

# Abschätzung der Gefährdung durch Tsunamis in perialpinen Seen infolge Unterwasserrutschungen

Autor(en): **Strupler, Michael / Bacigaluppi, Paola / Kremer, Katrina / Vetsch, David**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **112 (2020)**

Heft 1

PDF erstellt am: **09.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-941680>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Abschätzung der Gefährdung durch Tsunamis in perialpinen Seen infolge Unterwasserhangrutschungen

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

## Zusammenfassung

Historische Ereignisse haben gezeigt, dass Tsunamis nicht nur im marinen Bereich, sondern auch in Binnenseen auftreten können. Eine der Hauptursachen von See-Tsunamis sind subaquatische Massenbewegungen. In diesem Beitrag präsentieren wir einen Arbeitsablauf zur Abschätzung der Gefährdung durch Tsunamis durch Unterwasserhangrutschungen in perialpinen Seen. Die Methodik besteht aus einer automatischen Kartierung von potenziellen Unterwasserrutschungen und einer groben Abschätzung der Wellenamplituden, die durch solche Rutschungen zu erwarten sind. Als Folge lässt sich die Wellenausbreitung und das Auflaufen der Welle an der Seeuferlinie für ausgewählte Fälle mit der GPU-optimierten Software «BASEMENT» simulieren. Der Arbeitsablauf generiert eine Übersicht über die Gefährdung durch Tsunamis der untersuchten Seen und erlaubt die Identifikation und Priorisierung von Unterwasserhängen und Seebecken, welche vertiefte, weiterführende Modellierungen benötigen.

## 1. Einleitung

Historische Aufzeichnungen belegen, dass Tsunamis nicht nur in Ozeanen, sondern auch in Seen auftreten können. Eines der vielen historisch dokumentierten Beispiele in der Schweiz ist der Tsunami im Vierwaldstättersee, welcher sich im Jahr 1601 AD ereignet hat und zu Wellenamplituden von bis zu ~4 m über dem Seespiegel führte (Cysat, 1969; Schnellmann et al., 2002; Hilbe und Anselmetti, 2015). Unterwasserhangrutschungen sind eine der Hauptursachen von See-Tsunamis. Von einigen Rutschungen in perialpinen Seen wird angenommen, dass sie durch Erdbeben ausgelöst wurden (wie z. B. beim Ereignis von 1601 AD), da mehrere Rutschungen zeitgleich beckenweit auftraten (Schnellmann et al., 2002). In diesem Beitrag liegt der Fokus hauptsächlich auf Tsunamis, die durch erdbebeninduzierte Unterwasserhangrutschungen generiert werden.

Auch wenn die Ursachen für die meisten der historisch dokumentierten See-Tsunamis bekannt ist, fehlen die Grundlagen, um diese Gefahr zum heutigen Zeitpunkt quantitativ einzuschätzen. Diese Lücke soll in zwei aktuellen Schweizer Forschungsprojekten geschlossen 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. Eines der Arbeitspakete dieses Projekts (Arbeitspaket «WPwave») beschäftigt sich unter anderem mit der detaillierten Modellierung der Wellenausbreitung und Überflutungshöhe. In einem weiteren, auf dem Sinergia-Projekt aufbauenden Arbeitspaket, welches durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) gefördert wird («TSUNAMI-CH»), wird unter anderem die Gefährdung durch Tsunamis für Schweizer Seen mit einer Oberfläche grösser als 1 km<sup>2</sup> charakterisiert.

Um die Gefährdung durch solche rutschungsinduzierte See-Tsunamis mit numerischen Modellen detailliert zu simulieren, braucht es hochauflösende bathymetrische, sedimentologische und geotechnische Daten sowie Informationen zu potenziellen Auslösemechanismen («Triggern»).

In den vergangenen Jahren wurden von mehreren Schweizer Seen hochauflösende bathymetrische Tiefenmodelle erstellt. Von vielen Seen existieren auch Informationen zur Seeboden-Stratigraphie und Lithologie. Hochaufgelöste geotechnische Informationen sind bisher allerdings nur vom Vierwaldstättersee (Strasser et al., 2011) und vom Zürichsee (Strupler et

al., 2017) vorhanden, da diese Messungen zeitaufwendig und teuer sind. Darum ist ein Hauptziel dieser Studie, einen Arbeitsablauf und Werkzeuge für eine schnelle Beurteilung der Gefährdung durch Tsunamis auf Schweizer Seen bereitzustellen, der ohne aufwendige 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 selektieren, wofür vertiefte Untersuchungen mittels numerischer Modellierung nötig sind.

