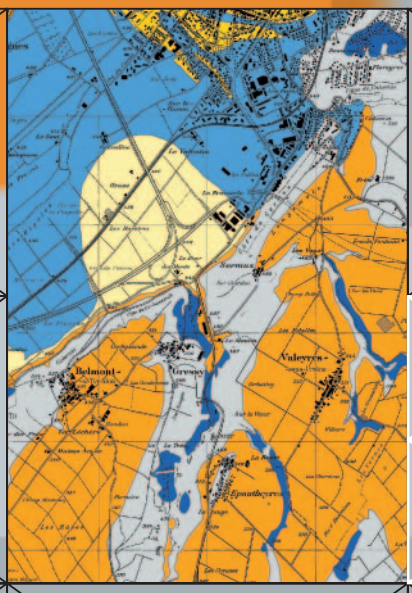
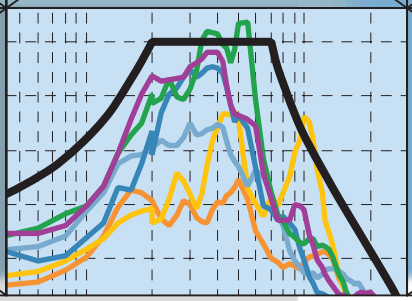






Verfahren zur Erstellung und Verwendung von Mikrozonierungsstudien in der Schweiz

Richtlinien des BWG – Directives de l'OFEG – Direttive dell'UFAEG
Bern, 2004

Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation
Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication
Dipartimento federale dell'ambiennte, dei trasporti,
dell'energia e delle comunicazioni

Verfahren zur Erstellung und Verwendung von Mikrozonierungsstudien in der Schweiz

Richtlinien des BWG – Directives de l'OFEG – Direttive dell'UFAEG
Bern, 2004

Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

Impressum

Herausgeber:	Bundesamt für Wasser und Geologie, BWG
Auflage:	1500d/700f
Zitiervorschlag:	Verfahren zur Erstellung und Verwendung von Mikrozonierungsstudien in der Schweiz, Richtlinien des BWG 2004
Sprachversion:	Original in französisch
Übersetzung:	Petra Blaser, Petraconsult, Arni (deutsche Fassung) Mit dem Beitrag von Hugo Raetzo, (BWG) Biel
Bildnachweis:	Sämtliche Kartenausschnitte reproduziert mit der Bewilligung von Swisstopo PK25/250, DHM25, Luftbild ©swisstopo (BA046448)
Internethinweis:	Die Publikation ist im PDF-Format auf der BWG-Internetsite www.bwg.admin.ch verfügbar
Bezugsadresse	BBL, Vertrieb Publikationen, CH-3003 Bern, Internet: www.bbl.admin.ch/bundespublikationen
Bestellnummer:	804.806.d
Copyright: © BWG, Biel, November 2004

Autoren

Olivier Lateltin (Vorsitz), Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Biel

Blaise Duvernay, SGEB, Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Biel

Donat Fäh, GSGI, Schweizerischer Erdbebendienst (SED), ETH Zürich

Prof. Domenico Giardini, Schweizerischer Erdbebendienst (SED), ETH Zürich

Christoph Haemmig, Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Biel

Corinne Lacave, SGEB/GSGI, Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Carouge

Pascal Tissières, SGEB/GSGI Bureau d'ingénieurs Tissières, Martigny

Florian Widmer, Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Biel

Begleitgruppe

Christoph Beer, SFIG, Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Bern

Peter Haldimann, Vorsitz SFIG, Büro Dr. H. Jäckli AG, Zürich

Prof. Simon Löw, SFIG, Ingenieurgeologie ETH, Zürich

Walter Müller, SFIG, NAGRA, Zürich

Prof. Aurèle Parriaux, SFIG, Geolep-ENAC, EPF Lausanne

Martin Koller, SGEB, Résonance Ingénieurs-Conseils, Carouge

Jost Studer, SFIG/SGEB, Bureau Studer Engineering, Zürich

Thomas Wenk, Vorsitz SGEB, Normenkommission SIA 261, Wenk Engineering, Zürich

Vorwort des Herausgebers

Anfangs des Jahres 2003 hat der schweizerische Ingenieur- und Architektenverein (SIA) die neuen SIA Normen 260 bis 267 (Swisscodes) veröffentlicht, welche mit den europäischen Normen (Eurocodes) kompatibel sind. Um den schweizerischen Bedürfnissen gerecht zu werden, sind die Normen momentan noch in einer Ausarbeitungsphase. Gleich wie alle anderen nationalen Normen, haben auch diese neuen Normen noch keine rechtliche Verbindlichkeit. Wenn jedoch bei einem Erdbeben ein Schaden auftritt, dann definieren diese Swisscodes gemäss dem anerkannten Stand der Technik, den Standard im Bauwesen. Insbesondere sind diejenigen Anforderungen erweitert und erhöht worden, welche die Sicherheit von neuen Bauwerken und die Standorteffekte bei Erdbeben betreffen.

Die Erdbebensicherheit von zukünftigen Bauwerken basiert in erster Linie auf einem Programm von sieben Massnahmen (Entscheid des Bundesrats vom 11. Dezember 2000) des Bundes. Dank der Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Erdbebendienst (SED/ETHZ), der Schweizerischen Fachgruppe für Ingenieurgeologie (SFIG) und der Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (SGEB) hat die Koordinationsstelle des Bundes für Erdbebenvorsorge im BWG eine Anleitung für die Durchführung von Mikrozonierungsstudien erarbeitet. Diese Richtlinien sind als Ergänzung der Norm SIA 261 «Einwirkungen auf Tragwerke» zu verstehen. Die gegenwärtigen Richtlinien haben das Ziel, sowohl die Arbeit von Baufachleuten zu vereinfachen, als auch die Berücksichtigung von Standorteffekten und Studien an Bauwerken zu fördern. Durch die Anwendung der SIA Baunormen und Berücksichtigung der Baugrundklassen ist es in unserem Land mit geringer bis mittlerer Erdbebengefährdung fortan möglich, eine angemessene Erdbebensicherheit bei neuen Bauwerken – ohne oder nur mit bescheidenen Mehrkosten – zu gewährleisten.

Biel, November 2004

Dr. Christian Furrer
Direktor des Bundesamts
für Wasser und Geologie

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung **8**
1.1 Definitionen, Ziele und Zielpublikum
1.2 Anlass der Studie
1.3 Erdbebenrisiko in der Schweiz
1.4 Regionale Erdbebengefährdung in der Schweiz
1.5 Bauwerksklassen und Erdbebensicherheit
1.6 Mikrozonierungsarten
1.7 Wahl der Mikrozonierungsart

2. Beschreibung der Phänomene **20**
2.1 Erdbeben
2.2 Standorteffekte
2.3 Induzierte Effekte: Bergsturz, Erdrutsch, Bodenverflüssigung und Thixotropie
2.4 Fundamentalfrequenz des Bodens und Resonanz zwischen Boden und Bauwerk

3. Karte der Baugrundklassen gemäss SIA 261 **30**
3.1 Definition
3.2 Die Anwendung der Karte der Baugrundklassen
3.3 Basisdaten und Begleitdokumente
3.4 Transkription der geologischen Legende
3.5 Legende und Interpretation der Karte der Baugrundklassen

4. Studien zur spektralen seismischen Mikrozonierung **35**
4.1 Regionale Gefährdung
4.2 Bestimmung der Spektralverstärkung
4.3 Elastische Antwortspektren für einen spezifischen Standort und spektrale Mikrozonierungskarte
4.4 Methoden
4.5 Beispiele für die spektrale Mikrozonierung

5. Rechtliche Aspekte der Mikrozonierung **51**
5.1 Gefahrenkarten und Raumplanung
5.2 Aufgaben der Behörden, Auftragnehmer und Eigentümer

Anhänge **54**
A Fachbegriffe
B Intensitätsskala EMS-98
C Definition und Anwendung von Antwortspektren
D Interaktive Karten der Baugrundklassen über das Internet

Verzeichnis der Figuren und Tabellen **62**

Bibliographie **64**

1. Einführung

1.1 Definitionen, Ziele und Zielpublikum

In der Mikrozonierung werden seismische Einwirkungen basierend auf den geologischen und topographischen Standorteffekten berücksichtigt. Die neue Norm SIA 261 «Einwirkungen auf Tragwerke» (2003) ordnet den Bauwerksstandorten eine der sechs Baugrundklassen zu. Können die Eigenschaften des Baugrunds nicht normgerecht identifiziert werden, dann müssen Bodenuntersuchungen die Auswirkungen von Erdbeben bestimmen. Die Erdbebensicherheit muss bei der Planung und Dimensionierung von neuen Bauwerken berücksichtigt werden. Dies gilt ebenfalls für die Überprüfung von bestehenden Bauwerken.

Ziel der Mikrozonierung ist ein einheitlicher Sicherheitsstandard für Neubauten in allen Erdbebenzonen unabhängig von geologischen Standorteffekten. Mit der Mikrozonierung werden Zonen identifiziert, die während einem Erdbeben ein ungünstiges Verhalten zeigen und spezielle Massnahmen verlangen. Es werden zwei Stufen unterschieden: Die erste Stufe der Mikrozonierung, auch Mikrozonierung nach SIA 261 genannt, basiert auf der Erdbebenzonenkarte und den Baugrundklassen der Norm SIA 261 «Einwirkungen auf Tragwerke» (2003). Daraus resultiert eine Zuordnung eines Standortes zu der Erdbebengefährdungszone und zu einer Baugrundklasse. Die Karte der Baugrundklassen und zusätzliche Dokumente zur Berücksichtigung der geometrischen Verstärkungseffekte sind wichtige Instrumente bei der Umsetzung. Die zweite Stufe der Mikrozonierung, auch spektrale seismische Mikrozonierung genannt, wird für Zonen oder Bauwerke mit hohem Risiko angewendet. Mit der spektralen Mikrozonierung berechnet man den Einfluss der geologischen Standortfaktoren und erhält spezifischere sowie genauere Resultate als mit der Baunorm SIA 261.

Die vorliegende Wegleitung liefert die zur Mikrozonierung notwendigen Ergänzungen zur Norm SIA 261. Geologen, Ingenieure und Architekten wenden die Methode an, wenn neue Bauwerke geplant oder realisiert werden. Die Wegleitung ist auch vorgesehen für kommunale, kantonale und eidgenössische Behörden, die im Bereich Raumplanung tätig sind und Baubewilligungen erteilen. Auch politische Entscheidungsträger können bei territorialen Planungen Entscheide auf die Mikrozonierung abstützen. Nicht zuletzt werden mit der vorliegenden Wegleitung auch alle Eigentümer über die Erdbebengefahren und deren Auswirkungen auf Parzellen informiert.

1.2 Anlass der Studie

Lokale Unterschiede bei den geologischen und topographischen Verhältnissen sind für teilweise gravierende und auf kurzer Distanz auftretende Änderungen in der Dauer, dem Frequenzspektrum und der Amplitude eines Erdbebensignals verantwortlich. Dieses Phänomen, generell als Standorteffekt (Standorteinwirkung) bezeichnet, ist mindestens seit dem Mittelalter bekannt, als Sultan Bayazid nach dem Erdbeben von Istanbul 1509 den Bau von Häusern in Küstengebieten auf Lockergesteinsgrund verboten hatte.

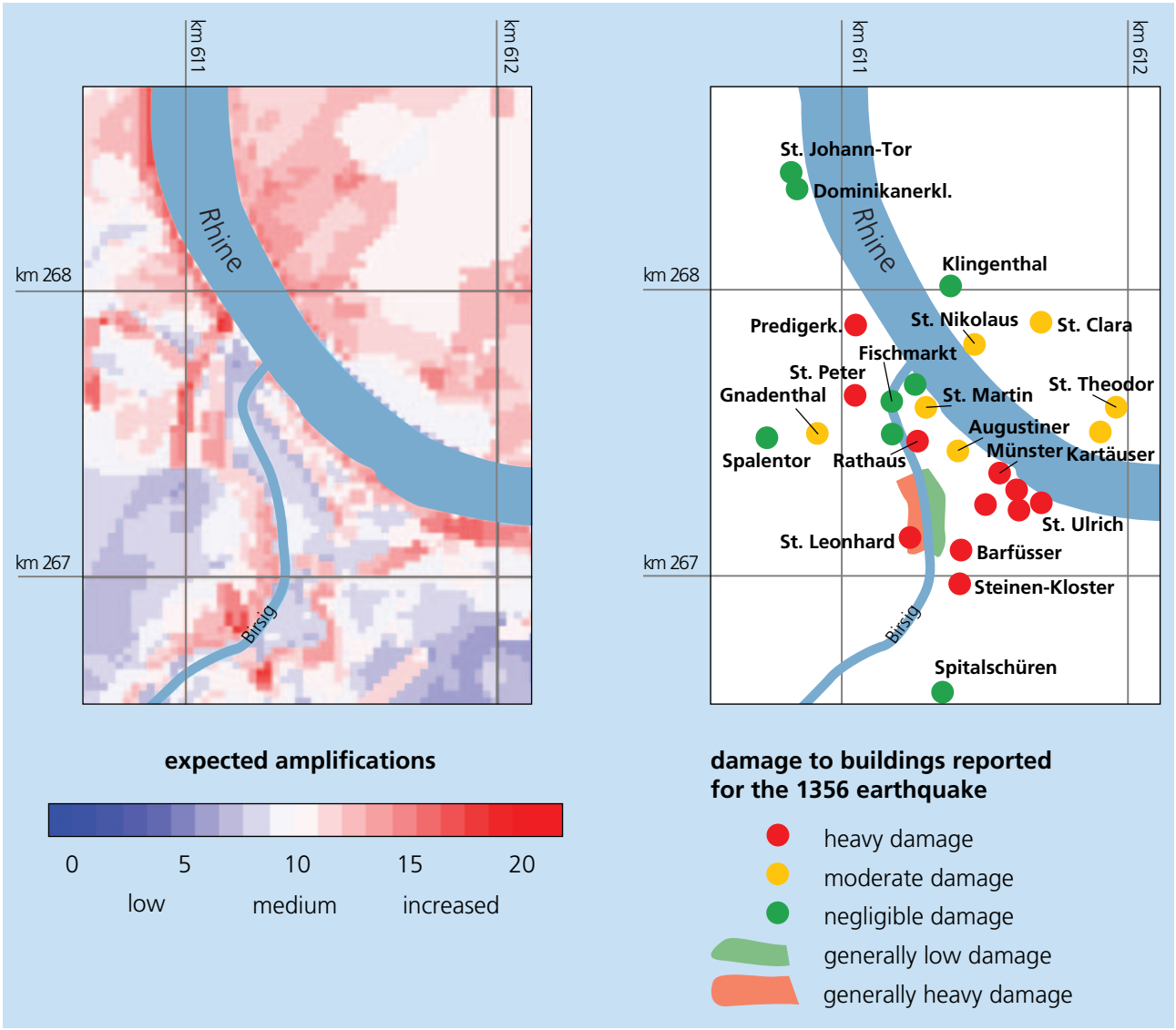
Dennoch dauerte es noch bis zu den 1980er Jahren bis die Internationale Seismologische Vereinigung im Anschluss an die Erdbeben von Mexiko (1985) und Loma-Prieta (1989) sich näher damit befasste. Es zeigte sich, dass die grosse Bandbreite der beobachteten Schäden, die vom gleichen Beben verursacht wurden und in unmittelbar benachbarten Gebieten (in einigen Hundert Metern Epizentraldistanz) auftraten, ausschliesslich der lokalen Geologie zuzuschreiben sind. Auf der seismischen Intensitätsskala (MSK) können auf einer Distanz von einigen Kilometern vom Erdbebenherd Unterschiede bis zu zwei Intensitätseinheiten festgestellt werden.

Wie die von den Erdbeben von Basel (1356) und Unterwalden (1601) verursachten Zerstörungen zeigen, blieb die Schweiz von solchen Standorteffekten keineswegs verschont. Dabei wurde die historische Altstadt von Basel, die auf Lockergesteinsgrund errichtet wurde, welcher die seismischen Wellen erheblich verstärkt, stark in Leidenschaft gezogen (Stadtteile St-Leonhard-Rathaus, Münster) (Figur 1). Diesselbe Situation wiederholte sich am 18. September 1601 in Luzern. Dort kam es durch zahlreiche Rutschungen am Ostufer des Vierwaldstättersees zu einer Destabilisierung der feinkörnigen Sedimente im Süden der Stadt. Die alten, auf den Molassehügeln errichteten Stadtviertel hielten dabei viel besser stand als die Wohngebäude der neueren Quartiere, die auf feinkörnigem Baugrund der Alluvialebene und der Uferzonen errichtet wurden. Solche Standorteffekte könnten in der Schweiz auch durch weitere historische Schadensbeben belegt werden (Figur 2).

Die jüngsten schweren Erdbeben (Northridge 1994, Kobe 1995, Izmit 1999 oder Algier 2003) bestätigen, dass der geologische Untergrund eine sehr bedeutende Rolle bei der geographischen Schadensverteilung spielt. Der entscheidende Einfluss der lokalen Baugrundeigenschaften auf die Intensität und das Frequenzspektrum der seismischen Anregung wird

dabei immer offensichtlicher. Diese Anhäufung von Tatsachen zeigt, dass für den Ingenieur bei der Projektierung von Bauwerken ein besseres Verständnis der Standorteffekte oder der lokalen Änderungen der Bodenunruhen durch eine Mikrozonierungsstudie unerlässlich ist, damit diese Bauten ohne grösseren Schaden potenziellen seismischen Erschütterungen standhalten können.

Entsprechend wurden in der Schweiz (Mayer-Rosa et al., 2000) die ersten Mikrozonierungsstudien im Kanton Obwalden (Schindler et al., 1996) durchgeführt. Bei diesen Studien wurde eine Karte vorgeschlagen, in welcher den seismisch relevanten Bodenparametern Intensitätskorrekturwerte (MSK-Skala) entsprechend ihrem seismischen Verhalten zugeordnet werden. Daraus liess sich dann mithilfe des GIS eine Intensitätskorrekturkarte des Untersuchungsgebiets erstellen. Aus der Überlagerung der Korrekturkarte mit der seismischen Gefährdungskarte resultiert eine korrigierte seismische Gefährdungskarte, die lokale geotechnische Eigenschaften berücksichtigt. Dabei handelt es sich um eine qualitative Mikrozonierung im Massstab 1: 25'000, basierend auf Intensitätskorrekturen in Abhängigkeit der geotechnischen und hydrogeologischen Eigenschaften des Untergrunds. Ein ähnliches Vorgehen wurde in Basel (Noack et al., 1999), im Kanton Solothurn, im Engelberger Tal (Beer, 1997) und im Wallis (Wagner et al., 2000) zwischen Susten und Brig gewählt. In der Region Sion wurden die Standorteffekte bezüglich der

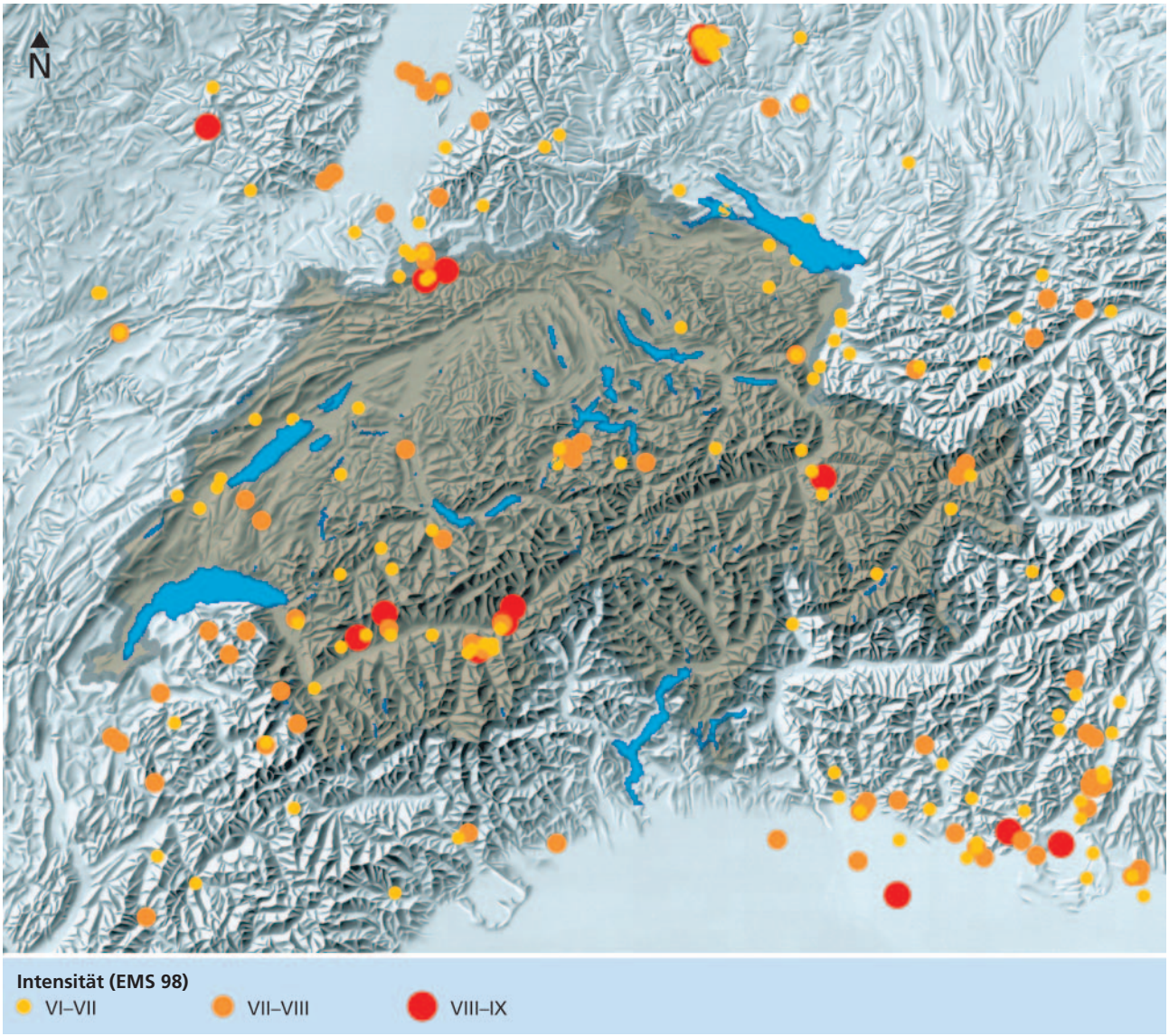


Figur 1: Übersicht der während des Erdbebens von Basel 1356 verursachten Gebäudeschäden und Modellierung der Standorteffekte (nach Fäh et al., Schweizerischer Erdbebendienst SED, 1997).

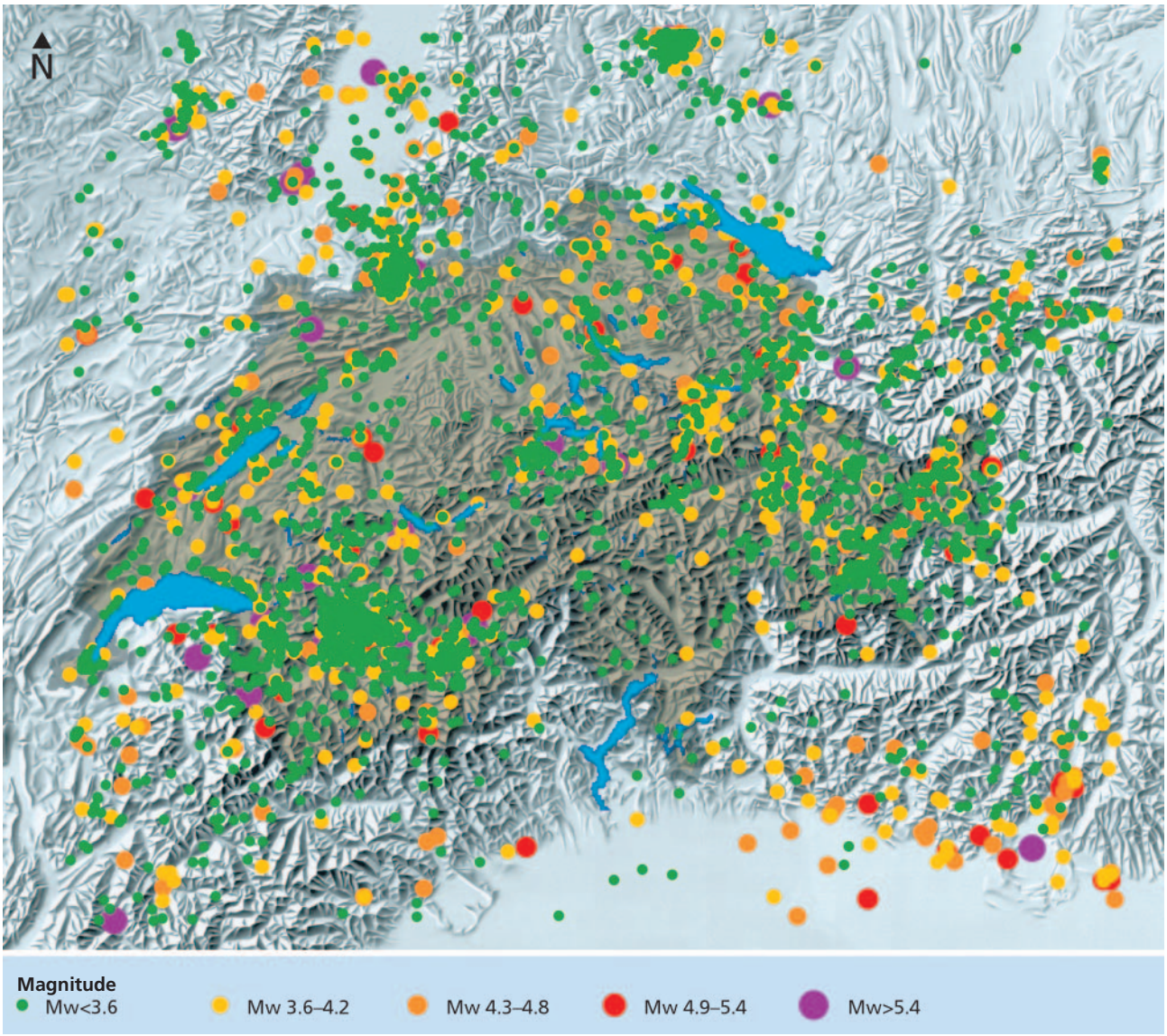
Fundamentalfrequenz und Verstärkung (Amplifikation) analysiert (Wagner et al., 2000, Frischknecht, 2000). Die numerische Modellierung und die Feldmessungen der Bodenunruhe wurden angewendet, um Verstärkungskarten (relative, maximale Verstärkung und der Frequenz) in lokalem Massstab zu erhalten. Weitere laufende Studien zu Baugutachten (Massstab 1: 5'000 bis 1: 1'000) stützen sich auf numerische Simulationen, um ein für den Baustandort spezifisches Bemessungsspektrum zu erstellen, wie z. B. bei Visp-Brig, Monthey oder Basel (Kind, 2002, Kind et al., 2003). Die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) hat im Jahr 1999 gefordert, den Standorteffekt der schweizerischen Kernanlagen zu prüfen. Mit dem Projekt «PEGASOS» (Probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse für die KKW-Standorte in der Schweiz) haben die Betreiber der Kernanlagen sowohl einen namhaften Beitrag zur Entwicklung eines neuen Erdbebenkatalogs der Schweiz (ECOS, 2003) beigetragen als auch Studien zu den Standorteffekten in der näheren Umgebung von Kernkraftwerken durchgeführt.

