

Donnerstag 19. Oktober 2017

12:00-12:30

Analoge Modellierung von Tomahügeln [An Analogue Toma Hill Model]

Christian Wolkersdorfer^{1,2,3}, Kagiso S. More¹, Mlindelwa Lupankwa¹

¹Department of Environmental, Water and Earth Sciences, Tshwane University of Technology, Private Bag X680, Pretoria, 0001, Südafrika; ²Laboratory of Green Chemistry, Lappeenranta University of Technology, Sammonkatu 12, 50130 Mikkeli, Finland;

³Weidach 16, 6632 Ehrwald/Tirol; Corresponding author: christian@wolkersdorfer.info

Zusammenfassung

Die hier vorgestellte Studie befasst sich mit der analogen Modellierung von Tomahügeln des Fernpassbergsturzes im Labormaßstab. Tomahügel sind charakteristische Landschaftsformen bei zahlreichen Felsstürzen, und bislang wurden im Wesentlichen vier Hypothesen für die Entstehung von Tomahügeln vorgeschlagen:

- Transport von Bergsturzmaterial auf einem noch vorhandenen Gletscher
- Bildung von Tomahügeln durch Schmelzen von Toteis
- Verkarstung zur Bildung von Tomahügeln
- Transport von Bergsturzmaterial auf verflüssigten, wassergesättigten Sedimenten

Das Hauptziel der vorliegenden Studie war es, den potenziellen Beitrag der internen Erosion und Suffosion durch Grundwasser bei der Bildung von Tomahügeln zu untersuchen. Dazu diente ein Analogmodell im Labormaßstab in den Ausmaßen 1,5 × 1 × 0,8 m. Im Modell wurden hydrogeologische Berechnungen der Darcy-Geschwindigkeit und der hydraulischen Leitfähigkeit ermittelt, um das Verständnis der vorliegenden Studie zu unterstützen.

Im Durchschnitt lag die Abstandsgeschwindigkeit im Modell 10 Mal höher als die errechnete in der Realität. Die hydraulische Leitfähigkeit des Experiments wurde mit dem Feldverfahren der hydraulischen Leitfähigkeitsmessung von Bialas und Seelheim bestimmt. Die Entwicklung der Risse, die seitlichen Vertiefungen des Materials im Modell und der Transport feineren Materials belegen, dass die interne Erosion ein wesentlicher Beitrag zur Bildung von Tomahügeln ist.

Abstract

This study focuses on Toma Hills that were formed after the occurrence of the Fernpass rock slide in Tyrol, Austria. These Hills are typical for many rockslides and the name "Toma" is derived from the local dialects in Switzerland and Tyrol, Austria. So far, four hypotheses have been proposed for the formation of Toma Hills:

- Transportation of rockslide material on a still existing glacier
- Formation of Toma Hills due to dead ice melting
- Karstification resulting in the formation of Toma Hills
- Transportation of rockslide material on liquefied, water saturated sediments

The main objective of the present study was to investigate the potential contribution of internal erosion by suffosion due to the presence of groundwater flow in the formation of Toma Hills. Construction of laboratory scale analogue model was used to investigate internal erosion by suffosion processes. From the model, hydrogeological calculations of Darcy velocity and hydraulic conductivity were determined to help understanding the present study.

The average groundwater velocity in the model was found to be 10 times higher than the velocity in reality. Hydraulic conductivity of the experiment was found to correlate with the field method hydraulic conductivity measurement, Bialas and Seelheim hydraulic conductivities. Development of the cracks, lateral depressions of the material in the model and discharge of finer material implicated that internal erosion is a substantial contribution to Toma Hill formation.

Einleitung

Dieser Beitrag stelle eine stark verkürzte Version einer Publikation dar, die derzeit von den Verfassern für eine internationale, in Englisch erscheinende Zeitschrift vorbereitet wird. Außerdem sind von den fünf geplanten Laborversuchen bislang nur vier abgeschlossen, sodass die hier vorgestellten Ergebnisse sich nur auf diese vier Versuche beziehen. Dennoch lassen sich schon jetzt Grundzüge ableiten, die dem nationalen Fachpublikum zur Diskussion vorgestellt werden sollen.

