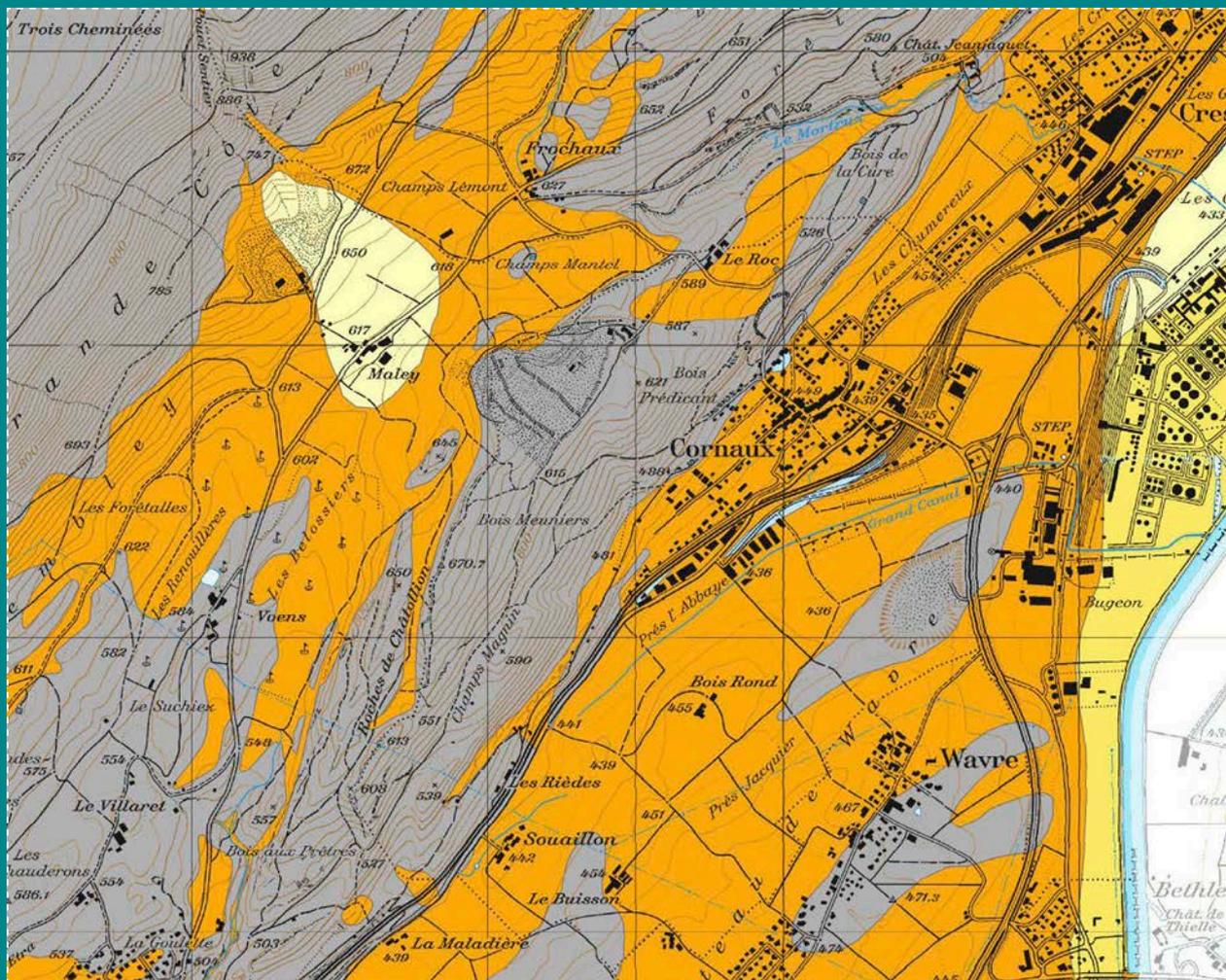


> Erdbeben: Karten der Baugrundklassen

Erstellung und Verwendung



> Erdbeben: Karten der Baugrundklassen

Erstellung und Verwendung

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Autoren

Joëlle Mayoraz, Geotechnisches Institut AG, Brig

Corinne Lacave, Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Carouge

Blaise Duvernay, Bundesamt für Umwelt, Bern

Begleitung

Donat Fäh, Schweizerischer Erdbebendienst, Zürich

Martin Koller, Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Carouge

Begleitung BAFU

Blaise Duvernay, Leiter der Koordinationsstelle des Bundes für Erdbebenvorsorge

Zitierung

Mayoraz J., Lacave C., Duvernay B. 2016: Erdbeben: Karten der Baugrundklassen. Erstellung und Verwendung. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1603: 48 S.

Sprachliche Bearbeitung

Jacqueline Dougoud, Zürich

Übersetzung

Barbara Brändli, Agentur der Dolmetscher- und Übersetzervereinigung (DÜV), Zürich

Gestaltung

Karin Nöthiger, 5443 Niederrohrdorf

Titelbild

Ausschnitt der Karte der Baugrundklassen des Kantons Neuenburg

Bildnachweis

S. 14: Thomas Wenk, Zürich

S. 18: Ministère de l'environnement et du développement durable, Paris, Frankreich

S. 19: oben: Swisstopo, Wabern; unten: Blaise Duvernay, Colombier

S. 20: Steve Taylor, Christchurch, New Zealand

PDF-Download

www.bafu.admin.ch/uw-1603-d

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

> Inhalt

Abstracts	5
Vorwort	7
Einführung	8

1 Seismologischer Kontext und Beschreibung der Phänomene	10
1.1 Erdbeben	10
1.2 Erdbebengefährdung und -risiko in der Schweiz	12
1.3 Standorteffekte	16
1.3.1 Impedanzkontrast	17
1.3.2 Felsgeometrie	17
1.3.3 Topografischer Standorteffekt	18
1.4 Induzierte Effekte	19
1.5 Fundamentalfrequenz des Bodens und Resonanz zwischen Boden und Bauwerk	21
1.6 Berücksichtigung der Standorteffekte	22
1.7 Berücksichtigung der induzierten Effekte	24
1.8 Bestandesaufnahme der Basisdaten zu den Standorteffekten in der Schweiz	24

2 Karten der Baugrundklassen	26
2.1 Definition der Baugrundklassen	26
2.2 Grundsätze der Erstellung und Verwendung von Karten der Baugrundklassen	28
2.3 Erforderliche Basisdaten	29
2.4 Methodik für die Kartenerstellung	29
2.5 Präsentation der Ergebnisse und Begleitdokumente	33
2.6 Behandlung von Zonen mit einem Potenzial für induzierte Effekte	34
2.6.1 Überprüfung des Bodenverflüssigungspotenzials	34
2.6.2 Überprüfung des Thixotropiepotenzials	35
2.6.3 Überprüfung des Potenzials von Massenbewegungen	35

Anhang	36
A1 Definition und Verwendung von Antwortspektren	36
A2 Interaktive Karten auf den Geodatenportalen des Bundes	39
A3 Bodenverflüssigungspotenzial	40
A4 Empfehlungen für die Karten der Baugrundklassen, die vor 2014 erstellt wurden	42

Literatur	45
Verzeichnisse	46
Glossar	47

> Abstracts

This publication covers the effects of local geology on seismic action for the design or verification of structures. It mainly presents a method for compiling maps of the seismic foundation soil classes in accordance with the SIA 261 «Actions on Structures» building code. Decision criteria are also proposed to facilitate the evaluation of the relevance of site studies or seismic spectral microzonation. This publication is primarily aimed at the cantonal authorities responsible for natural hazards along with seismologists, geologists and geotechnicians. It also contains important information for civil engineers and natural hazards experts.

Diese Publikation befasst sich mit der Berücksichtigung der lokalen Geologie bei der Bestimmung der Erdbebeneinwirkungen für die Bemessung und Überprüfung von Bauwerken. Sie erläutert insbesondere eine Methode zur Erstellung und Verwendung von Karten der seismischen Baugrundklassen nach Norm SIA 261 «Einwirkungen auf Tragwerke». Ebenfalls vorgeschlagen werden Entscheidungshilfen zur Beurteilung der Relevanz von Standortstudien oder spektralen seismischen Mikrozonierungsstudien. Die Publikation richtet sich primär an die für den Bereich Naturgefahren zuständigen Kantonsbehörden sowie an Fachleute in den Bereichen der Seismologie, der Geologie und der Geotechnik. Auch Fachleute in den Bereichen des Bauingenieurwesens und des Schutzes vor Naturgefahren finden darin wichtige Informationen.

Cette publication traite de la prise en compte de la géologie locale dans la détermination des sollicitations sismiques pour le dimensionnement et la vérification d'ouvrages. Elle présente en particulier une méthodologie pour l'établissement et l'utilisation de cartes de classes de sols de fondation sismiques selon la norme de construction SIA 261 «Actions sur les structures porteuses». Des aides à la décision sont également proposées pour évaluer la pertinence d'études de sites ou de microzonages sismiques spectraux. La publication s'adresse en premier lieu aux autorités cantonales responsables en matière de dangers naturels ainsi qu'aux sismologues, aux géologues et aux géotechniciens. Les ingénieurs civils et les spécialistes en dangers naturels y trouveront également des informations importantes.

La presente pubblicazione illustra come tenere conto della geologia locale nella determinazione delle sollecitazioni sismiche per il dimensionamento e la verifica di opere di costruzione. In particolare, presenta una metodologia per l'elaborazione e l'impiego di carte delle classi di suolo di fondazioni sismiche secondo la norma di costruzione SIA 261 «Azioni sulle strutture portanti». Fornisce altresì degli strumenti ausiliari per l'adozione di decisioni nell'ambito della valutazione della pertinenza di studi di siti o di microzonazioni sismiche spettrali. La pubblicazione è destinata principalmente alle autorità cantonali responsabili in materia di pericoli naturali come pure a sismologi, geologi e geotecnici, ma contiene informazioni importanti anche per ingegneri civili ed esperti di pericoli naturali.

Keywords:

Earthquakes, site effects, induced effects, map of foundation soil classes, site studies, seismic spectral microzonation, building code SIA 261

Stichwörter:

Erdbeben, Standorteffekte, sekundäre Ereignisse, Karte der Baugrundklassen, Standortstudien, spektrale seismische Mikrozonierung, Norm SIA 261

Mots-clés:

Tremblements de terre, effets de site, effets induits, cartes de classes de sol de fondation, études de sites, microzonage sismique spectral, norme SIA 261

Parole chiave:

Terremoti, effetti del sito, effetti indotti, carte delle classi di suolo di fondazioni, studi di siti, microzonazione sismica spettrale, norma SIA 261

> Vorwort

Die Norm SIA 261 «Einwirkungen auf Tragwerke» führte im Jahr 2003 sechs neue Baugrundklassen zur Bestimmung der Erdbebeneinwirkungen ein. Ab 2004 begannen Kantone, Karten der Baugrundklassen als Hilfsmittel für die Anwendung der Baunormen zu erarbeiten. Um die Erstellung solcher Karten zu vereinheitlichen und methodische Grundlagen für weitergehende Studien zu liefern (Standortstudien und spektrale seismische Mikrozonierungsstudien), publizierte das ehemalige Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) im Jahr 2004 die Richtlinien «Verfahren zur Erstellung und Verwendung von Mikrozonierungsstudien in der Schweiz».

Auf Basis der BWG-Richtlinien haben bisher 15 Kantone Karten der Baugrundklassen erstellt, die entweder teilweise oder flächendeckend ihr Kantonsgebiet abdecken. Weiter wurden in 5 Kantonen gezielt spektrale seismische Mikrozonierungen erarbeitet. Insgesamt verfügen 17 von 26 Kantonen über die eine oder andere Art von Daten. Um den Zugang zu diesen Daten zu erleichtern, stellt das BAFU auf seiner Web-GIS-Applikation alle bestehenden Karten der Baugrundklassen zur Verfügung sowie alle Perimeter, für welche spektrale seismische Mikrozonierungen vorhanden sind.

Der vorliegende methodologische Leitfaden ersetzt die BWG-Richtlinie von 2004, die aufgrund der Revision der Norm SIA 261 im Jahr 2014 und wegen der Fortschritte in Wissen und Praxis in den vergangenen zehn Jahren revisionsbedürftig geworden ist. Dieser Leitfaden richtet den Fokus auf die Erstellung von Karten der Baugrundklassen und deckt die methodischen und normativen Aspekte von Standortstudien und spektralen seismischen Mikrozonierungsstudien nicht ab.

Mit der Veröffentlichung dieses Leitfadens möchte das BAFU – als Fachbehörde des Bundes im Bereich der Erdbebenvorsorge – die Grundlagen zur Bestimmung der lokalen Erdbebengefährdung in der Schweiz fördern. Das BAFU wird in Zukunft wie bis anhin die Erstellung von kantonalen Karten der Baugrundklassen methodisch und finanziell unterstützen, dies mit dem Ziel, langfristig eine nationale Abdeckung zu erreichen. Die Kantone, welche neue Kartenprojekte oder Aktualisierungen bestehender Karten vorsehen, sind eingeladen, mit der Koordinationsstelle des Bundes für Erdbebenvorsorge beim BAFU Kontakt aufzunehmen (www.bafu.admin.ch/erdbeben).

Josef Hess
Vizedirektor
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

> Einführung

Die Intensität und die Dauer seismischer Erschütterungen hängen in sehr hohem Masse von den geotechnischen Eigenschaften des lokalen Baugrunds ab. Diese Eigenschaften können ein Erdbebensignal unter Umständen bereits auf kurze Distanz erheblich verändern. Deshalb ist es wichtig, dass bei der Bestimmung der seismischen Einwirkung, die als Basis für die Bemessung oder Überprüfung von Bauwerken dient, die verschiedenen Phänomene, welche eine Verstärkung des Erdbebensignals bewirken, quantifiziert werden können. Diese Phänomene werden auch als Standorteffekte bezeichnet.

Zudem können Erdbeben bei sogenannten sensiblen Böden induzierte Effekte wie eine Verflüssigung von wassergesättigten sandigen Böden, eine Thixotropie von sensiblen Tonen oder Bodeninstabilitäten verursachen. Bei einem als sensibel eingestuften Baugrund muss das Potenzial solcher Phänomene in Abhängigkeit vom Niveau der seismischen Einwirkungen und von den Bodeneigenschaften abgeklärt werden. Ist das Potenzial induzierter Effekte nachgewiesen, muss dies bei einem Bauprojekt durch spezifische Untersuchungen und Schutzmassnahmen berücksichtigt werden.

Zur Berücksichtigung von Standorteffekten hat die Norm SIA 261 fünf Baugrundklassen (A bis E) definiert, denen elastische Antwortspektren zugeordnet werden, welche der Bestimmung der seismischen Einwirkung dienen. Eine sechste Baugrundklasse (F) wurde für diejenigen Baugründe definiert, die von den fünf grundlegenden Baugrundklassen nicht abgedeckt sind. Bei solchen Baugründen sind zur Beurteilung des spezifischen Antwortspektrums Zusatzstudien erforderlich. Die Norm SIA 261 sieht auch vor, dass die den Baugrundklassen A bis E zugeordneten elastischen Antwortspektren durch Antwortspektren ersetzt werden können, die bei spezifischen Untersuchungen am Standort (Standortstudien) oder im betreffenden Gebiet (spektrale seismische Mikrozonierung) bestimmt wurden.

Der vorliegende methodologische Leitfaden verfolgt in erster Linie das Ziel, Grundkenntnisse über die wichtigsten Phänomene im Zusammenhang mit Standorteffekten und induzierten Effekten zu vermitteln, die Erstellung von Karten der Baugrundklassen nach einem bestimmten Standard zu ermöglichen und die Prinzipien der Anwendung solcher Karten zu veranschaulichen. Der Leitfaden richtet sich an die kantonalen Behörden als potenzielle Initiantinnen von Projekten, welche die Erstellung von Karten der Baugrundklassen oder Studien zur spektralen seismischen Mikrozonierung zum Ziel haben. Weitere Adressaten sind Fachleute in den Bereichen der Seismologie, der Geologie und der Geotechnik, die solche Arbeiten in Zusammenarbeit durchführen.

Das erste Kapitel beschreibt den allgemeinen seismischen Kontext der Schweiz sowie die verschiedenen Arten von Standorteffekten und induzierten Effekten und erläutert das Konzept des elastischen Antwortspektrums. Das Kapitel bietet auch Entscheidungshilfen zur Bestimmung der Relevanz von Standortstudien oder spektralen seismischen Mikrozonierungsstudien. Das zweite Kapitel befasst sich mit den Definitionen

der Baugrundklassen gemäss Norm SIA 261, den Grundsätzen der Erstellung und Verwendung von Karten der Baugrundklassen, den erforderlichen Basisdaten, der Methodik zur Erstellung dieser Karten sowie mit den erforderlichen Begleitdokumenten. Ausserdem sind Zusatzinformationen über Untersuchungen enthalten, die notwendig werden, wenn ein Baugrund der Baugrundklasse F zugewiesen wurde oder sich als potenziell sensibel betreffend induzierte Effekte herausstellt.

Anhang A1 enthält ergänzende Erläuterungen in Bezug auf die Definition und die Anwendung von Antwortspektren bei der Bestimmung der seismischen Einwirkung gemäss Norm SIA 261. In Anhang A2 werden die Geodatenportale des Bundes kurz vorgestellt, auf denen die Angaben zu den Karten der Baugrundklassen und zu den spektralen seismischen Mikrozonierungen konsultiert werden können. Anhang A3 bietet Zusatzinformationen über das Phänomen der Bodenverflüssigung. Anhang A4 stellt die bei der Revision der Norm SIA 261 im Jahre 2014 vorgenommenen Änderungen der Baugrundklassendefinitionen vor sowie die Konsequenzen dieser Änderungen für bestehende Karten der Baugrundklassen.

1 > Seismologischer Kontext und Beschreibung der Phänomene

Die Erdbebengefährdung der Schweiz wird als mässig beurteilt. Starke Erdbeben bis zu einer Magnitude 7 können zwar auftreten, dies aber viel seltener als in Ländern mit einer hohen Erdbebengefährdung. Die Intensität und die Dauer der Erschütterungen bei einem Erdbeben hängen in sehr hohem Masse von den geotechnischen Eigenschaften des lokalen Baugrunds ab. Deshalb ist es wichtig, dass bei der Bestimmung der seismischen Einwirkung, die als Basis für die Bemessung oder Überprüfung von Bauwerken dient, die Verstärkung (Amplifikation) des Erdbebensignals durch die lokalen geologischen Gegebenheiten quantifiziert wird. Dazu gibt es verschiedene Ansätze.

