

# Earth (sub-) surface processes and (micro-) climate: methodological improvements and variability in water-limited environments of northern Chile

*Zusammenfassung der Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität zu Köln, vorgelegt von Joel Mohren aus Düren. Die Dissertation wurde von der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität zu Köln angenommen. Die Disputation fand am 09.06.2021 statt.*

## **Kurzfassung**

Das Wirken und die Ausprägung chemischer und physikalischer Prozesse auf der terrestrischen Erdoberfläche und im Bodenkörper hängen von einer Reihe endogener und exogener Faktoren ab. Die Untersuchung der Auswirkung ausgewählter – und in der Regel dominanter – Faktoren auf solche Erdoberflächen- und Bodenprozesse ist in der Regel dort am vielversprechendsten, wo diese Prozesse unter möglichst langfristig eingrenzbaaren Bedingungen annähernd isoliert betrachtet werden können.

Im Rahmen dieser Dissertation werden schwerpunktmäßig Daten aus zwei verschiedenen Studiengebieten vorgestellt, bei denen solche Grundvoraussetzungen näherungsweise erfüllt werden. Beide Studiengebiete befinden sich weniger als 10 km vom Pazifischen Ozean entfernt in der Küstenkordillere Nordchiles. Hier wurde kleinräumige ( $< 1 \text{ km}^2$ ) fluviale Topografie als „natürliche Laboratorien“ ausgewählt, deren topographische Parameter die Verkettung von (mikro-) klimatischen Bedingungen und verschiedenen Erdoberflächen- und Bodenprozessen sowie deren zeitintegrierten Prozessraten reflektieren. Die konträre geographische Lage der vorgestellten Studiengebiete resultiert in wesentlichen Unterschieden bezüglich der generell vorherrschenden, großräumigen klimatischen Bedingungen. Das nördliche Studiengebiet befindet sich im hyperariden Kerngebiet der Atacama-Wüste Nordchiles ( $\sim 21.4^\circ\text{S}$ ) am nördlichen Rand des Río Loa Canyons, wo Erdoberflächen- und Bodenprozesse primär abiotisch gesteuert werden. Das südlichen Studiengebiet hingegen ist räumlich durch drei breitenkreisparallel orientierte Wassereinzugsgebiete innerhalb der Altos de Talinay bei  $\sim 30.4^\circ\text{S}$  bis  $30.5^\circ\text{S}$  definiert. Dort erlaubt das generell aride bis semi-aride Klima das großflächige Wachstum von vaskulären Pflanzen, sowie das Auftreten von Bioturbation.

Für beide Studiengebiete werden verschiedene Datensätze vorgestellt, die Rückschlüsse auf die Wechselwirkungen zwischen lokalem bzw. Mikroklima, deren Veränderlichkeit über die Zeit und Erdoberflächen- und Bodenprozessen zulassen. Im nördlichen Studiengebiet lässt die Analyse der Konzentration verschiedener kosmogener Radionuklide (hier:  $^{10}\text{Be}$ , *in situ*  $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ) aus amalgamierten Kiesen den Schluss zu, dass die untersuchten Wassereinzugsgebiete einen breitenkreisparallelen Erosionsgradienten repräsentieren. Abgeleitete Erosionsraten variieren zwischen  $\sim 1 \text{ m Mio. J.}^{-1}$  im östlichen Hinterland bis  $\sim 40 \text{ m Mio. J.}^{-1}$  im westlichen Teil des Studiengebietes. Diese Ergebnisse

werden unterstützt durch die Auswertung von Höhen- und Klimadaten sowie Feldbeobachtungen, welche expositionsabhängige Unterschiede beim Mikroklima sowie Korrelationsmuster zwischen geomorphologischen Parametern und Erosionsraten offenbaren. Demnach integriert die Entwicklung der dortigen Topografie über Zeiträume von  $10^5$  bis  $10^6$  Jahren, wobei die kosmogenen *in situ*  $^{14}\text{C}$  Konzentrationen ebenfalls einen signifikanten Rückgang fluvialer Aktivität mindestens seit dem Holozän, wahrscheinlich auch seit dem letzten glazialen Maximum, nahelegen. Auch wird deutlich, dass fluviale Erosion durch Krustenbedeckung und/oder halitische Verkrustung des Bodens moduliert wird, deren Bildung wiederum durch spezifische, hangexpositionsabhängige mikroklimatische Bedingungen hervorgerufen wird und/oder begünstigt werden kann.

