

Bild 1 / Ausschnitt des Vierwaldstättersees mit seinen Seebecken. In der Karte sind alle im Text vorkommenden Ortsbezeichnungen aufgeführt. Die gestrichelten Pfeile markieren stark vereinfacht die Herkunftsgebiete der größten Unterwasserrutschungen der Jahre 1601 (blau) und 1687 (rot). Die Karte basiert auf den DHM25 digitalen Höhendaten sowie den swissBATHY3D bathymetrischen Reliefdaten, deren Verwendung mit freundlicher Genehmigung des Bundesamtes für Landestopografie der Schweiz erfolgt (siehe auch www.geo.admin.ch).

TSUNAMIS

in Binnenseen der Alpen?

Eine Einschätzung der Gefährdung infolge Unterwasserhangrutschungen: Während Tsunamis entlang vieler Meeresküsten als eine Gefahr mit hohem Schadenspotenzial betrachtet werden, werden Tsunamis in Binnenseen des Alpenraums von der Bevölkerung kaum als eine Naturgefahr wahrgenommen. Dabei zeigen historische Aufzeichnungen, dass Tsunamis auch in Binnenseen auftreten können und sogar Menschenleben gefordert haben. Obwohl diese Ereignisse selten sind, bleibt dennoch die Frage, inwieweit sich ähnliche Ereignisse heute auswirken würden. Denn heutzutage sind die Uferbereiche vieler Seen in den Alpen viel dichter besiedelt als in der Vergangenheit, sodass die Konzentration von Menschen, Gebäuden und Infrastruktur an den Seeufern ein deutlich höheres Schadenspotenzial mit sich bringt.

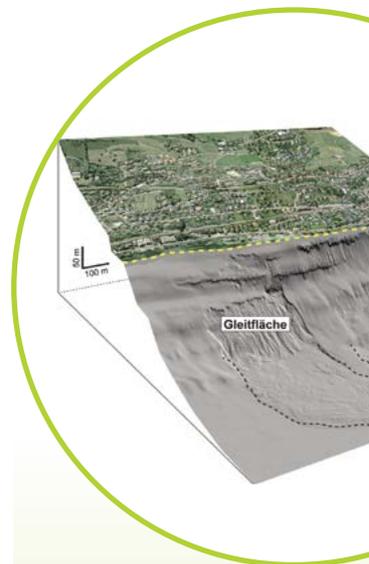


Bild 2 / Darstellung von Unterwasserrutschungen im Zürichsee. Beide Rutschungen haben eine Ausdehnung von mehreren 100 m. Es ist gut zu erkennen, wo sich das Sediment am Hang abgelöst hat und in tiefere Bereiche des Seebeckens abgeglitten ist. Als Gleitfläche wird der Bereich bezeichnet, auf dem die Rutschung mobilisiert wird (Quelle: Strupler et al., 2017b).



Historische Tsunamis in der Schweiz

Unter den historischen Tsunamis ist das Ereignis vom 16. September 1601 im Vierwaldstättersee vermutlich das bekannteste, bei dem eine bis zu 4 m hohe Flutwelle weite Bereiche des Seeufers, u. a. auch die Stadt Luzern, überflutete (Schnellmann et al., 2002). Der damalige Stadtscheiber von Luzern, Renward Cysat (1545-1614), notierte, dass die Flutwelle Schwemmgut bis zu 4 m über dem normalen Seespiegel angeschwemmt hatte und die Überflutungen im besonders flachen Uferbereich zwischen Buochs und Ennetbürgen mehrere 100 m in das Landesinnere hineinreichten (Bild 1). Weitere Augenzeugen berichteten, dass die Reuss, die normalerweise den See in Luzern entwässert, zeitweise ihre Fließrichtung umkehrte und in den Vierwaldstättersee hineinfluss und alle 10 Minuten trocken fiel, sodass die Leute „trockenen Fußes“ das Flussbett überqueren konnten.

