






# Gefahrenabschätzung von durch Unterwasserhangrutschungen ausgelösten Tsunamis in Seen

**Conference Paper****Author(s):**

Strupler, Michael ; Bacigaluppi, Paola ; Kremer, Katrina; Vetsch, David F. ; Anselmetti, Flavio S.; Boes, Robert ; Wiemer, Stefan 

**Publication date:**

2021

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000508181>

**Rights / license:**

[Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International](#)

**Originally published in:**

VAW-Mitteilungen 262

3909



# Gefahrenabschätzung von durch Unterwasserhangrutschungen ausgelösten Tsunamis in Seen

*Hazard assessment of tsunamis, triggered by sublacustrine  
landslides*

Michael Strupler, Paola Bacigaluppi, Katrina Kremer, David Vetsch,  
Flavio S. Anselmetti, Robert Boes, Stefan Wiemer

## Kurzfassung

Historische Ereignisse haben gezeigt, dass Tsunamis nicht nur im marinen Bereich, sondern auch in Binnenseen auftreten können. Eine Hauptursache von See-Tsunamis sind subaquatische Massenbewegungen. Numerische Modelle erlauben eine detaillierte Simulation solcher Tsunamis. Voraussetzung dafür ist jedoch ein fundiertes Verständnis der lokalen Unterwasserhangstabilitäten, welche hauptsächlich von den bathymetrischen, sedimentologischen und geotechnischen Eigenschaften abhängig sind. Die Erhebung von detaillierten geotechnischen und geophysikalischen Informationen ist allerdings zeit- und kostenaufwändig. Wir präsentieren einen Arbeitsablauf zur effizienten Abschätzung der Tsunamigefährdung durch Unterwasserhangrutschungen in perialpinen Seen. Die Methodik besteht aus einer (i) automatischen Kartierung von potentiellen Unterwasser-Rutschungen und (ii) groben Abschätzung der charakteristischen Wellenamplituden, welche durch solche Rutschungen zu erwarten sind. Der Arbeitsablauf generiert eine Übersicht über die Tsunamigefährdung der untersuchten Seen und erlaubt die Identifikation und Priorisierung von Unterwasserhängen und Seebecken, welche vertiefte, weiterführende Modellierungen benötigen. Für ausgewählte Rutschungen kann die Wellenausbreitung und Überschwemmung mit der GPU-optimierten Software „BASEMENT“ detailliert modelliert werden.

## Abstract

Tsunamis do not only occur in the marine realm, they may also occur in lakes, as historical examples have shown. One of the main causes for such lacustrine tsunamis are subaqueous mass-movements. With numerical modelling, detailed simulations of such landslide-induced tsunamis can be executed. However, fundamental information on the stabilities of submerged slopes, which mainly depends on high-resolution bathymetric, sedimentological, and geotechnical data, is needed for such calculations. The acquisition of these data needs important financial and temporal efforts. Therefore, we present a workflow for a rapid esti-

mation of the tsunami potential in perialpine lakes, caused by subaqueous landslides. The workflow consists of an (i) automatic mapping of potential subaqueous landslides, triggered by earthquakes with different return periods, and (ii) estimation of characteristic wave amplitudes that are caused by subaqueous landslides. The workflow gives an overview of the tsunami hazard on investigated lakes and allows for the identification and prioritization of submerged slopes and lake basins that need more in-depth investigations. For selected subaqueous landslides, the wave propagation and inundation can be modelled more in depth with the GPU-optimized software "BASEMENT".