1.1 Erdbeben

Die Erdkruste besteht aus mehreren grossen tektonischen Platten und einer Vielzahl kleiner Plattenfragmente. Diese Platten driften aufeinander zu, auseinander oder aneinander vorbei, und dies mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, die von ein paar Millimetern bis zu mehreren Zentimetern pro Jahr reichen können. An der Grenzfläche der Platten werden die relativen Verschiebungen behindert. Anfänglich wird die Bewegung der Platten blockiert, und es kommt langsam zu einem Spannungsaufbau und zu Verformungen in den Gesteinsmassen. Überschreitet die aufgestaute Spannung die Widerstandsfähigkeit des Gesteins entlang einer Störung, führt dies zu einer abrupten und stossweisen Verschiebung, die die akkumulierte Energie ins Gestein freisetzt. Die so freigesetzte seismische Energie breitet sich wellenförmig durch die Erde aus und löst Erschütterungen aus, die zu Recht als Erdbeben bezeichnet werden (Abb. 1).

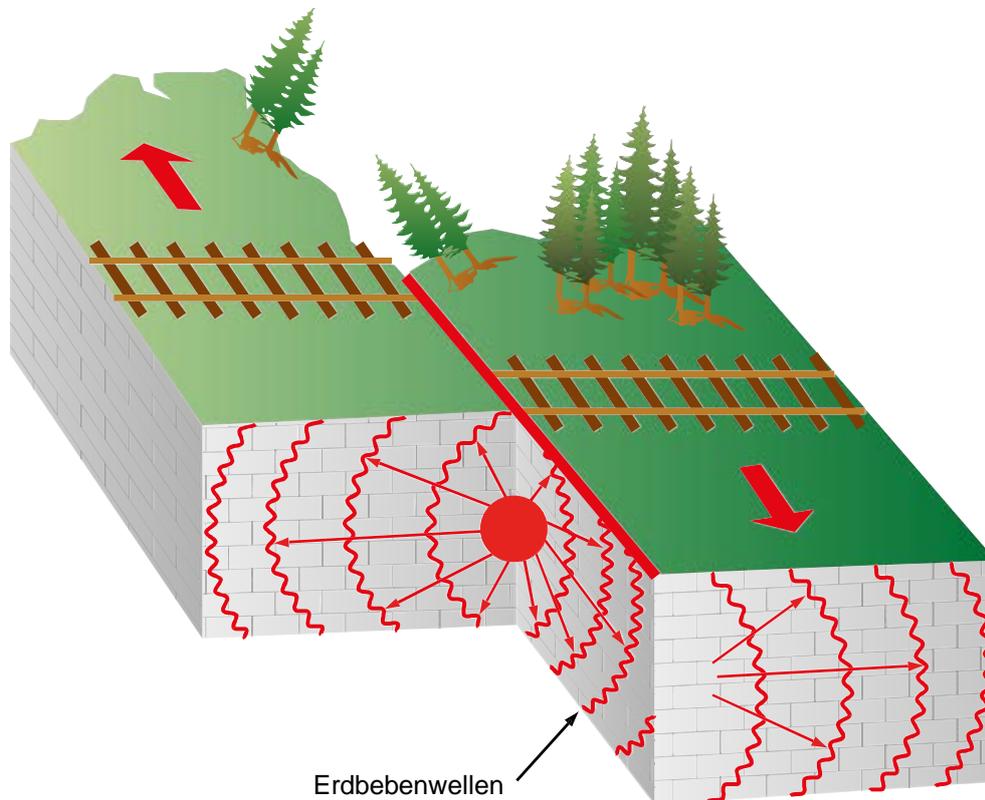
Bei einem Erdbeben kommt es zu schnellen Bewegungen des Bodens in alle Richtungen, wobei die vertikalen Bewegungen in der Regel von geringerem Ausmass sind als in der Horizontalen. Die Bodenbewegungen versetzen Gebäude in Schwingung, die je nach Intensität des Bebens und nach Konstruktionsweise mehr oder weniger stark beschädigt werden. Bei einem Beben, wie es sich in der Schweiz ereignen könnte, beträgt die typische Dauer von Erschütterungen mit starker Amplitude ungefähr 5 bis 10 Sekunden.

Die von einem Erdbeben ausgelösten mechanischen Wellen werden mit einem Seismografen aufgezeichnet. Auf dem Seismogramm, welches das Erdbebensignal darstellt, kann der Zeitpunkt des Eintreffens der Wellen und deren Amplituden abgelesen werden, um einerseits den Erdbebenherd zu lokalisieren und andererseits dessen Stärke (Magnitude) zu berechnen. Die auf der Magnitude-Skala gemessene Erdbebenstärke steigt exponentiell an. Die Erhöhung um eine Magnitude entspricht der Freisetzung

von etwa 30-mal mehr seismischer Energie. Ein Beben mit einer Magnitude 7 setzt somit etwa 900-mal mehr Energie frei als ein Ereignis mit einer Magnitude 5.

Abb. 1 > Erdbebenmechanismus

Ein Erdbeben ist das Ergebnis einer Energiefreisetzung durch eine abrupte relative Verschiebung entlang einer Bruchfläche (Störung).



BWG 2004

Während es sich bei der Magnitude eines Erdbebens um eine instrumentelle Bestimmung der durch das Beben freigesetzten Energie handelt, lässt sich die Intensität der Erschütterungen lokal durch eine Beurteilung der Auswirkungen des Erdbebens an der Oberfläche (Registrierung der Bodenbewegungen, Schäden) einschätzen. In Europa wird zur Bestimmung der Intensität die Europäische Makroseismische Skala (EMS-98) verwendet. Diese Skala ist in Intensitätsgrade von I bis XII unterteilt. Intensitätsgrad I entspricht einem nicht fühlbaren Erdbeben. Eine Intensität von IV bis V deckt stark wahrnehmbare Erschütterungen und sehr geringe Schäden ab (Haarrisse, fallende Objekte); bei einer Intensität VI wird von leichten Schäden an Gebäuden ausgegangen, während bei einer Intensität VII mittlere Gebäudeschäden auftreten. Bei Intensitätsgrad VIII treten schwere Gebäudeschäden und bei IX Zerstörungen auf. Intensitätsgrad XII steht für eine vollständige Verwüstung.

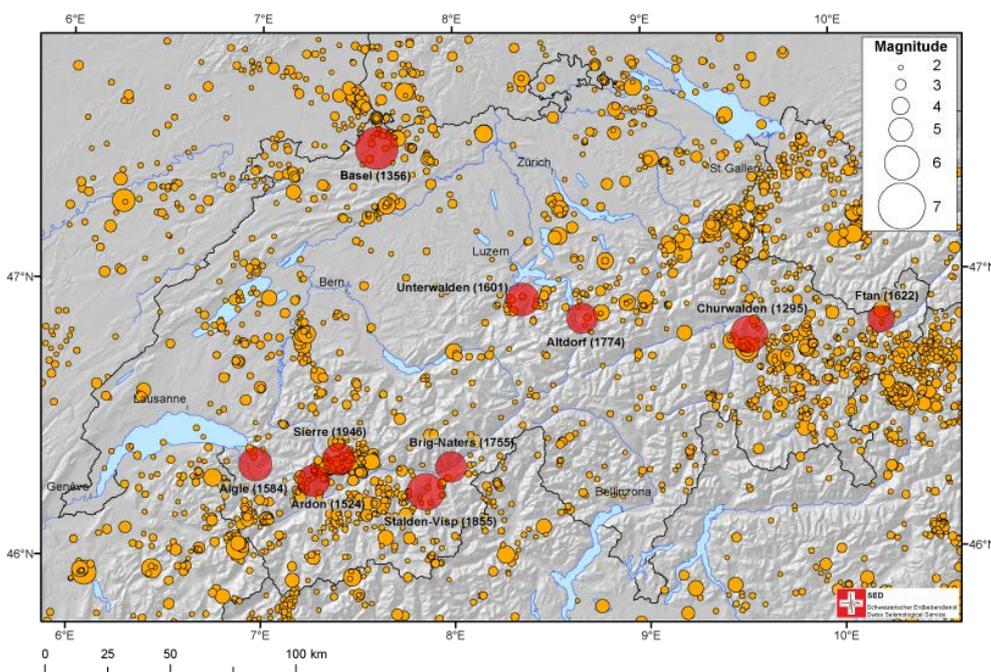
1.2 Erdbebengefährdung und -risiko in der Schweiz

Der 1914 vom Bundesrat geschaffene Schweizerische Erdbebendienst (SED) überwacht mit seinem Messnetz die seismische Aktivität in der Schweiz. Anhand von historischen Belegen zu Erdbeben, von Jahresberichten der 1879 gegründeten nationalen Erdbebenkommission sowie von Daten seines instrumentellen Netzwerks hat der SED einen Erdbebenkatalog der Schweiz (ECOS) erstellt. Dieser umfasst den Zeitraum von 250 n. Chr. bis heute.

Die Erdbebengefährdung wird weltweit in verschiedene Kategorien eingeteilt. Je nach Region wird die Gefährdung als schwach, mässig, hoch oder sehr hoch eingestuft. Die Erdbebengefährdung der Schweiz wird als mässig beurteilt. Starke Erdbeben bis zu einer Magnitude 7 können zwar auftreten, sind aber viel seltener als in Ländern mit einer hohen Erdbebengefährdung wie zum Beispiel Italien oder die Türkei.

Abb. 2 > Seismische Aktivität in der Schweiz

Karte der 10 stärksten historischen Erdbeben in der Schweiz (rot) sowie der zwischen 1975 und 2012 registrierten Beben ab einer Magnitude 2 (orange).



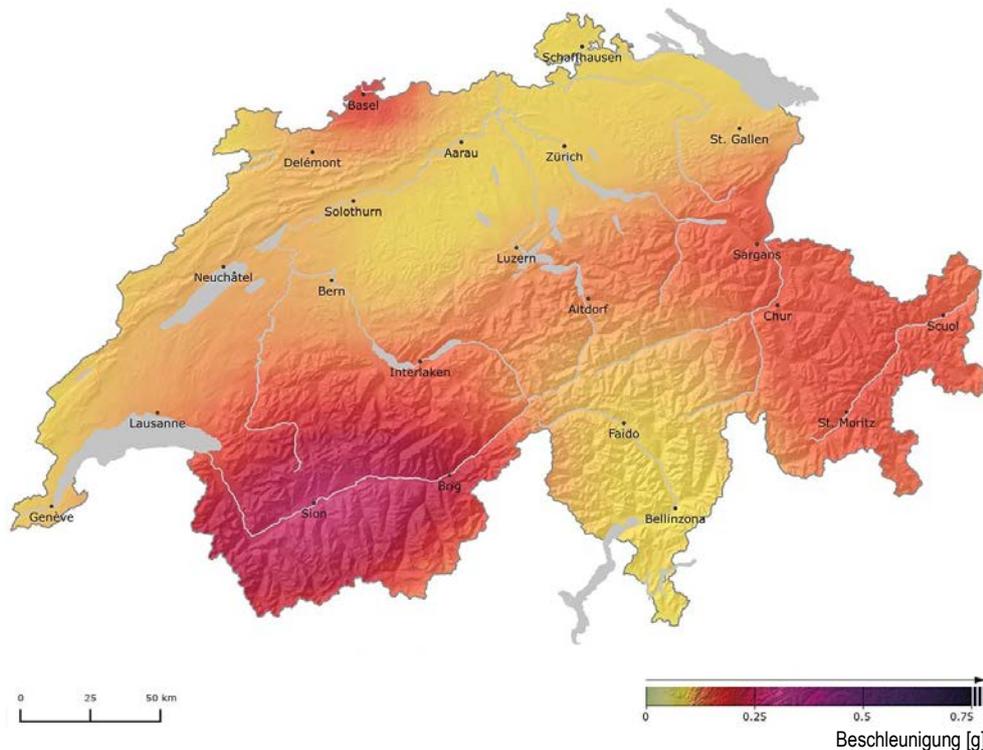
Quelle: SED

In der Schweiz bebzt die Erde durchschnittlich 500- bis 800-mal pro Jahr, doch nur 10 bis 15 Ereignisse sind für den Menschen wahrnehmbar. Seit dem 13. Jahrhundert wurden in der Schweiz zwölf Erdbeben dokumentiert, die grosse Schäden verursachten, insbesondere jene von 1946 in Siders (Magnitude 5,8), von 1601 in der Inner-schweiz (Magnitude 5,9) und von 1356 in Basel (Magnitude 6,6). Für einen Zeitraum von 50 Jahren schätzen die Seismologen die Wahrscheinlichkeit eines Erdbebens mit einer Magnitude 5,5 mit Schäden auf lokaler Ebene auf 80 %, diejenige eines Bebens

mit einer Magnitude 6 auf regionaler Ebene auf 40 % und die eines überregionalen zerstörerischen Starkbebens mit einer Magnitude 7 auf 5 %. Von Erdbeben sind zwar sämtliche Regionen betroffen, doch einige Regionen wie das Wallis, die Region Basel, die Innerschweiz, das Engadin und das St. Galler Rheintal haben eine höhere seismische Aktivität und somit auch eine höhere Erdbebengefährdung. In Abbildung 2 sind die zehn stärksten historischen Erdbeben in der Schweiz sowie die zwischen 1975 und 2012 registrierten Beben, welche eine Magnitude 2 erreichen, auf einer Karte aufgeführt.

Abb. 3 > Beispiel einer Karte der Erdbebengefährdungskarte der Schweiz

Karte der Erdbebengefährdung mit der Darstellung der horizontalen spektralen Beschleunigung für eine Grundfrequenz von 5Hz (Medianwert des Antwortspektrums) auf einem Referenzfels für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren.



Quelle: SED, 2015

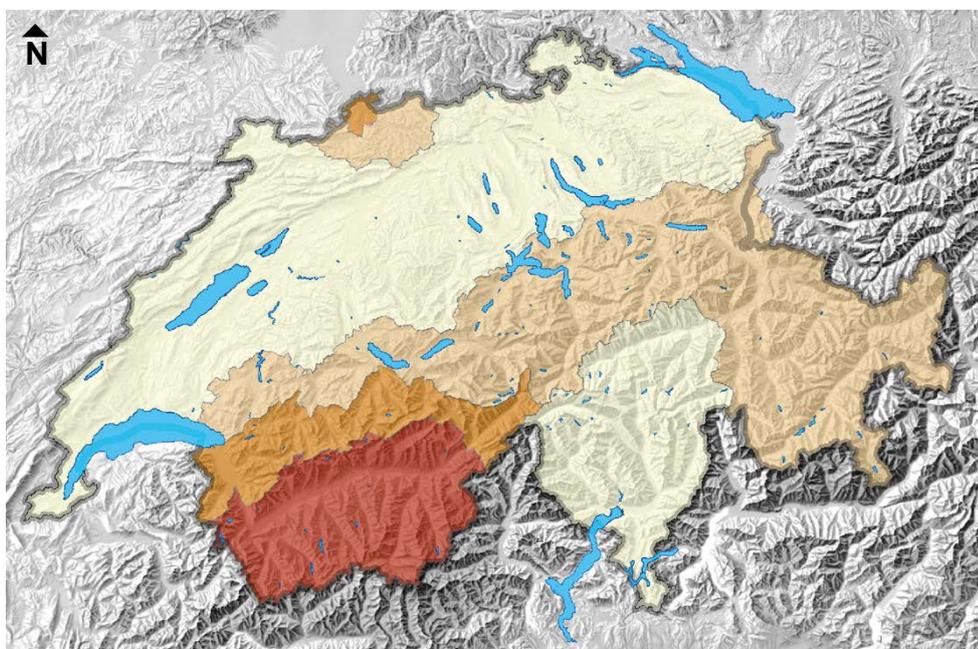
Die Erstellung und regelmässige Überarbeitung der seismischen Gefährdungsabschätzung zählt zu den Hauptaufgaben des Schweizerischen Erdbebendienstes. Wissenschaftlich gesehen lässt sich die Erdbebengefährdung als die Wahrscheinlichkeit definieren, mit der in einem Referenzzeitraum an einem bestimmten Ort ein bestimmter Wert eines Parameters der Bodenbewegung (z. B. die Horizontalbeschleunigung) überschritten wird. Die Gefährdung bezieht sich auf einen Referenzfels und berücksichtigt den Einfluss der Standorteffekte nicht. Um die seismische Gefährdung zu bestimmen, greifen Seismologen zurück auf Informationen zur Erdbebengeschichte, zur Tektonik und zur Geologie sowie auf mit Instrumenten registrierte Erdbeben, historische Schadensbeschreibungen und Modelle der Wellenausbreitung bei Erdbe-

ben. Die Erdbebengefährdung wird oft anhand von Karten der Bodenbeschleunigung oder der spektralen Beschleunigung (Antwortspektren) auf einem Referenzfels für verschiedene Eintretenswahrscheinlichkeiten oder Wiederkehrperioden dargestellt.

Ein Beispiel einer Erdbebengefährdungskarte zeigt Abbildung 3. Die Baunormen definieren auf der Grundlage solcher Karten Erdbebenzonen, denen ein Gefährdungsniveau für die Bemessung von Bauwerken zugeordnet wird (siehe Abb. 4).

Abb. 4 > Karte der Erdbebenzonen gemäss Norm SIA 261

Jeder Erdbebenzone wird ein Gefährdungsniveau für die Bemessung von Bauwerken zugeordnet. Gemäss Norm SIA 261 ist das Gefährdungsniveau von Zone 3b 2,7-mal höher als von Zone 1.