Tomahügel sind charakteristische Landformen vieler alpiner Bergstürze, die sich durch eine kegelartige Form mit abgeflachter Spitze auszeichnen und aus lokalem Bergsturzmaterial bestehen (Abele 1964; Nussbaum 1934; Staub 1910). Sie haben ihren wissenschaftlichen Namen von den Lokalbezeichnungen derartiger Hügel aus der Schweiz (Brunner 1962; Tarnuzzer 1896); die Lokalnamen finden sich aber auch im Zwischentoren wieder („Dummabichl“ nördlich Biberwier).

Ohne hier auf Details einzugehen, wurde ihre Entstehung bislang auf die folgenden Ursachen zurückgeführt (Abele 1964; Carlson Calhoun 2015; Meili et al. 2013; Mostler 2013; Penck 1882; Penck and Brückner 1901; Poschinger 2005; Staub 1910):

- Transport von Bergsturzmaterial auf einem noch vorhandenen Gletscher
- Schmelzen von Toteis
- Fluvial
- Verkarstung
- Transport von Bergsturzmaterial auf verflüssigten, wassergesättigten Sedimenten

Keine dieser fünf Hypothesen kann jedoch alle im Gelände erkennbaren Phänomene abschließen erklären, und die beiden Ersten wurden zwischenzeitlich hinreichend widerlegt (Imre et al. 2010; Meili et al. 2013; Prager et al. 2006). Auch gegen die rein fluviale Entstehung wurden von verschiedenen Autoren schon früh Argumente vorgebracht (Nussbaum 1934) und Schleier (2016) stellt fest, dass bislang nicht alle Zusammenhänge zwischen der Mechanik und der Bildung von Tomahügeln fest stünden. Insbesondere die „glattflächigen, symmetrisch angeordneten Flanken und geradlinigen scharfen Firsten“ (Abele 1969) lassen sich mit den bisherigen Modellen noch nicht abschließend erklären.

Dem Erstverfasser war bei hydrogeologischen Kartierungen und Geländeuntersuchungen im Bereich des nördlichen Fernpasses (Abb. 1) drei Charakteristika aufgefallen, die teilweise schon von früheren

Bearbeitern beschrieben wurden: (1) an der seitlichen Begrenzung der Bergsturzmassen, zum anstehenden Fels hin sind Tälchen vorhanden, in denen ganzjährig oder nach der Schneeschmelze Bäche fließen, (2) zwischen den Tomahügeln finden sich Täler, in denen gelegentlich das fließende Grundwasser zu hören ist und (3) die Winkel der Hügelflanken entsprechen größenordnungsmäßig den natürlichen Schüttwinkeln des jeweiligen Materials aus denen die Hügel aufgebaut sind.



Abb. 1: Tomahügel im nördlichen Ast des Fernpassbergsturzes bei Biberwier (rechts). Links im Bild der Weißensee (unten) und Blindsee (oben). Blickrichtung nach Westen (Foto: Wolkersdorfer).

Im analogen Modell sollte die Hypothese getestet werden, dass die Tomahügel des Fernpassbergsturzes wesentlich durch interne Erosion und Suffusion geprägt wurden und dass sich die initiale Entstehung auf diese Prozesse zurückführen lässt. Niederschlag oder fluviatile Prozesse wurden in dem analogen Modell nicht mit in Betracht gezogen, obgleich die endgültige Gestaltung der Tomahügel möglicherweise fluviatil erfolgte. Keinesfalls ist diese Hypothese gegensätzlich zu der des Transports auf verflüssigten, wassergesättigten Sedimenten zu sehen, sondern als Ergänzung. Obgleich die vorgenannten Prozesse von verschiedenen Autoren erwähnt wurden, hat es bislang keine systematische Untersuchung darüber gegeben, in welchem Umfang diese für die Bildung der Tomahügel verantwortlich sind. Diese Lücke sollen unsere analogen Modellierungen schließen.

