

ETH zürich



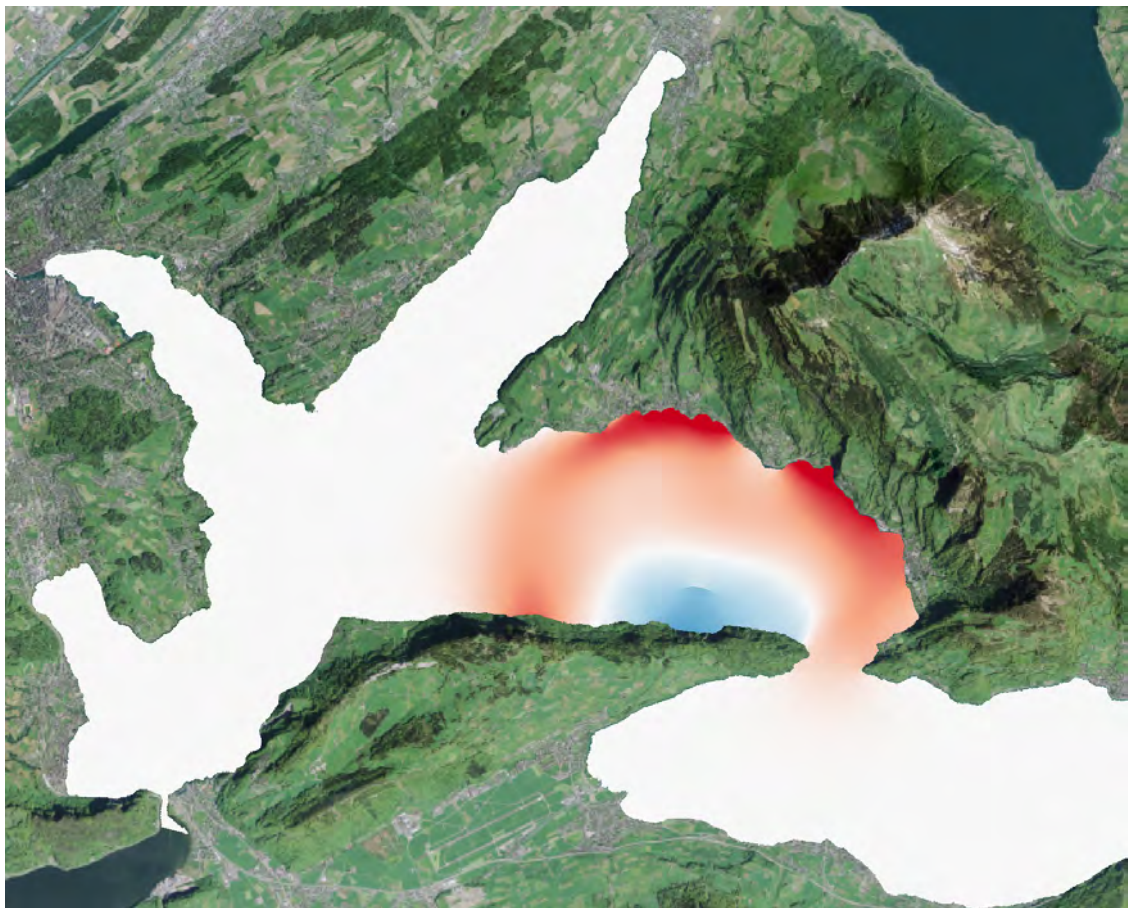
Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie

u^b

UNIVERSITÄT
BERN

Handbuch zur Gefahrenbeurteilung von See - Tsunamis

Theorie und Anwendung



Zürich / Bern, 31. August 2026

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Titelbild:

Simulation der Wellenausbreitung aufgrund des Felssturzes Obermatt am Vierwaldstättersee.

Impressum

- Auftraggeber:** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Gefahrenprävention, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
- Auftragnehmer:** Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW),
ETH Zürich
Institut für Geologie, Universität Bern
- Autorenschaft:** Jana C. Schierjott, Michael Strupler, Katrina Kremer, Flavio Anselmetti,
David F. Vetsch
- Begleitung BAFU:** Eva Gertsch-Gautschi
- Begleitgruppe:** Amin Askarinejad, Florian Aubry, Piotr Bednarz, Paolo Bergamo, Thierry Bussard, Stéphane Commend, Christophe Dénervaud, Marc Diebold, Blaise Duvernay, Guillaume Favre-Bulle, Sacha Gaillet, Sébastien Gaudillere, Christian Gerber, Stéphanie Girardclos, Philippe Heller, Christoph Knellwolf, Michel Kuhrmann, Antoine Magnollay, Etienne Monbaron-Jalade, Thomas Schneider, Gabrielle Schwab Rouge, David Siffert, Christian Volz, Olivier Watts

Hinweis: Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zitiervorschlag

Jana C. Schierjott, Michael Strupler, Katrina Kremer, Flavio Anselmetti, David F. Vetsch (2026): Handbuch zur Gefahrenbeurteilung von See-Tsunamis. Theorie und Anwendung.
<https://doi.org/10.3929/ethz-c-000804617>

Vorwort

Das vorliegende Handbuch zeigt einen möglichen Arbeitsablauf zur Gefahrenbeurteilung von See-Tsunamis auf, wobei sich die Autoren an den Handbüchern zur Gefahrenbeurteilung von Hochwassern oder Massenbewegungen orientiert haben. Dabei wird auf die theoretischen sowie praxisorientierten Aspekte, welche spezifisch für die Modellierung von See-Tsunamis sind, eingegangen. See-Tsunamis hat es schon mehrfach in der Schweiz gegeben. Unter anderem ist ein Beispiel am Vierwaldstättersee im Jahre 1601 erwähnenswert, bei dem eine mehrere Meter hohe Tsunamiwelle Teile der Stadt Luzern unter Wasser gesetzt hat. Aufgrund der Lage und topographischen Beschaffenheit der Schweizer Seen bleiben See-Tsunamis eine potentielle Gefahr. Vielmehr ist es nicht eine Frage des „Ob“ sondern des „Wann“. Damit die in der Zwischenzeit gewachsene Bevölkerung ausreichend früh gewarnt und eventuelle präventive Massnahmen ergriffen werden können, ist es essentiell, eine Gefährdung durch See-Tsunamis abzuschätzen. Ein zeitgemässer Ansatz dazu ist die numerische Simulation von Tsunamis in Seen und eine entsprechende Aufbereitung der Ergebnisse wie zum Beispiel anhand von Gefahrenkarten. In diesem Handbuch werden zuerst die theoretischen Grundlagen hinter der Simulationsweise von drei verschiedenen Auslösemechanismen von See-Tsunamis erläutert. Es folgt eine praxisorientierte Beschreibung des Ablaufs zur Gefahrenabschätzung durch See-Tsunamis, dessen Anwendung durch Beispiele aufgezeigt wird.

Anmerkung: Die in diesem Handbuch veranschaulichten Beispiele basieren auf BASEMENT Version 4 und QGIS 3.40 (Bratislava). Für allfällige Anpassungen im Workflow, die aufgrund von Softwareupdates notwendig werden, sind die bearbeitenden Expert/Innen zuständig.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	ii
Vorwort	iii
1 Einleitung	3
1.1 Überblick	3
1.2 Tsunamis in der Schweiz	4
1.3 Hintergrund	4
1.4 Ziel des Handbuchs	5
1.5 Aufbau des Handbuchs	6
2 Theoretischer Hintergrund & Modellierungsansatz	9
2.1 Überblick	9
2.2 Tsunami-Generierung durch TERM	9
2.3 Tsunami-Generierung durch SAQM	11
2.4 Hintergrund zur probabilistischen Herangehensweise	11
2.4.1 Latin-Hypercube-Sampling	12
2.4.2 Log-normal Verteilung	12
2.4.3 Perzentile	13
3 Situationsanalyse	15
3.1 Gemeinsame Datengrundlage für TERM und SAQM	15
3.2 Spezifische Daten für TERM	15
3.2.1 Disposition für TERM	15
3.2.2 Impulsproduktparameterberechnung	16
3.2.3 Berechnungen für die Welleneingabe	16
3.3 Spezifische Daten für SAQM	17
3.3.1 Disposition SAQM nicht-deltaisch	19
3.3.2 Disposition SAQM deltaisch	22
3.4 Dispositionskarte	23
3.4.1 Vergangene Ereignisse	23
4 Szenarienbildung	25
4.1 Grundszenarien	25
4.2 Erweiterte Szenarien	25
4.3 Weitere Faktoren in der Szenarienbildung	26
5 Wirkungsanalyse	27
5.1 Simulationsvorbereitung	27
5.1.1 Untersuchungsgebiet	27

5.1.2	Innere Randbedingung für TERM	29
5.1.3	Bereiche für SAQM	30
5.1.4	Erzeugung von Berechnungsgittern	30
5.2	Simulation	31
5.2.1	Initialmodell	31
5.2.2	Gittersensitivität	31
5.2.3	Kalibrierung und Validierung	31
5.2.4	Sensitivitätsanalyse und probabilistische Modellierung	31
5.2.5	Anwendung mit der Simulationssoftware BASEMENT	32
5.3	Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse	32
6	Anwendungsbeispiel	35
6.1	Hardware und Software Voraussetzungen	35
6.2	Situationsanalyse	36
6.2.1	Spezifische Daten für TERM	36
6.2.2	Spezifische Daten für SAQM	38
6.2.3	Szenarienbildung	41
6.3	Wirkungsanalyse	41
6.3.1	Simulationsvorbereitung	41
6.3.2	Simulation	49
6.3.3	Auswertung	50
A	Datengrundlage	53
B	Beispiel eines probabilistischen Simulationsansatzes	55

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Überblick

Das Wort Tsunami stammt aus dem Japanischen und ist zusammengesetzt aus zwei Wörtern: „tsu“ (Hafen) und „nami“ (Welle) (Darbyshire and Ishiguro, 1957; Goff et al., 2016). Der Begriff ist von japanischen Fischern geprägt worden, die bei ihrer Heimkehr vom offenen Meer durch Wellen verwüstete Dörfer vorfanden. Obwohl die Fischer auf offener See keinerlei aussergewöhnlichen Wellengang verspürt hatten, war die Zerstörung durch die an der Küste auflaufenden Wassermassen enorm. Die tückische Eigenschaft von Tsunamis ist ihre grosse Wellenlänge und niedrige Wellenhöhe im Vergleich zur Gewässertiefe, in der sie sich ausbreiten. Dies führt dazu, dass Tsunamis unbemerkt bleiben solange man sich auf offener See, respektive in tieferen Gewässern befindet, und nur durch Messbojen wahrnehmbar sind. Doch sobald sich ein Tsunami einer flacheren Uferregion nähert, baut sich die Welle ungemein auf und der Tsunami kann weite Teile des Uferbereichs überfluten. Eine weitere gefährliche Eigenschaft von Tsunamis ist ihre relativ schnelle Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Dies macht es schwierig, vor einem kommenden Tsunami zu warnen, besonders bei kurzen Distanzen vom Entstehungsort zum Ufer, wie es in Seen der Fall ist.

Ein Tsunami, respektive die Welle, entsteht durch eine plötzliche Veränderung des Wasserspiegels. Dies kann zum Beispiel durch einen vertikalen Versatz am Gewässergrund infolge von einem Erdbeben geschehen, aber auch durch einen plötzlichen Masseneintrag aufgrund einer Hangrutschung oder einem Kollaps einer Vulkanflanke, welcher viel Wasservolumen verdrängt (Abb. 1.1).

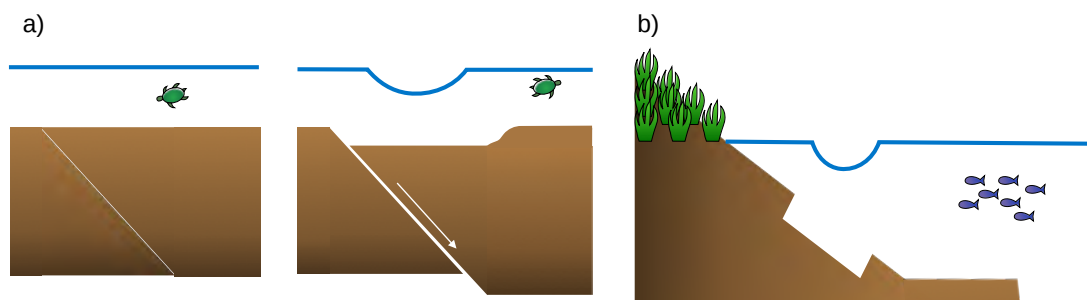


Abbildung 1.1: Die Abbildung zeigt schematisch zwei mögliche Ursachen für Tsunamis. a) zeigt den plötzlichen Versatz des Gewässergrundes infolge eines Erdbebens. Dies führt dazu, dass sich der Wasserspiegel senkt und dadurch eine Tsunamiwelle auslöst; b) zeigt einen vergleichbaren Vorgang, aber ausgelöst durch eine plötzliche Massenbewegung an einem Unterwasserhang infolge dessen es zu einem Versatz im Wasserspiegel kommt.

Der japanische Ursprung des Wortes deutet darauf hin, dass Tsunamis ein marines Phänomen sind. Historische Aufzeichnungen jedoch zeigen, dass Tsunamis nicht nur in marinen Gewässern, sondern auch in Seen auftreten. Lakustrine Tsunamis haben vielfältige Ursachen: vertikaler Versatz durch Erdbeben (1858 im Patzcuaro See in Mexico, ([Garduño-Monroy et al., 2011](#))), Stürme ausgelöst z.B. durch schwere Gewitter (Great Lakes, USA ([Bechle et al., 2016](#))) oder vulkanische Explosionen (Taal See, Philippinen ([Saderra Masó, 1904, 1911](#); [Paris et al., 2014](#))). Die häufigste Ursache von Tsunamis in Seen sind jedoch Massenbewegungen an Seeufern und -hängen (ober -und unterhalb des Wasserspiegels) laut historischen Aufzeichnungen weltweit ([Kremer et al., 2021](#)). Diese Massenbewegungen können nicht nur durch Sedimentüberlast (hohe Ablagerungsrate → „spontane Massenbewegung“), sondern auch durch Erdbeben ausgelöst werden.

Ein prominentes Ereignis ist der 4 m-hohe Tsunami im Chehalis See in Kanada im Jahr 2007, ausgelöst durch einen Hangrutsch oberhalb des Wasseroberfläche ([Roberts et al., 2013](#)). Die Tsunamiwelle zerstörte alle an den See angrenzenden Campingplätze und es wurden Auflaufhöhen von bis zu 37.8 m über mittlerem Seestand gemessen. Zudem breitete sich die Welle noch mehrere Kilometer im Chehalis Fluss flussabwärts aus. Ein anderes Beispiel ist das starke Erdbeben in Chile im Jahr 1960, welches Massenbewegungen an den Unterwasserhängen im See Nahuel Huapi auslöste. Daraufhin folgte eine 2.5 m hohe Welle, welche die Stadt Bariloche überflutete und 2 Tote forderte ([Barros and Sievers, 1961](#); [Parsons, 2002](#); [Chapron et al., 2006](#); [Beigt et al., 2016](#)). Eine allgemeine Übersicht an See-Tsunamis, inklusive des Volumens der Massenbewegungen und Personenschäden, ist in der Veröffentlichung von [Heller and Ruffini \(2023\)](#) zu finden.

1.2 Tsunamis in der Schweiz

In der Schweiz existiert das bisher umfassendste Archiv für See-Tsunamis, sowohl historisch belegte als auch anhand von Seesedimenten rekonstruierte prähistorische Ereignisse. Historische Dokumente, wie auch geologische Forschungsarbeiten zeigen, dass in der Schweiz See-Tsunamis vorallem auf Massenbewegungen an Steilhängen entlang des Ufers und an Unterwasserhängen zurückzuführen sind. Einige Beispiele werden im Folgenden genannt. Im Jahr 563 n. Chr. führte ein Bergsturz im Rhonetal zu einer deltaisichen subaquatischen Massenbewegung (SAQM deltaisich) am Rhonedelta. Dieses Ereignis führte gemäss einer numerischen Simulation zu einer bis zu 13 m hohen Welle, welche Teile der Genfer Altstadt überflutete ([Kremer et al., 2012](#)). Im Jahr 1601 führte ein Erdbeben der Stärke 5.9 zu mehreren zeitgleichen nicht-deltaischen SAQM und Bergstürzen im Vierwaldstättersee ([Schnellmann et al., 2002](#); [Siegenthaler et al., 1987](#)). Der resultierende Tsunami hatte eine Höhe von bis zu 4 m und überschwemmte Teile der Stadt Luzern. Im Jahr 1687 wurde ein Tsunami von 5 m Höhe im Vierwaldstättersee im Bereich Gersau/Uri-Becken beobachtet. Eine deltaisiche SAQM im Muotadelta wird als Ursache angenommen ([Hilbe and Anselmetti, 2014](#)). Ein ähnliches Ereignis wird auch im Jahre 1996 für das Aaredelta im Brienersee beschrieben, wo eine 0.5 m hohe Welle ausgelöst wurde ([Girardclos et al., 2007](#)). Diese Beispiele zeigen, dass die Gefährdung durch Tsunamis in der Schweiz durchaus real ist und erhebliche Personen- sowie Sachschäden durch sie entstehen können, besonders im Hinblick auf das Wachstum von Siedlungen entlang der Seen.

1.3 Hintergrund

Hintergrund des vorliegenden Handbuchs ist der Bericht „Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz“ des Bundesamts für Umwelt, welcher 2016 den Handlungsbedarf im Umgang mit Naturgefahren aufzeigte. In Massnahme Nr. 9 wurde festgehalten, dass gesamtschweizerische Grundlagen für alle relevanten Gefahrenprozesse bereitgestellt werden müssen. Es zeigte sich, dass diese Grundlagen u.a. für den Wasserprozess Tsunami noch fehlten. Die Grundlagen umfassen jeweils die Erarbeitung

der Methodik, der Gefahrengrundlagen und des Datenmodells sowie die schweizweite Integration in die Gefahrenkarten der Kantone und in das schweizerische Geoportal.

Um eine einheitliche Methodik zur Beurteilung der Tsunami-Gefährdung in der Schweiz zu entwickeln, lancierte das BAFU 2018 das Forschungsprojekt TSUNAMI-CH und liess aus dieser wissenschaftlichen Grundlage danach das vorliegende Handbuch für die Praxis erarbeiten. Erst wurde ein Arbeitsablauf zur Erhebung der Tsunamigefährdung (AET) durch nicht-deltaische subaquatische Massenbewegungen (SAQM nicht-deltaisch) entwickelt, um (1) die Wellenerzeugung und aufgrund derer, (2) die Wellenausbreitung und (3) das Wellenauflaufen einschliesslich der daraus folgenden Überflutung zu simulieren. Einen Überblick dazu findet sich in [Strupler et al. \(2020b\)](#). Der AET wurde anschliessend erweitert, um Gefahren durch terrestrische Massenbewegungen (TERM) und deltaische subaquatische Massenbewegungen (SAQM deltaisch) miteinzuschliessen ([Strupler et al., 2024](#)). Das Handbuch erlaubt eine einheitliche Gefahrenbeurteilung des Prozesses Tsunami über die ganze Schweiz. Mit der im Handbuch aufgezeigten Methodik können die Kantone die Anforderungen des BAFU für eine Gefahrenbeurteilung Tsunami erfüllen. Die Anforderungen werden in der Vollzugshilfe Gefahrenbeurteilung und im Vollzugsinstrument Gefahrenbeurteilung Wasser (beide in Arbeit, geplante Publikation 2027) konkret aufgezeigt.

Dass See-Tsunamis eine Gefährdung der Infrastruktur und von Personen darstellen ist nichts Neues. Zum Beispiel wurden schon im Jahr 1988 Berechnungen zur Wellengenerierung und -ausbreitung im Klöntalersee im Auftrag der Nordostschweizerischen Kraftwerke AG (NOK) durchgeführt ([Huber and Chervet, 1988](#)). Der Grund waren gemessene Felsbewegungen, die potentiell zu einem Felssturz und damit verbundenen See-Tsunami führen könnten. Das Ziel war es, herauszufinden, wie hoch die Gefährdung eines Sachschadens am Staudamm Rodanenberg und Wasserkraftwerk am Löntsch sein könnte. Inzwischen ist die Entwicklung numerischer Modelle zur Simulation von See-Tsunamis weit vorangeschritten und die Ausbreitung von Wellen kann effizient für ganze Seen berechnet werden. Zudem steht heutzutage fast jedermann genügend Rechenleistung zur Verfügung, um entsprechende Simulationen effizient durchzuführen. Dieses Handbuch vereint bisherige Forschungsergebnisse sowie daraus erarbeitete Arbeitsabläufe zur Erhebung der Tsunamigefährdung in Seen und soll als Grundlage für die Gefahrenbeurteilung von See-Tsunamis für Fachleute dienen.

1.4 Ziel des Handbuchs

Dieses Handbuch beschreibt wie eine Gefahrenbeurteilung für See-Tsunamis durchgeführt werden kann. Ziel ist nicht nur, die Höhe der Tsunamiwellen mithilfe der Modellierung abzuschätzen, sondern auch die Effekte der Überschwemmung am Ufer möglichst realistisch abzubilden. Daher berücksichtigt das numerische Modell die Bathymetrie des Sees sowie die Topographie des Uferbereichs einschliesslich der Gebäude. Das simulierte Auflaufen der Welle erlaubt es, mögliche Überflutungsgebiete und die dortigen Wassertiefen und Strömungsgeschwindigkeiten abzuschätzen, um eine detaillierte Gefahrenbeurteilung für Tsunamis zu ermöglichen. Basierend auf den Vorhersagen können präventive Massnahmen entwickelt werden.

In diesem Handbuch werden die zwei Haupttypen von Massenbewegungen betrachtet. Dabei handelt es sich einerseits um solche, die oberhalb des Wasserspiegels ihren Ursprung haben (z.B. Felsstürze, Hangrutschungen, Gletscherabbrüche, Schneelawinen, etc.), welche hier zusammengefasst als **Terrestrische Massenbewegungen (TERM)** bezeichnet werden. Andererseits werden Massenbewegungen, die unterhalb der Wasseroberfläche ihren Ursprung haben, betrachtet (**Subaquatische Massenbewegungen, SAQM**). Dabei wird zwischen zwei Subtypen unterschieden: subaquatische Massenbewegungen, die an einem lateralen Unterwasserhang stattfinden (**nicht-deltaische SAQM**) und subaquatische Massenbewegungen beim Delta eines Fliessgewäs-

sers (deltäische SAQM).

1.5 Aufbau des Handbuchs

Das Handbuch orientiert sich im Aufbau an der generellen Herangehensweise der Gefahrenbeurteilung durch Naturgefahren des Bundesamts für Umwelt (Abb. 1.2). Im Handbuch wird zunächst die *Methodik* vorgestellt, auf der die Modellierung der Tsunamiwellen basiert. Hierzu wird die Theorie zu den jeweiligen Auslösemechanismen eingeführt. Daraufhin folgt das Kapitel *Situationsanalyse* mit Informationen zu den grundlegenden Daten, die für die Szenarienbildung und später Simulation notwendig sind. Danach kommt das Kapitel *Szenarienbildung*, welches die verschiedenen Auslösemechanismen mit Bezug auf mögliche Auslösetrigger (wie Erdbeben) und die Auswahl der massgebenden potentiellen Massenbewegungen aus der Dispositionskarte beschreibt. Anschliessend wird im Kapitel *Wirkungsanalyse* die Simulationsvorbereitung, Simulation und die Ergebnisvisualisierung dargestellt. Abschliessend wird die Herangehensweise in einem Kapitel mit Anwendungsbeispielen nachvollziehbar aufgezeigt.

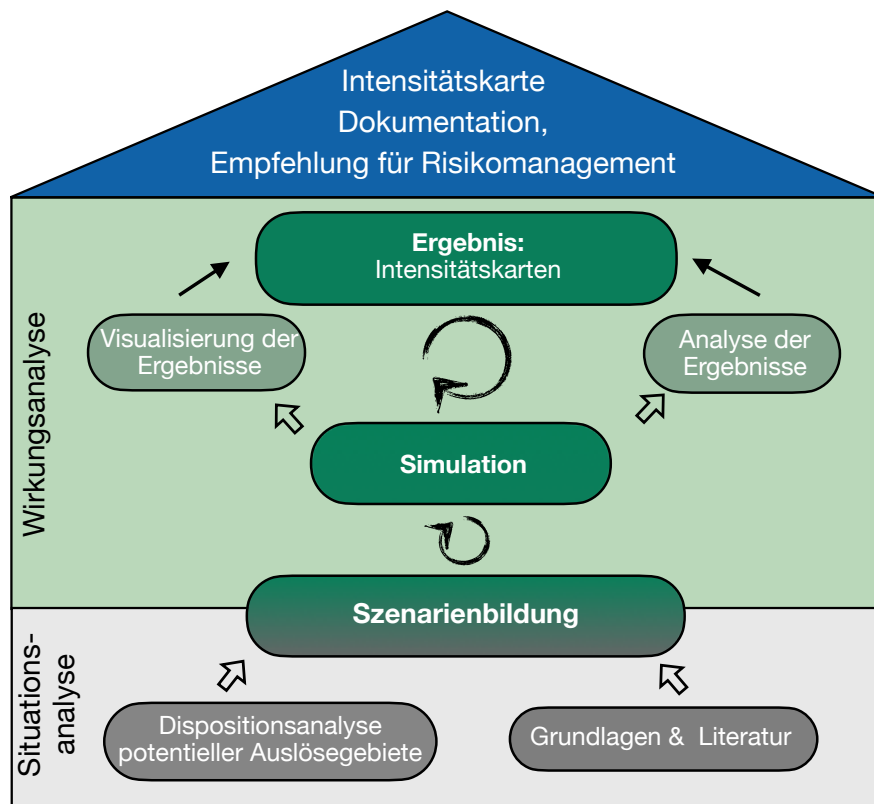


Abbildung 1.2: Herangehensweise der Gefahrenbeurteilung durch See-Tsunamis. Die Grafik illustriert wie die Gefahrenbeurteilung grundsätzlich aufgebaut ist. Das Grundgerüst ist dasselbe, welches auch bei anderen Naturgefahren angewandt wird (FAN-Handbücher). Das Fundament bildet dabei die Situationsanalyse. Dazu gehören eine initiale (Literatur-) Recherche und eventuelle Geländeaufnahme sowie Kartierung. Mithilfe dieser Informationen können verschiedene Szenarien gebildet werden. Im Teil der Wirkungsanalyse werden diese modelliert und die Ergebnisse aus den Simulationen visualisiert und analysiert. Danach können aus den Simulationsergebnissen Intensitätskarten abgeleitet werden. Diese, zusammen mit der Dokumentation, bilden das Ergebnis der Gefahrenbeurteilung und die Grundlage für das Risikomanagement.

