



Doctoral Thesis

Kinematics and failure mechanisms of the Randa rock slope instability (Switzerland)

Author(s):

Gischig, Valentin

Publication Date:

2011

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006668232> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH No. 19730

**Kinematics and failure mechanisms of the Randa rock slope instability
(Switzerland)**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCE

presented by
VALENTIN SAMUEL GISCHIG
Dipl. Natw., ETH Zurich

born
25 January 1982
citizen of Baltschieder, Valais

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Simon Loew
Dr. Jeffrey R. Moore
Dr. Florian Amann
Dr. Keith F. Evans
Prof. Dr. Erik Eberhardt

2011

Abstract

The rock slope instability above the village Randa in the southern Swiss Alps is the legacy of two successive rockslides, which occurred in April and May 1991 and released 22 and 7 million m³ of crystalline rock, respectively. The remaining unstable rock mass currently moves at a rate up to 30 mm/yr and became the subject of a multidisciplinary ETH research project in 2000. Geological mapping, geotechnical characterization, geophysical imaging, and micro-seismic monitoring were combined to help constrain a structural and kinematic model of the uppermost portion of the instability. This PhD thesis incorporates the outcomes of the two first phases of the project with observations from new remote sensing and monitoring datasets, as well as with numerical modelling. This work attempts to resolve the internal structure and kinematics of the entire unstable rock mass, as well as identify the underlying physical processes responsible for its temporal behaviour.

A set of four ground-based differentially synthetic aperture radar (GB-DInSAR) displacement maps measured from the opposite valley flank revealed the presence of both a basal sliding surface and a lateral release plane bounding the current instability. Further, the displacement pattern showed a transition from toppling near the top of the instability above 2150 m to translational sliding below. New structural information extracted from combined helicopter-based LiDAR DTMs and oblique orthophotos allowed for extending the 3D structural model, previously limited to the accessible uppermost portion of the instability, to the inaccessible 1991 failure surface. Stereographic analysis of large-scale structures with minimum trace lengths of 15 m confirmed that toppling kinematics is dominant above 2150 m, while below sliding along a discontinuous basal rupture surface is more likely. New geodetic measurements at the top of the instability combined with structural data indicated that dislocation across the lateral release plane has a strong opening component and is thus not involved in wedge sliding. The derived kinematic model was further validated in a 2D numerical study using UDEC, which also set the basis for subsequent numerical investigations into the temporal behaviour of the rock mass.

Exploration of different driving mechanisms governing the temporal behaviour of the instability relies on comprehensive analysis of quasi-continuous monitoring data. At Randa, these include fracture displacements measured both at the surface and at depth, as well as relevant additional parameters such as air and rock temperature, meteorological conditions, and borehole water pressure. Within the framework of this study, the monitoring system operational since 2001 was updated with new fiber-optic strain sensors and thermocouple sensor arrays in 2008. Analysis of all monitoring data since 2001 revealed an intriguing annual trend of increased displacement rates after temperatures drop in fall and decreasing rates in spring after snowmelt. This seasonal variation in displacement rate also occurred at depths down to 68 m, and has been measured from a number of different monitoring systems. The behaviour is opposite to that reported for most large landslides, where maximum displacement rates are associated with increased groundwater pressure after snowmelt or heavy rainfall. Here, it is suggested that thermal effects are responsible for the observed seasonal trend, and a conceptual numerical study was performed to investigate transient thermo-mechanical effects. It could be shown that near-surface thermo-elastic strain is transferred to depth of constant temperature (below the thermal active layer) as a result of material elasticity and topography. The associated stress changes, although small in magnitude, can induce slip along discontinuities provided they are at critical stress levels. The previously mentioned numerical model representing the 2D kinematics of the Randa instability was subsequently run in thermo-mechanically coupled

mode using annual temperature cycles as a surface boundary condition. Model results were able to reproduce the observed displacement rates and their seasonal variations, and confirm that thermo-mechanical effects are the dominant driving mechanism at the Randa instability.