## 1 Einleitung

Tsunamis können nicht nur im marinen Bereich, sondern auch in Seen auftreten, wie es historische Dokumente in Schweizer Seen zeigen. Hauptursachen für See-Tsunamis sind gravitative Massenbewegungen, die oberhalb sowie unterhalb des Seespiegels auftreten können. Vergangene limnogeologische Studien konnten viele Unterwasserhangrutschungen Erdbebenereignissen zuordnen (e.g. Schnellmann *et al.*, 2002; Strasser *et al.*, 2013; Kremer *et al.*, 2015). In diesem Beitrag liegt der Fokus auf Tsunamis, die durch Erdbeben-induzierte Unterwasserhangrutschungen generiert werden. In einem vom Schweizerischen Nationalfonds finanzierten Sinergia-Projekt mit dem Titel „Lake Tsunamis: Causes, Controls, and Hazard“ werden aktuell die wissenschaftlichen Grundlagen zum Verständnis von Ursache, Ausbreitung und Auswirkungen von Tsunamis in perialpinen Seen untersucht. Da Tsunamis in Seen lange Wiederkehrperioden aufweisen und nur relativ wenige historische Ereignisse dokumentiert sind, werden oft numerische Modellierungen für die Abschätzung der Gefährdung durch Rutschungs-induzierte See-Tsunamis verwendet. Dazu braucht es hochauflösende bathymetrische, sedimentologische und geotechnische Daten sowie Informationen zu potentiellen Auslösemechanismen. Da geotechnische Messungen relativ zeitaufwändig und teuer sind, soll in einem ersten Schritt ein Arbeitsablauf für die schnelle Beurteilung der Tsunamigefährdung in Schweizer Seen bereitgestellt werden, der ohne solche aufwändige Messungen auskommt. Konkret soll untersucht werden, welche Unterwasserhänge rutschungsgefährdet sind und welche Auswirkungen von diesen ausgehen könnten. Die Ergebnisse einer solchen Abschätzung sollen in erster Linie dazu dienen, gewisse Seen resp. Seebecken zu identifizieren, für welche vertiefte Untersuchungen mittels numerischer Modellierung nötig sind. Geophysikalische und sedimentologische Messungen in perialpinen Seen (e.g. Strasser *et al.*, 2011; Strupler *et al.*, 2018) haben gezeigt, dass Unterwasserhangrutschungen hauptsächlich an Hängen mit Neigungen zwischen ca. 10° und 25° auftreten. Die Gleitfläche vieler dokumentierter Rutschungen befindet sich in einer Schwachschicht, die aus spätglazialen Tonen

besteht. Heute ist diese potentielle Schwachschicht mit einer je nach Hangneigung und Wassertiefe ca. 3 bis 10 m mächtigen Holozänen Sedimentdecke überlagert.

## 2 Methodik

Der im Folgenden präsentierte Arbeitsablauf basiert auf der Arbeit von Strupler *et al.* (2019). Der gesamte Arbeitsablauf wird in der Software „R“ (R Core Team, 2018) ausgeführt.

### 2.1 Automatische Kartierung potentieller Unterwasserhangrutschungen

Ein erster Schritt in der Abschätzung der Lage und des Ausmasses potentieller Rutschungen besteht in einer beckenweiten Hangstabilitätsbeurteilung.

Oft wird die Stabilität von Hängen mit Grenzgleichgewichtsbedingungen berechnet und mit einem Sicherheitsfaktor (FS) ausgedrückt. Ein FS kleiner als 1 bedeutet, dass die hangabwärts gerichteten Kräfte stärker als die zurückhaltenden Kräfte sind, und ein Hang instabil ist. Umgekehrt bedeutet ein FS grösser als 1, dass ein Hang stabil ist. In der einfachsten Form berechnet sich der FS für wassergesättigte, feinporige Sedimente gemäss Gleichung 1:

$$FS = \frac{s_u}{\left(\int_0^z \gamma' dz\right) \times \sin(\alpha) \times \cos(\alpha) + k \times PGA \times \left(\int_0^z \gamma' + \gamma_w dz\right) \times \cos^2(\alpha)} \quad [1]$$

wobei

$z$  = Mächtigkeit der potentiellen Rutschung [m]

$s_u$  = undrainierte Scherfestigkeit [Pa]

$\gamma'$  = Gewicht unter Auftrieb des potentiell mobilen Sediments [ $N \cdot m^{-3}$ ]

$\gamma_w$  = Wichte des Wassers [ $N \cdot m^{-3}$ ]

$\alpha$  = Hangneigung

$PGA$  = Spitzen-Bodenbeschleunigung [ $m \cdot s^{-2}$ ]

$k$  = pseudostatischer Koeffizient = 0.2

Die vorhandenen geotechnischen Daten aus dem Zürichsee (Strupler *et al.*, 2017) und Vierwaldstättersee (Strasser *et al.*, 2011) zeigen Schüttdichten von ca. 1300 kg/m<sup>3</sup> am Seeboden, welche zu ca. 1600 kg/m<sup>3</sup> an der Basis der Holozänen Sedimentbedeckung ansteigen, und undrainierte Scherfestigkeiten an der potentiellen Gleitfläche von ca. 8000 Pa. Unter der vereinfachten Annahme, dass alle perialpinen Seen dieselben geotechnischen Charakteristiken aufweisen, werden für die Abschätzung der Hangstabilitäten gemäss Gleichung 1 Angaben zur Neigung des Hanges, zur Mächtigkeit der potentiell mobilen Sedimente, sowie Angaben der zu erwartenden Bodenbeschleunigungen als Ein-