Situationsanalyse im Detail

Innerhalb der Situationsanalyse gibt es mehrere Arbeitsschritte, die ausgeführt werden müssen. Dazu gehören neben der Literaturrecherche und der eventuellen Geländeaufnahme (beide nicht in diesem Handbuch beschrieben) die folgenden Schritte:

1. Beschaffung der Daten für den gewählten See (Kapitel [3.1](#))
2. Berechnung von Parametern und Datenreihen für TERM (Kapitel [3.2.2](#))
3. Kartierung potentieller SAQM (Kapitel [3.3.1](#))
4. Erstellung von Dispositionskarten

Szenarienbildung im Detail

Die Szenarienbildung bildet das Bindeglied zwischen der Situationsanalyse, bei der es hauptsächlich um Datenbeschaffung geht, und der Wirkungsanalyse, welche die Simulation und Auswertung beinhaltet. Die Szenarienbildung ist daher ein zentrales Element in der Gefahrenbeurteilung durch See-Tsunamis. Hierbei werden Dispositionskarten analysiert und massgebende Szenarien für die Simulation erstellt.

Wirkungsanalyse im Detail

Nach der Szenarienbildung sind im Rahmen der Wirkungsanalyse die Simulation vorzubereiten und nach der Simulation die Simulationsresultate auszuwerten und für die gewünschte Darstellung aufzubereiten. Dieser letzte Teil der Gefahrenbeurteilung für See-Tsunamis ist vergleichbar mit dem Vorgehen bei der Erstellung von Intensitätskarten für Hochwasser.

1. Simulationsvorbereitung (Kapitel [5.1](#)):
 - Erstellung eines Modellbereichs vom See
 - Definition von Anfangs- und Randbedingungen
 - Berechnungsgittererstellung unter Berücksichtigung der Bereiche der Massenbewegungen und Randbedingungen
2. Simulation (Kapitel [5.2](#))
3. Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse (Kapitel [5.3](#))

Ein detaillierterer Ablauf des Workflows ist in Abb. [1.3](#) dargestellt.

Gefahrenbeurteilung: Tsunamis ausgelöst durch SAQM und TERM

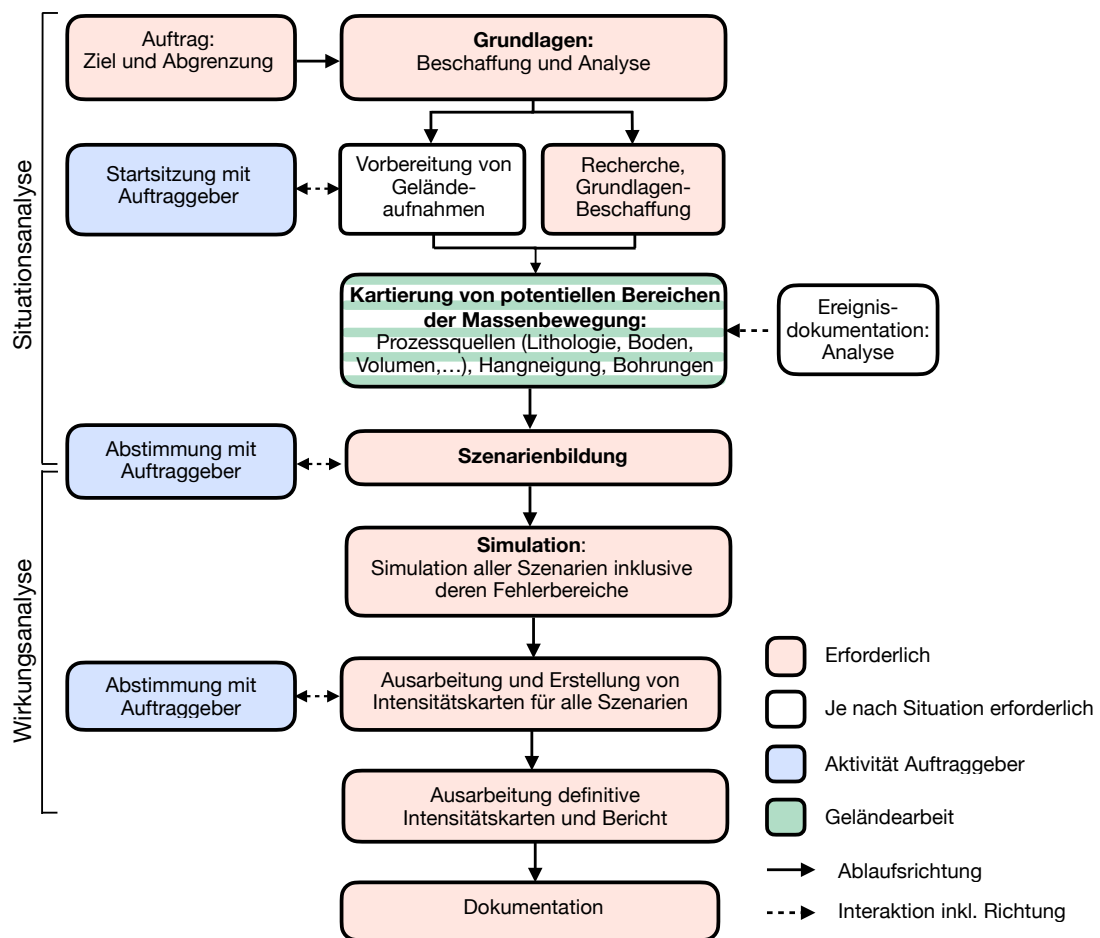


Abbildung 1.3: Genereller Ablauf zur Gefahrenbeurteilung für See-Tsunamis.

Kapitel 2

Theoretischer Hintergrund & Modellierungsansatz

2.1 Überblick

Der Arbeitsablaufs zur Erhebung der Tsunamigefährdung (AET) wurde entwickelt, um (1) die Wellenerzeugung aufgrund von TERM und SAQM (2) die Wellenausbreitung und (3) das Wellenauflaufen einschliesslich der daraus folgenden Überflutung zu simulieren (siehe Abb. 2.1). Die Datengrundlage dazu bilden kartierte Informationen und Abschätzungen zu vergangenen bzw. potentiellen Massenbewegungen und deren Charakteristiken (insb. deren Lage, Ausmass und Mächtigkeit).

Die grössten Unsicherheiten im AET finden sich bei der Abschätzung des Ursprungsortes und der Charakteristiken potentieller Massenbewegungen. Sensitivitätsanalysen zeigen, dass die Mächtigkeit der Massenbewegung einen erheblichen Einfluss auf die generierte Welle hat. Da die exakte Mächtigkeit einer Massenbewegung schwer vorhersehbar ist, können die Auswirkungen von unterschiedlich stark ausgeprägten Massenbewegungen anhand verschiedener Szenarien aufgezeigt werden. Sofern erforderlich, könnte auch ein probabilistischer Ansatz verwendet werden. In diesem Kapitel wird auf die Methodik der verwendeten Ansätze zur Modellierung der Wellenerzeugung aufgrund von TERM und SAQM (deltaisch und nicht-deltaisch) eingegangen.

2.2 Tsunami-Generierung durch TERM

Terrestrische Massenbewegungen führen dazu, dass Erd-, Gesteins-, Schnee- oder Eismassen mit einer bestimmten Geschwindigkeit, und daher einem Impuls, in den See stürzen (Abb. 2.2). Solche Massenbewegungen entstehen oft durch eine Kombination von einer geologischen Prädisposition und einem Auslöser, wie z.B. hohe Mengen an Regen, Frost-Tauprozesse, Schneefall, Überlast durch Anwachsen der Sedimentschicht, anthropogene Veränderungen (z.B. instabile Steinbrüche, Sprengungen), Erdbeben oder auch Vulkanausbrüche. Bei diesem Szenario wird der resultierende Tsunami als Impulswelle modelliert. Es gibt verschiedene Typen an Impulswellen, darunter zum Beispiel die Solitärwelle, Bore, Cnoidalwelle und Stokes-Welle (Evers et al., 2019a). Die bisher am häufigsten für Tsunamimodellierung verwendete Impulswelle ist die Solitärwelle (Madsen et al., 2008) (auch Soliton genannt, wenn mehrere Solitärwellen gleichzeitig präsent sind (Drazin and Johnson, 1989)). Dies liegt unter anderem daran, dass Solitärwellen eine eindeutige mathematische Lösung haben und, obwohl sie nichtlinear sind, mit nur zwei Parametern beschrieben werden können (z.B. Madsen et al., 2008). Dies macht sie für die Erarbeitung von analytischen und numerischen Lösungen interessant. Des Weiteren konnten Hammack Jr and Raichlen (1972); Hammack

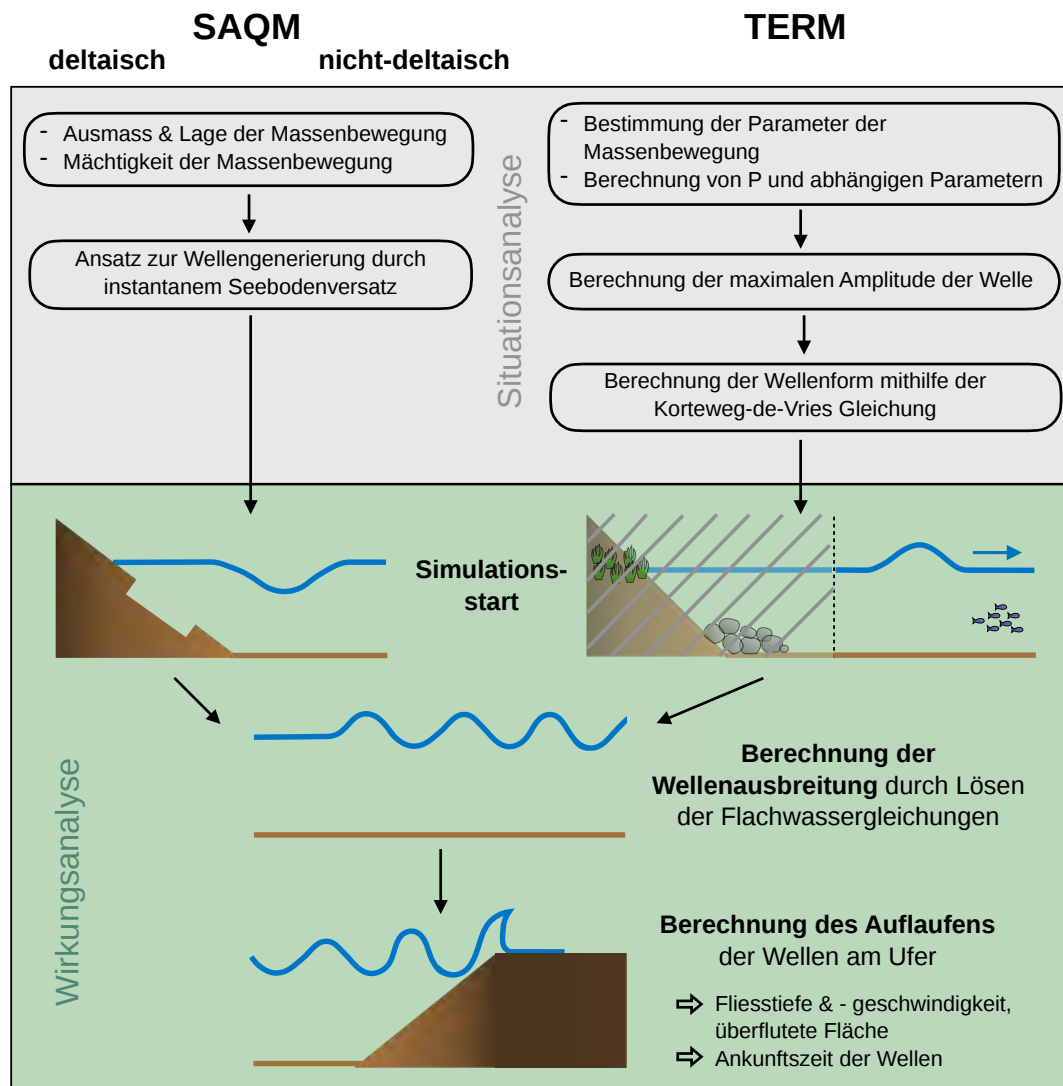


Abbildung 2.1: Konzeptionelle Darstellung des Ablaufs zur Simulation eines See-Tsunamis für verschiedene Auslösemechanismen. SAQM und TERM unterscheiden sich im Hinblick auf den physikalischen und damit auch auf den numerischen Ansatz.

(1973); Segur (1973) und weitere Autoren zeigen, dass eine impulsartige, positive oder negative Veränderung des Wasserspiegels bei konstanter Wassertiefe eine Solitärwelle zur Folge hat. Ähnlich argumentieren Goring and Raichlen (1978) und Yeh et al. (1994); sie schreiben, dass nach langer Ausbreitungsdauer die Tsunamiwelle der Form einer Solitärwelle entspricht.

Tsunamis, die durch TERM ausgelöst werden, wurden nicht nur theoretisch sondern auch vielfach im Labor in Wellenkanälen und -becken untersucht (Evers et al., 2019b; Heller, 2007; Heller and Hager, 2011). Dabei kommt der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich eine besondere Rolle zu, da sie im Laufe der Jahre ein umfangreiches Wissen zur Abschätzung von durch TERM generierten Impulswellen erarbeitet hat (z.B. Heller et al., 2009; Heller and Hager, 2010, 2014). Daraus ist der Leitfaden „Landslide-generated Impulse Waves in Reservoirs: Basics and Computation“ (Evers et al., 2019a) entstanden, in dem der physikalische Ansatz beschrieben ist, der die Grundlage für den hier verwendeten numerischen Ansatz bildet. In diesem Leitfaden schreibt Evers et al. (2019a) auch, dass eine Solitärwelle kein Wellental besitzt, was bedeutet, dass die Wellenamplitude der Wellenhöhe einer Solitärwelle entspricht. Auch wird sie als Flachwasserwelle klassifiziert, da typischerweise das Verhältnis von Wellenlänge zur mittleren Wassertiefe bei einer Solitärwelle grösser als 20 ist.

Bei TERM hat das Eintauchen der bewegten Masse in den See eine Übertragung des Impulses

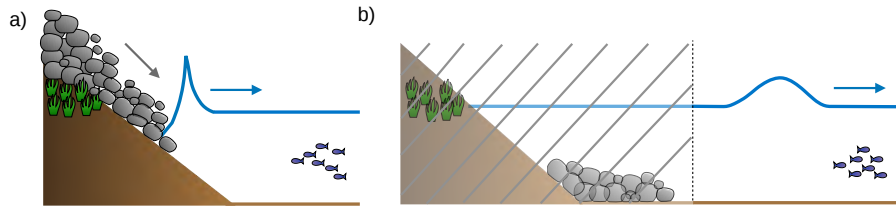


Abbildung 2.2: Die Abbildung zeigt das Konzept für die Tsunamigenerierung aufgrund von TERM. a) zeigt den Zustand während der Hangrutschung bzw. Felssturz und b) veranschaulicht die Welle, die durch die Interaktion mit dem Wasser entsteht und sich ausbreitet.

zur Folge, wodurch eine Welle entsteht. Die Tsunami-Generierung kann in zwei Phasen einteilt werden: 1) erste Interaktion der bewegten Masse mit dem vorwiegend ruhenden Wasser, und 2) die resultierende Reaktion des Wassers in Form einer Welle (Evers et al., 2019b). Im hier präsentierten Handbuch ignorieren wir die erste Phase, da es sich bei der Interaktion von bewegter Masse und Wasser um einen physikalisch äusserst komplexen Vorgang handelt und nicht massgebend für die hier vorgeschlagene Vorgehensweise zur Gefahrenbeurteilung durch See-Tsunamis ist. Stattdessen fokussieren wir uns auf die Generierung der resultierenden Welle und fahren dann fort mit der Modellierung der Wellenausbreitung und dem Auflaufen am Ufer.

Die Höhe des Tsunamis am Entstehungsort wird mit empirischen Gleichungen aus Evers et al. (2019b) berechnet und diese als Startbedingung für die hydrodynamische Modellierung verwendet. Es wird der empirische Ansatz aus 3D Experimenten gewählt, da ein See eher einem Wellenbecken als einem Wellenkanal gleicht. Es ist wichtig zu wissen, dass dies einen grossen Einfluss auf die Wellenausbreitung hat, denn aufgrund der lateralen Ausbreitungsmöglichkeit werden Wellen deutlich stärker in einer 3D- als in einer 2D Umgebung gedämpft, so dass die Wellenhöhe bis zu einer Magnitude kleiner sein kann (z.B. Heller and Ruffini, 2023). Des Weiteren wird hier der Ansatz verfolgt, zwei Wellen zu modellieren, wobei die erste Welle kleiner ist, aber verglichen mit der zweiten weniger Unsicherheit bezüglich der Grösse hat (Evers et al., 2019b).

2.3 Tsunami-Generierung durch SAQM

In diesem Handbuch werden für Tsunamis, die ihren Ursprung in subaquatischen Massenbewegungen haben (SAQM), zwei Auslösemechanismen berücksichtigt: 1) Massenbewegungen an meist ca. 10-25° steilen Unterwasserhängen im See (nicht-deltaische SAQM), und 2) solche am Deltabereich (deltaische SAQM). Der hier gewählte Modellierungsmechanismus für beide Typen ist grundsätzlich derselbe; der allgemeine Arbeitsablauf unterscheidet sich nur in den Annahmen bezüglich der Sedimentmächtigkeit und wie die Gebiete kartiert werden.

Das Vorgehen besteht aus zwei Schritten. Zuerst müssen potenzielle Bereiche von Massenbewegungen von Experten kartiert oder gewählt (zum Beispiel anhand von früheren Massenbewegungen oder Errechnung der Hangstabilität) und für die Wellensimulation vorbereitet werden. Anschliessend wird die Wellenausbreitung im See und der Wellenaufbau am Ufer simuliert. Dafür wird eine SAQM mit einem unmittelbaren Versatz des Seegrundes approximiert. Die Grösse des Versatzes entspricht in Mächtigkeit und Ausmass der erodierten Zone. Dieser vertikale Versatz löst die Welle aus (Abb. 2.3).

2.4 Hintergrund zur probabilistischen Herangehensweise

In diesem Abschnitt wird ein kurzer theoretischer Einblick in einen probabilistischen Ansatz gegeben, der benutzt werden kann, wenn Parameter mit Unsicherheiten behaftet sind. Die hier



Abbildung 2.3: Die Abbildung zeigt das Konzept für die Tsunamigenerierung aufgrund von SAQM. a) zeigt den Zustand vor der subaquatischen Massenbewegung. b) verdeutlicht wie das abgerutschte Sediment eine Veränderung der Wasseroberfläche nach sich zieht und einen Wellentrog induziert, und sich in c) folglich als Welle ausbreitet.

vorgestellte Methode ist eine von vielen Möglichkeiten, Unsicherheiten in der Modellierung mit einzubeziehen.

Generell stellt die probabilistische Methode einen Weg dar, um Wahrscheinlichkeiten für ausgesuchte Kombinationen innerhalb eines Parameterraumes zu berechnen und dabei Unsicherheiten der einzelnen Parameter zu berücksichtigen. Dies ist von Vorteil, wenn man Parameter nicht genau kennt, d.h. die Parameter einen Unsicherheits-/Fehlerbereich haben.

Die hier vorgeschlagene Methode um Unsicherheiten zu berücksichtigen, ist die Monte-Carlo-Simulation, bei der wiederholt zufällig Werte aus einem definierten Unsicherheitsbereich gewählt werden. Mit diesen Werten werden dann eine Vielzahl an Simulationen gebildet. Es wird allerdings kompliziert, wenn viele Parameter einen Unsicherheitsbereich haben. In diesem Fall bietet sich eine Unterkategorie der Monte-Carlo-Simulation besonders gut an: das Latin-Hypercube-Sampling (Kap. 2.4.1). Auf diesen Ansatz wird im weiteren Verlauf eingegangen.

2.4.1 Latin-Hypercube-Sampling

Eine Unterkategorie der Monte-Carlo-Simulation ist das Latin-Hypercube-Sampling (Minasny and McBratney, 2006), welche sich durch ihre Effizienz sehr gut für den hier beschriebenen Ablauf eignet. Die Anzahl der berücksichtigten Parameter wird mit k bezeichnet. Jedem dieser k Parameter mit einem Unsicherheitsbereich wird eine Standardabweichung zugeordnet. Für jeden Parameter wird der Unsicherheitsbereich anschliessend in n gleichwahrscheinliche Intervalle unterteilt. Aus jedem Intervall wird ein zufälliger Wert gezogen. Dadurch entstehen insgesamt nk gezogene Parameterwerte, die zu n Parametersätzen bzw. Modellen kombiniert werden.

2.4.2 Log-normal Verteilung

Die logarithmische Normalverteilung ist die bevorzugte Verteilung zur Untersuchung von Unsicherheiten in Kombination mit dem Latin-Hypercube-Sampling. Sie ist eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung für eine Variable, die nur positive Werte annehmen kann. Sie beschreibt die Verteilung einer Zufallsvariablen X , wenn die mit dem Logarithmus transformierte Zufallsvariable $Y = \ln(X)$ normalverteilt ist. Anders gesagt, wenn Y in dem oben beschriebenen Fall in Form einer Gauss'sche Glockenkurve (Standard-Normalverteilung) visualisiert werden kann, so ist X log-normalverteilt. In den Naturwissenschaften, der Technik und Medizin spielt die log-normal Verteilung eine grosse Rolle, da dadurch viele Prozesse besser als mit einer Standard-Normalverteilung abgebildet werden können.

Am besten erfolgt die statistische Analyse von log-normalverteilten Größen so, dass die Werte logarithmiert werden und auf diese transformierten Werte die Methoden der gewöhnlichen

Normalverteilung angewandt werden. Wenn sinnvoll, können dann die Ergebnisse, beispielsweise Vorhersage-Intervalle, in die ursprüngliche Skala zurücktransformiert werden.

2.4.3 Perzentile

Bei herkömmlichen Simulation gibt es als Resultat pro Berechnungszelle nur einen einzigen Wert pro simulierte Grösse, z.B. „die Abflusstiefe ist 1 m in dieser Berechnungszelle“. Hingegen bestehen die Resultate von Monte-Carlo-Simulationen aus einer Vielzahl an Werten pro Grösse und Berechnungszelle. Eine Möglichkeit diese Vielzahl an Werten darzustellen, ist die Verwendung von Perzentilen. Perzentile sind eine spezielle Form von Quantilen, welche Lagemasse in der Statistik darstellen. Bei Quantilen wird ein Datensatz der Grösse nach geordnet und in gewünschte, gleich grosse Teile zerlegt. Bei Perzentilen, wird der Datensatz in 100 gleich grosse Teile zerlegt. Das 5. Perzentil bedeutet zum Beispiel, dass 5% aller Werte kleiner oder gleich gross wie der Wert des 5. Perzentiles sind. Das heisst auch, dass 95% aller Werte der Verteilung grösser als dieser Schwellenwert sind. Im konkreten Fall von Tsunami-Überflutungsszenarien mit $n=100$ Simulationen heisst das, dass der 5-niedrigste Wert angegeben wird. Ein weiteres, oft benutztes Perzentil ist der Median. Es bedeutet, dass 50% der Grösse nach geordneten Werte kleiner oder gleich gross wie der Wert des Medians sind.

Kapitel 3

Situationsanalyse

3.1 Gemeinsame Datengrundlage für TERM und SAQM

Für alle Tsunami-Simulationen benötigen wir **Höheninformationen** aus einer kombinierten topographischen und bathymetrischen Karte (digitales Höhenmodell (DEM), Oberflächenmodell oder Geländemodell) in einem GIS-lesbaren Format. Für die Schweiz können die grundlegenden topographischen und bathymetrischen Daten bei [swisstopo](#) bezogen werden. Wichtig ist, dass alle Daten dasselbe Koordinatensystem nutzen.

3.2 Spezifische Daten für TERM

Die spezifischen initialen Daten für die Dispositionskarte und spätere Simulation von TERM- ausgelösten Tsunamis bestehen grundsätzlich aus der Lage (Disposition) und **charakteristischen Parametern der bewegten Masse**, die in den See stürzt. Dazu zählen Dichte, Ausdehnung, Froude-Zahl, Mächtigkeit, Breite, Einsturzwinkel, welche gutachterlich, resp. durch Experten, bestimmt werden müssen. Der gewünschte Detailgrad der Untersuchung entscheidet, ob eine einfache Abschätzung dieser Parameter (z.B. anhand vorhandener Literatur) oder etwa Begehungen und Feldmessungen nötig sind. Es ist wichtig zu beachten, dass alle gemessenen oder abgeschätzten Werte mit Unsicherheiten behaftet sind. Daraus folgt, dass die berechneten Anfangsbedingungen für die Welleneingabe auch mit Unsicherheiten behaftet sind. Zum Aufzeigen der Sensitivität ist es deshalb empfehlenswert, Unsicherheitsbereiche zu definieren und aufgrund dieser Berechnungen mit verschiedenen Anfangsbedingungen durchzuführen.

Des Weiteren wird der **mittlere Seespiegel** (wse) und die absolute **Referenz-Tiefe des Sees** (h_{ref}) für die Simulation benötigt. Daneben werden der Impulsproduktparameter P und abhängige Parameter benötigt, um schlussendlich die Startbedingung für den Tsunami berechnen zu können. Im Folgenden erläutern wir im Detail wie die benötigten Parameter berechnet werden. Diese Berechnungen müssen für jeden durch TERM ausgelösten Tsunami durchgeführt werden.

3.2.1 Disposition für TERM

Die Kartierung der TERM sollte gutachterlich durch Experten/innen geschehen. Schon existierende Gefahrenkarten können unterstützend genutzt werden. Kartierte TERM sollten zusammen mit den kartierten SAQM in einem GIS-Projekt zusammengefasst werden, um eine Dispositionskarte zu erstellen. Es genügt zuerst, das Ausmass, die Lage und einige charakteristische Eigenschaften der TERM an Land zu bestimmen. Für jede kartierte TERM müssen dann die in den nachfolgenden Abschnitten ([3.2.2](#) und [3.2.3](#)) beschriebenen Berechnungen gemacht werden.