Methoden

Aus den Ergebnissen von 45 Siebanalysen der Sedimente aus dem nördlichen Fernpassgebiet (Schuch 1981) wurde ein idealisiertes Bergsturzsediment zusammengestellt. Grundlage dafür bildete der Median aller Siebanalysen (Tab. 1). Diese Verfahrensweise wurde als Vereinfachung gewählt, da keine umfangreicheren Daten zur Verfügung standen und zum Zeitpunkt der Untersuchungen kein, wie bei Wolkersdorfer (1991) beschriebener, repräsentativer Aufschluss an einem Tomahügel existierte. Tatsächlich stellt dies eine starke Vereinfachung der tatsächlichen sedimentologischen Zusammensetzung eines Tomahügels dar, zumal einige der Tomahügel aus kompaktem Felsmaterial und nicht aus kleinröchigem Bergsturzmateriale *sensu stricto* bestehen. Ziel des analogen Modells war es, einen Anfangszustand herzustellen, der weitgehend einem Zeitpunkt kurz nach dem Ende des Sturzstromereignisses entsprach. Basierend auf dieser idealisierten Zusammensetzung wurde im Labor ein synthetisches Sediment hergestellt (De Souza Hardware & Brick Depot, Hestea Park, Südafrika). Unter Verwendung der Siebanalysen errechnen sich ein Median der hydraulischen Leitfähigkeiten nach Seelheim und Bialas (Aschenbrenner 1996) von $5,0 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ ($n = 41$) und $1,8 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ ($n = 16$).

Tab. 1: Statistische Daten der 45 Siebanalysen in Schuch (1981). StdAbw: Standardabweichung der Population. Synt Sed: synthetisches Sediment (Ergebnisse der Siebanalyse von Experiment № 3).

Größenbereich	Median	Mittelwert	Min.	Max.	StdAbw	Synt Sed
0,002—0,063	29%	29%	10%	76%	14%	18%
0,063—0,20	7%	10%	3%	38%	8%	15%
0,2—0,63	13%	14%	2%	33%	6%	18%
0,63—2,00	15%	16%	1%	37%	9%	23%
2,00—6,30	15%	14%	1%	27%	7%	6%
6,30—20,00	11%	12%	0%	36%	9%	18%
20,00—63,00	2%	5%	0%	22%	7%	2%

Um die Entstehung der Tomahügel analog zu modellieren, wurde ein 150 × 100 × 80 cm großer Tank aus Polyethylen (PE) verwendet (PioneerPlastics, Rosslyn, Südafrika), der neun verschiedene Einlässe und drei Auslässe besitzt. Diese wurden so angeordnet, dass unterschiedliche Strömungsverhältnisse und Abstandsgeschwindigkeiten des „Grundwassers“ eingestellt werden konnten. In drei Experimenten wurden 0,98 m³ locker (1,52 t; Schüttdichte 1,56 g cm⁻³) und in einem Experiment 0,75 m³ kompaktiert (1,52 t; Schüttdichte 2,03 g cm⁻³) synthetisches, homogenisiertes und nicht verkarstungsfähiges „Bergsturzmateriale“ in den Tank gefüllt. Nach vollständiger Befüllung mit 1,52 t Material wurde mittels zweier Peristaltikpumpen (Heidolph PD 5006, Schwabach, Deutschland) Ca-Mg-HCO₃-Leitungswasser (Vegter 1996) unter Raumtemperatur (15 – 25 °C) durch das Bergsturzmateriale geleitet. Jedes Experiment hatte eine Dauer von 30 Tagen und der Durchfluss wurde zwischen 1,2 und 1,8 L/min bei einem hydraulischen Gradienten zwischen 0,13 und 0,40 eingestellt. Dies ist in etwa 10 Mal größer als der natürliche hydraulische Gradient.