Für das südliche Studiengebiet werden Datensätze zu hangparallelen Bodendichten und Bodenmächtigkeiten vorgestellt, die entlang talquerender Klimasequenzen auf Hangspornen und Hangrücken generiert wurden. Da heutige Böden das kumulierte Ergebnis langzeitlicher Pedogenese sind, stellen gemessene Bodendichten und Bodenmächtigkeiten zeitintegrierte Messgrößen dar. Im konkreten Fallbeispiel zeigt sich eine expositionsabhängige, insignifikanter Zunahme der mittleren Bodendichte um  $0,04\text{-}0,18\text{ g cm}^{-3}$ , sowie eine Abnahme der mittleren Bodenmächtigkeit um  $4\text{-}13\text{ cm}$  auf nordexponierten Hängen gegenüber südexponierten Hanglagen. Diese Messdaten decken sich mit Höhendaten und Feldbeobachtungen, aus denen das Vorhandensein von ausgeprägten, expositionsabhängigen Kontrasten der Böschungswinkel und Hangflächen (Talasymmetrie) sowie der Vegetationsbedeckung abgeleitet werden kann. Unterschiede in Bezug auf das Mikroklima werden in beiden Studiengebieten primär durch die Hangexposition gegenüber Nebel und Sonnenstrahlung bedingt, wobei die Exposition gegenüber Wind vor allem im nördlichen Untersuchungsgebiet eine signifikante Rolle spielen könnte. Daraus kann abgeleitet werden, dass diese Faktoren die differenzielle Entwicklung der Topografie in den Studiengebieten bedingen.

Neben ihrer Bedeutung als physikalische Kenngröße ist die Dichte des Untergrunds auch ein wichtiger Parameter bei der Berechnung von Altern oder Prozessraten basierend auf der Konzentration terrestrischer kosmogener Nuklide. Da sie jedoch bislang in schwer zugänglichen Studiengebieten nur unter unverhältnismäßigem Aufwand zu Messen war, wurde eine alternative Methode, die auf dem Einsatz photogrammetrischer Techniken basiert, weiterentwickelt und in verschiedenen Testreihen an der Universität zu Köln und in einer Kiesgrube bei Köln erprobt. Aus diesen Tests folgt, dass auch ohne die Nutzung von kommerzieller Software und hochpreisigem Kameraequipment mit dieser Methode Bodendichten mit einer Präzision und Richtigkeit von  $> 95\%$  ermittelt werden können. Die Einfachheit und Verlässlichkeit der Anwendung dieser Methode erlaubte es wiederum, die Bodendichte entlang der räumlich entlegenen Proben transekte in den Altos de Talinay zu ermitteln. Dies unterstreicht die Relevanz der Methodik, auch für Anwendungsgebiete außerhalb der Geowissenschaften. Besonders wichtig für die Quantifizierung von Prozessraten mittels kosmogener Nuklide ist in diesem Zusammenhang, dass sich die Bodendichten entlang eines Hangsporns im Studiengebiet um bis zu  $0,6\text{ g cm}^{-3}$  unterscheiden können. Insgesamt stellen die im Rahmen dieser Dissertation erhobenen Daten

und die angewandten Methoden einen Beitrag zur Entschlüsselung des Einflusses von (mikro-) klimatischen Bedingungen auf Erdoberflächen- und Bodenprozesse über die Zeit dar. Die getestete Methodik zur Bestimmung von Bodendichten ermöglicht ferner eine genauere Herleitung von Altern und Prozessraten basierend auf der Konzentration terrestrischer kosmogener Nuklide und ist ein nützliches Werkzeug zur großflächigen und individuell anpassbaren Quantifizierung dieser simplen Kenngröße.

## **Abstract**

Chemical and physical processes on Earth's terrestrial surfaces and in soils are governed by a variety of endogenic and exogenic factors. Investigating how individual (usually dominant) agents influence such Earth (sub-) surface processes over time, is generally most conclusive where these mechanisms can be studied isolated and under environmental conditions that are constrainable over the long term.