3.2.2 Impulsproduktparameterberechnung

Die Höhe des Tsunamis am Entstehungsort wird mit empirischen Gleichungen aus [Evers et al. \(2019b\)](#) berechnet. Diese wird als Startbedingung für die hydrodynamische Modellierung verwendet. Es müssen einige Rechenschritte durchgeführt werden. Zuerst berechnet man den Impulsproduktparameter P mithilfe der folgenden Gleichung

$$P = F \sqrt{S_r} \sqrt[4]{M_r} \sqrt{\cos\left(\frac{6}{7}\alpha\right)}, \quad (3.1)$$

wobei F die Froude-Zahl der bewegten Masse ist, welche in das Gewässer stürzt, S_r dessen relative Mächtigkeit, M_r dessen relative Masse ([Evers et al., 2019a](#)) und α der Winkel mit dem die bewegte Masse auf das Wasser trifft (Eintreffwinkel). Die Froude-Zahl errechnet man mit der Gleichung $F = v/(gh_{ref})^{0.5}$ wobei g die Erdbeschleunigung (9.81 m/s^2), v die Eintauchgeschwindigkeit der Masse und h_{ref} die Referenzwassertiefe sind. Die relative Masse errechnet sich mit $M_r = (\rho_s V_b)/(\rho_w b h_{ref}^2)$ mit V_b als Bulkvolumen und ρ_s als Dichte der bewegten Masse, sowie ρ_w als Dichte des Wassers. Um die relative Mächtigkeit S_r zu erhalten, muss der absolute Wert der Mächtigkeit durch die Referenzwassertiefe h_{ref} geteilt werden.

Die Referenzwassertiefe ist eine sehr wichtige Grösse in der Generierung der Impulswelle und hat erheblichen Einfluss auf die Wellenamplitude des Tsunamis. Die Referenzwassertiefe muss genügend tief sein (mind. 10-mal grösser als die maximalen Wellenamplituden $a_{1,2}$), da ansonsten die Gültigkeit der Flachwassergleichungen nicht gegeben ist, resp. die physikalischen Prozesse bei der Wellenausbreitung nicht korrekt abgebildet werden. Es sind eventuell Iterationen notwendig, um h_{ref} zu bestimmen, da am Anfang der hier beschriebenen Berechnungen die maximalen Wellenamplituden nicht bekannt sind. Es müssen bei der Bestimmung einer korrekten Referenzwassertiefe beide Wellenamplituden berücksichtigt werden, d.h. für die maximalen Wellenamplituden der ersten und zweiten Welle muss die oben genannte Bedingung ($\epsilon = a_{1,2}/h_{ref} \leq 0.1$) erfüllt sein. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass die Wassertiefe in unmittelbarer Umgebung der Referenzwassertiefe mehr oder weniger konstant ist, d.h. die Stelle sollte nicht an einem Unterwasserhang liegen. Dafür sollte eine bathymetrischen Karte während der Berechnung hinzugezogen werden.

3.2.3 Berechnungen für die Welleneingabe

P wird dann benutzt, um die maximale Amplitude der Welle unmittelbar hinter dem Bereich, in dem die bewegte Masse eintaucht, abzuschätzen.

$$a_1 = 0.2 P^{\frac{1}{2}} B_r^{\frac{3}{4}} \left(\cos\left(\frac{6}{7}\alpha\right) \right)^{\frac{1}{4}} h_{ref} \quad (3.2)$$

$$a_2 = 0.14 \left(P B_r \cos\left(\frac{6}{7}\alpha\right) \right)^{\frac{1}{4}} h_{ref} \quad (3.3)$$

können die maximale Amplituden der ersten (a_1) und zweiten generierten Welle (a_2) empirisch beschrieben werden ([Evers et al., 2019b](#)). In diesen Gleichungen beschreibt B_r die relative Breite der bewegten Masse (Breite b/h_{ref}). Die Wellenamplituden reagieren sensibel auf die Breite b , weshalb es wichtig ist, diese während der Vorarbeiten besonders sorgfältig abzuschätzen. Für den weiteren Verlauf der Berechnungen nehmen wir an, dass die Wellenamplitude in jeder Ausbreitungsrichtung dieselbe ist. Die Amplitude der ersten, respektive der zweiten Welle kann anschliessend dafür verwendet werden, die Wellengeschwindigkeiten ($c_{1,2}$) zu ermitteln:

$$c_1 = 0.95(1 + a_1)^{0.5} (gh_{ref})^{0.5} \quad (3.4)$$

$$c_2 = 0.7(1 + a_2)^{0.5} (gh_{ref})^{0.5} \quad (3.5)$$

Im Folgenden berechnet man mithilfe der zuvor ermittelten maximalen Amplituden und Wellengeschwindigkeiten die Wellenhöhe in Abhängigkeit von der Zeit, d.h. die Wellenform. Dazu benutzt man die Korteweg-de-Vries (KdV) Gleichung (Gl. 3.7), für die eine Lösung für Solitärwellen existiert (Lo et al., 2013). Die Benutzung der KdV-Gleichung impliziert, dass wir die Tsunami-Wellen als Soliton beschreiben.

Die Lösung für einen Soliton mit der KdV-Gleichung (Goring and Raichlen, 1978) folgt

$$\eta(t) = a_{1,2} \cdot \operatorname{sech}^2(\kappa(x_{compl} - t \cdot c_{1,2})) \quad (3.6)$$

$$q(t) = h_{ref} \cdot \eta(t) \cdot \sqrt{g/h_{ref}} \quad (3.7)$$

wobei x_{compl} die notwendige Distanz ist, um eine vollständige Welle zu beschreiben. Damit eine vollständige Welle indiziert wird, muss ausserdem die Zeitperiode t lang genug gewählt werden, so dass die Wellenhöhe von 0 m auf die maximale Amplitude und dann wieder bis auf 0 m sinken kann.

Schlussendlich braucht man noch den Parameter κ , welcher sich aus der folgenden Gleichung ergibt (Goring and Raichlen, 1978):

$$\kappa = \sqrt{\frac{3}{4} \frac{a_{1,2}}{h_{ref}^3}}. \quad (3.8)$$

Als letzter Schritt, werden Wellenhöhen und die absolute Höhe des Seespiegels (m ü. M. oder NN, je nach Koordinatensystem) addiert. Die beiden resultierenden Datenreihen ($q(t)$ und $\eta(t)$) werden als Startbedingung bei der Simulation benutzt.

Merke!

1. Für die Tsunami-Generierung aufgrund von TERM braucht man

- F Froude-Zahl des Gesteins
- S_r relative Mächtigkeit
- M_r relative Masse
- B_r relative Breite, sorgfältig abschätzen!
- α Eintreffwinkel

Damit werden **Impulsproduktparameter** P und folgend **maximale Amplituden** a_1, a_2 und **Wellengeschwindigkeiten** $c_{1,2}$ der 1. und 2. Welle ausgerechnet. Diese Parameter werden für die Berechnung der **Wellenhöhe** $\eta(t)$ und des **Durchflusses** $q(t)$ gebraucht.

2. Die **Referenzwassertiefe** h_{ref} muss genügend tief gewählt werden, mindestens 10-mal grösser als die maximale Wellenamplitude. Die Randbedingung muss deswegen weit genug draussen im See angesetzt werden und an einem Ort gewählt werden, an dem sich die Wassertiefe nicht stark ändert (kein Hang).
3. Es ist ein **iterativer Prozess**, um eine **Distanz** x_{compl} und **Zeitperiode** t zu finden, die zusammen eine vollständige Solitärwelle beschreiben.
4. Die berechneten Werte unterliegen aufgrund ihrer Grundlage mehr oder weniger grossen Unsicherheiten. Daher empfiehlt es sich Unsicherheitsbereiche zu definieren und eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen.

3.3 Spezifische Daten für SAQM

Für die Simulation von SAQM Tsunamis ist zusätzlich zum Geländemodell die **Mächtigkeit, Lage und Ausdehnung der erwarteten Massenbewegung** erforderlich. Allerdings stellt die Abschätzung dieser Parameter aufgrund der Lage unter Wasser eine grosse Herausforderung dar (z.B. Harbitz et al., 2014). Da nicht immer geophysikalische und/oder sedimentologische Messungen

gemacht werden können, gibt es einige alternative Ansätze, um die Grösse und Verteilung von SAQM zu definieren. Unabhängig von der genutzten Technik gibt es bei jeder Abschätzung oder Messung Unsicherheiten. Diese werden idealerweise mit einer Sensitivitätsanalyse berücksichtigt.

Es wird hier auf eine existierende [Datenbank Grundlagen SAQM](#) verwiesen, welche im Zuge des Tsunami-CH Projekts erstellt wurde. Sie fasst die Örtlichkeiten vorhandener gesammelter Daten aus vorherigen Forschungsarbeiten in Schweizer Seen, die im Rahmen einer Tsunamimodellierung verwendet werden können, zusammen. In der Datenbank werden diejenigen Schweizer Seen mit einer untersuchten Tsunamiprädisposition aus [Strupler et al. \(2020a,c\)](#) berücksichtigt und die Datenbank wird durch eine zusammenfassende Tabelle beschrieben. Ausserdem ist für jeden See eine Karte mit den gegebenen Örtlichkeiten der gesammelten Daten und Tabellen mit den entsprechenden Koordinaten vorhanden. Die vorhandenen Datenarten werden für jeden See aufgelistet und die Lokalisierung der Datenpunkte werden in einem QGIS Projekt zusammengefasst. Die Datenbank liefert also nicht die Rohdaten. Die berücksichtigten Daten umfassen 1) hochauflösende seismische Reflexionslinien (mit einer vertikalen Auflösung von ca. 10-20 cm, hier vor allem Pinger und Sparker Daten), 2) lange Sedimentkerne (ab einer Länge von ca. 3 m), 3) cone-penetration tests (CPT) und 4) hochaufgelöste Bathymetrie (swisstopo). Die Lage der Datenpunkte und -linien sind in einem QGIS-Projekt zusammengefasst, das ebenfalls in der [Datenbank Grundlagen SAQM](#) veröffentlicht ist.

Abbildung 3.1 gibt einen Überblick der Seen, die in der [Datenbank Grundlagen SAQM](#) gelistet werden. Im Anhang A liegt die Tabelle vor (Tab. A1), welche die vorhandenen Daten für jeden See zusammenfasst. Seen in denen keine Daten bis jetzt erhoben wurden, werden hier nicht dargestellt. Die Datenbank wird laufend aktualisiert.

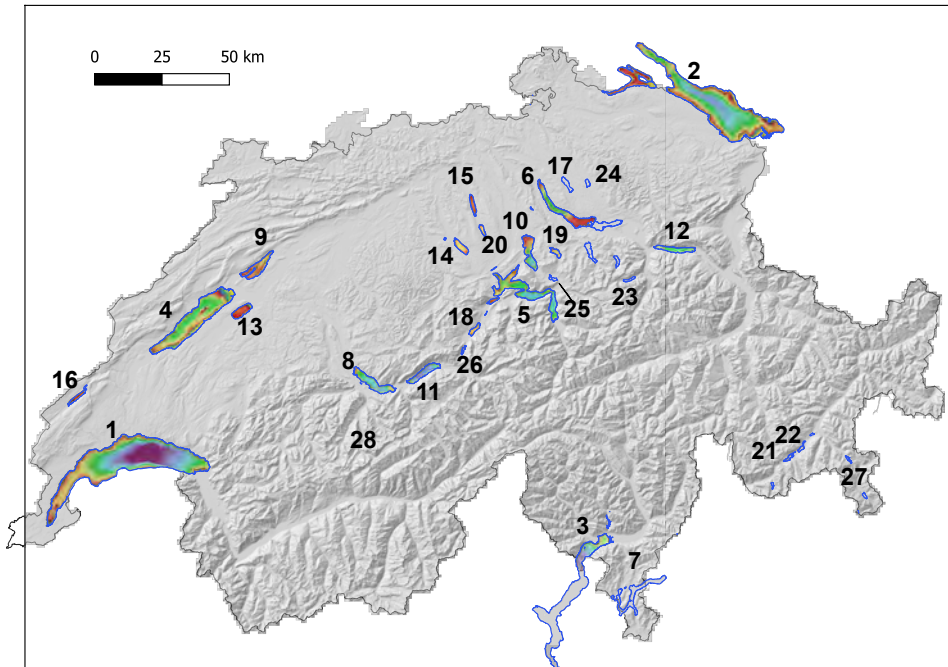


Abbildung 3.1: Übersichtskarte der in der Datenbank enthaltenen Seedatensätze. Die Nummern verweisen auf Tabelle A1 im Anhang. Die Auswahl der Seen beruht auf [Strupler et al. \(2020a,c\)](#).

In jedem Fall empfiehlt es sich in einem ersten Schritt eine geomorphologische Kartierung des Seegrundes durchzuführen, d.h. es sollte eine geomorphologische Karte vom gesamten Seebereich erstellt werden. Darauf können Spuren von vorhandenen Massenbewegungen (i.e. Anrisskanten,

Rutschflächen, Erosionsrinnen, alte Ablagerungen, ...) eingezeichnet und dokumentiert werden. Deltas sollten ebenfalls auskartiert werden. Diese Karte dient als Grundlage für eine weiterführende Analyse mit weiteren Methoden. In den nächsten Abschnitten wird auf weitere Methoden eingegangen, um SAQM ohne zusätzliche Messungen zu kartieren.

3.3.1 Disposition SAQM nicht-deltaisch

Nicht-deltaische SAQM können verschiedene natürliche und anthropogene Ursachen haben (z.B. Erdbeben, Sedimentüberlast, Wasserspiegeländerungen, Wasseraustritte aus dem Sediment, oder Bautätigkeit am Ufer). In den meisten Fällen ist eine sogenannte „Schwachsicht“ in der Sedimentabfolge vorhanden, an welcher die darüberliegenden Sedimente den Hang hinabgleiten. Die Bestimmung dieser Schwachsicht und der damit verbundenen Mächtigkeit der darüber liegenden Sedimentschichten kann mit Methoden unterschiedlicher Komplexität geschehen. Der gewünschte Detailgrad der Untersuchung und der damit verbundene Zeit- und Kostenaufwand entscheidet darüber, ob eine grobe Schnellabschätzung mit vereinfachten sediment-mechanischen Annahmen ausreicht (z.B. [Strupler et al., 2020a](#)) oder ob vertiefte Hangstabilitätsanalysen (z.B. mit Methoden der numerischen Modellierung und lokalen Messungen der sediment-mechanischen Parametern) nötig sind, um potentielle SAQM nicht-deltaisch zu identifizieren.

Einfache Grobabschätzung

Geophysikalische und sedimentologische Messungen, welche in den letzten Jahren in peri-alpinen Seen gemacht wurden ([Strasser et al., 2011](#); [Strupler et al., 2017, 2018](#); [Shynkarenko et al., 2022a,b](#)) haben gezeigt, dass nicht-deltaische SAQM hauptsächlich an Hängen mit Neigungen zwischen ca. 10 und 25° aufgetreten sind. Die Gleitfläche vieler dieser dokumentierter Massenbewegungen befindet sich in einer Schwachsicht, die aus spätglazialen Tonen besteht. Diese potenzielle Schwachsicht kann je nach Hangneigung und Wassertiefe mit einer ca. 3 bis 10 m mächtigen holozänen Sedimentdecke überlagert sein. Diese Informationen können für eine einfache Grobabschätzung genutzt werden.

Man nimmt an, dass grundsätzlich alle noch sedimentbeladenen Hänge mit Neigungen von 10 bis 25° (Zürichsee, Genfersee: 10-35°) potentielle Bereiche für Massenbewegungen darstellen, da dies bei vergangenen Ereignissen der Fall war. Unter Einbezug von bathymetrischen Informationen (z.B. der Exklusion von schon gerutschten Bereichen von einem Experten) und der Annahme von Mächtigkeiten aufgrund bisheriger Messungen können die zu erwartenden SAQM grob abgeschätzt werden.

Schnellabschätzung mithilfe von Grenzgleichgewichtsbedingungen

Eine oft verwendete etwas differenziertere Methode stellt die Abschätzung mit Grenzgleichgewichtsbedingungen unter Annahme eines infiniten Hanges (engl: Limit equilibrium equation on an infinite slope) dar, wobei die Hangstabilität mit einem Sicherheitsfaktor (FS, Gleichung 3.9) ausgedrückt wird. Ein Sicherheitsfaktor von $FS < 1$ bedeutet, dass die hangabwärts gerichteten Kräfte stärker als die zurückhaltenden Kräfte sind und ein Hang instabil ist. Umgekehrt bedeutet $FS > 1$, dass ein Hang stabil ist. Die Stabilität der Hänge hängt von der Hangneigung, Sedimentmächtigkeit, sediment-mechanischen Charakteristiken, und dem Auslösemechanismus ab. Falls die Massenbewegung durch Sedimentüberlast ausgelöst wird, kann man eine **statische Hangstabilitätsabschätzung** machen. Im Falle von externen Triggern (z.B. Erdbeben) wird eine **pseudo-statische Hangstabilitätsanalyse** durchgeführt, d.h. das Erdbeben wird als statische Kraft, welche horizontal wirkt, betrachtet ([Morgenstern and Price, 1967](#)).

In der einfachsten Form berechnet sich der (pseudo)-statische Sicherheitsfaktor für wassergesättigte, feinkörnige Sedimente zu:

$$FS = s_u \left[\left(\int_0^z \gamma' dz \right) \sin(\alpha) \cos(\alpha) + f k PGA \left(\int_0^z \gamma' + \gamma_w dz \right) \cos^2(\alpha) \right]^{-1}, \quad (3.9)$$

wobei s_u die undrainierte Scherfestigkeit ist [Pa], γ' das Gewicht unter Auftrieb des potenziell mobilen Sediments [Nm^{-3}], γ_w die Wichte des Wassers [Nm^{-3}], α die Hangneigung, g die Erdbeschleunigung (9.81 m/s^2) und PGA die Spitzen-Bodenbeschleunigung („peak ground acceleration“). PGA wird in dieser Gleichung in Abhängigkeit von g benutzt (Einheit ist $[g]$). Es kann auch vorkommen, dass die Bodenbeschleunigung PGA in $[m/s^2]$ angegeben wird (wie in Tabelle 3.2). Dann muss man PGA zusätzlich durch die Erdbeschleunigung g in der oben genannten Gleichung dividieren. k ist der pseudostatische Koeffizient, welcher oft zwischen 0.05 und 0.5 variiert (z.B. (Melo and Sharma, 2004, und Referenzen darin)). Für statische Analysen ist $k=0$. Der Verstärkungsfaktor f kann innerhalb eines Sees variieren sowie von See zu See und sollte von Expert:Innen gewählt und allenfalls getestet werden, um zu sehen wie gross der Einfluss auf FS ist. Es empfiehlt sich, das Produkt aus fk im Bereich von 0.5 bis 1 zu wählen. Dies ist konsistent mit Strupler et al. (2017) und Shynkarenko et al. (2023), sowie mit der Annahme für andere physikalische Parameter von lakustrinen Sedimenten in der Grenzgleichgewichtsgleichung (Dichte und undrainierte Scherfestigkeit).

Die Erhebung der undrainierten Scherfestigkeit ist aufwändig und es existieren bis jetzt nur Messwerte für die lateralen Hänge des Zürich- und Vierwaldstättersee (siehe Datenbank Grundlagen SAQM). Geht man davon aus, dass die Stratigraphie und geotechnischen Eigenschaften von den bisher untersuchten peri-alpinen Seen sehr ähnlich sind, können diese Werte auch für andere (Schweizer) peri-alpine Seen unter Vorbehalt verwendet werden.

Strupler et al. (2020a) folgend, können unter der erwähnten stark vereinfachten Annahme, dass alle peri-alpinen Seen in der Schweiz dieselben geotechnischen Charakteristiken aufweisen, folgende Daten für eine Schnellabschätzung genutzt werden: **Schüttdichten von ca. 1300 kg/m^3 am Seeboden, welche zu ca. 1600 kg/m^3 an der Basis der potentiell mobilen Sedimente ansteigen, und undrainierte Scherfestigkeiten an der potentiellen Gleitfläche von ca. 8 kPa .** Schüttdichten und Scherfestigkeiten sind in der Gleichung Faktoren, die aufgrund der vereinfachten Annahmen für die untersuchten Hänge gleich sind.

Folglich werden für die Abschätzung der Hangstabilitäten mittels Gleichung 3.9 noch die Angaben zur Hangneigung, zur Mächtigkeit der potentiell mobilen Sedimente, sowie Angaben zur erwarteten Bodenbeschleunigung als Eingabegrößen benötigt. Hangneigungen können mithilfe eines Geländemodells direkt in einem GIS-Programm berechnet werden und liegen für jeden Punkt im Modell vor. Die Bodenbeschleunigung kann aus dem Seismic Hazard Model «SuiHaz15» (Wiemer et al., 2016) verwendet werden. Sie muss aus Punktdaten interpoliert werden, um im gesamten Modellgebiet Daten zu haben. Die potenziell mobile Sedimentmächtigkeit über der Schwachschicht kann mit einem linearen Sedimentationsmodell, welches am Zürichsee kalibriert wurde (Strupler et al., 2018), als Funktion von der Wassertiefe d_w und Hangneigung α abgeschätzt werden. Die Sedimentmächtigkeit M_{sed} kann mit Gleichung 3.10 gemäss Strupler et al. (2020a) für jeden einzelnen Sedimenttyp S berechnet werden, wobei a, b, c empirisch bestimmte Koeffizienten sind und Δt die Akkumulationszeit der Sedimente in Jahren ist.

$$M_{sed}(S) = \Delta t 0.01 a(x, y) + b d_w(x, y) - c \alpha(x, y) \quad (3.10)$$

Ausgehend davon, dass die Sedimentationsabfolge in Schweizer Seen immer annähernd demselben Schema folgt, können näherungsweise folgende Werte in Gleichung 3.10 benutzt werden (Tab. 3.1): Die Berechnungen dazu können extern (z.B. Python, R) oder ebenfalls direkt in einem GIS-

Sedimenttyp S	Akkumulationszeit Δt [Jahre]	Koeffizient a	Koeffizient b	Koeffizient c
Unterer/ältere holozäne Sedimentschicht	5000	0.047	0.000175	0.001305
Obere/jüngere holozäne Sedimentschicht	7000	0.021	0.000104	0.000654

Tabelle 3.1: Werte für das lineare Sedimentationsmodell (Strupler et al., 2020a).

Programm gemacht werden. Es ist ratsam, das Sedimentationsmodell, wenn möglich, für spezifische Seen (vorallem wo viel detritischer Sedimentinput erwartet wird) anzupassen. Idealerweise werden dazu Informationen von Sedimentkernen mit seismischen Daten korreliert und daraus Sedimentationsraten an den Hängen abgeleitet. Es liegt in der Hand der bearbeitenden Expert:Innen, hier beispielhaft gezeigte Werte und Parameterkombinationen allenfalls anzupassen und/oder andere Methoden zur Kartierung der SAQM zu nutzen.

Tabelle 3.2 schlägt verschiedene Kombinationen von Bodenbeschleunigung PGA (muss durch g dividiert werden, um in Abhängigkeit von g , resp. in Einheit g dargestellt zu werden), Hangneigung und Sedimentmächtigkeit vor (Strupler et al., 2020a), welche grundsätzlich in einem Sicherheitsfaktor $FS < 1$ resultieren (unter der Berücksichtigung der oben erwähnten Schüttdichten und Scherfestigkeiten), d.h. die Hänge sind potentiell instabil, wenn diese Kombinationen vorliegen.

max. Bodenbeschleunigung (PGA) [m/s^2]	Hangneigung [$^\circ$]	Mächtigkeit [m]
0.0-0.1	5-10	8
	10-15	6
	15-25	5
0.1-0.2	5-10	7
	10-20	5
	20-25	4
0.2-0.3	5-10	6
	10-15	5
	15-25	4
0.3-0.4	5-10	5
	10-25	4
0.4-0.5	5-15	4
	15-25	3
0.5-0.6	5-10	4
	10-25	3
0.6-0.9	10-25	3
0.9-1.0	5-20	3
	20-25	2
1.0-1.1	5-10	3
	10-25	2
1.1-2.0	5-25	1

Tabelle 3.2: Werte für bestimmte Kombination von Bodenbeschleunigung, Hangneigung und Mächtigkeit, die unter Annahme der sediment-mechanischen Eigenschaften von Strupler et al. (2020a) zu einem potentiell instabilen Hang, für den $FS < 1$ ist, führen.

Es sollten alle potentiell instabilen Hangbereiche (z.B. ausgedrückt als $FS < 1$) in einem

GIS-Projekt eingezeichnet werden, respektive falls eine andere Methode zur Kartierung genutzt wurde, die ermittelten potentiellen SAQM derer. Dies stellt dann die Dispositionskarte für SAQM nicht-deltaisch dar. Jedoch ist es wichtig, sich bewusst zu sein, dass die Schnellabschätzung davon ausgeht, dass alle Hänge im zu untersuchenden See noch ungerutscht sind. Es müssen daher bereits gerutschte Zonen in der Bathymetrie/geomorphologischen Karte identifiziert und allenfalls ausgeschlossen werden (Expertenwissen). Auch eine Sensitivitätsanalyse der Stabilitätsberechnung ist eine potentielle Möglichkeit, um präzisere Aussagen treffen zu können. Entsprechend sollte die Dispositionskarte angepasst werden.

Merke!

Es gibt verschiedene Ansätze, um Bereiche potentieller SAQM nicht-deltaisch zu kartieren. Eine Variante ist die **Abschätzung mit Grenzgleichgewichtsgleichungen** unter Annahme eines infiniten Hanges (engl: Limit equilibrium equation on an infinite slope). Dazu benötigt man:

- Schüttdichte am Seeboden
- undrainierte Scherfestigkeiten
- Hangneigung
- Mächtigkeit der potentiell mobilen Sedimentschicht
- Bodenbeschleunigung z.B. Peak ground acceleration (*PGA*)

Unabhängig von der Kartierungsart, sollten Unsicherheiten im Bezug auf die SAQM-Parameter berücksichtigt werden.

3.3.2 Disposition SAQM deltaisch

Es wird angenommen, dass die Prozesse einer SAQM deltaisch ähnlich sind wie bei einer SAQM nicht-deltaisch und werden daher gleich modelliert (vgl. Abschnitt 2.3). Dies bedeutet, dass für die Simulation von Tsunamis durch SAQM deltaisch ebenfalls die **Mächtigkeit, Lage und Ausdehnung der potentiellen Massenbewegung** erforderlich sind. Im Gegensatz zu nicht-deltaischen SAQM, bei denen die Gleitfläche und aufgrund dessen die Mächtigkeit der potentiellen Massenbewegung besser abgeschätzt werden können, sind bei einer deltaischen SAQM viel grössere Unsicherheiten in der Mächtigkeit vorhanden. Daher sollten bei der Simulation die Sensitivität bezüglich der Mächtigkeit ausgewiesen werden.