Erdbebenzone nach SIA 261 (2014)

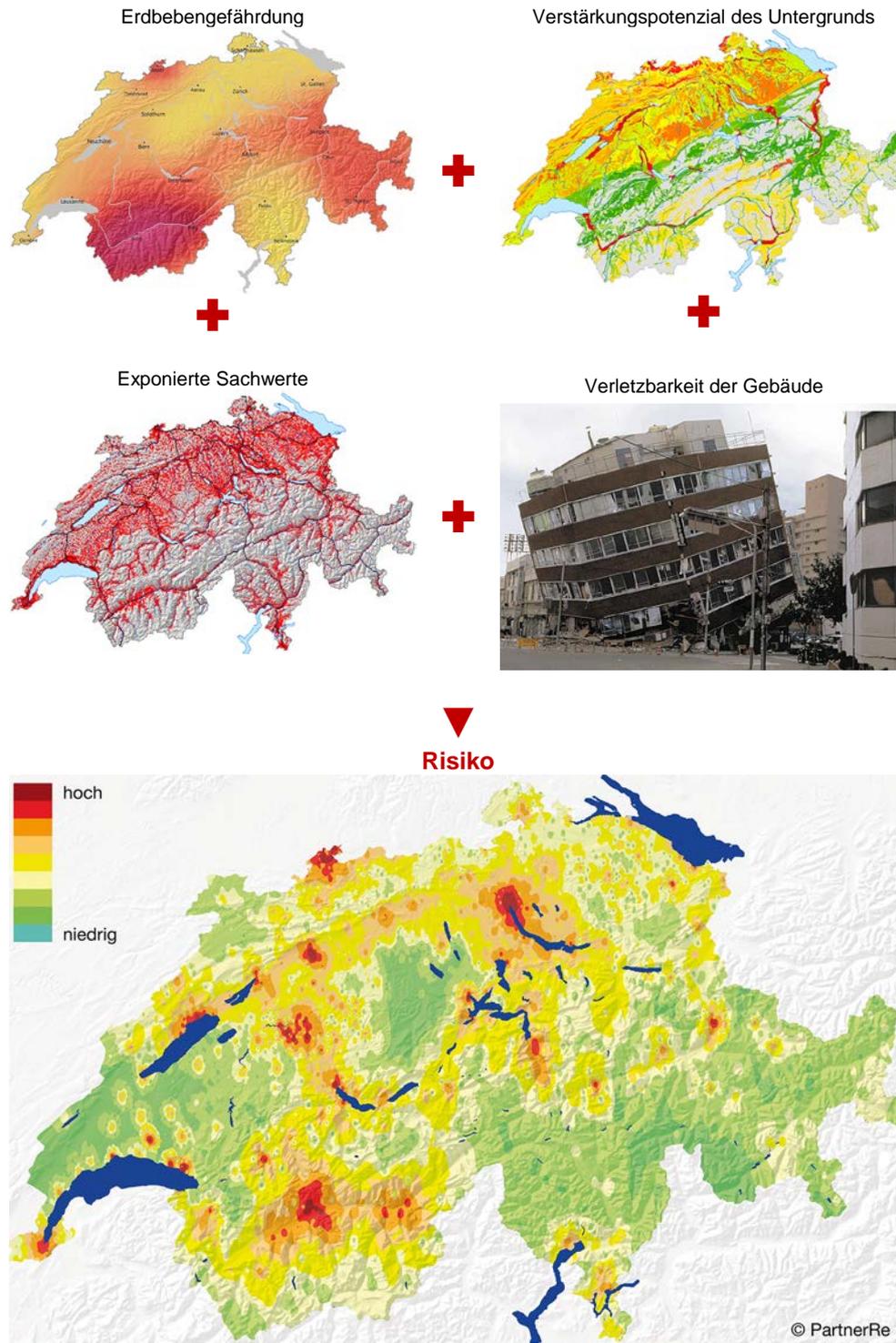


Quelle: SIA, Anpassungen BAFU

Das mit Erdbebenschäden verbundene Risiko wird berechnet aus einer Kombination von seismischer Gefährdung auf einem Referenzfels, dem Verstärkungspotenzial des lokalen Untergrunds, der exponierten Sachwerte und deren Verletzbarkeit. Abbildung 5 veranschaulicht die qualitative Verteilung des finanziellen Erdbebenrisikos in Bezug auf die Beschädigung von Gebäuden bei einer Gefährdung mit einer Wiederkehrperiode von 500 Jahren. Sie zeigt sehr gut, dass sich das Risiko nicht ausschliesslich auf die Erdbebenzonen mit der höchsten Gefährdung wie beispielsweise Basel und das Wallis beschränkt, sondern aufgrund der hohen Besiedlungsdichte und Sachwertkonzentration auch die grossen Ballungszentren betrifft.

Abb. 5 > Erdbebenrisiko in der Schweiz

Geografische Verteilung des Erdbebenrisikos in Bezug auf Gebäudeschäden



Quelle: SED, CatFocus© PartnerRe

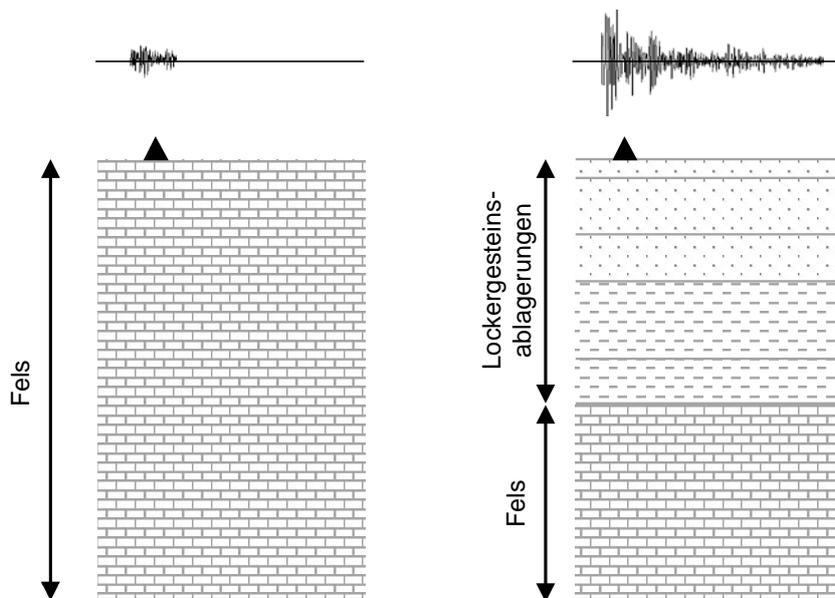
1.3

Standorteffekte

Die lokalen geologischen und topografischen Verhältnisse sind verantwortlich für teilweise sehr grosse und auf kurze Distanz auftretende Änderungen in der Amplitude, dem Frequenzspektrum und der Dauer der Bodenbewegung bei Erdbeben. Diese als Standorteffekte bezeichneten Phänomene sind mindestens seit dem Mittelalter bekannt, als Sultan Bayezid II. nach dem Erdbeben von Istanbul 1509 den Bau von Häusern in Küstengebieten auf Lockergesteinsgrund verboten hatte. Dennoch dauerte es noch bis zu den 1980er-Jahren, bis die Seismologen im Anschluss an die Erdbeben von Mexiko City (1985) und von Loma-Prieta in der Bucht von San Francisco (1989) sich intensiv damit befassten. Es zeigte sich, dass die grosse Bandbreite der beobachteten Schäden, die vom gleichen Beben verursacht wurden und in unmittelbar benachbarten Gebieten (in einigen hundert Metern Entfernung) auftraten, ausschliesslich der lokalen Geologie zuzuschreiben ist. Auch die Schweiz ist von solchen Standorteffekten betroffen, wie die durch die Erdbeben von Unterwalden vom 18. September 1601 verursachten Schäden in Luzern zeigen. Damals wurden die alten, auf den Molassehügeln errichteten Stadtviertel viel weniger stark in Mitleidenschaft gezogen als die Wohngebäude in Quartieren, die auf dem feinkörnigen Baugrund der Alluvialebene und der Uferzonen des Vierwaldstättersees errichtet worden waren.

Abb. 6 > Impedanzkontrast

Impedanzkontrast zwischen Felsuntergrund und Lockergesteinsablagerungen. Das Erdbebensignal an der Oberfläche von Lockergesteinsablagerungen hat eine grössere Amplitude und eine längere Dauer als das Signal auf dem Fels.



▲ Erdbebenaufzeichnung an der Oberfläche

1.3.1 Impedanzkontrast

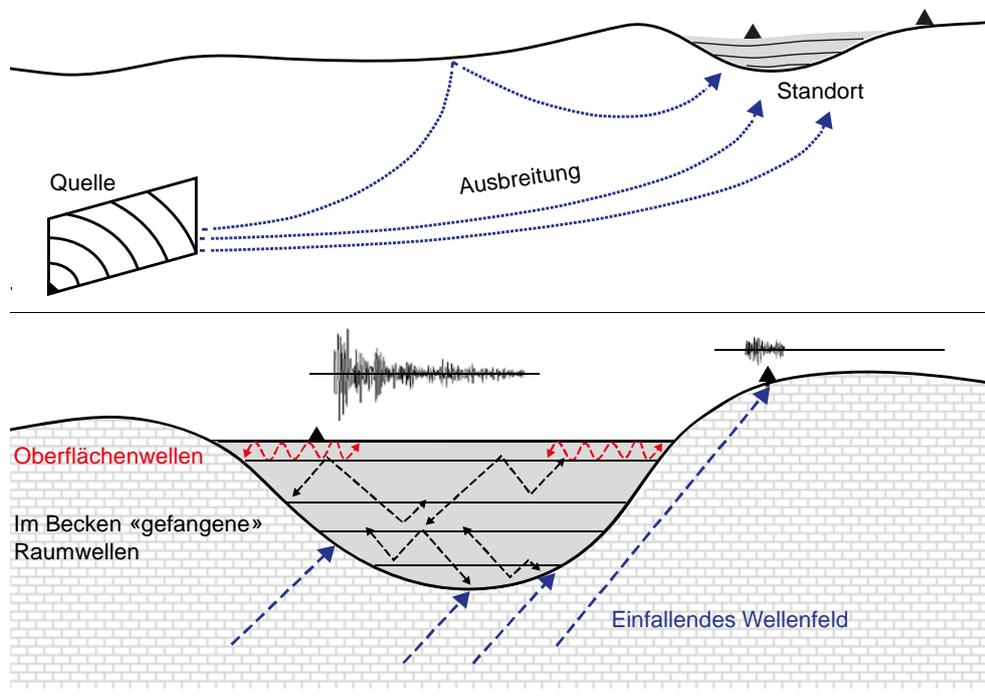
Eine wichtige Eigenschaft des Untergrunds ist der Impedanzkontrast zwischen Lockergesteinsablagerungen und dem viel kompakteren Felsuntergrund (Abb. 6). Dieser Kontrast bildet die Ursache von zwei Effekten: einer Erhöhung der Bodenbewegungsamplitude im Vergleich zu der einfallenden Bewegung an der Basis der Lockergesteinsablagerungen und einem Resonanzeffekt, bedingt durch das «Einfangen» der Wellen innerhalb der oberflächennahen Ablagerungen.

1.3.2 Felsgeometrie

Der weiter oben beschriebene Impedanzkontrast ist in Wirklichkeit nur selten der alleinige Effekt, der betrachtet werden muss, da dieser meistens mit Amplifikationseffekten aufgrund der Geometrie der lokalen geologischen Schichten verbunden ist. Der Effekt der Felsgeometrie wird je nach den lokalen geologischen Gegebenheiten oft auch als Talboden- oder Beckeneffekt bezeichnet.

Abb. 7 > Effekte der Felsgeometrie

Effekt des «Einfangen» der Wellenenergie in einem Sedimentbecken. Die Pfeile mit den gestrichelten Linien stehen für die verschiedenen Wellenarten: einfallendes Wellenfeld (blau), in den Lockergesteinsablagerungen «gefangene» Raumwellen (schwarz), an der Talflanke entstandene Oberflächenwellen (rot).



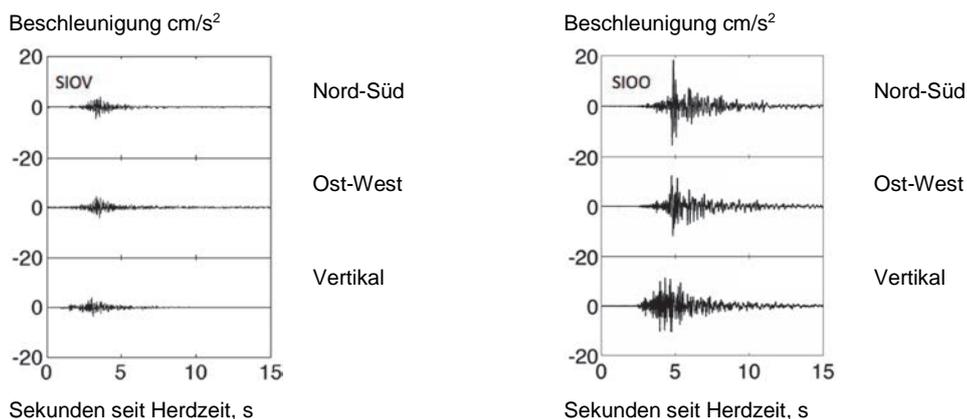
Die Grenze zwischen Lockergesteinsablagerungen und dem Felsuntergrund wird oft durch eine unregelmässige Geometrie charakterisiert, die eine besondere Fokussierung der Wellen im Becken bewirkt (Abb. 7). Eine Verstärkung der Erdbebenwellen und eine Verlängerung des Bebens sind die Folgen. Dieser Effekt wird am häufigsten in

engen Tälern beobachtet. Der Verstärkungseffekt ist nicht über alle Frequenzbereiche konstant. Er ist grösser, wenn die Frequenz nahe an der Fundamentalfrequenz des Tales oder des Beckens liegt. Abbildung 8 zeigt dieses Phänomen anhand von Aufzeichnungen ein und desselben Erdbebens aus zwei Stationen: Die eine steht auf Felsgebiet, die andere auf Sedimentablagerungen der Rhoneebene bei Sitten.

Der Effekt von Talflanken wiederum kommt im oberflächlichen Kontaktbereich von Felsuntergrund und Lockergestein vor. In dieser Kontaktzone werden Oberflächenwellen erzeugt, welche die sonst massgebenden Raumwellen dominieren können. Dieser Effekt wird in Zonen spürbar, die parallel zu den Talflanken liegen.

Abb. 8 > Beispiel eines Talbodeneffekts in Sitten (VS)

Beschleunigungszeitverläufe eines lokalen Erdbebens, aufgezeichnet an den Stationen SIOV (Fels) und SIOO (Talfüllung) in Sitten. Die Verstärkung der Amplituden an der Station SIOO ist deutlich zu erkennen.



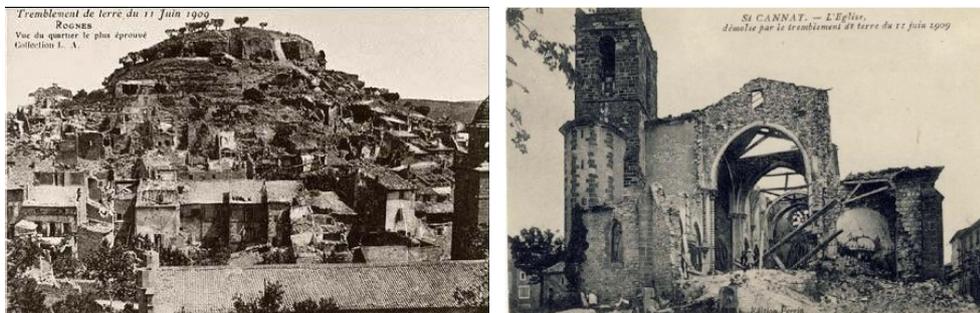
1.3.3 Topografischer Standorteffekt

In gewissen Fällen lassen sich durch eine starke Topografie des Terrains bedingte Amplifikationseffekte beobachten (Abb. 9). Eine starke Topografie ist indessen nicht zwangsläufig mit ausgeprägten Amplifikationseffekten des seismischen Signals ver-

bunden. Gemäss kürzlich durchgeführten Untersuchungen im Rahmen des europäischen Projekts NERA (Network of European Research Infrastructures for Earthquake Risk Assessment and Mitigation) (Burjanek et al. 2014) spielen die durch die lokale Geologie bedingten Faktoren wie Verwitterung und Frakturierung des Felses eine zentrale Rolle bei der Verstärkung des seismischen Signals, und weniger die Geometrie der Felsoberfläche.

Abb. 9 > Beispiel eines topografischen Standorteffekts

Beschädigungen im südfranzösischen Rognes nach dem Erdbeben von Lambesc vom 11. Juni 1909. Das Ausmass der Zerstörung ist auf dem Hügel am ausgeprägtesten – eine perfekte Veranschaulichung des topografischen Standorteffekts.



Quelle: Website von Plan Séisme, www.planseisme.fr (Ministerium für Umwelt und nachhaltige Entwicklung, Frankreich)

1.4

Induzierte Effekte

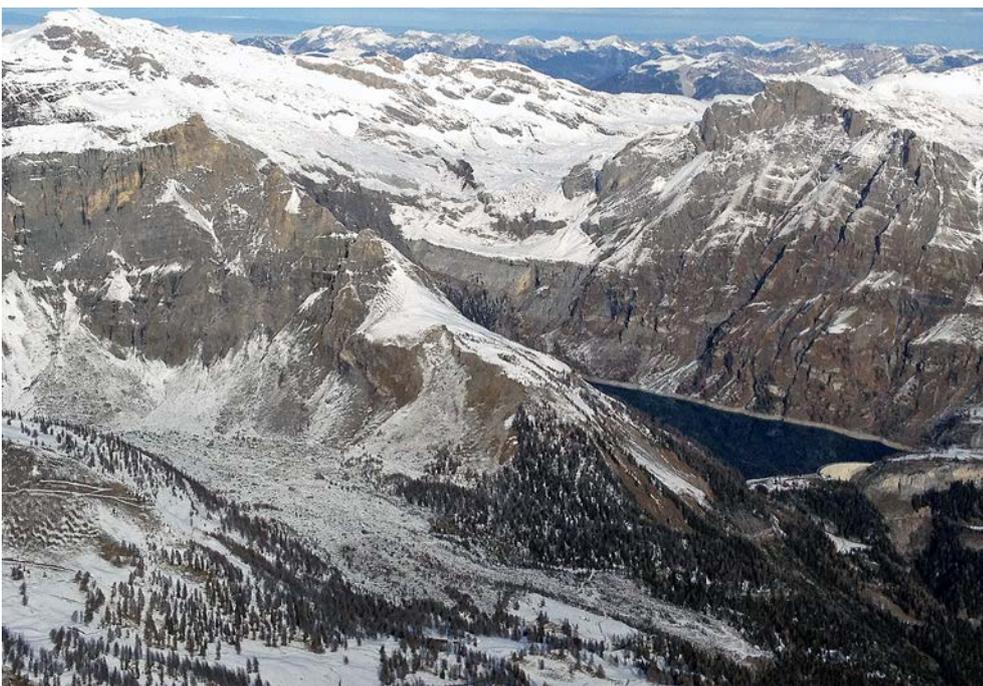
Seismische Wellen können in bestimmten Gebieten induzierte Effekte mit potenziell schädlichen Auswirkungen verursachen. Diese Effekte lassen sich grob in zwei Kategorien unterteilen: in Massenbewegungen sowie in Phänomene, die mit dem Verlust der Widerstandsfähigkeit des Bodens einhergehen.