Die Ursache des Tsunami waren Unterwasserrutschungen an den Hängen des Seebeckens, welche durch ein Erdbeben in der Zentralschweiz, etwa 10 km südlich vom Vierwaldstättersee, ausgelöst wurden (Bild 2). Die Tsunamiwelle entsteht durch das Abgleiten von auf den Hängen abgelagerten Seesedimenten. Dabei senkt sich die Wassersäule dort, wo die Rutschungen abgehen, und sie hebt sich dort, wo die Rutschmassen abgelagert werden. Durch diese vertikale Verlagerung der Wassersäule entsteht die Flutwelle, die sich lateral (seitlich) im See ausbreitet.

Am 23. September 1687 kam es zu einem weiteren Tsunami-Ereignis im Vierwaldstättersee, bei dem insbesondere der östliche Teil des Sees nahe dem Dorf Brunnen betroffen war (Bild 1). Bei dem Ereignis rutschte ein Teil des Muota-Deltas in tiefere Bereiche des Sees ab und löste daraufhin die Flutwelle aus. Die Chronik beschreibt, dass die Tsunamiwelle eine Höhe von 5 m erreichte



(Hilbe & Anselmetti, 2014), sodass der Wirt des Gasthauses zu Treib im ersten Stock seines Gebäudes „von einer Welle zu Boden“ geworfen wurde. Im Gegensatz zum Ereignis 1601 wurde die Rutschung am Muota-Delta nicht durch ein Erdbeben ausgelöst. Es gibt verschiedene Erklärungsansätze, aber der genaue Auslösemechanismus ist bisher unklar.

Untersuchungen von Tsunamis in Binnenseen

Doch nicht nur die Grundlagen der Auslösemechanismen von Unterwasserrutschungen sind noch nicht vollständig verstanden, auch die Ausbreitung und Auswirkung von Tsunami-Flutwellen in Seen werfen bisher noch viele Fragen auf, die noch nicht untersucht worden sind. Dabei ist das grundlegende Verständnis über Entstehung, Ausbreitung und Häufigkeiten von Unterwasserhangrutschungen und Tsunamis wichtig, um das Risikopotenzial solcher Ereignisse besser einschätzen zu können. Seit mehr als 20 Jahren forscht die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Flavio Anselmetti an der Universität Bern zusammen mit KollegInnen an der Tsunamithematik im Vierwaldstättersee und Zürichsee. Im Rahmen eines großen Forschungsprojektes (<http://tsunami.ethz.ch/de/home/>) werden derzeit in Zusammenarbeit zwischen der Universität Bern, dem Schweizerischen Erdbebendienst und der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich, dem Zentrum für Marine Umweltwissenschaften

(MARUM) der Universität Bremen sowie dem Schweizerischen Bundesamt für Umwelt (BAFU) Untersuchungen durchgeführt, die die Thematik von Tsunamis in Binnenseen erfassen sollen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen einem zukünftigen Risikomanagement dienen. Von den insgesamt fünf Projektgruppen analysiert beispielsweise die Arbeitsgruppe „Hazard“ die Gefährdung durch Tsunamis für Schweizer Seen mit einer Oberfläche größer als 1 km² mit dem langfristigen Ziel, eine Gefahrenhinweiskarte für die Öffentlichkeit zu erstellen.

Um die Gefährdung durch Tsunamis an Binnenseen zu erfassen, sind zunächst grundsätzliche Informationen und Arbeitsschritte notwendig (Bild 3). Dazu gehören 1 die Identifikation von rutschgefährdeten Hängen, 2 die Abschätzung von Wellenhöhen, die durch die potenziellen Rutschungen zu erwarten sind sowie 3 die Abschätzung von Wellenausbreitung auf dem See und das Auflaufen der Flutwelle an Land. Die Wellenhöhe eines rutschungsinduzierten Tsunamis ist u. a. vom Volumen der Rutschung und der Neigung der Gleitfläche des Hangrutsches abhängig und kann für eine erste Einschätzung – wie auch die Hangstabilität – vereinfacht berechnet werden. Dafür werden Angaben zum Ausmaß, zur mittleren Hangneigung und Mächtigkeit einer potenziellen Rutschung sowie zur Wassertiefe im Zentrum der Rutschung benötigt. Mit Hilfe von geophysikalischen Methoden können hochauflösende bathymetrische Daten des Seebeckens erstellt werden (Bild 1) sowie Informationen über ▶

