

Geologic and kinematic model of a complex landslide in crystalline rock (Randa, Switzerland)

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by

HEIKE WILLENBERG

Dipl.-Geol., Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, Germany

born 20.12.1972

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Simon Loew, examiner

Prof. Dr. Erik Eberhardt, co-examiner

Dr. Keith F. Evans, co-examiner

Prof. Dr. Herbert H. Einstein, co-examiner

2004

Summary

Rock slope instabilities in fractured crystalline rock tend to be complex. In many cases, planes of weakness like those associated with foliation, large faults or highly persistent fractures may dip away from the valley or may not be present. In such cases the failure surface has to develop by stepping through various fracture sets involving the failure of intact rock bridges and strength degradation along the sliding surface by means of progressive failure. To improve the understanding of the mechanisms leading to the development of such failure surfaces and the geological conditions under which these processes occur, a multidisciplinary project was initiated focussing on an unstable rock slope above the village of Randa (VS) in the Swiss Alps. The slope is situated in gneissic rocks with good to average rock mass quality. The foliation dips away from the valley which is in general favourable for slope stability. Nevertheless, the moving rock mass sits above the scarp of a multiple-event rockslide that occurred in 1991, involving 30 mio m³. To date, the unstable rock mass is slowly moving at surface displacement rates of up to 2 cm/year. In summer 2001, a multi-component geotechnical and microseismic monitoring network was installed at the surface and within three deep boreholes drilled into the unstable rock mass to depths of 50, 50 and 120 m. The installation campaign was accompanied by extensive field mapping and geophysical surface and borehole experiments. Within the framework of this project the focus of this thesis involves: i) the reconnaissance of the 3-D geological structure of the slope, ii) assessing the displacement fields at the surface and in boreholes using data from the geotechnical monitoring network, and iii) modelling the internal deformation of the unstable rock mass.

The displacements of the unstable rock mass were found to be distributed on a network of fault and fracture zones. Field mapping revealed that this large-scale discontinuity network should be regarded separately from the small-scale fracture network with mean trace lengths and normal set spacing in the range of 1-3 m. For the large-scale fault and fracture zone network two fault sets dipping NW and E and one fault set parallel to foliation were accounted for. The persistent nature of these features (i.e. minimum extent > 30 m) was confirmed by a joint analysis of single-hole georadar reflections and fracture data from optical televiewer images. Large, persistent faults or dominant fracture sets dipping towards the valley (i.e. to SE) which may serve as through-going sliding surfaces could not be identified either at the surface or in the boreholes.

Opening rates of surface fractures were measured with simple benchmark line surveys, continuously recording crackmeters and within benchmark quadrilateral arrays. The latter allow the orientation of the displacement vectors across the opening fractures as well as the magnitudes to be estimated. A special benchmark measurement tool was constructed for the readings in the benchmark quadrilateral arrays that was capable of measuring the small displacements encountered. The measurements revealed opening rates of several millimetres per year with a fluctuating signal overprinting a steady fracture opening rate. The fluctuations are probably of thermo-elastic origin. The direction of displacement vectors across different active fractures was found to lie within $\pm 30^\circ$ from the normal to the strike of the fracture.

The analysis of inclinometer-/extensometer surveys from the deep boreholes brought to light deficiencies in the standard analysis procedure when applied in inclined boreholes with contorted

casings. After carefully eliminating systematic errors in the inclinometer measurements, profiles of horizontal displacements along the boreholes were obtained. For the 120 m borehole, these could be combined with profiles of axial strain to obtain the profiles of 3-D displacement vectors. The latter revealed that most of the active fractures belong to the set of NW-dipping faults with moderate to steep dip angles. The major active zones showed dislocations of up to 5 mm/year, which largely involve shear movement in a normal faulting sense (i.e. footwall moves up-dip with respect to hanging wall). In all cases, in-plane slip directions were within 30° of alignment with the fracture dip directions. The distribution of displacements on the fault and fracture zone network, which was measured at the surface and in the boreholes, suggested that the rock mass is dissected into various blocks of 10-20 m dimensions. In addition, the interpretation of the inclinometer surveys revealed that these blocks exhibit either toppling, translational sliding or rotational movements on a deeper sliding surface that was not intersected by the boreholes.