Bei den analogen Modellierungen zur Entstehung der Tomahügel wurden die folgenden Parameter variiert: Durchfluss, hydraulischer Gradient sowie Kompaktierung des Materials. Niederschlag oder fluviale Prozesse wurde bei diesen Experimenten nicht simuliert, da der Tank keinen Abfluss für oberirdisch fließendes Wasser aufwies.

Zur Abschätzung der Wassergeschwindigkeit innerhalb des Tanks wurden das Hjulström-Diagramm (Hjulström 1935; Sundborg 1956) sowie die Kornverteilung des aus dem Tank erodierten Materials herangezogen.

Ergebnisse und Diskussion

Wenige Minuten nach Beginn des Wasserzulaufs in den Tank begannen sich laterale und transversale Risse im Sediment auszubilden, die sich im Verlauf des Experiments bis auf eine Breite von etwa 1 cm weiteten (Abb. 2). Weiterhin entstanden an den langen Seiten des Tanks bis zu 5 cm breite und wenige Zentimeter tiefe Depressionen, in denen sich nach längerer Zeit Wasser ansammelte. Unabhängig von der Zugabetiefe des Wassers begann ein Teil des Wassers innerhalb von Minuten bis Stunden oberflächlich zu fließen um nach wenigen Zentimetern oder Dezimetern im Sediment zu versickern. Risse traten in allen Experimenten auf, auch wenn das Material vor dem Experiment kompaktiert worden war (Experiment 4). Bei diesem Experiment mit kompaktiertem Material dauerte die Rissbildung jedoch länger als bei den Experimenten mit locker eingefülltem Sediment.

Bis zum Ende der Experimente zeigten sich verschiedenste, sich teilweise überkreuzende Risse von bis zu 1 cm Breite und nicht zu ermittelnder Tiefe. In einigen Experimenten zeigten sich längs der Risse Setzungen bis zu mehreren Zentimetern an denen sich abgeflachte Böschungswinkel ausbildeten. Wenn sich Risse überkreuzten kam es Mitunter dazu, dass isolierte „Hügel“ stehen blieben, an denen sich im Verlauf des Experiments materialcharakteristische Böschungswinkel einstellten.



Abb. 2: Ausgebildete, laterale Randmulde mit beginnender „See“- und Rissbildung. Zulauf von Links in 30 cm Tiefe. Abstand der Markierungsstriche 10 cm; rote, gestrichelte Line gibt die ursprüngliche Sedimenthöhe an (Foto: Wolkersdorfer).

Im Experiment 3, bei dem das Wasser an der tiefsten Stelle des Tanks zugegeben wurde, bildete sich an der Oberfläche, nahe der Einlassseite eine Limnokrene (Tümpelquelle) aus. Interessanterweise existiert eine solche Limnokrene auch südwestlich von Biberwier, in etwa 20 m Entfernung vom Pfarrer-Fink-Steig. Wie dort sprudelte das Wasser aus der Limnokrene und spülte feinkörniges Sediment an die Oberfläche.

In allen Experimenten bildeten sich flache Mulden aus, die sich gelegentlich mit Wasser zu füllen begannen, wenn Oberflächenerosion, ausgehend vom Einlass, eine Verbindung zwischen Einlass und der Mulde hergestellt hatte (Abb. 3). Einige dieser wassergefüllten Mulden hatten keine Oberflächenverbindung sondern wurden nur durch unterirdisch im Tank strömendes Wasser gespeist. Von der Anordnung her bildeten sich sowohl in Längsrichtung als auch in Querrichtung angeordnete Wassermulden. Sie scheinen somit den Fernpässe zu entsprechen.



Abb. 3: Laterale Randmulde mit „See“- und Rissbildung. Zulauf im Vordergrund aus 30 cm Tiefe und Fließrichtung in den Hintergrund. Abstand der Markierungsstriche 10 cm (Foto: Wolkersdorfer).