## 2. Methodik

Der Arbeitsablauf besteht grundsätzlich aus den folgenden drei Schritten:

1. Kartierung von potenziellen Unterwasserrutschflächen
2. Abschätzung der Wellenamplituden, welche durch die kartierten potenziellen Rutschungen zu erwarten sind, und
3. Abschätzung der Wellengeschwindigkeiten und des Wellenaufbaus am Seeufer

Die durch die Rutschungen generierten Wellenamplituden werden mit empirischen Gleichungen abgeschätzt. Für ausgewählte Fälle kann folglich die Wellenausbreitung und das Wellenauflaufen am Seeufer mit der GPU-optimierten Software «BASEMENT» modelliert werden. Die grundsätzlichen Arbeitsschritte sind in *Abbildung 1* dargestellt und werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

### 2.1 Kartierung von potenziellen Unterwasserrutschflächen

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 Rut-



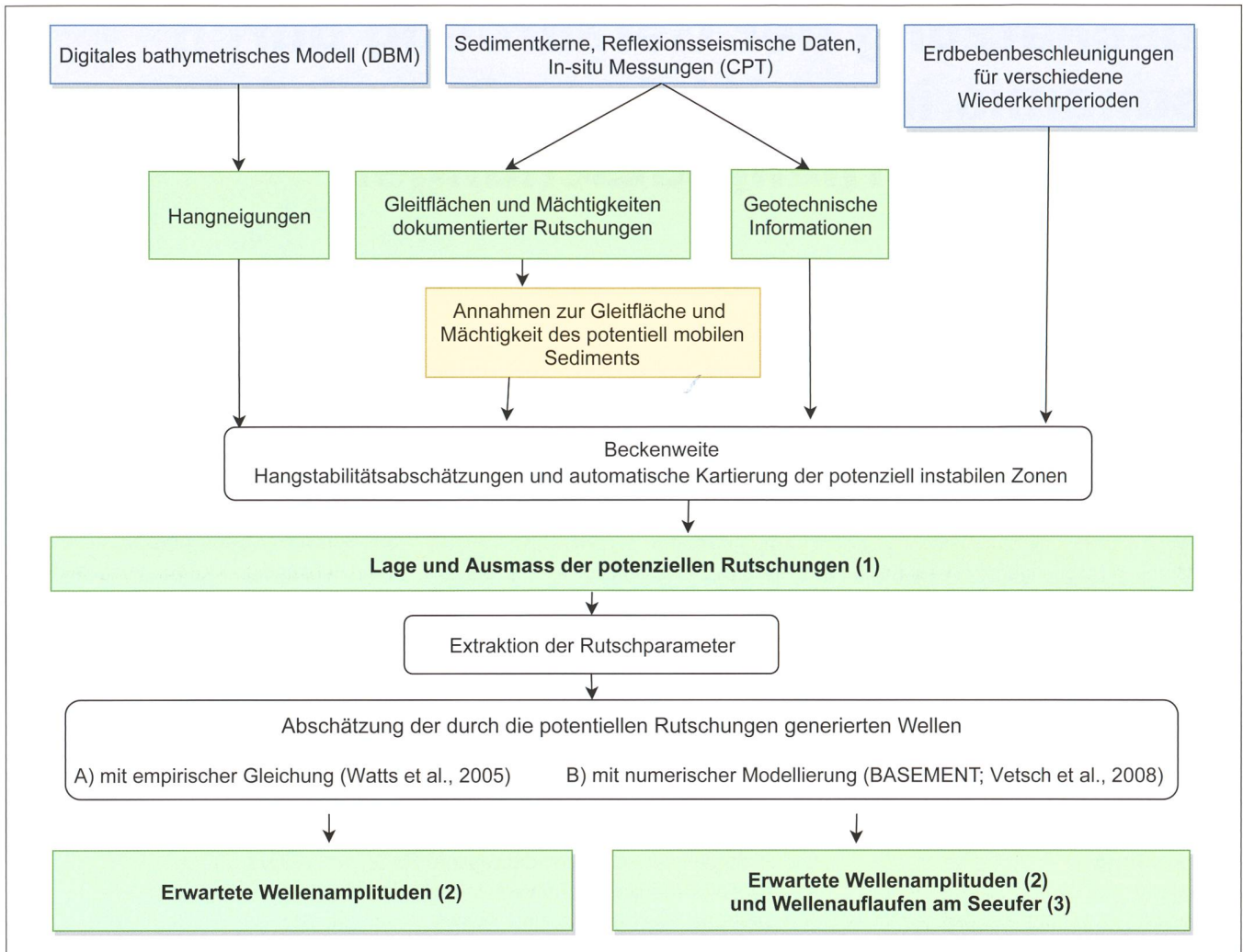


Abbildung 1: Schematischer Workflow mit den benötigten Inputdaten (blau), Annahmen (gelb) und Methoden (weiss) sowie Zwischenresultaten und Resultaten (grün).

schungen befindet sich in einer Schwachschicht, die aus spätglazialen Tonen besteht. Heute ist diese potenzielle Schwachschicht mit einer je nach Hangneigung und Wassertiefe ca. 3 bis 10 m mächtigen holozänen Sedimentdecke überlagert.

