und in Sachsen die Bodenoberfläche vor und kurz nach starken Niederschlagsereignissen erfasst. Zur Aufnahme der Geländeoberfläche werden Geländemodelle aus einem mit einer Mikrodrohne (UAV) aufgenommenen Bildverband aus und einer terrestrischen Laserscanneraufnahme verknüpft. Die Befliegung der Testfläche erfolgt mittels einer UAV mit integriertem GPS und IMU sowie einer installierten handelsüblichen Amateurkamera. Neben der Geländeerfassung durch photogrammetrische Triangulation wird ein terrestrischer Laserscanner (TLS) angewandt, der zur Verbesserung der Aufnahmegeometrie auf einem Hochstativ steht. Beide Messmethoden ergänzen sich gegenseitig.

Für einen multi-temporalen Vergleich der gemessenen Bodenoberfläche wird ein stabiles lokales Referenzsystem definiert. Vermarkte Passpunkte und retroreflektierende Zylinder dienen gleichzeitig der Verknüpfung der akquirierten Drohnen- und Laserscannerdaten zueinander sowie zwischen verschiedenen Zeitepochen. Die Vorbereitung der Datenakquise sowie ein Vergleich erster erzeugter Geländemodelle werden vorgestellt.

1 Einleitung

Bodenerosion beschreibt einen durch Wind und Wasser induzierten Abtragungsprozess des Bodens und kann volkswirtschaftlich langfristige Folgen aufgrund der Degradation von landwirtschaftlichen Nutzflächen haben. Die Mergellandschaften Andalusiens besitzen infolge der Bodeneigenschaften und des Niederschlagverhaltens (saisonale Starkregenereignisse) hohe Erosionsraten (u.a. FAUST & SCHMIDT, 2009; BRACKEN & KIRKBY, 2005; POESEN & HOOKE, 1997). Die kurzfristige Reliefveränderung ist als solche meist nicht wahrnehmbar, sollte aber keinesfalls bezüglich ihrer langfristigen Wirkung unterschätzt werden.

Zur Messung der kurzfristigen Ereignisse wird die Bodenoberfläche hochaufgelöst erfasst. Berührungslose photogrammetrische Verfahren werden mit einem mm-genauen Tracerverfahren mittels Radionuklid (WALLING ET AL., 2009) verknüpft. Seitens der Photogrammetrie kommt eine UAV, ausgestattet mit einer handelsüblichen Amateurkamera auf einem aktiv stabilisierenden Kamerahalter und ein TLS, installiert auf einem Hochstativ zum Einsatz. UAVs sind im Vergleich zur bemannten Luftbildphotogrammetrie kostengünstig, flexibel und können mittels programmierter Flugmuster die Testflächen wiederholt erfassen. Sie verzeichnen in den

1) Anette Eltner, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden; E-Mail: anette.richter@tu-dresden.de

letzten Jahren ein stark wachsendes Interesse (u.a. EISENBEIß, 2004; KIRCHGÄSSNER ET AL., 2010; CRAMER & HAALA, 2012; NEITZEL & KLONOWSKI, 2012; RAU ET AL., 2012).

UAV und TLS als Varianten zur Geländeerfassung ergänzen sich. Einerseits werden Verdeckungseffekte beim TLS (z.B. infolge tiefer Erosionsrinnen) und Fehlerfortpflanzungen bei großen Bildverbänden mit wenig Passpunkten kompensiert. Andererseits werden die Vorteile beider Methoden – hoher Automatisierungsgrad des TLS und hohe mögliche Genauigkeit bei niedrigen Flughöhen der UAV – genutzt. Zum Vergleich der Geländemodelle generiert einerseits mit UAV- und andererseits mit TLS-Daten, aber besonders zur multi-temporalen Veränderungsdetektion wird ein stabiles lokales Referenznetz aufgebaut, das die Testflächen geringstmöglich beeinflusst. Die Möglichkeit der Verknüpfung von TLS und UAV wurde bereits demonstriert (EISENBEIß & ZHANG, 2006). In dieser Arbeit wird eine Genauigkeit unter einem Zentimeter angestrebt – realisierbar durch sehr niedrige Flughöhen und kleinräumig gewählte Untersuchungsflächen.