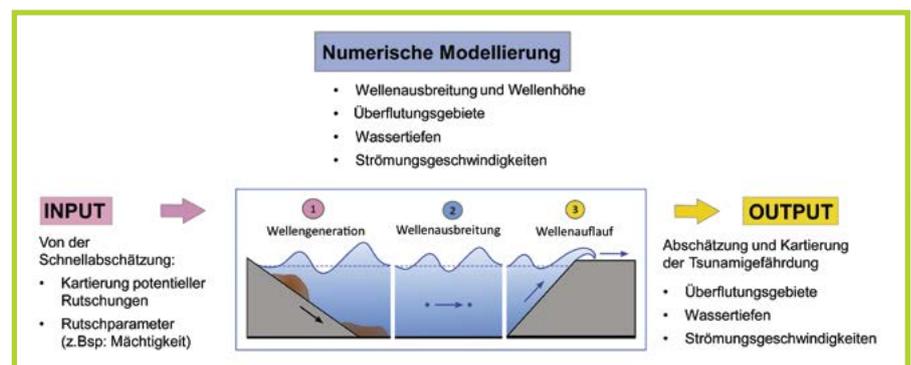


Bild 3 / Ablauf der Arbeitsschritte bei der Analyse und Abschätzung der potenziellen Gefährdung durch Tsunamis. Der schwarze Pfeil in der Grafik zeigt die Bewegungsrichtung der Rutschung an, die blauen Pfeile markieren die Wellenausbreitung und den Wellenauflauf im Uferbereich (Quelle: VAW ETH Zürich, Strupler et al., 2020).



die Lagerung der Sedimente im Untergrund gewonnen werden. Zusätzlich geben Messungen aus mehreren Meter langen Sedimentkernen des Seebodens Aufschluss über die Mächtigkeit von einzelnen Schichten und deren geotechnischen Eigenschaften. Letztere, zu denen z. B. die Dichte und Scherfestigkeit des Seeschlammes gehören, werden wie auch die Bodenbeschleunigung als Parameter der Erdbebenlast für eine grobe Abschätzung der Hangstabilität benötigt. Allein über die Berechnung der Hangstabilität ist es bereits möglich, Hangabschnitte zu identifizieren, die hinsichtlich der Rutschungsgefährdung kritisch sein können (**Bild 3**).

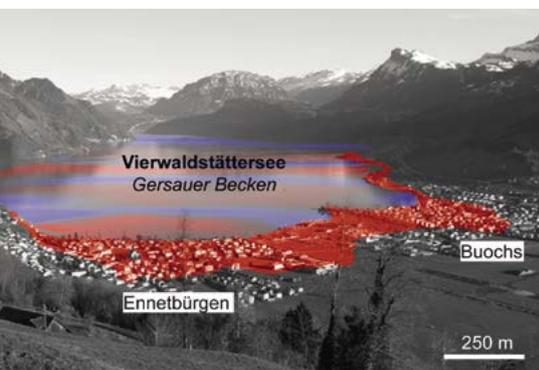


Bild 4 / Foto des Vierwaldstättersees mit Blick nach Osten über das Gersauer Becken. Die Farben zeigen die berechneten Wasserhöhen der numerischen Modellierung Szenario „Rutschung 1601“ zum Zeitpunkt der maximalen Überflutung. Rot – Wasserhöhe oberhalb des heutigen mittleren Wasserstandes, blau – Wasserhöhe unterhalb des heutigen mittleren Wasserstandes. Deutlich zu sehen ist, dass weite Gebiete der heute bebauten Flächen in Ennetbürgen und Buochs überflutet wären. (Quelle: Anselmetti & Hilbe, 2016)

Liegen Informationen zu kritischen Hangabschnitten vor, können für diese Bereiche gezielt Berechnungen durchgeführt werden, die die Wellenhöhe für jede potenzielle Rutschung individuell ermitteln. Sobald diese Ergebnisse vorliegen, kann abgeschätzt werden, welche Gebiete von einer auflaufenden Welle überflutet werden könnten. Dieser Ansatz der schnellen Abschätzung von potenziellen Wellenhöhen ist jedoch limitiert auf einen einzelnen Hangrutsch. Sobald mehrere Rutschmassen abgleiten, z. B. ausgelöst durch ein Erdbeben, kommt es zu Interferenzen zwischen den ausgelösten Wellen, die die Wellen-

höhe maßgeblich beeinflussen und nicht mehr über eine einfache empirische Gleichung erfasst werden können. Um für mehrere Rutschungen eine Berechnung der Wellenhöhen und der Auflaufhöhen an Land zu erhalten, werden numerische Modellierungen benötigt, die die komplexen Zusammenhänge simulieren und die Auswirkungen von Hangrutschungen auf die Entstehung und Ausbreitung von Tsunamis quantifizieren können.

