

KONTINUIERLICHES SCHNEEDECKEN-MONITORING MITTELS ZEITSERIEN VON 3D-PUNKTWOLKEN AUS AUTOMATISCHEM TERRESTRISCHEM LASERSCANNING

STEFAN EBERLEIN¹, KATHARINA ANDERS^{1,2}; BERNHARD HÖFLE^{1,2,3}

¹GEOINFORMATIK, GEOGRAPHISCHES INSTITUT, UNIVERSITÄT HEIDELBERG, IM NEUENHEIMER FELD 368, 69120 HEIDELBERG

²IWR, UNIVERSITÄT HEIDELBERG, IM NEUENHEIMER FELD 205, 69120 HEIDELBERG

³HEIDELBERG CENTER FOR THE ENVIRONMENT, UNIVERSITÄT HEIDELBERG, IM NEUENHEIMER FELD 229, 69120 HEIDELBERG

E-MAIL: HOEFLE@UNI-HEIDELBERG.DE

Zusammenfassung: Mit einer hochaufgelösten 3D-Zeitreihe der Oberfläche kann die morphologische Schneedeckenveränderung in ihrer raumzeitlichen Variabilität untersucht werden. Dazu wurde die Schneedecke unterhalb der UFS über mehrere Tage stündlich mit einem terrestrischen Laserscanner aufgenommen. Mit den Daten wird eine statistische Methode entwickelt, um automatisiert Informationen über die Dynamik der Schneedecke abzuleiten. Dies trägt zu einem neuen Ansatz für die autonome Langzeit-Beobachtung von topographischen Veränderungen bei.

Abstract: High-resolution 3D time series data of the surface can be used to analyze spatiotemporal morphologic changes of the snow cover. For this, a time series of the snow cover below the UFS was acquired hourly over several days with a terrestrial laser scanner. Using this dataset, a statistical method is developed for morphological change analysis to automatically derive information on spatial and temporal dynamics of the snow surface. This contributes to a novel approach of autonomous long-term monitoring of topographic change.

Einführung

Schnee spielt eine entscheidende Rolle in vielen Umweltprozessen, beispielsweise in der Hydrologie, Glaziologie, Ökologie oder Geomorphologie (Adam et al., 2009; Wipf et al., 2010; Coppola et al., 2018). Genaue Informationen über die Dynamik der Schneedecke unterstützen nicht nur die Untersuchung dieser Prozesse, sondern können auch zur Parametrisierung von Umweltmodellen verwendet werden (Abudu et al., 2012).

Um die raumzeitliche Dynamik der Schneedecke untersuchen und letztendlich besser verstehen zu können, ist eine räumlich und zeitlich detaillierte Beobachtung der Topographie erforderlich. Dies ist möglich durch eine Aufnahmestrategie mit permanentem Laserscanning (Eitel et al., 2016). Hierbei wird ein terrestrischer Laserscanner (TLS) an einer fixen Position aufgestellt und nimmt die umgebende Topographie in regelmäßigen, definierten Zeitabständen auf. Jede TLS-



Abb.1: Terrestrischer Laserscanner im Außenbereich der UFS

Aufnahme generiert eine 3D-Punktwolke, welche die Oberfläche in einer Sammlung von Millionen bis Milliarden Punktkoordinaten (XYZ) repräsentiert. Die dadurch generierte 3D-Zeitserie bildet eine flächenhafte Repräsentation der Topographie mit der Genauigkeit der terrestrischen Lidar-Messung (mm-cm) in hoher zeitlicher Auflösung.

Um räumlich und zeitlich variable Änderungen verschiedener Magnitude, Geschwindigkeit und Häufigkeit aus diesen sehr umfangreichen (10^8 Punkte / h) Datensätzen zu extrahieren, werden im Projekt Auto3Dscapes (<https://uni-heidelberg.de/auto3Dscapes>) neue Analysemethoden entwickelt mit dem Ziel, ein autonomes geomorphologisches Monitoring zu ermöglichen.

Datenerfassung

Im April 2018 wurde das schneebedeckte Gelände unterhalb der UFS über sechs Tage stündlich mit einem terrestrischen Laserscanner aufgenommen. Das Foto in Abbildung 1 zeigt das TLS Instrument mit Aussicht auf die Schneedecke.