1.3 Erdbebenrisiko in der Schweiz

Das mit Erdbeben verbundene Risiko wird berechnet aus der Erdbebengefährdung multipliziert mit dem Schadenspotenzial.



Figur 2: Verbreitung der historischen schadenverursachenden Erdbeben. Quelle SED (ECOS), 2003 (nach Fäh et al., Schweizerischer Erdbebendienst SED, 2003).



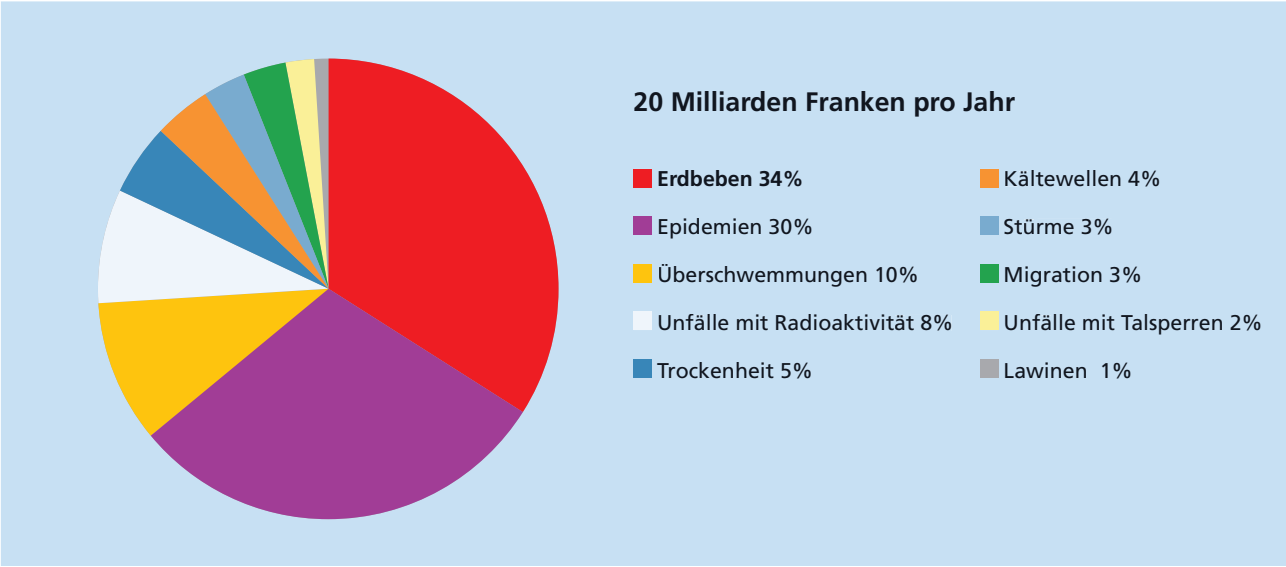
Figur 3: In der Schweiz beobachtete Epizentren und Magnituden, die im ECOS-Katalog verzeichnet sind. Quelle: SED, 2003 (nachbearbeitet).

Bezüglich der Gefährdung sind Erdbeben, wie das von Kobe in Japan (1995) mit einer Magnitude von 7 auf der Richterskala, zwar relativ selten, prinzipiell aber auch in der Schweiz möglich. In den vergangenen 700 Jahren gab es in der Schweiz und deren unmittelbarer Umgebung mindestens 800 Ereignisse mit einer geschätzten Magnitude von > 4 und 90 Ereignisse mit einer solchen > 5 (Figur 3).

Es wird angenommen, dass sich in der Schweiz alle 10 Jahre ein Beben mit einer Magnitude von 5 ereignet (Magnitude 6: alle 100 Jahre). Das letzte Erdbeben, das zu leichten Schäden führte, hat sich in der Region Vaz im Kanton Graubünden im Jahr 1991 ereignet. Ein Beben mit einer Magnitude von 5–6 kann Schäden im Umkreis von ca. 25 Kilometern auslösen, ein solches mit einer Magnitude von 6–7 Schäden im Umkreis von über 60 Kilometern.

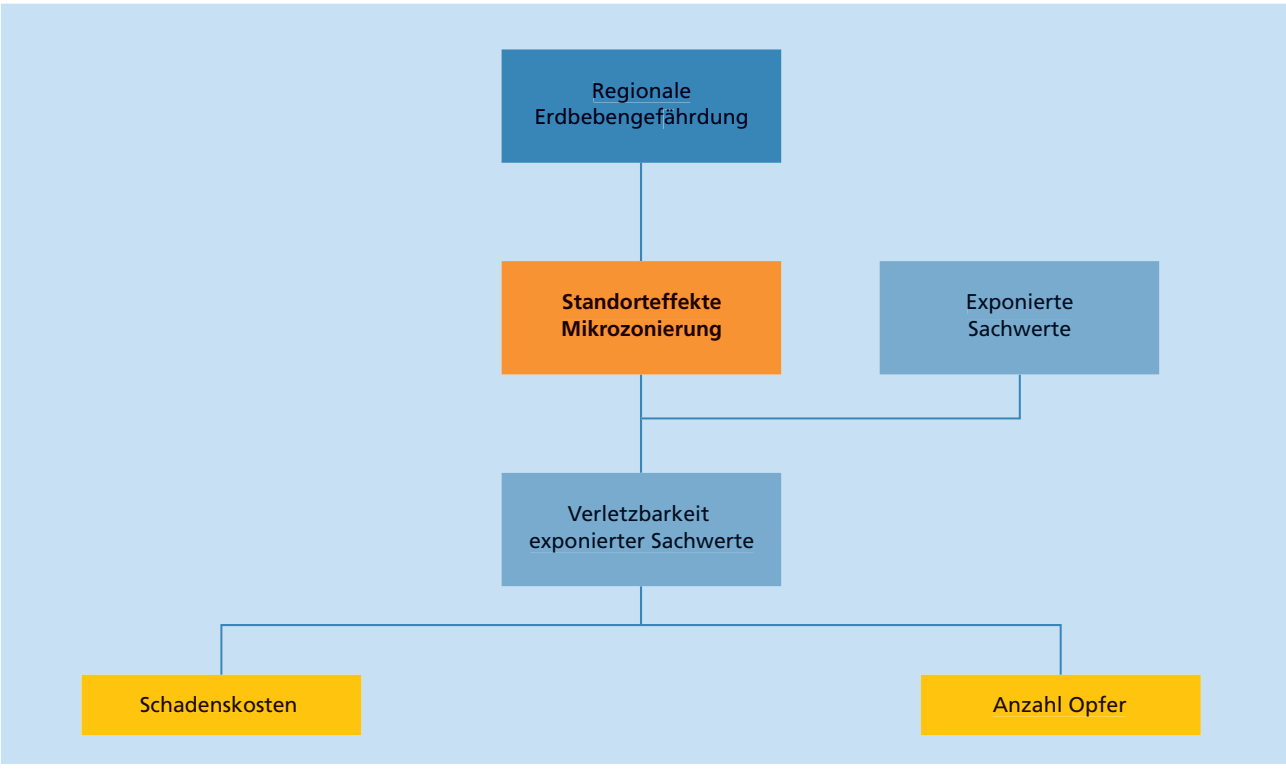
Für das Erdbeben, das 1356 teilweise die Stadt Basel zerstörte, wurde eine Magnitude von 6.9 abgeschätzt. Schwächere Beben (ab einer Magnitude von 5) könnten noch schwerwiegende Folgen für unser Land haben, da die Bauwerke bei weitem nicht systematisch geplant und bemessen sind, um den Beanspruchungen eines solchen Erdbebens standzuhalten.

In der Schweiz wurden mehr als 90% aller Gebäude vor 1989 und 70% vor 1970 errichtet. Bis zu diesem Datum gab es noch keine Baunorm zum Erdbeben-

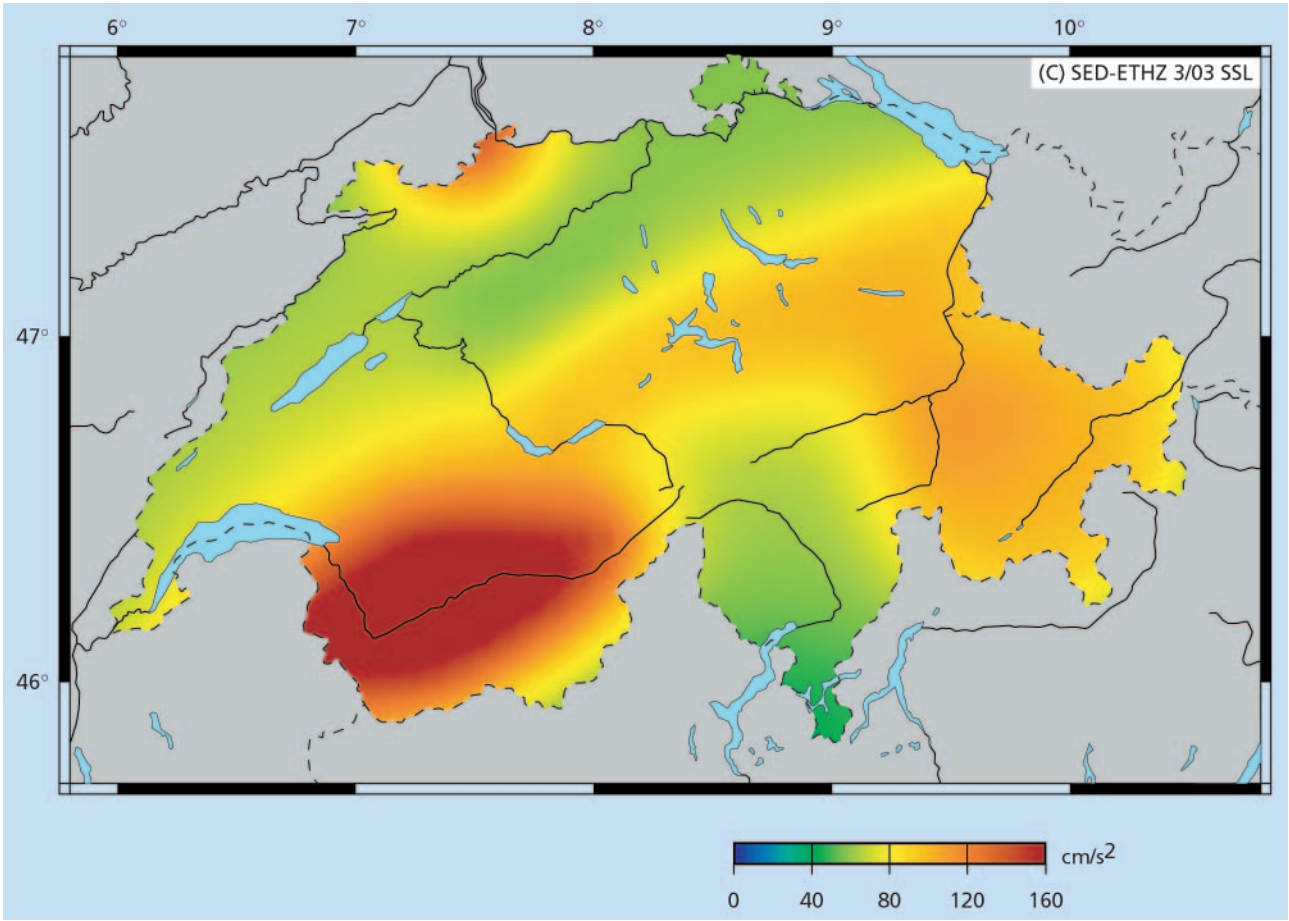


Figur 4: Statistische Verteilung der Risiken in der Schweiz. Quelle: KATARISK, 2003.

schutz. Von 1970 bis 1989 waren die Bauvorschriften weitgehend unzureichend. Dies bedeutet, dass etwa 90% der in der Schweiz bestehenden Bauwerke aufgrund nicht angepasster Vorschriften an die Erdbebensicherheit bemessen wurden. Diese Bauwerke können somit keine ausreichende seismische Sicherheit gewähren und sind somit verletzbar bzw. schadenanfällig. Zudem wurde die Verstärkung der seismischen Wellen durch die Standorteffekte, die in Abhängigkeit der geologischen Verhältnisse eine wichtige Rolle im lokalen Massstab spielen kann, als solche nur in der neuen Ausgabe der Baunormen 2003 berücksichtigt.



Figur 5: Berechnungsmodell zur Abschätzung von Erdbebenschäden unter Berücksichtigung der Standorteffekte (Mikrozonierung).



Figur 6: Erdbebengefährdungskarte der Schweiz mit den Bemessungswerten der Horizontalbeschleunigung in cm/s² für eine Wiederkehrperiode von 500 Jahren. Quelle: SED, 2003.

Die KATARISK-Studie (KATARISK, 2003) hat gezeigt, dass Erdbeben in der Schweiz das vorherrschende Risikopotenzial (34%) darstellen und noch beträchtlicher als Überschwemmungen oder Epidemien sind (Figur 4). Dieses Ergebnis lässt sich auf das enorme Schadenspotenzial in Verbindung mit der Gebäudeverletzbarkeit und hohen Besiedlungsdichte in der Schweiz zurückführen. In Zusammenhang mit der städtebaulichen Entwicklung ist ein beträchtlicher Zuwachs der Bevölkerung und Sachwerte zu verzeichnen. Öffentliche Infrastrukturbauten und -einrichtungen («Lifelines») haben in gleichem Masse eine enorme Entwicklung erfahren.

Nach den Statistiken der Schweizer Versicherer stellen die versicherten Gebäude in der Schweiz einen Wert von etwa 1800 Milliarden Franken dar. Hinzu kommen noch 700 Milliarden an Mobiliarvermögen. Für ein mögliches Epizentrum in der Region Basel mit einer Magnitude von 6.5 und unter Berücksichtigung der Standorteffekte, des Gebäudeinventars, der Verletzbarkeit der Bauten und der Abminderung der seismischen Wellen als Funktion der Epizentraldistanz werden Schäden in Höhe von 45 Milliarden Franken an Gebäuden und 15 Milliarden Franken am Mobiliar erwartet (Figur 5).

Die Rückversicherungsgesellschaften in der Schweiz gehen aufgrund ihrer Szenarien davon aus, dass die von Jahrhundertereignissen (Magnitude 5.5–6) verursachten Schäden ca. 7 Milliarden Franken (an Gebäude und Einrichtungen) betragen, 40 Milliarden bei einem alle 500 Jahre auftretenden Beben (Magnitude von 6–6.5) sowie mehr als 75 Milliarden Franken für ein Jahrtausendereignis (Magnitude > 6.5).

1.4 Regionale Erdbebengefährdung in der Schweiz

Im weltweiten Vergleich wird die Erdbebengefährdung in der Schweiz als schwach bis mässig beurteilt. Stärker gefährdet sind das Wallis, die Region Basel, die Zentralschweiz, das Engadin und das Rheintal bei St. Gallen. Die Erdbebengefährdung lässt sich als die Wahrscheinlichkeit definieren, mit der ein seismisches Ereignis einer gewissen Intensität, z. B. der horizontalen Beschleunigung, im Verlauf eines bestimmten Zeitintervalls auftritt. Sie berechnet sich anhand der statistischen geographischen Verteilung sämtlicher aufgezeichneter historischer Erdbeben. Die Zonierung der Erdbebengefährdung erfolgt im regionalen Massstab und bezeichnet den Vorgang der Unterteilung einer Region in durch gleichartiges Verhalten bezüglich des Parameters der seismischen Intensität charakterisierte Bereiche.

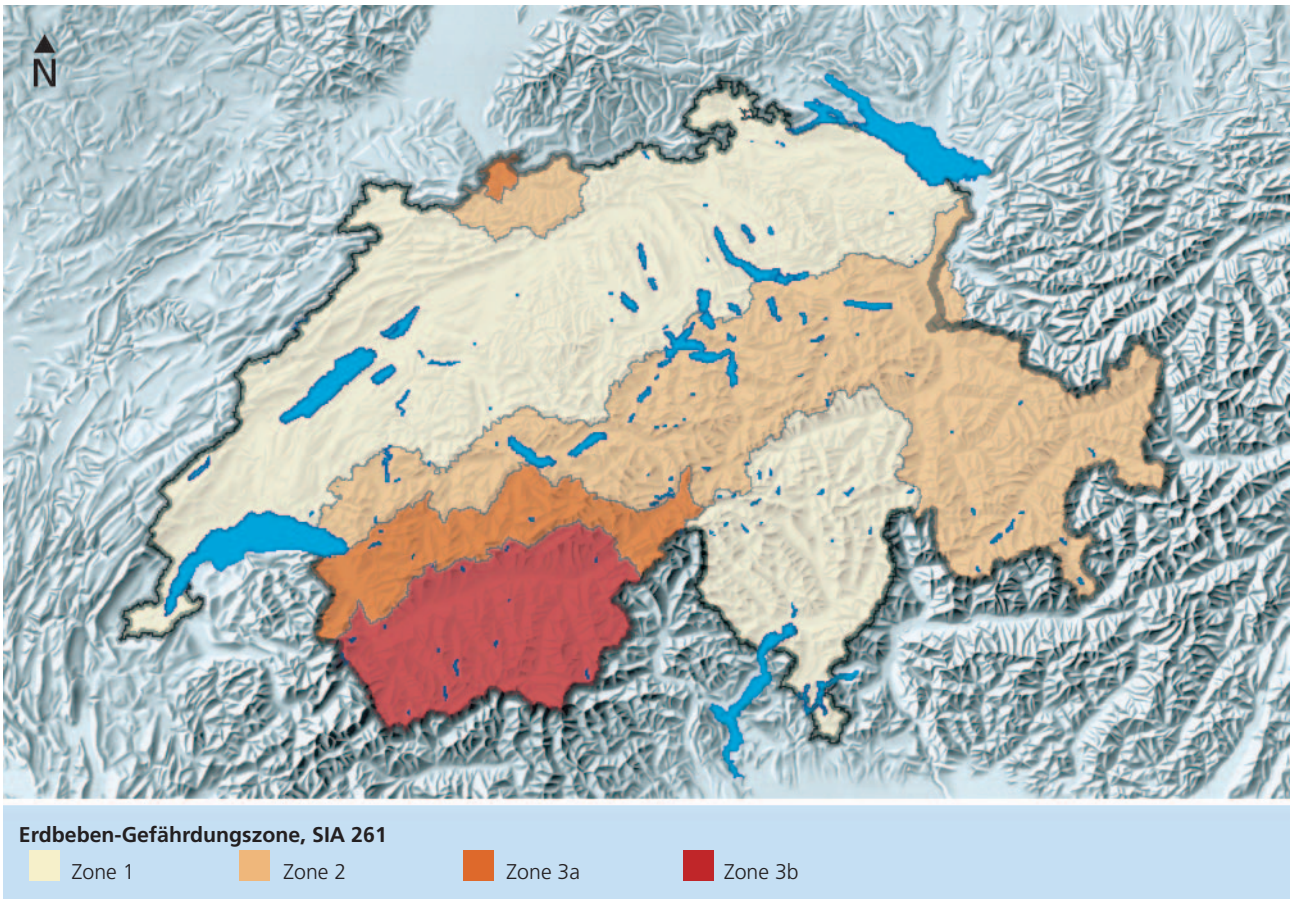
Die in der Norm SIA 160 (Ausgabe 1989) vorgeschlagene Karte mit Zonen der Erdbebengefährdung beruht auf den ersten probabilistischen Erdbebengefährdungsstudien der Schweiz aus den 1970er Jahren (Sägesser & Mayer-Rosa, 1978). Für jede Erdbebenzone wurde ein Wert der effektiven horizontalen Bodenbeschleunigung eines Bemessungsbebens mit einer Wiederkehrperiode von 400 Jahren festgelegt. Die strengeren Anforderungen des Eurocode 8 schreiben den Maximalwert der horizontalen Bodenbeschleunigung für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren als Bemessungswert vor. Diese Wiederkehrperiode wurde damit zu einem internationalen Standard erklärt und entspricht einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10% in 50 Jahren.

In den letzten 30 Jahren wurden zahlreiche Fortschritte bei der Bestimmung der Erdbebengefährdung erzielt. Einerseits musste der Erdbebenkatalog (ECOS, 2002) überarbeitet werden, der sämtliche historischen und instrumentell erhobenen Daten enthält und eine homogene Abschätzung der Magnitude vorschlägt. Andererseits sind die Modelle der seismischen Quellen verfeinert worden. Schliesslich wurden neuartige Gesetzmässigkeiten zur Abminderung seismischer Wellen für die Schweiz (Bay, 2002) für alle Magnituden zwischen 3 und 5.5 sowie Epizentraldistanzen zwischen 10 und 300 Kilometern entwickelt.

Die neuen Erdbebengefährdungskarten des Schweizerischen Erdbebendienstes (SED, 2003) zeigen:

- Spektralwerte der Horizontalbeschleunigung von 0.5, 1, 2, 3, 5, 10 und 12 Hz für einen harten Fels (V_s: 1500 m/s) und eine Wiederkehrperiode von 500 Jahren;
- Bemessungswerte der maximalen Horizontalbeschleunigung für eine Wiederkehrperiode von 500 Jahren (Figur 6).

Die vorgeschlagenen Bemessungswerte der Horizontalbeschleunigung ähneln stark den in der Norm SIA 160 (1989) dargelegten effektiven Bodenbeschleunigungen. Die Beibehaltung der bisherigen vier Zonen Z1, Z2, Z3a und Z3b mit den zugehörigen Beschleunigungswerten 0.6 m/s^2, 1.0 m/s^2, 1.3 m/s^2 und 1.6 m/s^2 erwies sich deshalb als zweckmässig. Die geographische Ausdehnung der Zonen in der von SIA 261 (2003) neu vorgeschlagenen Karte bildet die Verteilung der Erdbebebengefährdung (Figur 7) besser ab als diejenige von 1989. Die Neuklassierung der Basler Region (Zone 3a) verbessert die Abstimmung mit den Nachbarländern entlang der Grenze zu Frankreich, und die Homogenität der Zone 3b im Wallis erleichtert das behördliche Verfahren.



Figur 7: Karte der Erdbeben-Gefährdungszonen der Schweiz gemäss SIA 261 (2003).

1.5 Bauwerksklassen und Erdbebensicherheit

Bei der Erdbebenbemessung wird eine Differenzierung des Schutzgrads je nach Funktion und Bedeutung des Bauwerks vorgenommen. So gelten für ein Spital wesentlich strengere Anforderungen im Vergleich zu einem einfachen Wohnhaus am selben Standort.

In der Norm SIA 261 (2003) werden drei verschiedene Bauwerksklassen definiert. Die Wahl der Bauwerksklasse erfolgt jeweils entsprechend der Bedeutung eines Gebäudes für die Öffentlichkeit und dessen Umweltgefährdungspotenzial im Schadensfall. Tabelle 1 zeigt die Definition der 3 Bauwerksklassen mit jeweils typischen Beispielen.