Seismische Wellen vermögen bereits instabile oder verwitterte Felswände zu destabilisieren. Sie können zudem Rutschungen beschleunigen oder reaktivieren oder Hänge in Bewegung setzen, die vor dem Erdbeben bezüglich Instabilität eine geringe Sicherheitsmarge aufwiesen. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 10 dargestellt, die den Bergsturz am Rawylhorn als Folge des Nachbebens nach dem Hauptbeben von 1946 in der Nähe von Siders zeigt.

Gewisse sensible Böden wiederum neigen dazu, bei seismischen Erschütterungen ihre Widerstandsfähigkeit zu verlieren. Die Konsequenzen können das Versagen von Foundationen, erhebliche Setzungen oder Massenbewegungen bei Hanglagen sein. Besonders anfällig sind vor allem wenig kompaktierte und wassergesättigte sandige oder siltige Böden, die sich wegen des steigenden Porenwasserdrucks verflüssigen können, oder aber sensible Tone wie Seekreiden, deren Kohäsion durch die Erschütterungen zerstört wird. Abbildung 11 zeigt das Beispiel einer Verflüssigung eines sandigen Bodens in geringer Tiefe.

Abb. 10 > Beispiel eines Bergsturzes in der Schweiz nach einem Erdbeben

Bergsturz am Südhang des Rawylhorns, ausgelöst durch das Nachbeben vom 30. Mai 1946 in Siders (Magnitude 5,5), bei dem 5 Millionen Kubikmeter Felsmaterial in die Tiefe stürzten. Dieses Nachbeben trat nach dem Hauptbeben vom 25. Januar 1946 mit einer Magnitude 5,8 auf, dessen Epizentrum ebenfalls in der Nähe von Siders lag.



Oben: Luftaufnahme von 1946 (Quelle: Swisstopo).

Unten: Luftaufnahme von 2014 mit der Zeuzier-Staumauer im Hintergrund.

Abb. 11 > Beispiel einer Bodenverflüssigung

Beispiel einer Verflüssigung eines wassergesättigten sandigen Bodens beim Erdbeben von Christchurch (Neuseeland) vom 21. Februar 2011; Magnitude auf der Oberflächenwellen-Magnituden-Skala $M_s = 6,3$ (Bild: NOAA/NGDC, Steve Taylor (Ray White)). Der Boden hatte seine Tragfähigkeit verloren, und ein Gemisch aus Sand und Wasser drang an die Oberfläche.

**1.5 Fundamentalfrequenz des Bodens und Resonanz zwischen Boden und Bauwerk**

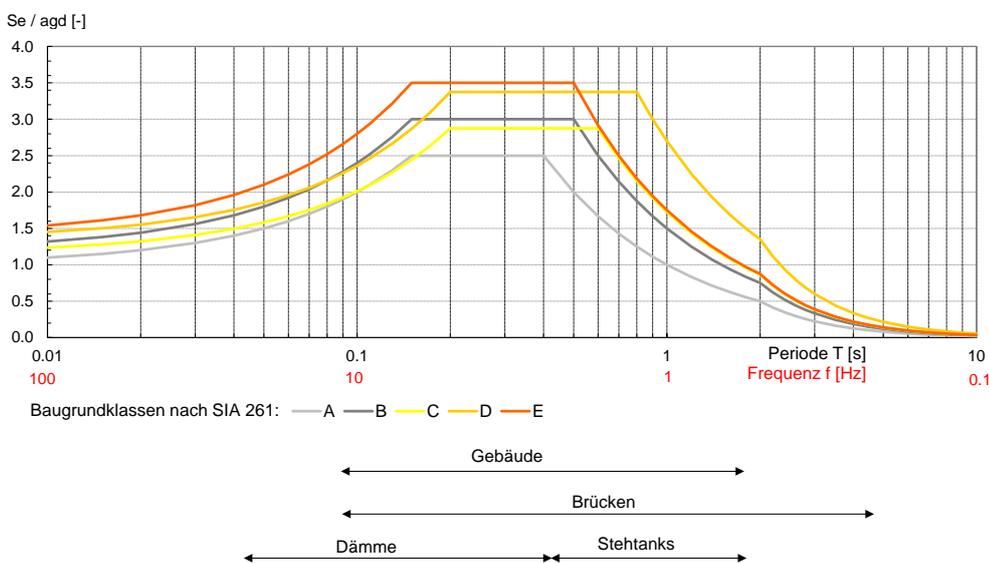
Ein wichtiger Parameter zur Bestimmung der dynamischen Belastungen ist die Fundamentalfrequenz. Dabei handelt es sich um die Frequenz, mit der ein Lockergestein, ein Bauwerk oder jedes andere Objekt natürlich schwingt. Die Fundamentalperiode ihrerseits wird definiert als die Inverse der Fundamentalfrequenz.

Bei einem Erdbeben induzieren die Erschütterungen des Bodens eine entsprechende Schwingung der Bauwerke. Die Bauwerksfundationen folgen dabei den Bodenbewegungen, und der Oberbau schwingt relativ zu den Fundationen entsprechend seiner Masse und Steifigkeit. Die Bodenbewegungen und diejenigen des Oberbaus sind folglich im Allgemeinen unterschiedlich. Ist die Fundamentalfrequenz eines Gebäudes derjenigen des Baugrunds sehr ähnlich, spricht man vom Phänomen der Resonanzkopplung zwischen dem Baugrund und dem Bauwerk. Die Schwingungsamplituden des Gebäudes werden im Vergleich zu denjenigen der umliegenden Bauwerke, die gegenüber dem Baugrund deutlich verschiedene Fundamentalfrequenzen aufweisen, stark erhöht. Das in Resonanz versetzte Gebäude ist somit besonders bedroht.

Abbildung 12 zeigt die Bereiche der unterschiedlichen Fundamentalfrequenzen, welche bei den verschiedenen Bauwerkstypen vorkommen. Generell lässt sich sagen: Je höher ein Gebäude ist, desto tiefer ist die Fundamentalfrequenz.

Abb. 12 > Elastische Antwortspektren der Norm SIA 261 und die Bereiche der Fundamentalfrequenzen und -perioden verschiedener Bauwerkstypen

Bereiche der Fundamentalfrequenzen und -perioden von gewissen Bauwerkstypen im Zusammenhang mit den Antwortspektren der in der Norm SIA 261 beschriebenen Baugrundklassen A bis E.



1.6 Berücksichtigung der Standorteffekte

Bei der Bemessung oder Überprüfung der Erdbebensicherheit von Bauwerken können die Standorteffekte mithilfe von differenzierten Antwortspektren berücksichtigt werden. Dieses Spektrum lässt sich auf zwei verschiedene Arten bestimmen:

- > mit der Baugrundklassen der Norm SIA 261, denen fünf Antwortspektren zugeordnet wurden, die eine approximative Berücksichtigung der lokalen geologischen Gegebenheiten erlauben (Abb. 12);
- > mittels einer Standortstudie zur Bestimmung des spezifischen Antwortspektrums für die lokalen geologischen Verhältnisse des betreffenden Standorts. Handelt es sich dabei um eine grössere Region, wird von einer spektralen seismischen Mikrozonierung gesprochen (Definition von verschiedenen Zonen mit jeweils eigenen spezifischen Antwortspektren).

Die vom Eurocode 8 (2005) übernommenen Spektren der Norm SIA 261 wurden bestimmt, um eine breite Palette an möglichen Konfigurationen innerhalb derselben Baugrundklasse abzudecken. Sie sind im langperiodischen Bereich tendenziell konservativ. Der Baugrundklasse F ist kein Antwortspektrum zugeordnet. Bei den darunterfallenden Böden sind für die Bestimmung des zutreffenden Antwortspektrums zusätzliche Abklärungen erforderlich.

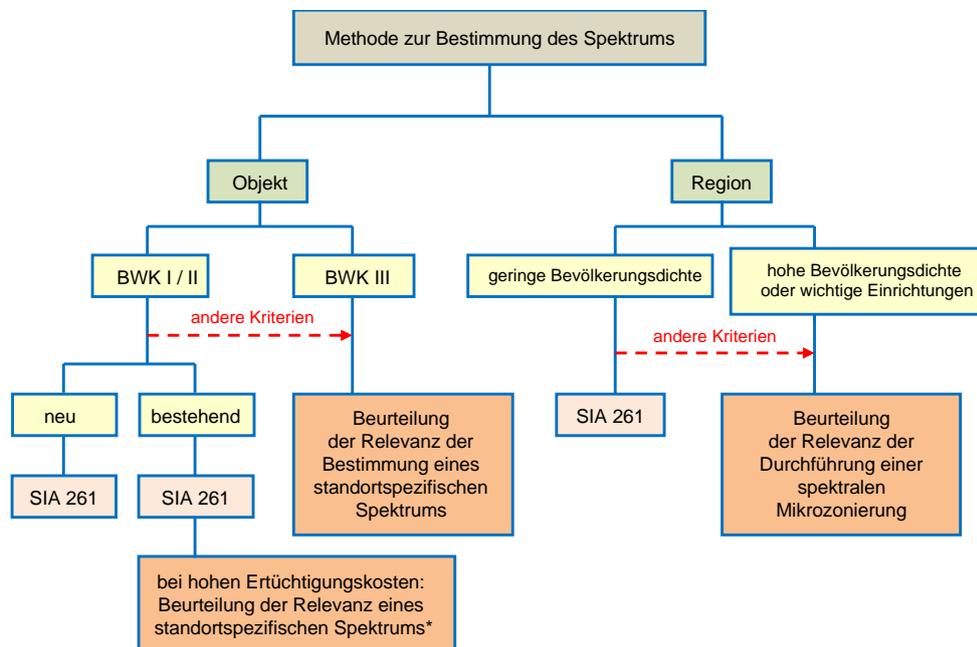
In gewissen Situationen können sich eine spektrale seismische Mikrozonierung oder eine punktuelle Standortstudie als sinnvolle Investition erweisen, weil diese eine genauere Bestimmung der spezifischen Spektren und somit eine bessere Berücksichtigung des lokalen Standorteffekts erlauben. Dies ist insbesondere in folgenden Situationen gegeben:

- > bei Bauwerken von grosser Bedeutung wie Kernkraftwerke, Staudämme, Chemiewerke, Spitäler, Einrichtungen für den Katastrophenschutz, strategische Industrie- oder Finanzzentren usw.;
- > bei bestehenden Bauten, bei denen sich dank der Bestimmung eines genaueren Antwortspektrums unter Umständen Massnahmen zur Verbesserung der Erdbebensicherheit reduzieren lassen oder sich erübrigen;
- > bei dicht bebauten Zonen, in denen sehr hohe Standorteffekte vermutet werden.

Abbildung 13 enthält Orientierungskriterien für die Wahl einer Methode zur Berücksichtigung der Standorteffekte.

Abb. 13 > Orientierungskriterien für die Wahl einer Methode zur Berücksichtigung der Standorteffekte

Orientierungskriterien für die Wahl des geeigneten Studientyps zur Bestimmung eines angemessenen Antwortspektrums. BWK: Bauwerksklasse gemäss Norm SIA 261.



WK: Bauwerksklasse gemäss Norm SIA 261

* In den meisten Fällen sind die Spektren der Norm SIA 261 auf der konservativen Seite im langperiodischen Bereich. Wenn aufgrund dieser Spektren kostspielige Verstärkungsmassnahmen in Betracht zu ziehen sind, kann die Bestimmung des standortspezifischen Spektrums potenziell erhebliche Kostensenkungen bei den Massnahmen zur Erdbebenertüchtigung bewirken.

1.7 Berücksichtigung der induzierten Effekte

Nachdem potenziell sensible Böden identifiziert worden sind, muss das effektive Potenzial von induzierten Effekten bestimmt werden. Dies erfolgt in Abhängigkeit von den geotechnischen Bodenparametern und vom Ausmass der seismischen Einwirkung, die bei der Bemessung oder bei der seismischen Überprüfung eines Bauwerks zu berücksichtigen ist. So ist es beispielsweise möglich, dass das Bodenverflüssigungspotenzial bei einem wenig kompaktierten und gesättigten sandigen Boden in der Erdbebenzone 1 aufgrund der zu schwachen Erdbebeneinwirkung nicht gegeben ist, aber in stärker erdbebengefährdeten Zonen durchaus zu berücksichtigen ist, weil dort die seismische Einwirkung stark genug ist, um einen erheblichen Anstieg des Porenwasserdrucks oder gar eine totale Bodenverflüssigung zu bewirken.

Kapitel 2.6 und Anhang A3 geben zusätzliche Anhaltspunkte für die Beurteilung potenzieller induzierter Effekte bei sensiblen Böden.

1.8 Bestandesaufnahme der Basisdaten zu den Standorteffekten in der Schweiz

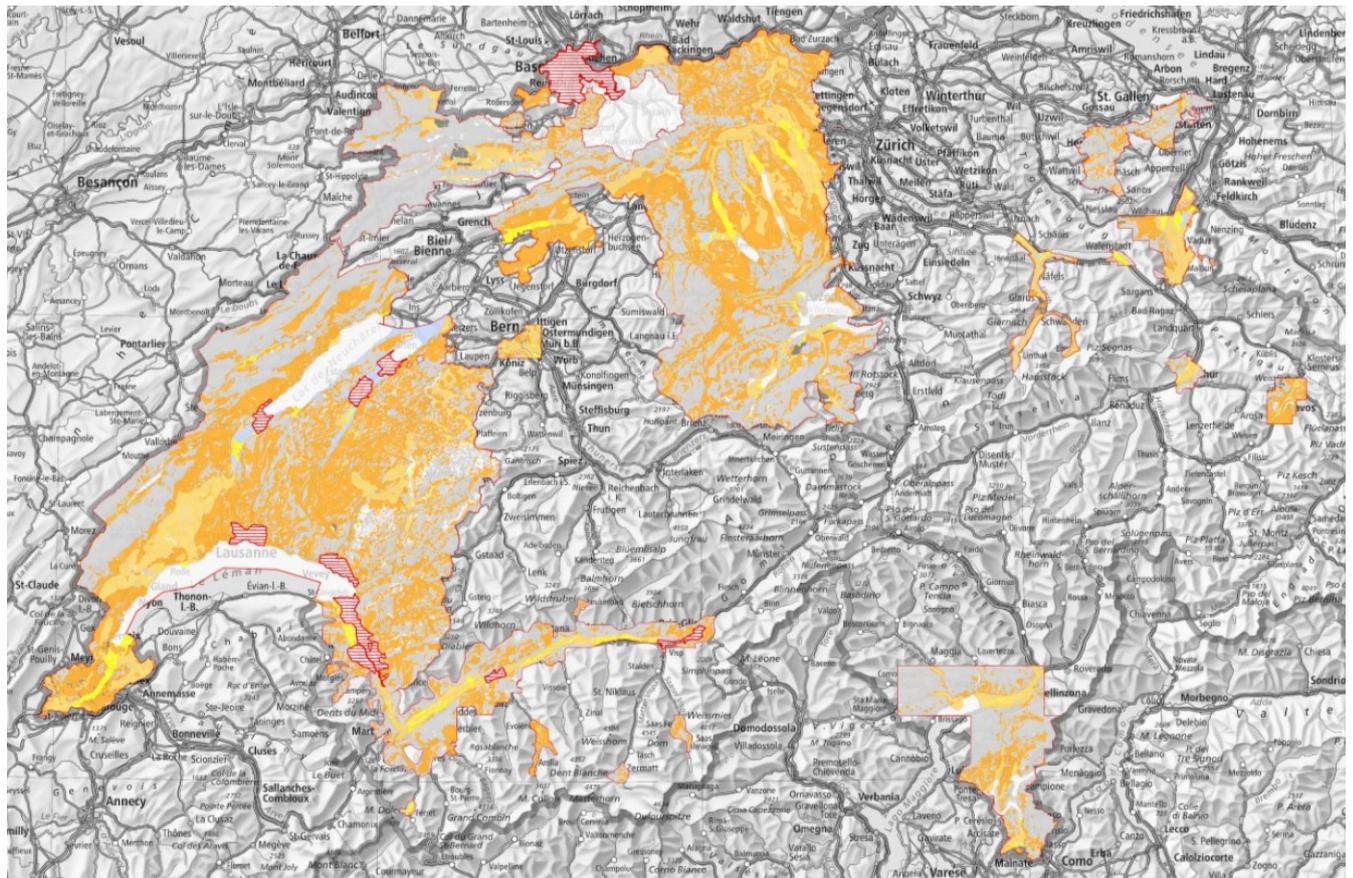
Der Bund unterstützt seit 2003 die Erstellung von Karten der Baugrundklassen gemäss Norm SIA 261. Abbildung 14 stammt vom Geodatenportal des Bundes und zeigt, für welche Gebiete solche Karten derzeit vorliegen.

Ausserdem wurden für die folgenden Gebiete bereits spektrale seismische Mikrozonierungsstudien durchgeführt: Basel, Brig-Visp, Sitten, Monthey und Waadtländer Abschnitt des Rhonetals, Vevey-Montreux, Lausanne, Yverdon, Payerne und Avenches. Diese sind in Abbildung 14 rot schraffiert gezeigt.

Anhang A2 enthält weitere Informationen über die auf den Geodatenportalen des Bundes verfügbaren «Karten der Baugrundklassen» und der «spektralen seismischen Mikrozonierung».

Abb. 14 > Überblick über die Gebiete, für die eine Karte der Baugrundklassen oder eine spektrale seismische Mikrozonierung existiert

Gebiete, für die eine Kartierung des Baugrunds (eingefärbten Zonen) oder eine spektrale seismische Mikrozonierung (rot schraffiert) vorgenommen wurde.