Die Kartierung von SAQM deltaisch ist nicht mithilfe einer Schnellabschätzung möglich, da keine Sedimentationsmodelle für diese Art von Massenbewegungen vorliegen. Es steht jedoch eine [Datenbank Deltatyp](#) mit Deltatypen zur Identifizierung potenzieller SAQM deltaisch zur Verfügung. Für deren Erstellung wurden Schweizer Seen mit einer Fläche von mindestens $> 1 \text{ km}^2$ berücksichtigt, für die hochauflösende Bathymetriedaten (SWSSBATHY 3D) vorliegen. In der Datenbank Deltatyp wurden die SAQM deltaisch erfasst, die mit im Gewässernetz der Schweiz identifizierbaren Flüssen verbunden sind und in der hochauflösenden Bathymetrie morphologische Strukturen und Merkmale aktiver Deltas aufweisen (z. B. Sedimentwellen, Canyons). Die Delta-regionen werden in zwei Typen unterteilt: Typ 2, der im Allgemeinen ein geringes Potenzial für Massenbewegungen aufweist, und Typ 1, der eher mit Massenbewegungen größeren Ausmaßes in Verbindung gebracht wird. Die Datenbank enthält die abgegrenzten Deltaregionen, ihre Einteilung in die Typen 1 und 2 sowie die zur morphologischen Charakterisierung verwendeten Profile. Die [Datenbank Deltatyp](#) beinhaltet Shapefiles, mit schon ausgewiesenen Gebieten der beiden Deltatypen, welche direkt für die Kartierung, Erstellung der Dispositionskarten und Szenarienbildung übernommen werden können.

Merke!

Für die Generierung für Tsunamis aufgrund von SAQM (deltaisch und nicht-deltaisch) braucht man Information zur:

1. Lage
2. Mächtigkeit
3. Ausdehnung der sich potentiell bewegenden Bereiche

3.4 Dispositionskarte

Die Dispositionskarte ergibt sich aus allen kartierten SAQM nicht-deltaisch, den SAQM deltaisich Typ 1 aus der [Datenbank Deltatyp](#) sowie den ausgewiesenen Bereichen von potentiellen TERM. Diese sollten alle in ein GIS-Projekt zusammengefasst werden, was folglich als Ausgangslage für die Szenarienbildung dient.

3.4.1 Vergangene Ereignisse

Mithilfe einer rein manuellen Herangehensweise können auch schon vergangene Ereignisse kartiert und später simuliert werden. Solche Ereignisse können manuell zur Dispositionskarte hinzugefügt werden. Dies kann zur Validierung des Modells besonders sinnvoll sein.

Kapitel 4

Szenarienbildung

Die Szenarienbildung beinhaltet die Auswahl und allfällige Gruppierung von potentiell instabilen Hängen und die Kombination von TERM und SAQM mit dem Ziel, die für die Gefahrenbeurteilung massgebenden Szenarien sowie erweiternde Szenarien zu definieren.

4.1 Grundszenarien

Zu Beginn werden die Auslösemechanismen separat behandelt, um die vorliegende Situation kennen zu lernen und die Auswirkungen der jeweiligen Auslösemechanismen vergleichen zu können. Die Auswahl der SAQM/TERM basiert auf der Dispositionskarte, die das Ergebnis der Kartierung der deltaischen und nicht-deltaischen SAQM und der TERM ist. In Abhängigkeit davon mit welcher Methode kartiert wurde (Grobabschätzung oder Schnellabschätzung oder sonstige Methode), sieht diese anders aus. Es sollten folgende Szenarien simuliert werden:

- jeweils die grösste, kartierte deltaische und nicht-deltaische SAQM
- falls vorhanden: Gruppierungen von jeweils 2-4 SAQM nicht-deltaisch, die nah beieinander liegen
- falls vorhanden: auf jeder Seite des Sees (N,S,W,O) je eine SAQM deltaisch und nicht-deltaisch
- jeweils alle vorhandenen TERM einzeln, falls sehr viele: gleiches Vorgehen wie oben bei SAQM

Mithilfe dieser Grundszenarien kann der/die Projektbearbeiter/in einen Eindruck bekommen, welches für die vorliegende Situation die massgebenden Szenarien sein können, resp. wie schnell die Wellen sich ausbreiten (Laufzeit und Ankunftszeit am Ufer) und zu welcher Überschwemmung sie jeweils führen.

4.2 Erweiterte Szenarien

Basierend auf den Grundszenarien und den gewonnenen Erfahrungen können nun erweiterte Szenarien definiert werden, bei denen jeweils mehrere massgebende SAQM und/oder TERM ausgewählt werden. Es muss nun nicht wie bei den Grundszenarien zwingend die grösste SAQM gewählt werden, sondern diejenige(n), die am ehesten zusammen auftreten resp. den grössten Einfluss auf die Überflutung haben werden. Dies ist für jeden See höchst individuell und basiert stark auf der erarbeiteten Dispositionskarte (die aufgrund der Kartierungsmethode jeweils anders aussehen kann) und dem erarbeiteten Wissen durch die Grundszenarienbildung. Falls historische Ereignisse z. B. bestimmte Regionen um den See besonders anfällig für TERM und /oder SAQM erscheinen lassen, so können dort gruppierte SAQM/TERM als Szenarien sinnvoll sein.

Des Weiteren sollte bei den erweiterten Szenarien auf jeden Fall die Annahme des Auftretens eines starken Erdbebens berücksichtigt werden (falls dies bei den Grundszenarien noch nicht geschehen ist). Dies betrifft die SAQM nicht-deltaisch folgendermassen: es muss zwingend eine Kartierungsmethode genutzt werden, die die Erdbebenwiederkehrperiode berücksichtigt. Folgend der vorgestellten Methode in diesem Handbuch wäre das die Schnellabschätzung mittels Grenzgleichgewichtsgleichungen. Für die SAQM deltaisch gibt es bisher noch keinen Ansatz, welcher zwischen einer spontanen oder Erdbeben-induzierten Kartierung unterscheidet. Deswegen wird für die Szenarienbildung einfacherhalber angenommen, dass bei einem Erdbeben alle SAQM deltaisch gleichzeitig rutschen. Es gibt keine Unterscheidung in der Erdbebenwiederkehrperiode bei SAQM deltaisch. Für TERM sollte der/die Gutachter/in allenfalls Angaben machen, in wie weit ein Erdbeben Einfluss haben könnte. Falls es keine Angaben dazu gibt, wird davon ausgegangen, dass alle potentiellen TERM Erdbeben-induziert sein können und es gibt keine Unterscheidung in der Erdbebenwiederkehrperiode.

- alle massgebende(n) SAQM nicht-deltaisch zusammen (je für 475 und 2475 Jahre)
- alle massgebende(n) SAQM deltaisch zusammen
- alle massgebende(n) SAQM nicht-deltaisch (je für 475 und 2475 Jahre) und TERM zusammen
- alle massgebende(n) SAQM deltaisch und nicht-deltaisch (je für 475 und 2475 Jahre) zusammen
- alle massgebenden Massenbewegungen (je für 475 und 2475 Jahre) zusammen.

Es sollte bei den Ergebnissen darauf hingewiesen werden, welche Art von Kartierung und Szenarienbildung schlussendlich benutzt wurde.

4.3 Weitere Faktoren in der Szenarienbildung

Ein weiterer Faktor, der bei der Szenarienbildung berücksichtigt werden sollte, ist der Einfluss des absoluten Seespiegels. Unter Umständen sollten unterschiedliche Seestände simuliert werden, die Hochwasser oder Niedrigwasser berücksichtigen, da das Zusammenspiel von Uferbefestigung resp. der Uferneigung, von Wellen und dem jeweiligen Seestand zu unterschiedlich starker Überflutung führen kann. Weiterhin ist es wichtig, andere Randbedingungen, wie Wehre und Zu- und Abflüsse von Flüssen zu berücksichtigen. Dabei sollte beachtet werden, dass die Strömung eines kleinen Flusses in einem grossräumigen Delta tendenziell eher vernachlässigbar ist, während die Strömung eines relativ gesehen grossen Flusses in einem kleinen Deltabereich einen Einfluss haben kann. Daher kann es sinnvoll sein, Flüsse im Modell entweder als Randbedingung mit durchschnittlichem Zu- oder Abfluss zu berücksichtigen, oder die Uferlinie und Modellgrenze so zu setzen, dass die Flussmündung oder der Flussursprung nicht direkt mit der Modellgrenze abschliesst.

Kapitel 5

Wirkungsanalyse

In diesem Kapitel werden die vor der Simulation notwendigen Arbeitsschritte beschrieben. Darunter fallen eine adäquate Auswahl des Modellperimeters sowie der Ausdehnung des Uferbereichs und die Informationen zu etwaigen Randbedingungen. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, braucht es **topographische und bathymetrische Daten** welche den Modellperimeter abdecken. Des Weiteren sind die kartierten, potentiellen Bereiche der SAQM (Kap. 3.3) und die Lage und Eigenschaften der TERM (Kap. 3.2) wichtig. Zusammenfassend gehören folgenden Schritte zur Simulationsvorbereitung:

1. Definition des Untersuchungsgebiets und Erstellung eines dazugehörigen Rasterdatensatzes mit topographischen und bathymetrischen Höhenwerten (digitales Geländemodell), Berücksichtigung von Gebäuden (je nach detailgrad der Analyse) und Definition von etwaigen Randbedingungen (Zu- und Abfluss, Wehre, ...)
2. Definition der inneren Randbedingungen für TERM
3. Definition von Bereichen mit potentiellen Massenbewegungen
4. Erstellung von Berechnungsgittern, welche die Informationen aus den obigen Punkten enthalten und als Grundlage für die Simulationen dienen.

5.1 Simulationsvorbereitung

5.1.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet wird durch die Modellgrenze definiert und sollte so festgelegt werden, dass mindestens der überflutungsgefährdete Bereich abdeckt wird, d.h. alle flachen Uferbereiche. Aus dem Geländemodell, oder einem vorhandenen Datensatz wie [swissTLM3D](#), kann eine Uferlinie vom See abgeleitet werden. Beim Übergang zwischen den unterschiedlichen Höhenmodellen sowie der Bathymetrie kann es sein, dass überlappende oder Bereiche ohne Daten auftreten, die manuell interpoliert werden müssen. Des Weiteren kann es an der Schnittstelle zwischen Bathymetrie und Höhenmodell die Notwendigkeit geben, manuell die Bathymetrie des Flusses darzustellen, da die Höhenmodelle nur die Oberfläche, aber nicht das Flussbett widerspiegeln. Zusätzlich muss die Modellgrenze festgelegt werden (Abb. 5.1). Für die Simulation ist es notwendig, dass alle Randbedingungen und Modellgrenzen geschlossen sind, d.h. es dürfen keinerlei Lücken/Löcher o.ä. im Gitter sein. Damit der Uferbereich genauer abgebildet werden kann, empfiehlt es sich, die Elemente dort kleiner zu wählen als im See selber. Im Allgemeinen braucht es die folgenden Informationen, um das Berechnungsgitter zu erstellen:

- Modellgrenze
- Uferlinie
- Uferbereich/Siedlungsbereich
- Randbedingungen (Zufluss, Ausfluss, allfällige Seeregulierung, etc.)
- kartierte Bereiche der SAQM
- Gebäude (falls gewünscht)
- Rauheiten der Gebiete
- Lage der TERM-Randbedingung im See

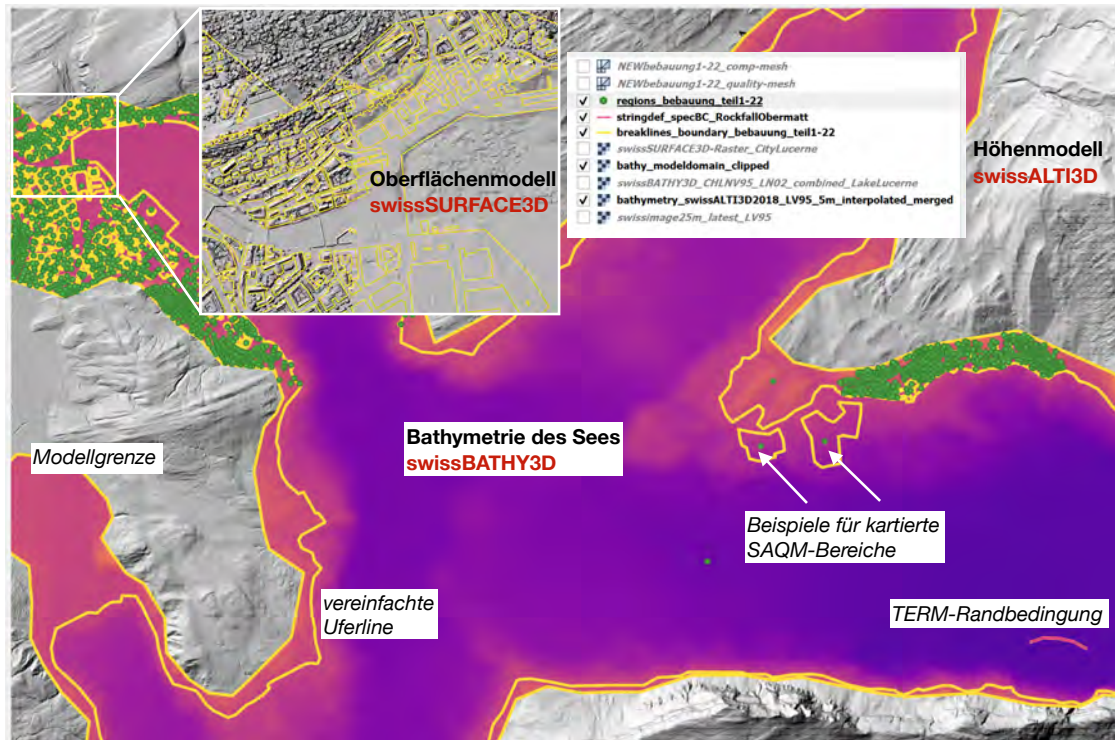


Abbildung 5.1: Die für die Erstellung des Berechnungsgitters notwendigen Elemente sind hier dargestellt. Die Grundlage bilden Daten von swisstopo zum Höhenmodell (swissALTI3D), der Bathymetrie (swissBATHY3D) und allenfalls zu Gebäuden (z.B. swissSURFACE3D, swissTLM3D) und Uferlinie (swissTLM3D). Aus diesen kann die Uferlinie des Sees und der Modellperimeter abgeleitet werden. Die Bereiche der SAQM werden entweder mit der in Kap. 3.3.1 beschriebenen Methode ermittelt oder anderweitig ermittelt (historische Ereignisse, andere Kartierungsmethode). Die innere Randbedingung (TERM-Randbedingung) für die Generierung des TERM-Tsunami befindet sich etwas vom Ufer entfernt im See (siehe Abb. 5.2).

Berücksichtigung von Gebäuden

Um die Überflutungsfläche möglichst genau abzubilden, sollte die Bebauung berücksichtigt werden. Es gibt zwei Ansätze, um den Einfluss der Gebäude einfließen zu lassen. Die einfachere Variante ist die Nutzung eines Digitalen Oberflächenmodells (z.B. swissSURFACE3D) anstatt des sonst benutzten Höhenmodells (swissALTI3D). Andernfalls können die Gebäude einzeln als Polygone in die Simulationsvorbereitung miteinbezogen werden. swissTLM3D stellt Daten (swissTLM3D_TLM_GEBAEUDE_FOOTPRINT.shp) bereit, die bei der Simulationsvorbereitung im GIS genutzt werden können, um die Bebauung in das Modell einzufügen. Der Ansatz wird [hier](#) beschrieben (angepasst auf eine Nutzung der hydrodynamischen Simulationssoftware BASEMENT). Im Zusammenspiel mit den swissTLM3D-Daten muss dann das digitale Höhenmodell und nicht das Oberflächenmodell genutzt werden.

Diese beiden unterschiedlichen Ansätze haben beide ihre Vor- und Nachteile. Während bei der Nutzung von swissTLM3D (Ausschneiden der Gebäude) die Gebäudelage und -form sehr genau

abbildet wird, sind die Gebäude in diesem Ansatz unendlich hoch. Bei der Nutzung von swissSURFACE3D werden die Gebäude wie Topographie behandelt, d.h. ihre Höhe entspricht in etwa der Realität, dadurch aber weniger genau bezüglich Lage und Form dargestellt.

Randbedingungen

Zu den Randbedingungen zählen etwaige Zuflüsse und Abflüsse oder Wehre (Seeregulierung). Wenn diese mit ihren Spezifikationen bekannt sind, können sie auch in der Modellierung berücksichtigt und bei der Gittererstellung entsprechend definiert werden.

5.1.2 Innere Randbedingung für TERM

In der Realität stürzt die bewegte Masse in den meisten Fällen unmittelbar beim Ufer ins Wasser, was aber aufgrund der Komplexität der dabei ablaufenden Prozesse und des gewählten Modellansatzes nicht exakt so modelliert werden kann (vgl. Kap. 3.2.2, 3.2.3). Deswegen ist es notwendig, den Bereich, in welcher die Massenbewegung eigentlich auftritt, ein Stück in den See hinaus zu verschieben (Abb. 5.2). Der Richtwert hierfür ist, dass das Verhältnis ϵ von der errechneten maximalen Wellenamplitude ($a_{1,2}$) zur Referenzwassertiefe (h_{ref}) gleich oder weniger 0.1 sein muss, an der Stelle wo die Tsunami-Randbedingung gesetzt wird. Dabei muss beachtet werden, dass beide Wellenamplituden die Bedingung erfüllen. Wie in Kap. 3.2 beschrieben, ist es nicht sofort ersichtlich, welche Referenzwassertiefe korrekt ist, da sie die maximale Wellenamplitude beeinflusst, welche wiederum in ϵ auftritt. Daher ist eine iterative Vorgehensweise notwendig. Weiterhin sollte beachtet werden, dass die Tsunami-Randbedingung (und damit auch die Referenzwassertiefe) möglichst nicht an einem Unterwasserhang liegt, sondern auf einer ebenen Fläche. Dafür ist das Hinzuziehen einer bathymetrischen Karte während der Berechnung sinnvoll.

Für Schweizer Seen mit meist steilen Unterwasserhängen ist es tendenziell nicht problematisch, eine genügend grosse Referenzwassertiefe zu finden. Trotzdem sollte verifiziert werden, ob das Verhältnis von Wellenamplitude zur gewählten Referenzwassertiefe die Bedingung von $\epsilon \leq 0.1$ erfüllt. Wenn dies nicht der Fall ist, kann trotzdem die Wellensimulation durchgeführt werden. Bei der Auswertung sollte dann darauf geachtet werden, dass Unsicherheiten grösser sein können. Ein weiterer Punkt ist die Ausrichtung und Form der inneren Randbedingung, an der die TERM-Welle startet: Sie sollte in der Grösse und Form in etwa einer erwarteten Welle entsprechen, d.h. eine gekrümmte *Stringdef* sollte im Gitter gezeichnet werden. Die Richtung"der *Stringdef* wird bei der Gittererstellung durch BASEMESH automatisch generiert (wie bei allen *Stringdef* in BASEMENT) und muss im Berechnungsgitter oder durch eine Test-Simulation herausgefunden werden.

Des Weiteren müssen für die TERM zwei Zeitreihen erstellt werden, die die Wellenform der Tsunamiwelle darstellen: eine Zeitreihe mit dem Verlauf der Wellenamplitude η und eine Zeitreihe mit dem Durchfluss q . Diese beiden Zeitreihen müssen für die erste und zweite Welle erstellt werden. Dazu wird zuerst der Impulsproduktparameter P berechnet und die daraus folgenden maximalen Amplituden a_1 und a_2 . Diese setzt man in die KdV-Gleichung ein und erhält die Wellenamplituden η mit der Zeit t . Für den Durchfluss q wird die errechnete Wellenamplitude mit der Referenzwassertiefe und einem weiteren Faktor multipliziert (siehe Kap. 3.2.2, 3.2.3). Dieser Ansatz wird für die erste und zweite Welle verfolgt. Details zu den Gleichungen finden sich in Kapitel 3.2.

Ein wichtiger Aspekt ist der zeitliche Abstand zwischen den beiden generierten Wellen: Generell gilt, dass der zeitliche Abstand zwischen der ersten und zweiten Welle möglichst klein sein soll. Beim Erstellen der Zeitreihen für die Wellenamplituden und Durchflüsse muss darauf geachtet werden, dass die Amplitude und der Durchfluss der ersten Welle erst Null ist bevor die zweite Welle startet.

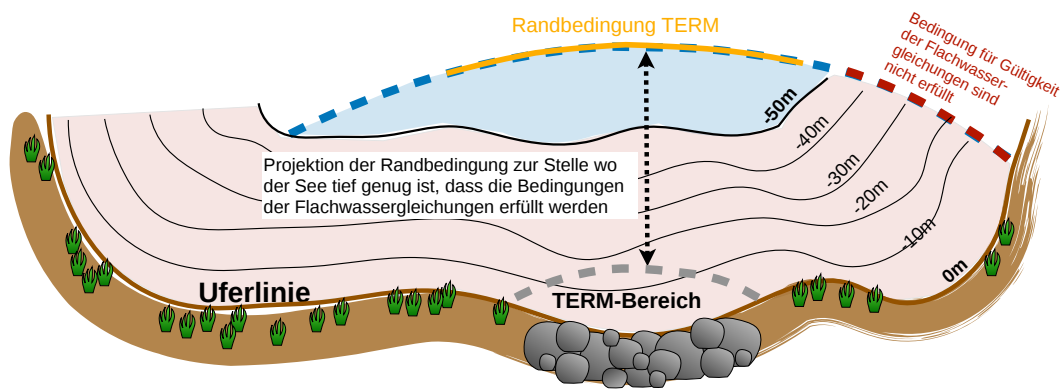


Abbildung 5.2: Verdeutlichung wie die innere Randbedingung für die Modellierung eines TERM-Tsunami definiert werden muss. Der TERM-Bereich ist der Eintauchbereich der Massenbewegung. Dort wo die gestrichelte Linie rot ist, ist die Gültigkeit der Flachwassergleichungen nicht erfüllt; ϵ ist also zu gross. Dort, wo die gestrichelte Linie blau ist, hingegen schon. Das heisst, dort kann die Randbedingung für den TERM-Tsunami gesetzt werden.

5.1.3 Bereiche für SAQM

Für diesen Fall werden die potentiellen Bereiche der SAQM im GIS-Programm mithilfe von Polylinien kartiert und als sogenannte „breaklines“ (Bruchkanten) auf einem Shapefile gespeichert (zusammen mit den „breaklines“ des Uferbereichs, Seebereichs und der Bebauung). Diese Gebiete bekommen jeweils eine *ID*, *matID*, *maxArea* und evtl. *hole* (wenn ein Teilgebiet, z.B. ein Haus, bei der Simulation ausgelassen werden soll) zugewiesen. Diese Informationen werden zum Teil bei der Simulationskonfiguration zur Referenzierung weiterverwendet (unter anderem *matID*).

5.1.4 Erzeugung von Berechnungsgittern

Für die Erzeugung von Berechnungsgittern müssen alle gesammelten Informationen zu den Massenbewegungen, Randbedingungen, der Bebauung und des allgemeinen Modellperimeters/Sees in einer Gitterdatei (.2dm-Datei) vereint werden. Zudem beinhaltet ein Berechnungsgitter Höheninformationen vom Modell und die Gitterzellengrösse. Wenn das Berechnungsgitter in QGIS erstellt wird, kann das Werkzeug BASEmesh verwendet werden, welches kompatibel mit der hier verwendeten Simulationssoftware BASEMENT ist. In Kapitel 6 wird anhand eines Beispiels die genaue Vorgehensweise der Simulationsvorbereitung erläutert.

Merke!

Für alle Simulationen braucht es:

1. Geländemodell, Höhenmodell, Oberflächenmodell (von swisstopo, GIS-lesbar)
⇒ daraus folgen: Modellgrenze, Uferbereich/Siedlungsbereich, Uferlinie
2. Randbedingungen (Zu-/Abfluss, Wehr, etc.)
3. Lage der TERM im See (falls vorhanden) + berechnete Wellenform
4. kartierte SAQM (falls vorhanden) + deren Mächtigkeit
5. alle oben genannten Features kombiniert im Berechnungsgitter als .2dm-Datei

5.2 Simulation

5.2.1 Initialmodell

Als Ausgangslage für alle weiteren Simulationen ist ein sogenanntes „Initialmodell“ zu erstellen. Bei diesem wird eine Simulation gestartet ohne jegliche Tsunami-Auslösemechanismen zu nutzen, aber eventuelle Zu- und Abflüsse und andere Randbedingungen berücksichtigt werden. Der Seespiegel sollte sich während der Simulationszeit nicht grossartig verändern, ausser dies ist zu erwarten aufgrund von Zu- und Abflüssen. Eine Wellenentstehung sollte es nicht geben. Das Initialmodell bildet die Basis für weitere Simulationen und kann angepasst werden, falls Zu- oder Abflüsse obsolet werden oder hinzukommen.

5.2.2 Gittersensitivität

Bevor man sich für das finale Berechnungsgitter entscheidet, sollten verschiedene Gitterzellengrößen und deren Auswirkung auf die Simulationsergebnisse getestet werden. Generell empfiehlt es sich, dem Uferbereich kleinere Gitterzellen als dem Seebereich zuzuordnen, damit der Überflutungsbereich genauer abgebildet werden kann, sich jedoch die Simulationszeit nicht zu stark erhöht. Der Einfluss der Gitterzellengröße sollte mehrfach getestet werden, bis der/die Projektbearbeiter/in ein Gefühl für die Veränderungen im Simulationsergebnis aufgrund der Gitterzellengröße entwickelt hat. Besonders einfach ist dies mithilfe von historischen Ereignissen zu erreichen (siehe unten). Für jede Änderung in der Gitterzellengröße muss man ein finales Berechnungsgitter erstellen (siehe [5.1.4](#)).

5.2.3 Kalibrierung und Validierung

Das aufgesetzte Modell kann allenfalls anhand von historischen Ereignissen kalibriert und validiert werden. Falls es Ereignisse gibt, die zu einem Tsunami in dem zu evaluierenden See geführt haben, können diese nachgebildet werden. Damit kann abgeschätzt werden, ob das erstellte Berechnungsgitter ausreichend viele Gitterzellen hat, um das Ereignis auf dem See und an Land genau genug nachzubilden. Andernfalls kann iterativ die Gitterzellengröße angepasst werden. Weiterhin kann erkannt werden, ob die Simulation z.B. die Mächtigkeit der Massenbewegung tendenziell eher über- oder unterschätzt (so dass eher zu grosse oder zu kleine Wellen entstehen). In diesen Teil der Vorarbeit kann auch einfließen, ob Zu- und Abflüsse die Wellenausbreitung und -grösse beeinflussen.