BWK	Merkmale	Beispiele
I	– keine grösseren Menschenansammlungen – keine besonders wertvollen Güter und Einrichtungen – keine Gefährdung der Umwelt	– Wohn-, Büro- und Gewerbegebäude – Industrie- und Lagergebäude – Parkgaragen – Brücken von untergeordneter Bedeutung nach einem Erdbeben (z. B. Fusswegbrücken und land- oder forstwirtschaftlich genutzte Brücken, sofern sie nicht über Verkehrswege von erheblicher Bedeutung führen)
II	– grössere Menschenansammlungen wahrscheinlich – besonders wertvolle Güter und Einrichtungen – bedeutende Infrastrukturfunktion – beschränkte Gefährdung der Umwelt	– Spitäler samt Anlagen und Einrichtungen (sofern sie nicht BWK III zuzuordnen sind) – Einkaufszentren, Sportstadien, Kinos, Theater, Schulen und Kirchen – Gebäude der öffentlichen Verwaltung – Brücken von erheblicher Bedeutung nach einem Erdbeben sowie Brücken, die über Verkehrswege mit erheblicher Bedeutung nach einem Erdbeben führen – Stützmauern und Böschungen im Bereich von Verkehrswegen mit erheblicher Bedeutung nach einem Erdbeben – Bauwerke sowie Anlagen und Einrichtungen zur Versorgung, Entsorgung und Telekommunikation (sofern sie nicht BWK III zuzuordnen sind) – Hochkamine
III	– lebenswichtige Infrastrukturfunktion – erhebliche Gefährdung der Umwelt	– Akutspitäler samt Anlagen und Einrichtungen – Bauwerke sowie Anlagen und Einrichtungen für den Katastrophenschutz (z. B. Feuerwehrgebäude und Ambulanzgaragen) – Brücken von grosser Bedeutung für die Zugänglichkeit eines Gebiets nach einem Erdbeben – Stützmauern und Böschungen im Bereich von Verkehrswegen mit grosser Bedeutung für die Zugänglichkeit ausgewählter Bauwerke oder eines Gebiets nach einem Erdbeben – lebenswichtige Bauwerke zur Versorgung, Entsorgung und Telekommunikation – Bauwerke, Anlagen und Einrichtungen, die bei Beschädigung eine Umweltgefährdung darstellen (z. B. Tankanlagen und Rohrleitungen, die Gas oder gefährliche Flüssigkeiten enthalten)

Tabelle 1: Bauwerksklassen (BWK) gemäss Tabelle 26 der Norm SIA 261 (2003).

Die Zuordnung zu einer Bauwerksklasse verdeutlicht die betroffenen Werte und ist zusammen mit der Baugrundklasse ein entscheidendes Kriterium für die Durchführung von Ergänzungsstudien (spektrale Mikrozonierung, siehe Kapitel 4).

1.6 Mikrozonierungsarten

Die erste Stufe der Mikrozonierung, auch Mikrozonierung nach SIA 261 genannt, basiert auf der Erdbebenzonenkarte und den Baugrundklassen der Norm SIA 261 «Einwirkungen auf Tragwerke» (2003). Damit resultiert eine Zuordnung eines Standortes zu der Erdbebengefährdungszone und zu einer Baugrundklasse, die dem Antwortspektrum der seismischen Beanspruchung entspricht.

Die neue Norm SIA 261 «Einwirkungen auf Tragwerke» (2003) schlägt aktuell 6 Baugrundklassen vor, die den in der Schweiz beobachteten lokalen geologischen Verhältnissen angepasst wurden. Für jeden dieser Baugrundtypen werden in Abhängigkeit der vier verschiedenen Erdbebengefährdungszonen entsprechende Antwortspektren empfohlen (siehe Figur 7).

Die Karten der Baugrundklassen der Norm SIA 261, welche die wichtigsten geologischen Eigenschaften der obersten Lockergesteine (Mächtigkeit ca. 30 Meter) im Massstab 1: 25'000 beinhaltet, dient als Hilsmittel bei der Anwendung der Norm SIA 261. Sie werden gemäss der vorliegenden Richtlinie erstellt (Kapitel 3) und vom Bundesamt für Wasser und Geologie BWG teilweise subventioniert.

1. Seismische Mikrozonierung gemäss Norm SIA 261 (Karten der seismischen Gefährdungszonen und Baugrundklassen)	**2. Spektrale seismische Mikrozonierung (punktuell oder regional)**
Ziel: Zuordnung eines Antwortspektrums zur Dimensionierung von Strukturen gemäss Norm SIA 261 in einer seismischen Gefährdungszone (1, 2, 3a, 3b) für eine bestimmte Baugrundklasse. Topographische Effekte werden mit Multiplikationsfaktoren berücksichtigt.	**Ziel:** Dokument mit den elastischen Antwortspektren, welche als Grundlage bei der Dimensionierung von spezifischen Tragstrukturen dienen. Diese Spektren sind sowohl für einzelne Bauwerke (punktuell), als auch für lokale Zonen (regional) anwendbar.
Inhalt: Auswertung bestehender Dokumente zur Abschätzung und Kartierung der sechs Baugrundklassen A bis F gemäss Norm SIA 261 (Geologische Karte, Bohrungen, Geophysikalische Studien, usw.). Baugrundklasse F wird nach induzierten Effekten unterschieden (Rutschungen, Bodenverflüssigung, Thixotropie, usw.). Zonenkarte mit topographischen Verstärkungseffekten und Multiplikationsfaktoren.	**Inhalt:** Präzise Bodenkartierungen werden mittels detaillierten Felduntersuchungen erstellt. Karte gleicher Bodenfrequenzen. Geophysikalisches Modell. Numerische Modellierungen, spezifische Antwortspektren und Zonenkarte.
Bearbeitungstiefe: Grobe Übersicht.	**Bearbeitungstiefe:** Detailliert (parzellenscharf).
Massstab: 1: 25'000	**Massstab:** 1: 5'000 bis 1: 500 (punktuell)
Ausdehnung: Regionen oder ganze Kantone.	**Ausdehnung:** Zonen mit hohem Risiko (s. Kapitel 1.7).

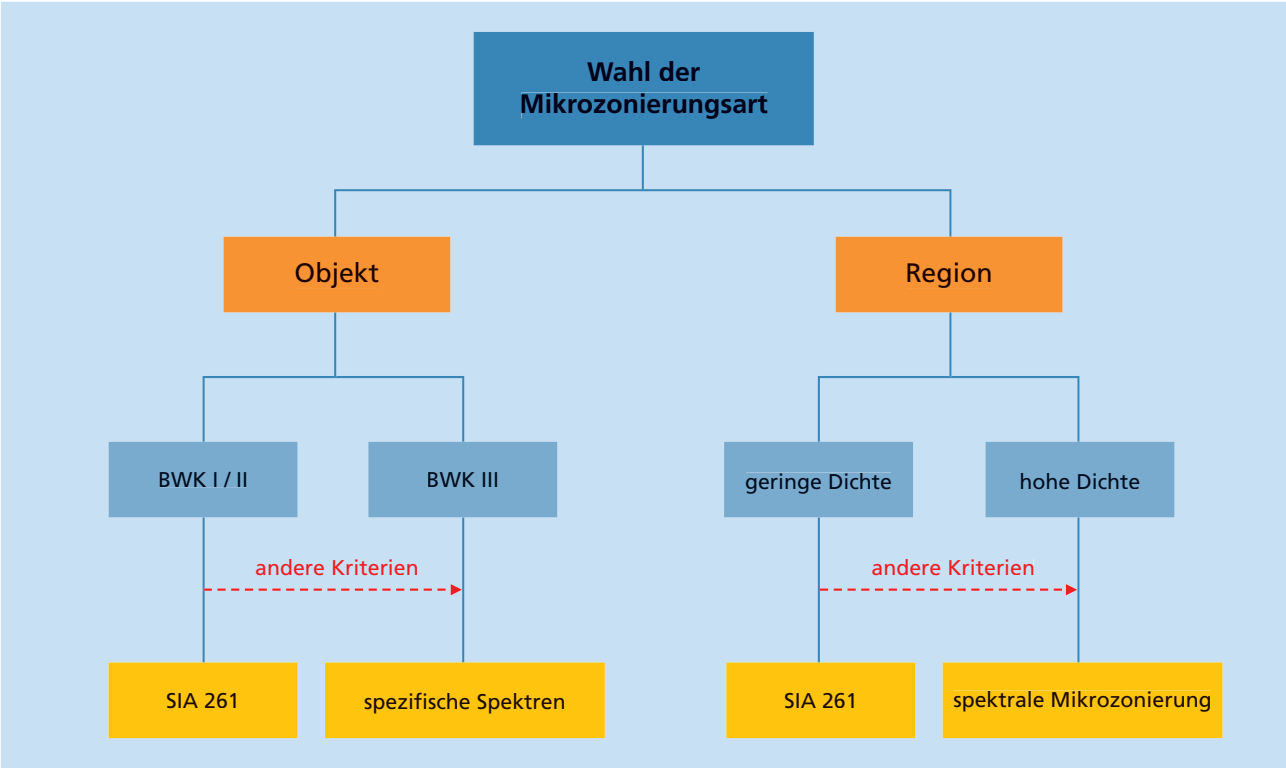
Tabelle 2: Charakterisierung der Mikrozonierung gemäss Norm SIA 261 und der spektralen seismischen Mikrozonierung.

Die mit der Geologie und der Schichtmorphologie zusammenhängenden Verstärkungseffekte (Amplifikationseffekte bei Kreten, engen Tälern, Talflanken, Becken) sollen künftig bei der Umsetzung der Norm SIA 261 eingesetzt werden. In der Schweiz erarbeitet man zur Zeit eine Methodik, um diese Verstärkungseffekte in seismischen Karten zu berücksichtigen.

Die zweite Stufe der Mikrozonierung, auch spektrale Mikrozonierung genannt, beinhaltet eine quantitative Studie in Zonen oder für Bauwerke mit hohem Risiko. In dieser Studie berechnet man den Einfluss der geologischen Standortfaktoren mittels den elastischen Antwortspektren und erhält dadurch spezifischere sowie genauere Resultate als mit der Norm SIA 261 «Einwirkungen auf Tragwerke».

Diese Detailstudien sind dort notwendig, wo ungünstige geologische Gegebenheiten, hohe Bevölkerungsdichten und sensible Bauwerke vorliegen (siehe Kapitel 1.7). Die spektrale seismische Mikrozonierung wird punktuell bei Einzelbauwerken, deren Erdbebensicherheit garantiert werden muss, eingesetzt. Eine spektrale Mikrozonierungskarte erstellt man bei hoher Bevölkerungsdichte oder grossen Risiken im Massstab einer Parzelle (1: 5'000 oder grösser).

In der Detailstudie wird das spezifische Antwortspektrum für den geologischen Standort mit einer numerischen Modellierung bestimmt. Die in den spektralen Mikrozonierungskarten definierten Antwortspektren können günstiger, ungünstiger oder gleich den von der Norm empfohlenen Spektren sein.



Figur 8: Selektionsverfahren für die Mikrozonierung bei punktuellen Bauwerken (links) oder raumplanerischen Aufgaben (rechts).

1.7 Wahl der Mikrozonierungsart

Kantonale und regionale Mikrozonierungskarten sollen die Prioritäten entsprechend den Risiken und der Erdbeben-Gefährdungszonenkarte berücksichtigen. Gebiete hoher Bevölkerungsdichte sollen beispielsweise zuerst in der Zone 3a und erst danach in der Zone 1 untersucht werden. In der Tabelle 3 werden die Kriterien aufgelistet, die bei der Wahl der Mikrozonierung nach der Norm SIA 261 (Baugrundklassen und Karte der Erdbeben-Gefährdungszonen) berücksichtigt werden sollen.

Die Figur 8 zeigt ein Beispiel eines Selektionsverfahrens für die Mikrozonierungsart bei punktuellen Bauwerken (Objekte) und bei der spektralen Mikrozonierung für eine definierte Region. Das vorgeschlagene Selektionsverfahren kann von den Kantonen entsprechend der sozioökonomischen Kriterien und Gewichtung angepasst werden.

Wenn die Überbauungsziffer kleiner 0.5 ist, dann sprechen wir von Zonen geringer Dichte. In diesem Fall sind weniger als 50% der Parzellenfläche überbaut. Mit der Überbauungsziffer können beispielsweise Wohnquartiere mit Einfamilienhäusern (Ziffer kleiner als 0.5) von Stadtzentren (Ziffer grösser als 0.5) unterschieden werden.

Das in der Figur 8 dargestellte Selektionsverfahren führt zu verschiedenen Mikrozonierungsarten. Diese sind folgendermassen definiert:

SIA 261:

- Bei den Objekten handelt es sich um die Anwendung der elastischen Antwortspektren, welche aus der Überlagerung mit den Baugrundklassen nach SIA 261 hervorgehen. Die Baugrundklassen werden mittels Untersuchung lokaler Bohrungen in der Risikozone bestimmt (siehe Kapitel 3).
- Im Falle einer regionalen Zone handelt es sich um die Anwendung der elastischen Anwortspektren, welche aus der Überlagerung mit den Baugrundklassen nach SIA 261 hervorgehen. Hier werden die Baugrundklassen aus der Karte der Baugrundklassen in der Risikozone entnommen.

Spezifische Spektren:

- Das elastische Antwortspektrum ist eigens für den vorgesehenen Bauwerksstandort berechnet (siehe Kapitel 4).

Spektrale Mikrozonierung:

- Mit einem kartographischen Verfahren werden die verschiedenen Geltungsbereiche für die elastischen Antwortspektren in einer Region ermittelt (siehe Kapitel 4).

1. Region	2. Objekt
– Erdbeben-Gefährdungszone nach SIA 261 – Bevölkerungsdichte – Wirtschaftliche Gewichtung	– Erdbeben-Gefährdungszone nach SIA 261 – Anzahl Bewohner – Bauwerksklasse nach SIA 261 – Baugrundklasse nach SIA 261

Tabelle 3: Kriterien für die Wahl der Mikrozonierungsart.

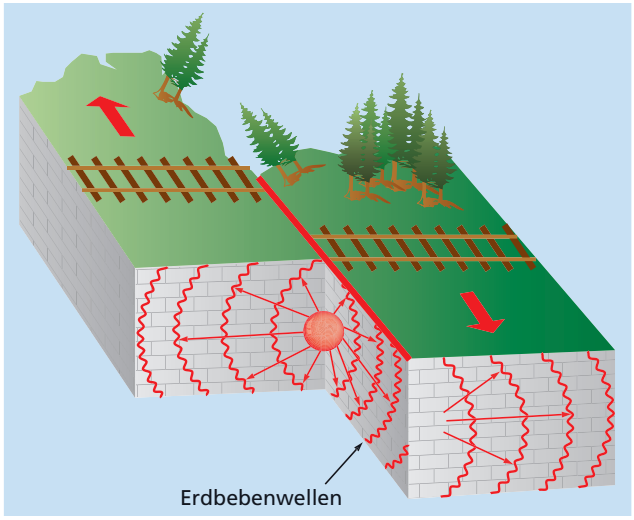
2. Beschreibung der Phänomene

2.1 Erdbeben

Ein Erdbeben äussert sich durch eine gewaltige Erschütterung im Untergrund, ausgelöst durch eine relative Verschiebung zwischen zwei Gesteinsmassen in der tiefen Erdkruste, die durch eine tektonische Diskontinuität (oder Störung) getrennt werden. Die dabei resultierende abrupte Energiefreisetzung (Figur 9) entsteht, wenn nach einem langsamen Druckspannungs- und Energieaufbau entlang von Störungen die mechanische Bruchfestigkeit der Gesteine in der Tiefe überschritten wird. Die dann entstehenden verschiedenen Wellen breiten sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit nach allen Richtungen aus, bis sie an einem Standort an der Oberfläche verschiedenartige Bodenbewegungen verursachen können.

Erdbeben verursachen an der Oberfläche zyklische, horizontale und vertikale Versetzungen und können Amplituden im Zentimeter- bis Dezimeterbereich erreichen, wobei die entsprechenden Beschleunigungen einige Hundertstel bis mehrere Zehntel der Erdbeschleunigung betragen können.

Die Stärke und die Auswirkungen eines Erdbebens werden üblicherweise mithilfe zweier Messskalen bewertet: Magnitude und Intensität (Anhang B).



Figur 9: Ein Erdbeben ist das Ergebnis einer abrupten Freisetzung von Energie entlang einer Bruchfläche in der Tiefe.

Die Magnitude ist ein Messwert für die an einem Erdbebenherd freigesetzte seismische Energie, die anhand analoger oder digitaler Aufzeichnung quantifiziert werden kann. Die gebräuchlichste Messskala wurde 1935 von C. F. Richter eingeführt und basiert auf einer Standardinstrumentierung. Die Magnitudenskala ist nach oben und unten offen, im Allgemeinen werden jedoch Werte zwischen 1 und 9 beobachtet. Der kleinste Wert, der negativ sein kann, hängt vor allem von der Genauigkeit der Messinstrumente ab, während der Höchstwert im Wesentlichen von der Länge des betroffenen Störungssegments abhängt, das bei einem solchen Ereignis auf einmal zerbricht.

Die Intensität entspricht einer qualitativen Bewertung der Schadenswirkung basierend auf der Wahrnehmung von Menschen und der an verschiedenen Bauwerken und in der Natur beobachteten Veränderungen. Demzufolge handelt es sich dabei um rein statistisch zu behandelnde Beurteilungen. Dafür wurden verschiedene Skalen vorgeschlagen, die manchmal Verwirrung stiften können. In Europa wird derzeit am häufigsten die EMS-98-Skala verwendet.

Die seismische Aktivität untersteht in der Schweiz einer ständigen Überwachung. Der Schweizerische Erdbebendienst (SED) betreibt derzeit zwei hochempfindliche Seismometernetze zur Registrierung von Erdbeben. Einerseits handelt es sich dabei um ein Netz aus 30 über die ganze Schweiz verteilten Stationen, welche gleichzeitig nahe gelegene und weit entfernte seismische Aktivitäten registrieren können. Die Messstationen sind so weit wie möglich von störenden Einflüssen der Zivilisation abgeschirmt. Diese Stationen übermitteln kontinuierlich und in Echtzeit die aufgezeichneten Signale an die Auswertezentrale in Zürich.

Andererseits dient ein zweites Stationsnetz der Registrierung von starken Bewegungen mit Beschleunigungsmessern und besteht aus etwa 100 Messeinrichtungen, wovon 35 Stationen in der unmittelbaren Umgebung von Talsperren lokalisiert sind. Dieses zweite Netz wird für die Aufzeichnung von lokalen Ereignissen eingesetzt und ermöglicht die präzise Bestimmung der maximalen Bodenbeschleunigung.

Parallel zur kontinuierlichen Erdbebenüberwachung hat der Schweizerische Erdbebendienst einen Erdbebenkatalog der Schweiz (ECOS) erstellt, in welchem alle seit dem Jahr 250 registrierten historischen Ereignisse, die in den Jahrbüchern der Schweizerischen Erdbebenkommission seit 1879 publizierten Daten, die vom instrumentellen Netzwerk des SED seit 1975 aufgezeichneten Daten sowie Ergänzungen aus 12 Erdbebenkatalogen von Nachbarländern und internationalen Agenturen aufgenommen sind.

Bei einem Erdbeben schwingt der Untergrund schnell – aber generell in geringem Ausmass – in allen Raumrichtungen auf der Horizontalen sowie in vertikaler Richtung hin und her. Die Dauer der Schwingungen beträgt z. B. bei einem Ereignis einer mittleren Magnitude ungefähr 10 bis 20 Sekunden (Figur 10).

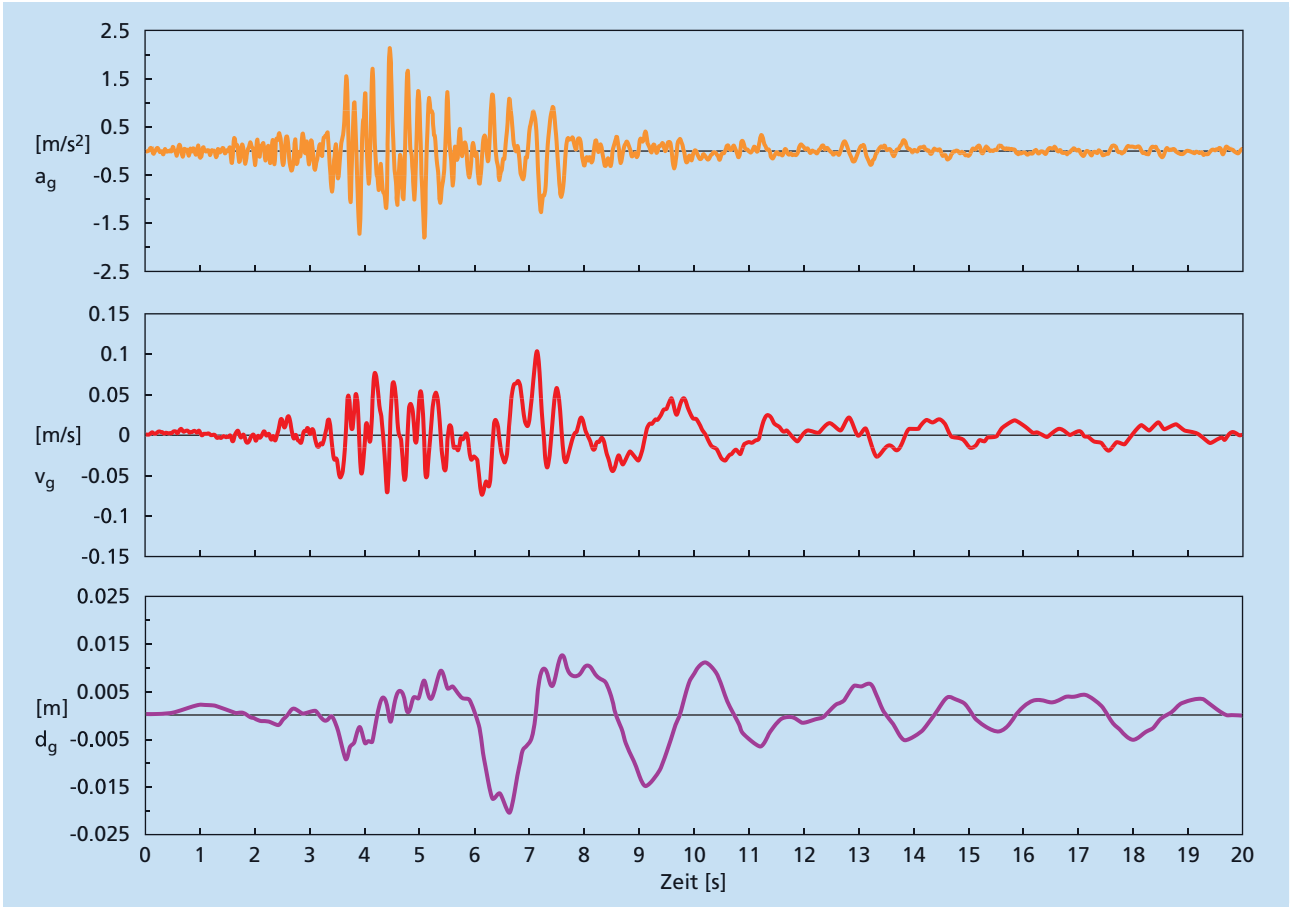
Die Erdbebeneinwirkungen auf ein Bauwerk werden im Wesentlichen durch die Amplituden und zeitlichen Schwankungen dreier Parameter bestimmt, welche die Bodenbewegung aufgrund ihrer Beschleunigung (a_g), Geschwindigkeit (v_g) und Verschiebung (d_g) beschreiben. Das Frequenzspektrum dieser drei Parameter spielt eine wesentliche Rolle beim Ausmass der Einwirkungen auf Bauwerke.

2.2 Standorteffekte

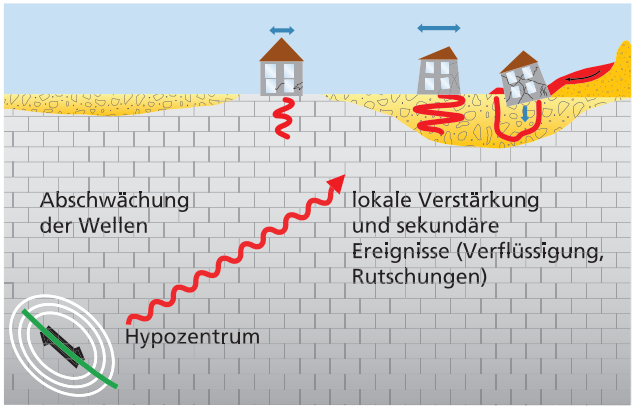
Die bei einem seismischen Bruch in der Erdkruste freigesetzte Energie breitet sich gegen die Oberfläche in Form von Wellen aus, deren Amplituden und Frequenzspektrum während des Wegs verändert werden. In Oberflächennähe sind die geologischen Kontraste oftmals grösser als in der Tiefe und können eine Änderung des Signals bewirken, die manchmal auf kurzen Distanzen erheblich sein kann. Solche oberflächennahen Einwirkungen machen im Wesentlichen die sogenannten Standorteffekte aus (Figur 11).

Dabei werden verschiedene Szenarien betrachtet, die solche Standorteffekte erzeugen können:

A) Geologische Standorteffekte sind vor allem durch den Impedanzkontrast zwischen Lockergesteinsablagerungen mit generell schwachen bodenmechanischen Eigenschaften und dem häufig kompakteren Felsuntergrund (oder «Bedrock») bedingt. Dieser Kontrast bildet die Ursache zweier Effekte: Eine Erhöhung der Bodenbewegungsamplitude im Vergleich zu der eintreffenden Bewegung an der Basis der wenig konsolidierten Ablagerungen und



Figur 10: Erdbeben der Magnitude 6.0 im italienischen Friaul. Seismogramm vom 15. September 1976 der Station Forgaria-Cornio, die sich auf kompaktiertem Lockergestein in 14 km Distanz zum Epizentrum befand. Die Messungen des Erdbebens im Friaul sind ebenfalls repräsentativ für potentielle Schweizer Beben.



Figur 11: Einfluss der lokalen Untergrundverhältnisse auf die Erdbebenerschütterungen.

ein Resonanzeffekt bedingt durch «Einfang» der Wellen innerhalb der oberflächennahen Ablagerungen.
Diese Art von Standorteffekt kommt sicherlich am häufigsten vor und beeinträchtigt besonders die Siedlungsbauten in Tälern, an Flussufern oder in flachen Sedimentbecken.