gabe-Variablen benötigt. Die Hangneigung wird aus dem digitalen bathymetrischen Modell (DBM) (räumliche Auflösung 10 m) berechnet und die potentiell mobile Sedimentmächtigkeit über der Schwachschicht mit einem einfachen linearen Sedimentationsmodell als Funktion der Wassertiefe und Hangneigung (Strupler *et al.*, 2018) abgeschätzt. Erdbebenbeschleunigungen („peak ground accelerations“, PGA) werden aus dem Seismic Hazard Model „SuiHaz15“ (Wiemer *et al.*, 2016) entnommen. Aus der Berechnung des FS für verschiedene Kombinationen von PGA, Hangneigung und potentiell mobiler Sedimentdicke können potentiell instabile Hänge identifiziert werden. Dabei wird angenommen, dass alle zusammenhängenden, instabilen Zonen die Rutschfläche einer potentiellen Unterwasserrutschung bilden. Diese wird automatisch kartiert. Deltas an Gewässermündungen werden ausgeschlossen, da das momentane Verständnis zur Mechanik von Deltakollapsen noch ungenügend ist. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit anderen Seen, wo keine Informationen zu Unterwasserrutschungen vorhanden sind, wird vereinfacht angenommen, dass für jeden See die Unterwasserhänge noch ungestört sind, d.h. in der Vergangenheit noch keine Rutschungen stattgefunden haben.

## 2.2 Abschätzung der zu erwartenden Wellenhöhen

Für jedes der ermittelten potentiellen Hangrutschungs-Polygone werden charakteristische Parameter ermittelt, die für die Abschätzung der zu erwartenden charakteristischen Wellenamplituden an der Seeoberfläche, oberhalb jeder Rutschung ( $\eta_{0,2D}$ ) benötigt werden (Gleichung 2; Watts *et al.*, 2005). Diese Parameter umfassen die mittlere Hangneigung der potentiellen Rutschfläche ( $S_e$ ), die Mächtigkeit ( $T$ ) und Längenausdehnung ( $L_e$ ) der Rutschung, sowie die Wassertiefe ( $d$ ) bezogen auf den Schwerpunkt der Rutschmasse und werden aus Informationen aus dem DBM, den automatisch kartierten potentiellen Rutschflächen, einem Sedimentationsmodell (Strupler *et al.*, 2018) und der mittleren Seespiegelhöhe berechnet (Abb. 1).

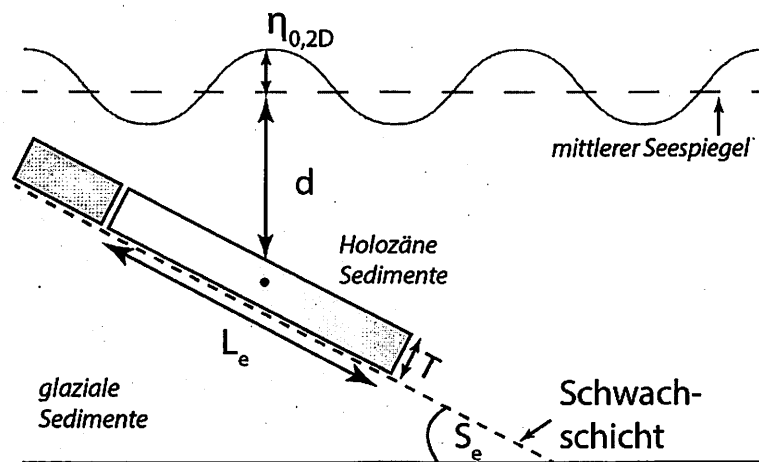


Abb. 1: Rutschparameter, welche für die Abschätzung der charakteristischen Wellenamplitude  $\eta_{0,2D}$  nach Watts *et al.* (2005) benötigt werden.

$$\eta_{0,2D} \approx 0.0286T(1 - 0.750 \times \sin S_e) \left( \frac{L_e \times \sin S_e}{d} \right)^{1.25} \quad [2]$$