In addition to thermo-mechanical effects, other possible forcing factors were explored, namely the role of groundwater pressure, fracture air ventilation, freezing of water in fractures, and regional seismicity. Hydrogeological conditions, identified through mapping the temporal occurrence of surface water seepages, are characterized by a low groundwater table that may only marginally affect the unstable rock mass. While freeze-thaw effects are also considered to be secondary, fracture air ventilation is likely to disturb the temperature field at depth and may thus contribute to thermo-mechanical forcing of instability deformation. Special focus was set on the seismic response of the instability. Triggered dynamic strain measurements recorded across surface tension fractures during a nearby small earthquake, as well as spectral amplification characteristics derived from seismic recordings revealed the significant role of compliant tension fractures on seismic response of the unstable rock mass. Elastic numerical models including only steeply-dipping compliant fractures were able to reasonably explain the strong frequency-dependent amplification measured at Randa. Such seismic site effects are rarely considered for hard rock slope instabilities.

Zusammenfassung

Die Hanginstabilität oberhalb des Dorfes Randa (Wallis) in den südlichen Schweizer Alpen stellt eine Felsmasse dar, welche nach zwei aufeinanderfolgenden Bergstürzen im April und Mai 1991 (22 bzw. 7 Millionen m³ kristallines Gestein) instabil blieb. Derzeitige Bewegungsraten liegen im Bereich von bis zu 30 mm/Jahr. Die Hanginstabilität wurde im Jahre 2000 Gegenstand eines multidisziplinären Forschungsprojektes der ETH Zürich. Geologische Kartierung, geotechnische Charakterisierung, geophysikalische Bildgebung und mikro-seismische Überwachung wurden kombiniert, um ein strukturelles und kinematisches Modell des obersten Teiles der Instabilität zu konstruieren. Diese Doktorarbeit berücksichtigt die Ergebnisse der ersten zwei Phasen des Projektes, und analysiert diese zusammen mit Beobachtungen aus neuen Fernerkundungs- und Überwachungsdaten sowie mit Hilfe numerischer Simulation. Das Ziel ist die interne Struktur und Kinematik der gesamten instabilen Felsmasse detailliert zu beschreiben und die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse, die ursächlich für das zeitliche Verhalten sind, zu identifizieren.

Vier Verschiebungskarten aus terrestrischen differenziellen SAR (GB-DInSAR) Messungen von der gegenüberliegenden Talseite bewiesen die Existenz einer basalen Gleitfläche und einer lateralen Begrenzungsfläche, welche die aktuelle Instabilität begrenzen. Das räumliche Verschiebungsmuster liess zudem einen Übergang zwischen zwei unterschiedlichen kinematischen Bewegungstypen erkennen. Der Bewegungsmechanismus oberhalb von 2150 m wurde als Toppling identifiziert, unterhalb herrscht Translationsgleiten vor. Helikopter-basierte LiDAR DHMs und entzerrte Photos ermöglichten die Akquisition von Strukturdaten, insbesondere in der bisher unzugänglichen 1991-er Abbruchsfläche. Damit wurde das 3D Strukturmodell verbessert und auf die gesamte Instabilität ausgeweitet. Eine stereographische Analyse der grossskaligen Diskontinuitäten (Spurlängen grösser als 15 m) bestätigte, dass die Kinematik oberhalb von 2150 m von Toppling dominiert ist, während darunter Gleiten entlang einer basalen Bruchfläche wahrscheinlicher ist. Die Interpretation neuer geodätischer Messungen oberhalb des Anrissbereiches in Kombination mit Bruchorientierungen ergab, dass der Versatz entlang der lateralen Begrenzungsfläche eine beachtliche Öffnungskomponente aufweist. Ausgleiten eines Bruchkeils entlang dieser Bruchzone ist daher kinematisch unwahrscheinlich. Das kinematische Konzept-Modell, welches sich aus diesen Betrachtungen ergab, wurde mit Hilfe numerischer 2D-Modelle validiert. Diese dienten auch als Basis für weiterführende numerische Simulationen im Hinblick auf das zeitliche Verhalten der instabilen Felsmasse.