B) Der Effekt der Schichtgeometrie ist ebenfalls direkt von der Beschaffenheit der lokalen geologischen Verhältnisse abhängig. Der unter A) weiter oben beschriebene Einfluss des Impedanzkontrasts ist tatsächlich nur selten der alleinige Effekt, der betrachtet werden muss, da dieser meistens mit dem geometrischen Effekt der Gesteinsoberfläche verbunden ist. Der geometrische Effekt ist noch ungenügend dokumentiert und kann in drei Klassen Felsgeometrie, Topografie und Talflanken unterteilt werden (s. unten). Die Norm SIA 261 berücksichtigt mit den Antwortspektren und deren Sicherheitsmargen einen Teil dieser geometrischen Effekte.

B1) Der Effekt der Felsgeometrie: Die Grenze zwischen Lockergesteinsablagerungen und dem Felsuntergrund wird oft durch eine unregelmässige Geometrie charakterisiert, die eine besondere Bündelung der Wellen im Inneren des Beckens bewirkt. Eine Verstärkung der Erdbebenwellen und eine Verlängerung des Bebens sind die Folge.
Dieser Effekt wird in tiefen Tälern mit einem kleinen Breiten-Längen-Verhältnis beobachtet ($L/(2H) < 10$). In verschiedenen Forschungsprojekten wird zur Zeit dieser Effekt untersucht (z.B. Interreg III SISMO-VALP). Nach heutigem Kenntnisstand kann man keine einheitliche Bestimmung des Verstärkungsfaktors basierend auf der Felsgeometrie vornehmen. Die Spannweite des Faktors wird in den meisten Fällen zwischen 1.5 und 2.5 liegen. Unter der Berücksichtigung der laufenden Forschungsarbeiten ist in der Schweiz eine Kartierung der Gebiete mit Felsgeometrieeffekten geplant, um daraus Näherungswerte für den Verstärkungsfaktor abzuleiten. Die Verstärkung ist nicht konstant über alle Frequenzbereiche. Sie ist grösser, wenn die Frequenz nahe an der Fundamentalfrequenz des Tales oder des Beckens liegt. Im Rhonetal liegt das Verhältnis $L/(2H)$ zwischen 0.3 und 4 und die Frequenz



Figur 12: Topographische Standorteffekte des Erdbebens von Algier/Boumerdès (2003) mit Konzentration der Schäden auf die überhängenden Steilwände des Tals.

beträgt zirka 0.5 Hz. Diese Frequenz ist nur für einen sehr geringen Anteil von Bauten relevant (Figur 19).

B2) Topographische Standorteffekte beeinflussen die Verstärkung oder Abminderung eines seismischen Signals, je nachdem, ob die Topographie bzw. das Relief konvex oder konkav ist. Für topographisch bedingte Einwirkungen ist eine geeignete akzentuierte Morphologie erforderlich, um solche Standorteffekte sogar auf felsigem Untergrund verursachen zu können.

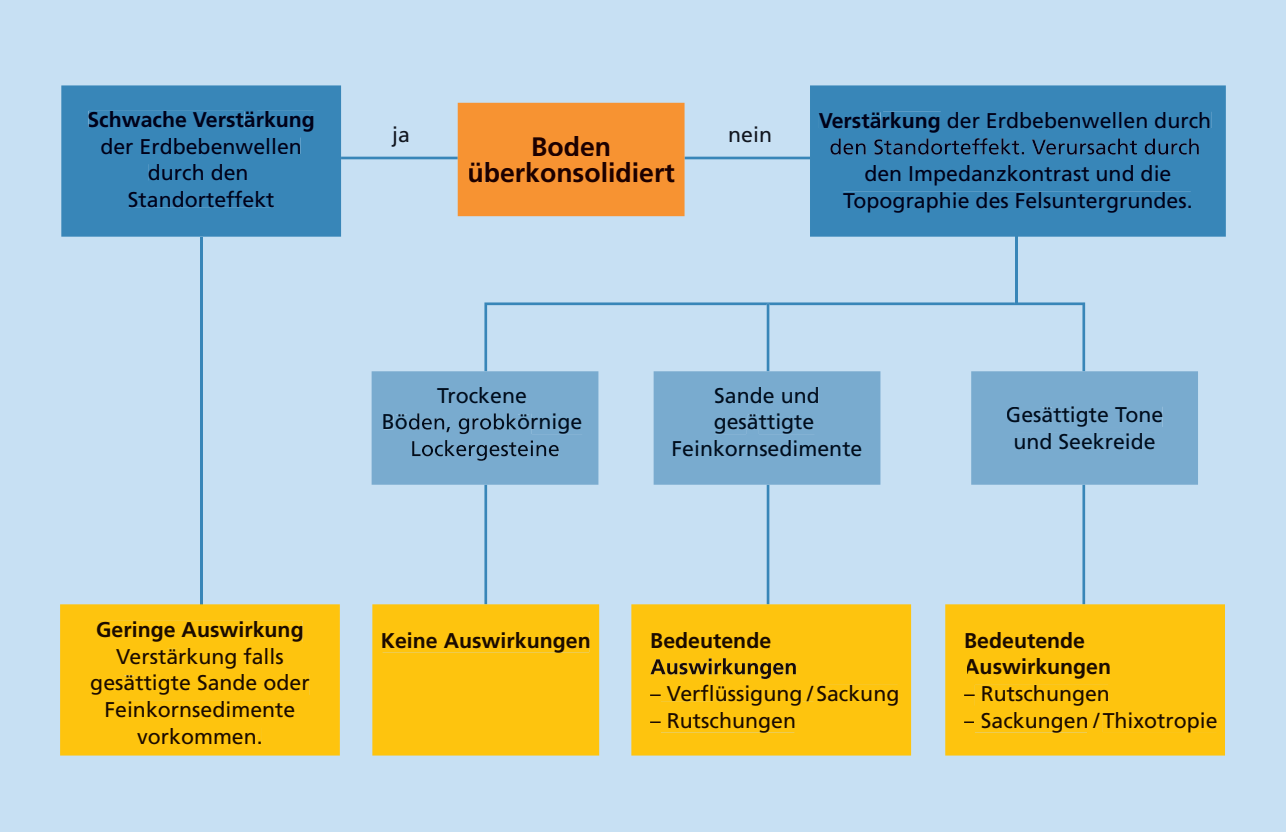
B3) Der Effekt von Talflanken kommt im Kontaktbereich von Felsuntergrund und Lockergestein vor. In dieser Kontaktzone treten Oberflächenwellen auf, welche die sonst massgebenden S-Wellen dominieren können. Dieser Effekt wird in Zonen, die parallel zu den Talflanken liegen, beobachtet. Über die Ausbreitung der Zonen und deren Verstärkungseffekt ist heute wenig bekannt. Einzig komplexe Modellierungen können diese Verstärkung aufzeigen.

Im Falle von Festgestein (Fels) wird generell beobachtet, dass die Bodenbewegung in der Nähe der Berggipfel verstärkt wird, während sie in den Mulden abgemindert wird (Figur 12). Solche Effekte treten lediglich bei extremen topographischen Szenarien auf (steilwandige Bergkämme, Felswandkanten etc.). Die heutigen Erkenntnisse über die Mechanismen eines solchen topographischen Effekts sind noch begrenzt und erlauben lediglich ungefähre Schätzungen. Der Anhang A von Eurocode 8 (Teil 5, prEN 1998-5: 2003) erläutert die Berücksichtigung dieses Effekts.

2.3 Induzierte Effekte: Bergsturz, Erdrutsch, Bodenverflüssigung und Thixotropie

Seismische Wellen können in bestimmten Gebieten Sekundäreffekte induzieren, die je nach Untergrundeigenschaften schwerwiegende Folgen auf Bauwerke haben können (Figur 13).

Seismische Wellen können Felswände destabilisieren und talabwärts gelegene Siedlungsgebiete bedrohen. Sie können zudem latente Rutschungen reaktivieren oder instabile wasserübersättigte Abhänge in



Figur 13: Auswirkungen auf den Standort je nach Beschaffenheit des Lockergesteins.



Figur 14: Bergsturz am Südhang des Rawylhorns ausgelöst durch das Erdbeben vom 30. Mai 1946 in Sierre (Magnitude 6, dabei stürzten 5 Millionen Kubikmeter Felsmaterial in die Tiefe).

Bewegung setzen. Sind wassergesättigte und wenig kompaktierte Lockergesteine vorhanden, treten gehäuft eine Bodenverflüssigung (Solifluktion) von Sanden und Silten und eine Thixotropie von Tonen und Seekreiden auf. Solche Phänomene induzieren differenzielle Bodensackungen und können daher ebenfalls Bauwerke gefährden.

a) Bergsturz

Häufig werden in der Literatur durch Erdbeben hervorgerufene Bergstürze beschrieben. Dafür ist vor allem das Trennflächen-, Lagerungs-, Störungs-, Kluft- und Schieferungsmuster ausschlaggebend. Ungünstige hydrogeologische Verhältnisse können die durch ein Erdbeben verursachte Instabilität noch verstärken. Befindet sich die Felswand in der Nähe eines Gebirgskamms, so wird das Erdbebensignal wie bei einem Erdrutsch verstärkt. Die Vertikalkomponente der Erdbebenwellen hat bei einer Wand mit einer Neigung von > 45° einen stärker destabilisierenden Effekt als die Horizontalbeschleunigungen. Die Erdbebeneinwirkung, die bei einer Gleichgewichtsstudie berücksichtigt werden muss, entspricht der Multiplikation aus den maximalen horizontalen und vertikalen Beschleunigungen mit allgemein abgeschätzten pseudostatischen Faktoren zwischen 0.1 und 0.5. Figur 14 veranschaulicht den Bergsturz am Rawylhorn, der sich am 30. Mai 1946 infolge eines der Nachbeben der Bebenserie von Sierre ereignete.
Ein Bergsturz auf einem Mergel-, Tonstein- oder Tonschieferhorizont verläuft ähnlich wie ein Erdrutsch aus Lockergesteinsmassen, ausser dass aufgrund der Kohäsion der Mergel, Tonsteine oder Tonschiefer das Risiko einer Bodenverflüssigung ausgeschlossen wird.

b) Erdrutsch

Ein stärkeres Erdbeben kann im Gebirge zahlreiche Erdrutsche auslösen, entweder durch Reaktivierung zur Ruhe gekommener oder sich langsam bewegender Rutschmassen oder durch Mobilisierung ursprünglich stabiler Bodenschichten (Figur 15). Wie bei Erdrutschstudien, die nicht die Erdbebengefährdung berücksichtigen, ist Wasser der bestimmende Faktor: Daher muss das unterirdische Fliessregime innerhalb der potenziellen Rutschmasse bekannt sein. Zudem trägt die Erhöhung des Porenwasserdrucks unter

Tabelle 4: Untersuchung der Geländestabilität unter Erdbebeneinwirkung

- Abschätzung der Erdbebeneinwirkung (Horizontalbeschleunigung)
  - Bestimmung der Fundamentalfrequenz des Bodens
  - Erhöhung im Falle eines nahen Gebirgskamms

↓

- Abschätzung der hydrogeologischen Beanspruchung
  - Bestimmung der Fliessbedingungen im Untergrund

↓

- Abschätzung des Bodenverflüssigungspotentials gemäss Tabelle 6

↓

- Abschätzung der Scherwiderstandsparameter
  - Innerer Reibungswinkel
  - Kohäsion

↓

- Berechnung der Stabilität mit Modellen, die zyklische Horizontalbeschleunigungen und möglicherweise vorhandene verflüssigbare Böden simulieren

↓

Abschätzung der Gefahr durch Schlammströme



Figur 15: Durch das Erdbeben vom 13. Januar 2001 ausgelöster kreisförmiger Erdrutsch an der Carretera de San Vincente (El Salvador).

wiederkehrenden Belastungen von Böden, die verflüssigbare Sande oder Silte enthalten, ebenfalls vermehrt zur Destabilisierung des Geländes bei.

Erdrutsche werden somit häufig von Erdbeben durch Erhöhung der effektiven Horizontalspannung und des Porenwasserdrucks ausgelöst (bei einer Magnitude von ca. > 5).

Die detaillierten Schritte bei der Untersuchung eines möglicherweise instabilen Geländes werden in Tabelle 4 zusammengefasst.

Die Stabilitätsberechnungen erfolgen auf übliche Weise (statische Gleichgewichtsbedingungen) mit einer einfachen zyklischen Horizontalkomponente der Beschleunigung, die gleich der Multiplikation der für den Standort bestimmten maximalen horizontalen Beschleunigung mit einem pseudostatischen Faktor ist. Die Wahl dieses pseudostatischen Faktors ist nicht trivial und muss von der Bedeutung der untersuchten Zone und dem angenommenen Erschütterungsgrad abhängen. Im Allgemeinen liegt dieser Faktor zwischen 0.1 und 0.5. Befindet sich die Rutschmasse in der Nähe eines Bergkamms, so wird das Erdbebensignal durch die Topographie verstärkt (siehe Kapitel 2.2).

Für die Berechnung der Massenverlagerung stehen verschiedene Methoden zur Verfügung (Newmark, 1965, etc.). Unter der Voraussetzung, dass diese Methoden die Phänomene der Bodenverflüssigung und Schlammströme vernachlässigen, müssen sie für jede Stabilitätsstudie unabhängig voneinander verwendet werden.

c) Bodenverflüssigung

Die sogenannte Bodenverflüssigung bezeichnet einen Prozess, der zum Verlust der Scherfestigkeit eines Bodens durch Porendruckerhöhung und zur Verringerung der effektiven Spannung zwischen den Mineralkörnern führt. Begleiterscheinungen sind Sackungen, Dilatanz oder Erdrutsche. Die Erhöhung des Porenwas-



Figur 16: Einsinken eines Wohngebäudes nach hinten als Folge der Bodenverflüssigung seines Baugrunds (Erdbeben von Izmit, Türkei, 1999).

serdrucks erfolgt bei jedem Zyklus der Erdbebenwelle. Die Bodenverflüssigung betrifft wassergesättigte und wenig kompaktierte Lockergesteine (Tabelle 5) geringer Durchlässigkeit. Der Porenwasserdruck hat dabei nicht genügend Zeit, sich während zweier Belastungszyklen wieder abzubauen. Deshalb werden einzig gesättigte Sande und Silte von einer solchen Bodenverflüssigung betroffen (Böden mit einer Durchlässigkeit zwischen 10^{-5} und 10^{-6} m/s).

Falls dieses Kriterium erfüllt ist, kann die Bewertung der Verflüssigungsempfindlichkeit eines Bodens durch verschiedene Methoden, beispielsweise durch bodenmechanische Tests, wie dem Standard-Penetrometertest («standard penetration test» SPT), einer Rammsondierung im Bohrloch und der Drucksondierung («cone penetration test» CPT) oder auch Laborversuche mit der dynamischen Triaxialzelle präzisiert werden. Dynamische Modelle ermöglichen zudem eine Simulation der Bodenverflüssigung. Im Eurocode 8 (Teil 5) wird ein empirisches Vorgehen zur Bestimmung der Bodenverflüssigung vorgeschlagen.

Tabelle 5: Das Kriterium der Korngrössenverteilung für gesättigte und wenig kompaktierte Böden:

- 15 % mit Korndurchmesser: $d_{15} > 5$ µm
- 50 % mit Korndurchmesser: 50 µm < d_{50} < 1.5 mm
- 70 % mit Korndurchmesser: $d_{70} > 75$ µm.

Tabelle 6: Untersuchung der Bodenverflüssigung bei einem Erdbeben

Kriterium der Korngrössenverteilung erfüllt

↓

Abschätzung der Erdbebeneinwirkung eines Bodens durch:
- Beziehung Magnitude – horizontale Bodenbeschleunigung
- 1D-Simulation

↓

Abschätzung der Erdbebenwiderstandsfähigkeit eines Bodens durch:
- Scherfestigkeit
- Druckfestigkeit (NSPT etc.)
- Dynamische Triaxialversuche etc.

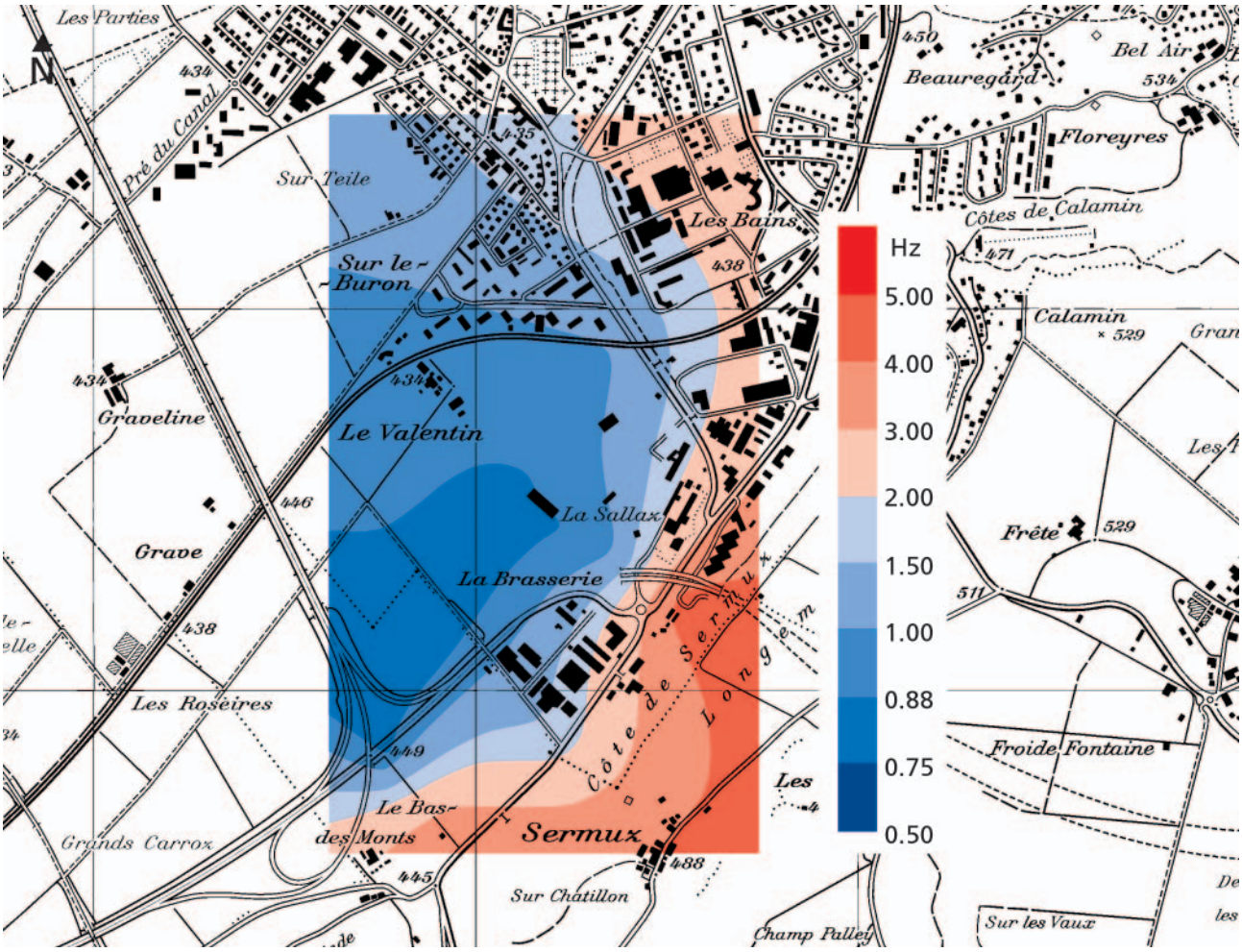
↓

Vergleich zwischen Beanspruchung und Widerstandsfähigkeit: Die Widerstandsfähigkeit muss ausreichend sein.

Von der Bodenverflüssigung sind per Definition Lockerböden betroffen, die auf Erdbeben mit Setzungen reagieren. Daher sind gesättigte Böden aus mehr als ca. 20 m Tiefe ausreichend dicht, so dass sie nicht mehr von einer Bodenverflüssigung betroffen werden.

Die Gefahr einer Bodenverflüssigung muss für jedes einzelne Gebäude bewertet werden. Das Verhalten eines Bauwerks hängt auch von der Art seines Fundaments ab (Einzelfundament, Streifenfundament, Fundamentplatte, Pfahlgründung). Trotz einer Bodenverflüssigung können bei einer entsprechend ausgelegten Pfahlgründung (z. B. Unempfindlichkeit der Pfähle gegenüber Verformungen des Oberbodens, Auslegung der Pfähle unter Berücksichtigung der durch oberflächennahe Bodensetzungen verursachten negativen Reibung) Folgeschäden vermieden werden.

Die Tatsache, dass ein verflüssigter Boden seine Eigenimpedanz verändert, wodurch auch eine Änderung des Erdbebensignals bewirkt wird, darf nicht ausser Acht gelassen werden. Das Vorgehen bei der Untersuchung der Bodenverflüssigung ist in Tabelle 6 zusammengefasst.



Figur 17: Fundamentalfrequenzmessungen von Lockergesteinen in der Region von Yverdon (Widmer et al., 2003).

d) Thixotropie von Tonen

Nach Ablagerung der Tone in lakustrischem oder marinem Milieu, werden die Tonpartikel langsam umgeordnet und bilden eine dreidimensionale Struktur. Sie bilden ein Netz aus Plättchen, die mehr oder weniger orthogonal zueinander angeordnet sind. Eine seismische Erschütterung kann zu einem Zusammenbruch dieser Struktur führen, deren Gleichgewicht mit einem Kartenstapel vergleichbar ist. Wenn die Tone sich ursprünglich nicht in einem überkonsolidierten Zustand befinden, setzen sie sich oder lösen einen Erdrutsch aus. Ihr Konsolidierungsgrad ist somit eine wesentliche Eigenschaft für ihr Verhalten bei einem Erdbeben. Sogar nach einem Thixotropiephänomen bleibt der Ton plastisch verformbar.

Die Durchlässigkeit von Tonen ist sehr gering, der Porenwasserüberdruck, der von den Beschleunigungszyklen erzeugt wird, benötigt Stunden bis zu Tagen um sich abzubauen. Eine Rutschmasse kann einen solchen Überdruck lange nach einem Hauptbeben aufrechterhalten, vor allem wenn Nachbeben dessen Abbau beeinträchtigen. Zudem ist im Anschluss an die plastischen Verformungen, die von dem Hauptbeben verursacht wurden, die mechanische Widerstandsfähigkeit der Tone geschwächt (residualer Reibungswinkel, residuale Kohäsion).

Die Thixotropie von Tonen bleibt ein vergleichsweise seltenes Phänomen in der Schweiz und tritt nur örtlich begrenzt in der Nähe von Seen oder alten lakustrischen Ablagerungen auf.

2.4 Fundamentalfrequenz des Bodens und Resonanz zwischen Boden und Bauwerk

Ein wichtiger Parameter im Rahmen der dynamischen Belastungen ist die Fundamentalfrequenz (oder Eigenfrequenz). Dabei handelt es sich um die Frequenz, mit der ein Lockergestein, ein Bauwerk oder jedes andere Objekt natürlich schwingt. Die Fundamentalfrequenz kann durch eine Stimmgabel verdeutlicht werden.
Die Fundamentalperiode wird definiert als die inverse Fundamentalfrequenz.

Es ist möglich, Fundamentalfrequenzkarten von Lockergesteinen (Figur 17) durch Messungen im Vergleich zum «Umweltlärm» und geeigneter Behandlung dieser Messwerte zu erstellen.