Quelle: www.map.geo.admin.ch und www.map.bafu.admin.ch (Stand März 2015)

2 > Karten der Baugrundklassen

Der primäre Zweck der Karten der Baugrundklassen besteht darin, auf rasche Weise einen Anhaltspunkt für die wahrscheinliche Baugrundklasse zu bieten, damit bereits am Anfang eines Bauprojekts dem Lastfall Erdbeben bestmöglich Rechnung getragen werden kann. Diese Karten werden anhand der verfügbaren geologischen, geophysikalischen und geotechnischen Daten erstellt. In Zweifelsfällen liegen sie auf der konservativen Seite.

2.1 Definition der Baugrundklassen

Die Norm SIA 261 definiert sechs Baugrundklassen anhand von Untergrundeigenschaften wie Lithologie, Kornverteilung und Mächtigkeit der Lockergesteinsschicht, Scherwellengeschwindigkeit in den ersten 30 Metern sowie Kompaktierung (Tab. 1). Diese Beschreibungen und die Richtwerte der geotechnischen Parameter dienen als Hilfe bei der Zuordnung eines Baugrunds zu einer der Klassen A bis F. Für die Quantifizierung der Verstärkung des Erdbebensignals durch den lokalen Baugrund ist die Scherwellengeschwindigkeit der wichtigste Parameter. Die in Tabelle 1 aufgeführten lithologischen Beschreibungen und geotechnischen Werte entsprechen somit den Bodentypen, die im Allgemeinen Scherwellengeschwindigkeiten v_s der gleichen Gröszenordnung aufweisen.

Tab. 1 > Baugrundklassen nach der Norm SIA 261, revidiert 2014

Baugrund-klasse	$V_{s,30}$ [m/s]	N_{SPT}	S_u [kPa]	Beschreibung
A	>800	-	-	Fels oder andere felsähnliche geologische Formation mit höchstens 5 m Lockergestein an der Oberfläche.
B	500–800	>50	>250	Ablagerungen von sehr dichtem Sand, Kies oder sehr steifem Ton mit einer Mächtigkeit von mindestens einigen zehn Metern, gekennzeichnet durch einen allmählichen Anstieg der mechanischen Eigenschaften mit der Tiefe.
C	300–500	15–50	70–250	Ablagerungen von dichtem oder mitteldichtem Sand, Kies oder steifem Ton mit einer Mächtigkeit von einigen zehn bis mehreren hundert Metern.
D	<300	<15	<70	Ablagerungen von lockerem bis mitteldichtem kohäsionslosem Lockergestein (mit oder ohne einige weiche kohäsive Schichten), oder von vorwiegend weichem bis steifem kohäsivem Lockergestein.
E	-	-	-	Oberflächliche Schicht von Lockergestein mit v_s -Werten nach C oder D und veränderlicher Dicke zwischen 5 m und 20 m über einem Bodenmaterial mit $v_s > 800$ m/s.
F	-	-	-	Strukturempfindliche, organische und sehr weiche Ablagerungen (z. B. Torf, Seekreide, weicher Lehm) mit einer Mächtigkeit über 10 m.

N_{SPT} erforderliche Schlagzahl für eine Eindringtiefe von 0,3 m bei einem Standard-Penetrometertest

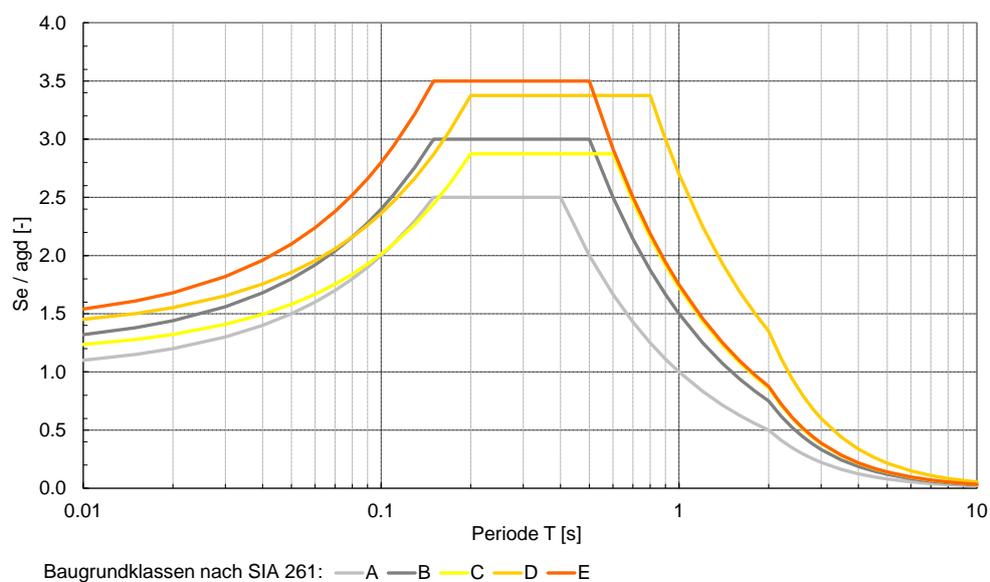
S_u Scheinbare undrainierte Kohäsion

$V_{s,30}$ Mittlere Scherwellengeschwindigkeit bis in eine Tiefe von 30 m

Jeder Baugrundklasse von A bis E wird in der Norm SIA 261 ein elastisches Antwortspektrum mit der horizontalen Beschleunigung zugeordnet, das bei der Bemessung oder Überprüfung von Tragstrukturen als Grundlage für die Bestimmung der Erdbeneinwirkung dient (Abb. 15). Bei der Klasse F, der kein charakteristisches Spektrum zugeordnet ist, sind zur Bestimmung eines standortspezifischen Antwortspektrums Untersuchungen erforderlich. Zudem sollten unter Umständen zusätzliche Untersuchungen für die Klasse F durchgeführt werden, um potenzielle induzierte Effekte wie eine Bodenverflüssigung oder eine Thixotropie zu bestätigen oder zu widerlegen.

Abb. 15 > Elastische Antwortspektren gemäss Norm SIA 261

Jedes Antwortspektrum ist einer Baugrundklasse zugeordnet. Die in dieser Abbildung dargestellten Spektren wurden normalisiert mithilfe des Parameters a_{gd} , der das Niveau der Erdbebengefährdung für eine Erdbebenzone in Form eines Bemessungswerts der horizontalen Bodenbeschleunigung darstellt.



Erdbebenzone a_{gd}

1	0,6 m/s ²	3a	1,3 m/s ²
2	1,0 m/s ²	3b	1,6 m/s ²

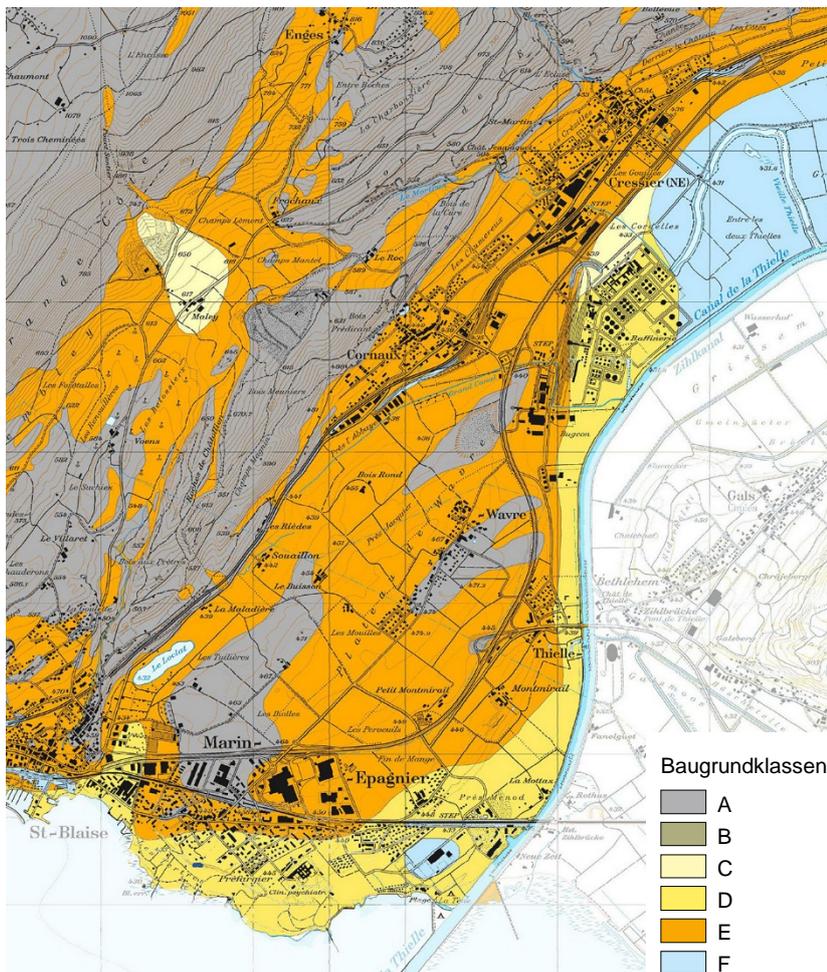
Bei den in der Ausgabe der Norm SIA 261 von 2003 ursprünglich definierten Baugrundklassen wurden in der Teilrevision von 2014 Anpassungen vorgenommen. Nicht verändert wurden die elastischen Antwortspektren. Die Änderungen bedeuten an und für sich nicht, dass die vor 2014 erstellten Karten der Baugrundklassen dringend revidiert werden müssten. Ausführlichere Informationen über die erfolgten Änderungen und deren Auswirkungen auf die vor 2014 erstellten Karten der Baugrundklassen sowie zum diesbezüglichen Kommunikationsbedarf der Kantone sind in Anhang A4 enthalten.

2.2 Grundsätze der Erstellung und Verwendung von Karten der Baugrundklassen

Mithilfe der Karte der Erdbebenzonen und der Karte der Baugrundklassen lässt sich die bei der Bemessung oder Überprüfung von Tragstrukturen zu berücksichtigende Erdbebeneinwirkung bestimmen. Die Karte der Baugrundklassen wird anhand der verfügbaren geologischen, geophysikalischen und geotechnischen Daten erstellt. Für die Gestaltung der Karte wird das Untersuchungsgebiet im Massstab 1:25 000 in eine der sechs verschiedenen Baugrundklassen, wie in der Baunorm SIA 261 (2014) definiert, eingeteilt. Diese Karte erlaubt es somit, Gebiete nach ihrem jeweiligen Verstärkungspotenzial der seismischen Wellen voneinander zu unterscheiden und diejenigen Zonen zu ermitteln, die spezifische Untersuchungen erfordern. Ein Beispiel einer solchen Karte der Baugrundklassen ist in Abbildung 16 abgebildet.

Abb. 16 > Auszug aus einer Karte der Baugrundklassen des Kantons Neuenburg

Das Gebiet in Klasse D zeigt ein typisches Beispiel für eine Zone, deren Bodenverflüssigungspotenzial überprüft werden sollte (wenig kompaktierte gesättigte Sedimente). Bei der Zone F wiederum ist zur Bestimmung des zutreffenden elastischen Antwortspektrums eine spezifische Untersuchung erforderlich.



Dank dieser Karte kann bereits im Vorfeld eines Projekts den am Standort des geplanten Bauwerks vorgefundenen Verhältnissen eine Baugrundklasse zugeordnet werden. Aufgrund ihres Massstabs und je nach verfügbaren Daten enthält diese Karte Unsicherheiten, die tendenziell auf der konservativen Seite liegen.

Falls die geotechnischen Daten eines Projekts von der Karte der Baugrundklassen abweichen, sollten die vor Ort erhobenen Messwerte als Basis für die Bestimmung der Baugrundklasse dienen.

2.3 Erforderliche Basisdaten

Die geologische Karte bildet ein essenzielles Basisdokument für die Erstellung einer Karte der Baugrundklassen. Die Daten aus den mechanischen Sondierungen, die geologischen Profilschnitte in Kombination mit den Ergebnissen der geotechnischen Versuche sowie die Daten von geophysikalischen (seismischen und/oder elektrischen) Abklärungen lassen auf die Beschaffenheit und Mächtigkeit der Lockergesteinsschicht schließen. Numerische Geländemodelle, hydrogeologische und geomorphologische Karten sowie anderweitiges kartografisches Material (Kiesgruben, Torfmoore, Kataster der belasteten Standorte usw.) liefern ihrerseits weitere und präzisere Informationen, die unter anderem die Identifikation von Gebieten mit einem erheblichen Potenzial für induzierte Effekte erlauben können.

Ergänzend und im Rahmen gezielter Untersuchungen können auch wissenschaftliche Studien oder Artikel über die regionale geologische Geschichte, Geomorphologie oder Hydrogeologie zusätzliche Anhaltspunkte liefern hinsichtlich der Verdichtung (Eiszeiten) und der Beschaffenheit der Ablagerungen oder der Morphologie der Felsoberfläche.

2.4 Methodik für die Kartenerstellung

Die Zuweisung zu einer bestimmten Baugrundklasse hängt in erster Linie von der Beschaffenheit des Untergrunds ab. Eine direkte Übertragung in eine Baugrundklasse anhand der Legende der geologischen Karte (z. B. freiliegender Fels, Moorlandschaft, Torfmoor) ist lediglich in einfachen Fällen möglich.

Die oberflächennahe Bedeckung weist in den meisten Fällen eine heterogene und komplexe Schichtung auf. Deshalb empfiehlt es sich, bei der Zuweisung diejenige Baugrundklasse zu wählen, die für die vorherrschende Lithologie in der Tiefe am repräsentativsten ist (in der Regel die ersten 20 bis 30 Meter). Damit diese Zuordnung leichter fällt, ist es wichtig, anhand der verfügbaren Basisdaten für das untersuchte Gebiet eine Übersicht über die verschiedenen Ablagerungen und Mächtigkeiten des Lockergesteins zusammenzustellen (Abb. 17). Die Vollständigkeit und die Schwierigkeit dieses Arbeitsschritts können je nach den bereits verfügbaren georeferenzierten

Informationen variieren (z. B. wenn es bereits Karten gibt, welche die oberste Schicht gewisser geologischer Einheiten oder die Felsoberfläche darstellen).

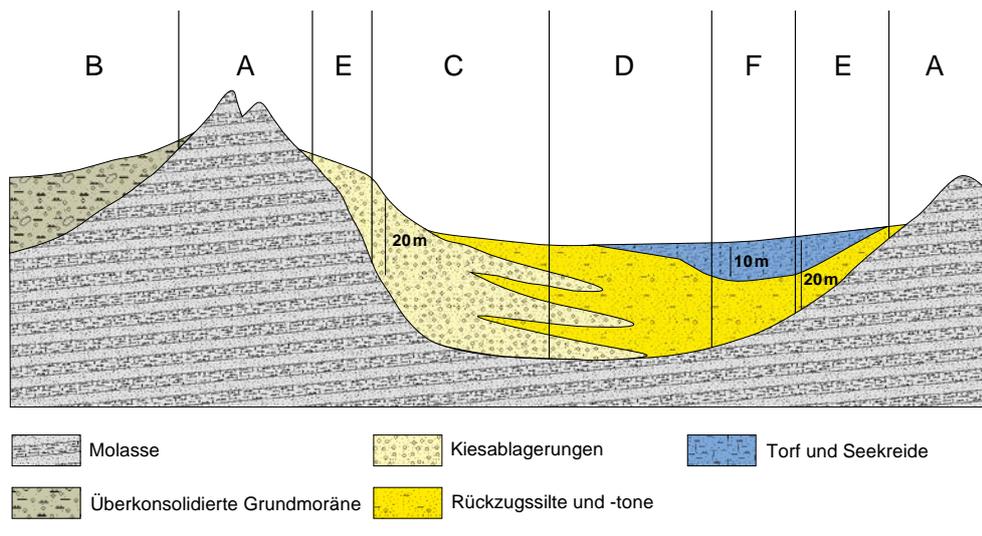
Nach der Transkription der Legende der geologischen Karte und der Identifikation der verschiedenen Ablagerungen im untersuchten Gebiet (Abb. 17) muss für die Zuordnung zu Baugrundklassen eine Tabelle als Entscheidungshilfe erstellt werden (siehe Beispiel in Tab. 2). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Definitionen der in Tabelle 1 aufgeführten Baugrundklassen der Norm SIA 261 bei der Transkription aufgrund der verschiedenen vor Ort angetroffenen geologischen Formationen zu Unsicherheiten führen können.

Tab. 2 > Beispiel einer Tabelle als Entscheidungshilfe für die Zuordnung einer geologischen Formation zu einer Baugrundklasse

Lithologie/Phänomene (Beispiele)	Mächtigkeit	Baugrundklasse	Bemerkungen
Unverwitterter Fels, Felssackung		A	Bei einer Felsverwitterung mit einer Mächtigkeit >5 m → Baugrundklasse B
Sehr dicht gelagerte mittel- bis grobkörnige Sedimente (Grundmoräne oder andere überkonsolidierte Kiesablagerungen)	<5 m auf Fels	A	N _{spt} >50
	5–20 m auf Fels	B	
	>20 m	B	
Mitteldicht bis dichte, mittel- bis grobkörnige Sedimente (Moräne, fluvioglaziale Kiesablagerungen, grobkörnige Sande, Bergsturzablagerungen, Schuttüberdeckungen, fluvioglaziale Sedimente)	<5 m auf Fels	A	N _{spt} zwischen 15 und 50
	5–20 m auf Fels	E	
	>20 m	C	
Weiche bis mitteldichte, mittel- bis grobkörnige, kohäsionslose Sedimente (sehr selten; allenfalls fein- bis mittelkörnige Flusssande)	<5 m auf Fels	A	N _{spt} <15
	5–20 m auf Fels	E	
	>20 m	D	
Sehr steife kohäsive feinkörnige Sedimente (alte überkonsolidierte glaziolakustrische Ablagerungen)	<5 m auf Fels	A	N _{spt} >50
	5–20 m auf Fels	B	
	>20 m	B	
Steife kohäsive feinkörnige Sedimente (lakustrische und glaziolakustrische Ablagerungen, Überschwemmungsablagerungen, konsolidiert bis überkonsolidiert)	<5 m auf Fels	A	N _{spt} zwischen 15 und 50
	5–20 m auf Fels	E	
	>20 m	C	
Kohäsive feinkörnige Sedimente von weicher bis mittlerer Konsistenz (Anschwemmungen, lakustrische und glaziolakustrische Ablagerungen, Überschwemmungsablagerungen, verwitterte Feinkornsedimente und Kolluvialablagerungen)	<5 m auf Fels	A	N _{spt} <15
	5–20 m auf Fels	E	
	>20 m	D	
Strukturempfindliche und organische Ablagerungen (Moore, Torf, Seekreide, weiche Tone, Kolluvialablagerungen, schlecht kompaktierte Aufschüttungen)	<5 m auf Fels	A	E falls Felsmächtigkeit weniger als 20 m, C oder D falls Fels mächtiger als 20 m
	5–10 m	C, D oder E	
	>10 m	F	

Abb. 17 > Schematische Wiedergabe einer Zuweisung von Baugrundklassen

Die Baugrundklasse hängt von der Beschaffenheit und der Verteilung der verschiedenen, in den ersten paar zehn Metern unter der Oberfläche vorgefundenen geologischen Formationen ab.