Beispiel: Untersuchungen am Vierwaldstättersee

Aufgrund der besonders guten Datengrundlagen sind verschiedene Computer-basierte Berechnungen bisher für den Vierwaldstättersee und Zürichsee durchgeführt worden (Hilbe & Anselmetti, 2015; Strupler et al., 2017a, 2017b). Der Vierwaldstättersee eignet sich besonders gut, da die historischen Tsunami-Ereignisse im numerischen Modell rekonstruiert und die Ergebnisse mit den Augenzeugenberichten abgeglichen werden können. Basierend auf den historischen Rekonstruktionen können dann auch zukünftige Szenarien modelliert und hinsichtlich ihres Gefährdungspotenzials beurteilt werden. Denn das numerische Modell berechnet nicht nur die Wellenhöhe, sondern auch die Ausdehnung der Überflutungsgebiete an den Ufern und die Überflutungstiefen. Für die Risikoanalyse sind insbesondere die Ausdehnung der Überflutungsgebiete und die zu erwartenden Wassertiefen von großer Bedeutung. Die Ergebnisse der Untersuchung am Vierwaldstättersee zeigen, dass Hangrutschungen hauptsächlich an Hängen mit einem Gefälle zwischen 10 und 25° (Strasser et al., 2011; Strupler et al., 2017a) vorkommen. Das liegt vor allem daran, dass 3 bis 10 m mächtige Sedimentpakete einer Schwachschicht an den Hangflächen auflagern, und diese potenziell abgleiten können. Ist die Hangneigung zu flach, kann die Schicht kaum mobilisiert werden. Ist die Neigung zu steil, kann sich keine ausreichend mächtige Schicht ablagern, die bei einer Rutschung eine bedeutende Wellenhöhe auslöst. Bisherige Ergebnisse gehen davon aus, dass mindestens ein Rutschungsvolumen von 1 Mio. m³ übertroffen werden

muss, um eine signifikante Wellenhöhe zu erreichen. Bei den Ereignissen von 1601 und 1687 hatten die Rutschungen etwa ein Volumen zwischen 20 und 30 Mio. m³. Das numerische Modell errechnete, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flutwellen so schnell ist, dass die Wellen den See in wenigen Minuten durchqueren und besonders in den flachen Uferbereichen zu erheblichen Überflutungen führen. Laut den Ergebnissen der Computersimulation für das Ereignis von 1601 erreichte die Flutwelle eine Höhe von mindestens 4 Metern an den Ufern des Gersauer Beckens sowie eine Auflaufdistanz – ausgehend von der Seeuferkante – in der Ebene zwischen Buochs und Ennetbürgen von etwa 700 m (**Bild 1 und 4**).

In einer weiteren Simulation wurde ein extremes Szenario für den Vierwaldstättersee unter der Erdbebenlast eines 1000-jährlichen Bebens (Erdbebenlast >1601) modelliert (Anselmetti & Hilbe, 2016). Das Modell geht von der heutigen Seemorphologie und Sedimentmächtigkeit auf den Hängen aus. Es wurden insgesamt 27 Rutschungsbereiche in den Seebecken des Vierwaldstättersees identifiziert, die unter der angenommenen Erdbebenlast instabil werden könnten und beim Abgleiten zu einem komplexen Muster sich überlagernder Tsunami-Wellen führen würden. Die simulierten Wellenhöhen fallen jedoch deutlich geringer aus als bei dem modellierten Szenario aus dem Jahr 1601 (**Bild 5**). Das gilt ebenso für das Ausmaß der Überflutungen in der Ebene zwischen Buochs und Ennetbürgen. Die Ursache liegt darin, dass viele der potenziell gefährdeten Hänge beim Erdbeben 1601 bereits „bereinigt“ wurden und die Sedimente damals abgeglichen sind. Die aktuelle Mächtigkeit der seither abgelagerten Schichten ist deutlich geringer als 1601. Da die Wellenhöhe über das Volumen der Rutschung u. a. von der Mächtigkeit abhängt, bedeutet eine geringere Mächtigkeit auch eine niedrigere Wellenhöhe und damit einhergehend eine geringe Auflaufdistanz in flachen Uferbereichen. Der Grad der Instabilität hängt neben der Erdbebenlast auch von der Mächtigkeit der potenziell instabilen Sediment-