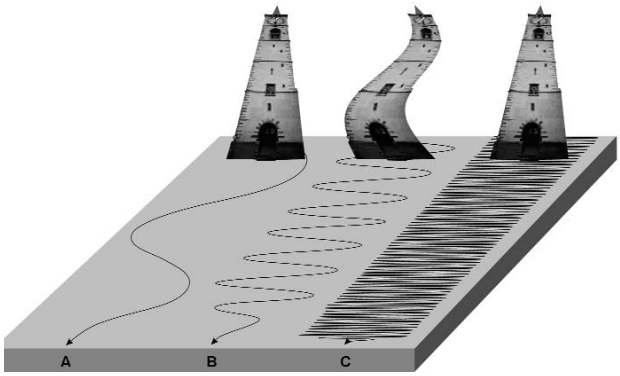
Bei der ungefähren Abschätzung der Fundamentalfrequenz eines Lockergesteinsbodens für ein System aus mehreren horizontalen Lockergesteinsschichten, die einen kompakteren Untergrund überlagern (z. B. Alluvialablagerungen auf dem Molasseplateau) kommt folgende Gleichung zur Anwendung:

$$f_0 = \frac{V_s}{4h} \qquad T_0 = \frac{4h}{V_s}$$

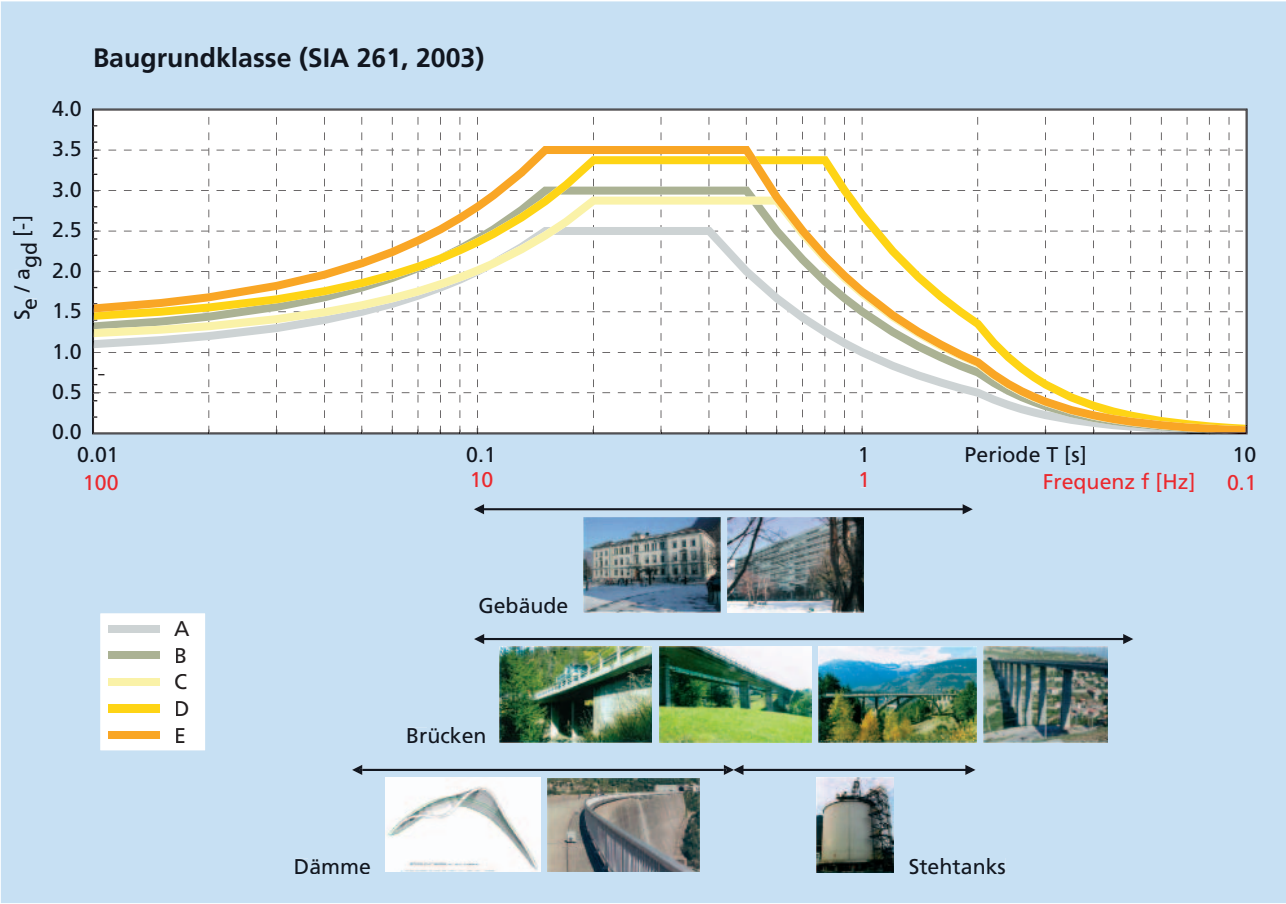
f_0: Fundamentalfrequenz [Hz]
T_0 : Fundamentalperiode [s]
V_s: Mittlere Scherwellengeschwindigkeit im Lockergestein [m/s]
h: Kumulierte Mächtigkeit der Lockergesteinsschichten auf dem Felsuntergrund [m]

Die Anwendung dieser Gleichung setzt die Kenntnis des Geschwindigkeitsprofils der Scherwellen in der Lockergesteinsschicht voraus.

Bei einem Erdbeben induzieren die Erschütterungen bzw. Schwingungen im Boden eine entsprechende Schwingung der Bauwerke, die auf diesem gegründet sind. Die Bauwerksfundationen nehmen dabei die Bodenbewegungen auf, bis ihr Oberbau entsprechend seiner Masse und Steifigkeit schwingt. Die Bodenbewegungen und diejenigen des Oberbaus sind folglich im Allgemeinen unterschiedlich. Ist die Fundamentalfrequenz eines Gebäudes derjenigen des Baugrunds sehr ähnlich, so spricht man vom Phänomen der Resonanz 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 (Figur 18). Das in Resonanz versetzte Gebäude ist somit besonders bedroht. Es kann an seinem Tragwerk erheblich plastisch deformiert werden, lokal nachgeben oder schlimmstenfalls total einstürzen.



Figur 18: Resonanzerscheinung (B) zwischen Boden und Bauwerk, die bei einer bestimmten Frequenz erzeugt wird (Weidmann, 2002).



Figur 19: Bereich der Fundamentalperioden bestimmter Bauwerkstypen in Zusammenhang mit den Antwortspektren der in der Norm SIA 261 (2003) beschriebenen Baugrundklassen.

Sofern ein Bauwerk eine identische oder ähnliche Fundamentalfrequenz wie der Baugrund aufweist, müssen die Anforderungen bezüglich seiner Dimensionierung oder seiner Erdbebensicherheit verstärkt werden aufgrund der in den Baunormen geforderten Massnahmen. Im Rahmen des Möglichen bemüht man sich, die Fundamentalfrequenz eines projektierten Gebäudes durch bauliche Massnahmen, wie Versteifung oder «Verweichung» (Erhöhung der Duktilität) der Tragwerke so zu verändern, dass sie sich von derjenigen des Baugrunds unterscheidet.

Die Figur 19 zeigt die Bereiche der unterschiedlichen Fundamentalfrequenzen, welche bei den veschiedenen Bauwerkstypen vorkommen. Generell kann man sagen, je höher ein Gebäude ist, desto tiefer ist die Fundamentalfrequenz.

Die Bestimmung der Fundamentalfrequenz eines bestimmten Gebäudes erfolgt idealerweise mit Hilfe einer Modellierung der statischen Tragwerke und nach Möglichkeit durch In-situ-Messungen. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Bewertung des Steifigkeitsverlusts der Tragwerkselemente durch Beschädigung bei einem grösseren Erdbeben. Dieser Steifigkeitsverlust führt zu einer Reduktion der Fundamentalfrequenz.

Mit einer verallgemeinernden Gebäudekategorisierung ist es möglich, einfache Gleichungen zu verwenden.

3. Karte der Baugrundklassen gemäss SIA 261

3.1 Definition

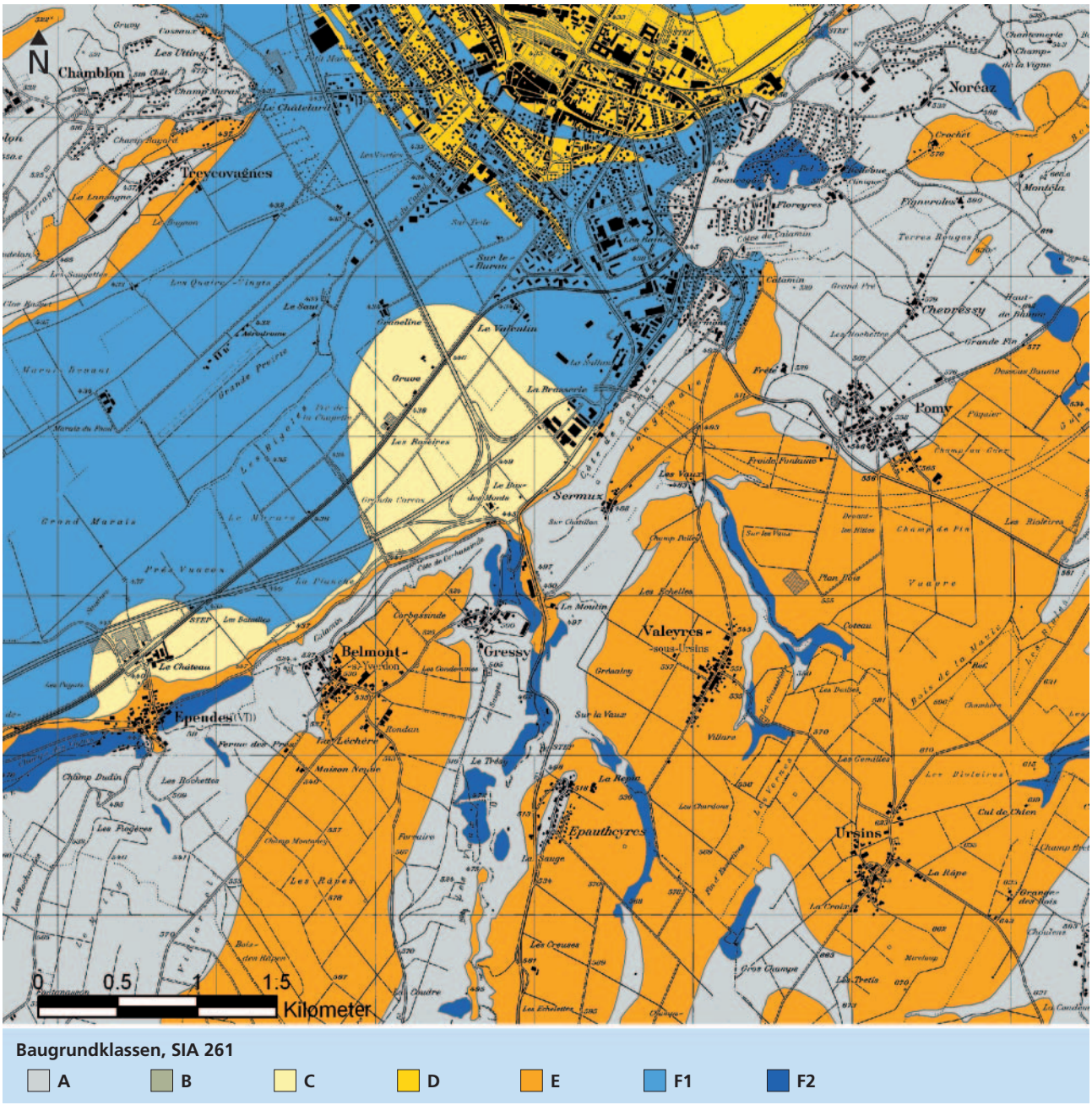
Entsprechend dem Vorgehen, das für sämtliche Naturgefahren übernommen wurde, kann eine Voruntersuchung der seismischen Gefährdung dank der Erdbebenzonenkarte (Figur 7) und der Karte der Baugrundklassen durchgeführt werden. Die Karte der Baugrundklassen zeigt die Zonen der verschiedenen nach der geltenden Baunorm SIA 261 spezifizierten Bodenklassen. Diese gelten im Wesentlichen für die obersten 30 Meter Schichtmächtigkeit. Die Erstellung der Karte der Baugrundklassen bildet dabei einen grundlegenden Schritt. Sie verdeutlicht kostengünstig diejenigen Zonen, die generell ein gewisses Verstärkungspotenzial aufweisen und demzufolge detaillierte-re Ergänzungsuntersuchungen erfordern (spektrale seismische Mikrozonierungsstudien, Kapitel 4).
Für die Gestaltung der Karte wird das Untersuchungsgebiet im Massstab 1: 25'000 in die sechs verschiedenen Baugrundklassen, wie in der Baunorm SIA 261 (2003) definiert, eingeteilt.

Die Baugrundklasse F der strukturempfindlichen, organischen Ablagerungen oder instabilen Rutschungszonen erfordert für die betroffenen Werte vertiefte Studien zur spektralen Mikrozonierung, um ein spezifisches Anwortspektrum der untersuchten Zone zu erhalten (Figur 8) und/oder zur Bestätigung eines Potenzials für induzierte Effekte, wie Massenbewegungen, Bodenverflüssigung oder Thixotropie. Gegenüber der Norm SIA 261 wird diese Kategorie in zwei weitere unterteilt: F1 beinhaltet die strukturempfindlichen, organischen Ablagerungen; F2 umfasst die Rutschungen. Mit dieser Zweiteilung können für jede Zone die potentiellen Auswirkungen dargelegt werden.

Ein Beispiel für eine solche Karte der Baugrundklassen, die strikt der Norm SIA 261 entspricht, ist in Figur 20 dargestellt; dabei handelt es sich um die Karte des Blatts Yverdon-les-Bains im Massstab 1: 25'000.

Baugrundklasse	Beschreibung	$V_{s,30}$ [m/s]	N_{SPT}	S_u [kPa]
A	Harter Fels (z. B. Granit, Gneis, Quarzit, Kieselkalk, Kalk) oder weicher Fels (z. B. Sandstein, Nagelfluh, Juramergel, Opalinuston) unter maximal 5 m Lockergesteinsbedeckung.	> 800	–	–
B	Ablagerungen von grossräumig zementiertem Kies und Sand und/oder vorbelastete Lockergesteine mit einer Mächtigkeit über 30 m.	400–800	> 50	> 250
C	Ablagerungen von normal konsolidiertem und unzementiertem Kies und Sand und/oder Moränenmaterial mit einer Mächtigkeit über 30 m.	300–500	15–50	70–250
D	Ablagerungen von nicht konsolidiertem Feinsand, Silt und Ton mit einer Mächtigkeit über 30 m.	150–300	< 15	< 70
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.	–	–	–
F1	Strukturempfindliche und organische Ablagerungen (z. B. Torf, Seekreide) mit einer Mächtigkeit über 10 m.	–	–	–
F2	Aktive oder reaktivierbare Rutschungen.	–	–	–

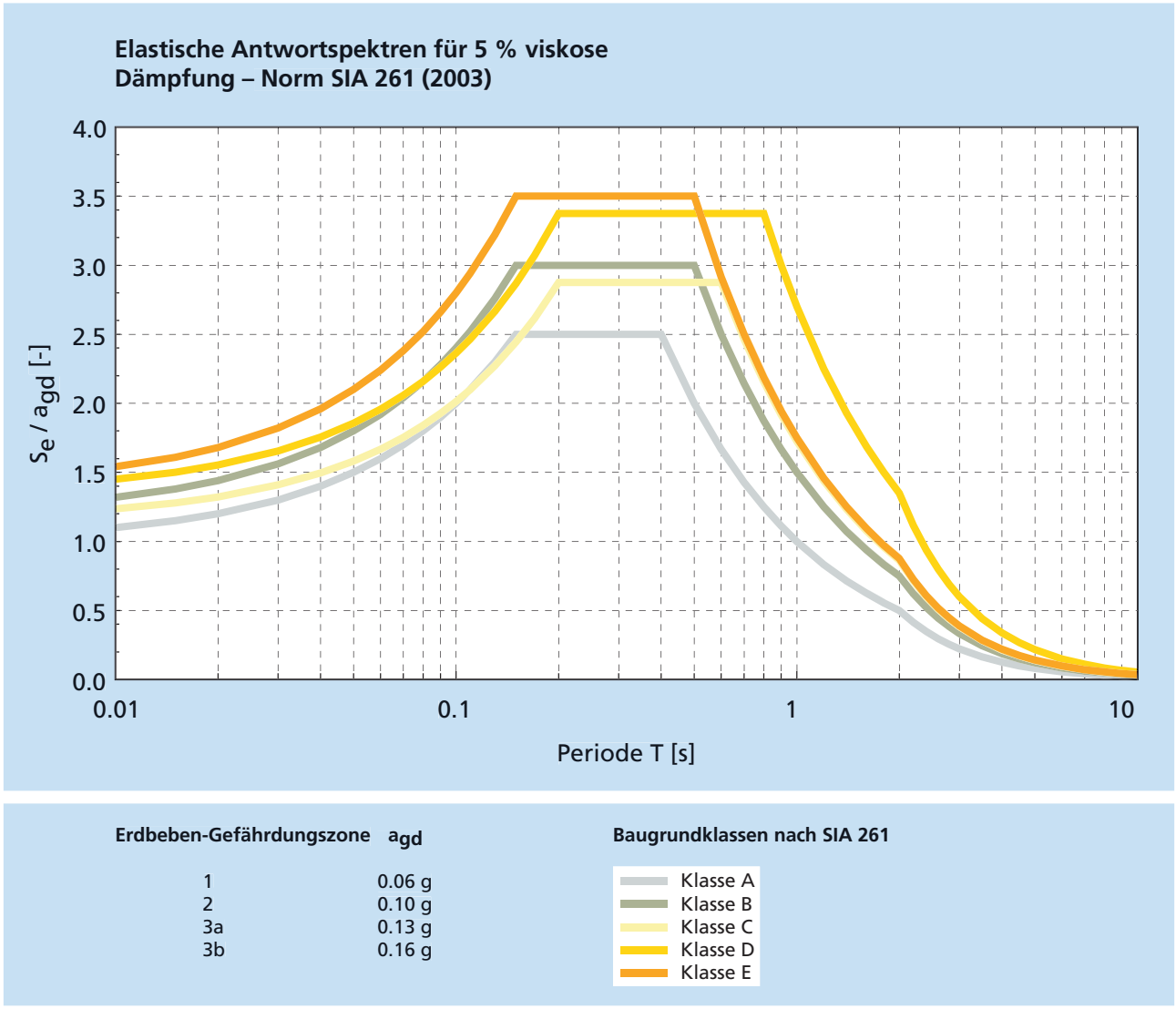
Tabelle 7: Beschreibung der Baugrundklassen nach der Norm SIA 261 (2003).



Figur 20: Ausschnitt aus der Karte der Baugrundklassen nach SIA 261 des Blatts Yverdon-les-Bains im Massstab 1: 25'000 (Widmer, 2002).

3.2 Die Anwendung der Karte der Baugrundklassen

Den Baugrundklassen A bis E werden elastische Antwortspektren mit horizontaler Beschleunigung gemäss Baunorm SIA 261 zugeordnet (Tabelle 7 und Figur 21). Die elastischen Antwortspektren dienen der Dimensionierung von Tragstrukturen. In einigen Fällen ist es für den Ingenieur schwierig, aufgrund der beim Baugrund vorgefundenen Verhältnisse, eine Zuweisung zu einer Baugrundklasse vorzunehmen. Der verantwortliche Projektingenieur kann für die Bestimmung der Baugrundklasse einerseits die Karte der Baugrundklassen konsultieren oder andererseits die verfügbaren geotechnischen Daten verwenden. Falls die geotechnischen Daten von der Karte der Baugrundklassen abweichen, sollen die vor Ort erhobenen Messwerte als Basis für die Bestimmung der Baugrundklasse dienen.



Figur 21: Antwortspektren der Baugrundklassen gemäss Norm SIA 261.

In der Schweiz sind sowohl die vorhandenen Karten der Baugrundklassen als auch zahlreiche Informationen über Erdbeben direkt mittels Internet auf der Seite www.bwg.admin.ch abrufbar (Anhang D).

Für die Bodenklasse F und die Böden, die nicht in A bis E eingeordnet werden können, sollte man zusätzliche Untersuchungen bezüglich der seismischen Einwirkung durchführen. Damit werden die Auswirkungen auf Rutschungen, strukturempflindliche und organische Ablagerungen bestätigt oder widerlegt, gleichzeitig wird die Verstärkung der seismischen Wellen quantifiziert. Sollten sich die Auswirkungen (Thixotropie, Bodenverflüssigung, Massenbewegungen) bestätigen, dann müssen konstruktive Schutzmassnahmen ausgeführt werden (Vergrösserung der Fundationstiefe, Bodenverstärkungen, usw.).

3.3 Basisdaten und Begleitdokumente

Die geologische Karte bildet – sofern vorhanden – das Basisdokument für die Baugrundklassen. Darin werden systematisch die in Tabelle 7 in SIA 261 beschriebenen Baugrundklassen in die geologische Legende übertragen und die Ausbisslinien der verschiedenen Lithologien in den obersten 30 Metern berücksichtigt. In Bereichen mit fehlender Information zu den quartären Ablagerungen oder fehlender geologischer Karte, präzisieren Daten aus mechanischen Sondierungen sowie auch geophysikalische Untersuchungsmethoden den Aufbau und die Mächtigkeit der oberflächennahen Lockergesteinsbedeckung (Seismik und/oder Geoelektrik). In der Praxis wird häufig eine heterogene und komplexe Schichtlagerung der Sedimentbedeckung an der Oberfläche angetroffen. In diesem Fall erfolgt die Zuordnung der Baugrundklasse entsprechend der vorherrschenden Lithologie, nach der in der Norm festgelegten Tiefe (Tabelle 7).

Mit der Karte der Baugrundklassen können Bereiche mit deutlich auftretenden induzierten Effekten (vor allem Massenbewegungen und Bodenverflüssigung) identifiziert werden. In diesem Zusammenhang bilden die Gefahrenkarten sowie die hydrogeologischen Karten einen wertvollen Beitrag für die Voruntersuchung. Die Karte der Baugrundklassen muss unbedingt von einem erläuternden Synthesebericht begleitet werden. Darin sind alle verwendeten Grundlagen aufgeführt und die Etappen der Bearbeitung beschrieben. Es ist darauf zu achten, dass keine geologischen Informationen verloren gehen und diese nachvollziehbar konsultiert werden können. Im Erläuterungsbericht werden auch die Unsicherheiten bezüglich Baugrundklassen und den entsprechenden Auswirkungen dargelegt. In den Baugrundklassen D oder E, die Feinsande, Silte oder unkonsolidierte Tone beinhalten, können beispielsweise Bodenverflüssigungen auftreten, insbesondere wenn der Grundwasserstand hoch ist. In der Klasse F1 sollte man, wenn möglich, die erwarteten Auswirkungen erläutern (Torfböden, Bodenverflüssigung, Thixotropie, usw.).

3.4 Transkription der geologischen Legende

Die Wahl eines geeigneten Buchstabens bei der Definition der Baugrundklassen nach der Norm SIA 261, welche sich aus der Tabelle 7 ergeben, kann Unklarheiten hervorrufen. Die Zuordnung zu den verschiedenen geologischen Formationen ist nicht immer eindeutig gegeben. Die Tabelle 8 soll als Hilfe bei der Zuweisung von Baugrundklassen an die geologischen Gegebenheiten dienen. Insbesondere wird Rücksicht auf die Mehrheit der in der Schweiz anzutreffenden geologischen Ablagerungen genommen.

3.5 Legende und Interpretation der Karte der Baugrundklassen

Die Baugrundklassen der Norm SIA 261, die auf der Karte durch verschiedene Farbtöne dargestellt sind, werden eine generelle qualitative Bewertung der Standorteffekte (Tabelle 7 und Figur 20) auf schnelle Weise ermöglichen.

Es wird vorgeschlagen, Grautöne für die hauptsächlich felsigen Zonen (Klassen A und B) zu verwenden, deren Verstärkungspotenzial der Erdbebenwellen bei einem Ereignis eher schwach ist. Eine Abstufung in Gelbtönen für die Lockergesteinsklassen C, D und E wird die Zonen, die generell ein mässiges Verstärkungspotenzial aufweisen, aufzeigen. Blautöne werden der Klasse F zugeordnet und zeigen sensible Ablagerungen, die ein Anregungssignal beträchtlich verstärken können oder schädliche Auswirkungen verursachen.

Diese Einteilung setzt voraus, dass die in blau dargestellten Böden der Klasse F die sensibelsten Zonen darstellen und dass dort Zusatzstudien zur Beurteilung von seismischen Einwirkungen notwendig sind. Diesbezüglich gibt es keine Analogie, die im Rahmen der Bundesempfehlungen (1997) zur Berücksichtigung der Massenbewegungs- und Hochwassergefahren bei Raumplanungsaktivitäten rote Zonen systematisch mit Bauverboten belegt. In der Tat ist ein Bauverbot aufgrund der seismischen Gefährdung in der Schweiz nicht gerechtfertigt.

Lithologie / Phänomene und Mächtigkeit	Baugrund-klasse	Bemerkungen
Fels an Ort und Stelle	A	
Bergsturzablagerungen 0–5 m auf Fels	A	
Bergsturzablagerungen 5–30 m auf Fels	E	
Bergsturzablagerungen > 30 m auf Fels	C	
Bergsturzablagerungen 0–30 m auf alluvialen Ablagerungen	C–D	In Abhängigkeit vom Typ der darunter liegenden Alluvialablagerungen
Bergsturzablagerungen > 30 m auf alluvialen Ablagerungen	C	
Schuttüberdeckung 0–5 m	A	
Schuttüberdeckung 5–30 m	E	
Schuttüberdeckung > 30 m	C	
Felssackung	A	
Rutschung	F2	
Unkonsolidierte Moräne 0–5 m auf Fels	A	
Unkonsolidierte Moräne 5–30 m auf Fels	E	
Unkonsolidierte Moräne > 30 auf Fels	C	
Unkonsolidierte Moräne 0–30 m auf grobkörnigen alluvialen Ablagerungen	C	
Unkonsolidierte Moräne > 30 m auf grobkörnigen alluvialen Ablagerungen	C	
Unkonsolidierte Moräne 0–5 m auf feinkörnigen alluvialen Ablagerungen	D	
Unkonsolidierte Moräne 5–30 m auf feinkörnigen alluvialen Ablagerungen	C–D	In Abhängigkeit der Moränenmächtigkeit
Unkonsolidierte Moräne > 30 m auf feinkörnigen alluvialen Ablagerungen	D	
Grundmoräne 0–30 m auf Fels	A	
Grundmoräne > 30 m	B	
Grobkörnige Sande, Kies 0–5 m auf Fels	A	
Grobkörnige Sande, Kies 5–30 m auf Fels	E	
Grobkörnige Sande, Kies > 30 auf Fels	C	
Silt, Ton 0–5 m auf Fels	A	
Silt, Ton 5–30 m auf Fels	E	
Silt, Ton > 30 m auf Fels	D	
Silt, Ton 0–30 m auf alluvialen Ablagerungen	C–D	In Abhängigkeit vom Typ der darunter liegenden Alluvialablagerungen
Silt, Ton > 30 m auf alluvialen Ablagerungen	D	
Sumpf, Torf 0–5 m auf Fels	A	
Sumpf, Torf 5–10 m auf Fels	E–F1	Wahl für die Sicherheit: F1
Sumpf, Torf > 10 m auf Fels	F1	
Sumpf, Torf 0-5 m auf alluvialen Ablagerungen	C–D	In Abhängigkeit vom Typ der darunter liegenden Alluvialablagerungen
Sumpf, Torf 5–10 m auf alluvialen Ablagerungen	C–D–F1	Wahl für die Sicherheit: F1
Sumpf, Torf > 10 m auf alluvialen Ablagerungen	F1	

Tabelle 8: Entscheidungshilfe bei der Zuweisung einer Baugrundklasse nach SIA 261 zu einer geologischen Formation (CREALP, 2004).

