



Doctoral Thesis

Quantifying late quaternary natural hazards in Swiss lakes subaquatic landslides, slope stability assessments, paleoseismic reconstructions and lake outbursts

Author(s):

Strasser, Michael

Publication Date:

2008

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005558165> →

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 (17285)

Quantifying Late Quaternary Natural Hazards in Swiss Lakes:

Subaquatic Landslides, Slope Stability Assessments, Paleoseismic Reconstructions and Lake Outbursts

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
For the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

Presented by

Michael Strasser

Dipl. Natw. ETH

Born September 19, 1977

Citizen of Wangen a. A. (BE)

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Flavio S. Anselmetti, ETH Zürich, examiner

Prof. Dr. Domenico Giardini, ETH Zürich, co-examiner

Prof. Dr. Achim J. Kopf, University of Bremen, co-examiner

Prof. Dr. Anders Solheim, Norwegian Geotechnical Institute, co-examiner

2007

ABSTRACT

Understanding geological processes that govern nature, evolution and consequences of geohazards, as well as quantitative information on their magnitudes and recurrence frequencies is a key requirement for natural hazard assessments in highly populated areas, such as central Switzerland. This thesis investigates and quantifies causes and effects of Late Quaternary seismic and environmental impacts in and around Lake Zurich and Lake Lucerne, by studying in detail subaquatic slope failure processes and their deposits with combined geophysical, sedimentological, in situ geotechnical and numerical modeling techniques.

Subaqueous mass movements are common features in both marine and lacustrine environments and can have severe impacts on offshore infrastructures and coastal areas. They can originate from various processes including rapid sedimentation and earthquakes. In this study, the fjord-type perialpine Lake Lucerne and Lake Zurich are used as model basins to investigate subaqueous slope stability under static and dynamic loading conditions and to decipher the role of seismic vs. aseismic trigger mechanisms. In the investigated lakes, lateral non-deltaic slopes generally are stable under static loading conditions but failed during past earthquakes along planar sliding surfaces that systematically developed at the glacial-to-postglacial lithological boundary. Coring and in situ geotechnical measurements in Lake Lucerne reveal this critical interface to be characterized by slightly underconsolidated, weak Late Glacial clay deposits above and overconsolidated, glacially-deformed, glacio-lacustrine deposits with excessive formation pore pressure below. In deltaic settings, however, sediment supply from local creeks and high sedimentation rates exhibit an important control on slope stability conditions, which may change over relative short geological time scales, and may facilitate aseismically-triggered delta slope failures.

The occurrence of historic and prehistoric earthquakes in the greater Lucerne area, as recorded by multiple coeval mass-movement deposits in the subsurface of Lake Lucerne, has already been documented in previous studies. New in situ geotechnical site characterization along failed and stable lateral slopes, combined with limit equilibrium calculations back-analyzing slope stability during past failure events allow for reconstruction of critical earthquake intensities. Results reveal seismic peak ground acceleration of ~ 0.08 g and ~ 0.14 g for the historic 1601 A.D. $M_w \sim 6.2$ earthquake and a prehistoric, ~ 2220 cal yr. B.P. earthquake, respectively. The value for the 1601 A.D. event lies in the range of calculated accelerations deduced from predictive ground motion models and suggests comparable macroseismic threshold intensities for basin-wide sliding (I=VII) as

estimated from historical data. These findings thus pinpoint the potential of detailed subaqueous slope stability analysis as paleoseismological tool to quantitatively reconstruct prehistoric earthquake shaking intensities.

For the greater Zurich area, it was so far unknown whether or not strong seismic shaking occurred during prehistoric times. However, new Lake Zurich data comprising ~ 300 km of high-resolution seismic profiles, 6 gravity piston cores and 15 radiocarbon ages allow for establishing a complete Late Glacial-to-Holocene mass-movement catalogue that clearly reveals the occurrence of three events, during which multiple coeval landslides occurred throughout the lake. This clearly suggests a seismic trigger. Furthermore, the ages of these events match the ages of reconstructed prehistoric earthquakes recorded in Lake Lucerne. This correlation thus implies that three large earthquakes (at 2220, 11600 and 13770 cal. yr B.P.) shook central Switzerland, strong enough to trigger multiple mass movements in both lakes located ~ 40 km apart. Using calibrated macroseismic threshold intensities for lacustrine landsliding as input parameter for macroseismic reconstructions, empirical seismic attenuation models reveal minimal earthquake magnitudes of $M_w > 6.5$ and epicentres that potentially were located close to North-Alpine front. These findings indicate ongoing Alpine deformation that generated and could potentially again generate destructive earthquakes in heavily-populated regions that are unaccustomed to seismic activity during historic times.