Zum Verständnis, und um die Wellenhöhen einordnen zu können, weisen wir darauf hin, dass eine durch TERM und eine durch eine SAQM ausgelöste Welle in etwa dieselbe Amplitude haben, solange das Volumen, Dichte und weitere spezifische Parameter der rutschenden Massenbewegung gleich oder ähnlich sind.

5.2.4 Sensitivitätsanalyse und probabilistische Modellierung

Um Unsicherheiten bei der Simulation von See-Tsunamis abzuschätzen, kann entweder eine Sensitivitätsanalyse oder eine probabilistische Modellierung durchgeführt werden. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt üblicherweise einen Trend der Ergebnisse in Abhängigkeit eines Parameters oder Modellgrösse auf, lässt aber keine generelle Bewertung der Unsicherheiten zu. Eine Sensitivitätsanalyse eignet sich gut, um die Auswirkungen von verschiedenen Szenarien miteinander zu vergleichen. Um folglich auch Unsicherheiten generell zu berücksichtigen, kann ein probabilistischer Simulationsansatz verwendet werden. Dieser besteht aus einer grossen Anzahl an Simulationen, die sich alle in einem oder mehreren Parametern unterscheiden. Als erster Schritt wird jedem Parameter, der evaluiert werden soll, eine Standardabweichung (Fehlerbereich) zugewiesen (Aufgabe

des/der Experten/in, welche/r die Massenbewegung evaluiert). Mit diesem Wissen können nun Simulationen gestartet werden, die den Mittelwert, und beliebig viele Perzentile des zu evaluierenden Parameters nutzen. Wenn mehrere Parameter einen Fehlerbereich haben, kann der Ansatz des Latin-Hypercube-Samplings (2.4.1) benutzt werden.

5.2.5 Anwendung mit der Simulationssoftware BASEMENT

Für die Simulation wird die Software BASEMENT (Vetsch et al., 2020; Vanzo et al., 2021) verwendet, welche die Flachwassergleichungen löst, um hydrodynamische Begebenheiten (z.B. See, Fluss) zu modellieren. Die Gleichungen, die während der Simulation gelöst werden, setzen voraus, dass das Verhältnis der durchschnittlichen (Referenz-)Wassertiefe h_{ref} zur Wellenlänge des Tsunamis $\lambda << 1$ ist. Dies bedeutet, dass die Wassertiefe kleiner als die typische Wellenlänge sein muss.

In den folgenden Abschnitten wird nur beschrieben, welche Besonderheiten bei BASEMENT für die Tsunami-Generierung berücksichtigt werden müssen. Für weitere Details zur Anwendung von BASEMENT wird auf das [Benutzerhandbuch](#) verwiesen. Zudem wird in Kapitel 6 anhand eines Beispiels Schritt für Schritt die Vorgehensweise bei der Simulation erläutert.

TERM

Speziell bei einer TERM wird vorausgesetzt, dass zwei Datenreihen vorhanden sind: eine Zeitreihe, die die Wellenform mit der Amplitude A beschreibt und eine Zeitreihe, die die Wellenform mithilfe des Durchflusses q beschreibt. Für die TERM benutzen wir eine innere Randbedingung, an der der Tsunami gestartet wird. Diese wird im BOUNDARY-Block unter INTERNAL angegeben. Die TERM-spezifische innere Randbedingung heisst *zqhydrograph_internal*. Wenn man diese auswählt, gibt es die Möglichkeit, die zwei Datenreihen (A und q) einzulesen sowie den *name* und *stringdef* der Randbedingung. Letzteres ist der Name, welcher der Randbedingung im GIS-Programm gegeben wurde. *name* bezieht sich auf den Namen, welcher bei der Namensgebung im STRINGDEF-Block der Randbedingung gegeben wurde. Nachdem das Setup fertig vorbereitet ist, wird sie per GUI oder im Terminal validiert. Wenn das Berechnungsgitter sehr gross ist, kann es mehrere Sekunden dauern, bis die Datei ausgeführt ist.

Im Anschluss wird die Simulation definiert, allenfalls Ausgabeparameter hinzugefügt oder entfernt und die Laufzeit festgelegt. Danach beginnt die eigentliche Berechnung der Wellenausbreitung mit BASEMENT. Die Simulation kann je nach Grösse des Gitters und der Art und Anzahl der benutzten Rechenkerne mehrere Stunden dauern. Als letzter Schritt muss die Resultatdatei generiert werden.

SAQM

Speziell für die SAQM wird die mittlere Mächtigkeit der Bereiche mit den potentiellen Massenbewegungen benötigt sowie natürlich die Bereiche selber. Für die SAQM wird der Block MASSMOVEMENT genutzt. Als Eingabedaten für den Block werden die *matID* der Bereiche der Massenbewegungen und deren zugehörige Mächtigkeit benötigt. Die anschliessenden Simulations-Schritte für SAQM sind identisch mit denen einer TERM (Konfiguration und Durchführen der Simulation, Generierung der Resultatdatei).

5.3 Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse

Die numerische Simulation erlaubt die Ausgabe verschiedener Tsunami-relevanter Parameter, welche als Zeitreihe oder auf Intensitätskarten dargestellt werden können. Für den Seebereich sind dabei die Wellenhöhe und -geschwindigkeit von besonderem Interesse während an Land vor allem

die Fliesstiefe, die Fliessgeschwindigkeit und die Ankunftszeit der Welle bedeutend sind. Die Simulationsergebnisse können mit geeigneter Software wie ParaView oder GIS-Programmen visualisiert werden.

Intensitätskarten sind eines der Hauptprodukte des Arbeitsablaufs zur Gefahrenerhebung durch Tsunamis. Sie geben Informationen über die Intensität der Gefährdung in einer bestimmten Region, ausgedrückt durch folgende Überschwemmungsparameter:

- h : Fliesstiefe [m]
- v : Fliessgeschwindigkeit [m/s]

Für Intensitätskarten sind dabei die Maximalwerte von h und v von besonderem Interesse. Aus diesen Parametern können die maximale Auflaufhöhe über dem Seespiegel sowie die überschwemmte Fläche abgeleitet werden. Die Multiplikation der Fliesstiefe mit der Fliessgeschwindigkeit im Quadrat ergibt den „Momentum Flux“, welcher wichtig für Schadensberechnungen ist. Auf den Intensitätskarten können die Fliesstiefen analog zu den Intensitäten, welche für Überschwemmungen verwendet werden, klassifiziert werden: schwache ($< 0.5m$), mittlere ($0.5 - 2m$) und grosse ($> 2m$) Fliesstiefe ([BAFU-Dokument-Überschwemmung](#)).

Des Weiteren können Zeitreihen mithilfe eines mit der Software BASEMENT mitgelieferten Python-Skripts erstellt werden. Das Python-Skript *BMv4GaugeExtract.py* erlaubt die Extraktion der gewünschten Überschwemmungsparameter in Abhängigkeit der Zeit an einem beliebigen Punkt im Gitter (d.h. auf der Seeoberfläche und an Land), welche als Zeitreihe visualisiert werden können. Details zur Benutzung dieses und weiterer Skripte zur Auswertung finden sich auf der ([BASEMENT-Website](#)).

Kapitel 6

Anwendungsbeispiel

In diesem Kapitel werden die einzelnen Arbeitsschritte für die Gefahrenbeurteilung im Detail anhand eines Anwendungsbeispiels für den Vierwaldstättersee aufgezeigt. Dabei werden Situations- (Datengrundlage, Szenarienbildung) und Wirkungsanalyse (Simulationsvorbereitung, Simulation, Ergebnisauswertung) berücksichtigt.

6.1 Hardware und Software Voraussetzungen

Bevor wir mit dem Anwendungsbeispiel einsteigen, geben wir einen kurzen Überblick über die technischen Voraussetzungen für die Simulationsvorbereitung und Simulation.

Die Software BASEMENT, welche an der VAW entwickelt wurde ([Vetsch et al., 2020](#), u.A.), eignet sich gut für die Modellierung von See-Tsunamis ([Nigg et al., 2021](#)). Die flexible Gitteraufteilung ermöglicht es, Modellierungen von sehr grossen Gebieten durchzuführen wobei komplexe Geometrien mit einem hohen Detailgrad abgebildet werden können. Aufgrund der speziellen Architektur der Software, welche durch eine starke Skalierung unter Verwendung von Multi-Core-CPU's oder GPU's (Prozessoren von handelsüblichen Grafikkarten) charakterisiert ist, sind die Berechnungen sehr effizient. Die Software BASEMENT ist frei verfügbar und kann auf dieser [Website](#) heruntergeladen werden. Es werden die Betriebssysteme Windows und Linux unterstützt. Mehr Informationen zur Software sind auf der [BASEMENT-Homepage](#) zu finden.

Die Software BASEMENT hat eine grafische Benutzeroberfläche (GUI), welche das Aufsetzen und Ausführen von Simulationen unterstützt, resp. die drei Dateien model.json, simulation.json und result.json erstellt. Des Weiteren wird eine Version von QGIS, die kompatibel mit BASEmesh ist, gebraucht. BASEmesh ist eine toolbox in QGIS, welche zur Erstellung des Berechnungsgitters für die Simulation mit BASEMENT verwendet wird. Informationen hierzu findet man im oben erwähnten Usermanual von BASEMENT.

Um See-Tsunamis zu simulieren, muss zwingend die neueste Version von BASEMENT verwendet werden. Ebenfalls muss die neueste Version vom QGIS-Plugin BASEmesh installiert sein. Des Weiteren wird eine Version von Python3 vorausgesetzt.

Für das Anwendungsbeispiel verwendete Hard-/Software

1. Hardware: GPU: Tesla P100-PCIE-12GB
2. Betriebssystem: Linux *Ubuntu-Jammy*
3. BASEMENT Version 4.0.1
4. QGIS Version 3.22 *Biatowieza*
5. QGIS BASEmesh Plugin Version 2.2.0
6. Python Version 3.10.12

6.2 Situationsanalyse

Wir folgen in diesem Unterkapitel dem Aufbau in Kapiteln 3.1 und 4 und zeigen Schritt für Schritt, welche Aufgaben und Überlegungen gemacht werden müssen, um zu einer erfolgreichen Szenarienbildung zu kommen.

1. Datenbeschaffung und Verortung TERM
2. Datenbeschaffung und Kartierung SAQM
3. Szenarienbildung

6.2.1 Spezifische Daten für TERM

Zu den spezifischen Arbeiten für die TERM gehören zwei Teile: die Definition der potentiellen TERM (d.h. Lage, Grösse, Dichte, ...) und das Berechnen des Impulsproduktparameters zum Erstellen der Zeitreihen von Amplitude und Durchfluss der TERM-generierten Welle. Die Definition einer potentiellen TERM ist Aufgabe eines/r Experten/in im Bereich Geologie/Hangstabilität und sollte vom bearbeitenden Büro in Auftrag gegeben werden. Dies wird deswegen nicht in diesem Anwendungsbeispiel beschrieben. Im Folgenden betrachten wir die Schritte zur Berechnung des Impulsproduktparameters und der Zeitreihen unter der Bedingung, dass Daten zu einer potentiellen TERM vorliegen. Daher benutzen wir in diesem Beispiel für eine TERM den historischen Felssturz bei Obermatt im Vierwaldstättersee (Fuchs and Boes, 2010).

Berechnung des Impulsproduktparameters P

Wie in den Kapiteln 3.2 und 5.1.2 beschrieben, muss zuerst der Impulsproduktparameter P berechnet werden. In diesem Beispiel verwenden wir Werte vom historischen Felssturz bei Obermatt (Fuchs and Boes, 2010), um P zu berechnen (Tab. 6.1). Bei einer herkömmlichen Simulation (d.h. ohne Berücksichtigung von Parameterunsicherheiten), erhält jeder Parameter einen Wert (2. Spalte aus Tabelle 6.1). Eingesetzt in Gleichung 3.1 ergibt sich ein Wert von $P = 0.0433366$, woraus gemäss Gleichungen 3.2 und 3.3 die Amplituden der ersten $a_1 = 2.65$ m und zweiten generierten Welle $a_2 = 6.88$ m errechnet werden können. Auf eine alternative Anwendung mit einem probabilistischen Ansatz wird hier nicht eingegangen. Jedoch findet sich im Anhang B ein Beispiel zur Veranschaulichung der Berechnung von P für eine probabilistische Simulation.

Berechnungen für die Welleneingabe

Nun kann mit den jeweiligen maximalen Amplituden die Höhe der Welle mit der Zeit berechnet werden. Dies geschieht für die maximale Amplitude der ersten Welle ($a_1 = 2.65$ m) und der zweiten Welle ($a_2 = 6.88$ m). Um die Wellenform zu berechnen, benutzen wir Gleichung 3.7 und setzen

Parameter	Wert	Standardabweichung	Einheit
Eintauchgeschwindigkeit v	30	6	m/s
Referenzwassertiefe h_{ref}	146	29.2	m
Eintreffwinkel α	30	6	°
Volumen V_b	5000	1000	m^3
Mächtigkeit S	5	1	m
Breite B	50	10	m
Dichte ρ_s	2000	400	kg/m^3

Tabelle 6.1: Verwendete Werte für die Berechnung des Impulsproduktparameters P . Diese Werte stammen von Fuchs and Boes (2010).

je einmal die Parameter für die erste Welle ein, und einmal für die zweite. Das Ergebnis ist die Wellenform und der Durchfluss des durch eine TERM generierten Tsunamis.

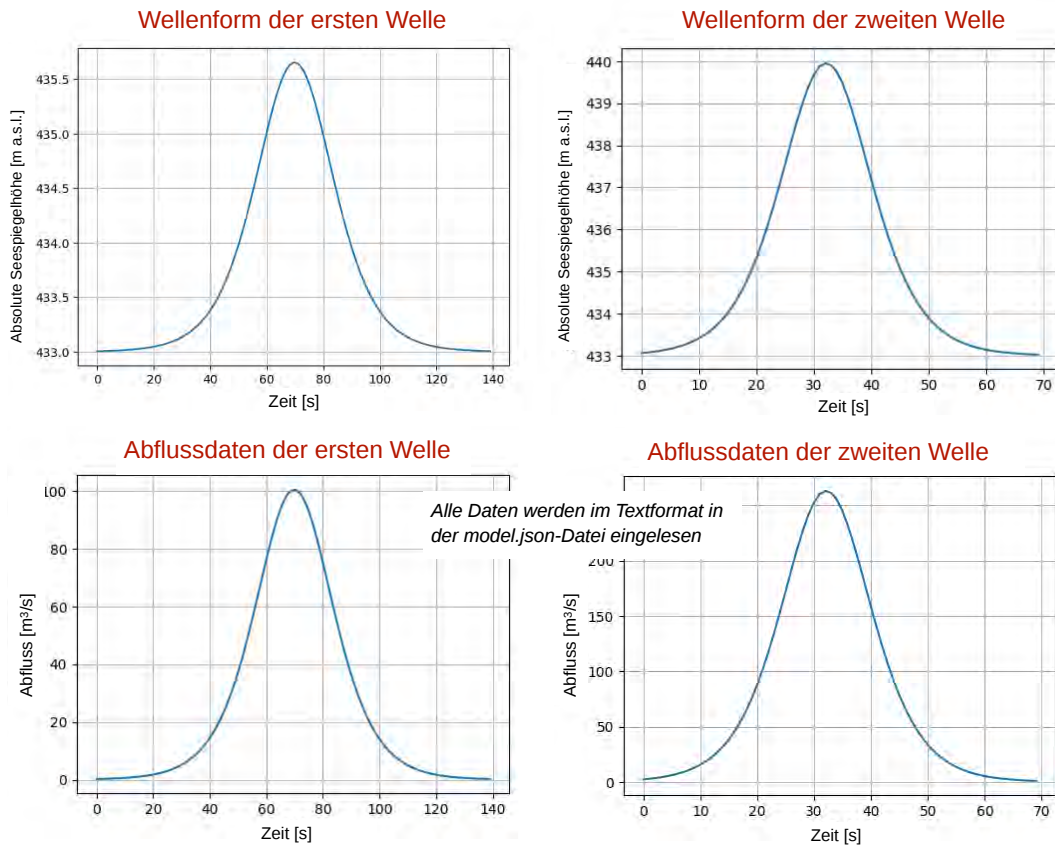


Abbildung 6.1: Höhe sowie Abfluss der ersten und zweiten Welle mit der Zeit (Wellenform einer Solitärwelle) als Ergebnis der KdV-Gleichung.

Es muss dabei darauf geachtet werden, dass zwei Variablen (die Distanz x und der Zeitraum t über den die Wellenform eingelesen wird), immer neu angepasst werden müssen. Dies bedeutet, dass für eine schmale Welle ein kleinerer Zeitraum t gewählt werden kann und trotzdem die Welle vollständig dargestellt ist. Die Distanz x hat die Eigenschaft, die Welle nach rechts (also in Richtung einer späteren Zeit) zu verschieben. Deswegen müssen beide Variablen iterativ angepasst werden. Meist sind einige Versuche notwendig, um ein Gefühl dafür zu entwickeln, wie weit sich die Welle verschiebt und wie gross der Zeitraum t gewählt werden muss, damit die Wellenform vollständig dargestellt wird. In Abbildung 6.1 sieht man beispielhaft für das oben beschriebene Beispiel die erste und zweite Welle.

Für die Simulation müssen die gezeigten Werte der Amplitude (plus die absolute Höhe des Wasserspiegels) für beide Wellen in einer Textdatei vorliegen (Abb. 6.2), damit sie in der Setup-Datei eingelesen werden können. Der Abstand der Wellenamplituden sowie der Durchflüsse zwischen den beiden Wellen ist so zu wählen, dass er möglichst klein ist, die Amplitude/Durchfluss der ersten Welle dennoch bis auf Null fällt bevor die zweite Welle beginnt (Abb. 6.2). Die Wellenform kann mithilfe der KdV-Gleichung für beliebig viele Szenarien berechnet werden, d.h. für verschiedenste Perzentile, die interessant sind. Es muss dann, wie oben erwähnt, für jedes Szenario die Distanz x und der Zeitraum t angepasst werden. Für eine schnelle Berechnung und Überprüfung der Wellenform ist ein (Python-)Skript hilfreich.

Nun sind alle notwendigen Schritte ausgeführt und die Zeitreihen mit der absoluten Wasserspiegellage (inkl. der berechneten Wellenamplituden) resp. des Durchflusses vs. Zeit vorhanden, die bei der Simulation benötigt werden.

The figure displays two side-by-side plots of seismic waveforms. Both plots have a y-axis labeled 'Amplitude [m]' and an x-axis labeled 'Zeit [s]'. The left plot shows a single waveform with a red box highlighting the first peak and a blue box highlighting the second peak. The right plot shows a similar waveform with a red box highlighting the first peak and a blue box highlighting the second peak. Both plots have a y-axis labeled 'Amplitude [m]' and an x-axis labeled 'Zeit [s]'. The left plot has a red box around the first peak and a blue box around the second peak. The right plot has a red box around the first peak and a blue box around the second peak. The left plot has a red box around the first peak and a blue box around the second peak. The right plot has a red box around the first peak and a blue box around the second peak.

Zeit [s]	Amplitude [m]
1	433.025629194522
2	433.02856033733
3	433.031824674364
4	433.035459588763
5	433.039506538623
6	433.044011472153
7	433.049025277971
8	433.054604271624
9	433.060810718947
10	433.06771339609
11	433.075388185105
12	433.08391870266
13	433.093396957804
14	433.103924032551
15	433.115610776374
16	433.128578502344
17	433.142959668506
18	433.158898523053
19	433.176551685757
20	433.196088630851

Zeit [s]	Amplitude [m]
50	435.361365705315
51	435.441376984795
52	435.510374021015
53	435.566889533682
54	435.609674556734
55	435.637755350307
56	435.650479616031
57	435.647548331279
58	435.629030572314
59	435.595360077326
60	435.547313840299

...

Zeit [s]	Amplitude [m]
113	433.022084675475
114	433.019815620302
115	433.017778907722
116	433.015950900713
117	433.0143103368
118	433.012710378247
119	433.010331561463
121	433.137972521321
122	433.166033856678
124	433.240112633838
125	433.28850092367
126	433.34638533916
127	433.415515973319
128	433.497915035328
129	433.595896345575
130	433.71207473635
131	433.849358559806
132	434.010916046166
133	434.200103443649
134	434.420340011621
135	434.674912655311

Abbildung 6.2: Ausschnitt der Textdatei, die die Wellenform des Tsunamis darstellt: Zeit in Sekunden (erste Spalte) und Höhe der ersten Welle plus die absolute Höhe des Seespiegels (zweite Spalte). Dies ist das Format, in dem die Textdatei vorliegen muss, damit sie korrekt eingelesen werden kann.

Zu den spezifischen Arbeiten für SAQM gehören die Kartierung und das Einzeichnen der potentiellen Bereiche der SAQM. Eine Möglichkeit stellen wir hier Schritt für Schritt vor.

Für das Anwendungsbeispiel haben wir potentielle SAQM im Vierwaldstättersee mit der Schnellabschätzung mithilfe der Grenzgleichgewichtsgleichungen kartiert. Zuerst betrachten wir die Bathymetrie im Vierwaldstättersee und schliessen vorläufig schon einmal bestimmte Regionen aus. Dazu gehören Deltabereiche, Bereiche, die offensichtlich schon einmal gerutscht sind (Abrisskante oder gerutschtes Material ersichtlich) und Bereiche mit Rinnen, wo Sediment direkt weiter transportiert werden kann (Abb. 6.4 b)). Expertenwissen sollte hierfür eingesetzt werden. Anschliessend werden im GIS-Programm Hangneigungen eingezeichnet, zwischen $10\text{--}25^\circ$. Dies wäre dann die sogenannte Grobabschätzung. Jedoch ist es schwierig, zusammenhängende Gebiete mithilfe dieser Grobabschätzung zu ermitteln.

die Bodenbeschleunigung (anstatt der Höheninformation) zugeordnet werden. Anschliessend wird mit dem *Elevation meshing* ein Gitter erstellt, welches die Bodenbeschleunigung aus den Punkten interpoliert. Dies wird mithilfe des Werkzeugs *Rasterize mesh dataset* zu einem .TIF transformiert. Wir haben eine Pixelsize von 100 m genommen. Damit die interpolierte Bodenbeschleunigung nur innerhalb des Sees zu sehen ist, wurde in dem Beispiel mithilfe von *Clip raster by mask layer* und der Nutzung der vereinfachten Uferlinie das Raster der Bodenbeschleunigung auf den See begrenzt.

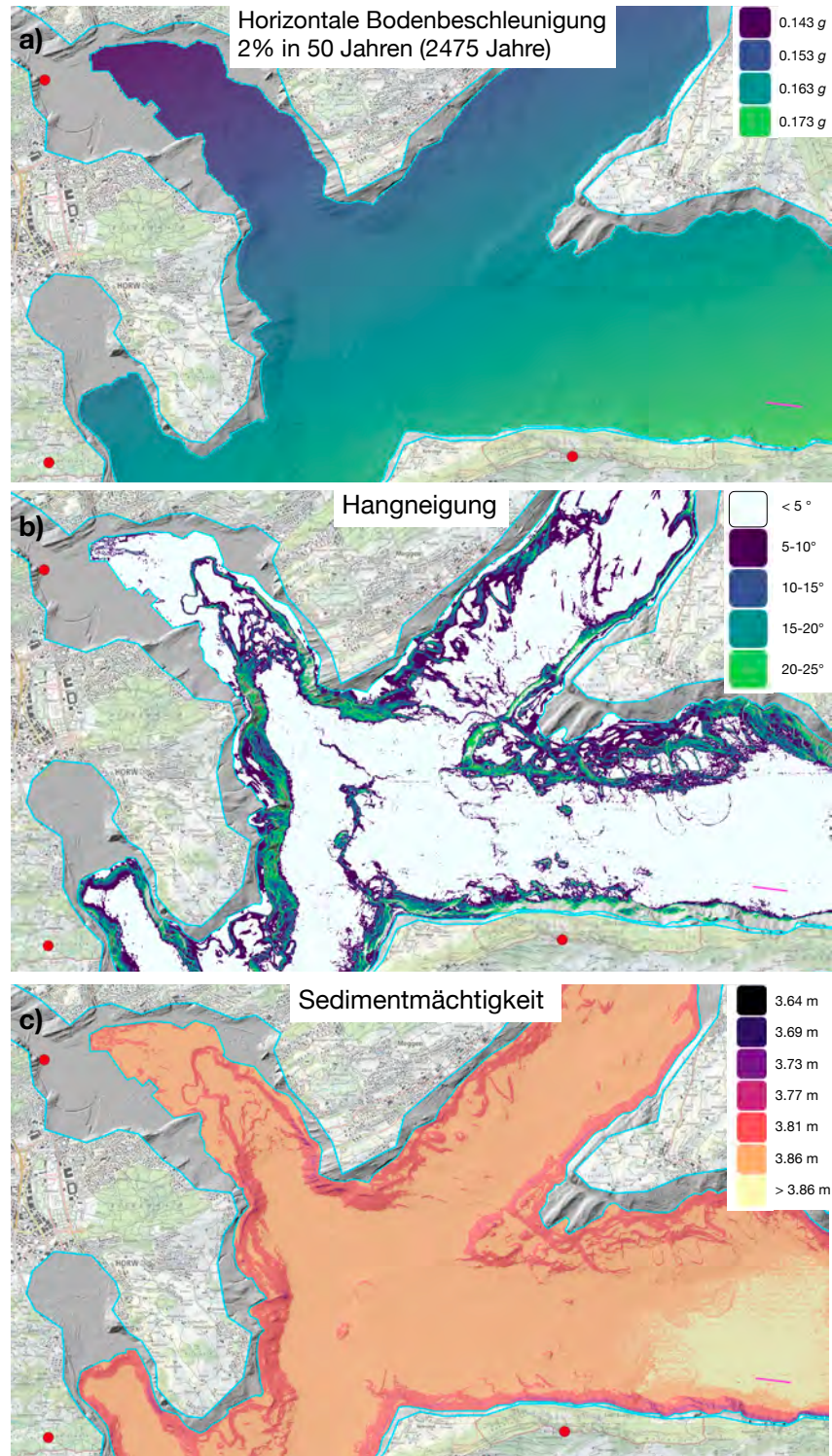


Abbildung 6.3: a) zeigt die gemittelte, horizontale Bodenbeschleunigung PGA in Bezug auf g für eine Erdbebenwiederkehrperiode von 2475 Jahren, b) die Hangneigung und c) die Sedimentmächtigkeit. Aus der Kombination dieser 3 Eigenschaften können unter Benutzung der Tabelle 3.2 Bereiche mit $FS < 1$ definiert werden.