4. Studien zur spektralen seismischen Mikrozonierung

4.1 Regionale Gefährdung

Die Erdbebengefährdung der Schweiz wurde vom Schweizerischen Erdbebendienst (SED, 2003) vollkommen neu berechnet. Die Werte der Spektralbeschleunigung sind für die Frequenzen von 0.5, 1, 2, 3, 5, 10 und 12 Hz in Form von Karten mit verschiedenen Wiederkehrperioden (500 und 1000 Jahre) für das gesamte Schweizer Gebiet verfügbar (s. Website des SED). Diese Werte gelten für einen Boden des Typs «harter» Fels, d. h. bei dem die geschätzte Ausbreitungsgeschwindigkeit der S-Wellen in der Grössenordnung von 1500 m/s liegt.

4.2 Bestimmung der Spektralverstärkung

4.2.1 Interpretation der geologischen und geotechnischen Daten

Die geologischen und hydrogeologischen Daten sind in Form von Karten oder auch Profilschnitten mit Angabe der Bodenbeschaffenheit und -mächtigkeiten darzustellen. Die geologischen Daten müssen durch möglichst viele geotechnische Daten ergänzt werden.

Tabelle 9: Basisdaten für seismische Mikrozonierungsstudien

- Ablagerungen an der Oberfläche:
  - Beschaffenheit
  - Mächtigkeit
  - Geotechnische Eigenschaften
  - S-Wellengeschwindigkeit
  - Fundamentalfrequenz
  - Kornverteilung (und Klassifikation gemäss USCS)
  - Plastizitätsindex für Tone
  - Scheinbarer volumetrischer Wassergehalt
  - Kompaktierung, Konsolidierungsgrad und relative Lagerungsdichte
  - Grundwasserdruckspiegelhöhen (bei Niedrigwasser und Hochwasser)
- Felsuntergrund:
  - Formation
  - Mächtigkeit
  - S-Wellengeschwindigkeit
  - Aktive und nicht-aktive tektonische Strukturen
  - Dichte
  - Verwitterungsgrad und Mächtigkeit der Verwitterungszone

Die wichtigsten für die quantitative Simulation der Standorteffekte benötigten Parameter sind: Beschaffenheit der Lockergesteinsablagerungen und des Felsuntergrunds (Mächtigkeit, Fundamentalfrequenz, Dichte und Schichtgeometrie) sowie Scherwellengeschwindigkeit (S-Wellen), Plastizitätsindex der Tone und Grundwasserdruckspiegelhöhe (Tabelle 9). Es sollen möglichst viele Informationen zu den im Untersuchungsgebiet durchgeführten punktuellen geotechnischen Studien gesammelt werden. Dabei handelt es sich um Untersuchungen im Rahmen von Gebäuden, Strassen- und Eisenbahnbau, usw. Sämtliche verfügbare Sondierungs- oder Testergebnisse (Ergebnisse aus In-situ- oder Laborversuchen) werden zur bestmöglichen Abschätzung der S-Wellengeschwindigkeiten verwendet. Bei den In-situ-Versuchen seien die Rammsondierung (standard penetration test SPT) oder die Drucksondierung (cone penetration test CPT) genannt, mit denen die Bodenkompaktion ermittelt wird. Die Bestimmung des verwendeten SPT-Typs ist wichtig, bevor Korrelationsgleichungen zur Bestimmung der S-Wellengeschwindigkeit angewendet werden.

Bei der Akquisition der geologischen und geotechnischen Daten sollen möglichst wenige Vorinterpretationen durchgeführt werdenen. Hypothesen werden erst bei der Endauswahl der Parameter und Parametervariationen entwickelt (in Übereinstimmung mit dem Geophysiker und dem Geologen).

Nach erfolgter Akquisition der geologischen und geotechnischen Daten werden das Bodenverflüssigungspotenzial und mögliche induzierte Effekte (Erdrutsch, Steinschlag usw.) bestimmt. Zudem sind die Sammlung und Interpretation der Informationen über historische Erdbeben sowie die Registrierung bestehender Beben zur Bestimmung der für die Berechnung der Standorteffekte benötigten Bemessungsbeben hilfreich.

4.2.2 Messung der fundamentalen Fundamentalfrequenz der Ablagerungen

Da die S-Wellengeschwindigkeiten sowie die Schichtmächtigkeiten sämtlicher im Untersuchungsgebiet angetroffenen Formationen schwierig abzuschätzen sind, ist die Messung der Grundfrequenz (Fundamentalfrequenz) der Ablagerungen ein sehr nützlicher zusätzlicher Parameter. Tatsächlich ermöglicht die Verwendung dieser Information bei numerischen Simulationen eine Anpassung/Abschätzung der nicht gemessenen Werte für die Geschwindigkeit und/oder

Schichtmächtigkeit sowie eine Präzisierung der Ausdehnung von Bereichen mit relativ identischen Eigenschaften.

Mit verschiedenen experimentellen Methoden kann die Grundfrequenz von Ablagerungen an zahlreichen Punkten eines das gesamte Untersuchungsgebiet abdeckenden Messnetzes bestimmt werden. Wir beschränken uns an dieser Stelle auf die Methode, die häufig als Nakamura-Methode bezeichnet wird und auf die Verwendung von Aufzeichnungen der ambienten Schwingungen (der sogenannten Bodenunruhe) basiert, die mithilfe einer einzelnen Station (Seismometer) oder mehrerer Stationen (Array-Methode) erfolgt. Diese Methode beruht auf einem Spektralverhältnis zwischen den Horizontal- und Vertikalkomponenten aus der Registrierung ambienter Schwingungen. Sie ist ein einfaches, schnelles und kostengünstiges Instrument zur Bestimmung der Grundfrequenz (Fundamentalfrequenz) von Sedimentablagerungen. Jedoch weist diese Methode eine grosse Unsicherheit auf, insbesondere wenn die Impedanzkontraste zwischen Lockergesteinsablagerungen und Felsuntergrund ziemlich schwach sind. Die Bedeutung und Interpretation des H/V-Peaks ist noch Gegenstand der aktuellen Forschung.

Im Anschluss an eine solche Messkampagne kann eine Isofrequenzkarte für die Fundamentalfrequenzen des Bodens erstellt werden (Figur 17, Figuren 26 und 27).

4.2.3 Definition eines S-Wellengeschwindigkeitsmodells

Es wird strengstens empfohlen, gleich wie bei den S-Wellengeschwindigkeitsmessungen zu verfahren. Tatsächlich ist die Kenntnis der S-Wellengeschwindigkeit in quartären Ablagerungen der Schweiz sehr begrenzt. Einige Methoden, die relativ leicht durchgeführt werden können, werden in Kapitel 4.4.1 vorgestellt. Mit diesen Messungen sollen zumindest die S-Wellengeschwindigkeiten in oberflächennahen Sedimenten bestimmt werden, möglicherweise aber auch bis zum Felsuntergrund.

Auf Grundlage sämtlicher verfügbarer Daten und Messungen wird ein geophysikalisches Modell der untersuchten Region erstellt. Dieses Modell generiert Profile der beiden für die Modellierung der Standorteffekte wichtigsten Parameter, d. h. der:

- Scherwellengeschwindigkeit (S-Wellen)
- Dichte des Fels- und Lockergesteinsuntergrunds

Diese Profile zeigen deutlich:

- Den erwarteten Variationsbereich der S-Wellengeschwindigkeit
- Den Variationsbereich der Grenzen und Kontaktflächen zwischen den verschiedenen Schichten
- Die Tiefe und Geometrie des Felsuntergrunds

Wenn Berechnungen, die das nicht-lineare Verhalten von Stoffen berücksichtigen in Betracht gezogen werden, empfiehlt es sich ebenfalls die für diese Modellierungen notwendigen Parameter abzuschätzen. Falls Modellierungen der P-SV-Wellen vorgesehen sind, wird zudem die Bestimmung der P-Wellengeschwindigkeiten empfohlen.

4.2.4 Numerische Modellierung der Verstärkung (Amplifikation)

Im Folgenden sollen numerische Modellierungen der Standorteffekte durchgeführt werden. Dabei ist es wichtig, die jeweils für das Untersuchungsgebiet geeignetste(n) Simulationsmethode(n) auszuwählen unter Berücksichtigung von:

- Der Geometrie des Felsuntergrunds, welche die Wahl der 1D-, 2D- oder sogar 3D-Modellierung bestimmt
- Das erwartete nicht-lineare Verhalten der Böden (günstige Bodenbeschaffenheit für nicht-lineare Effekte, erwartete erhöhte Gefährdung für den Fels). Ist ein nicht-linearer Effekt zu erwarten, empfiehlt es sich, diesen – zumindest mithilfe der sogenannten «linear-äquivalenten» Approximation – in den Simulationen zu berücksichtigen
- Der Einfluss der seismischen Quelle (Magnitude, Mechanismus, Tiefe, Entfernung)

Es müssen eine Abschätzung der Simulations- und Eingabeparameterunsicherheiten durchgeführt und zudem die Grenzen und Anwendungsbereiche der verwendeten Methoden präzisiert werden.

Aus der numerischen Modellierung resultiert eine oder mehrere Funktion(en) für die Verstärkung des Bemessungsbebensignals im Fels entsprechend der lokalen geologischen Bedingungen. Kapitel 4.4.3 stellt die verschiedenen Methoden für die Simulation der Standorteffekte dar.

4.3 Elastische Antwortspektren für einen spezifischen Standort und spektrale Mikrozonierungskarte

Das Ergebnis einer vollständigen Mikrozonierungsstudie ist schlussendlich die spektrale Mikrozonierungskarte. Dabei handelt es sich um eine Karte des Untersuchungsgebiets, auf der die verschiedenen aufgrund der Studie der Standorteffekte definierten Zonen eingetragen sind. Die Anzahl dieser Zonen variiert je nach Bedeutung der Standorteffekte, Variabilität des Untergrunds und Ausdehnung des Untersuchungsgebiets. Jedoch empfehlen wir aufgrund der Unsicherheiten im Zusammenhang mit der Bewertung von Standorteffekten, eine Anzahl von ca. 5 Zonen nicht zu überschreiten.

Die Festlegung der Grenzen dieser Zonen erfolgt insbesondere anhand bestimmter Daten, die für die Definition der Bauwerksklassen in der SIA-Norm 261 erhoben wurden. Dabei handelt es sich um die:

- Geologische Karte
- Tiefenlage des Felsuntergrunds
- Variation der S-Wellengeschwindigkeit und der Dichte der Schichten
- Isofrequenzkarte mit den Fundamentalfrequenzen des Bodens
- Ergebnisse der Berechnungen der Standorteffekte an verschiedenen Punkten

Jede auf diese Weise definierte Zone wird durch das jeweils vorgeschlagene elastische Antwortspektrum begleitet, das sowohl grafisch als auch in analytischer Form dargestellt wird. Dieses Spektrum entspricht dem Ergebnis der Multiplikation der Verstärkungsfunktion (aus der Berechnung in Kapitel 4.2.4) mit dem elastischen Referenzantwortspektrum (Input) für den harten Fels (regionale Gefährdung, bestimmt in Kapitel 4.1). Es empfiehlt sich, einfache Formen zu definieren (ähnlich wie jene der SIA-Norm 261), immer im Hinblick auf das eigentliche Ziel der Mikrozonierung, die direkte Verwendung von elastischen Antwortspektren durch Bauigenieure zur Dimensionierung von Bauwerken anstelle der in der SIA-Norm 261 vorgeschlagenen Spektren.

Ergebnisse der spektralen Mikrozonierungsstudie

Die benötigten Basisdaten (S-Wellengeschwindigkeit, Mächtigkeit der Ablagerungen usw.) sind oft mit grossen Unsicherheiten behaftet. Deshalb bestehen wir an dieser Stelle auf einer geeigneten Behandlung solcher Unsicherheiten bei der Erstellung der Mikrozonierung. Es werden dabei die folgenden Punkte behandelt:

- Sämtliche Unsicherheiten und die festgehaltenen Hypothesen müssen im Bericht klar ausgedrückt werden
- die Quellen der verwendeten Dokumente und/oder Daten sollen im Referenzverzeichnis zitiert werden
- im Bericht muss eine Abschätzung der Variation der Berechnungsergebnisse angegeben sein

Der Bericht könnte somit folgende Dokumente enthalten:

- Karten und Profilschnitte, die das geophysikalische Modell verdeutlichen
- Isofrequenzkarten mit der Grundfrequenz des Bodens
- eine Mikrozonierungskarte mit den elastischen Antwortspektren, die diejenige der SIA-Norm 261 ersetzt
- eine Karte der induzierten Effekte (Bodenverflüssigung, Erdrutsch, Bergsturz, Thixotropie)
- ein Dokument mit den geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Basisdaten, deren Unsicherheiten und die effektive Auswahl durch die drei Partner der Studie (Geologe, Geophysiker und Bauingenieur). Dieses Dokument beschreibt ebenfalls die Evaluationsmethoden der Standorteffekte, welche die Basis der verwendeten elastischen Antwortspektren bilden, sowie die Ergebnisse der verschiedenen Berechnungen

4.4 Methoden

4.4.1 Methoden zur Bestimmung der S-Wellengeschwindigkeiten

Die räumliche Geschwindigkeitsausbreitung der S-Wellen (Scherwellen) im Boden kann durch aktive Messungen im Gelände bestimmt werden, d. h. mit seismischen Verfahren, wie Reflexion/Refraktion von S-Wellen, Messungen der Oberflächenwellen mithilfe einer Einzelstation oder einer Stationsauslage oder sogar mit Bohrlochmessverfahren («down-hole» und «cross-hole»). Die passiven Methoden basierend auf der Messung der Bodenunruhe oder Mikroerschütterungen sind besonders von Interesse, da sie in Stadtgebieten angewendet werden können. Dort ist es aufgrund des Platzmangels für die Testeinrichtungen sowie dem Verbot des Einsatzes von Sprengstoffen generell nicht möglich, aktive Messungen durchzuführen.

Jede Messtechnik hat ihre Vor- und Nachteile. Die Reflexions-/Refraktionsseismik von S-Wellen erzeugt Raumwellen im Bereich > 30 Hz, die einerseits die Variation der Grenzschichten im Untergrund wiedergeben, andererseits aber in einem Frequenzband oberhalb des für Erdbeben interessanten Bereichs operieren, der bei der Erdbebenkunde angewandt wird. Zudem können die hochfrequenten Wellen von lateralen kleinräumigen Heterogenitäten beeinflusst werden, und die Geschwindigkeitsmessungen stimmen für Frequenzen kleiner 10 Hz nicht zwingend mit den S-Wellengeschwindigkeiten überein. Eines der Hauptprobleme der Reflexions/Refraktionsseismik von S-Wellen ist die Kopplung der Quelle an den Boden und die damit verbundene begrenzte Eindringtiefe der S-Wellen. Die Messtechniken innerhalb von Vertikalbohrungen erfordern selbst viel Zeit und sind zudem sehr kostspielig.

Die Spektralanalyse der Oberflächenwellen (SASW) setzt die Messung der Gruppen- und Phasengeschwindigkeit der Rayleigh-Wellen voraus, um die räumliche Ausbreitung der S-Wellengeschwindigkeit anhand von Dispersionskurven zu bestimmen. Die Rayleigh-Wellen werden durch vertikale Einwirkungen an der Bodenoberfläche erzeugt. Diese Methode weist ebenfalls eine begrenzte Eindringtiefe in der Grössenordnung von 20 bis 30 m auf. Generell können die tieferen Sedimente oder der Fels nicht berücksichtigt werden.

Wenn die Sedimentmächtigkeit bekannt ist, ermöglicht die H/V-Methode von Nakamura eine Abschätzung der mittleren S-Wellengeschwindigkeit der normalerweise konsolidierten Sedimente. Ausserdem kann die Kurvenform aus dem H/V-Verhältnis zur Abschätzung des S-Wellengeschwindigkeitsprofils verwendet werden. Yamanaka et al. (1994) und Satoh et al. (2001) haben diese Methode für tiefe Sedimentbecken angewendet, Fäh et al. (2001) für weniger tiefe Standorte. Die Methoden verwenden eine Auslage mit mehreren Messstationen und wurden von Horike (1985) nach vorausgehenden Arbeiten von Aki (1957) entwickelt. Diese Methoden beziehen sich auf die Eigenschaften der Dispersion von Oberflächenwellen und ermöglichen die Bestimmung des S-Wellengeschwindigkeitsprofils als Funktion der Inversion der Dispersionskurven. Die Geschwindigkeiten der S-Wellen können bis in eine Tiefe von mehreren Hundert Metern festgestellt werden.

4.4.2 Methoden für die Berücksichtigung des nicht-linearen Verhaltens

• linear-äquivalente 1D-Simulation:

Einige Softwareprogramme können die Nicht-Linearität des Bodens annäherungsweise berücksichtigen. Dies geschieht über die linear-äquivalente Approximation, die auf einem iterativen Verfahren beruht, mit welchem die Bodenparameter (Steifigkeit und Dämpfung) angepasst werden. Die Software SHAKE (Schnabel et al., 1972) ist dabei das am häufigsten für solche Modellierungen verwendete Programm (nur vertikaler Einfall).

• nicht-lineare 1D-Simulation:

In bestimmten Fällen, wenn die geotechnischen Daten ausreichend genau sind, empfiehlt sich die Berücksichtigung des vollständig nicht-linearen Verhaltens des Bodens und der Bodenverflüssigungsphänomene. Die Software CyberQuake (1998) ermöglicht beispielsweise solche Modellierungen. Es bleibt festzuhalten, dass meistens die Unzulänglichkeit der verfügbaren geotechnischen Daten dazu führt, dass relativ kostspielige mechanische Sondierungen und Laborversuche durchgeführt werden müssen.

4.4.3 Numerische Modellierungen

Die Wahl der für die Evaluation der Standorteffekte benötigten Methode hängt in der Praxis von mehreren Faktoren ab: Ausmass der Studie, Bedeutung der betroffenen Werte, verfügbare Daten, Aufbau des Untersuchungsgebiets, usw. Die Zielsetzung dieser Anleitung ist nicht die detaillierte Beschreibung der zahlreichen zur Verfügung stehenden Methoden,

sondern eher die Aufzählung mit den möglichen Besonderheiten ihrer Anwendungsbedingungen.

An dieser Stelle seien lediglich die am häufigsten verwendeten Methoden zitiert, für ein umfassenderes Inventar wird der Leser aufgefordert, sich auf die bestehende Literatur zu beziehen (Bard & Riepl-Thomas, 1999, Riepl-Thomas & Cotton, 1999). Tabelle 9 zeigt eine Zusammenfassung der näher beschriebenen Methoden. Die verschiedenen vorgeschlagenen Methoden können manchmal zu leicht unterschiedlichen oder widersprüchlichen Daten führen. Es obliegt somit dem Spezialisten, im Rahmen des Budgets die geeignetste(n) Methode(n) für den betrachteten Fall (je nach Anwendungsbereich und Grenzen) auszuwählen und nach Möglichkeit eine Sensitivitätsstudie durchzuführen.

Sind die geologischen und geotechnischen Eigenschaften des untersuchten Standorts hinreichend genau bekannt, kann das Ausmass der Standorteffekte durch numerische Modellierung evaluiert werden. Es gibt zahlreiche Methoden mit unterschiedlichem Entwicklungsgrad. An dieser Stelle zitieren wir die häufigsten. Die Wahl einer Methode muss von den Bedingungen des Standortgebiets (1D-, 2D- oder sogar 3D-Geometrie) sowie von der Genauigkeit der verfügbaren Daten abhängen. Selbst wenn eine vollständige Nicht-Linearität nicht notwendig erscheint oder aufgrund mangelnder Daten nicht ins Auge gefasst wird, empfehlen wir stattdessen, den Einfluss der Nicht-Linearität durch eine Berechnung nach der linear-äquivalenten Approximation zu evaluieren. Es bleibt an dieser Stelle festzuhalten, dass der Einfluss der Nicht-Linearität von Stoffen ein heftig diskutiertes Thema zwischen einigen Seismologen und der Vereinigung der Geotechniker bleibt.

• Eindimensionale (1D) Simulation:

Die eindimensionale (1D) Modellierung ist die einfachste und am wenigsten entwickelte der numerischen Methoden. Deshalb ist sie nicht für Fälle mit komplexer Geometrie (alpine Talkessel, Becken usw.) geeignet. 1D-Modelle werden dargestellt durch homogene, horizontal gelagerte Schichten. Das Ergebnis solcher Modelle wird für ein einfaches primäres (P) oder sekundäres (S) Wellenfeld berechnet, das senkrecht oder schräg einfällt. Höher entwickelte Modelle, wie die Methode der diskreten Wellenzahlen, ermöglichen die Berücksichtigung einer komplexeren Anregung.

• Zweidimensionale (2D) Simulation:

Bei komplexer Geometrie eines Standorts wird empfohlen, sich nicht ausschliesslich auf 1D-Modellierungen zu beschränken, die tendenziell zu einer Unterschätzung der effektiven Verstärkung am Standort führen. Alpine Täler stellen den typischen Fall für die erforderliche Anwendung einer 2D-Modellierung dar.

Diffraktionseffekte und durch multiple Reflexionen verursachte Effekte bei komplexer Geometrie werden von mehreren Methoden berücksichtigt. Unter anderem seien die Methode von Aki & Larner (1970), die von Fäh & Suhadolc (1994) entwickelte Methode, welche die Summation der Moden und finiten Differenzen kombiniert sowie die Methode der finiten Differenzen von Mozco & Bard (1993) genannt.

• Dreidimensionale (3D) Simulation:

Die Modellierung der Bodenbewegung in den 3D-Strukturen eines Sedimentbeckens wurde erst dank der Fortschritte bei den Rechenmethoden in der Informatik ermöglicht. Jedoch bleibt ihre Anwendung – aufgrund der hohen Anforderungen an die Speicherkapazität und mangelnder genauer Kenntnisse über die Heterogenität des dreidimensionalen geologischen Aufbaus des untersuchten Gebiets – Forschungsprojekten vorbehalten. Solche Methoden sind auf niedrige Frequenzen (maximal 1 bis 2 Hz) beschränkt. Die ersten 3D-Simulationen wurden im Rahmen der Beckenstudien von Los Angeles und Salt Lake in den Vereinigten Staaten durchgeführt (Olsen & Archuleta, 1996). In den Alpen wurde die Stadt Grenoble als Pilotstudie für die Anwendung solcher Methoden ausgewählt (Cotton et al., 1998).

4.4.4 Experimentelle Methoden

Bei den experimentellen Methoden gibt es zwei Hauptnachteile:

- Einerseits erfordern sie die Aufzeichnung realer seismischer Daten und setzen die Installation mehrerer seismischer Messstationen zur Registrierung von Erdbeben voraus. Da jedoch die Schweiz – je nach Region – ein Land mit schwacher bis mässiger Seismizität ist, sind solche Messkampagnen sehr langwierig und somit kostspielig, um genügende seismische Registrierungen zufriedenstellender Qualität zu erhalten (Signal/Rausch-Verhältnis usw.).

Methode	Typ	1D, 2D, 3D ?	Nicht-Linearität ?	Bemerkungen
Klassische Spektralverfahren	experimentell	je nach Registrierungs-standort	linear	Erdbebenregistrierungen (mit Referenzstandort)
Seismische H/V-Beziehungen	experimentell	je nach Registrierungs-standort	linear	Erdbebenregistrierungen
Linear-äquivalente Simulationen vom Typ SHAKE oder ähnlich	numerisch	1D	linear-äquivalent	Unzureichend bei ausgesprochenen 2D-Effekten
Nicht-lineare Simulation vom Typ CyberQuake oder ähnlich	numerisch	1D	nicht-linear	Kenntnis der Gesetzmässigkeiten zum nicht-linearen Verhalten erforderlich
2D-Simulationen vom Typ Aki-Larner (1970), Fäh-Suhadolc (1994) oder Moczo-Bard (1993) oder andere	numerisch	2D	linear oder linear-äquivalent	Hochschulprogramme kombiniert mit einer linear-äquivalenten Berechnung (falls nicht in der Methode integriert)
3D-Simulationen	numerisch	3D	linear	Hochschulentwicklung, Kenntnis der 3D-Struktur, begrenzt auf niedrige Frequenzen

Tabelle 10: Zusammenfassung der Evaluationsmethoden für Standorteffekte.

- Andererseits werden solche experimentelle Methoden der Nicht-Linearität der Bodenbewegung nicht gerecht. Tatsächlich beruhen diese Methoden auf Messungen aus der Registrierung schwacher Erdbeben. Daher kann oftmals nicht eindeutig bestimmt werden, bis zu welchem Einwirkungsniveau die Extrapolation der erhaltenen Verstärkungskurven möglich ist.