Die rohen 3D-Punktwolken des Laserscanners enthalten nur die relativen Koordinaten der

Punkte zum Standort des Laserscanners. Aufgrund minimaler Veränderungen in der Position des Instruments, kann es über die Zeit zu Versätzen zwischen den Punktwolken kommen. Um sie vergleichen zu können, muss dieser Versatz korrigiert werden. Diese sogenannte Co-Registrierung geschieht mit einem iterativen Verfahren, das die Punktwolken anhand stabiler Oberflächen, die in den Scans der Szene an der gleichen Stelle sein müssen, zueinander verschiebt. Wenn der Versatz zwischen den Scans korrigiert ist, werden die Koordinaten in ein geographisches Koordinatensystem transformiert, um die TLS-Daten mit anderen räumlichen Daten verknüpfen zu können. Für diese Georeferenzierung dienen Punktmessungen eines Globalen Satellitennavigationssystems, mit dem markante Punkte, zum Beispiel Zaunpfähle oder Gebäudeecken, in der Szene mit einer Genauigkeit von 1-2 cm eingemessen wurden. Die vorprozessierte 3D-Zeitserie ist die Datengrundlage für die Ableitung zeitlich und räumlich hochaufgelöster Informationen über die Schneedeckenveränderungen in diesem Zeitraum.

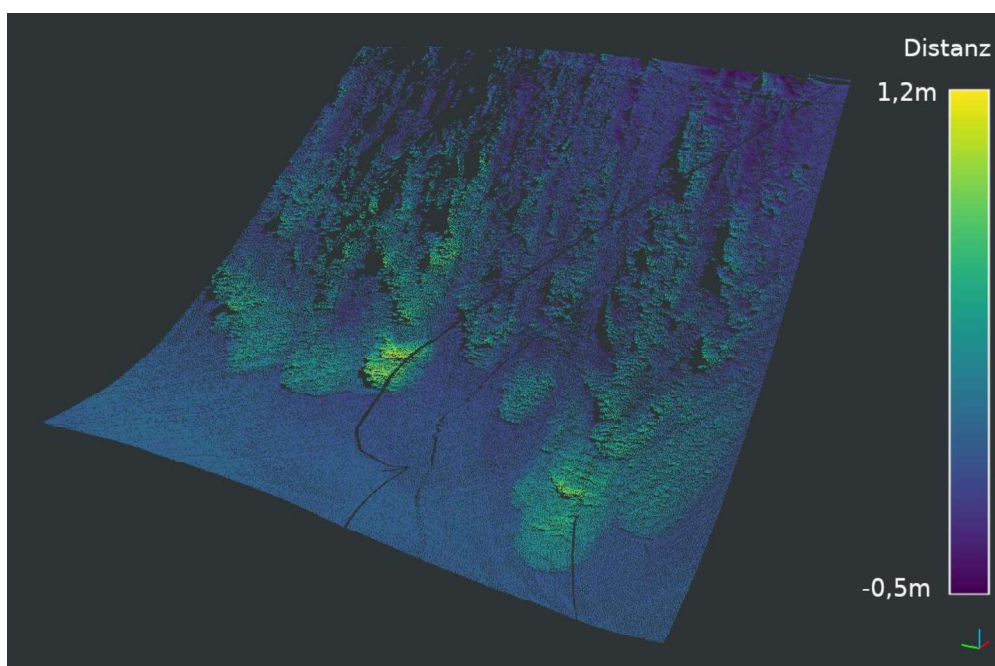


Abb.2: Oberflächenänderung der Schneedecke an einem Hangausschnitt quantifiziert als Punktwolken-Distanz der lokalen Oberfläche zwischen zwei Aufnahmepunkten

Im Zeitraum der Datenaufnahme herrschten außergewöhnlich hohe Tagestemperaturen und Strahlungswerte, die vor allem ein Absacken und Verdichten der Schneedecke sowie vereinzelte Lawinenabgänge bewirkten. Die durch diese Prozesse hervorgerufenen Änderungen in der Schneehöhe treten beim zeitlichen Vergleich der Oberflächendaten vorwiegend als negative Höhenänderungen hervor. Im Ablagerungsbereich der Schneelawinen ergibt sich eine (abrupte) positive Höhenänderung. Abbildung 2 zeigt das Ergebnis des Vergleichs zweier Punktwolken aufeinanderfolgender Zeitpunkte.