Für ausgewählte Situationen kann eine detaillierte Abschätzung mit einem numerischen Modell durchgeführt werden. Hierfür wird die Software BASEMENT ([basement.ethz.ch](http://basement.ethz.ch)) verwendet. Um die Aussagekraft des Modells zu verbessern, werden insbesondere die Ansätze für die Wellengenerierung anhand von experimentellen Daten aus der Literatur (u.a. Watts *et al.*, 2005) oder von Modellversuchen zu Unterwasserrutschungen der VAW (Fuchs *et al.*, 2018) validiert. Anschliessend können die zuvor kartierten potentiellen Rutschflächen und erhobenen Rutschparameter als Input für die Abschätzung der Wellengeneration verwendet werden. Die Software BASEMENT Version 3.0, welche an der VAW entwickelt wurde (Vetsch *et al.*, 2018), erlaubt es, komplexe Geometrien mit einem hohen Detailgrad abzubilden und somit Berechnungen auf hochaufgelösten Berechnungsgittern durchzuführen. Aufgrund der speziellen Architektur der Software, welche durch eine starke Skalierung von Multi-Core-CPU-Simulationen und der Verwendung von GPUs (Prozessoren von handelsüblichen Grafikkarten) charakterisiert ist, sind die Berechnungen sehr effizient. Dies ermöglicht umfangreiche Analysen zur Sensitivität von Parametern und Unsicherheiten, z.B. mittels Monte Carlo Simulationen.

### 3 Resultate und Diskussion

Im Folgenden werden Resultate aus dem Arbeitsablauf, welcher auf jeden See mit perialpinen Charakteristiken angewandt werden kann, am Beispiel des Vierwaldstättersees (mittlerer Seespiegel 434 m ü. M.) exemplarisch gezeigt.

In Abb. 2 werden Lage und Ausmass der einzelnen potentiellen Rutschungen die für Erdbeben mit Wiederkehrperioden von rund 2500 Jahren zu erwarten sind, sowie die dazugehörigen, zu erwartenden charakteristischen Wellenamplituden dargestellt. Im Vierwaldstättersee deuten die Resultate darauf hin, dass die zentralen Becken am meisten von potentiellen Rutschungen betroffen sind.

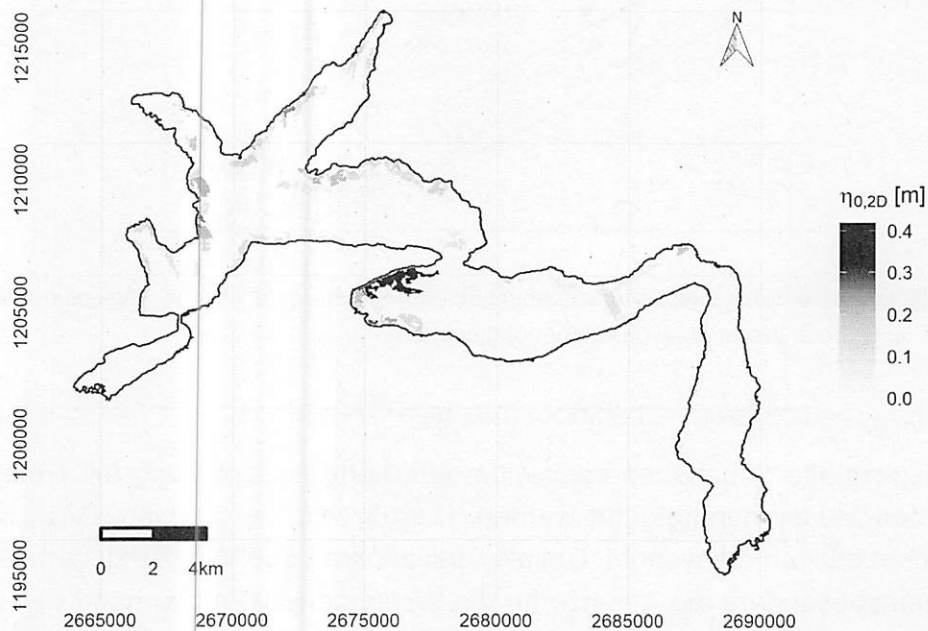


Abbildung 2: Lage und Ausmass einzelner potentieller Rutschungen für Erdbeben mit Wiederkehrperioden von ~2500 Jahren sowie die dazugehörigen, zu erwartenden charakteristischen Wellenamplituden