In der Bodenerosionsforschung werden UAVs in Verbindung mit TLS noch nicht eingesetzt. Generell werden berührungslose photogrammetrische Verfahren zur Erosionserfassung überwiegend unter Laborbedingungen angewandt bzw. werden sehr kleine Testparzellen betrachtet (RIEKE-ZAPP & NEARING, 2005; JESTER & KLIK, 2005; HAUBROCK ET AL., 2009). Während Laserscanner vereinzelt Anwendung finden (HANCOCK ET AL., 2005; SCHMID ET AL., 2004), dienen UAV bisher zur Detektion von Bodenerosion größerer Magnituden (D'OLEIRE-OLTMANN ET AL., 2012). Diese Arbeit soll das Potenzial der kombinierten Nutzung beider Methoden zur hochaufgelösten Erfassung der Bodenoberfläche aufzeigen.

2 Verwendete Systeme zur Geländeerfassung

Zur hochaufgelösten Erfassung der Bodenoberfläche werden in Andalusien (im Raum Sevilla) zwei rechteckige Testflächen (40 x 50 m²) – Campo 1 und Campo 2 – mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften definiert. Campo 2 besitzt im Unterschied zu Campo 1 einen Boden, der deutlich tonhaltiger ist. Neben dem mediterranen Raum wird eine weitere Testfläche (20 x 30 m²) im Mittelsächsischen Lösshügelland (bei Döbeln) festgelegt. Das hier anzutreffende Substrat Löss besitzt vergleichbare Erosionseigenschaften wie der untersuchte Mergel in Spanien, jedoch ist die Niederschlagscharakteristik der Region eine andere. Einzelne Starkregenereignisse sind wesentlich seltener und es herrscht im Gegensatz zum mediterranen Klima ein ganzjährig fallender Niederschlag vor.

2.1 UAV

Zur Geländeerfassung wird mit der Mikrodrohne „AscTec Falcon 8“ (Abbildung 1) der Firma Ascending Technologies geflogen. Die UAV ist mit acht Propellern auf zwei Motorschienen ausgestattet. Die Redundanz im Antrieb erhöht die Sicherheit des Flugsystems. Die Flugzeit beträgt bis zu 18 Minuten, kann aber je nach Windverhältnissen deutlich kürzer ausfallen. Die UAV kann bis zu 15 ms⁻¹ fliegen. Wird ein programmiertes Flugmuster abgeflogen beträgt die Fluggeschwindigkeit 3 ms⁻¹. Für die autonome Befliegung bestimmter Flugrouten wird ein auf der UAV-Plattform installiertes integriertes GPS- und IMU-System genutzt.

Die UAV ist mit einem aktiv stabilisierenden Kamerahalter versehen. Das bedeutet, neben Aufnahmestörungen infolge von Vibrationen des Flugkörpers, werden Nick- und Rollbewegungen kompensiert. Bei sehr niedrigen Flughöhen ist dies wichtig, da bereits geringe Verdrehungen um die ω - oder φ -Achse der UAV-Plattform – z.B. aufgrund von Wind – starke Auswirkung auf die Überlappung der Bilder hat. Für die spätere Aerotriangulation des aufgenommenen Bildblocks muss für die Näherungswerte der Orientierung des Projektionszentrums lediglich der κ -Winkel beachtet werden und Verdrehungen um die verbleibenden Achsen betragen näherungsweise Null.