Im Folgenden wird das sogenannte «klassische Spektralverfahren» vorgestellt. Diese Methode beruht auf der Berechnung des Spektralverhältnisses zwischen den gleichzeitigen Registrierungen eines Erdbebens am Untersuchungsstandort und an einem sogenannten Referenzstandort, der sich auf anstehendem Fels befindet (Borcherdt, 1970). Die Hypothesen und Bedingungen, die bei der Anwendung dieser Methode beachtet werden müssen, sind: Geringer Abstand zwischen den beiden Stationen, Beschaffenheit des Felsuntergrunds an der Referenzstation, Verwendung mehrfacher Registrierungen sowie gutes Signal/Rausch-Verhältnis. Ökonomisch gesehen, ist diese Methode insbesondere in Gebieten mit schwacher Seismizität ziemlich kostspielig. Andererseits kann sie aber als die verlässlichste der experimentellen Methoden erachtet werden.

Sind registrierte seismische Daten, wenn auch in geringem Umfang, im Untersuchungsgebiet vorhanden, so sollten diese unbedingt zum Vergleich und zur Bewertung der aus den numerischen Simulationen erhaltenen Ergebnisse verwendet werden.

4.5 Beispiele für die spektrale Mikrozonierung

4.5.1 Beispiel: Region Brig-Visp

Der genaue Ablauf – von der Untersuchung bis zur Erstellung einer spektralen seismischen Mikrozonierungskarte und der damit verbundenen Antwortspektren – kann wie folgt beschrieben werden (diese Methode ist in der Region Visp angewendet worden, CREALP, 2000, sowie in Monthey, CREALP in Vorbereitung).

Bestimmung des regionalen Gefährdungsspektrums in «hartem» Fels

↓

Erstellung von S-Wellengeschwindigkeits- und Dichteprofilen

↓

Messung der Grundfrequenz in den oberflächennahen Böden

↓

Messung der S-Wellengeschwindigkeit in den obersten 30 Metern, SASW-Methode

↓

Erste Abschätzung der Standorteffekte für schwache Bewegungen durch numerische Simulation

↓

Vergleich mit Fundamentalfrequenzmessungen in oberflächennahen Böden

↓

Falls nötig, Anpassung des S-Wellengeschwindigkeitsprofils (für Werte, die nicht gemessen wurden)

↓

Auswahl des Bemessungsbebens für den Fels, welches das Spektrum der regionalen Gefährdung abdeckt

↓

Berechnung des Standorteffekts unter Berücksichtigung der Variation des Schermoduls in Abhängigkeit von der Deformation und den Unsicherheiten beim Parametersatz (Geometrie, Geschwindigkeiten, usw.)

↓

Auswahl der Beschleunigungsantwortspektren

↓

Erstellung von Karten, in denen die Bereiche mit gültigen Spektren definiert sind

Tabelle 11: Vorgehen zur Erstellung der Erdbebenmikrozonierung der Untersuchungsgebiete Brig, Visp und Monthey.

Das Vorgehen und die Arbeitsschritte dieser Studie sind systematisch in Tabelle 11 beschrieben.

Die Untersuchungsgebiete befinden sich in einem alpinen Talkessel. Im Rahmen dieser Studien wurden eindimensionale (1D) und zweidimensionale (2D) Simulationen durchgeführt. Die dafür verwendeten Verfahren werden in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben.

Für sämtliche dieser Simulationen stehen folgende drei Elemente im Vordergrund:

- Das S-Wellengeschwindigkeitsprofil des Untersuchungsstandorts;
- das nicht-lineare Verhalten der untersuchten Lockergesteinsschichten;
- eine seismische Bewegung an der Basis des Übergangs Sediment/Felsuntergrund.

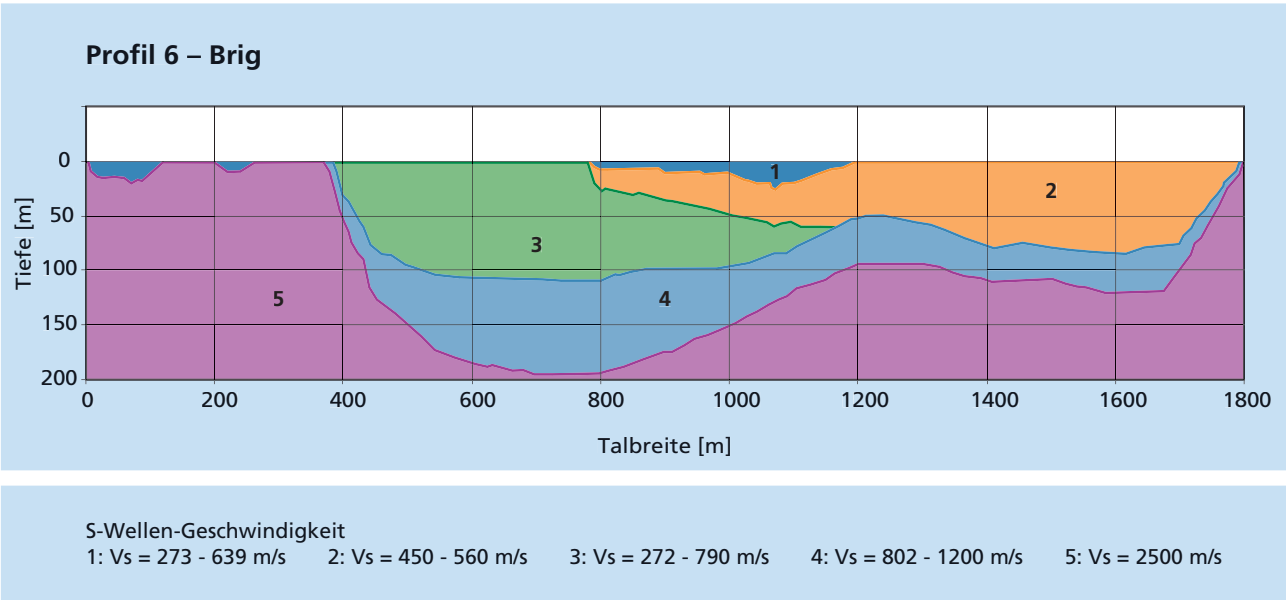
Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils:

Sofern das Untersuchungsgebiet nicht detailliert geotechnisch und geologisch untersucht wurde, gibt es nur wenige Daten zur Geologie oder zu den physikalischen Eigenschaften der Böden, für den tieferen Felsuntergrund sind solche sogar nicht vorhanden.

Zur Kompensation dieser mangelnden Informationen wurden parallel drei Studien realisiert, die eine bessere Abschätzung der geologischen und geotechnischen Eigenschaften des Standorts ermöglichen:

- Eine Kompilation der geologischen Daten
- seismische Oberflächenwellenprofile (SASW-Methode)
- eine Messkampagne der Fundamentalfrequenzen des Bodens (H/V-Verhältnis)

Die geologischen und hydrogeologischen Informationen werden aus der bestehenden Literatur systematisch recherchiert. Diese Informationen werden anschliessend in Form geologischer Profile synthetisiert (Figur 22).



Figur 22: S-Wellengeschwindigkeit in der Region Brig (CREALP/Résonance/Tissières 2001, unpubliziert, nachbearbeitet).

Die 1D-Simulation: Die Software CyberQuake:

CyberQuake ist eine Software, die 1997 von der Softwareabteilung des Bureau de Recherches Géologiques et Minières BRGM entwickelt wurde. Dieses Programm ermöglicht die Berechnung von Bodenbewegungen für eine vertikale Ausbreitung ebener Wellen in einer Bodensäule mit ebenen und horizontalen Schichten. Es simuliert die nicht-linearen Bewegungen des Bodens mit einer visko-elastischen linear-äquivalenten Approximation. Diese von Seed & Idriss in den 70er Jahren entwickelte Methode wird zur Simulation der Nicht-Linearität von Stoffen im Software-Programm SHAKE (Schnabel et al., 1972) verwendet.

An dieser Stelle sollen die relativen Daten zum mechanischen Verhalten verschiedener Schichten eingeführt werden. Diese umfassen die Entwicklung von Gleichungen, die für verschiedene Formationen den Schermodul und die Dämpfung mit der Deformation verbinden. Das Programm beginnt mit der erstmaligen Berechnung der vertikalen Ausbreitung in den verschiedenen horizontal gelagerten Schichten. Es berechnet die Deformation in den Schichten und passt entsprechend den Schermodul (G) und die Dämpfung (D) in Abhängigkeit vom Materialverhalten an, das zuvor im Programminput angegeben wurde (G-γ und D-γ). CyberQuake berechnet daraus neu die Wellenbewegung in diesen deformierten Schichten. Es rechnet auf diese Weise in mehreren Iterationen weiter, bis die Differenz zwischen der erhaltenen Deformation gleich der zuvor eingegebenen kleiner ist als ein fixierter Schwellenwert. Das Programm berechnet dann die Bodenbewegung an der Oberfläche anhand neuer geotechnischer Parameter, die bei der letzten Iteration bestimmt wurden.

Für schwache bis mässige Einwirkungen sind die mit CyberQuake erhaltenen Lösungen vergleichbar mit solchen aus höher entwickelten Modellen oder Beobachtungen im Gelände. Dennoch sind die aus dem linearen Modell erhaltenen Lösungen für den Fall eines ausgeprägten nicht-linearen Verhaltens nicht zufriedenstellend. Die vorliegende Studie war davon jedoch nicht betroffen.

2D-Simulation: Aki-Larner-Methode:

Für 2D-Simulationen wurde ein von P.-Y. Bard geschriebenes Programm verwendet. Dieses Programm basiert auf der so genannten Aki-Larner-Methode (1970).

Die Methode beruht auf der Auflösung der klassischen Wellengleichung in der Seismik. Diese Theorie betrachtet eine Überlagerung von horizontalen, homogenen, isotropen Schichten mit verschiedenen physikalischen Parametern im Halbraum. Mit dieser Methode kann die minimale Impulsantwort in 2D- oder 3D-Darstellung für eine eben einfallende Welle bestimmt werden.

Für dieses Programm gibt es mehrere Versionen. Bei der hier verwendeten Version sind die Grenzflächen zwischen den verschiedenen Schichten des sediment-

gefüllten Tals eben und horizontal. Einzig kann der Kontakt zwischen den Lockergesteinsablagerungen und dem Felsuntergrund eine beliebige Geometrie aufweisen.

Kombination von Simulationen und Messungen:

Das Verfahren für die numerischen Modellierungen lässt sich folgendermassen beschreiben:

- 2D-Berechnung für schwache Bewegungen (schwache Beben, linearer Fall)
- Angleichung der S-Wellengeschwindigkeiten (V_S), nicht gemessen, mithilfe der Nakamura-Messungen
- 1D-Berechnung für stark angepasste Bewegung (siehe Kapitel 4.4.3) mit dem Programm Cyber-Quake für verschiedene Vertikalprofile. Der in Annäherung bestimmte Einfluss der Nicht-Linearität lässt V_S erniedrigen und die Dämpfung erhöhen
- 2D-Berechnung für starke Bewegung (Starkbeben, Einfluss der Nicht-Linearität) durch Verwendung der beim vorherigen Schritt bestimmten Geschwindigkeiten und Dämpfungen
- Berechnung der elastischen Antwortspektren für die simulierten Beschleunigungsverläufe
- Berechnung der «Verstärkungsfunktionen» definiert als Beziehung zwischen den zuvor berechneten elastischen Antwortspektren und den elastischen Antwortspektren der Signale, die für die Simulation der Anregung verwendet wurden

Bemessungsbeben:

Die Berechnung der Erdbebengefährdung in der Schweiz wurde vom Schweizerischen Erdbebendienst 2003 (SED, 2003) vollständig aktualisiert. Die Werte der Spektralbeschleunigung für die Frequenzen 0.5, 1, 2, 3, 4, 10 und 12 Hz und für verschiedene Wiederkehrperioden werden für einen Boden der Klasse «harter Fels» angegeben, d. h. mit einer S-Wellengeschwindigkeit in der Grössenordnung von 1500 m/s.

Im Rahmen der neuen seismischen Mikrozonierungskarte der Swisscodes SIA 261 haben D. Fäh und T. Wenk die folgende Gleichung zur Bestimmung des Werts der Horizontalbeschleunigung a_{gd} im Boden für die Baugrundklasse A formuliert:

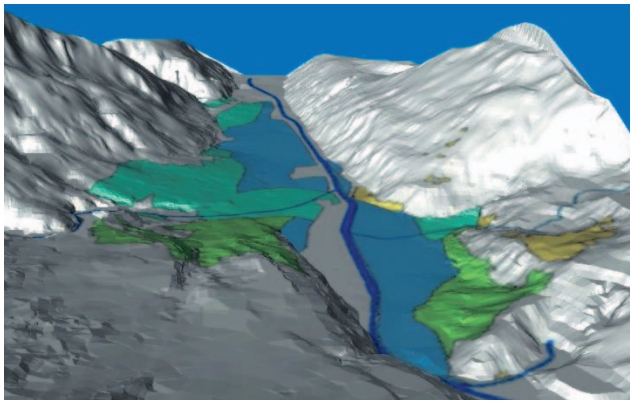
$$a_{gd} = \frac{3.5 \cdot S_a + 2.5 \cdot S'_a}{2} \cdot \frac{1}{2.5} \cdot \frac{1}{1.2}$$

Mit Sa: Spektralbeschleunigung bei 5 Hz, und S'_a: Spektralbeschleunigung bei 10 Hz, beide für den Fels SED (V_S = 1500 m/s).

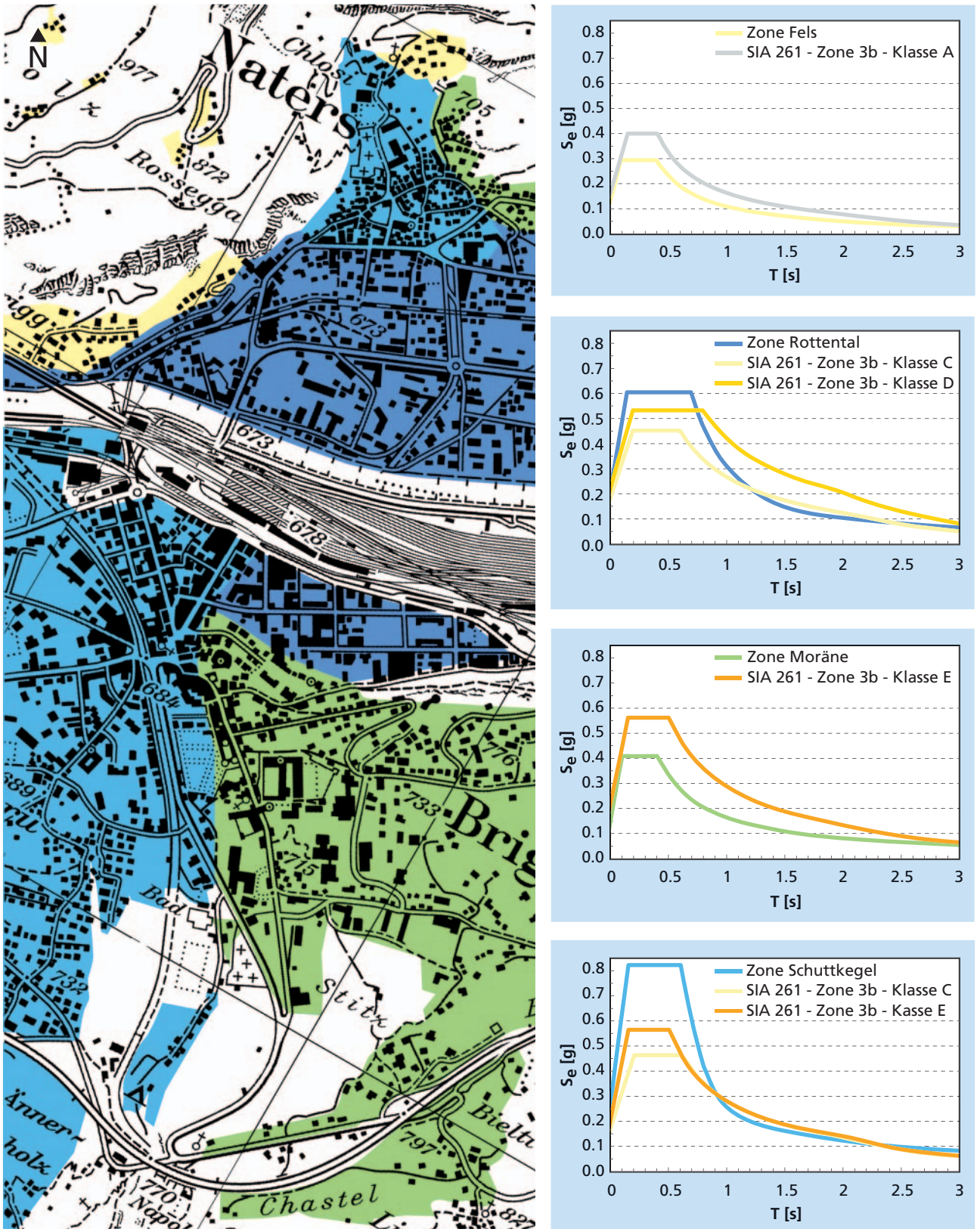
Für den «harten» Fels (V_S = 1500 m/s) haben wir ein Spektrum der Form des Swisscode-Spektrums SIA 261 Klasse A als Referenzantwortspektrum eines felsigen Standorts verwendet mit einem Plateauwert für die Spektralbeschleunigung, der gleich dem Mittelwert der Werte des SED für 5 Hz und 10 Hz ist. Dies führt zu einem Beschleunigungswert der Nullperiode:

$$a_o = \frac{S_a + S'_a}{2} \cdot \frac{1}{2.5}$$

Für die Berechnung der Standorteffekte werden Beschleunigungsverläufe ausgewählt, deren Spektren das gewählte Inputspektrum abdecken, um die Erdbebengefährdung des Felsuntergrunds an der Basis des Tragwerks zu berücksichtigen. Reale Beschleunigungsverläufe können aus der Datenbank «Internet-Site for European Strong-Motion Data» (Ambraseys et al., 2001) ausgewählt werden. Weitere Beschleunigungsverläufe können mit der von Sabetta & Pugliese (1996) entwickelten Software berechnet werden, mit der für ein bestimmtes Magnituden-Distanz-Paar sowie eine bestimmte Bodenklasse semi-künstliche Beschleunigungsverläufe generiert werden können. Diese Beschleunigungsverläufe werden als semi-künstlich bezeichnet, da sie im Gegensatz zu anderen Software-Programmen, wie SIMQKE, anhand realer seismischer Aufzeichnungen aus einer italienischen Datenbank generiert werden und dabei vor allem ein zeitlich variables Frequenzspektrum aufweisen, wie dies für reale Erdbeben der Fall ist.



Figur 23: Dreidimensionale Ansicht der Region Brig und spektrale seismische Mikrozonierungskarte (CREALP/Résonance/Tissières 2001, unpubliziert).



Figur 24: Ausschnitt der spektralen seismischen Mikrozonierungskarte der Region Brig. Vergleich der erhaltenen elastischen Antwortspektren mit denjenigen der SIA-Norm 261 für die Erdbeben-Gefährdungszone 3b und die betreffenden Baugrundklassen (CREALP / Résonance / Tissières 2001, unpubliziert).

Spektren und seismische Mikrozonierungskarte:

Mit den durchgeführten Simulationen wurde die Bestimmung von angepassten elastischen Antwortspektren möglich, welche die lokalen Spezifikationen, wie Art und Aufbau der Ablagerungen in einer bestimmten Region berücksichtigen. Bei der Auswahl der Spektren muss beachtet werden, dass ihre Form einfach bleibt und sich an den in der SIA-Norm 261 gewählten Spektralformen orientiert. Dabei ist es wichtig, dass ihre Verwendung einfach bleibt, damit die Ingenieure, die mit der Kontrolle oder der Dimensionierung von Bauwerken hinsichtlich der Erdbebenvorsorge betraut sind, diese einfach an Stelle der in der Norm enthaltenen elastischen Antwortspektren verwenden können.

Die Karte der spektralen seismischen Mikrozonierung selbst definiert die für die erhaltenen Antwortspektren gültigen Zonen. Auch dort bleibt die einfache Anwendung ein wichtiger Faktor. Deshalb haben wir uns auf ca. fünf Zonen beschränkt. Diese Zonen werden aufgrund der verfügbaren geologischen Informationen sowie der Resultate der numerischen Modellierungen bestimmt. Die Mikrozonierungskarte soll direkt verwendet werden, daher muss sie die definierten Zonen sowie die jeweiligen Antwortspektren klar kennzeichnen. Letztere sind grafisch oder analytisch dargestellt.

Die Figuren 23 und 24 zeigen als Beispiel eine dreidimensionale Ansicht und einen Auszug aus der spektralen seismischen Mikrozonierungskarte der Region Brig.

Die Figur 24 stellt zudem einen Vergleich der elastischen Antwortspektren aus der spektralen seismischen Mikrozonierung (lokale Spektren) mit denjenigen einer Mikrozonierung gemäss den Erdbebenrisikozonen und Baugrundklassen der SIA-Norm 261 (SIA-Spektren) dar.

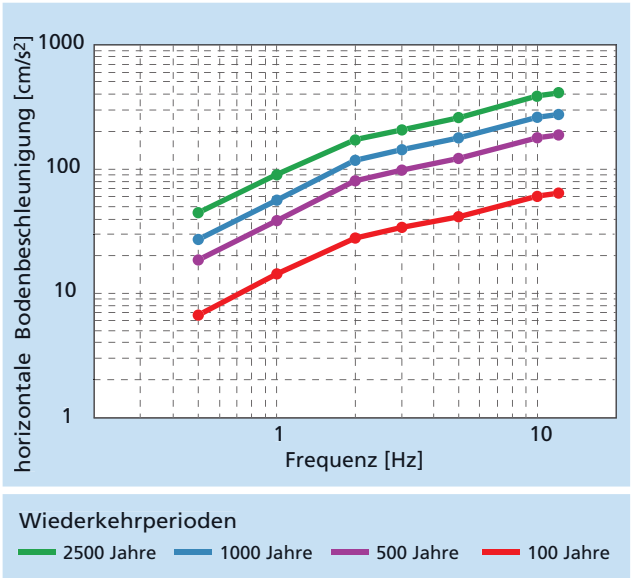
- Zone «Fels». Das lokale Spektrum ist geringfügig niedriger als das SIA-Spektrum für die betreffende Baugrundklasse (Klasse A).
- Zone «Moräne». Das lokale Spektrum ist deutlich niedriger als das SIA-Spektrum für die betreffende Baugrundklasse (Klasse E).
- Zone «Rottental» (Rhone-Ebene). Im konstanten Bereich der Spektren (Plateau) ist das lokale Spektrum etwas höher als die SIA-Spektren für die betreffenden Baugrundklassen (Klasse C oder D). Für den abfallenden Spektrumsbereich ist das SIA-Spektrum der Klasse C gleich dem lokalen Spektrum und das SIA-Spektrum der Klasse D höher als das lokale Spektrum.
- Zone «Schuttkegel». Das lokale Spektrum ist wesentlich höher als die SIA-Spektren für die betreffenden Bauwerksklassen (Klasse C oder D) bis zu einer Periode von ca. 1 s.

Dieser Vergleich zeigt, dass die spektrale seismische Mikrozonierung den Konservatismus der Normspektren nach Möglichkeit reduziert und sie die Zonen mit einem Verstärkungspotenzial identifiziert, für die eine Dimensionierung entsprechend strengerer Vorschriften als bei der SIA-Norm notwendig und gerechtfertigt ist.

4.5.2 Beispiel: Region Basel

Im Projekt «Erdbebenszenarien für die Schweiz» (Fäh & Giardini, 1998) wurde unter anderem eine Mikrozonierung der Stadt Basel durchgeführt (Kind, 2002; Kind et al., 2003). Diese ist die Weiterentwicklung der im Jahre 1997 publizierten qualitativen Mikrozonierung für Basel (Noack et al., 1997; Fäh et al., 1997).

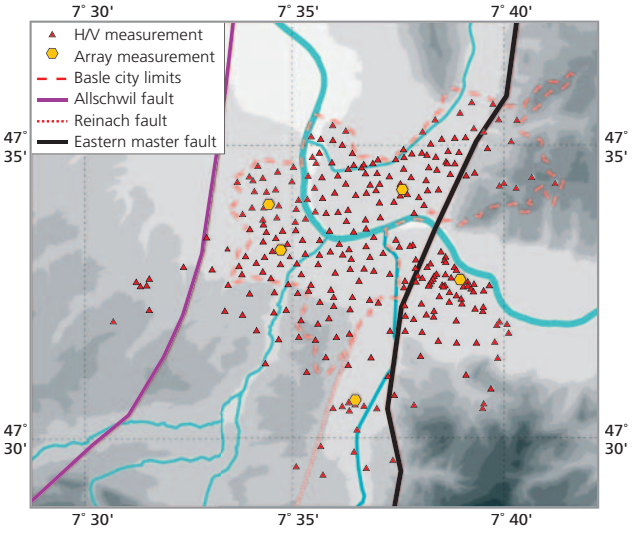
Den Ausgangspunkt bilden die Spektralwerte der horizontalen Bodenbeschleunigung bei verschiedenen Frequenzen zwischen 0.5 und 12 Hz für einen harten Fels und für verschiedene Wiederkehrperioden, wie dies für die Stadt Basel in Figur 25 dargestellt ist.