Als nächster Schritt wird die Wassertiefe mit dem *Raster calculator* aus der Uferlinienhöhe und der Bathymetrie berechnet. Mit dem Werkzeug *Slope* kann die Hangneigung im See aus der Bathymetrie berechnet werden. Als letzter Schritt wird die Sedimentmächtigkeit mithilfe der Gleichung 3.10 und dem *Raster calculator* berechnet. Hierbei sollte beachtet werden, dass die Sedimentmächtigkeit grossen Unsicherheiten unterliegt, und es in der Verantwortung der Experten/Innen liegt, allenfalls mehrere Sedimentmächtigkeiten in den folgenden Schritten und Simulationen zu benutzen. Nun können aufgrund der Kombinationen in Tabelle 3.2 und den berechneten Daten Bereiche mit $FS < 1$ definiert werden (Abb. 6.3).

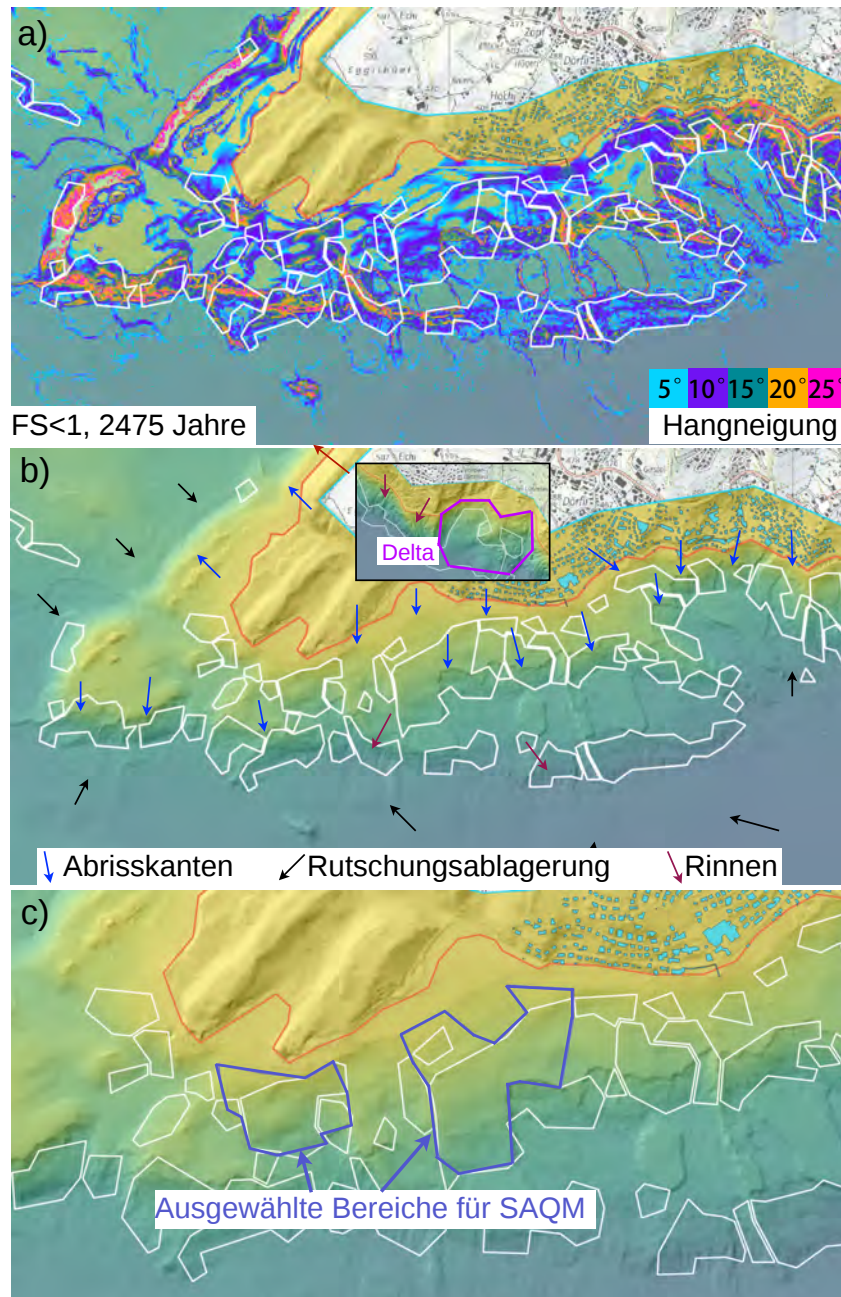


Abbildung 6.4: Im Hintergrund ist jeweils die Bathymetrie des Sees zu sehen. a) zeigt die Hangneigung im Vordergrund und weiss umrandet die Bereiche in denen $FS < 1$ unter der Berücksichtigung einer Erdbebenwiederkehrperiode von 2475 Jahren, der Sedimentmächtigkeit und der Hangneigung, b) zeigt ebenfalls die Bereiche in a) und beispielhaft Abrisskanten (blaue Pfeile), Rutschungsablagerungen am Seegrund (schwarze Pfeile) und Unterwasser-Rinnen (rote Pfeile). Diese Informationen werden genutzt, um bestimmte potentielle Bereiche als SAQM auszuschliessen. Die Box zeigt beispielhaft wie die Bathymetrie eines Deltabereichs aussieht. c) zeigt die endgültig kartierten und ausgewählten Bereiche der SAQMs.

Überall dort wo $FS < 1$, werden die Bereiche im GIS-Programm angezeigt (Abb. 6.4 a), weiss umrandet). Allerdings überlappen diese im Grossteil mit schon gerutschten Bereichen (Abb. 6.4 b), Pfeile). Daher kommen nur sehr wenige Bereiche als potentielle SAQM in Frage. Wir haben zwei Bereiche ermittelt, die an Stellen liegen, wo weder eine starke Abrisskante noch sehr viel gerutschtes Material zu sehen ist, und die auch noch innerhalb der weiss umrandeten Gebiete liegen. Diese beiden Bereiche werden im weiteren Verlauf des Anwendungsbeispiels die SAQMs nicht-deltaisch sein, welche wir betrachten und simulieren. Das Ergebnis der Kartierung der SAQMs nicht-deltaisch ist die Dispositionskarte für SAQM nicht-deltaisch. Kombiniert man diese nun mit den potenziellen SAQM deltaisch ([Datenbank Deltatyp](#), siehe unten) und durch Experten/innen kartierte TERM erhält man die vollständige Dispositionskarte für alle Massenbewegungen.

Kartierung SAQM deltaisch

Für die Kartierung der SAQM deltaisch können vorhandene Daten aus der [Datenbank Deltatyp](#) genutzt werden. In diesem Anwendungsbeispiel berücksichtigen wir keine SAQM deltaisch, da die Methode im weiteren Verlauf identisch mit der der SAQM nicht-deltaisch ist.

6.2.3 Szenarienbildung

Kombination von TERM und SAQM

Damit man nicht für jedes Szenario ein neues GIS-Projekt erstellen muss, ist es möglich, mehrere SAQM auf einem Shapefile zu kartieren, aber nicht alle eingezeichneten Bereiche von Massenbewegungen bei jeder Simulation zu nutzen. Daher empfiehlt es sich, die *matIDs* und *name* der Bereiche mit potentiellen Massenbewegungen zu notieren und sich eine Tabelle anzulegen mit allen Szenarien und den zugehörigen Bereichen. Ebenfalls müssen nicht alle TERM in jeder Simulation verwendet werden. Auch hier können mehrere Tsunami-Randbedingungen auf einem Shapefile eingezeichnet, aber nicht alle für jede Simulation benutzt werden (*name* jeder Randbedingung notieren). So kann man verschiedene TERM und SAQM zu unterschiedlichen Szenarien kombinieren und dementsprechend nur die gewünschten Bereiche und Randbedingungen für die jeweilige Simulation nutzen. Im weiteren Verlauf des Anwendungsbeispiels nutzen wir eine TERM von einem historischen Ereignis, sowie die zwei kartierten SAQMs nicht-deltaisch. Die TERM könnte man zum Beispiel als Validierungsereignis verwenden. Die SAQMs nicht-deltaisch könnten zum Beispiel von einem Erdbeben ausgelöst worden sein. Dies passt zu der während der oben beispielhaft gezeigten Kartierung gemachten Annahme von einer Erdbebenwiederkehrperiode von 2475 Jahren.

6.3 Wirkungsanalyse

6.3.1 Simulationsvorbereitung

In diesem Abschnitt beschreiben wir anhand des Anwendungsbeispiels, wie wir zu den Dateien kommen, die für eine Erstellung des Berechnungsgitters notwendig sind. Um diese Dateien zu erstellen, braucht man folgende Informationen:

- Modellgrenze
- Uferlinie
- Randbedingungen (Zufluss, Ausfluss, allfällige Seeregulierung, etc.)
- kartierte Bereiche der Massenbewegung (SAQM)
- Gebäude
- Lage der TERM-Randbedingung im See

Definition Untersuchungsgebiet

In dem hier gezeigten Beispiel ist das zu untersuchende Gebiet der gesamte Uferbereich um den Vierwaldstättersee wobei besonderes Interesse auf drei angrenzende Städte gelegt wird: Luzern, Stansstad und Weggis. Aus diesem Grund wurden die Gebäude in diesen Regionen berücksichtigt (swissTLM3D), jedoch nicht im restlichen Modellbereich (dies würde die Berechnungszeit zu sehr vergrössern). Der Überflutungsbereich wird durch die Modellgrenze definiert (hellblau) und schliesst alle flachen Uferbereiche ein. Um das Ausmass des Uferbereichs zu definieren, eignet sich ein Geländemodell. Dies wird auch später bei der Erzeugung des Berechnungsgitters noch benötigt. Die Uferlinie (orange) wurde vereinfacht aus einem vorhandenen Datensatz abgeleitet (swissTLM3D) und eingezeichnet. Zudem sind alle Regionen so aufbereitet, dass sie ein geschlossenes Polygon bilden (mithilfe der Snapping-Funktion), da für die Erstellung des Berechnungsgitters keine Löcher im Modellbereich vorhanden sein dürfen. Jedoch können nicht direkt Polygone, sondern es müssen zwingend Polylinien benutzt werden (BASEMENT Vorgabe). Je nach Bedarf können weitere Regionen definiert werden, z.B. für die Zuweisung einer spezifischen Gitterauflösung in einer bestimmten Region. Abschliessend werden alle Polylinien auf einem Polylinien-Shapefile zusammengefasst. Die Polylinien auf dem resultierenden Shapefile werden bei der Erstellung des Berechnungsgitters als sogenannte *breaklines* betitelt. Einfachheitshalber nennen wir hier das Shapefile deswegen entsprechend *breaklines_boundary*. Als nächstes wird ein Punkte-Shapefile ange-

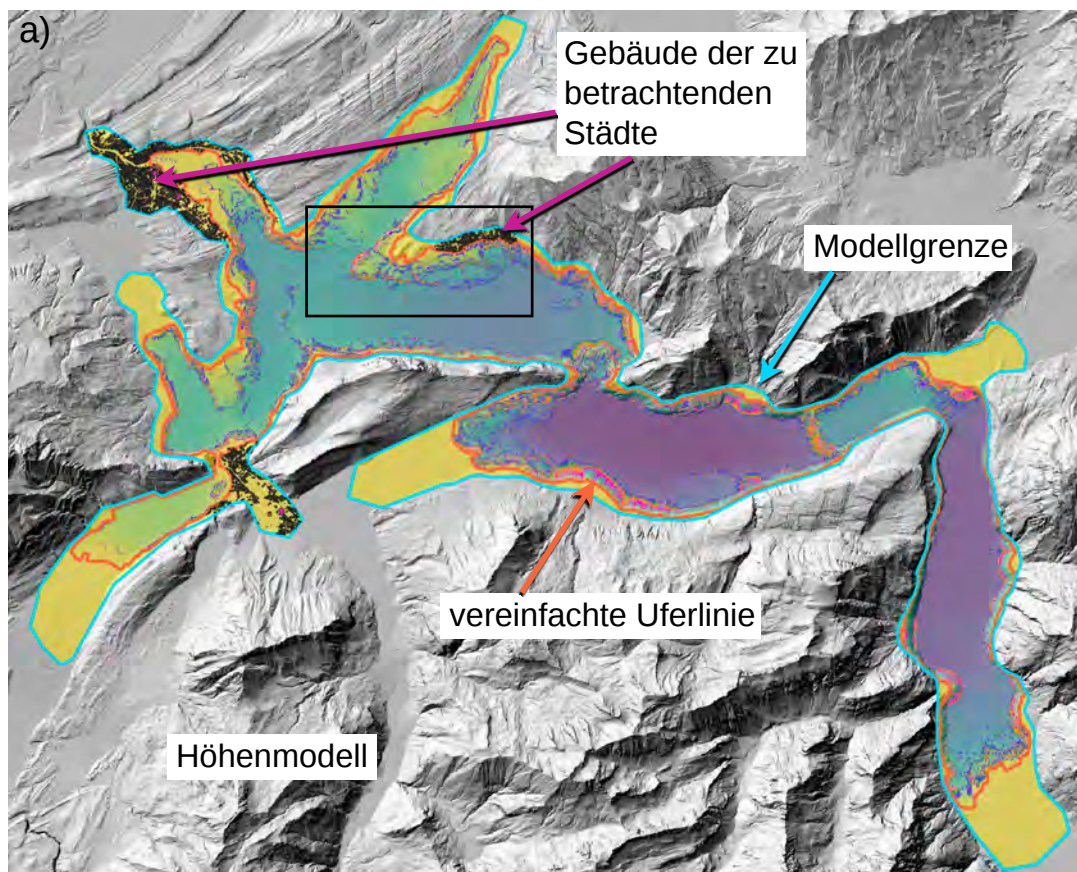


Abbildung 6.5: Die Abbildung zeigt eine Übersicht des gesamten Modellbereichs. In hellblau ist die Modellgrenze eingezeichnet, in orange eine vereinfachte Seegrenze und im Hintergrund ist das digitale Höhenmodell sowie die Bathymetrie des Sees zu sehen. Drei Städte sind in diesem Szenario von näherem Interesse, weswegen die Gebäude von Luzern, Weggis und Stansstad im Modell berücksichtigt werden. Die Box zeigt den Ausschnitt, welcher bei der Kartierung der potentiellen SAQM gezeigt wird.

legt, welches allen durch *breaklines* abgetrennten Regionen spezifische Eigenschaften zuordnet. In

diesem Beispiel hier nennen wir das Punkte-Shapefile *region_points*. Jede Region muss eine *matID*, *name*, *area* (maximale Grösse der Gitterelemente in dieser Region), *hole* (ob die Region ignoriert wird in der Simulation) und eine ID (automatisch von QGIS zugeordnet) zugewiesen bekommen (Abb. 6.7). Um ein Punkte-Shapefile zu erstellen, setzt man je ein Point-Feature in jede Region (See, Uferzone, Bereiche von SAQM, ...) und erstellt die oben beschriebenen Eigenschaften als Spalten in der Attributstabelle: *matID* (Material ID), *area*, *name*, *hole* zusätzlich zu der automatisch erstellten Spalte *ID*. *name* und *matID* werden für die Simulation benötigt. Daher empfiehlt es sich, die Namen und zugehörigen MatIDs zu notieren.

Bereiche für SAQM

Zwei Schritte müssen hier vollzogen werden. Nachdem die Bereiche der SAQM schon kartiert wurden, werden sie nun auf demselben Polylinien-Feature Shapefile eingezeichnet wie die oben beschriebenen Modellgrenze und Uferlinie. Es werden alle SAQM eingezeichnet, auch wenn nicht alle für jedes Szenario benutzt werden. In dem hier gezeigten Beispiel handelt es sich um das Shapefile mit dem Name *breaklines_boundary* in Abbildung 6.7.

Ebenso wie die See- und Uferregionen (und allenfalls sonstige Regionen) bekommen die Bereiche der SAQM jeweils eine *ID* (optional, wird von vielen GIS Programmen automatisch zugewiesen), *matID*, *area*, *name* und *hole* zugewiesen. Das Einzeichnen der Punkte geschieht auf demselben Punkte-Shapefile, welches auch die Informationen der See- und Uferregionen enthält. Die *matID* dürfen nicht identisch sein mit denen der See- oder Ufer- oder sonstigen Regionen. In diesem Beispiel sind alle Regionsdefinitionen auf dem Punkte-Shapefile mit dem Namen *region_points* eingezeichnet (Abb. 6.7), bevor das Shapefile mit den Gebäuden erweitert wird (siehe nächster Abschnitt). Auch hier gilt: *name* und *matID* werden für die Simulation benötigt und sollten notiert werden.

Berücksichtigung von Gebäuden

Es gibt wie in Kapitel 5.1 beschrieben, zwei Möglichkeiten Gebäude zu berücksichtigen. In diesem Beispiel stellen wir die aufwändigere Variante unter der Nutzung von Gebäude-Polygonen aus dem swissTLM3D-Datensatz vor.

In diesem Szenario interessieren uns drei Uferregionen besonders: die Städte Luzern, Weggis und Stansstad. Dies weil einerseits Weggis direkt oberhalb der SAQM liegt, Luzern am Ende einer schmalen Bucht und die grösste Stadt am Vierwaldstättersee ist, und Stansstad, weil es am sehr schmalen Übergang zum Alpnachersee liegt. Die Gebäudeumrisse liegen als Polygone von swissTLM3D vor (Abb. 6.6). Zuerst wurden alle Gebäude um den See ausser den besagten Städten ausgeschnitten, weil sonst im gesamten bebauten Gebiet sehr kleine Gitterzellen generiert werden würden und dies die Simulationszeit stark erhöhen würde. Anschliessend kann das spezielle Tool <https://gitlab.ethz.ch/vaw/public/basemesh-v2/-/wikis/Users/Mesh-Generation-with-Building-Outlines> angewendet werden. Die auszuführenden Dateien sowie die Anleitung sind auf der Website vorhanden. Die erste auszuführende Datei muss nicht angewendet werden, da die Daten von swissTLM3D inzwischen als Polygone und nicht als Polylinien vorliegen. Daher startet man mit der Datei 02. In den Dateien 02 und 03 gibt es Einstellungen, die die Genauigkeit der Umrisse von den Gebäuden betrifft. Diese müssen jeweils dem Projekt angepasst werden, d.h. wenn die Gebäude sehr nah beieinander stehen, kann keine Genauigkeit von 5 m Abstand genommen werden. In diesem Beispiel wurden jeweils 2 m (Abb. 6.6 c)), respektive 3 m (Abb. 6.6 d)) benutzt, da die Luzerner Innenstadt sehr enge Gassen aufweist. Trotz dieser Genauigkeit verschmelzen einige Gebäude und Umrisse werden etwas verändert. Dies kann manuell angepasst werden, bevor die Datei 03 ausgeführt wird. Bevor die Datei 04 ausgeführt werden kann, müssen die Schritte in den Abschnitten oben (*Definition Untersuchungsgebiet* und *Bereiche für SAQM*) abgeschlossen

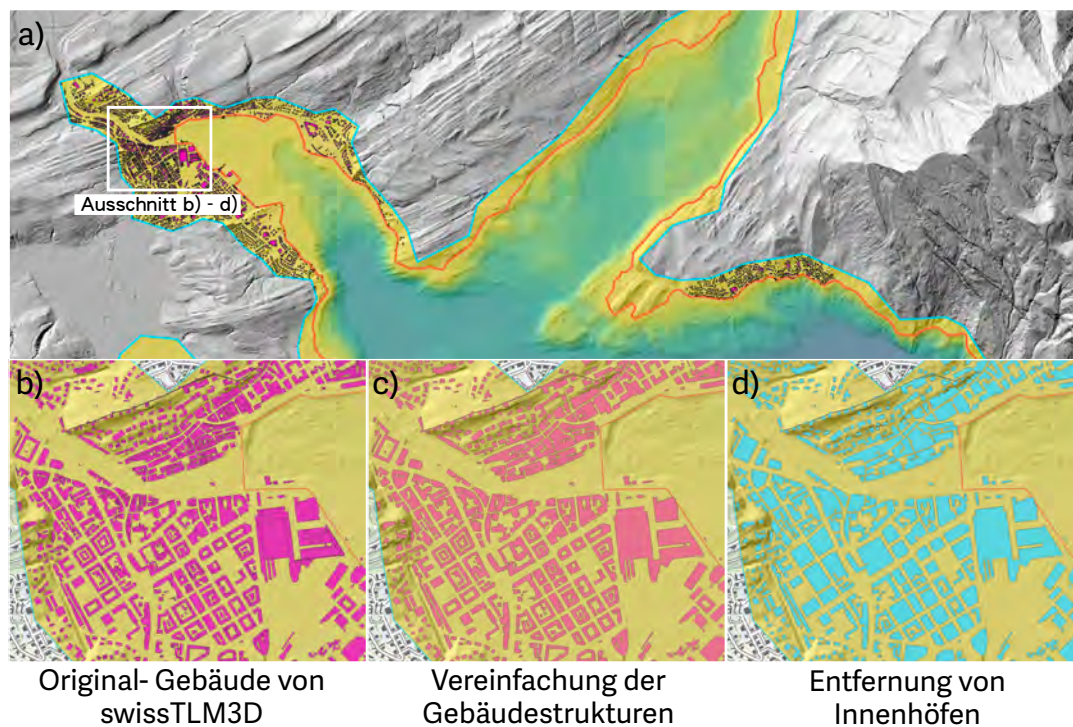


Abbildung 6.6: a) zeigt den nördlichen Teil vom Vierwaldstättersee mit den Städten Luzern und Weggis, der Modellgrenze (hellblau) und der Uferlinie (orange). b) zeigt einen Ausschnitt von Luzern mit den Originalgebäuden von swissTLM3D. In c) ist eine Vereinfachung der Gebäudestrukturen mithilfe von einem externen GIS-Tool vorgenommen worden so dass doppelte Umrisse und zusätzliche Linien nicht mehr vorhanden sind. d) zeigt den finalen Zustand der Gebäude nachdem auch Innenhöfe mithilfe des externen GIS-Tools entfernt wurden.

sein. Dies liegt daran, dass die Datei 04 das Punkte-Shapefile mit den Regionsdefinitionen sowie das Polylinien-Shapefile mit den Bereichen der SAQM und den Ufer- und Seeregionen manipuliert. Um Datei 04 ausführen zu können, müssen zwingend alle Bereiche der SAQM und der Ufer- und Seeregionen schon auf ein und demselben Polylinien-Shapefile vorliegen. Dasselbe gilt für die Punkte mit den Regionsdefinitionen der SAQM und anderen Regionen, welche ebenfalls auf ein und demselben Punkte-Shapefile definiert sein müssen. Es ist zudem sehr wichtig, dass alle Shapefiles dasselbe Koordinatensystem nutzen. Für Datei 04 werden die gerade beschriebenen Shapefiles ausgewählt, sowie das mit der Datei 03 generierte Shapefile mit den Gebäuden ohne Innenhöfe. In Abbildung 6.7 a) sieht man, wie das bei dem hier gezeigten Beispiel aussieht. Das Punkte-Shapefile *region_points* wird während des Ausführens der Datei 04 erweitert, so dass alle geschlossenen Gebäude automatisch eine *matID*, *name* und *area* zugewiesen bekommen (diese Felder können leer sein, aber es ist wichtig, dass sie existieren). Ähnlich funktioniert dies auch für die Gebäudeumrisse (die als Polygone vorliegen), welche dem Polylinien-Shapefile mit den SAQM und Ufer- und Seeregionen automatisch hinzugefügt und wieder in Polylinien umgewandelt werden (Abb. 6.7 b)). Diese finalen Shapefiles werden bei der Erzeugung von Berechnungsgittern benötigt. Das finale Punkte-Shapefile in dem Beispiel hier heisst *region_bebauung*. Falls keine Gebäude vorhanden sind, kann dieser Abschnitt ausgelassen werden.

Randbedingungen

In diesem Beispiel sind keine Randbedingungen vorhanden, abgesehen von der inneren Randbedingung der TERM, welche im nächsten Abschnitt besprochen wird. Randbedingungen wie Zuflüsse oder Wehre können wichtig sein, wenn sie lokal oder regional einen grossen Einfluss auf das Strömungsverhalten haben. Da die Reussmündung relativ klein im Verhältnis zum dortigen Seebereich

ist, haben wir uns dagegen entschieden, einen Zufluss als Randbedingung hinzuzufügen. Der Abfluss der Reuss bei Luzern könnte unter Umständen eine grössere Rolle spielen, genauso wie das Wehr, welches die Reuss dort kontrolliert. Aus diesem Grund könnte man den Einfluss dieser Randbedingungen in der Szenarienbildung berücksichtigen. Da wir jedoch beispielhaft nur ein Szenario zeigen, ist in dem hier veranschaulichten Beispiel keine weitere Randbedingung vorhanden.