Die Hangstabilität wird mit Grenzgleichgewichtsbedingungen ermittelt, die eine einfache und schnelle, grobe Abschätzung erlauben. Dabei wird die Stabilität 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: 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 [ $N \cdot m^{-2}$ ]  
 $k$  = pseudostatistischer Koeffizient = 0.2  
 Die vorhandenen geotechnischen Daten aus dem Zürichsee (Strupler et al., 2017) und Vierwaldstättersee (Strasser et al., 2011) zeigen Schüttdichten von ca.  $1300 \text{ kg/m}^3$  am Seeboden, welche zu ca.  $1600 \text{ kg/m}^3$  an der Basis der holozänen Sedimentbedeckung ansteigen, und undrainierte Scherfestigkeiten an der potentiellen Gleitfläche von ca.  $8000 \text{ Pa}$ . 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 zu erwarteten Bodenbeschleunigungen als Eingabe-Variablen benötigt.

Die Hangneigung wird aus dem digitalen bathymetrischen Modell (DBM) (räumliche Auflösung 10m) berechnet, und die potentiell mobile Sedimentmächtigkeit über der Schwachschicht wird mit einem einfachen linearen Sedimentationsmodell als Funktion von Wassertiefe und Hangneigung (Strupler et al., 2018) abgeschätzt. Erdbebenbeschleunigungen («peak ground accelerations», PGA) werden aus dem Seismic Hazard Model «SuiHaz15» (Wiemer et al., 2016) verwendet. Aus der Berechnung des FS für verschiedene Kombinationen von PGA, Hangneigung und potentiell mobiler Sedimentdicke können instabile Hänge identifiziert werden (Abbildung 2).

Unter der Annahme, dass alle zusammenhängenden, instabilen Zonen die Rutschfläche einer potentiellen Unterwasserrutschung bilden, werden diese automatisch kartiert.

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



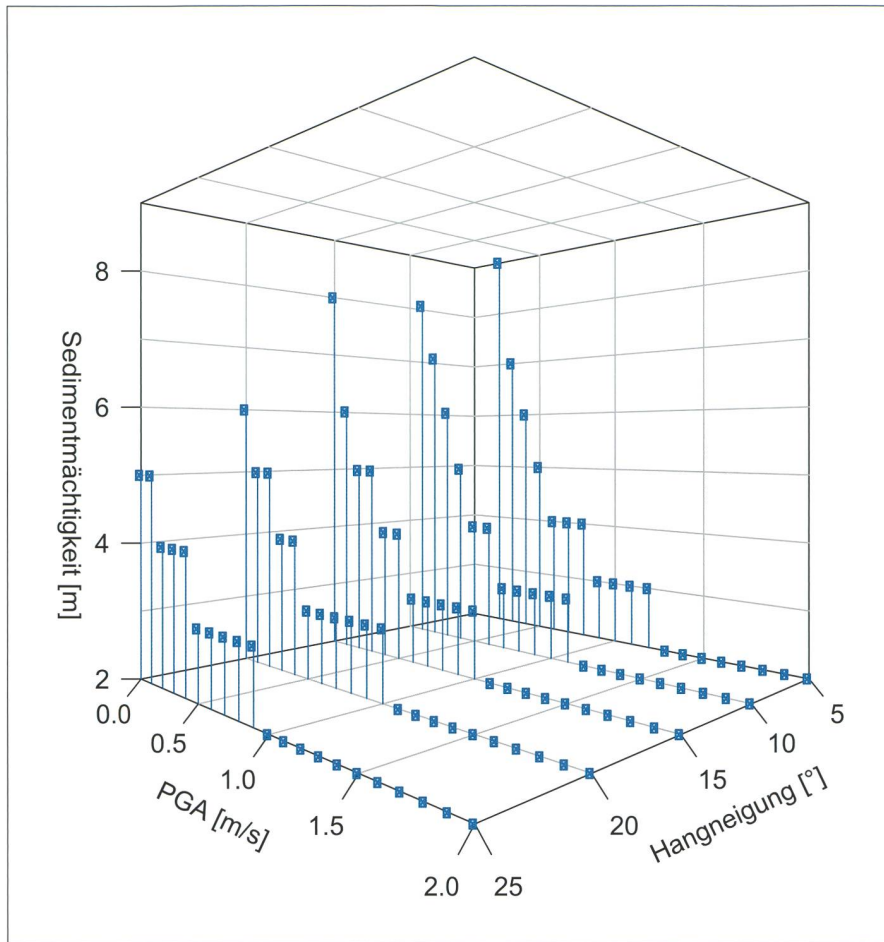


Abbildung 2: Minimale Mächtigkeit der Sedimentdecke, welche abhängig von verschiedenen Kombinationen von PGA und Hangneigung vorhanden sein muss, damit ein Hang unter den verwendeten sediment-mechanischen Annahmen instabil wird.