In the subsurface of Lake Zurich, the oldest of these three events is associated with sediment waves that indicate formation under strong current conditions. This observation, combined with geomorphological and core data in downstream areas of Lake Zurich point towards a sudden collapse of the Zurich moraine and a subsequent lake outburst flood that lowered lake level by ~ 12 m. Fluid dynamic calculations reveal that averaged outburst discharge exceeded minimum values of ~ 2400 m³s⁻¹ and estimated peak discharge of ~ 20600 m³s⁻¹. The moraine breakthrough could have been caused either by primary earthquake shaking and/or secondary effects, such as landslide-generated waves.

In summary, data and results presented in this thesis reveal occurrence and quantitative information on frequencies and intensities of varying seismic and environmental impacts that affected Lake Zurich and Lake Lucerne and their surroundings during the last ~ 17000 years. This study thus demonstrates the multi-disciplinary approach studying subaquatic mass movements in different basins to be a successful and promising strategy to assess the geo-hazard potential arising from such rare but potentially-destructive events.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Abschätzung des Gefährdungspotentials natürlicher geologischer Ereignisse verlangt prozess-basierte Kenntnisse über die Entstehung und über mögliche Konsequenzen von Naturgefahren sowie quantitative Informationen über deren Intensitäten und Wiederkehrraten. Diese Studie befasst sich mit spätquartären Erdbeben und Umweltereignissen in und um den Zürich- und Vierwaldstättersee. Insbesondere wird aufgezeigt, wie mit Hilfe von geophysikalischen, sedimentologischen, in situ geotechnischen und numerischen Modellierungs-Methoden detaillierte Untersuchungen von subaquatischen Hangrutschungen und deren Ablagerungsprodukten zum Verständnis solcher Naturgefahren beitragen können.

Subaquatische Rutschungen treten sowohl in Ozeanen als auch in Seen auf und können eine Gefährdung für Bauten und Verankerungen am Boden der Gewässer sowie für Mensch und Infrastruktur am Ufer darstellen. Solche Hanginstabilitäten können durch verschiedene Mechanismen ausgelöst werden, wie zum Beispiel durch Erdbeben oder durch erhöhte Sedimentzufuhr. Die fjordähnlichen Schweizer Alpenrandseen, wie Zürich- und Vierwaldstättersee, sind besonders geeignet, den Einfluss von seismischen bzw. nicht-seismischen Auslösemechanismen zu erforschen und die Hangstabilität als Funktion von statischer und dynamischer Belastung im Detail zu studieren. In den untersuchten Seen sind seitliche Unterwasserabhänge, welche nicht von Delta-Prozessen beeinflusst werden, unter statischer Belastung stabil. Erst zusätzliche dynamische Belastungen, welche durch Erdbebenerschütterungen hervorgerufen werden, lösen Hangrutschungen aus. Die Rutschungsflächen bilden sich bevorzugt entlang der lithologischen Grenze zwischen leicht unterkonsolidierten spätglazialen Tonen mit relativ geringen Scherfestigkeiten und den darunterliegenden überkonsolidierten, glazial deformierten Gletscherseeablagerungen mit erhöhten Porenwasserdrücken. Grossräumige Versackungen und Massenbewegungen während des endeiszeitlichen Gletscherrückzugs sowie nacheiszeitliche Hanginstabilitäten entlang von Deltaabhängungen können unter dem Einfluss von erhöhtem Sedimenteintrag hingegen auch aseismisch ausgelöst werden.