Wenn es Randbedingungen gibt, unabhängig davon ob Äussere oder Innere, werden sie auf ein zweites, separates Polylinien-Shapefile eingezeichnet. Dazu muss jeder inneren und äusseren

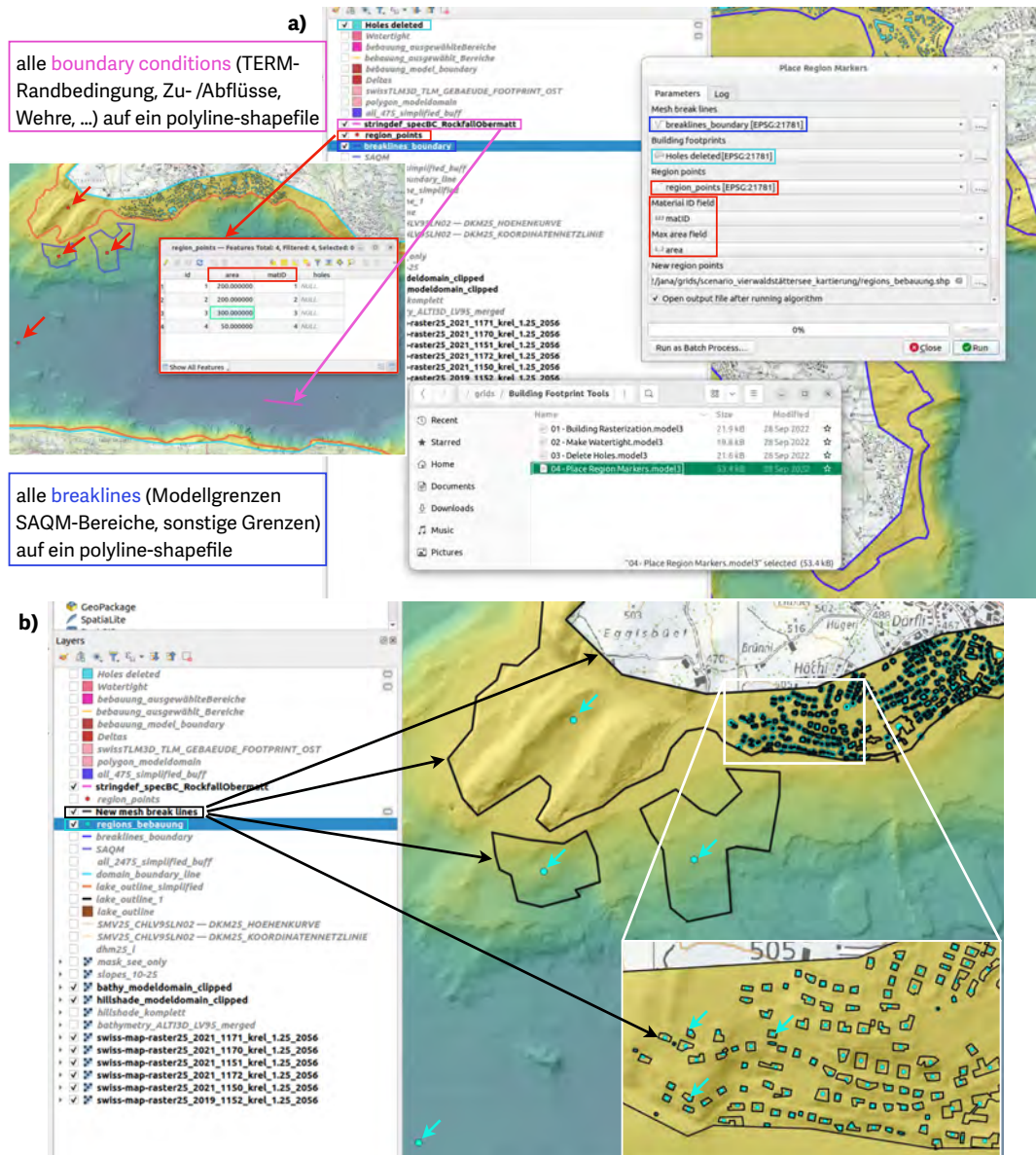


Abbildung 6.7: a) zeigt den Zustand der Shapefiles bevor der letzte Schritt des externen GIS-Tools angewendet wurde. Um dieses anwenden zu können, müssen zwingend alle Regionsdefinitionen (rote Pfeile) verweisen auf die gesetzten Punkte innerhalb der SAQMs und der anderen Regionen) auf einem Punkte-Shapefile (*region_points*, rot) liegen. Des Weiteren müssen alle Grenzen, abgetrennte Bereiche und Regionen auf einem Polylinien-Shapefile liegen (*breaklines_boundary*, dunkelblau). Es wird auch das zuvor generierte Shapefile mit den Gebäuden benötigt (*Holes_deleted*, türkis). Das Shapefile mit den Randbedingungen (*stringdef_specBC_RockfallObermatt*, pink) wird für diesen Vorgang nicht benötigt. b) zeigt den Zustand der neu generierten Dateien nach dem Ausführen des letzten Schritts des externen GIS-Tools: Ein neu generiertes Polylinien-Shapefile, welches alle Häuserumrisse sowie die Regionen und SAQM-Bereiche kombiniert, wurde generiert (*New mesh break lines*, schwarz) und ein neues Punkte-Shapefile (*regions_bebauung*). Türkise Pfeile zeigen exemplarische einige der neu generierten Punkte und die alten schon existierenden Punkte.

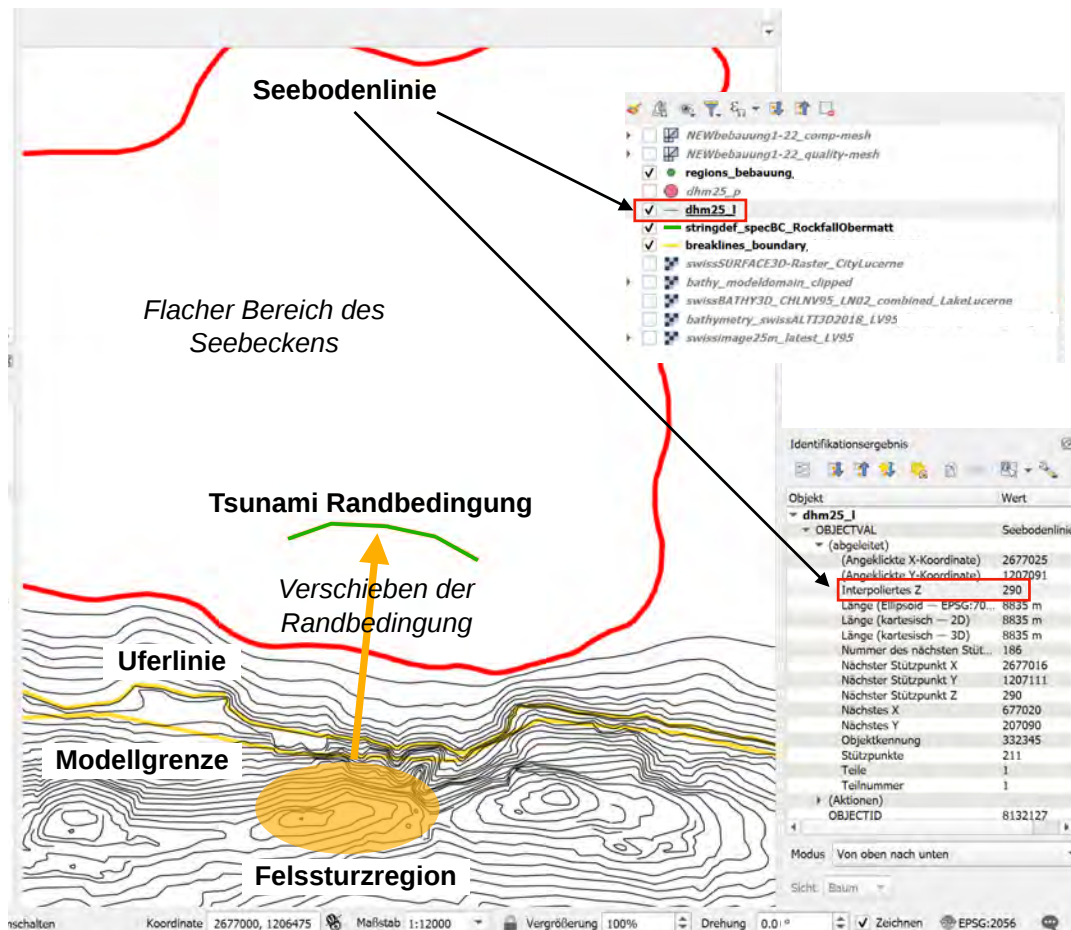
Randbedingung ein *name* und *matID* zugewiesen werden, welche auch später bei der Simulation angegeben werden müssen. Daher ist es sinnvoll, die Namen und zugehörigen *matIDs* zu notieren. Falls Randbedingungen mit der Modellgrenze überlappen, sollte man die Funktion des *Snapping* verwenden, um sicher zu stellen, dass die Linien auch exakt aufeinander liegen. Falls Randbedingungen nicht mit schon vorhandenen Grenzen übereinstimmen, muss zwingend eine Grenze resp. Linie („breakline“) an der exakt gleichen Stelle wie die Randbedingung in das Polylinien-Shapefile mit den Modellgrenzen, Uferlinie und sonstigen Bereichen eingezeichnet werden (im Beispiel: *breaklines_boundary*). Hierzu sollte die *Snapping*-Funktion verwendet werden, um sicher zu stellen, dass die Linien genau aufeinander liegen.

Randbedingungen werden in QGIS während der Erstellung des Berechnungsgitters mit dem Plugin BASEmesh als *string definitions* betitelt. Um Verwirrung zu vermeiden, empfiehlt es sich, das Polylinien-Shapefile dementsprechend zu benennen. Gäbe es in dem hier gezeigten Beispiel zusätzliche Randbedingungen (z.B. Wehr, Zufluss), würden sie auf dem Polylinien-Shapefile mit dem Namen *stringdef_specBC_RockfallObermatt* eingezeichnet werden müssen (Abb. 6.7); dasselbe Shapefile, auf dem auch die innere Randbedingung der TERM eingezeichnet wird (siehe nächsten Abschnitt).

Innere Randbedingung für TERM

Als erstes muss der Nutzer überlegen, wie weit die interne Randbedingung, wo der Tsunami startet, in den See verlegt werden muss. Dies hängt von der Referenzwassertiefe h_{ref} ab, die gross genug sein muss, damit die Flachwassergleichungen erfüllt sind. Die Bedingung dafür wiederholen wir nochmal: die Referenzwassertiefe muss etwa 10x grösser sein als die Wellenamplitude (= Wellenhöhe für Solitärwelle), d.h. dass die Referenzwassertiefe h_{ref} von 100 m für einen 10 m hohen Tsunami gerade ausreichen würde. Damit sicher gestellt wird, dass in jedem Fall die Flachwassergleichungen erfüllt sind, geben wir in diesem Handbuch die Empfehlung ab, eine Referenzwassertiefe von mindestens 150 m zu benutzen. h_{ref} sollte jedoch nicht nur abhängig von der Erfüllung der Flachwassergleichungen sein, sondern auch davon, wie die Bathymetrie des Sees aussieht. Es empfiehlt sich als Referenzwassertiefe einen Wert zu nehmen, der eine Seetiefe widerspiegelt, die sich nicht an einem Unterwasserhang befindet, sondern in einem flachen Bereich im See (möglichst nah am Ufer zu der Stelle wo die TERM auftritt und trotzdem die obige Bedingung erfüllt) (Abb. 6.8). Wenn eine geeignete Stelle ausgesucht wurde, kann an dieser Stelle ein Polylinien-Feature auf ein entweder neues Shapefile oder auf ein allenfalls schon existierendes Polylinien-Shapefile mit Randbedingungen gezeichnet werden. Das Polylinien-Feature muss eine *matID* und *name* zugewiesen bekommen. Der *name* sollte notiert werden, da er während der Simulation benötigt wird. Ebenso wird die Referenzwassertiefe bei der Simulation und auch bei der Berechnung des Impulsproduktparameters (6.2.1) benutzt und sollte daher ebenfalls notiert werden. Für jede TERM muss zwingend eine Linie („breakline“) an der exakt gleichen Stelle wie die TERM-Randbedingung in das Polylinien-Shapefile mit den Modellgrenzen, Uferlinie und sonstigen Bereichen eingezeichnet werden.

In diesem Beispiel beträgt die Referenzwassertiefe 146 m (aufgrund der Werte von [Fuchs and Boes \(2010\)](#)). Wäre diese Vorgabe nicht vorhanden, würde folgender Arbeitsablauf gemacht: Die Referenzwassertiefe lässt sich aus der Höhe des Seespiegels/der Uferlinie von 433 m und der letzten angegebenen Höhenlinie im See von 290 m errechnen (433 m-290 m= 143 m). Die TERM-Randbedingung wurde so weit in den See hineingelegt, dass sie etwas Abstand zum Unterwasserhang hat und sie in einem flachen Bereich liegt. Dies ist eine essentielle Bedingung für die spätere Simulation. Aufgrund dessen liegt die TERM nicht genau auf der Höhenlinie von 290 m und somit ist die Referenzwassertiefe tendenziell etwas grösser als die 143 m (passt zu den 146 m aus der Literatur). Des Weiteren ist die Referenzwassertiefe grösser als die hier angegebene theoretisch notwendige Tiefe von 100 m, um die Bedingungen der Flachwassergleichungen zu erfüllen und



benutzt: **swissALTI3D, swissBATHY3D, dhm25 (Höhenlinien)**

Abbildung 6.8: Die Abbildung zeigt beispielhaft, welche Datensätze benutzt werden können, um die Referenzwassertiefe und einen geeigneten Ort für die Tsunami-Randbedingung zu ermitteln. Die Randbedingung sollte in einem flachen Bereich mit einer genug grossen Referenzwassertiefe liegen.

liegt nah am empfohlenen Wert von 150 m. Somit ist die Lage der TERM in jeglicher Hinsicht angemessen.

Da wir in diesem Beispiel noch keine Randbedingungen haben, erstellen wir ein neues Polylinien-Shapefile mit dem Namen *stringdef_specBC_RockfallObermatt* (Abb. 6.8), auf dem wir die Randbedingung einzeichnen. Die Länge der Randbedingung orientiert sich in etwa an der Breite der potentiellen TERM. An derselben Stelle zeichnen wir im Polylinien-Shapefile *breaklines_boundary* eine Linie ein.

Erzeugung von Berechnungsgittern

Das Shapefile mit den Randbedingungen (*stringdef_specBC_RockfallObermatt*), das Shapefile mit den Grenzen und den Bereichen der SAQM (*breaklines_boundary*) sowie das Punkte-Shapefile mit der Definition aller Regionen (*regions_bebauung*) werden nun bei der Erstellung des *Quality Meshes* benutzt. Für die Erstellung ist in QGIS das Plugin BASEmesh vorhanden. Für die Erstellung ist in QGIS das Plugin BASEmesh vorhanden. Einige Einstellungen, die beim *Quality Mesh* berücksichtigt werden müssen, sind (Abb. 6.9):

- Break lines: hier wird das Shapefile mit den zuvor definierten Uferlinien, der Modellgrenze und den Bereichen der SAQM angegeben (*breaklines_boundary*).

- Regions: hier müssen das zuvor als Punkte-Feature erstellte Shapefile mit den definierten Regionen ausgewählt werden (*regions_bebauung*). Dabei müssen *matID* und *Maximum area field, name* und *hole* (falls Gebäude berücksichtigt oder Gebiete ausgelassen werden) ausgewählt werden.
- String definitions: Falls eine spezifische Randbedingung (z.B. In- oder Outflow) angegeben werden muss, muss diese hier ausgewählt werden (*stringdef_specBC_RockfallObermatt*).
- Output: Hier wird das *Quality mesh* gespeichert.

Um das finale Berechnungsgitter (*Computational Mesh*) zu erhalten, welches für die Simulation mit BASEMENT benötigt wird, ordnen wir dem eben erstellten *Quality Mesh* die Höhenwerte aus einem digitalen Höhenmodell (DEM) zu (Abb. 6.9). Dieses kann entweder im Rasterformat (z.B. .tif) oder als TIN vorhanden sein kann. Dieses Vorgehen wird ebenso mit dem Plugin BASEmesh gemacht.

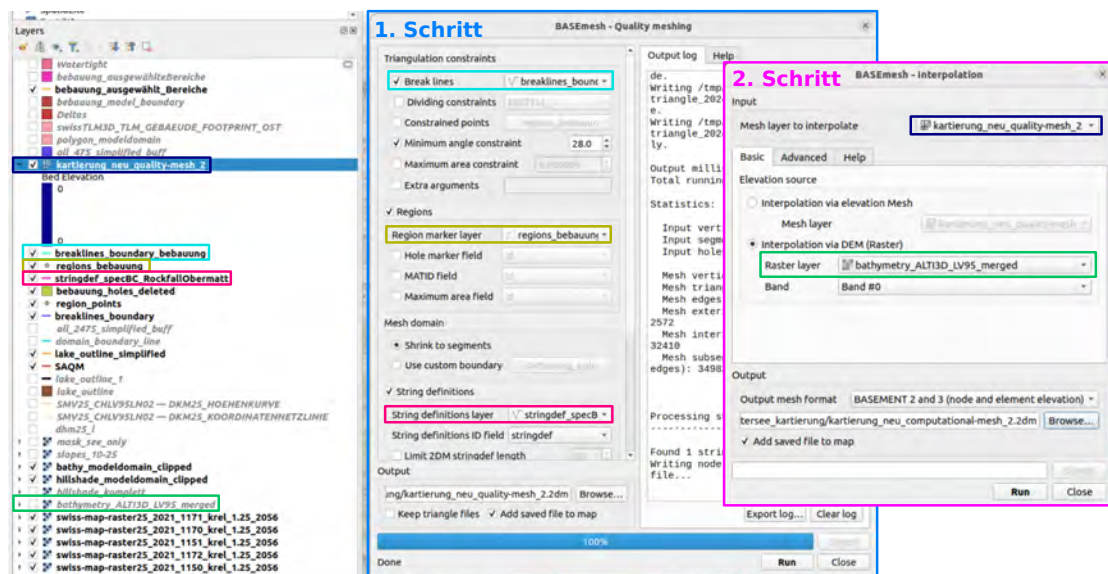


Abbildung 6.9: Hier wird gezeigt welche Shapefiles gebraucht werden um 1. das *Quality Mesh* und darauffolgend das *Computational Mesh* (das finale Berechnungsgitter) zu erstellen. Für diese Schritte ist das Plugin BASEmesh notwendig. Um das *Quality Mesh* zu erstellen, werden die drei Shapefiles der Regionsdefinitionen, Randbedingungen und Grenzen/SAQM benötigt. Für das *Computational Mesh* benutzt man dann das zuerst erstellte *Quality Mesh* sowie ein Geländemodell der Region.

Merke!

Aufgelistet sind die **Features**, dazugehörige **Shapefiles** und in () die **Benennung derer im Quality Meshing**

- **Polyline-Feature**: Modellgrenze, Uferlinie, Grenzen von Regionen
⇒ breaklines_boundary.shp (Break lines)
- **Polyline-Feature**: Randbedingungen, TERM Tsunami-Randbedingung
⇒ stringdef_specBC_RockfallObermatt.shp (String definitions layer)
- **Point-Feature**: Regionen-Definitionen mit spez. Eigenschaften
⇒ regions_bebauung.shp (Region marker layer)

6.3.2 Simulation

In diesem Abschnitt wird genau beschrieben, wie die Simulation mit Hilfe der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) von BASEMENT aufgesetzt wird. Für weitere Details zur Anwendung von BASEMENT wird auf das [Benutzerhandbuch](#) verwiesen. Zuerst muss die Setup-Datei aufgestellt und validiert werden. Dabei ist es wichtig, dass die Pfade zu Datenreihen und dem Berechnungsgitter korrekt sind, ebenso wie die Pfade zu den ausführbaren BASEMENT-Dateien. Das Berechnungsgitter wird bei *mesh_file* eingelesen.

Für jede einzelne TERM wird eine eigene innere Randbedingung benutzt: BOUNDARY, INTERNAL im HYDRAULICS-Teil der Setup-Datei. Bei der inneren Randbedingung muss der *type* ausgewählt werden, welcher *zghydrograph_internal* heisst. Des Weiteren muss der („name“) angegeben werden sowie die Pfade zu den beiden erstellten Datenreihen der Wellenform und Durchfluss.

Es ist wichtig, dass die TERM-Randbedingung, die als *String definitions* während der Simulationvorbereitung in GIS definiert wurde und dort ein Namensattribut („name“) bekommen hat, denselben Namen im Randbedingungs-Block („string_name“) und im *STRINGDEF*-Block („name“) in der Setup-Datei zugewiesen bekommt. In unserem Beispiel heisst die TERM-Randbedingung *BC* (Abb. 6.10).

Es müssen nicht alle TERM-Randbedingungen, die im GIS-Programm definiert wurden, genutzt werden. Für die Simulation werden nur die TERM-Randbedingungen berücksichtigt, welche in der Setup-Datei angegeben werden. Daher können unterschiedliche Szenarien mit demselben Berechnungsgitter simuliert werden.

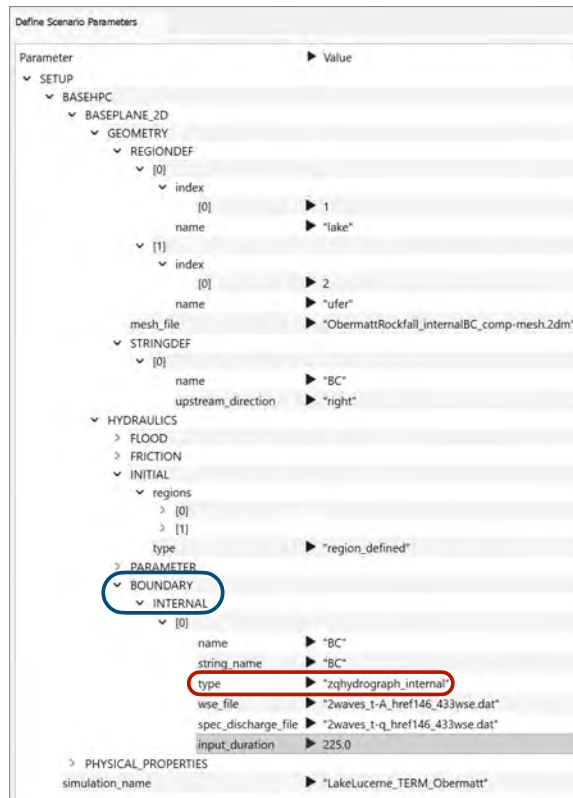
Weitere Randbedingungen wie zum Beispiel Wehre, mündende Flüsse oder Dämme, müssen ebenfalls angegeben werden. Eine komplette Liste findet sich im BASEMENT-GUI (INTERNAL, STANDARD, LINKED BOUNDARY). Unter den verschiedenen Optionen finden sich die Attribute, welche für die jeweilige Randbedingung notwendig sind. In diesem Beispiel hier ist keine weitere Randbedingung vorhanden.

Die SAQM wird jeweils im MASSMOVEMENT-Block angegeben. Dafür gibt man in diesem Block die durchschnittliche Mächtigkeit und die *matID* der kartierten SAQM an (Abb. 6.10). Auch hier muss darauf geachtet werden, dass „name“ im REGIONSDEF-Block mit „region_name“ im INITIAL-Block sowie im MASSMOVEMENT-Block übereinstimmen. In unserem Beispiel betragen die durchschnittlichen Mächtigkeiten der SAQM jeweils 3.8 m (aus der Literatur, [Strupler et al. \(2020a\)](#)) und wir benutzen beispielhaft direkt beide SAQM. Hierbei sollte beachtet werden, dass die Sedimentmächtigkeit grossen Unsicherheiten unterliegt, und es in der Verantwortung der Experten/Innen liegt, allenfalls mehrere Sedimentmächtigkeiten in den Simulationen zu benutzen. Generell gilt, dass für die Simulation nur die Bereiche berücksichtigt werden, welche in der Setup-Datei angegeben werden. Alle anderen werden ignoriert. Daher können ohne grossen Aufwand mehrere unterschiedliche Szenarien mit verschiedenen SAQM auch in Kombination mit unterschiedlichen TERM (Stichwort: Szenarienbildung) mit demselben Berechnungsgitter simuliert werden.

Wenn die Setup-Datei vollständig ausgefüllt wurde, führt man Schritt 1 der Simulation aus, indem man auf **Write** klickt. Die Validierung der Setup-Datei kann je nach Grösse des Berechnungsgitters einige Zeit dauern.

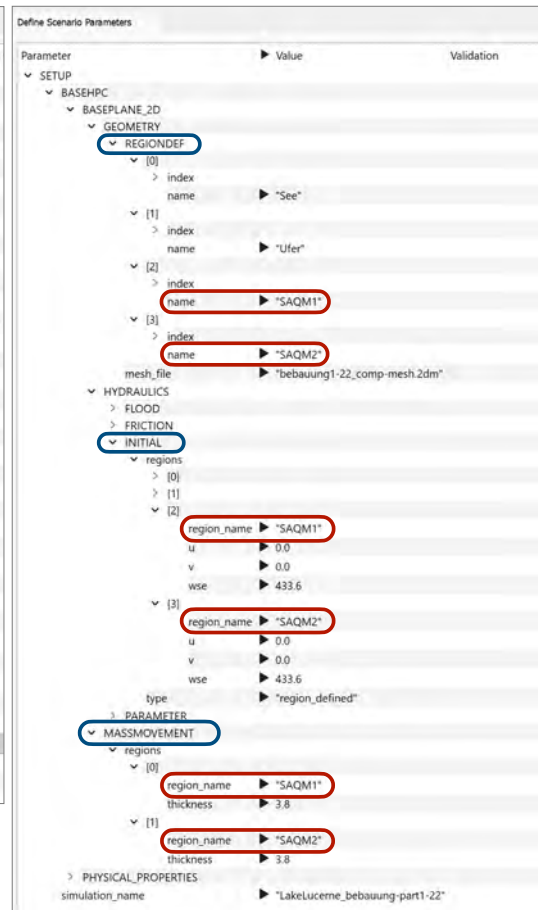
Nach der Validierung des Modell-Setups kommt der nächste Schritt, die eigentliche Simulation. Über das GUI fügt man, wenn gewünscht, Ausgabeparameter zur Simulations-Datei hinzu (Abb. 6.11). Wichtig sind hierbei Parameter wie *water_depth* und *flow_velocity*, da diese für die Auswertung (z.B. Berechnung der Wellenamplitude und -ankunftszeit) benötigt werden. Weiterhin definiert man die Laufzeit der Simulation. Danach startet man die Berechnung der Wellenausbreitung mit BASEMENT im GUI indem man auf **Run** klickt. Dabei kann man auswählen, ob mit GPUs, CPUs oder einer Mischung aus beiden die gerechnet werden soll. Die Simulation kann je

TERM Setup



Unter **BOUNDARY** muss **INTERNAL** gewählt werden und dann unter **type** *zqhydrograph_internal*. Die Dauer der **input_duration** in Sekunden muss mit der Dauer der Abfluss- (*spec_discharge_file*) und Amplitudendateien (*wse_file*) übereinstimmen, damit die kompletten Wellen eingelesen werden.

SAQM Setup



Die **region_name** und **name** der rutschenden Regionen (auch der anderen, wie der See-Region) müssen in jedem Block (**MASSMOVEMENTS**, **INITIAL**,...) übereinstimmen.

Abbildung 6.10: Ausschnitt aus dem GUI von BASEMENT, welches die spezifischen Abschnitte für die Tsunami-Generierung zeigt. Um eine TERM hinzuzufügen, muss im HYDRAULICS-Block die Spezifikation BOUNDARY und darunter INTERNAL ausgewählt werden. Es müssen die Pfade zu den beiden Textdateien mit der Wellenform und Durchfluss und *type=zqhydrograph* angegeben werden. „string_name“ muss übereinstimmen mit „name“ im Block STRINGDEF, in dem alle Randbedingungen gelistet werden. Für subaquatische Massenbewegungen fügt man unter BASEPLANE_2D einen MASSMOVEMENT-Block hinzu. Auch hier muss darauf geachtet werden, dass „name“ im REGIONSDEF-Block mit „region_name“ im INITIAL-Block sowie im MASSMOVEMENT-Block übereinstimmen. Für jede SAQM muss im MASSMOVEMENT-Block die mittlere Mächtigkeit der Bereiche angegeben werden.

nach Grösse des Gitters und der Art und Anzahl der benutzten Rechenkerne mehrere Stunden bis zu Tagen dauern. Nachdem die Simulation fertig ist, wird die Ergebnis-Datei in einem dritten Schritt formatiert. Das Ergebnis der Berechnung ist jetzt im .xdmf-Format vorhanden und kann in einem geeigneten Programm (z.B. GIS-Programm oder ParaView) geöffnet und die Ergebnisse visualisiert werden.