Bei der Erstellung der Karte werden, gestützt auf die Entscheidungshilfe (Tab. 2) und in der Regel mithilfe einer GIS-Software, die folgenden schematischen Arbeitsschritte vorgenommen:

- > Automatische Zuweisung der Flächen der geologischen Karte zu einer Baugrundklasse, sofern dies möglich ist (Übernahme der Polygone, z. B. freiliegender Fels zu Klasse A und Torfmoor zu Klasse F).
- > Manuelle Zuweisung einer Baugrundklasse zu anderen Objekten, welche die Struktur und Beschaffenheit des Bodens in der Tiefe beschreiben (Sondierungen und Schnitte) und Darstellung auf der Karte (Integration von Punkten und Polylinien ins System, siehe Abb. 18).
- > Zeichnen der Karte: Die Bereiche zwischen den bereits einer Baugrundklasse zugeordneten Objekten werden unter Berücksichtigung der verschiedenen topografischen und geologischen Informationen manuell interpoliert.
- > Sektoren, für die entweder keine Daten oder nur widersprüchliche Daten vorliegen, werden einer ausführlicheren Beurteilung unterzogen (zusätzliche gezielte Untersuchungen).

Je nach Datenqualität oder -typ und Grad der Unsicherheit/Ungenauigkeit können die verschiedenen Objekte (Polygone aus einer geologischen Karte, Bohrpunkte oder Polylinienschnitte) mit einem Plausibilitätshinweis versehen werden. Entstehen bei der Interpolation von Flächen derselben Baugrundklasse widersprüchliche Ergebnisse, können solche Plausibilitätshinweise die Entscheidung erleichtern.

Die fertiggestellte Karte wird nicht überall den gleichen Plausibilitätsgrad aufweisen, da die Informationen nicht gleichmässig verteilt sind. Zum Beispiel liegt entlang der Verkehrswege und in dicht bebauten Gegenden logischerweise eine höhere Informationsdichte vor.

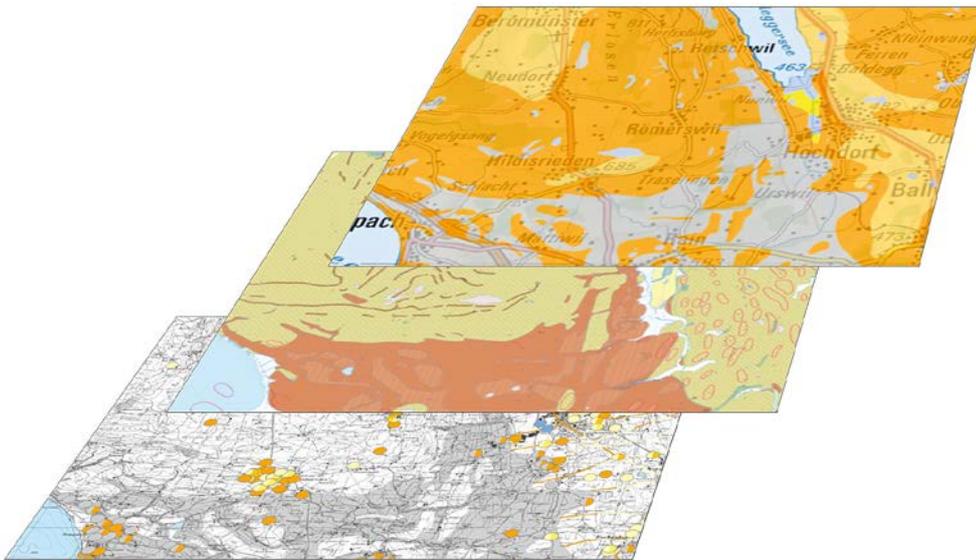
Abschliessend ist darauf hinzuweisen, dass potenziell verflüssigbare Bodenhorizonte keine Baugrundklasse darstellen und sich nur schwer systematisch identifizieren lassen. So können sich unter Standorten, die als Baugrundklassen C, D, E oder F klassifiziert wurden, potenziell verflüssigbare Bodenschichten befinden (siehe 2.6 und Anhang A3).

Abb. 18 > Dateninterpolation für die Erstellung einer Karte der Baugrundklassen

Obere Karte: Auszug aus der Karte der Baugrundklassen des Kantons Luzern nach der Dateninterpolation

Mittlere Karte: Geologische Karte

Untere Karte: Karte der Baugrundklassen vor der Dateninterpolation. Die grauen Flächen wurden anhand der geologischen Karte automatisch der Klasse A (freiliegender Fels) zugewiesen. Die Punkte stellen die Sondierungsstandorte dar und die Striche die Lage der verfügbaren geologischen Schnitte. Die Farben stehen für die den verschiedenen Objekten zugewiesenen Baugrundklassen (siehe Tab. 1). Sind zwei Klassen möglich, so ist der Punkt in den beiden zutreffenden Farben gehalten.



Die Karte der Baugrundklassen beruht zu einem grossen Teil auf den lithologischen Beschreibungen der geologischen Karte und der Sondierungen. Zu bevorzugen wäre die Zuweisung zu einer Baugrundklasse direkt auf Basis der Geschwindigkeit der Scherwellen v_s , da diese Geschwindigkeit besser mit der Verstärkung der seismischen Wellen korreliert als die lithologische Beschreibung.

Zuweisung einer Baugrundklasse anhand der S-Wellengeschwindigkeit und der geotechnischen Parameterwerte

Die Scherwellengeschwindigkeiten lassen sich anhand von geotechnischen Parametern schätzen oder können mit geophysikalischen Messungen bestimmt werden (Studer et al. 1997). Leider stehen solche Angaben selten zur Verfügung. Die Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeitsprofile mit geophysikalischen Messungen ist relativ kompliziert und beschränkt sich in der Regel auf Standortstudien oder auf spektrale seismische Mikrozonierungsstudien. Was die Angaben zu geotechnischen Parametern anbelangt, so sind diese oft auf geografisch beschränkte Zonen konzentriert; zudem korrelieren diese Parameter nicht in eindeutiger Weise mit der Scherwellengeschwindigkeit. Die Methode zur seismischen Messung des H/V-Verhältnisses, die auf Messungen der

Bodenunruhe basiert, ist von potenziellem Interesse, weil sich damit die Resonanzfrequenz der Lockergesteinsablagerungen, die wiederum mit der Mächtigkeit und der mittleren Scherwellengeschwindigkeit verbunden ist, relativ einfach beschreiben lässt. In gewissen Fällen kann diese Methode mittels Abschätzung der Geschwindigkeit v_s die Zuweisung einer Baugrundklasse erleichtern.

Eine Vergleichsstudie (Fäh und Gassner-Stamm 2014) zwischen den an 47 Standorten in der Schweiz gemessenen Geschwindigkeiten $v_{s,30}$ (mittlere Scherwellengeschwindigkeit in 30 Metern Tiefe) und der Kartierung der Baugrundklassen anhand der Geologie lässt folgende Schlussfolgerungen zu:

- > In vielen Fällen erwies sich die Klassifizierung anhand der Karten als korrekt oder als auf der konservativen Seite liegend.
- > Ein gewisser Anteil der Standorte der Klasse C weist in Wirklichkeit Geschwindigkeiten $V_{s,30}$ der Klasse B auf; dieser Fehler bei der Baugrundklassenzuweisung ist durch den allgemeinen Mangel an Informationen über die Kompaktion des Untergrunds bedingt.
- > Gewisse grundsätzlich felsige und in Klasse A eingeteilte Standorte haben Geschwindigkeiten $V_{s,30}$, die einer Klasse B entsprechen. Dies ist auf die Felsverwitterung zurückzuführen, welche die Scherwellengeschwindigkeit erheblich vermindern kann.
- > Die in Klasse D einzuteilenden Standorte werden in der Regel von den Karten gut identifiziert.

2.5 Präsentation der Ergebnisse und Begleitdokumente

Die Baugrundklassen der Norm SIA 261 sind in den Karten in klassenspezifischen Farben (Tab. 3) dargestellt. Für hauptsächlich felsige Zonen (Klassen A und B) werden Grautöne vorgeschlagen. Eine Abstufung in Gelbtönen zeigt die Lockergesteinsklassen C, D und E auf. Die Farbe Blau wird der Klasse F zugeordnet und zeigt sensible Ablagerungen an, die ein Anregungssignal beträchtlich verstärken oder schädliche induzierte Effekte verursachen können.

Tab. 3 > Standard-Farbcodes (RGB-Werte) für Baugrundklassen

Klasse	R	G	B
A	224	224	224
B	199	199	169
C	255	255	191
D	255	229	0
E	255	195	0
F	115	178	255

Die Karte der Baugrundklassen muss von einem erläuternden Synthesebericht begleitet werden. Darin sind alle verwendeten Grundlagen und konsultierten geologischen Informationen aufgeführt und die Etappen der Erarbeitung beschrieben. Dieser Bericht hebt die wichtigsten Zonen mit verbleibenden Unsicherheiten in Bezug auf die Bodenbeschaffenheit oder die erwarteten induzierten Effekte hervor. Bei den Zonen F sollten nach Möglichkeit die Gründe für diese Zuweisung erläutert werden.

Zudem müssen die Benutzer der Karten darauf hingewiesen werden, dass sich Böden mit einem Bodenverflüssigungs- oder Thixotropiepotenzial in Zonen der Baugrundklassen C, D, E oder F befinden können.

Eine Überlagerung der Karte der Baugrundklassen mit den betroffenen Werten (hohe Besiedlungsdichte, wichtige Infrastrukturbauten usw.) kann ebenfalls durchgeführt und dokumentiert werden, um Gebiete zu ermitteln, für welche die Relevanz von Zusatzstudien evaluiert werden sollte.

2.6 **Behandlung von Zonen mit einem Potenzial für induzierte Effekte**

Die Zonen, die für induzierte Effekte wie Bodenverflüssigung oder Thixotropie anfällig sind, können anhand der Karte der Baugrundklassen nicht systematisch identifiziert werden. Deshalb muss das Potenzial für solche induzierte Effekte immer anhand der lokalen geotechnischen Daten überprüft werden. Denn Standorte mit einer Baugrundklasse C, D, E oder F können Bodenhorizonte aufweisen, die potenziell für solche Phänomene anfällig sind.

Zonen, in denen bei Erdbeben Massenbewegungen, Felsstürze und Bergstürze ausgelöst werden können, werden von den Karten der Baugrundklassen nicht behandelt. Diese Zonen lassen sich zu einem grossen Teil anhand der Gefahrenkarten für gravitative Naturgefahren identifizieren.

2.6.1 **Überprüfung des Bodenverflüssigungspotenzials**

Das Risiko einer Bodenverflüssigung besteht bei wenig kompaktierten und gesättigten sandigen oder sandig-siltigen Bodenhorizonten. Zur Beurteilung des Bodenverflüssigungspotenzials und seiner Berücksichtigung bei Bauprojekten sollten insbesondere die Normen SIA 267 (2013) und SIA 269/8 (erscheint 2016) konsultiert werden. Angaben zur Identifikation von potenziell verflüssigbaren Böden und zur Beurteilung des Bodenverflüssigungspotenzials sind im Anhang A3 aufgeführt.

2.6.2 Überprüfung des Thixotropiepotenzials

Das Risiko einer Thixotropie besteht bei bestimmten weichen gesättigten tonigen Böden, deren Struktur bei Erschütterungen leicht aufgelöst wird, was zu einer plötzlichen Verflüssigung führen kann. Bei solchen Böden muss das tatsächliche Thixotropiepotenzial unter Bezugnahme auf die seismische Einwirkung und die projektspezifischen geotechnischen Daten überprüft werden. Bei Mächtigkeiten von über 10 Metern (Klasse F) ist zudem ein standortspezifisches elastisches Spektrum zu erstellen.

2.6.3 Überprüfung des Potenzials von Massenbewegungen

Bei Hanglagen muss die Stabilität des Hangs unter Erdbebeneinwirkung überprüft werden. Zur Beurteilung der Hangstabilität und des Potenzials für bleibende Verschiebungen sollten insbesondere die Normen SIA 267 und SIA 269/8 konsultiert werden.

> Anhang

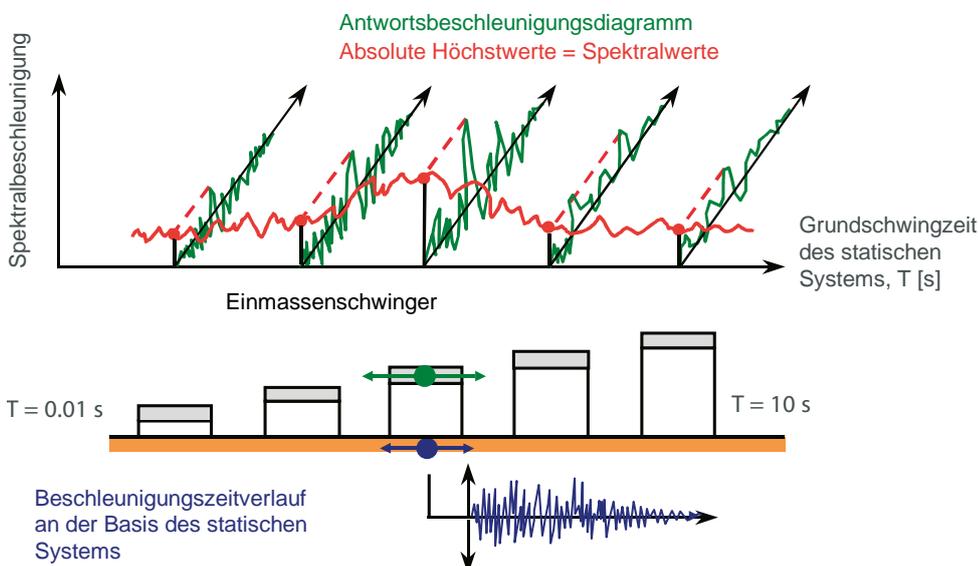
A1 Definition und Verwendung von Antwortspektren

Elastische Antwortspektren

Das Konzept des elastischen Antwortspektrums ist im Erbebeningenieurwesen von zentraler Bedeutung. Eingeführt wurde es in den 1930er-Jahren als praktisches Instrument zur Charakterisierung der Wirkung von Bodenerschütterungen auf Tragwerke. Es ermöglicht die Darstellung der Maximalantwort (bezüglich Verschiebung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung), welche ein beliebiger elastischer Einmassenschwinger erfährt, wenn er von einem Beschleunigungszeitverlauf eines Erdbebens angeregt wird.

Die Erstellung eines elastischen Beschleunigungsantwortspektrums ist schematisch in Abbildung 19 dargestellt. Eine Reihe von linearen Einmassenschwingern mit 5 % viskoser Dämpfung wird sukzessive von einem Beschleunigungszeitverlauf angeregt. Während dieser Anregung wird die Maximalbeschleunigung der Masse (in absoluten Werten) für jeden Einmassenschwinger bestimmt. Dabei handelt es sich um die elastische Spektralbeschleunigung für die Grundschnwingzeit des jeweiligen Einmassenschwingers. Die Serie von Einmassenschwingersystemen deckt dabei die gesamte relevante Bandbreite der Grundschnwingzeiten (in der Regel von 0,01 bis 10 s) ab, die für das Bauingenieurwesen relevant sind. Auf diese Weise wird das elastische Antwortspektrum für diesen spezifischen Beschleunigungszeitverlauf Punkt für Punkt konstruiert. Das Vorgehen ist identisch für die Bestimmung der elastischen Antwortspektren in Geschwindigkeit oder Verschiebung.

Abb. 19 > Schema der Erstellung eines Antwortspektrums



Wird eine grosse Zahl von für die lokale Erdbebengefährdung repräsentativen Beschleunigungszeitverläufen berücksichtigt, so ist es möglich, ein mittleres repräsentatives Antwortspektrum zu erstellen, das anschliessend geglättet und analytisch definiert werden kann (siehe Abb. 20). Solche «normalisierten» elastischen Antwortspektren, wie sie der Norm SIA 261 oder Standortstudien entnommen werden können, stellen die lokale Erdbebengefährdung dar und dienen als Grundlage für die Bestimmung der Erdbebeneinwirkung auf Tragwerke.

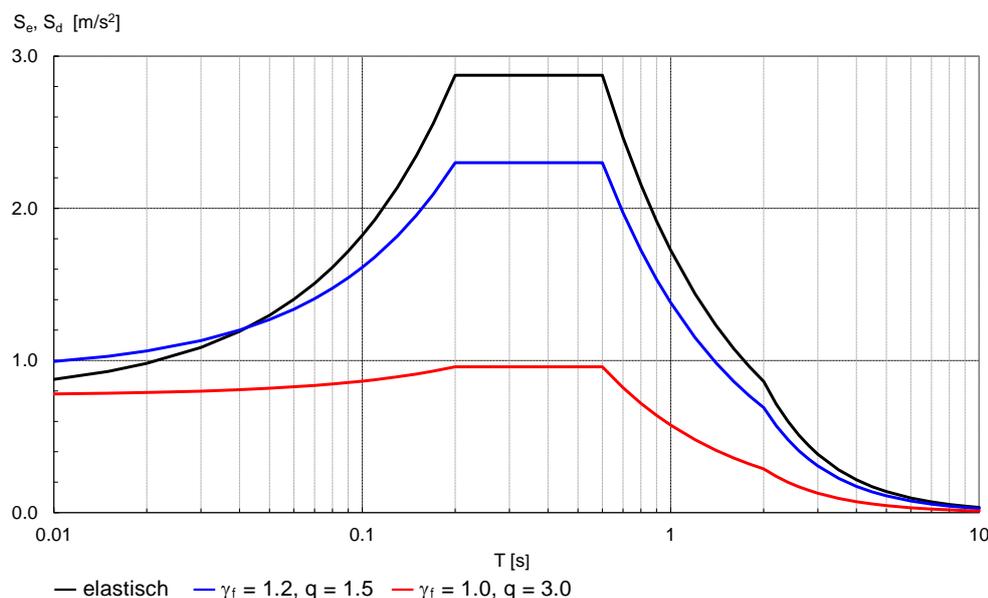
Bemessungsantwortspektren

Das Bemessungsantwortspektrum wird anhand des elastischen Antwortspektrums und unter Berücksichtigung des Verhaltensbeiwerts der Tragstruktur und des Bedeutungsfaktors des Bauwerks definiert, die in der Norm SIA 261 als q beziehungsweise als γ_f bezeichnet sind.