Mit einer Panasonic Lumix DMC-LX 3 erfolgt die Aufnahme der Bilder. Die Sensorgröße ist vom Hersteller mit 1/1.63''-CCD angegeben. Die Kamera besitzt ein Zoomobjektiv. Die Brennweite beträgt minimal 5.1 mm und maximal 12.8 mm. Im Projekt wird mit der festen Brennweite von 5.1 mm gearbeitet. Das Kleinbildäquivalent ist 24 mm bzw. 50 mm. Bei einem Seitenverhältnis von 3648 zu 2736 Pixeln lässt sich somit eine Sensorgröße von 7.36 x 5.52 mm² mit einer Pixelgröße von 2 μ m berechnen. Die Kamera besitzt einen optischen Bildstabilisator, der jedoch während der Befliegung deaktiviert wird, um ein stabiles Verhältnis der Linsen zum Sensor zu gewährleisten.



Abb. 1: UAV „Falcon 8“; TLS auf dem Hochstativ

2.2 TLS

Neben der UAV wird das Gelände mit einem terrestrischen System erfasst. Der TLS Riegl LMS Z420i ist ein Panoramascanner, der das Impulslaufzeitverfahren verwendet und eine Reichweite von bis zu einem Kilometer besitzt. Die Messgenauigkeit liegt unter einem Zentimeter. Die Testflächen werden von allen vier Seiten gescannt, um Schatteneffekte weitestgehend zu vermeiden. Die Winkelauflösung wird mit 0.024° gewählt, damit bei einer Erfassung von den vier Seiten ein theoretischer Punktabstand von einem Zentimeter im näheren Bereich des Scanfolds (Entfernung < 25 m) und ca. 2 cm am gegenüberliegenden Testfeldrand gewährt ist. Der Scanner wird auf ein Hochstativ in einer Höhe von etwa 4 m installiert (Abbildung 1), denn für diese Arbeit werden relativ flache Hänge erfasst. Durch den erhöhten Blickwinkel soll die Geometrie des Schnitts des Laserspots mit dem zu erfassenden Objekt verbessert und somit Ungenauigkeiten, infolge unzureichender Reflexion oder falscher Distanzwerte durch Mehrfachreflexion (BOEHLER ET AL., 2003) verringert werden.

2.3 Definition eines Referenzsystems

Eine wesentliche Zielstellung des Projektes ist es, die Geländeänderungen multi-temporal hochaufgelöst zu betrachten. Dafür muss ein stabiles lokales Referenzsystem errichtet werden, dass zusätzlich die Verknüpfung der UAV- mit den TLS-Daten erlaubt. Das Referenzsystem wird mittels 60 bzw. 100 cm langer Vermarkungsstangen, die bis zum Anschlag in den Boden eingebracht werden, realisiert. Sie werden im regelmäßigen Abstand um die Testflächen platziert. Da die Testflächen weitestgehend ungestört bleiben sollen, wird in der Fläche nur ein, das Feld halbierender, schmaler Pfad genutzt, um zusätzliche Höhenpasspunkte zu setzen. Auf die Vermarkungsrohre werden stabile selbstgebaute passgenaue Zielmarken (Abbildung 2) gesteckt, die nach der Messkampagne wieder entfernt werden. Bei der Aerotriangulation finden Holzplatten mit weißen Kreisen auf schwarzem Hintergrund ihre Anwendung. Für die Registrierung der Laserscans kommen retroreflektierende Zylinder zum Einsatz. Auf die Zylinder werden zusätzlich ebenfalls weiße Kreise mit einem schwarzen Kontrastring installiert. Somit können die Zylinder für die Aerotriangulation und die Laserscanregistrierung gemeinsam genutzt werden. Eine Veränderung der Positionen der Vermarkungsrohre ist nicht gänzlich auszuschließen, besonders für die tonige Testfläche Campo 2, auf der stärkere Quell- und Schrumpfungsprozesse und somit Bodenveränderung bis in größere Tiefen erwartet werden. Daher werden zur langfristigen Kontrolle die Passpunkte zusätzlich tachymetrisch in ein weiteres übergeordnetes lokales Netz, markiert mit Betonnägeln auf betonierte Flächen in der näheren Umgebung, eingemessen.