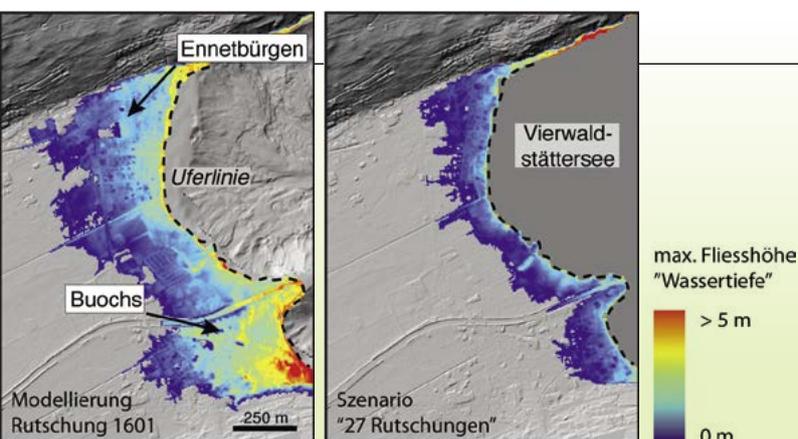


Bild 5 / Vergleich der berechneten Wasserhöhen aus den numerischen Modellierungen für das Szenario „Szenario 1601“ und für ein zukünftiges Szenario „27 Rutschungen“, ausgelöst durch ein Erdbeben mit einer statistischen Wiederkehrperiode von 1000 Jahren. Es ist deutlich zu sehen, dass die Überflutungen im Uferbereich deutlich geringer ausfallen als in der Simulation des Ereignisses von 1601. (Quelle: Anselmetti & Hilbe, 2016)

ablagerungen an den Hängen ab. Es ist zu vermuten, dass Hänge, die 1601 und 1687 von Rutschungen betroffen waren, heute auch unter Erdbebenlast relativ stabil sind und nur kleinere Rutschungen produzieren. Daher wäre somit auch die maximale Höhe einer Tsunamiflutwelle limitiert. Je länger die Hänge nicht von Rutschungen erfasst werden, je mächtiger lagern sich die Sedimente dort an. Die Gefahr eines Tsunami erhöht sich im Laufe der Zeit. Am Vierwaldstättersee liegt ein kritischer Bereich heute auf der westlichen Seite der Chindli-Moräne (**Bild 1**), die bei den Erdbeben 1601 und 1774 nicht betroffen war. Die simulierte Flutwelle würde eine Auflaufhöhe von mehr als 5 m Höhe im Bereich der Deltas von Gersau und Beckenried erreichen. Ein solches Ereignis hätte verheerende Folgen für das dicht besiedelte Gebiet (Hilbe & Anselmetti, 2015).

Was bedeuten diese Erkenntnisse für die Zukunft?

Tsunamis in Binnenseen werden auch in Zukunft auftreten – das ist sicher.

Risikobewertung von Tsunamis in Binnenseen

Aufgrund der geringen Anzahl an historisch dokumentierten schweren Tsunami-Ereignissen in der Schweiz und der langen Wiederkehrzeiten sowie dem bisher unzureichenden Verständnis der Auslösemechanismen ist es schwierig, Aussagen zu statistischen Häufigkeiten von Ereignissen bestimmter Magnitude zu treffen. Daher ist es umso wichtiger, dass diese Thematik auch in anderen Regionen der Alpen untersucht wird, um einen besseren Einblick in die Häufigkeit von See-Tsunamis zu erhalten. Ausgehend von der Universität Innsbruck werden mittlerweile auch in Österreich verschiedene Seen hinsichtlich ihrer „Tsunami-Geschichte“ untersucht.