Der Verhaltensbeiwert q ermöglicht eine Verminderung der elastischen Spektralwerte entsprechend der Fähigkeit der Tragstruktur, plastischen Verformungen standzuhalten. Je mehr die Struktur hohen plastischen Verformungen ohne Versagen standhalten kann, desto grösser ist der Faktor q . Der Bedeutungsfaktor γ_f ist ein Multiplikationsfaktor, der die Bedeutung des Bauwerks berücksichtigt. Er variiert je nach der in der Norm SIA 261 definierten Bauwerksklasse (BWK) zwischen 1,0 und 1,4. Abbildung 20 zeigt den Unterschied zwischen einem elastischen Antwortspektrum und Bemessungsspektren für zwei Fälle.

Abb. 20 > Elastisches Antwortspektrum und Bemessungsspektrum

Beispiele von Bemessungsspektren für eine Baugrundklasse C in der Erdbebenzone 2, wobei:
 – $q = 1,5$ und $\gamma_f = 1,2$ (unarmiertes Mauerwerk, klassische Bemessung, Bauwerksklasse II)
 – $q = 3,0$ und $\gamma_f = 1,0$ (Stahlbeton, Kapazitätsbemessung, Bauwerksklasse I).

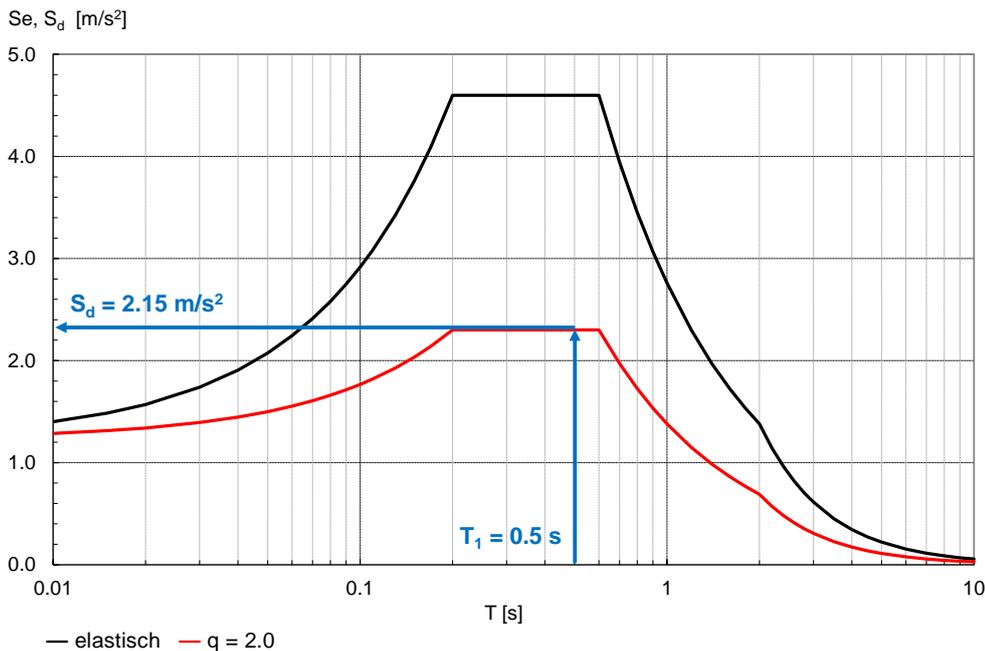
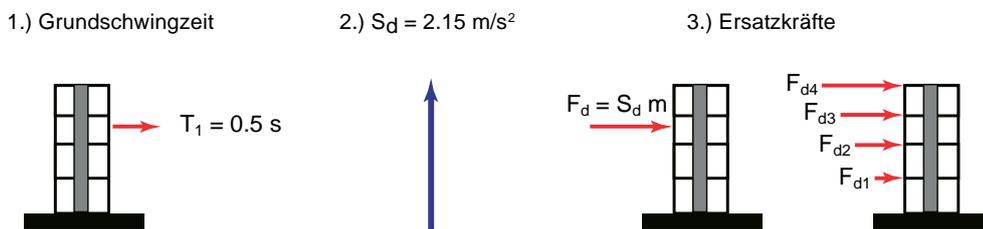


Bestimmung der Erdbebeneinwirkung

Das Prinzip der Bestimmung der Erdbebeneinwirkung auf eine bestimmte Tragstruktur wird in Abbildung 21 anhand des sogenannten Ersatzkraftverfahrens erläutert.

Abb. 21 > Schematische Darstellung des Ersatzkraftverfahrens

Bestimmung der Ersatzkräfte für eine Tragstruktur aus Stahlbeton der Bauwerksklasse I mit einem Verhaltensbeiwert von $q = 2,0$, die sich in einer Erdbebenzone 3b auf einem Baugrund der Klasse C befindet.



- > *Schritt 1:* Bestimmung der Grundswingzeit T_1 der Tragstruktur.
- > *Schritt 2:* Bestimmung des Bemessungsspektrums unter Berücksichtigung des elastischen Antwortspektrums, des Verhaltensbeiwerts q und des Bedeutungsfaktors γ_f und Bestimmung des Bemessungswerts der Spektralbeschleunigung S_d , der dem Wert von T_1 entspricht.
- > *Schritt 3:* Bestimmung der seismischen Bemessungseinwirkungen entsprechend dem Bemessungswert der Spektralbeschleunigung S_d und der Masse m . Das Ersatzkraftverfahren beruht auf dem Trägheitsprinzip, bei dem die Horizontalkraft F_d der Masse m multipliziert durch die Beschleunigung S_d entspricht. Die globale Horizontalkraft F_d wird anschliessend auf die verschiedenen Stockwerke verteilt.

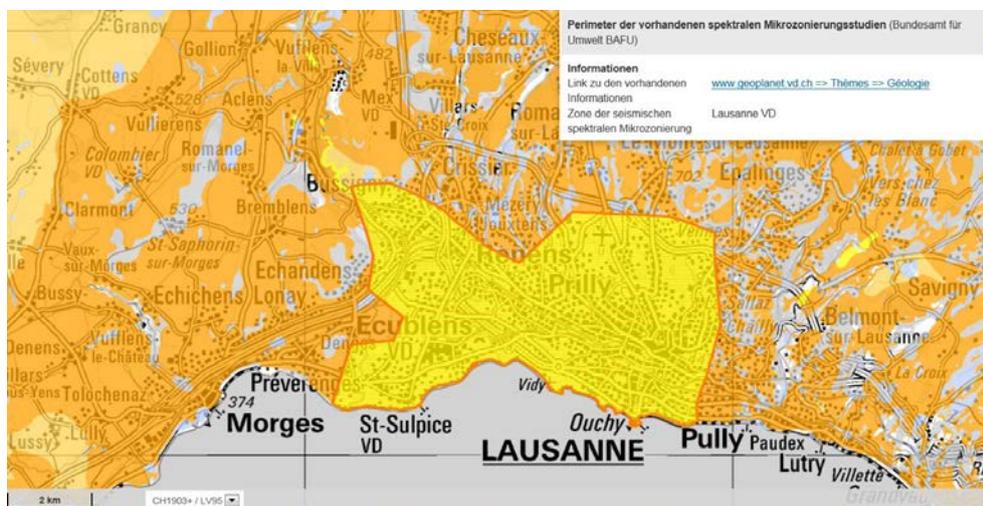
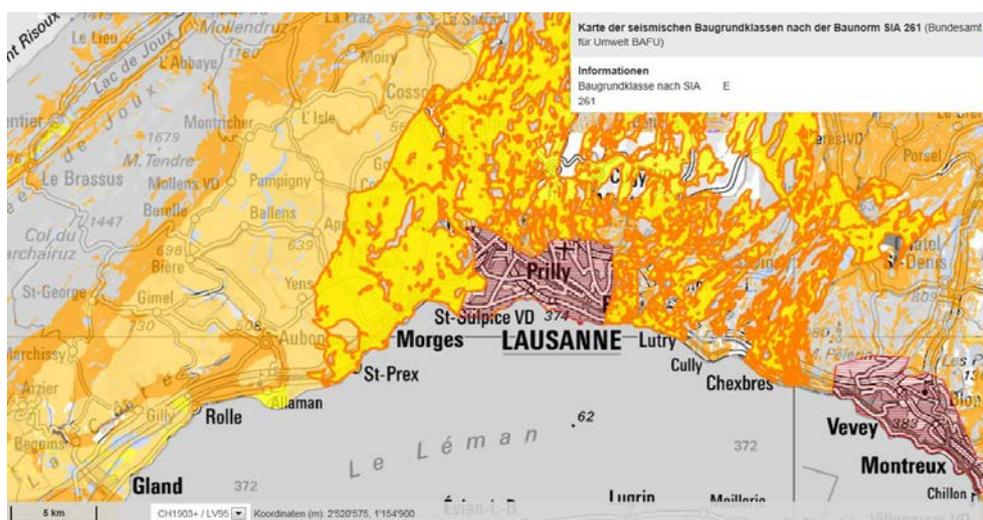
A2 Interaktive Karten auf den Geodatenportalen des Bundes

Die existierenden Karten der Baugrundklassen und Informationen zu den vorhandenen spektralen seismischen Mikrozonierungen sind unter den Internetadressen <http://map.geo.admin.ch/> oder <http://map.bafu.admin.ch/> (siehe Ausschnitt in Abb. 22) verfügbar. Mit einer Suche nach Koordinaten (x, y) und/oder nach Adressen lassen sich die gewünschten standortrelevanten Informationen rasch finden, z. B.:

- > Erdbebenzone gemäss Norm SIA 261;
- > Baugrundklasse gemäss Norm SIA 261, sofern verfügbar;
- > Link zu detaillierten Angaben über die spektrale seismische Mikrozonierung, sofern verfügbar (rot schraffierte Bereiche).

Die Kantone sind als Eigentümer der Daten für deren Aktualisierung zuständig.

Abb. 22 > Ausschnitt aus dem Geodatenportal des Bundes



A3 Bodenverflüssigungspotenzial

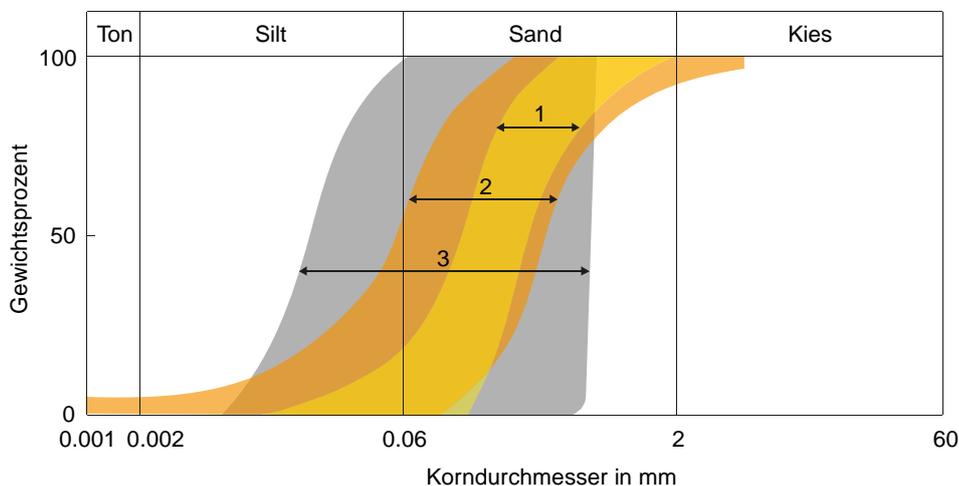
Identifikation von potenziell verflüssigbaren Böden

Bei potenziell verflüssigbaren Böden handelt es sich hauptsächlich um junge gesättigte, lockere bis mitteldichte sandig-siltige Ablagerungen, die sich in einer Tiefe bis 15 m befinden und einen oberflächennahen Grundwasserspiegel aufweisen. Sind solche Böden einer raschen zyklischen Beanspruchung ausgesetzt, wie dies bei einem Erdbeben der Fall ist, können sie ihren Scherwiderstand teilweise oder ganz verlieren. Dieser Verlust an Scherwiderstand ist darauf zurückzuführen, dass der Porenwasserdruck mit jedem horizontalen Verschiebungszyklus graduell ansteigt. Dieser Anstieg des Porenwasserdrucks erfolgt, weil die geschüttelten Mineralkörner des Bodens sich in einer kompakteren Form reorganisieren (und damit weniger Volumen besetzen) und das überschüssige Porenwasser keine Zeit hat, sich zu verbreiten. Ist die Erhöhung des Porenwasserdrucks gross genug, kommt es zu einer vollständigen Verflüssigung des Bodens (totaler Kontaktverlust zwischen den Mineralkörnern des Bodens). Gesättigte Böden in einer Tiefe von mehr als 20 m sind normalerweise dicht genug, um nicht mehr von einer Bodenverflüssigung betroffen zu sein. Ausnahmen sind indessen immer möglich.

Die Kornverteilung, die Kompaktion, der Konsolidierungsgrad, die Bodenstruktur sowie die effektiven Spannungen bestimmen das Verflüssigungspotenzial eines Bodens (siehe auch Empfehlungen AFPS 90). Die Anfälligkeit gegenüber der Bodenverflüssigung sinkt mit zunehmender Kompaktion sowie mit dem Alter und dem Konsolidierungsgrad der Sedimente. Was die Kornverteilung anbelangt, so sind es hauptsächlich die relativ sauberen Sande und Silte mit enger Korngrössenverteilung, die sich verflüssigen können, sowie gewisse siltig-tonige Bodentypen (Abb. 23).

Abb. 23 > Korngrössenbereich von verflüssigbaren Böden

Beispiel von Korngrössenbereichen, für die ein Bodenverflüssigungspotenzial identifiziert wurde. 1 – Sand von Niigata; 2 – Schicht von 19 japanischen Sanden, die sich unter einer Erdbebeneinwirkung verflüssigten; 3 – Gemäss den Laborversuchen von Lee und Focht (nach Finn 1972).



Gewisse siltig-tonige Böden können sich ebenfalls verflüssigen. Für solche Böden bestehen Kriterien, die auf der Kornverteilung und den «Zustandsgrenzen nach Atterberg» beruhen (insbesondere die Plastizitätszahl I_P und die Fließgrenze w_L) und mit denen sich die Anfälligkeit für eine Verflüssigung bestimmen lässt (Ansal 2014).

Kiesböden sind normalerweise wenig anfällig. Aber auch Kiesablagerungen können sich unter Umständen verflüssigen, wenn ihre natürliche Durchlässigkeit stark eingeschränkt ist (Ansal 2014), das heisst:

- > wenn sie von Sedimenten mit geringer Durchlässigkeit umgeben oder begrenzt sind;
- > wenn die Entwässerung durch das Vorhandensein von feinkörnigen Sedimenten zwischen den Kieselsteinen verhindert wird;
- > bei einer bedeutenden Schichtmächtigkeit, durch die sich die Distanz erhöht, auf der die Entwässerung bei einem Erdbeben rasch erfolgen muss.

Untersuchung des tatsächlichen Bodenverflüssigungspotenzials in Abhängigkeit von der seismischen Einwirkung

Bei Böden, von denen anzunehmen ist, dass sie sich verflüssigen oder zumindest einen erheblichen Anstieg des Porenwasserdrucks erfahren können, muss das tatsächliche Potenzial dieser Phänomene entsprechend dem Niveau der seismischen Einwirkung überprüft werden, die für den betreffenden Standort gilt. Dazu gibt es verschiedene Ansätze, die sich in die folgenden drei Hauptkategorien unterteilen lassen:

- > empirische Methoden (siehe z. B. Idriss und Boulanger 2008);
- > Laborversuche (dynamische Triaxialversuche usw.);
- > Modellierung durch finite Elemente mit konstitutiven Modellen, welche das Phänomen adäquat darstellen können.

In der Praxis werden hauptsächlich empirische Methoden angewendet. In der Schweiz empfiehlt die Norm SIA 267 (Geotechnik) die Anwendung empirischer Methoden auf Basis von Drucksondierungen («cone penetration test», CPT). Diese Norm enthält zudem Angaben zu den Werten, die bestimmten bei empirischen Methoden verwendeten Parametern zuzuordnen sind, so etwa die zu berücksichtigende Magnitude von Erdbeben. Aufgrund der mit diesen Methoden gemachten Erfahrungen lässt sich sagen, dass für die seismische Bemessungseinwirkung in der Erdbebenzone 1 in der Schweiz praktisch kein Potenzial für eine Bodenverflüssigung besteht. Ausnahmen sind indessen immer möglich.

A4 Empfehlungen für die Karten der Baugrundklassen, die vor 2014 erstellt wurden

Die wichtigsten Unterschiede zwischen den Versionen von 2003 und 2014 der Norm SIA 261 betreffen die folgenden Anpassungen bei der Definition der Baugrundklassen (siehe auch Tab. 4):

- > Bereich der Scherwellengeschwindigkeit v_s der Klasse B von 500–800 m/s (vorher 400–800 m/s);
- > Streichung der Angabe von Mächtigkeiten über 30 m für die Klassen B und C zugunsten der Formulierung «einige zehn Meter»;
- > ausführlichere Angaben zur Mächtigkeit für die Klasse D;
- > Mächtigkeit der Schicht von Lockergestein auf Fels in der Definition der Klasse E von 5–20 m (vorher 5–30 m); dieses Lockergestein darf ausschliesslich über einer Schicht der Baugrundklasse A liegen (vorher A oder B);
- > Möglichkeit, sehr steife tonige Böden der Baugrundklasse B zuzuweisen (vorher nicht ausdrücklich erwähnt);
- > Möglichkeit, steife tonige Böden der Baugrundklasse C zuzuweisen (vorher nicht ausdrücklich erwähnt);
- > Streichung der Kategorie «Rutschmassen» in der Baugrundklasse F.