Bei den Experimenten 1 – 3 wurden 158 – 317 g des Sediments mit einer Korngröße von maximal 0,425 mm und einem d_{50} von 0,1 mm aus dem Tank erodiert, wobei sich keine Abhängigkeit von den experimentellen Parametern feststellen ließ. Basierend auf dem Hjulström-Diagramm (Hjulström 1935; Sundborg 1956) lassen sich somit interne Wassergeschwindigkeiten von 9 – 18 m/min ableiten. Für das synthetische Sediment errechnen sich aus den Kornverteilungskurven hydraulische Leitfähigkeiten von $2,1 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ (Seelheim) $8,3 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ (Bialas), was unwesentlich geringer als der Median des natürlichen Materials ist (Tab. 2). Unter Hinzuziehung des Gesetzes von Darcy (Darcy 1856; Hölting and Coldewey 2013), dem gemessenen Abfluss und den eingestellten hydraulischen Gradienten errechnet sich eine hydraulische Leitfähigkeit von $8,7 \times 10^{-6}$ bis $8,0 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$. Diese sind deutlich geringer als die von Schuch (1981) im Labor ermittelten hydraulischen Leitfähigkeiten ($a \times 10^{-5} - 4,8 \times 10^{-3}$), was daran liegt, dass jenes Gutachten nur in ausgewählten, potentielle grundwasserleitende Schichten die hydraulische Leitfähigkeiten ermitteln ließ.

Tab. 2: Zusammenstellung der mit verschiedenen Methoden ermittelten hydraulischen Leitfähigkeiten (k_f -Werte) für das Bergsturzmaterial nördlich des Fempasses.

Methode	$k_f, \text{ m s}^{-1}$
Natürliches Material (errechnet)	$1,8 \times 10^{-5} - 5,0 \times 10^{-4}$
Synthetisches Material (errechnet)	$8,3 \times 10^{-6} - 2,1 \times 10^{-4}$
Aus Experiment (gemessen)	$8,7 \times 10^{-6} - 8,0 \times 10^{-5}$
Schuch (1981)	$a \times 10^{-5} - 4,8 \times 10^{-3}$

Schlussfolgerungen

Wie die Ergebnisse zeigen, kommt es im Labor bei der analogen Modellierung der Tomahügel zur Ausbildung von Rissen, Böschungen und wassergefüllten Mulden. Dies ist einerseits auf Materialsetzungen, andererseits auf interne Erosion und Suffusion des synthetischen Bergsturzmaterials zurückzuführen. In der analogen Modellierung zeigte sich, dass die mehr oder weniger horizontale Abdachung der Hügel erhalten bleibt, während sich materialcharakteristische Flanken ausbilden, in denen sich das ehemals an Top der Fläche befindende Material wiederfindet. An den Rändern des analogen Modells bildeten sich muldenartige Strukturen aus, in denen entweder Wasser floss oder sich Wasser ansammelte. Diese Strukturen finden sich auch am Fernpass wieder, wo beispielsweise der Dorfbach in Biberwier oder der Weißensee in ganz ähnlichem räumlichem Kontext vorhanden sind. Laterale und transversale Risse, wie sie sich im Modell ausbildeten, finden sich auch am Fernpass selbst. Diese wurden bislang im Wesentlichen durch Sackungen erklärt; es muss aufgrund der vorliegenden Ergebnisse aus der analogen Modellierung jedoch davon ausgegangen werden, dass diese durch Setzungen infolge interner Erosion entstanden sind. In fast allen analogen Modellierungen zeigte sich ein Rissmuster, wie es im topographisch höheren Teil des Fernpassbergsturzes beobachtet werden kann. Auch dolinenartige Strukturen traten im Modell auf, sodass sich die Dolinen des Fernpassbergsturzes gänzlich durch interne Erosion erklären ließen.