In order to investigate the instability processes, consideration had to be given to the fact that the location and geometry of the basal sliding surface(s) could be identified neither by surface- nor borehole observations. As such, numerical simulations involving the 2-D distinct element code (UDEC) were run to test and validate different instability scenarios that produce similar internal deformation patterns as those measured. Based on the four model geometries tested, fairly good agreement between modelled and measured displacement patterns were achieved for models involving either stepped or persistent planar sliding surfaces. The agreement with other model geometries (i.e. circular and bilinear sliding surfaces) was not as good. The step-path model gave especially promising results with respect to the geological model and indicators pointing to progressive failure through tensile yielding leading to a through-going failure plane that is not of tectonic origin. New insights into how displacement patterns within a fractured rock mass relate to the geometry of possible sliding surface(s) have been developed that provide valuable input into better understanding rockslide processes in crystalline rock.

Due to the multidisciplinary approach of the research project, the results presented in this thesis could be constrained and verified by comparing the results obtained using different investigation techniques, as applied to the mapping of faults and major fractures in crystalline rock, the geotechnical measurements of fracture opening at the surface or the interpretation of borehole displacement data. Similarly, the combination of geological mapping, the analysis of monitoring data and numerical modelling, such that the results constrained each other, proved to be necessary to better understand the processes acting on the investigated complex rockslide.

Zusammenfassung

Felsrutschungen im geklüfteten Fels neigen zu Komplexität und häufig fehlen Trennflächen mit herabgesetzter Scherfestigkeit, wie zum Beispiel Schieferungsflächen, Störungen oder durchgängige Trennflächen, oder fallen gegen den Hang ein. In solchen Fällen muss sich ein getreppter Scherhorizont entwickeln, der zum einen durch bestehende Kluftsysteme verläuft und zum anderen durch den Bruch intakter Gesteinsbrücken durch progressive Bruchfortpflanzung gebildet wird. Um die Prozesse besser zu verstehen, die zu der Bildung eines solchen Scherhorizontes führen, und auch die geologischen Rahmenbedingungen, unter denen dies auftritt, wurde ein multidisziplinäres Forschungsprojekt gestartet; Ort der Untersuchungen ist ein instabiler Felshang oberhalb der Ortschaft Randa (Wallis) in den Schweizer Alpen. Dieser Felshang besteht vorwiegend aus Gneisen, deren Gebirgsqualität als mittel bis gut klassiert werden kann. Die Schieferung fällt in den Hang ein, was generell einen günstigen Einfluss auf die Hangstabilität haben sollte. Trotzdem gehört das Untersuchungsgebiet zu einer instabilen Felsmasse, deren Volumen auf 2.5-9 mio m³ geschätzt wird und Oberflächenverschiebungen von bis zu 2 cm/Jahr aufweist. Es schliesst sich zudem an die Anrissnische eines mehrphasigen Bergsturzes mit einem Volumen von 30 mio m³ aus dem Jahr 1991 an. Im Sommer 2001 wurde an der Oberfläche und in drei tiefen Bohrungen ein Multikomponenten-Messsystem für geotechnische und mikroseismische Messungen eingerichtet; dafür wurden Bohrungen 50, 50 und 120 m tief in die instabile Felsmasse abgeteuft. Zeitgleich wurden eine geologische Kartierung und geophysikalische Experimente in den Bohrlöchern und von der Oberfläche aus durchgeführt. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes konzentriert sich diese Arbeit auf folgende Aspekte: i) die Erkundung der geologischen Struktur des Hanges in 3-D, ii) die Bewertung der Verschiebungsfelder an der Oberfläche und in der Tiefe, und iii) die Modellierung interner Deformationen in instabilen Hängen.

Es zeigte sich, dass die Verschiebungen der instabilen Felsmasse auf ein Netzwerk von Störungen und Kluftzonen verteilt sind. Dieses weiträumige Netzwerk liess sich anhand der Kartierungen von dem klein-massstäblichen Kluftnetzwerk abgrenzen, das durchschnittliche Kluftlängen und -abstände von 1-3 m aufweist. Das Netzwerk aus Störungen und Kluftzonen umfasst zwei Sets mit mittlerem bis steilen Einfallen nach Nordwest und Ost und ein Set parallel zur Schieferung. Die weiträumige Erstreckung dieser Trennflächen (>30 m) konnte durch eine gemeinsame Auswertung von Inloch-Radar-Reflexionen und Bohrlochkamera-Bildern bestätigt werden. Allerdings konnten keine grossen durchgängigen Trennflächen kartiert werden - weder an der Oberfläche noch in den Bohrlöchern-, die mittelsteil aus dem Hang einfallen und daher als durchgängige Gleithorizonte dienen könnten.