Von einzelnen Rutschungen wird erwartet, dass sie Wellen mit einer Amplitude von bis zu ~0.4 m auslösen können. Aufgrund der vielen getroffenen Annahmen und den damit verbundenen Unsicherheiten (z.B. Sedimentationsmodell, räumlich konstante sediment-mechanische Charakteristiken) sind die abgeschätzten Wellenamplituden allerdings nicht als absolut zu interpretieren. Sie sollen vielmehr kritische Hänge identifizieren, welche nähere Untersuchungen mit numerischer Modellierung benötigen. Ebenfalls werden mit der empirischen Gleichung von Watts *et al.* (2005) Effekte der Interferenz nicht berücksichtigt, welche jedoch im Falle von mehreren, gleichzeitig auftretenden Rutschungen, wie dies oft im Zusammenhang mit Erdbeben der Fall ist, auftreten können. Zur Simulation der Wellenausbreitung wurde aus Abbildung 2 eine einzelne Rutschung, die gemäss Gleichung 2 eine Welle von 0.4 m Amplitude generieren kann, gewählt. In dieser Rutschungszone, die man in Abbildung 3a) leicht identifizieren kann, wird ein plötzlicher Versatz des Seegrunds um 5 m nachgebildet. Daraufhin bilden sich Wellenzüge, die sich dann im Vierwaldstättersee ausbreiten. Die numerischen

Ergebnisse wurden anhand der Software BASEMENT 3.0 erhalten. Insbesondere, dank der GPU-optimierten Architektur der Software, wurden die Ergebnisse von 1.3 Millionen Zellen und 400 s Simulationszeit in 336 s mit einer Grafikkarte GeForce GTX 1080 Ti erhalten. Dies deutet darauf hin, dass diese Software auch für zukünftige Anforderungen mit näherer Analyse der Unsicherheiten gut geeignet ist.

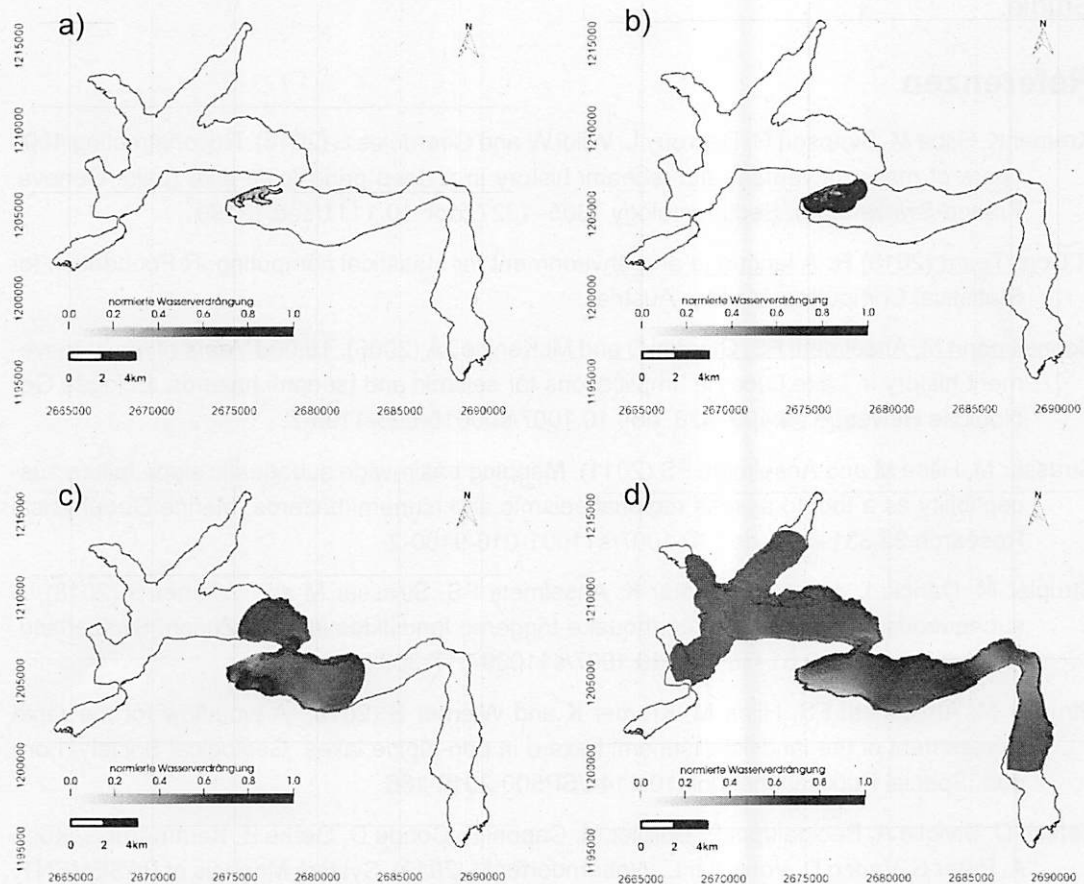


Abbildung 3: Simulation der Wellenausbreitung im Vierwaldstättersee zu verschiedenen Zeitpunkten. Zu beobachten ist die normierte Wasserverdrängung zu den Zeitpunkten 4 s (a), 10 s (b), 100 s (c) und 400 s (d).