Methoden

Um die Information über morphologische Veränderungen der Schneedecke aus dem großen raumzeitlichen Datensatz extrahieren zu können, wird eine automatisierte Analyseverfahren entwickelt. Dabei wird der Aufnahmebereich in ein räumliches Raster aus möglichst homogenen Zellen aufgeteilt und die Veränderung der Schneehöhe innerhalb dieser Zellen analysiert. Bisherige Methoden beziehen hier nur jeweils zwei Zeitpunkte (vorher/nachher) in die Analyse mit ein, wie es beispielhaft in Abbildung 2 dargestellt ist. Damit lassen sich nur bedingt Aussagen über den Prozessverlauf treffen und die zeitliche Korrelation über mehrere Zeitpunkte wird außer Acht gelassen. Um dies zu verbessern, analysieren wir für jede Zelle die komplette

Zeitreihe aus 3D-Daten mit einem statistischen Modell. Dabei werden die Messunsicherheiten des Laserscanners ebenso berücksichtigt wie die raumzeitliche Autokorrelation der Messdaten. Umgesetzt wird dies mittels eines Generalized Additive Mixed Models (GAMM, Hastie, 1986, Lin, 1997). Das additive Modell ermöglicht es, den Einfluss der Zeit mit einer stückweisen kubischen Regression zu modellieren. Damit können wir den Zeitverlauf der mittleren Schneehöhe detailliert abbilden und dabei auch zeitliche Änderungen der Messvarianz (Homoskedastizität) berücksichtigen. Zusätzlich wird als erklärender Faktor die räumliche Position der Punktdaten mit einer linearen Regression abgebildet.

Effektiv wird damit der Einfluss der Hangneigung herausgerechnet. Schließlich können neben der zufälligen Messstreuung mit dem gemischten Modell auch Effekte der Co-Registrierung integriert werden. So wird es möglich, in den Zellen selbst kleine statistisch signifikante Veränderungen der Schneehöhe zu detektieren, die bislang durch die Messunsicherheiten verdeckt werden. Die effiziente Datenabfrage für die einzelnen Zellen wird durch eine spaltenorientierte Datenbank ermöglicht.

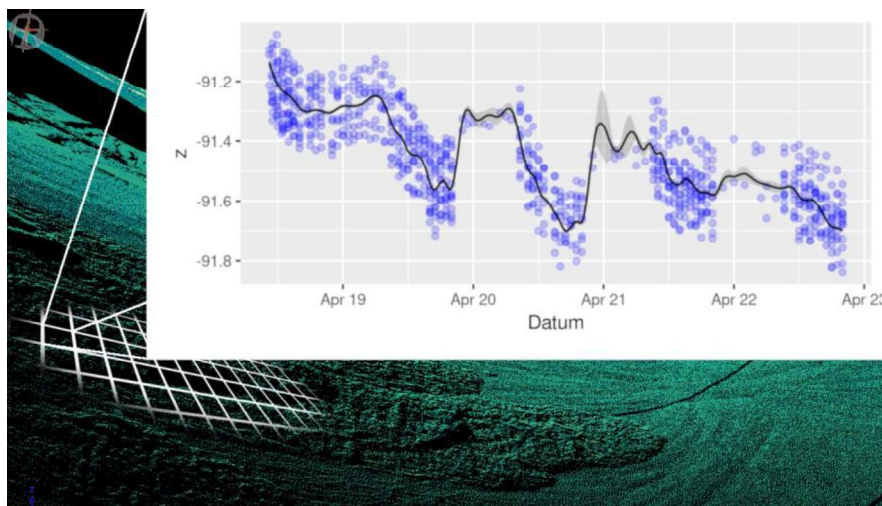


Abb.3: Illustration der Analyseverfahren. Pro Zelle im Raum wird die Zeitreihe mit einem Modell beschrieben, aus dem sich Informationen über tatsächliche Veränderungen ableiten lassen. Die blauen Punkte entsprechen den gemessenen Höhen und die schwarze Linie ist die Vorhersage des Modells inkl. Standardfehler (grau)