Kluftöffnungsraten an der Oberfläche wurden mit einfachen Messbolzen-Paaren, kontinuierlich messenden Rissmetern und Messbolzen-Vierecken erfasst; die Messung der Abstände in den Messbolzen-Vierecken erlaubte zudem die Bestimmung des Kluftöffnungsvektors. In Hinblick auf die geringen Verschiebungsraten wurde für die Abstandsmessungen in den Messbolzen-Vierecken ein spezielles Messgerät entwickelt. Die Messungen brachten Kluftöffnungsraten von einigen Millimetern pro Jahr, deren konstanter Trend von einem fluktuierenden Signal überprägt wird, das thermo-elastischen Effekten zugeschrieben wurde. Die Richtung der Kluftverschiebungen weicht $\pm 30^\circ$ von der Senkrechten zum Kluftstreichen ab. Die Auswertung von Inklinometer-/Extensometermessungen brachte Defizite bei den Standardauswerteverfahren zu Tage, sobald

diese für geneigte Bohrungen mit verdrillten Messrohren angewendet werden. Erst nachdem systematische Fehler in den Inklinometermessungen sorgfältig korrigiert waren, konnten die erhaltenen horizontalen Verschiebungsprofile mit denen vertikaler Verschiebungen kombiniert werden. Die so erhaltenen 3-D Verschiebungsvektoren zeigten auf, dass die meisten aktiven Trennflächen dem Set mittelsteil bis steil nach Nordwesten einfallender Störungen angehören. Die Hauptverschiebungszonen weisen Verschiebungen von bis zu 5mm/Jahr auf, wobei die hauptsächlich Scher-Bewegungen auftreten, bei denen sich der liegende gegenüber dem hangenden Block nach oben verschiebt. Die Schervektoren auf den Flächen weichen $\pm 30^\circ$ vom Trennflächeneinfallen ab. Dass die Verschiebungen an der Oberfläche und in der Tiefe auf dem Störungsnetzwerk stattfinden, legte nahe, dass die Felsmasse in Blöcke von 10-20m Grösse zerlegt ist. Diese Blöcke weisen zudem unterschiedliche Kipp-, Rutsch- und Rotationsbewegungen auf, wie aus den Resultaten der Inklinometermessungen geschlossen werden konnte.

Um die Prozesse der Hanginstabilität genauer zu untersuchen, musste besonders berücksichtigt werden, dass die Lage und Geometrie des Gleithorizontes weder durch die Untersuchungen an der Oberfläche noch in den Bohrungen bestimmt werden konnte. Daher wurde eine Reihe von numerischen Simulationen beruhend auf 2-D Diskontinuum Ansätzen (UDEEC) durchgeführt, um bei verschiedenen Instabilitätsszenarien zu testen, ob sich ähnliche interne Verformungen wie die gemessenen modellieren lassen. Von den vier getesteten Modellgeometrien konnte besonders für getreppte und ebene Gleitflächen eine gute Übereinstimmung von gemessenen und modellierten Verformungsfeldern erreicht werden. Weniger gute Übereinstimmung zeigten Modelle mit einer runden oder bi-linearen Gleitfläche. Als viel versprechend wurde besonders Modell „getreppte Gleitfläche“ angesehen, da es dem geologischen Modell des Hanges entspricht und auch Anzeichen dafür aufweist, dass sich durch progressive Bruchfortpflanzung mit Zugversagen durchgängige Scherflächen bilden können, die von nicht tektonischem Ursprung sind. Die gewonnen Erkenntnisse, wie interne Verformungsmuster mit der Geometrie sich entwickelnde Gleitflächen zusammenhängen, ergeben einen weiteren Schritt, die Prozesse von Felsrutschungen in geklüftetem Gebirge zu verstehen.

Augrund des multidisziplinären Projektansatzes beruhen die Ergebnisse, die in dieser Arbeit präsentiert werden, auf der gegenseitigen Verifizierung der Resultate verschiedener angewandter Erkundungsmethoden; so die Kartierung von Störungen und Kluftzonen im kristallinen Gebirge, die geotechnische Kluftöffnungsmessungen und die Interpretation von Verformungsmessungen in Bohrlöchern. Gleichzeitig zeigt diese Arbeit auch, dass zum Verstehen von komplexen Felsrutschungen eben diese Kombination verschiedener Untersuchungsmethoden und Ansätze nötig ist; in diesem Fall die Kombination von geologischer Kartierung, geotechnischem Monitoring und numerischen Simulationen.