In einem der Experimente bildete sich ein Limnokren aus, wie er ähnlicher südlich Biberwier vorhanden ist, sich aber dort von den anderen Quellen im nördlichen Fernpassgebiet unterscheidet. Dies deutet darauf hin, dass Grundwasser im Untergrund des Fernpassbergsturzes fließt und an präferenziellen Fließwegen mit geringerer hydraulischer Leitfähigkeit als Quelle an die Oberfläche kommt und feinkörniges Material des Fernpassbergsturzes transportiert.

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, wieso es zwischen manchen Tomahügeln enge Tälchen gibt, deren Flanken jeweils dem natürlichen Schüttungswinkeln dieses Materials entsprechen. Dies ließ sich auch im Experiment zeigen. Dort kam es durch interne Erosion zu einem Materialdefizit und folglich zu einem Nachrutschen des Materials.

Aufgrund der bisherigen Ergebnisse, der Geländebefunde und den Ergebnissen der Literaturuntersuchungen lässt sich die Morphologie der Tomahügel wie folgt erklären: Bergsturzmaterial fällt auf wassergesättigte fluviatile Sedimente und breitet sich auf diesen aus wobei es sich zu größeren oder kleineren Anhäufungen von mehr oder weniger zusammenhängendem Material kommt. In dieses Material fließen von den Flanken der Berge Bäche, werden im Bergsturzmaterial zu Grundwasser und verursachen in dem teilweise locker geschütteten Material interne Erosion, was zu Setzungen und zur Ausbildung von Tälchen führt. Beim Nachrutschen des Materials rutscht auch Material vom Top in die Flanken, was das Vorhandensein von Moränenmaterial am Top der Hügel und in deren Flanken erklären würde. Durch die Kombination dieser Prozesse lässt sich die Morphologie der Tomahügel zwanglos deuten.

Welche konkreten Fließwege das Wasser im analogen Modell nimmt, ließ sich nicht feststellen, da es dazu zu Eingriffen in das Modell hätte kommen müssen. Auch Tracerversuche zur Ermittlung der hydraulischen Leitfähigkeit oder der Abstandsgeschwindigkeit des Wassers ließen sich bislang nicht durchführen. Sie sollen in einem abschließenden Experiment erfolgen.

Danksagung

Die Autoren danken der National Research Foundation (NRF) Südafrika unter dem SARChI Chair für Mine Water Management für die Finanzierung des Projekts. Besonderer Dank gilt außerdem Lwazi Shongwe, der bei der Handhabung des Materials mitgeholfen hat und der Firma De Souza Hardware & Brick Depot dafür, dass sie die Tonnen an Sediment für uns gelagert, gemischt sowie entsorgt haben.