#### 4 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde ein methodischer Ablauf zur schnellen Abschätzung der durch Unterwasserhangrutschungen ausgelösten Tsunamigefährdung in Binnenseen präsentiert.

Obwohl der hier vorgestellte Workflow auf stark vereinfachten Annahmen beruht, gibt dessen Anwendung auf verschiedenen Seen einen Anhaltspunkt, welche Seen prioritär mit weiterführenden, vertieften Modellierungen untersucht werden sollten. In zukünftigen Arbeiten kann der Arbeitsablauf unter Berücksichtigung



der Tsunamigefährdung aufgrund von Deltainstabilitäten und Massenbewegungen oberhalb des Seespiegels erweitert werden.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Schweizerischen Nationalfonds (Nr. 171017) und beim Bundesamt für Umwelt (Nr. 17.0092.PJ) für die Finanzierung dieser Studie.

## Referenzen

- Kremer K, Hilbe M, Simpson G, Decrouy L, Wildi W and Girardclos S (2015). Reconstructing 4000 years of mass movement and tsunami history in a deep peri-Alpine lake (Lake Geneva, France-Switzerland). *Sedimentology* 1305–1327. doi: 10.1111/sed.12190
- R Core Team (2018) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria
- Schnellmann M, Anselmetti FS, Giardini D and McKenzie JA (2006). 15,000 Years of mass-movement history in Lake Lucerne: Implications for seismic and tsunami hazards. *Eclogae Geologicae Helveticae* 99:409–428. doi: 10.1007/s00015-006-1196-7.
- Strasser M, Hilbe M and Anselmetti FS (2011). Mapping basin-wide subaquatic slope failure susceptibility as a tool to assess regional seismic and tsunami hazards. *Marine Geophysical Research* 32:331–347. doi: 10.1007/s11001-010-9100-2.
- Strupler M, Danciu L, Hilbe M, Kremer K, Anselmetti FS, Strasser M and Wiemer S (2018). A subaqueous hazard map for earthquake-triggered landslides in Lake Zurich, Switzerland. *Natural Hazards* 90:51–78. doi: 10.1007/s11069-017-3032-y.
- Strupler M, Anselmetti FS, Hilbe M, Kremer K and Wiemer S (2019). A workflow for the rapid assessment of the landslide-tsunami hazard in peri-alpine lakes. Geological Society, London, Special Publications. doi: 10.1144/SP500-2019-166
- Vetsch D, Siviglia A, Bacigaluppi P, Bürgler M, Caponi F, Conde D, Gerke E, Kammerer S, Koch A, Peter S, Vanzo D, Vonwiller L, Weberndorfer M (2019). System Manuals of BASEMENT, Version 3.0. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW). ETH Zurich. Available from <https://www.basement.ethz.ch>.
- Watts P, Grilli ST, Tappin DR and Fryer GJ (2005). Tsunami generation by submarine mass failure. II: Predictive equations and case studies. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 131:298–310. doi: 10.1061/(asce)0733-950x(2005)131:6(298).
- Wiemer S, Danciu L, Edwards B, Marti M, Fäh D, Hiemer S, Wössner J, Cauzzi C, Kästli P and Kremer K (2016). Seismic Hazard Model 2015 for Switzerland. 1–163. doi: 10.12686/a2.

## **Adressen der AutorInnen**

Dr. Michael Strupler (korrespondierender Autor)

Dr. Katrina Kremer, Prof. Dr. Stefan Wiemer

Schweizerischer Erdbebendienst, ETH Zürich

CH-8092 Zürich, Sonneggstrasse 5.

[michael.strupler@sed.ethz.ch](mailto:michael.strupler@sed.ethz.ch)

Prof. Dr. Flavio S. Anselmetti

Institut für Geologie & Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern

CH-3012 Bern, Baltzerstrasse 1+3

Dr. Paola Bacigaluppi, Prof. Dr. Robert Boes, Dr. David Vetsch

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) ETH Zürich

CH-8093 Zürich, Höggerbergring 26.