## 2.2 Abschätzung der zu erwartenden Wellenamplituden

Die Gefährdung durch Tsunamis auf einem See kann mit verschiedenen Kenngrößen dargestellt werden. Ein erster Indikator ist die Wellenamplitude bei ihrer Entstehung. Mit dem empirischen Ansatz von *Watts et al. (2005)* kann die charakteristische, durch eine Rutschung generierte 2-dimensionale Wellenamplitude als Funktion der mittleren Hangneigung der potenziellen Rutschfläche ( $S_e$ ), Mächtigkeit ( $T$ ) und Längenausdehnung ( $L_e$ ) der Rutschung, sowie der Wassertiefe ( $d$ ) im Zentrum der Rutschmasse (Abbildung 3) berechnet werden:

Die verschiedenen, für Gleichung 2 benötigten Parameter (Abbildung 3) werden aus Informationen aus dem DBM, den automatisch kartierten potenziellen Rutschflächen, einem Sedimentationsmodell und der mittleren Seespiegellage berechnet.

Für ausgewählte Situationen kann eine detaillierte Abschätzung mit einem numerischen Modell durchgeführt werden. Hierfür wird die Software BASEMENT (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 potenziellen Rutschflächen und erhobenen Rutschparameter als Input für die Abschätzung der Wellengenerierung verwendet werden.

Im Vergleich zur einfachen Abschätzung ermöglicht das numerische Modell eine dynamische Simulation der Wellenausbreitung unter Berücksichtigung der Bathymetrie und der Uferbereiche des jeweiligen Sees. Der simulierte Wellenauflauf erlaubt es, mögliche Überflutungsgebiete und die dortigen Wassertiefen und Strömungsgeschwindigkeiten abzuschätzen, die für eine detaillierte Bewertung der Gefährdung durch Tsunamis und Kartierung des Risikos benötigt werden. *Abbildung 4* fasst dieses Konzept zusammen.

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 Berech-

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

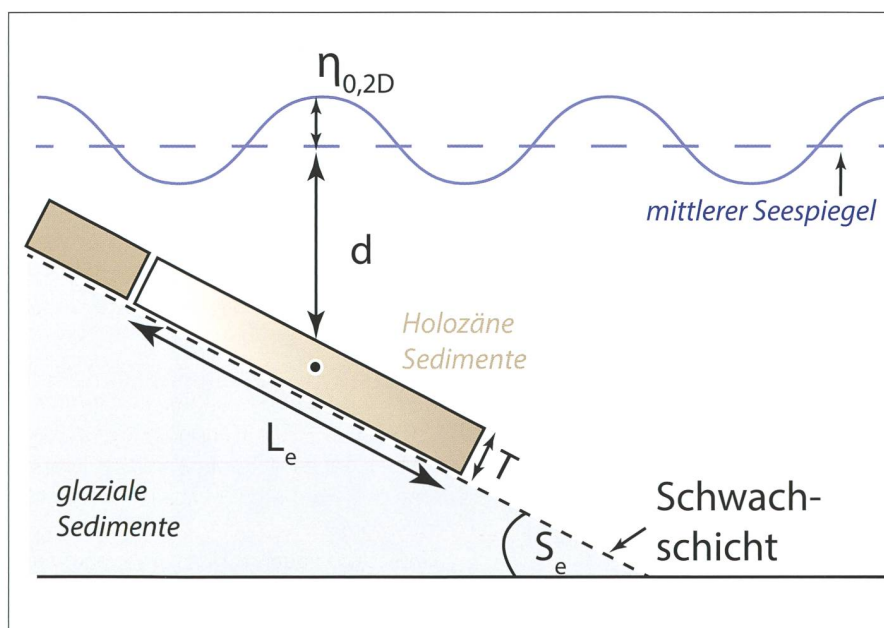


Abbildung 3: Benötigte Parameter zur Abschätzung der rutschinduzierten Wellenamplituden (Gleichung 2)