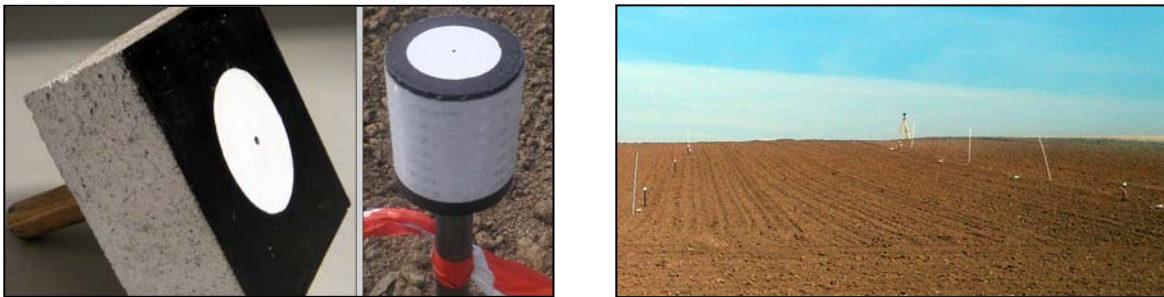


Abb. 2: Zielmarken für die Orientierung im lokalen Referenzsystem; Ausschnitt des Testfelds in Sachsen

3 Datenakquise und -verarbeitung

Vor dem eigentlichen Einsatz der UAV erfolgt eine Flugplanung mittels spezieller Software des Drohnenherstellers. Bei den Testflächen in Spanien beträgt die Flughöhe 10 m und in Sachsen 8 m. Längs- und Querüberdeckung ergeben jeweils 80% und 60%. In Tabelle 1 sind die sich daraus ergebenden Bildverbandparameter dargestellt. Die Bildblöcke müssen in allen Fällen aufgrund der begrenzten Akkuleistung unterbrochen und mit neuem Akku fortgesetzt werden. Letzte Einstellungen der Flugmatrix – absolute Lage des ersten Aufnahmepunktes und Orientierung des Bildblocks – müssen vor Ort erfolgen, da Kartenmaterial mit ausreichendem Maßstab für die kleinen Testflächen für die Arbeit nicht gegeben ist. Die Erfassung von Campo 1 erfolgte unter erschwerten Bedingungen. Aufgrund stärkeren Windes sind häufig unscharfe Bilder im Bildblock enthalten und einzelne Flugstreifen stark zueinander verdreht.

Tabelle 1: Parameter der Flugplanung

	Brennweite [mm]	Maßstabszahl	Bodenauflösung [mm]	Bildseite a (Gelände) [m]	Bildseite b (Gelände) [m]	Basis [m]	Streifenabstand [m]	Bilderanzahl pro Streifen	Streifenanzahl
Spanien	5.1	1961	3.96	14.42	10.82	2.16	5.77	25	7
Sachsen	5.1	1569	3.17	11.54	8.65	1.73	4.62	19	5

Bei der verwendeten Amateurkamera ist von einer instabilen inneren Genauigkeit auszugehen. Um die Reproduzierbarkeit der Kameraparameter zu untersuchen, wird sie vor dem Einsatz im Gelände mehrmals kalibriert. Zusätzlich wird die Kamera direkt vor und nach jedem Flug mittels eines mobilen Kalibrierfelds kalibriert (Abbildung 3). Die Werte der Verzeichnung sind zwar hoch, bleiben aber zwischen den verschiedenen Aufnahmevarianten nahezu konstant. Die Veränderungen der Lage des Bildhauptpunktes sowie der Kamerakonstante vor und nach jedem Flug besitzen hingegen einen wesentlich stärkeren Einfluss auf die Genauigkeit der Objektpunkte.