So berichtet eine historische Quelle aus dem Jahr 1761 von einem Flutwellen-Ereignis im Hechtsee in Tirol, und die ersten sedimentologischen Auswertungen der Universität Innsbruck scheinen dieses Ereignis zu bestätigen (Strasser et al., 2017).

Die Vorhersage von tsunamiauslösenden Hangrutschungen ist bisher kaum möglich. Was sicher ist, ist jedoch, dass die Magnitude des nächsten See-Tsunamis auch davon abhängen wird, wann die nächste Rutschung ausgelöst wird. Je länger die stabile Phase andauert, desto mächtiger sind die Ablagerungen auf rutschungsgefährdeten Hängen der Seebecken, die die Wellenhöhe kontrollieren. Auch wenn das Wiederkehrintervall von größeren Seetsunamis bei mehreren 100 oder 1000 Jahren liegt, sollte die Gefahr, die von einem solchen Ereignis ausgeht, nicht unterschätzt werden. Im Fall des Falles gibt es nahezu keine Vorwarnzeit, die den Menschen ermöglicht, sich selbst und ihr Eigentum zu schützen. Die Sensibilisierung der Menschen in potenziell betroffenen Gebieten für eine Naturgefahr, die bisher kaum Beachtung findet, ist somit ein wichtiger Schritt eines erfolgreichen Risikomanagements.

Danksagung

Ein großes Dankeschön geht an Prof. Dr. Flavio Anselmetti (Universität Bern), Prof. Dr. Michael Strasser (Universität Innsbruck) und Dr. Michael Strupler (Schweizerischer Erdbebendienst, ETH Zürich) für ihre Unterstützung und die Bereitstellung von Abbildungen. Ein großer Dank gilt auch dem Bundesamt für Landestopografie der Schweiz und der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich für die Genehmigungen zur Verwendung der Abbildungen. ▲

LITERATUR

Anselmetti, F. und Hilbe, M., 2016. Tsunamis im Vierwaldstättersee. In: Die Natur kennt keine Katastrophen. (Hrsg.) Meier, M., Wunderlin, D. und Anselmetti, F., Periferia Edizioni, Luzern, 320 Seiten.

Hilbe, M. und Anselmetti, F., 2015. Mass movement-induced tsunami hazard on perialpine Lake Lucerne (Switzerland): Scenarios and numerical experiments. *Pure and Applied Geophysics* 172, 545-568.

Hilbe, M. und Anselmetti, F., 2014. Signatures of slope failures and river-delta collapses in a perialpine lake (Lake Lucerne, Switzerland). *Sedimentology*, 61, 1883-1907.

Schnellmann, M. Anselmetti, F. et al., 2002. Prehistoric earthquake history revealed by lacustrine slump deposits. *Geology*, 30, 1131-1134.

Strasser, M. et al., 2017. Seesedimente als geologische Zeugen vergangener extremer Naturereignisse. Arbeitstagung „Angewandte Geowissenschaften an der GBA“, 19.-22. Juni 2017. Bad Ischl, Hallstatt, Gmunden.

Strasser, M. et al., 2007. Quantifying subaqueous slope stability during seismic shaking: Lake Lucerne as model for ocean margins. *Marine Geology*, 240, 77-97.

Strupler, M., et al., 2020. Abschätzung der Gefährdung durch Tsunamis in perialpinen Seen infolge Unterwasserhangrutschungen. *Wasser, Energie, Luft*, 112, 11-16.

Strupler, M. et al., 2017a. A subaqueous hazard map for earthquake-triggered landslides in Lake Zurich, Switzerland. *Natural Hazards*, 90, 51-78.

Strupler, M. et al., 2017b. Probabilistic stability evaluation and seismic triggering scenarios of submerged slopes in Lake Zurich (Switzerland). *Geomarine Letters*, 37, 241-258.

Dr. Miriam Dühnforth
Risikoanalyse und -beratung
Versicherungskammer Bayern
München