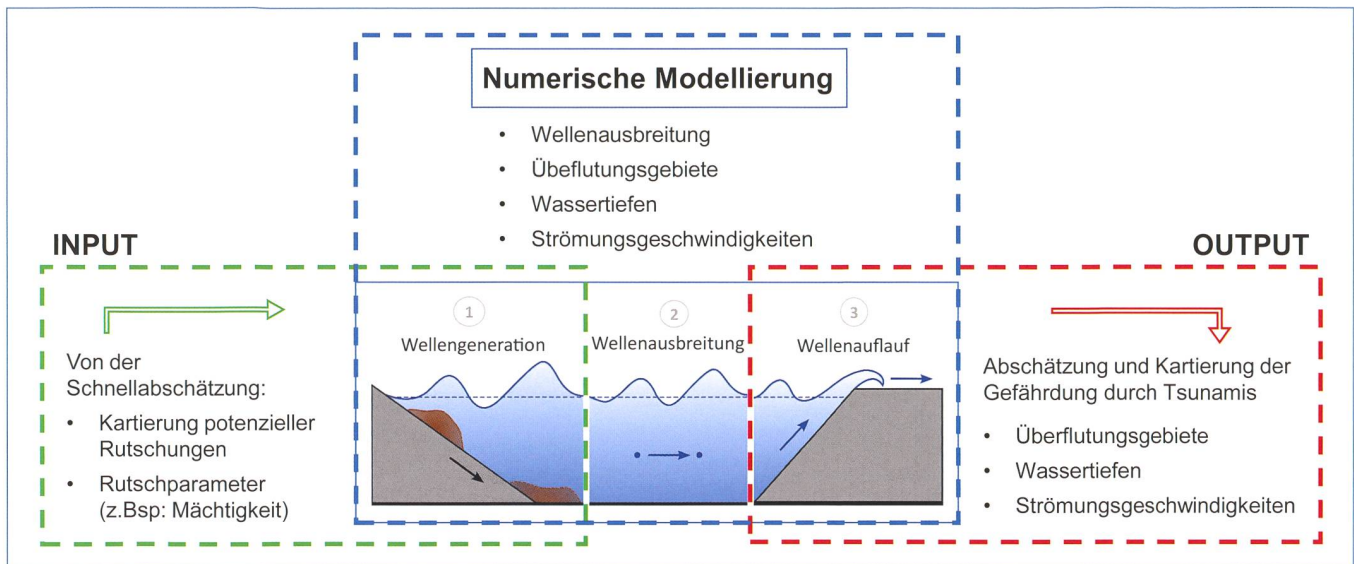


Abbildung 4: Ablauf der Abschätzung von potenziellen Gefährdungen durch Tsunamis mit dem numerischen Modell. Die schwarzen Pfeile zeigen die Bewegung der Rutschung, während die blauen Pfeile die Wellenausbreitung und den Wellenauflauf repräsentieren.

nungen sehr effizient. Dies ermöglicht umfangreiche Analysen zur Sensitivität von Parametern und Unsicherheiten, z. B. mittels Monte-Carlo-Simulationen.

### 3. Anwendungsbeispiel Vierwaldstättersee

Der Arbeitsablauf wird im Folgenden am Beispiel des Vierwaldstättersees (mittlerer Seespiegel 434 m ü. M.) exemplarisch aufgezeigt. Dieser glazial entstandene, perialpine See in der Zentralschweiz eignet sich gut für die Abschätzung der Gefährdung durch Tsunamis. Einerseits sind (I) historische Tsunamis dokumentiert (z. B. Cysat, 1969), und andererseits sind (II) Spuren von mehreren im See verteilten Massenbewegungen vorhanden, von denen man annimmt, dass sie durch Erdbeben verursacht wurden (z. B. Schnellmann et al., 2006).

#### 3.1 Potenzielle Unterwasser-rutschungen und generierte Wellenamplituden

Individuelle Rutschungen, welche gemäss der hier vorgestellten Schnellabschätzung für Erdbeben mit einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren (Abbildung 5a) und 2475 Jahren (Abbildung 5b) am Seeboden des Vierwaldstättersees zu erwarten sind, resultieren gemäss Gleichung 2 in potenziellen charakteristischen Wellenamplituden von bis rund 0.5 m. Die Schnellabschätzung berücksichtigt jedoch keine Effekte aufgrund von Interferenz mehrerer Wellen oder der Bathymetrie. Um diese Effekte mit einzubeziehen, wird im Folgenden eine detailliertere numerische Modellierung mit BASEMENT durchgeführt.