Literatur

- Abele, G. (1964): Die Fernpaßtalung und ihre morphologischen Probleme. – Tübinger Geograph. Studien, 12:1-123, 7 Abb., 4 Bilder, 3 Tab., 1 Faltkarte.
- Abele, G. (1969): Vom Eis geformte Bergsturzlandschaften – Zur Frage der glazialen Umgestaltung der Bergstürze von Sierre, Flims, Ems und vom Fernpaß. – Z. Geomorph. N.F. Suppl., 8:119-147, 11 Abb.
- Aschenbrenner, F. (1996): Die Auswertung von Kornverteilungskurven zur Ermittlung der Durchlässigkeit. – Gießener Geol. Schr., 56:33-48, 4 Abb., 10 Tab.
- Brunner, H. (1962): Die Churer Toma. – Bündner Jb., 4:67-75, 4 Abb., 1 Tab.
- Carlson Calhoun, N. (2015): LiDAR and geomorphic characterisation of landslide-induced liquefaction deposits in the eastern Swiss Alps. Simon Fraser University. – 137 S., 63 Abb.; (Publisher).
- Darcy, H. P. G. (1856): Les fontaines publiques de la ville de Dijon – Exposition et application des principes a suivre et des formules a employer dans les questions de distribution d'eau – Ouvrage terminé par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes au filtrage des eaux à la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de tole et de bitume. – 647 S., Paris (Dalmont).
- Hjulström, F. H. (1935): Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. – Bull. Geol. Inst. Univ. Uppsala, 25:221-525, 51 Abb., 38 Tab., 8 Taf.
- Hölting, B. & Coldewey, W. G. (2013): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, 8 edn. – 326 S., 118 Abb., 69 Tab.; Berlin Heidelberg (Springer).
- Imre, B., Laue, J. & Springman, S. M. (2010): Fractal fragmentation of rocks within sturzstroms: insight derived from physical experiments within the ETH geotechnical drum centrifuge. – Granular Matter, 12(3):267-285, doi:10.1007/s10035-009-0163-1.
- Meili, R., Imre, B., Laue, J., Askarinejad, A. & Springman, S. M. (2013): Die Toma Hügel des Fernpass Bergsturzes – Hinweise zur Entstehung aus physikalischen Experimenten. Paper presented at the Geoforum Umhausen, Umhausen. – S. 16-19, 2 Abb.
- Mostler, W. (2013): Der Fernpassbergsturz in völlig neuem Lichte. Paper presented at the Geoforum Umhausen, Umhausen. – S. 20-28, 8 Abb.
- Nussbaum, F. (1934): Ueber die Formen von Bergsturzmassen, mit besonderer Berücksichtigung des Bergsturzes im Kandertal. – Schweizer Geogr., 11(1):12-13, doi:10.5169/seals-13979.

- Penck, A. (1882): Die Vergletscherung der deutschen Alpen. – 483 S., Leipzig.
- Penck, A. & Brückner, E. (1901): Die Alpen im Eiszeitalter: 3 Bde. – Leipzig (Tauchnitz).
- Poschinger, A. v. (2005): Fluidisation of Alluvial Deposits by Large Rock Slides. – Geophys. Res. Abstr., 7(1607-7962/gra/EGU05-A-01785):01785.
- Prager, C., Krainer, K., Seidl, V. & Chwatal, W. (2006): Spatial features of Holocene sturzstrom-deposits inferred from subsurface investigations (Fernpass rockslide, Tyrol, Austria). – Geo.Alp, 3:147-166, 11 Abb., 1 Tab.
- Schleier, M. T. (2016): Rock-slope failures in Innerdalen and Innfjorddalen, western Norway – rock-slope instabilities and rock avalanches in a changing landscape following the melt down of the Scandinavian ice sheet. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. – 176 S., 48 Abb., 23 Tab.; Erlangen (Publisher).
- Schuch, M. F. (1981): Bericht über die Ergebnisse der Hydrogeologischen Untersuchungen im Bereiche des Weißen-, Mitter- u. Finstersees. Michael F. Schuch, Innsbruck, 14 S.
- Staub, W. (1910): Die Tomalandschaften im Rheintal von Reichenau bis Chur. – Jb. Geogr. Ges. Bern, 22 4 Taf., 1 Abb.; doi:10.5169/seals-322528.
- Sundborg, Å. (1956): The River Klarälven – A study of fluvial processes. – Geografiska Annaler, 38(2, 3):127-316, 60 Abb., 8 Tab.; doi:10.2307/520140; 10.2307/520285
- Tarnuzzer, C. (1896): Geologische Beobachtungen während des Baues der Rhätischen Bahn bei Chur und Reichenau. – Jb. Naturforsch. Ges. Graubünden, 39:55-63, doi:10.5169/seals-594855.
- Vegter, J. R. (1996): The fountains of Pretoria. – Environmental Geology, 27(2):113-117, doi:10.1007/bf01061682.
- Wolkersdorfer, C. (1991): Aufschluß an einem Tomahügel des Fernpaßbergsturzes/Tirol. – Jb. Geol. Bundesanst., 134(2):439-441, 2 Abb.