In the context of this dissertation, data obtained from two different study areas, which generally fulfil the requirements mentioned above, are presented. Both study areas are located in the Coastal Cordillera of northern Chile, within less than 10 km distance from the Pacific Ocean. In both cases, the focus of analysis is laid on small-scale ( $< 1 \text{ km}^2$ ) fluvial topography. These "natural laboratories" were chosen as the topographical features observed within these sites are considered to reflect linkages between (micro-) climatic conditions and the manifestation of Earth-shaping processes, including the rates at which the surfaces and soils undergo physical and chemical alteration over time. The two study areas are located at different latitudes, such that macroclimatic conditions differ significantly. The northern study area is situated within the hyperarid core of the Atacama Desert, on the northern rim of the Río Loa canyon ( $\sim 21.4^\circ\text{S}$ ), where (sub-) surface processes are predominantly abiotically controlled. In the southern study area, which is spatially defined by three latitude-parallel oriented catchments located within the Altos de Talinay between  $\sim 30.4^\circ\text{S}$  and  $30.5^\circ\text{S}$ , the arid to semi-arid climate promotes a widespread growth of vascular plants and bioturbation.

The datasets presented from both study areas allow to infer how local and/or microclimatic conditions and their variability over time can influence Earth (sub-) surface processes. In the northern study area, measured concentrations of terrestrial cosmogenic nuclides (TCNs; here, radionuclides:  $^{10}\text{Be}$ , *in situ*  $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ) from amalgamated channel pebbles indicate the presence of a latitude-parallel, time-integrated erosional gradient, with inferred  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  erosion rates increasing from  $\sim 1 \text{ m Myr}^{-1}$  in the eastern hinterland to  $\sim 40 \text{ m Myr}^{-1}$  at the western margin of the study area. This finding is supported by the analysis of a high-resolution digital terrain model (DTM), field evidence, and local climate records, revealing aspect-related microclimatic differences and correlation patterns between catchment metrics and erosion rates. Accordingly, local topography formation integrates over time periods of  $10^5$  to  $10^6$  years. However, a significant decrease in fluvial activity can be inferred from cosmogenic *in*

*situ*  $^{14}\text{C}$  concentrations at least for the Holocene epoch but possibly since the Last Glacial Maximum (LGM). Furthermore, there is evidence that fluvial erosion is modulated by the abundance of surface crust cover and/or halitic encrustation of the soil. The formation of both physically resistant layers, in turn, is shown to be likely caused and/or promoted by specific, slope aspect-related microclimatic conditions.

In the southern study area, data sets were generated along valley-crossing N-S oriented climosequences and include information on slope-parallel density and thickness of the soil layers analysed along ridges and spurs ('noses'). As present-day soils are the cumulative result of long-term pedogenesis, measured values of soil densities and depths are also time-integrated. In general, mean soil densities are  $0.04\text{-}0.18\text{ g cm}^{-3}$  higher and soil thicknesses  $4\text{-}13\text{ cm}$  lower on north-facing slopes (NFSs), when compared to south-facing slopes (SFSs). This finding coincides with datasets obtained from a DTM and observations made in the field, from which pronounced valley asymmetries and strong aspect-dependent contrasts in the type and abundance of vegetation cover are evident between NFSs and SFSs. Microclimatic differences on different slope aspects are primarily induced by their exposure to fog and solar radiation in both study areas, and exposure to strong afternoon winds could further be important particularly at the northern site. Over the long term, these factors are supposed to dictate differential topography formation in the water-limited environments that are investigated.

Density is not only an important physical measure of the subsurface, but it represents an important variable when it comes to the inference of ages and process rates based on the quantification of TCNs. However, the determination of soil densities in remote areas has remained a time-consuming and cumbersome task so far. Thus, an alternative method based on structure-from-motion multi-view stereo (SfM-MVS) photogrammetry was refined and tested at the facilities of the University of Cologne and in a gravel pit near Cologne. From these tests, it is found that soil densities can be determined with an accuracy and precision of  $> 95\%$  by applying the SfM-MVS photogrammetry-based technique, even without using commercial software and high-quality camera equipment. The simplicity and reliability of this method facilitated the acquisition of considerably large soil density datasets along the remote climosequences in the Altos de Talinay, which underlines the relevance of the methodology, also for non-geoscientific applications. A further result obtained from the generated dataset is that soil densities along the same nose can vary by up to  $0.6\text{ g cm}^{-3}$  in the study area, emphasising the importance of accurate soil density determinations for TCN-based applications. Altogether, the data generated and the methods used and developed within the scope of this dissertation are dedicated to contributing to a further deciphering of the influence of (micro-) climatic conditions on Earth (sub-) surface processes over time. Moreover, the refined SfM-MVS photogrammetry-based methodology to determine soil densities contributes to improving both accuracy and precision of process rates and ages inferred from the concentration of TCNs and provides a useful and adaptably tool to extensively quantify this simple physical measure in the field.