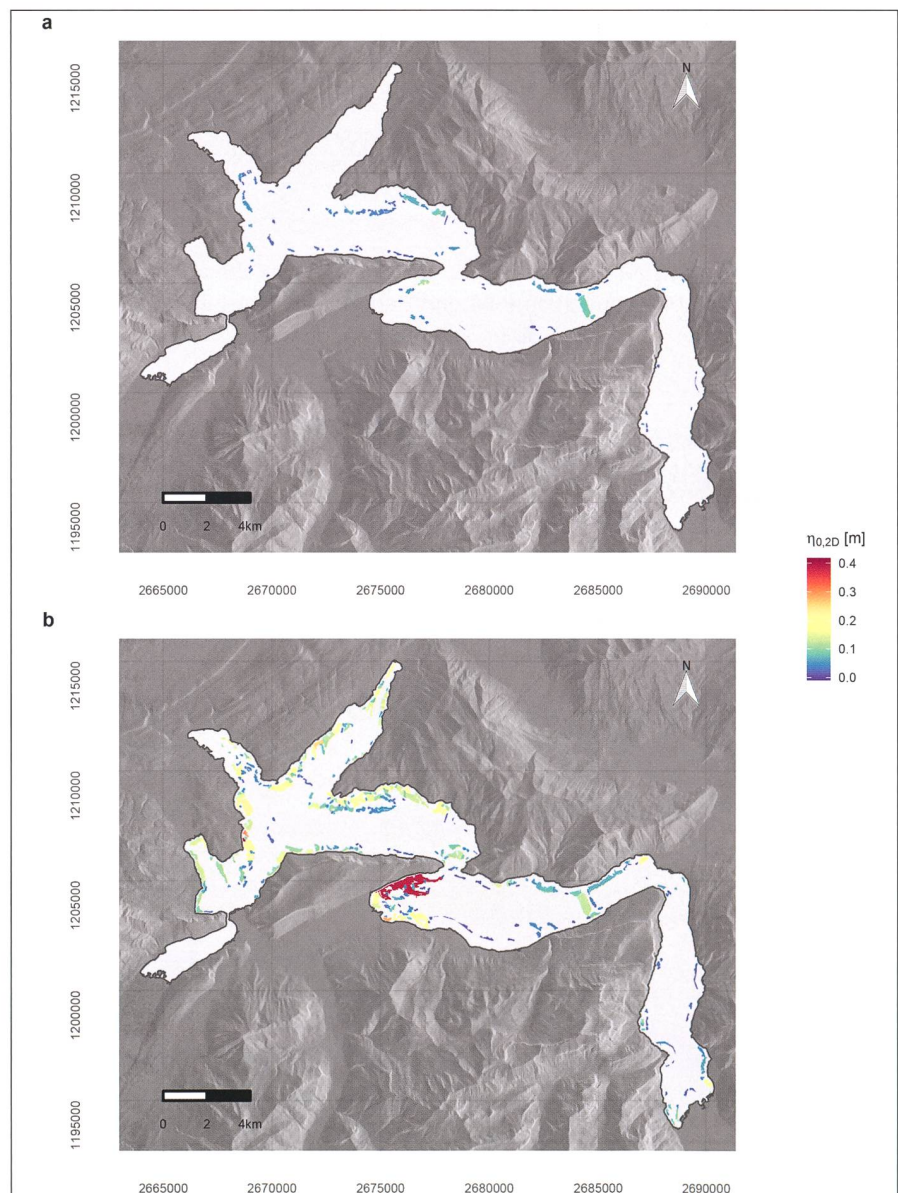


Abbildung 5: Erwartete Rutschungen, eingefärbt mit der abgeschätzten Wellenamplitude  $\eta_{0,2D}$  für Wiederkehrperioden von 475 (a) und 2475 (b) Jahren.



### 3.2 Detaillierte Modellierung der Wellengeneration und -ausbreitung mit BASEMENT

Eine detailliertere Abschätzung der Wellenausbreitung wird nachfolgend anhand eines Beispiels für einen Ausschnitt des Vierwaldstättersees veranschaulicht. Hierfür wur-

den zwei Rutschungsbereiche ausgewählt, welche gemäss der vorgestellten Schnellabschätzung durch Erdbeben mit einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren (Abbildung 5a) ausgelöst werden könnten. Für das ausgewählte Beispiel wurde angenommen, dass die zwei Unterwasserhang-

rutschungen gleichzeitig auftreten und dabei verschiedene Wellen erzeugen. Die beiden generierten Wellen breiten sich aus und treffen sich in der Seemitte zwischen den Rutschungszonen und laufen weiter bis zur Uferlinie. Für die numerische Simulation wird aus dem DBM und der Seeufer-