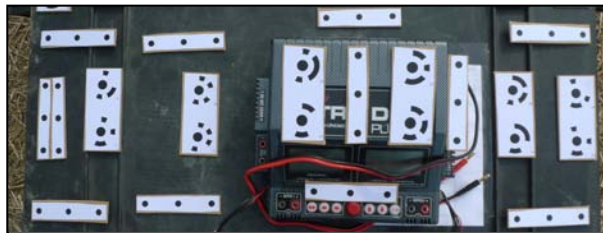


Abb. 3: mobiles Kalibrierfeld

Die Orientierung der Bildblöcke erfolgt mit LPS. Aufgrund der stabilisierenden Kamerahalterung, die eine Nadiraufnahme und Einhaltung der geplanten Überlappung erleichtert, und der autonomen Ansteuerung der Bildaufnahmepositionen kann eine Aerotriangulationskette erfolgen, wie sie bei Aufnahmen mit Flugzeugen üblich ist. Die Bündelblockausgleichung (BBA) erfolgt einstufig. Als Näherungswerte für die Projektionszentren werden die vom System aufgezeichneten GPS-Lagekoordinaten verwendet. Die Genauigkeit der GPS-Höhenkoordinate – Schwankungen im Meterbereich – ist bei der niedrigen Flughöhe nicht ausreichend. Ersatzweise kommen die barometrisch gemessenen Höhen zur Anwendung. Es wird mit entzeichneten Bildern gearbeitet. Zur automatischen Verknüpfungspunktsuche verwendet LPS die Kreuzkorrelation zur Grobbestimmung und anschließend LSM (Least-Square-Matching) zur sub-pixelgenauen Messung der Bildkoordinate. Mit den Originalbildern ist, aufgrund der starken Verzeichnung sowie der begrenzten Genauigkeit des GPS/IMU, besonders in den oberen Hanglagen bei abnehmender Überlappung die Punktzuordnung v.a. zwischen Bildern verschiedener Streifen nicht erfolgreich. Die Bildkoordinaten der Passpunkte werden mit einer iterativen sub-pixelgenauen Anpassung von Ellipsen – umgesetzt durch hauseigene Software – automatisch ermittelt. Das Ergebnis der Ausgleichung ist für alle drei Testflächen in Tabelle 2 dargestellt. Die Gesamtgenauigkeit liegt zwischen 0.5 und 1 Pixel, d.h. zwischen 1.6 und 4 mm im Objektraum.

Tab. 2: Statistik der Residuen der Verbesserungen der Passpunkte nach der BBA

	Lüttewitz ($s_0 = 0.55$ Pixel)			Campo 1 ($s_0 = 1.06$ Pixel)			Campo 2 ($s_0 = 0.49$ Pixel)		
	v_X [mm]	v_Y [mm]	v_Z [mm]	v_X [mm]	v_Y [mm]	v_Z [mm]	v_X [mm]	v_Y [mm]	v_Z [mm]
Mittelwert	-0.5	0	-0.4	0.3	-0.3	0.2	0	-0.1	-0.2
Stabw.	1.7	1.3	1.5	1.6	1.4	2.3	1.5	1.5	4

Die Referenzierung der einzelnen Scanpositionen der Laserscans wird im ersten Schritt mittels der in die Vermarkungsrohre eingefügten Zielmarken sowie zusätzlicher temporär installierter Zylinder vorgenommen. Danach erfolgt die Übertragung der vereinigten Punktwolke in das lokale Referenzsystem mit den gesteckten Zylindern mittels einer weiteren Helmert-Transformation. Die Genauigkeiten liegen zwischen 4 und 6 mm. Die Referenzkoordinaten der gesteckten Zylinder werden am Mittelpunkt der Deckfläche gemessen. Da die automatische Referenzierung der Scanpositionen mit den Zylindermittelpunkten geschieht, müssen die Referenzkoordinaten der Zylinder um die Zylinderhöhe reduziert werden. Im Gelände ist kein lotrechtes Einschlagen aller Vermarkungsrohre gewährleistet. Während die Auswirkung der alleinigen Reduzierung der Höhe für die Koordinatenübertragung bei schrägen Zylindern für die Höhe gering ist, ist sie für die Lage umso bedeutender.