Ergebnisse

Durch die Analyse des räumlichen Rasters mit einem GAMM können im Vergleich zu herkömmlichen Methoden, die nur zwei Zeitschritte berücksichtigen, besonders feine Veränderungen detektiert und deren Dynamik beschrieben werden. Abbildung 3 veranschaulicht ein exemplarisches Ergebnis der Analyse. Tagsüber sind in den Daten Höhenänderungen durch überlappende Prozesse der Ablation, Verdichtung und Lawinen zu erkennen, während sich die Höhen in den gemessenen Daten nachts kaum verändern. Durch die Abbildung der Zeitreihe mit einem Modell lassen sich auch weitere Eigenschaften der Veränderungen ableiten, zum Beispiel Veränderungsgeschwindigkeiten und räumliche Streuung der Veränderungen. Damit wird es möglich, einzelne Prozesse besser zu charakterisieren.

Zukünftige Forschung

Nach Abschluss der Entwicklung der GAMM-basierten Methodik kann die erfasste 3D-Zeitreihe der Schneedecke automatisiert analysiert werden. Die resultierenden Höhenänderungen in unterschiedlichen Bereichen des Gebiets und zu verschiedenen Zeitpunkten werden die Schneedeckendynamik in beispiellosem zeitlichem Detail darstellen können. Die Analysewerkzeuge können dann auch auf eine Fortführung der 3D-Zeitreihe angewandt werden, zum Beispiel während der Schneefallperiode oder über einen ganzen Winter. Die Anwendung der entwickelten Methodik bleibt nicht auf die Beobachtung von Schneedecken beschränkt und ist auf verschiedenste geomorphologisch dynamische Untersuchungsgebiete übertragbar.

Literatur

Abudu, S., Cui, C., Saydi, M. und King, J. P.: Application of snowmelt runoff model (SRM) in mountainous watersheds: A review. *Water Sci. Eng.* 5, 123–136, 2012.

Adam, J. C., Hamlet, A. F. und Lettenmaier, D. P.: Implications of global climate change for snowmelt hydrology in the twenty-first century. *Hydrol. Process.* 23, 962–972, doi: 10.1002/hyp.7201, 2009.

Coppola, E., Raffaele, F. und Giorgi, F.: Impact of climate change on snow melt driven runoff timing over the Alpine region. *Clim. Dyn.* 51, 1259–1273, doi: 10.1007/s00382-016-3331-0, 2018.

Eitel, J. U. H., Höfle, B., Vierling, L. A., Abellán, A., Asner, G. P., Deems, J. S., Glennie, C. L., Joerg, P. C., LeWinter, A. L., Magney, T. S., Mandlbürger, G., Morton, D. C., Müller, J. und Vierling, K. T.: Beyond 3-D: The new spectrum of lidar applications for earth and ecological sciences. *Remote Sensing of Environment*, 186, 372–392, doi: 10.1016/j.rse.2016.08.018, 2016.

Hastie, T. und Tibshirani, R. Generalized Additive Models. *Stat. Sci.* 1, 297–310, doi: 10.1214/ss/1177013604, 1986.

Lin, X. und Zhang, D. Inference in Generalized Additive Mixed Models. *J. R. Stat. Soc. Ser. B* 61, 381–400, 1997.

López-Moreno, J. I., Revuelto, J., Alonso-González, E., Sanmiguel-Valladolid, A., Fassnacht, S.R., Deems, J., und Morán-Tejeda, E. Using very long-range terrestrial laser scanner to analyze the temporal consistency of the snowpack distribution in a high mountain environment. *Journal Mt. Sci.* 14, 823–842, doi: 10.1007/s11629-016-4086-0, 2017.

Wipf, S. und Rixen, C. A review of snow manipulation experiments in Arctic and alpine tundra ecosystems. *Polar Res.* 29, 95–109, doi: 10.1111/j.1751-8369.2010.00153.x, 2010.

Danksagung

Die Arbeit wurde teilweise mit Mitteln der Heidelberg Graduate School of Mathematical and Computational Methods for the Sciences (HGS MathComp) finanziert, gegründet in der Exzellenzinitiative der DFG (GSC 220).