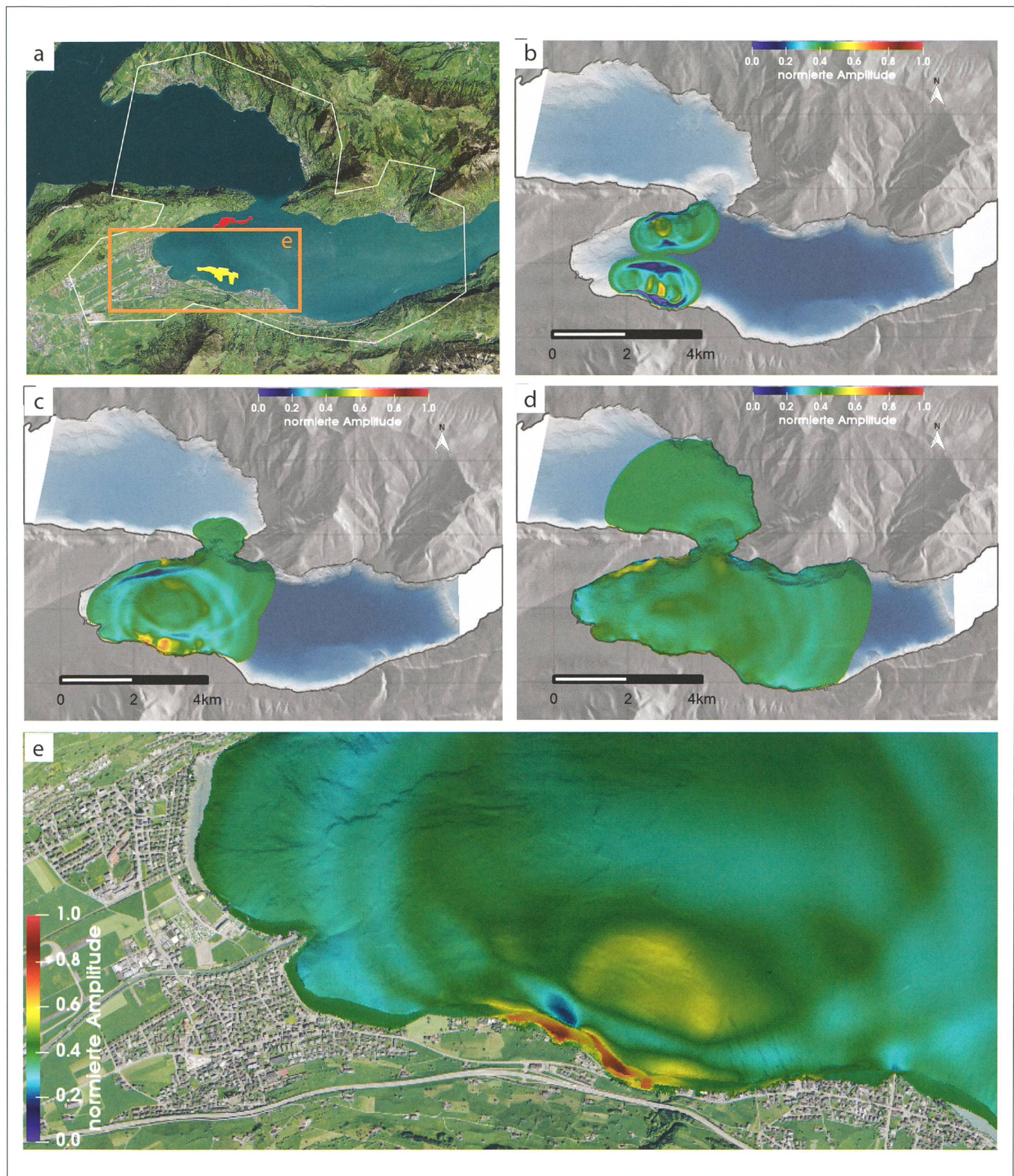


Abbildung 6: Simulation der Wellenausbreitung im Vierwaldstättersee zu verschiedenen Zeitpunkten. (a) Gewähltes Simulationsgebiet (weisses Polygon), ausgewählte Rutschungszonen (rote und gelbe Fläche) und Detailausschnitt bei Buochs (oranges Rechteck). Simulation der Wellenausbreitung zum Zeitpunkt 12s (b), 40s (c), und 100s (d) nach Auslösung der Rutschung. e) Detail der Simulation bei Buochs zum Zeitpunkt 50s nach Auslösung der Rutschung.



Anzahl Dreieckselemente	Mittlere Elementgrösse [m <sup>2</sup> ]	Simulationszeit [s]	Berechnungszeit [s]	Grafikkarte
2.6 Millionen	50	160	103	GeForce GTX 1080 Ti

Tabelle 1

linie ein Berechnungsgitter mit Dreieckselementen erstellt (Details in *Tabelle 1*).

Das für das Beispiel betrachtete Simulationsgebiet (weisses Polygon) und die potenziellen Rutschungszonen sind in *Abbildung 6a* dargestellt. Die Mächtigkeit der Rutschungszonen wurde anhand der Schnellabschätzung ermittelt (siehe *Abchnitt 3.1*) und beträgt 5 m (*gelbe Zone*) und 7 m (*rote Zone*). In diesem Beispiel werden in der numerischen Simulation die Rutschungen als plötzlicher Versatz des Seegrunds nachgebildet, d. h., die Elemente in diesen beiden Gebieten erfahren eine unvermittelte Änderung der Bathymetrie in der Grösse der Rutschmächtigkeit. Daraufhin bilden sich zwei Wellenzüge aus. Als Ausgangswasserspiegel wurde der mittlere Seespiegel 434 m ü. M. angenommen. Die so generierten Wellen breiten sich bis zum Ufer aus, wobei der Prozess des Wellenaufbaus noch nicht detailliert untersucht wurde; *Abbildungen 6b–d* zeigen den zeitlichen Verlauf der Wellen anhand der Wellenamplituden zu verschiedenen Zeitpunkten. Die dargestellten Wellenamplituden wurden mit dem Maximalwert normiert, sodass die Werte zwischen 0 und 1 liegen. *Abbildung 6e* zeigt eine Vergrößerung des Gebiets bei Buochs (*oran-*

*ges Rechteck in Abbildung 6a*). Das Ziel dieses Beispiels ist es, den allgemeinen Arbeitsablauf aufzuzeigen. Der Ansatz für die Simulation der Wellenerzeugung ist Bestandteil der laufenden Forschung, weshalb die gezeigten Resultate zum jetzigen Stand des Projekts ausschliesslich qualitativen Charakter haben.