4 Vergleich der UAV- und TLS-Daten

Mit den Werten der errechneten äußeren Orientierung, der kalibrierten inneren Orientierung und den entzeichneten Bildern wird in LPS ein erstes Geländemodell erstellt. Die Punktdichte beträgt durchschnittlich 1 Punkt/15 cm² und ist wesentlich niedriger als beim TLS. Innerhalb dieser Präsentation wird primär die Performance des triangulierten Blocks zur Punktwolke des TLS über die gesamte Testfeldfläche betrachtet. Dafür sind die gegebenen Punktdichten ausreichend. Dennoch muss für die weitere hochaufgelöste Geländemodellierung mit weiteren Matching-Algorithmen (z.B. HIRSCHMÜLLER ET AL., 2008) verfahren werden.

Der Vergleich der TLS- mit den UAV-Daten wird mit der Open-Source Software CloudCompare realisiert (Abbildung 5). Dabei werden die Distanzen in Z-Richtung zwischen der zu testenden Punktwolke (LPS) und der Referenzpunktwolke (TLS) nach der Chamfer-Methode berechnet (HEZEL ET AL., 2002). Bei der kleinen Testfläche in Sachsen liegen die Abweichungen innerhalb des Genauigkeitsbereichs des TLS. In Spanien werden die Differenzen jedoch größer. Verschiedene Ursachen müssen aufgelistet werden. Die Kamerakalibrierungen vor und nach dem Flug zeigen wesentlich größere Unterschiede für die Testflächen in Spanien im Vergleich zu Sachsen. Außerdem sind die Flughöhen in Spanien größer und somit wirkt sich die instabile Kamera zudem stärker auf das geometrische Modell aus. Des Weiteren sind die Testflächen Campo 1 und Campo 2 größer und die gesetzten Höhenpasspunkte im mittleren Streifen des Feldes sind anscheinend nicht ausreichend um den Bildblock zu stabilisieren. Höhen aus LPS werden in der Mitte der leicht konvexen Hänge unterschätzt. Bei der nächsten Messkampagne werden weitere Höhenpasspunkte ausgelegt und zusätzliche Querstreifen geflogen. Einen weiteren Einfluss auf die unterschiedlichen Genauigkeiten in Spanien und Sachsen hat die auf Campo 1 und 2 vorhandene Vegetation. Nur die östlichen Feldhälften wurden gegggt, während auf den Westlichen Getreidestoppeln stehen blieben. Auch hier sind die Höhen der TLS-Punkte aufgrund unzureichender Punktzuordnung bei den bewachsenen Flächen wesentlich größer.

Abschließend ist für Campo 1 festzustellen, dass sich die erschwerten Aufnahmebedingungen in den Genauigkeiten des Geländemodells – generiert aus den UAV-Daten – widerspiegeln. Dennoch sind die Differenzen zwischen TLS und UAV auf den vegetationsfreien Flächen in Spanien vielversprechend.