Untersuchungen bezüglich dem zeitlichen Verhalten der Instabilität beruhen auf einer umfassenden Analyse quasi-kontinuierlicher Messdaten. Diese umfassen Verschiebungen entlang von Brüchen an der Oberfläche und in der Tiefe, sowie weitere relevante Parameter wie Luft- und Felstemperaturen, meteorologische Daten und Wasserdrücke in Bohrlöchern. Im Rahmen dieser Studie wurde im Sommer 2008 das Messsystem, welches 2001 in Betrieb genommen wurde, mit faseroptischen Verformungssensoren und Temperatursensorketten ergänzt. Die Auswertung der gesamten Überwachungsdaten seit 2001 ergab ein konsistentes zeitliches Verschiebungsmuster. Die Verschiebungsraten nehmen mit fallenden Temperaturen zu bzw. nach der Schneeschmelze im Frühling wieder ab. Solche jahreszeitliche Schwankungen traten auch in Tiefen bis zu 68 m auf. Die meisten in der Literatur beschriebenen Hangbewegungen zeigen, dass die maximalen Verschiebungsraten mit erhöhtem Bergwasserdruck nach der Schneeschmelze oder nach Starkniederschlägen in Verbindung gebracht

werden können. Dies steht im Gegensatz zur heutigen Randa-Instabilität. Die Daten zeigen, dass thermische Effekte für den beobachteten Jahresgang der Verschiebungen verantwortlich sind. Daher wurde eine konzeptionelle numerische Studie durchgeführt, welche den Effekt von transienten thermo-mechanisch induzierten Spannungsänderungen auf das Verformungsverhalten idealisierter Felsböschungen untersuchte. Es konnte gezeigt werden, dass oberflächennahe thermo-elastische Dehnungen aufgrund von Materialelastizität und Topographie in Tiefen konstanter Temperatur übertragen werden können (d.h. auch unter die thermisch aktive Schicht). Die damit einhergehenden Spannungsänderungen können trotz niedriger Amplitude Gleiten entlang von Diskontinuitäten induzieren, falls diese einen kritischen Spannungszustand aufweisen. Das zuvor hergeleitete numerische Modell zur Reproduktion und Validierung der 2D-Kinematik der Instabilität, wurde aufgrund obiger Erkenntnisse im thermo-mechanisch gekoppelten Modus gerechnet. Dabei wurden jährliche Temperaturzyklen als Oberflächenrandbedingung verwendet. Die Modellresultate konnten die beobachteten Verschiebungsraten und deren Jahresgang hinreichend reproduzieren, was bestätigt, dass der thermo-mechanische Effekt den dominanten Antriebsmechanismus der Randa-Instabilität darstellen kann.

Zusätzlich zu thermo-mechanischen Effekten wurden weitere mögliche antreibende Faktoren untersucht, wie die Rolle des Bergwasserdruckes, der Luftzirkulation und Frostbildung in Klüften, sowie der Einfluss der regionalen Seismizität. Die hydrogeologischen Gegebenheiten wurden mittels Kartierung des zeitlichen und räumlichen Auftretens von Quellen erfasst. Diese Untersuchungen ergaben, dass ein tiefliegender Bergwasserspiegel existiert, der nur marginal die instabile Felsmasse beeinflussen kann. Frost-Tau-Effekte werden ebenfalls als sekundär beurteilt. Dagegen ist es wahrscheinlich, dass Luftzirkulation in offenen Brüchen das Temperaturfeld tiefreichend stört, wodurch möglicherweise das Deformationsverhalten durch zusätzliche thermo-mechanische Effekte beeinflusst wird. Spezielle Beachtung wurde der seismischen Antwort der Instabilität geschenkt. Während eines kleinen regionalen Erdbebens wurden dynamische Verformungen an einem Zugbruch an der Oberfläche erfasst. Zusammen mit gemessenen spektralen Amplifikationscharakteristiken demonstrieren diese den signifikanten Einfluss von elastisch nachgiebigen Zugbrüchen auf die seismische Antwort einer instabilen Felsmasse. Spektrale Amplifikationsfaktoren von bis zu 10 konnten auf der Grundlage elastischer numerischer Modelle mit steil einfallenden Brüchen geringer Steifigkeit erklärt werden. Solche seismischen Standorteffekte werden bei Instabilitäten in kompetentem Fels selten berücksichtigt.