#### 4. Schlussfolgerungen

In diesem Beitrag präsentieren wir einen Arbeitsablauf für die schnelle Abschätzung von Wellenamplituden, die durch erdbebeninduzierte Unterwasserhangrutschungen ausgelöst wurden. Der hier vorgestellte Arbeitsablauf erlaubt eine effiziente Identifikation von Zonen an den Unterwasserhängen, für welche weiterführende und vertiefte sedimentologische und geotechnische Studien angebracht sind. Ausserdem erlaubt die schnelle Abschätzung die Auswahl von Zonen, für welche detailliertere Modellierungen (z. B. mittels der Software BASEMENT) angebracht sind. Mittels dieses Arbeitsablaufes kann für verschiedene perialpine Seen die relative Gefährdung durch Tsunamis, welche durch Unterwasserhangrutschungen ausgelöst werden können, eingeschätzt werden.

Unabhängig von der gewählten Modellierungsmethode muss für die Abschätzung von durch Rutschungen verursachten Tsunamis in einem ersten Schritt eine Hangstabilitätsanalyse und Kartierung von potenziellen Rutschflächen durchgeführt werden. Je nach Vorhandensein von Daten für verschiedene Seen können dann generellere oder spezifischere Modelle verwendet werden.

Obwohl der hier vorgestellte Workflow auf stark vereinfachten Annahmen beruht (z. B., dass die Sedimenteigenschaften in allen perialpinen Seen dieselben sind), gibt dessen Anwendung auf verschiedenen Seen einen Anhaltspunkt, welche Seen prioritär mit weiterführenden, vertieften Modellierungen untersucht werden sollten.

#### 5. Ausblick

Der vorgestellte Arbeitsablauf benötigt Eingabedaten, welche auf einer engen Zusammenarbeit der Gebiete Sedimentologie, Geotechnik und numerischer Modellierung beruhen. Geotechnische Messungen an Unterwasserhängen ausgewählter perialpiner Seen würden eine individuelle Beurteilung anhand der Stabilitätskriterien für jeden See ermöglichen. In zukünftigen Arbeiten soll der Arbeitsablauf unter Berücksichtigung der Gefährdung durch Tsunamis aufgrund von Delta-Instabilitäten und Massenbewegungen oberhalb des Seespiegels erweitert werden.

#### Quellen:

Cysat R (1969). *Collectanea Chronica und denkwürdige Sachen pro Chronica Lucernensi et Helvetiae*. In: Schmid J (ed) *Quellen und Forschungen zur Kulturgeschichte von Luzern und der Innerschweiz*. Diebold Schilling Verlag, Luzern, pp 882–888.

Füchs H, Evers F, Razmi A, Vetsch D, Boes R (2018). Tsunamis, ausgelöst durch Unterwasserrutschungen in Seen. In: Zenz G (ed.) *Proc. Wasserbausymposium 2018*, TU Graz, B3: 17–24.

Hilbe M and Anselmetti FS (2015). Mass movement-induced tsunami hazard on perialpine Lake Lucerne (Switzerland): Scenarios and numerical experiments. *Pure and Applied Geophysics* 172, 545–568. doi: 10.1007/s00024-014-0907-7.

Schnellmann M, Anselmetti FS, Giardini D, McKenzie JA and Ward S (2002). Prehistoric earthquake history revealed by lacustrine slump deposits. *Geology*, 30, 1131–1134. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<1131:PEHRBL>2.0.CO;2.

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 Helvetiae* 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, Hilbe M, Anselmetti FS, Kopf AJ, Fleischmann T and Strasser M (2017). Probabilistic stability evaluation and seismic triggering scenarios of submerged slopes in Lake Zurich (Switzerland). *Geo-Marine Letters* 37:241–258. doi: 10.1007/s00367-017-0492-8.

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>.

Geodaten:  
© swisstopo

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.

#### Autoren:

**Michael Strupler**, **Katrina Kremer**, und **Stefan Wiemer**  
Schweizerischer Erdbebendienst an der ETH Zürich,  
Sonneggstrasse 5, 8092 Zürich,  
[www.seismo.ethz.ch](http://www.seismo.ethz.ch), [michael.strupler@sed.ethz.ch](mailto:michael.strupler@sed.ethz.ch)

**Flavio Anselmetti**  
Institut für Geologie und Oeschger-Zentrum für  
Klimaforschung an der Universität Bern,  
Baltzerstrasse 1 + 3, 3012 Bern, [www.geo.unibe.ch](http://www.geo.unibe.ch)

**Paola Bacigaluppi**, **Robert Boes**, und **David Vetsch**  
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und  
Glaziologie (VAW) ETH Zürich, Höggerbergring 26,  
CH-8093 Zürich, [www.vaw.ethz.ch](http://www.vaw.ethz.ch)