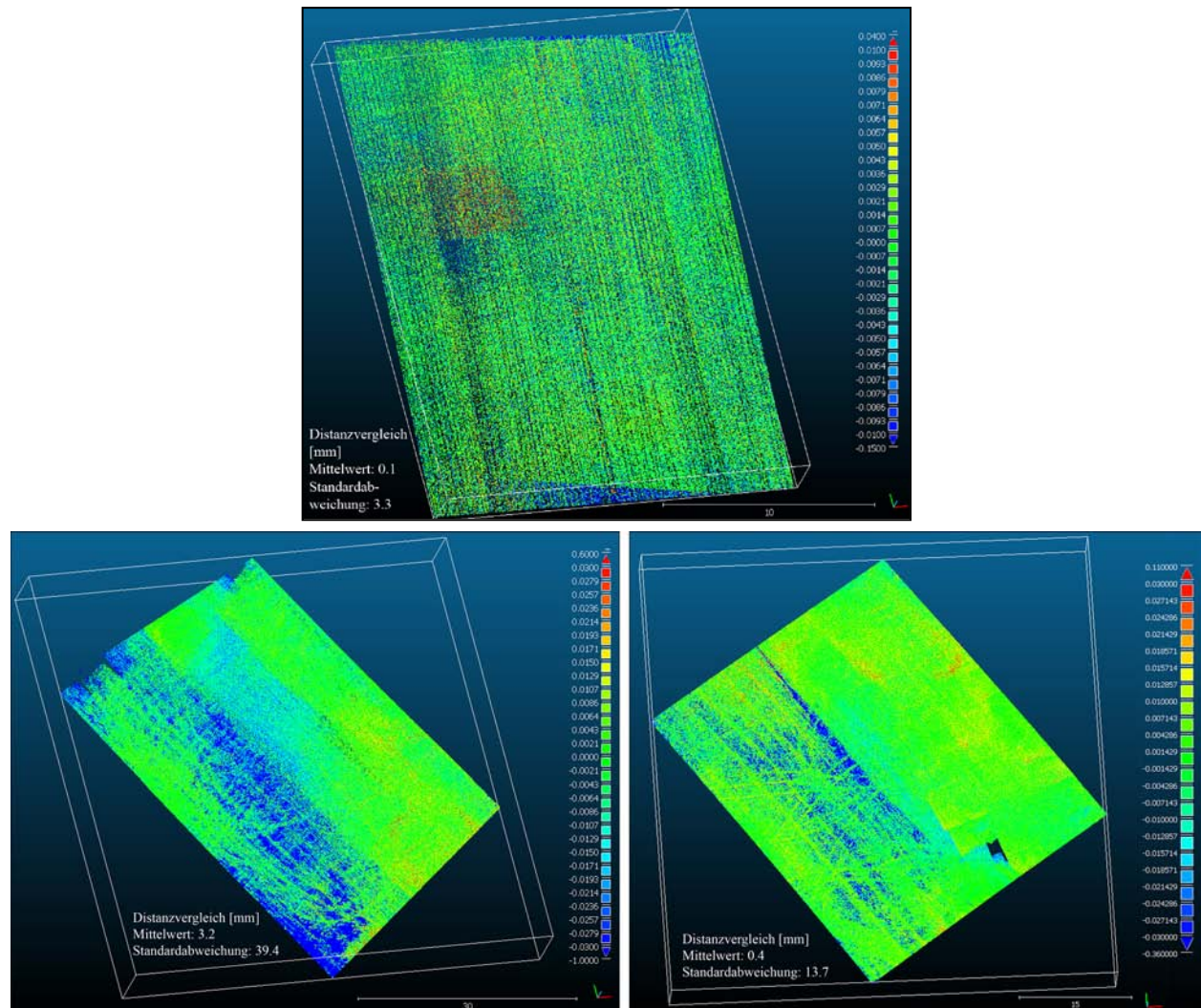


Abb. 5: Differenz Punkte der Geländemodelle erzeugt mit LPS und TLS für die Testflächen in Sachsen (oben) und Spanien (unten links Campo 1, unten rechts Campo 2)

5 Ausblick

Ein erster Vergleich der UAV und TLS-Daten konnte demonstrieren, dass es möglich ist mit dem definierten lokalen Referenzsystem Genauigkeiten unter einem Zentimeter zu erreichen. In wieweit die hochaufgelöste Geländeerfassung zur Bodenerosionsmodellierung beitragen kann, werden weitere Messkampagnen mit multi-temporalen Vergleichsdaten zeigen.

Die Verwendung weiterer Software ist nötig. Neben der einstufigen BBA wird in einem nächsten Schritt zweistufig mit verschiedener Open-Source Software (Beispiele siehe KERSTEN ET AL., 2012) gearbeitet, in denen z.B. der SIFT-Operator (LOWE, 1999) implementiert ist. Eine deutlich

höhere Verknüpfungspunktdichte ermöglicht die Selbstkalibrierung und Verwendung der verzeichneten Originalbilder.