Diese Anpassungen haben einige Auswirkungen bei der Interpretation und beim Lesen von vor der Revision erstellten Karten.

Alte Baugrundklassen F2

Die vor 2014 erstellten Karten unterscheiden zwischen den Baugrundklassen F1 (strukturempfindliche und organische Ablagerungen, neu F) und F2 (Rutschmassen). Die Integration von Rutschmassen (im Sinne eines möglichen durch ein Erdbeben induzierten Effekts) ist nicht gerechtfertigt und wurde gestrichen¹. Bei einer Überarbeitung von Karten sind die in Baugrundklasse F2 liegenden Bereiche derjenigen Baugrundklasse zuzuordnen, die dem Standort entspricht (Klassen A bis F).

Anpassungen der Referenziefen für die Klasse E

Die für die Klasse E entscheidende Mächtigkeit einer Schicht von Lockergestein wurde von 30 auf 20 m reduziert, um eine Übereinstimmung mit dem Eurocode 8 zu gewährleisten. Dies bedeutet, dass in alten Karten die Böden der Klasse E zulasten der Klassen C oder D tendenziell überrepräsentiert werden. Bei einer allfälligen Neuklassierung in Klasse C (anstatt E) stellt dies kein Problem dar (da das Spektrum E konservativer ist), bei Böden, die in die Klasse D umklassiert werden, hingegen schon. Der Grund liegt darin, dass das Spektrum E im Vergleich zum Spektrum D die seismische Einwirkung oberhalb eines Bereichs der Grundschiwingzeit von 0,6 s unterschätzt.

¹ Es besteht in baulicher Hinsicht keinerlei Zusammenhang zwischen der Berücksichtigung von Massenbewegungen und der Berücksichtigung der Bodenbeschaffenheit bezüglich Standorteffekten. Der Ingenieur muss die Baugrundklasse des Geländes kennen, unabhängig davon, ob eine Rutschgefährdung vorliegt oder nicht.

Tab. 4 > Beschreibung der seismischen Baugrundklassen: Gegenüberstellung der Version von 2003 und von 2014 der Norm SIA 261

Klasse	Beschreibung SIA 261 (2003)	$V_{s,30}$ [m/s]	Beschreibung SIA 261 (2014)	$V_{s,30}$ [m/s]
A	Harter Fels (z. B. Granit, Gneis, Quarzit, Kieselkalk, Kalk) oder weicher Fels (z. B. Sandstein, Nagelfluh, Juramergel, Opalinuston) unter max. 5 m Lockergesteinsabdeckung	>800	Fels oder andere felsähnliche geologische Formation mit höchstens 5 m Lockergestein an der Oberfläche	>800
B	Ablagerungen von grossräumig zementiertem Kies und Sand und/oder vorbelastete Lockergesteine mit einer Mächtigkeit über 30 m	400–800	Ablagerungen von sehr dichtem Sand und Kies oder sehr steifem Ton, mit einer Mächtigkeit von mindestens einigen zehn Metern, gekennzeichnet durch einen allmählichen Anstieg der mechanischen Eigenschaften mit der Tiefe	500–800
C	Ablagerungen von normal konsolidiertem und unzementiertem Kies und Sand und/oder Moränenmaterial mit einer Mächtigkeit über 30 m	300–500	Ablagerungen von dichtem oder mitteldichtem Sand, Kies oder steifem Ton mit einer Mächtigkeit von einigen zehn bis mehreren hundert Metern	300–500
D	Ablagerungen von nicht konsolidiertem Feinsand, Silt und Ton mit einer Mächtigkeit über 30 m	150–300	Ablagerungen von lockerem bis mitteldichtem kohäsionslosem Lockergestein (mit oder ohne einige weiche kohäsive Schichten) oder von vorwiegend weichem bis steifem kohäsivem Lockergestein	<300
E	Alluviale Oberflächenschicht der Baugrundklassen C oder D mit einer Mächtigkeit zwischen 5 und 30 m über einer steiferen Schicht der Baugrundklassen A oder B		Oberflächennahe Lockergesteinsschicht mit v_s -Werten der Klasse C oder D mit einer Mächtigkeit zwischen 5 und 20 m über einer Schicht mit einem v_s -Wert von >800 m/s	
F	Strukturempfindliche und organische Ablagerungen (z. B. Torf, Seekreide) und Rutschmassen mit einer Mächtigkeit über 10 m		Strukturempfindliche, organische und sehr weiche Ablagerungen (z. B. Torf, Seekreide, weicher Ton) mit einer Mächtigkeit über 10 m	

Bei der Klasse B könnte die Streichung der minimalen Mächtigkeit von 30 m eine Neuklassierung aus der Klasse C in die Klasse B erforderlich machen (womit bis zu einem gewissen Grad allfällige Fehler bei der Baugrundklassenzuweisung zwischen C und B korrigiert werden, beispielsweise bei Ablagerungen von Moränenmaterial).

Änderungen der lithologischen Beschreibungen (Angabe der Kornverteilung) für die Klassen B, C und D

Bei der lithologischen Beschreibung der Baugrundklassen von 2003 wurden in den Klassen B und C die feinkörnigen Böden nicht explizit erwähnt, und in der Klasse D fehlten die grobkörnigen Böden. Dies ist in der aktuellen Version nicht mehr der Fall, und sehr weiche Kiesablagerungen könnten theoretisch der Klasse D zugewiesen werden. Es ist ebenfalls möglich, dass sich feinkörnige, sehr steife Sedimente nun einfacher der Klasse C oder B zuordnen lassen.

Empfehlungen bezüglich der Revision von Karten der Baugrundklassen, die vor 2014 erstellt wurden

Bei den vor 2014 erstellten Karten der Baugrundklassen besteht aufgrund der oben aufgeführten Änderungen kein dringender Revisionsbedarf. Bei einer zukünftigen Kartenrevision sind indessen die neuen Beschreibungen und der vorliegende methodologische Leitfaden zu berücksichtigen. Diese Empfehlung beruht auf den folgenden Überlegungen:

- > Ein Grossteil der kartierten Bereiche dürfte mit der neuen Beschreibung identisch bleiben;
- > bei den Bereichen, die Unterschiede aufweisen könnten, liegen die Karten, welche vor 2014 erstellt wurden, tendenziell mehr auf der konservativen Seite;
- > die Informationen aus einer Karte der Baugrundklassen sind anhand von projektspezifischen Informationen zu überprüfen; die Zuteilung einer Baugrundklasse aufgrund projektspezifischer Informationen hat Vorrang.

Kommunikation, Informationsbedarf

Das BAFU empfiehlt den Kantonen, die über eine Karte der seismischen Baugrundklassen von vor 2014 verfügen, die Karte mit einem Verweis für die Benutzer zu begleiten. Beispiel:

«Diese Karte der Baugrundklassen wurde auf Basis der Norm SIA 261, Ausgabe 2003, erstellt. Die Beschreibung der seismischen Baugrundklassen wurde in der Norm SIA 261, Ausgabe 2014, angepasst. Diese Anpassungen sind in der vorhandenen Karte noch nicht berücksichtigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Anpassungen in den meisten Fällen keinen Einfluss auf die Klassifizierung haben oder dass die Klassifizierung eher auf der konservativen Seite liegt. Es liegt jedoch in der Verantwortung der Fachplaner, die Baugrundklasse aufgrund der projektspezifischen Informationen und anhand der Beschreibungen der Baugrundklassen in der Norm SIA 261, Ausgabe 2014, zu überprüfen.»

> Literatur

AFPS 1990: Recommandations AFPS 90 pour la rédaction de règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes aux séismes. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées. Paris.

Ansal A.M. 2014: Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology: Volume 1, chap 19 Recent Advances in Seismic Soil Liquefaction Engineering. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, 650 p.

Burjanek J., Fäh D., Pischotta M., Rovelli A., Calderoni G., Bard, P.-Y., NERA-JRA1 working group 2014: Site effects at sites with pronounced topography: overview & recommendations, Research report for EU project NERA, 64 pp, doi: 10.3929/ethz-a-010222426.

EMS 1998: – European Macroseismic Scale; Grünthal, G. (Ed.). Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie, volume 19.

Eurocode 8 – NF EN 1998-1 (2005): Calcul des structures pour leur résistance aux séismes, Partie 1: Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments. ISSN 0335–3931.

Fäh D. and Gassner-Stamm G. 2014: : Soil Classes compared with Geophysical measurements (V_s ,30 and f_0). Report SED, (ETHZ).

Finn, W.D.L. 1972: Soil dynamics and liquefaction of sand. Proc. of Int. Conf. on Microzonation for safer Construction-Research and Application, Seattle, Wash.

Idriss I.M. and Boulanger R.W. 2008: Soil liquefaction during earthquakes – Earthquake Engineering Research Institute (EERI).

Norm SIA- SIA-261 (2003): Einwirkungen auf Tragwerke. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich.

Norm SIA- SIA-261 (2014): Einwirkungen auf Tragwerke. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich.

Norm SIA-267 (2013): Geotechnik. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich.

Norm SIA 269/8 (erscheint 2016). Erhaltung von Tragwerken – Erdbeben. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich.

Schweizerischer Erdbebendienst (SED) 2015: Seismic hazard assessment of Switzerland. www.seismo.ethz.ch/

Studer J.A. und Koller M.G. 1997: Bodendynamik, Grundlagen, Kennziffern, Probleme. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin.

> Verzeichnisse

Abbildungen

Abb. 1 Erdbebenmechanismus	11	Abb. 15 Elastische Antwortspektren gemäss Norm SIA 261	27
Abb. 2 Seismische Aktivität in der Schweiz	12	Abb. 16 Auszug aus einer Karte der Baugrundklassen des Kantons Neuenburg	28
Abb. 3 Beispiel einer Karte der Erdbebengefährdungskarte der Schweiz	13	Abb. 17 Schematische Wiedergabe einer Zuweisung von Baugrundklassen	31
Abb. 4 Karte der Erdbebenzonen gemäss Norm SIA 261	14	Abb. 18 Dateninterpolation für die Erstellung einer Karte der Baugrundklassen	32
Abb. 5 Erdbebenrisiko in der Schweiz	15	Abb. 19 Schema der Erstellung eines Antwortspektrums	36
Abb. 6 Impedanzkontrast	16	Abb. 20 Elastisches Antwortspektrum und Bemessungsspektrum	37
Abb. 7 Effekte der Felsgeometrie	17	Abb. 21 Schematische Darstellung des Ersatzkraftverfahrens	38
Abb. 8 Beispiel eines Talbodeneffekts in Sitten (VS)	18	Abb. 22 Ausschnitt aus dem Geodatenportal des Bundes	39
Abb. 9 Beispiel eines topografischen Standorteffekts	19	Abb. 23 Korngrössenbereich von verflüssigbaren Böden	40
Abb. 10 Beispiel eines Bergsturzes in der Schweiz nach einem Erdbeben	20		
Abb. 11 Beispiel einer Bodenverflüssigung	21	Tabellen	
Abb. 12 Elastische Antwortspektren der Norm SIA 261 und die Bereiche der Fundamentalfrequenzen und -perioden verschiedener Bauwerkstypen	22	Tab. 1 Baugrundklassen nach der Norm SIA 261, revidiert 2014	26
Abb. 13 Orientierungskriterien für die Wahl einer Methode zur Berücksichtigung der Standorteffekte	23	Tab. 2 Beispiel einer Tabelle als Entscheidungshilfe für die Zuordnung einer geologischen Formation zu einer Baugrundklasse	30
Abb. 14 Überblick über die Gebiete, für die eine Karte der Baugrundklassen oder eine spektrale seismische Mikrozonierung existiert	25	Tab. 3 Standard-Farbcodes (RGB-Werte) für Baugrundklassen	33
		Tab. 4 Beschreibung der seismischen Baugrundklassen: Gegenüberstellung der Version von 2003 und von 2014 der Norm SIA 261	43

> Glossar

Antwortspektrum

Grafik, welche die maximale Antwort (in Beschleunigung, Geschwindigkeit oder Verschiebung) aller möglichen gedämpften Federmasse-Systemen darstellt, die von einem bestimmten Beschleunigungszeitverlauf angeregt werden (siehe Anhang A1).

Baugrundklasse

Die Norm SIA 261 von 2014 definiert sechs Baugrundklassen für die Bestimmung der Erdbebeneinwirkung aufgrund der lokalen Geologie.

Beschleunigungszeitverlauf

Instrumentelle Messung eines Erdbebens, die die Bodenbeschleunigung als Funktion der Zeit darstellt.

Bodenverflüssigung

Durch ein Erdbeben induzierter momentaner Totalverlust der Tragfähigkeit eines Lockergesteinsuntergrunds. Betrifft prinzipiell wassergesättigte und wenig kompakte Sande und Silte.

Eintretenswahrscheinlichkeit

Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Referenzereignisses für eine bestimmte Zeitperiode und ein bestimmtes Gebiet (z. B. die Wahrscheinlichkeit des Wiederauftretens eines Erdbebens der Magnitude >6,0 in der Schweiz über eine Zeitperiode von 50 Jahren).

Erdbebengefährdung

Wahrscheinlichkeit, mit der in einem Referenzzeitraum an einem bestimmten Ort ein bestimmter Wert eines Parameters zur Beschreibung der Bodenbewegung (z. B. die Horizontalbeschleunigung) erreicht oder überschritten wird.

Erdbebenrisiko

Produkt aus der seismischen Gefährdung, dem Wert und der Verletzbarkeit der betroffenen Sachgüter.

Erdbebensignal

Genereller Ausdruck für den Frequenzgehalt, die Amplitude und die Dauer einer seismischen Welle.

Geologische Karte

Die geologische Karte gibt Aufschluss über die oberflächennahen Schichten der Erdkruste. Die geologischen Formationen werden nach ihrer Zusammensetzung (Lithologie), ihrem Alter (Stratigraphie) und ihrer strukturellen Lage (Tektonik) klassiert und dann auf einer topografischen Grundlage eingetragen.

Geophysik

Gesamtheit der Methoden zur Erforschung der Erdkruste mittels indirekter physikalischer Methoden (Gravimetrie, Erdmagnetismus, Seismologie usw.).

Geschwindigkeitsprofil

Vertikalschnitt durch den Untergrund, der die Scherwellengeschwindigkeit (S-Wellen) oder Kompressionswellengeschwindigkeit (P-Wellen) als Funktion der Tiefe angibt.

GIS-Software

Ein Geoinformationssystem (GIS) ist eine Software zur Organisation und Präsentation räumlicher Daten. Damit können geografische Daten erfasst, organisiert, verwaltet, verarbeitet und in Form von Karten und Plänen wiedergegeben werden.

Grundfrequenz

Frequenz, mit welcher ein Objekt frei schwingt.

Impedanz

Physikalische Grösse, die ein Material als Produkt aus Dichte und Geschwindigkeit der Wellen, die ihn durchlaufen, charakterisiert. Oft ist die Rede vom Impedanzkontrast zwischen zwei Materialien, an deren Grenzfläche die durchquerenden Erdbebenwellen reflektiert und refraktiert werden.

Induzierte Effekte

Prozesse wie Massenbewegungen, Bodenverflüssigung oder Thixotropie, die bei einem Erdbeben ausgelöst werden.

Intensität

Grösse zur Beschreibung der Stärke der Erdbebenschütterungen auf einer qualitativen 12-stufigen Skala. Sie wird aufgrund von Beobachtungen des menschlichen Verhaltens sowie der Schäden an Bauwerken und in der Natur bestimmt. Die EMS-98-Skala wird als Standard in Europa verwendet.

Karte der Baugrundklassen

Karte, die das Untersuchungsgebiet im Massstab 1:25 000 in eine der sechs Baugrundklassen, die in der Baunorm SIA 261 definiert sind, einteilt.

Magnitude (nach Richter)

Durch C. F. Richter im Jahr 1935 eingeführte Grösse, mit der die an einer seismischen Quelle (Erdbebenherd) freigesetzte Energie auf einer offenen logarithmischen Skala bestimmt wird. Die entsprechenden Werte für verspürte bis zerstörerische Erdbeben schwanken zwischen 2.5 und 9. Die Erhöhung der Magnitude um eine Grösseneinheit entspricht etwa der Freisetzung von 30-mal mehr Energie.

P-Wellen

P-Wellen (oder Kompressionswellen) sind Wellen, deren Schwingungsebene in der gleichen Richtung wie die Ausbreitung der Wellen liegt.

Seismische Zonierung

Definition von Erdbebenzonen auf der Basis von Erdbebengefährdungskarten.

Spektrale seismische Mikrozonierung

Untersuchungen mit dem Ziel der Quantifizierung der lokalen Standorteffekte sowie der Bereitstellung von standortspezifischen Antwortspektren. Dabei wird zwischen punktuellen Standortstudien (für einen einzelnen Standort) und spektralen seismischen Mikrozonierungsstudien (für ein grösseres Gebiet) unterschieden.

Standorteffekt

Änderung des einfallenden Erdbebensignals (Verstärkung oder Abminderung) durch die geologischen, topografischen und geometrischen Eigenschaften eines Standortes.

S-Wellen

S-Wellen (oder Scherwellen) sind Wellen, die durch eine Schwingung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung charakterisiert werden.

Thixotropie

Abnahme der Viskosität eines Materials oder Flüssigkeit unter Scherspannungen. Nach Absetzen der Scherspannungen nimmt die Viskosität progressiv wieder zu, und das Material verfestigt sich wieder.

Verletzbarkeit

Verhältnis zwischen den Schäden an einem Bauwerk und dem Niveau der Erdbebeneinwirkung.

Wiederkehrperiode

Zeitintervall zwischen einem Referenzereignis und dessen erneutem Auftreten (z. B. Eintreten eines Erdbebens mit einer Magnitude grösser als 6 in einer bestimmten Region oder Überschreitung einer Bodenbeschleunigung einer gewissen Grösse an einem bestimmten Ort).

Abkürzungen**BWK**

Bauwerksklasse gemäss Norm SIA 261

CPT

Drucksondierung

N_{SPT}

Erforderliche Schlagzahl für eine Eindringtiefe von 0,3 m bei einem Standard-Penetrometertest

SED

Schweizerischer Erdbebendienst

SIA

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

SPT

Standard-Penetrometertest

S_u

Scheinbare undrainierte Kohäsion

V_s

Scherwellengeschwindigkeit

V_{s,30}

Mittlere Scherwellengeschwindigkeit bis in eine Tiefe von 30 m