Frühere Studien in der Region Luzern haben bereits aufgezeigt, dass historische und prähistorische Erdbeben die Region mehrfach erschüttert und im Vierwaldstättersee gleichzeitig mehrere subaquatische Rutschungen verursacht haben. Mit rechnerischen Analysen der Hangstabilität, welche dank Daten von in situ geotechnischen Messungen quantitativ durchgeführt werden können, wird neu die für das Auslösen der Rutschungen nötige kritische seismische Bodenbeschleunigung vergangener Beben rekonstruiert. Demnach entsprach die Erschütterung während des historischen $M_w \sim 6.2$ Erdbebens im Jahre 1601 einer Bodenbeschleunigung von ca. $0.08 g$. Für ein prähistorisches Beben 2220 Jahre vor heute ergeben sich Werte von $\sim 0.14 g$. Die Resultate der 1601-Erdbeben-Rekonstruktion liegen in der gleichen Grössenordnung wie die mit stochastischen Simulationsmethoden errechnete theoretische Bodenbeschleunigung. Sie sind ebenfalls ver-

gleichbar mit lokalen Intensitätsangaben in historischen Quellen. Somit zeigt diese Studie auf, dass die quantitative Analyse von vergangenen subaquatischen Hanginstabilitäten eine vielversprechende Methode für die Rekonstruktion prähistorischer Erdbebenintensitäten darstellt.

Für die Region Zürich war es bis anhin nicht bekannt, ob in der Vergangenheit grössere Erdbebenerschütterungen stattgefunden haben. Die neuen Untersuchungen im Zürichsee, wo mit Hilfe von 300 km reflektionsseismischen Profilen, 6 Sedimentkernen und 15 Radiokarbondatierungen die zeitliche und räumliche Verbreitung von Unterwasserrutschungen im Detail rekonstruiert wurde, zeigen aber drei grosse Ereignisse mit simultan ausgelösten Rutschungen auf, was auf drei prähistorische Erdbeben schliessen lässt. Auffallenderweise stimmen die Alter der drei Beben (2220, 11600 und 13770 Jahre vor heute) mit den Altern von im Vierwaldstättersee rekonstruierten Beben überein, was einen genetischen Zusammenhang impliziert. Mit Hilfe von makroseismischen Rekonstruktionen, für welche die für die Auslösung von Rutschungen kritischen Intensitäten sowie empirische seismische Wellenausbreitungsmodelle verwendet wurden, wird die minimale Magnitude dieser drei Erdbeben auf $M_w > 6.5$ geschätzt. Die Epizentren dürften wohl irgendwo entlang des nördlichen Alpenrandes gelegen haben. Diese Resultate lassen vermuten, dass aktive alpin-tektonische Kräfte zur Aktivierung von seismogenen Zonen in den Alpen geführt haben und auch in Zukunft führen könnten.

Im Weiteren wurden im Zürichsee Sedimentstrukturen beobachtet, welche im Zusammenhang mit dem ältesten dieser drei Erdbeben entstanden sein müssen und auf grosse Wasserströmungen hinweisen. Zusätzliche geomorphologische Daten und Bohrkernaufnahmen im Raum Zürich zeigen auf, dass diese Strukturen durch einen Zürichsee-Ausbruch mit durchschnittlichen Ausflussraten von mindestens $2400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ und einer resultierenden Seespiegelabsenkung von $\sim 12 \text{ m}$ gebildet wurden, welcher sich als Folge eines Durchbruchs durch den stauenden Moränenriegel von Zürich ereignet hatte. Maximale Spitzenabflussraten dürften in der Grössenordnung von $\sim 20600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ gelegen haben. Der Moränendurchbruch selbst wurde entweder primär durch die seismische Erschütterung oder sekundär von überschwappenden Wellen ausgelöst, welche durch die Wasserverdrängung von erdbebeninduzierten Rutschungen im See entstehen können.

Zusammengefasst dokumentiert diese Arbeit das Auftreten verschiedener geologischer Ereignisse, wie Massenbewegungen, Erdbeben und Seerausbrüche, welche sich im Verlaufe der letzten rund 17000 Jahren in der Zürich- und Vierwaldstättersee Region ereignet haben. Daten und Resultate dieser Studie erlauben es, Intensitäten und Wiederkehrraten solcher Prozesse quantitativ abzuschätzen. Der angewandte multidisziplinäre Ansatz, die Entstehung und Konsequenzen von subaquatischen Hangrutschungen im Detail zu erforschen, kann daher als relevante und vielversprechende Methode betrachtet werden, um das Gefährdungspotential von solch seltenen aber möglicherweise katastrophalen geologischen Ereignissen abzuschätzen.