6 Literaturverzeichnis

- BOEHLER, W.; BORDAS VICENT, M. & MARBS, M. (2003): Investigating Laser Scanner accuracy. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV – 5/C15, 696-701.
- BRACKEN, L. J. & KIRKBY, M. J. (2005): Differences in hillslope runoff and sediment transport rates within two semi-arid catchments in southeast Spain. *Geomorphology*, **68** (3-4), 183-200.
- CRAMER, M. & HAALA, N. (2012): Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Bildauswertung für Daten unbemannter Luftfahrzeuge. *DGPF Tagungsband*, **21**, 428 - 440.
- D'OLEIRE-OLTMANN, S.; MARZOLFF, I.; PETER, K. D. & RIES, J. B. (2012): Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco. *Remote Sensing*, **4**, 3390-3416.
- EISENBEIß, H. (2004): A mini Unmanned Aerial Vehical (UAV): System Overview and Image Acquisition. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36 – 5/W1.
- EISENBEIß, H. & ZHANG, L. (2006): Comparison of DSMs generated from Mini UAV Imagery and Terrestrial Laser Scanner in a Cultural Heritage Application. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36 – 5, 90-96.
- FAUST, D. & SCHMIDT, M. (2009): Soil erosion processes and sediment fluxes in a Mediterranean marl landscape, Campiña de Cádiz, SW Spain. *Z. Geomorphologie N.F.*, **52** (2), 247-265.
- HAUBROCK, S.-N.; KUHNERT, M.; CHABRILLAT, S.; GÜNTNER, A. & KAUFMANN, H. (2009): Spatiotemporal variations of soil surface roughness from in-situ laser scanning. *Catena*, **79**, 128 - 139.
- HANCOCK, G.R.; CRAWTER, D.; FITYUS, S.G.; CHANDLER, J. & WELLS, T. (2008): The measurement and modelling of rill erosion at angle of repose slopes in mine spoil. *Earth Surf. Process. Landf.*, **33**, 1006 - 1020.
- HEZEL, S.; KUGEL, A.; MÄNNER, R. & GAVRILA, D. M. (2002): FPGA-based Template Matching using Distance Transforms. *Proc. of the IEEE Symposium on Field-Programmable Costum Computing Machines*, 89 - 97.
- HIRSCHMÜLLER, H. (2005): Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 2005, San Diego, CA, USA, Volume 2, 807 - 814.
- JESTER, W. & KLIK, A. (2005): Soil surface roughness measurement-methods, applicability, and surface representation. *Catena*, **64**, 174 - 192.
- KERSTEN, T.; LINDSTAEDT, M.; MECHELKE, K. & ZOBEL, K. (2012): Automatische 3D-Objektkonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie. *DGPF Tagungsband*, **21**, 137 - 148.
- KIRCHGÄSSNER, U.; PUTZE, U.; SCHÖNERMARK, M.V. & HAALA, N. (2010): Anforderungen an die Auswertung UAV-gestützter Fernerkundungsdaten. *DGPF Tagungsband*, **19**, 597 - 605.
- LOWE, D. G. (1999): Object recognition from local scale-invariant features. *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, **2**, 1150 - 1157.

- NEITZEL, F. & KLONOWSKI, J. (2011): Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 38 – 1/C22.
- POESEN, J. & HOOKE, J. M. (1997): Erosion, flooding and channel management in Mediterranean Environments of southern Europe. Progress in Phys. Geogr. **21** (2), 157 - 199.
- RAU, J.; JHAN, J. P.; LO, C. F. & LIN, Y. S. (2012): Landslide Mapping Using Imager Acquired by a fixed-wing UAV. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 38 – 1/C22.
- RIEKE-ZAPP, D. & NEARING, M. (2005): Digital Close Range Photogrammetry for Measurement of Soil Erosion. The Photogrammetric Record, **20** (109), 69 - 87.
- SCHMID, T.; SCHACK-KIRCHNER, H. & HILDEBRAND, E. (2004): A case study of terrestrial laser scanning in erosion research: calculation of roughness and volume balance at a logged forest site. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 36 – 8/W2, 114 - 118.
- WALLING, D. E.; SCHULLER, P.; ZHANG, Y. & IROUMÉ, A. (2009): Extending the timescale for using beryllium 7 measurements to document soil redistribution by erosion. Water Resources Research, **45**.