6.3.3 Auswertung

Im Abschnitt 6.3.3 wird die Erstellung von Zeitreihen verschiedener Tsunamiparameter an beliebigen Gitterpunkten erklärt und wird die Erstellung der Intensitätskarten erläutert. Da die Auswertung unabhängig von der Art des Auslösemechanismus ist, zeigen wir anhand einer SAQM deltaisch beispielhaft wie die Auswertung funktioniert. Die beiden Python-Skripte *BMv4GaugeExtract.py*

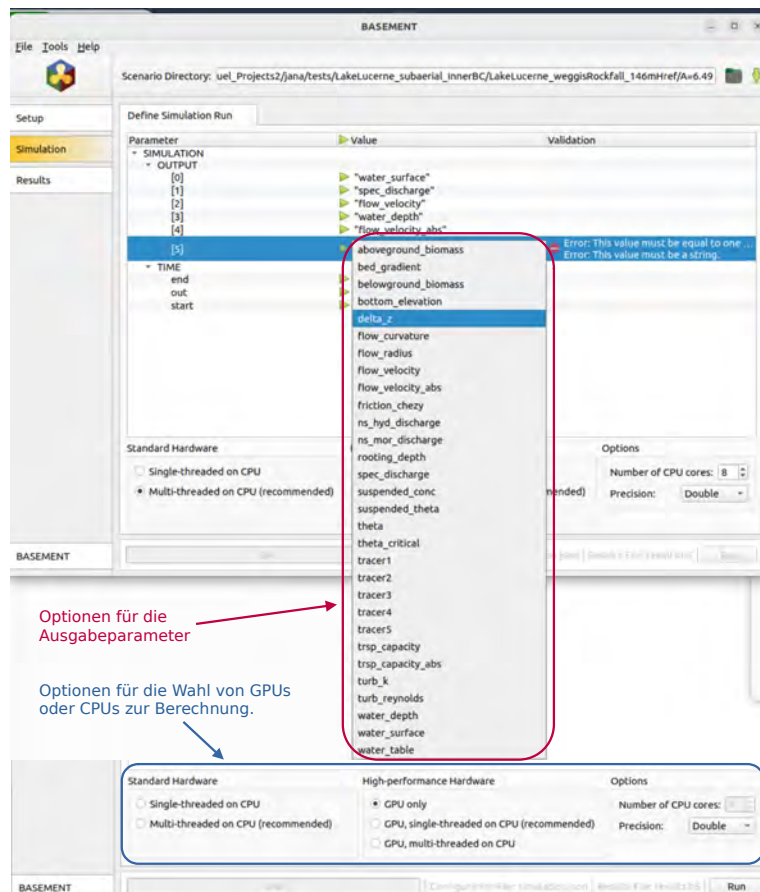


Abbildung 6.11: Hier sieht man, welche Optionen in der Simulations-Datei vorhanden sind. Ausgabeparameter und die Hardware können ausgewählt werden. Dies ist für TERM und SAQM gleich.

und *CalcPercentiles.py* sind im BASEMENT-Paket enthalten.

Zeitreihen von Tsunami-relevanten Parametern

Das Python-Skript *BMv4GaugeExtract.py* erlaubt die Extraktion der gewünschten Parameter in Abhängigkeit der Zeit an einem beliebigen Punkt im Gitter (d.h. auf der Seeoberfläche und an Land), welche dann in einem beliebigen Programm als Zeitreihe visualisiert werden können. Die Messpunkt-Koordinaten (x,y) müssen in einer separaten Datei (*gauge_locations.csv*) abgespeichert werden, welche sich im selben Ordner wie das Python-Skript befinden muss. Die x- und y-Koordinaten in der Datei müssen durch ein Leerzeichen getrennt werden. Für jeden Messpunkt braucht es eine neue Linie. Die extrahierten Zeitreihen der Tsunamiparameter werden pro Messpunkt jeweils als individuelle Textdatei (.csv) geschrieben, i.e. „BM_gauge_[MESSPUNKTNR].csv“.

Erstellung von Intensitätskarten

Für die einfache Darstellung auf Karten kann ein gewünschter Zeitschritt der Überflutung, wie z.B. das maximale Szenario ausgewählt werden und als einzelner Rasterlayer exportiert werden (z.B. als Geotiff, .tif). Um aus der Resultatedatei (*results.xdmf*) die gewünschten Perzentile der Tsunamiparameter herauszulesen, muss der Abschnitt *User Input* im Python-Skript *CalcPercentiles.py* angepasst werden (Pfade, die Anzahl der Simulationen, die gewünschten Perzentile, ...). Danach lässt man das Script *CalcPercentiles.py* laufen und erhält die Resultate für die gewünschten Parameter.

Die resultierende *percentiles.h5*-Datei kann direkt in QGIS geladen werden. Dazu lädt man zuerst das *final_mesh.2dm* in QGIS, öffnet die „Eigenschaften“ dieses Layers und klickt auf das

grüne '+' Symbol. Anschliessend wählt man die results.xdmf-Datei aus, wonach weitere Datensätze geladen werden („Datasets successfully added to the mesh layer“). Achtung Hinweis: Je nach QGIS-Version muss der Kopf der results.xdmf-Datei zu den folgenden Zeilen geändert werden:

```
<?xml version="1.0" ?>
<!DOCTYPE Xdmf SYSTEM "Xdmf.dtd" []>
<Xdmf Version="2.0">
```

Mit dem Befehl „Rasterize Mesh Dataset“ kann in QGIS schliesslich ein beliebiger Layer rasterisiert und als Geotiff abgespeichert werden. Bei *Dataset groups* muss dazu der gewünschte Layer ausgewählt werden, z.B. der Median der Fliesstiefe. Um die Werte innerhalb des Sees nicht zu beachten, werden diese mit einer inversen Maske ausgeschnitten. Anschliessend hat man ein Geotiff mit den Rasterwerten von Interesse. In Abbildung 6.12 ist als Beispiel die Fliesstiefe mit dem 5., 50. und 95. Perzentil einer SAQM deltaisch gezeigt. Auf den Intensitätskarten können die Fliesstiefen analog zu den Intensitäten, welche für Überschwemmungen verwendet werden, klassifiziert werden: schwache ($< 0.5m$), mittlere ($0.5 - 2m$) und grosse ($> 2m$) Fliesstiefe ([BAFU-Dokument](#)).

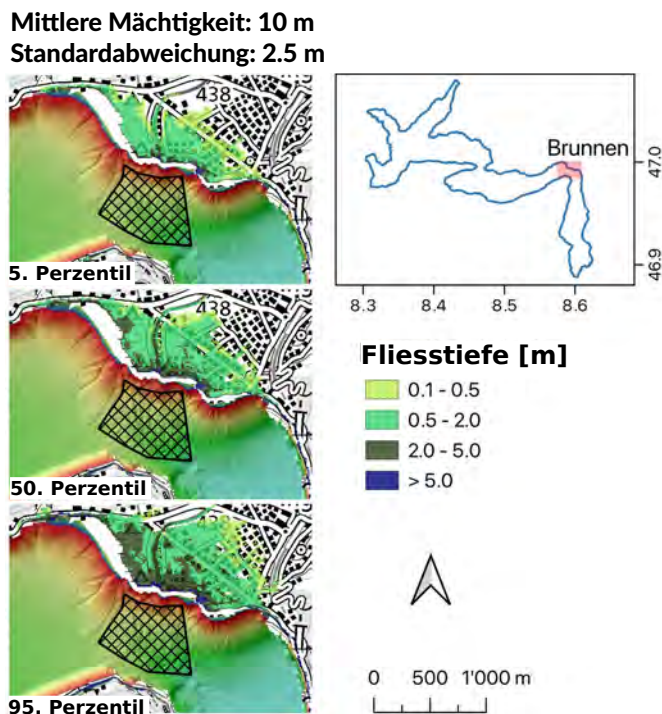


Abbildung 6.12: 5., 50. und 95. Perzentil der erwarteten Fliesstiefe für die simulierte SAQM deltaisch.

Anhang A

Datengrundlage

Die [Datenbank Grundlagen SAQM](#) beherbergt alle Information, die in dieser Tabelle zusammengefasst sind, bzw. verweist auf Quellen zu den Daten.

Index	See	CPT	Langkerne >2m	Reflektions- seismik (3.5 kHz)	Hochauflösende Bathymetry (Swisstopo)	Daten publiziert in
1	Léman		✓	✓	✓	Kremer 2014
2	Bodensee		✓	✓	✓	Wessels et al., 2015; Schwestermann, 2016; Schaller et al., 2022
3	Maggiore				✓	
4	Neuchatel		✓	✓	✓	Reusch et al., 2016; Reusch 2016
5	Vierwaldstättersee	✓	✓	✓	✓	Schnellmann, 2006; Hilbe, 2013, Shynkarenk et al., 2022a,b
6	Zurich	✓	✓	✓	✓	Strasser, 2013; Strupler, 2018
7	Lugano		✓	✓		Niessen, 1987
8	Biel		✓	✓	✓	Alice Jeannet 2012.; Dubois et al., 2021
9	Thun		✓	✓	✓	Wirth et al., 2011; Kremer et al., 2022
10	Zug			✓	✓	Kuenz, 2013
11	Brien		✓	✓	✓	Girardclos et al., 2007
12	Walen			✓	✓	Affentranger, 2023, Zimmermann 2008
13	Murten		✓		✓	Haas et al., 2020
14	Sempach				✓	
15	Hallwil				✓	
16	Joux			✓	✓	R. Meier, 2020.
17	Greifen		✓			On going Master Thesis in the group of Hendrik Vogel
18	Sarnen			✓	✓	Monecke et al., 2004
19	Aegeri			✓	✓	Müller, 2007; Hofmann, 2015
20	Baldegger		✓	✓		Monecke et al., 2004
21	Sils			✓	✓	Bellwald et al., 2024; Nigg et al., 2021; Blass et al., 2006
22	Silvaplana		✓	✓	✓	Bellwald et al., 2024; Blass et al., 2006
23	Kloental			✓		Glur 2013
24	Pfäeffikon					
25	Lauerz		✓	✓		Busmann and Anselmetti, 2010
26	Lungern		✓	✓	✓	Monecke 2004; Pfaffen, , 2007; MSc thesis Walker, in Bearbeitung
27	Poschiavo			✓		Wirth, 2013
28	Oeschinen		✓	✓		Knapp et al., 2018

Abbildung A.1: Die Tabelle fasst die Seen zusammen, für die Datengrundlagen verfügbar sind, sowie die entsprechenden Referenzen. Die Angaben entsprechen dem Wissensstand Ende 2024. Da laufend neue bathymetrische Modelle und weitere Datensätze veröffentlicht werden, empfiehlt es sich, die aktuell verfügbaren Daten zu überprüfen. Für hochauflösende bathymetrische Daten sollte insbesondere das Produkt swissBATHY3D von swisstopo konsultiert werden.

Zusätzlich können Shapefiles für GIS-Projekte mit Informationen zu Deltas von der [Datenbank Deltatyp](#) heruntergeladen werden.

Anhang B

Beispiel eines probabilistischen Simulationsansatzes

Hier wird anhand des Impulsproduktparameters ein Beispiel eines probabilistischen Simulationsansatzes aufgezeigt. Im Falle einer probabilistischen Simulation werden die Unsicherheiten in der Berechnung von P berücksichtigt. Der Einfachheit halber wird in diesem Anwendungsbeispiel angenommen, dass die Standardabweichung 20% des jeweiligen Parameterwertes beträgt. Nun werden mittels Latin Hypercube Sampling (vgl. 2.4.1) Kombinationen von verschiedenen Eingabevariablen generiert. Nochmals zur Erinnerung: Es wird die Streubreite jedes involvierten Parameters k in n Intervalle (hier: $n = 10$) mit gleicher Wahrscheinlichkeit eingeteilt. Anschliessend wird aus jedem dieser Intervalle ein zufälliger Wert gezogen. Die n Werte, welche für jeden Parameter geprobt wurden, werden schliesslich zufällig miteinander kombiniert, woraus $n * k$ Kombinationen von Parametern resultieren (Minasny and McBratney, 2006). Im gezeigten Beispiel wird angenommen, dass alle $k = 7$ Eingabeparameter log-normal verteilt und unabhängig voneinander sind. Ein Auszug mit den ersten 10 Parameterkombinationen aus dem LH-Sampling ist in Tabelle B.1 dargestellt. Setzt man nun jeweils das 5., 50. und 95. Perzentil in die Gleichungen 3.1, 3.2 und 3.3 ein, ergeben

	Eintauch- geschwindig- keit v	Referenz- wasser- tiefe h_{ref}	Eintreff- winkel α	Volumen V_b	Mächtigkeit S_r	Breite B_r	Dichte ρ_s
1	27.57	155.04	27.63	4276.98	2.97	59.47	2796.04
2	32.00	184.07	25.64	6100.28	3.64	33.11	2072.14
3	23.65	130.05	33.59	5843.05	4.34	42.52	1765.90
4	34.23	179.20	23.42	3320.25	4.67	38.42	1716.58
5	43.55	157.11	35.05	5300.15	5.70	39.75	1952.67
6	34.73	125.60	42.45	6219.29	4.97	50.30	2018.21
7	29.91	144.47	22.48	4420.82	4.43	51.30	1881.21
8	27.07	127.34	25.38	4996.18	4.24	50.88	1608.99
9	24.38	153.21	38.98	4859.02	4.30	54.65	1496.14
10	29.19	165.52	31.72	5740.35	4.02	52.64	1673.80

Tabelle B.1: Auszug aus den LHS gesampelten Parameterkombinationen.

sich folgende Werte für a_1 (2. Spalte) und a_2 (3. Spalte) (Tabelle (B.2)). Mit diesen Perzentilen, oder je nach Ziel anderen, kann mit der Berechnung für die Welleneingabe fortgefahren werden.

Perzentil	a_1	a_2
5.	2.02	5.77
50.	2.61	6.80
95.	3.71	8.00

Tabelle B.2: 5., 50. und 95. Perzentil aus den mit LHS berechneten Werten von a_1 und a_2 (auf zwei Nachkommastellen gerundet).

Literaturverzeichnis

- G. Barros and H. Sievers. El maremoto del 22 de mayo de 1960 en las costas de Chile. *Departamento de Navegación e Hidrografía de la Armada, Republica de Chile*, (3012), 1961.
- A. J. Bechle, C. H. Wu, D. A. Kristovich, E. J. Anderson, D. J. Schwab, and A. B. Rabinovich. Meteotsunamis in the Laurentian Great Lakes. *Scientific Reports*, 6(1):37832, 2016.
- D. Beigt, G. Villarosa, E. A. Gómez, and C. Manzoni. Subaqueous landslides at the distal basin of Lago Nahuel Huapi (Argentina): Towards a tsunami hazard evaluation in northern Patagonian lakes. *Geomorphology*, 268:197–206, 2016.
- E. Chapron, D. Ariztegui, S. Mulsow, G. Villarosa, M. Pino, V. Outes, E. Juvignié, and E. Crivelli. Impact of the 1960 major subduction earthquake in northern Patagonia (Chile, Argentina). *Quaternary International*, 158(1):58–71, 2006.
- J. Darbyshire and S. Ishiguro. Tsunamis. *Nature*, 180(4577):150–150, 1957.
- P. G. Drazin and R. S. Johnson. *Solitons: an introduction*, volume 2. Cambridge University Press, 1989.
- F. Evers, V. Heller, H. Fuchs, W. Hager, and R. Boes. *Landslide-generated Impulse Waves in Reservoirs: Basics and Computation*. VAW-Mitteilung, volume 254. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, 2019a.
- F. M. Evers, W. H. Hager, and R. M. Boes. Spatial Impulse Wave Generation and Propagation. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 145(3):1–15, 2019b. doi: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000514.
- H. Fuchs and R. Boes. Berechnung felsrutschinduzierter Impulswellen im Vierwaldstättersee. *Wasser Energie Luft*, 102(3):215 – 221, 2010. ISSN 0377-905X. doi: 10.3929/ethz-b-000256996.
- V. H. Garduño-Monroy, D. C. Soria-Caballero, I. Israde-Alcántara, V. M. Hernández Madrigal, A. Rodríguez-Ramírez, M. Ostroumov, M. Á. Rodríguez-Pascua, A. Chacon-Torres, and J. C. Mora-Chaparro. Evidence of tsunami events in the paleolimnological record of Lake Patzcuaro, Michoacán, Mexico. *Geofísica internacional*, 50(2):147–161, 2011.
- S. Girardclos, O. T. Schmidt, M. Sturm, D. Ariztegui, A. Pugin, and F. S. Anselmetti. The 1996 AD delta collapse and large turbidite in Lake Brienz. *Marine Geology*, 241(1-4):137–154, 2007.
- J. Goff, Y. Ebina, K. Goto, and J. Terry. Defining tsunamis: Yoda strikes back? *Earth-science reviews*, 159:271–274, 2016.
- D. G. Goring and F. Raichlen. Tsunamis—the propagation of long waves onto a shelf. 1978.
- J. L. Hammack. A note on tsunamis: their generation and propagation in an ocean of uniform depth. *Journal of Fluid Mechanics*, 60(4):769–799, 1973.

- J. L. Hammack Jr and F. Raichlen. Tsunami generation and propagation. In *Coastal Engineering 1972*, pages 2589–2608. 1972.
- C. B. Harbitz, F. Løvholt, and H. Bungum. Submarine landslide tsunamis: how extreme and how likely? *Natural Hazards*, 72:1341–1374, 2014.
- V. Heller. *Landslide generated impulse waves: Prediction of near field characteristics*. PhD thesis, ETH Zurich, 2007.
- V. Heller and W. Hager. Wave types of landslide generated impulse waves. *Ocean Engineering*, 38(4):630–640, 2011. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.12.010>.
- V. Heller and W. H. Hager. Impulse product parameter in landslide generated impulse waves. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 136(3):145–155, 2010.
- V. Heller and W. H. Hager. A universal parameter to predict subaerial landslide tsunamis? *Journal of Marine Science and Engineering*, 2(2):400–412, 2014.
- V. Heller and G. Ruffini. A critical review about generic subaerial landslide-tsunami experiments and options for a needed step change. *Earth-Science Reviews*, page 104459, 2023.
- V. Heller, W. H. Hager, and H.-E. Minor. *Landslide generated impulse waves in reservoirs: Basics and computation*, volume 211. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 2009.
- M. Hilbe and F. S. Anselmetti. Signatures of slope failures and river-delta collapses in a perialpine lake (lake lucerne, switzerland). *Sedimentology*, 61(7):1883–1907, 2014.
- A. Huber and A. Chervet. Mögliche Auswirkungen des Absturzes einer Felsmasse in den Klöntalersee beim Bärentritt - Bericht über die Abschätzung der Schwallwellenhöhen. 1988.
- K. Kremer, G. Simpson, and S. Girardclos. Giant lake geneva tsunami in ad 563. *Nature Geoscience*, 5(11):756–757, 2012.
- K. Kremer, F. S. Anselmetti, F. M. Evers, J. Goff, and V. Nigg. Freshwater (paleo)tsunamis – a review. *Earth-Science Reviews*, 212:103447, 2021. doi: [10.1016/j.earscirev.2020.103447](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103447).
- H.-Y. Lo, Y. S. Park, and P. L.-F. Liu. On the run-up and back-wash processes of single and double solitary waves — an experimental study. *Coastal Engineering*, 80:1–14, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.05.001>.
- P. A. Madsen, D. R. Fuhrman, and H. A. Schäffer. On the solitary wave paradigm for tsunamis. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C12), 2008.
- C. Melo and S. Sharma. Seismic coefficients for pseudostatic slope analysis. In *13th World conference on earthquake engineering*, volume 369, page 15. Vancouver Canada, 2004.
- B. Minasny and A. McBratney. Chapter 12 latin hypercube sampling as a tool for digital soil mapping. In P. Lagacherie, A. McBratney, and M. Voltz, editors, *Digital Soil Mapping*, volume 31 of *Developments in Soil Science*, pages 153–606. Elsevier, 2006. doi: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(06\)31012-4](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(06)31012-4).
- N. Morgenstern and V. Price. A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces. *The Computer Journal*, 9(4):388–393, 1967.
- V. Nigg, P. Bacigaluppi, D. F. Vetsch, H. Vogel, K. Kremer, and F. S. Anselmetti. Shallow-water tsunami deposits: Evidence from sediment cores and numerical wave propagation of the 1601 ce lake lucerne event. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(12):e2021GC009753, 2021.

- R. Paris, A. D. Switzer, M. Belousova, A. Belousov, B. Ontowirjo, P. L. Whelley, and M. Ulvrova. Volcanic tsunamis: a review of source mechanisms, past events and hazards in southeast asia (indonesia, philippines, papua new guinea). *Natural Hazards*, 70:447–470, 2014.
- T. Parsons. *Enciclopedia historica centenaria de Bariloche*. 2002.
- N. J. Roberts, R. J. McKillop, M. S. Lawrence, J. F. Psutka, J. J. Clague, M.-A. Brideau, and B. C. Ward. Impacts of the 2007 landslide-generated tsunami in chehalis lake, canada. *Landslide Science and Practice: Volume 6: Risk Assessment, Management and Mitigation*, pages 133–140, 2013.
- M. Saderra Masó. *Volcanoes and seismic centers of the Philippine Archipelago*, volume 3. Department of Commerce and Labor, Bureau of the Census, 1904.
- M. Saderra Masó. *The Eruption of Taal Volcano: January 30, 1911*. Department of the Interior, Weather Bureau, Manila, 1911.
- M. Schnellmann, F. S. Anselmetti, D. Giardini, J. A. McKenzie, and S. N. Ward. Prehistoric earthquake history revealed by lacustrine slump deposits. *Geology*, 30(12):1131–1134, 2002. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<1131:PEHRBL>2.0.CO;2.
- H. Segur. The korteweg-de vries equation and water waves. solutions of the equation. part 1. *Journal of Fluid Mechanics*, 59(4):721–736, 1973.
- A. Shynkarenko, K. Kremer, S. Stegmann, P. Bergamo, A. M. Lontsi, A. Roesner, S. Hammerschmidt, A. Kopf, and D. Fäh. Geotechnical characterization and stability analysis of subaqueous slopes in lake lucerne (switzerland). *Natural Hazards*, 113(1):475–505, 2022a.
- A. Shynkarenko, K. Kremer, S. Stegmann, A. M. Lontsi, A. Roesner, S. Hammerschmidt, A. Kopf, and D. Fäh. In-situ and laboratory geotechnical investigations (cptu, sediment coring) performed in lake lucerne (switzerland) in 2018–2020. Technical report, ETH Zurich, 2022b.
- A. Shynkarenko, C. Cauzzi, K. Kremer, P. Bergamo, A. M. Lontsi, P. Janusz, and D. Fäh. On the seismic response and earthquake-triggered failures of subaqueous slopes in swiss lakes. *Geophysical Journal International*, 235(1):566–588, 06 2023. doi: 10.1093/gji/ggad240. URL <https://doi.org/10.1093/gji/ggad240>.
- C. Siegenthaler, W. Finger, K. Kelts, and S. Wang. Earthquake and seiche deposits in Lake Lucerne, Switzerland. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 80:241–260, 1987.
- M. Strasser, M. Hilbe, and F. S. Anselmetti. Mapping basin-wide subaquatic slope failure susceptibility as a tool to assess regional seismic and tsunami hazards. *Marine Geophysical Research*, 32(1-2):331–347, 10 2011. doi: 10.1007/s11001-010-9100-2.
- M. Strupler, M. Hilbe, F. S. Anselmetti, A. J. Kopf, T. Fleischmann, and M. Strasser. Probabilistic stability evaluation and seismic triggering scenarios of submerged slopes in Lake Zurich (Switzerland). *Geo-Marine Letters*, 37(3):241–258, 2017. doi: 10.1007/s00367-017-0492-8.
- M. Strupler, L. Danciu, M. Hilbe, K. Kremer, F. S. Anselmetti, M. Strasser, and S. Wiemer. A subaqueous hazard map for earthquake-triggered landslides in Lake Zurich, Switzerland. *Natural Hazards*, 90(1):51–78, 2018. doi: 10.1007/s11069-017-3032-y.
- M. Strupler, F. S. Anselmetti, M. Hilbe, K. Kremer, and S. Wiemer. A workflow for the rapid assessment of the landslide-tsunami hazard in peri-alpine lakes. *Geological Society, London, Special Publications*, 500(1):81–95, 2020a. doi: 10.1144/SP500-2019-166.

- M. Strupler, P. Bacigaluppi, K. Kremer, D. Vetsch, F. S. Anselmetti, R. Boes, and S. Wiemer. Abschätzung der Gefährdung durch Tsunamis in perialpinen Seen infolge Unterwasserhangrutschungen. *Wasser Energie Luft*, 112(1):11–16, 2020b.
- M. Strupler, F. M. Evers, K. Kremer, C. Cauzzi, P. Bacigaluppi, D. F. Vetsch, R. M. Boes, D. Fäh, F. S. Anselmetti, and S. Wiemer. A Simplified Classification of the Relative Tsunami Potential in Swiss Perialpine Lakes Caused by Subaqueous and Subaerial Mass-Movements. *Frontiers in Earth Science*, 8:1–14, 2020c. doi: 10.3389/feart.2020.564783.
- M. Strupler, J. Schierjott, M. Bürgler, and D. F. Vetsch. Ansatz zur modellierung von see-tsunamis, ausgelöst durch terrestrische massenbewegungen. *Wasser Energie Luft*, 116(4):255–258, 2024.
- D. Vanzo, S. Peter, L. Vonwiller, M. Bürgler, M. Weberndorfer, A. Siviglia, D. Conde, and D. F. Vetsch. BASEMENT v3: A modular freeware for river process modelling over multiple computational backends. *Environmental Modelling and Software*, 143:105102, 2021. doi: 10.1016/j.envsoft.2021.105102.
- D. Vetsch, M. Bürgler, E. Gerke, S. Kammerer, D. Vanzo, and R. Boes. BASEMENT – Softwareumgebung zur numerischen Modellierung der Hydro- und Morphodynamik in Fließgewässern. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 72(7-8):281–290, 8 2020. doi: 10.1007/s00506-020-00677-6.
- S. Wiemer, L. Danciu, B. Edwards, M. Marti, D. Fäh, S. Hiemer, J. Wössner, C. Cauzzi, P. Kästli, and K. Kremer. Seismic Hazard Model 2015 for Switzerland. pages 1–163, 2016. doi: 10.12686/a2.
- H. Yeh, P. Liu, M. Briggs, and C. Synolakis. Propagation and amplification of tsunamis at coastal boundaries. *Nature*, 372(6504):353–355, 1994.