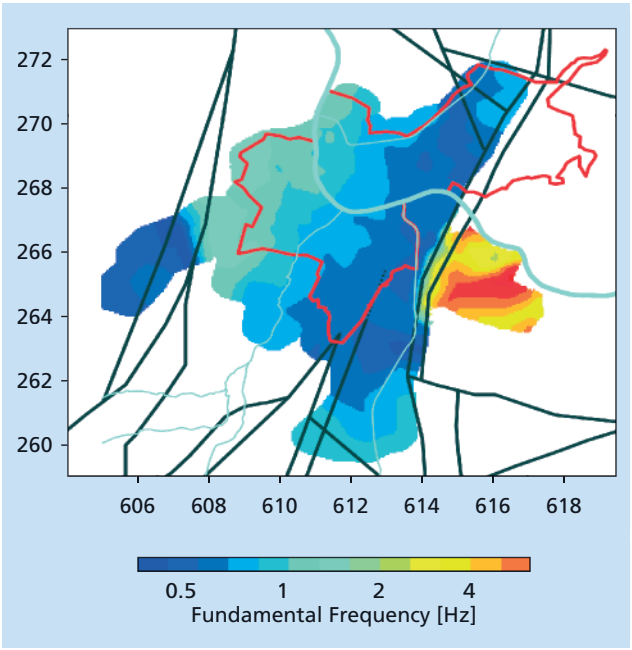
Figur 25: Antwortspektren für Basel und für verschiedene Wiederkehrperioden, gültig auf einem Felsuntergrund. Ausschnitt aus der Webseite des Schweizerischen Erdbebendienstes (nach http://histserver.ethz.ch/hazard, nachbearbeitet).

Aufgrund fehlender Starkbebenaufzeichnungen wurde für die Mikrozonierung der indirekte Weg über die Bestimmung der geophysikalischen Untergrundstruktur unter der Region Basel und die anschliessende numerische Modelierung der Verstärkung der Bodenbewegung gewählt. Ein Schwerpunkt der Arbeit war die Weiterentwicklung von kostengünstigen Methoden zur Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeit des Untergrunds. Es wurden Methoden entwickelt, die auf der Interpretation der natürlichen seismischen Bodenunruhe beruhen. Solche Methoden sind mit geringem finanziellem Aufwand verbunden und können auch innerhalb einer Stadt angewandt werden. Figur 26 zeigt die Standorte in der Region, an welchen Messungen vorgenommen wurden.

In einem ersten Schritt wurde eine Karte der fundamentalen Resonanzfrequenz des Untergrunds erstellt. Dazu wurde die H/V-Polarisationsanalyse der seismischen Bodenunruhe an über 250 Messpunkten angewandt. Die natürliche Bodenunruhe hat die Eigenschaft, dass das Wellenfeld im Bereich der Fundamentalfrequenz auf der horizontalen Komponente polarisiert wird. Damit ist es möglich, die Fundamentalfrequenz mit Hilfe einer einfachen Messung zu bestimmen.

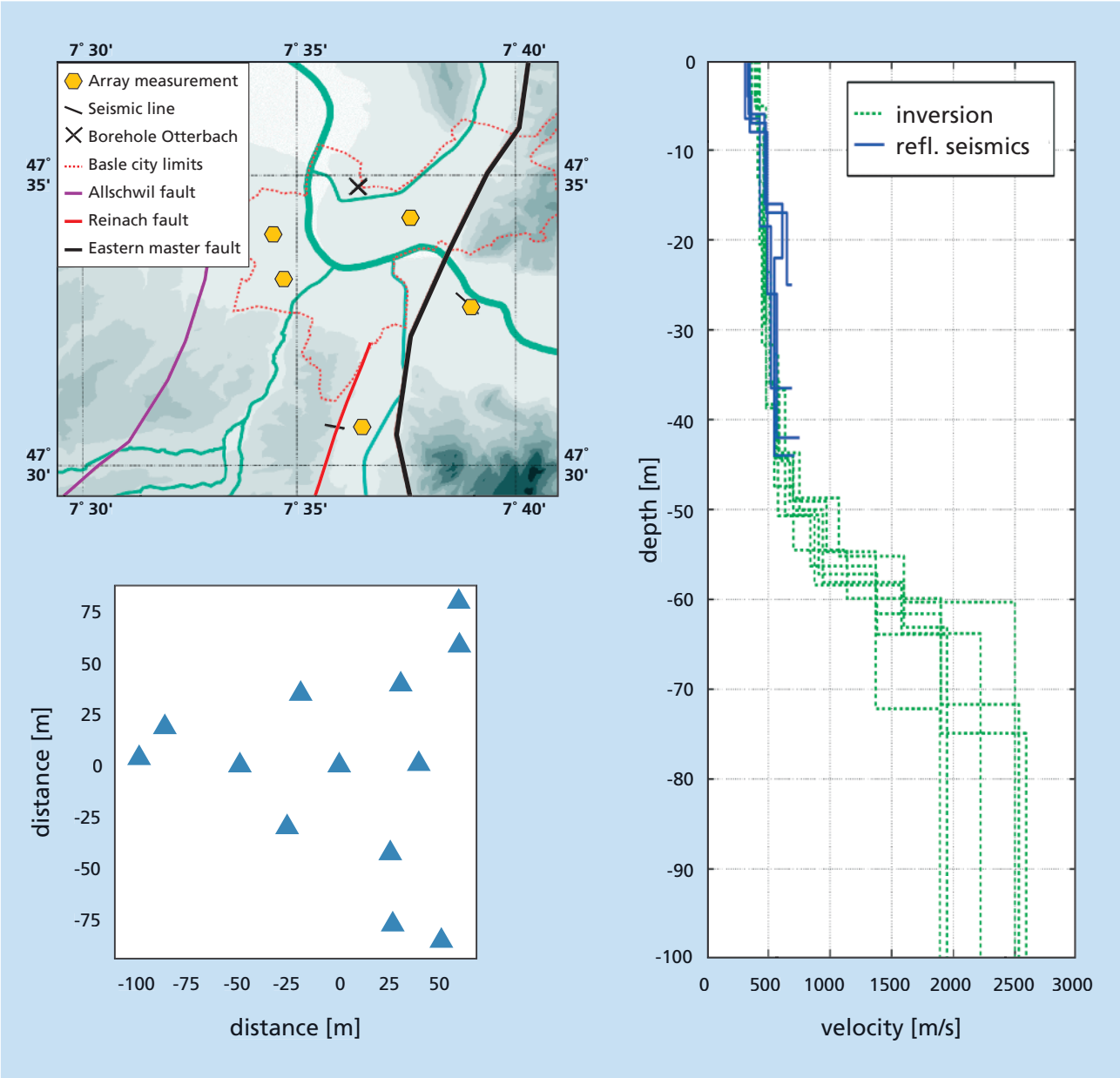


Figur 26: Übersicht über die Messpunkte in der Region Basel, an welchen Bodenunruhemessungen vorgenommen wurden (nach Kind, 2002, nachbearbeitet).



Figur 27: Fundamentalfrequenz der Lockersedimente in Basel. Bekannte Verwerfungen sind durch schwarze Linien gekennzeichnet, die Kantonsgrenze durch die roten Linien (Kind 2002; Kind et al., 2003).

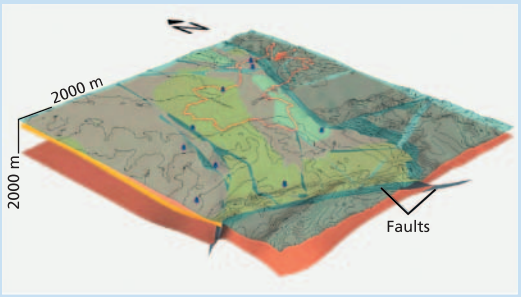
Die Hälfte der Fundamentalfrequenz gibt eine untere Grenze für denjenigen Frequenzbereich an, in welchem mit einer Verstärkung der Bodenbewegung während eines Erdbebens gerechnet werden muss. Bei der Fundamentalfrequenz ist die Verstärkung im Allgemeinen am grössten. Für höhere Frequenzen muss generell mit einer Verstärkung der seismischen Wellen gerechnet werden, deren Amplitude von der Schichtfolge der Lockersedimente abhängig ist. Die Fundamentalfrequenz ist daher schon für sich allein eine wichtige Grösse. Zudem ist die Fundamentalfrequenz mit der S-Wellengeschwindigkeit der Lockersedimente und der Tiefe des Felsgesteins verbunden. Durch Interpolation zwischen den Messpunkten ergibt sich eine Fundamentalfrequenzkarte (Figur 27). Innerhalb der Rheingrabenstruktur sind die Fundamentalfrequenzen sehr tief (0.4–1Hz), was auf weiche Sedimente bis in grosse Tiefen hindeutet. Ausserhalb des Rheingrabens ist die Fundamentalfrequenz grösser als 2 Hz.



Figur 28: Standorte für die Messung der Wellengeschwindigkeiten in Basel, typische Anordnung für eine Arraymessung und Ergebnis der Messungen am östlichsten Standort (nach Kind, 2002; Kind et al., 2003, nachbearbeitet).

In einem zweiten Schritt wurden S-Wellengeschwindigkeiten der Lockersedimente an fünf Standorten in und um die Stadt Basel gemessen. Scherwellen sind einer der kritischen Faktoren bei Standorteffekten, da Scherwellen bei lokalen Erdbeben die grösste Amplitude haben. Es wurde eine Methode verwendet, die auf der Auswertung der natürlichen Bodenunruhe innerhalb eines Miniarrays von Seismographen beruht (7–13 Instrumente, ungefähr 200 m Apertur).

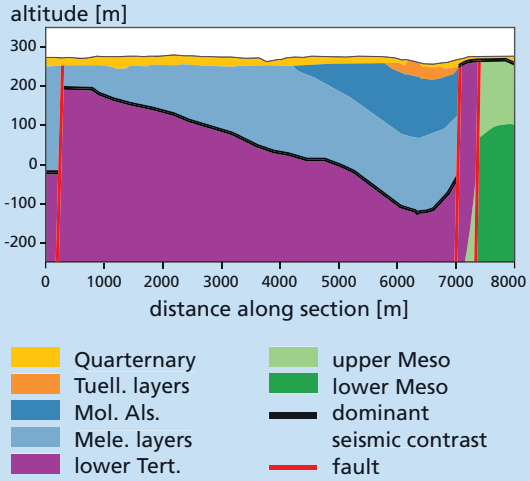
Die Resultate für die obersten hundert Meter ergaben S-Wellengeschwindigkeiten im Bereich 400–800 m/s für die weichen Sedimente des Rheingrabens. Die Entwicklung der Messmethode war Teil des Projekts. Figur 28 zeigt die Standorte der Arraymessungen. Im weiteren wurden zwei Profile mit Hilfe der S-Wellen-Reflexionsseismik untersucht. Für die Arbeit standen zudem P- und S-Wellengeschwindigkeiten für Fels im Geothermiebohrloch Otterbach zur Verfügung.



Zechner et al., 2001
Earth Sciences, University of Basel

layer	abreviation	p[kg/m^3]	V_p [m/s]	Q_p	V_s [m/s]	Q_s
Quarternary	QUA	1850	800^C (600-1000)	30	450^A (400-500)	15
Tüllinger layers	TUE	1850	2200^C (1000-2600)	50	725^A (650-900)	25
Molasse Alsacienne	ALS	1850	2200^D 2200-2800)	50	650^A (600-800)	25
Meletta layers	MEL	2000	1800^D 1400-2500)	50	600^A (450-700)	25
lower Tertiary/ first Meso-zoic	SAN	2350	3400^B (3200-3600)	125	2000^B (1800-2200)	50
upper Mesozoic	UPM	2550	4000^B (3600-4500)	125	2350^B (2150-2650)	50

^{A}Array measurement; ^{B}Borehole sonic log; ^{C}Reflection seismics; ^{D}Literature



depth [m]	V_s (MEL) [m/s]	V_s (ALS) [m/s]	V_s (TUE) [m/s]
25-50	600	575	650
50-75	600	675	850
75-100	600	725	925
100-150	650	775	1000
150-200	650	825	1025
200-250	700	850	1050
250-300	700	875	1075
300-350	750	900	1100
AV_{100}	600 (450-700)	650 (600-800)	725 (650-900)

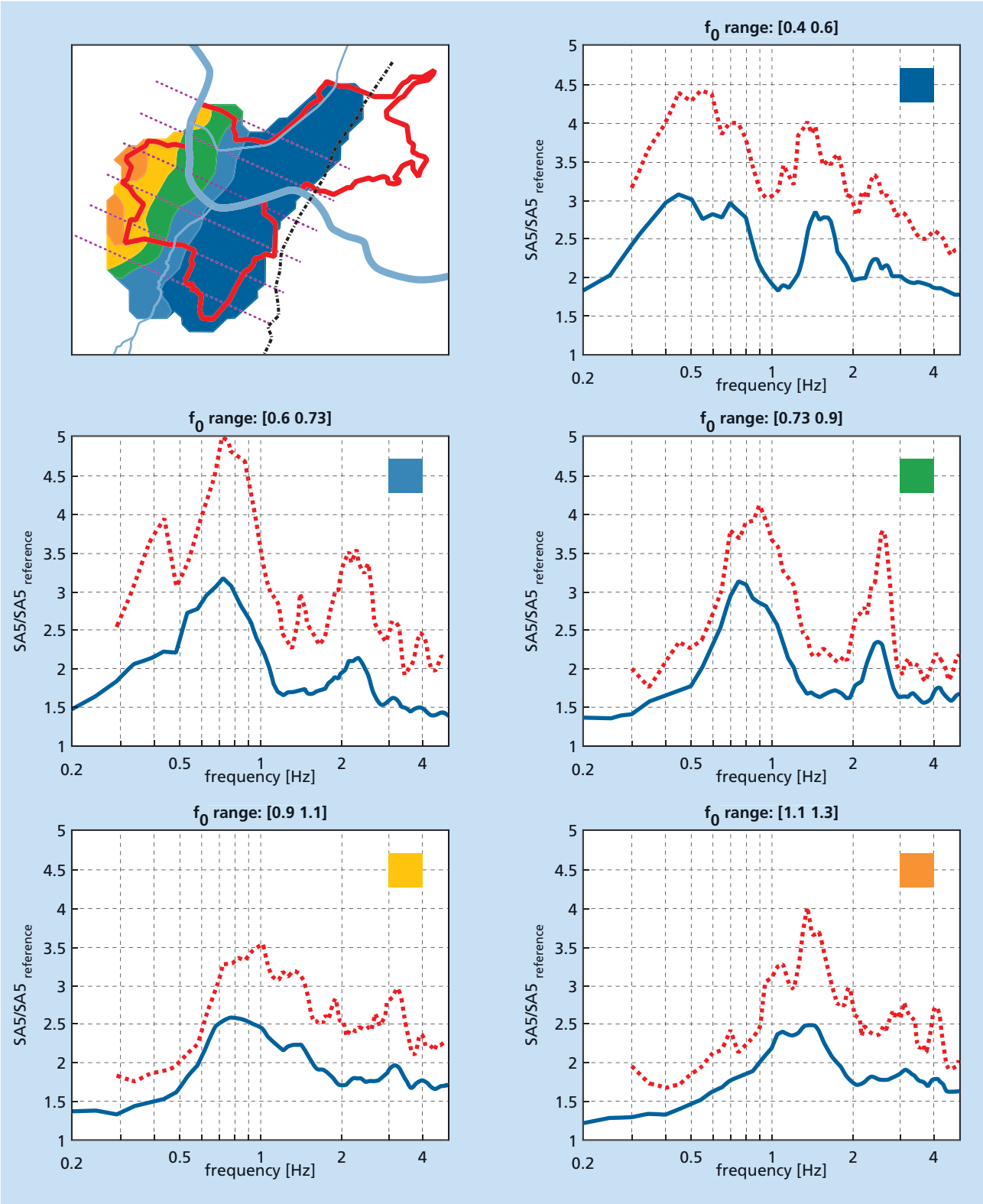
Figur 29: Resultierendes 3D-Modell, Schnitt durch das Modell von Westen nach Osten und physikalische Parameter und deren Unsicherheiten (nach Kind, 2002; Kind et al., 2003).

Die Kantonsgeologie der Universität Basel erarbeitete ein dreidimensionales Modell der Geometrie des Untergrundes (Zechner et al., 2003). Dies diente als Basis für ein geophysikalisches 3D-Modell welches die Messergebnisse, Bohrlochinformationen und geologischen Daten zusammenfasst.

Durch den Vergleich der errechneten Fundamentalfrequenzen aus dem ursprünglichen Modell und den gemessenen Werten konnten die Informationen zur Gesamttiefe der weichen Sedimente und damit der Geometrie des Modells verbessert werden (Figur 29).

Auf einer Anzahl von 2D-Sektionen aus dem Modell wurde dann eine Serie von Erdbeben in verschiedenen Distanzen, Tiefen und mit verschiedenen Herdmechanismen numerisch simuliert. Die verwendete Hybridmethode (Fäh & Suhadolc, 1994) erlaubt die Modellierung der seismischen Quelle und des Ausbreitungswegs in einem zweidimensionalen Modell. Das Materialverhalten ist linear-anelastisch, da bei den vorhandenen Lockersedimenten und dem angenommenen Gefährdungsniveau ein nicht-lineares Verhalten nur in wenigen Zonen der Region erwartet wird. Das Rechnen mit linearem Materialverhalten ist zudem konservativer als der nicht-lineare Fall.

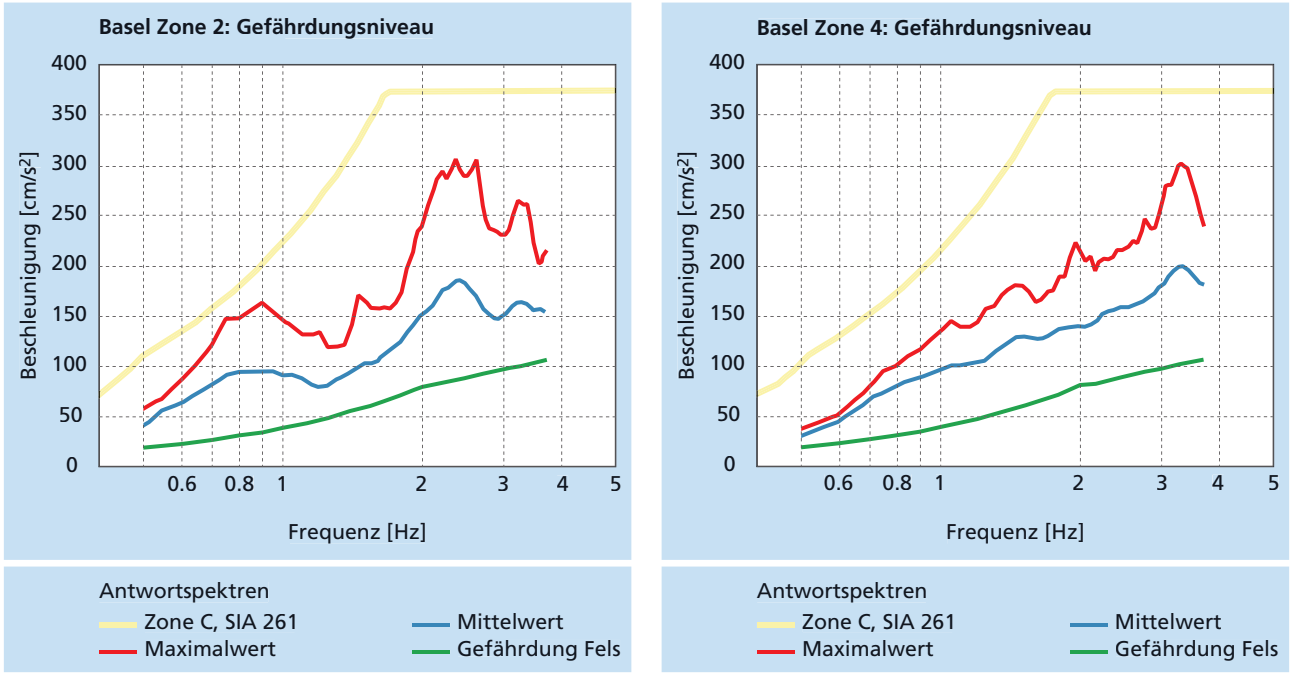
Durch den Vergleich mit der Modellierung auf einer Referenzstruktur (Felsuntergrund) wurde die spektrale Amplifikation der Bodenbewegung bestimmt (Antwortspektren mit 5 % Dämpfung). Anhand der Fundamentalfrequenz und der Ähnlichkeit der Amplifi-



Figur 30: Mikrozonierung der Stadt Basel: Spektrale Amplifikation in den fünf Zonen innerhalb der Stadt Basel (Kind, 2002; Kind et al., 2003). In der Karte sind die Umrisse der Stadt und die Gewässer dargestellt. Eine Strich-punktierte Linie bezeichnet den Rheingrabenrand. Die Lage der 2D Sektionen der Simulationen sind als gepunktete Linien eingezeichnet. Die Farben in den Flächen entsprechen den Farben der Amplifikationskurven. Bei den Amplifikationskurven wird jeweils die mittlere Amplifikation (blaue durchgezogene Linie) und die maximale Amplifikation (rote gestrichelte Linie) über eine Vielzahl von möglichen Erdbeben gezeigt.

kationskurven wurde die Stadt Basel schliesslich in fünf Zonen mit ähnlichem Verhalten bei einem Erdbeben eingeteilt. Die Definition der Zonen erfolgte aufgrund der Resonanzfrequenz der Lockersedimente. Figur 30 zeigt die erwartete mittlere und maximale Amplifikation in den verschiedenen Zonen.

Als letzter Schritt erfolgt die Bestimmung eines standortspezifischen Spektrums durch Multiplikation des Spektrums in Figur 25 mit den Amplifikationsfunktionen aus der Figur 30. Dies führt zu einer Definition eines elastischen Antwortspektrums unter Berücksichtigung der Unsicherheiten. Figur 31 zeigt das Beispiel für zwei Zonen und vergleicht die Spektren aus der spektralen Mikrozonierung mit den Antwortspektren der SIA 261-Norm. Da die Spektren der Norm mit konservativen Annahmen hergeleitet wurden, ist auch zu erwarten, dass die Werte der spektralen Mikrozonierung tiefer liegen.



Figur 31: Antwortspektren der Norm SIA 261 verglichen mit den Werten aus der spektralen Mikrozonierung für die Zone 2 (hellblaue Zone in Figur 5) und Zone 4 (orangefarbene Zone in Figur 30) (nach Fäh et al., 2004).

5. Rechtliche Aspekte der Mikrozonierung

5.1 Gefahrenkarten und Raumplanung

Die Mikrozonierungsstudien sind vergleichbar mit den Gefahrenkarten, die in der Schweiz für Lawinen, Hochwasser und Massenbewegungen erstellt werden. Mit der Mikrozonierung werden Zonen festgelegt, deren Böden sich im Erdbebenfall ungünstig verhalten, was spezielle Bauvorschriften bei Neu- oder Umbauten erforderlich macht.

Die seismische Mikrozonierung führt in der Schweiz zu keinem Bauverbot. Sie hat dagegen einen direkten Einfluss auf die Zonenpläne und Bauvorschriften. Aus diesem Grund ist es notwendig, je nach Interessen der Akteure sowie unterschiedlicher Bodennutzung, mehrere Beurteilungskriterien für die Erdbebengefährdung zu unterscheiden. Die seismische Mikrozonierung kann als ein Aspekt der vielfältigen «Naturgefahren» betrachtet werden, die in Art. 6 Abs. 2 Bst. c des Bundesgesetzes vom 22. Juni 1979 über die Raumplanung (RPG) erwähnt werden:

Art. 6 Abs. 2 Bst. c Raumplanungsgesetz

> Die Kantone stellen fest, welche Gebiete durch Naturgefahren oder schädliche Einwirkungen erheblich bedroht sind.
>
> Die Gesetzgebung über die Raumplanung ist in Art. 75 der Bundesverfassung (BV), verankert:

Art. 75 Bundesverfassung:

> Der Bund legt die Grundsätze der Raumplanung fest. Diese obliegt den Kantonen und dient der zweckmässigen und haushälterischen Nutzung des Bodens und der geordneten Besiedlung des Landes.

Der kantonale Richtplan ist ein Instrument der Raumplanung. Er dient der Koordination und der Vorsorge. Formal besteht er aus einer Karte mit Erläuterungen. Der Richtplan liefert richtungsweisende Festlegungen und Abstimmungsanweisungen. Er zeigt zudem die massgebliche planerische und räumliche Ausgangslage. Für den Bereich Naturgefahren kann der Richtplan mögliche Konflikte zwischen Nutzungen und Naturgefahren aufzeigen, einen Überblick über die bereits vorhandenen und die noch zu erstellenden Grundlagen (Gefahrenkarten) geben und Vorgaben für die nachstehenden Planungen, namentlich die kommunalen Nutzungsplanungen, machen.

Die Karte der Baugrundklassen (im Massstab 1 : 25'000) oder – falls vorhanden – auch die spektrale seismische Mikrozonierungskarte stellen bezüglich der Naturgefahr Erdbeben die zentralen Grundlagen des kantonalen Richtplans dar. Sie ermöglichen im Voraus den Nachweis potenzieller Konflikte zwischen einer Bodennutzung und den Standorteffekten in Zusammenhang mit der Erdbebengefährdung. Der kantonale Richtplan sollte ausserdem einen Gesamtüberblick über die vorhandenen grundlegenden Dokumente liefern und Aussagen enthalten über die im Kanton anzuwendenden Vorschriften zur

BZR-Artikel: Geologischen Gefahren ausgesetzte Gebiete

Erdbebengefahr

Die Erdbebengefährdungskarte der Schweiz zeigt, dass der gesamte Kanton einer mässigen Erdbebengefährdung ausgesetzt ist. Ein vorhandener Lockergesteinsgrund kann den Gefährdungsgrad noch erhöhen. Überall, wo ein solcher existiert, regelt die Hinweiskarte der seismischen Mikrozonierung (Karte der Baugrundklassen) mit den spezifischen Beschleunigungspektren die einzuleitenden Baumassnahmen zur Erdbebenvorsorge.

Beim Neubau oder Umbau hinsichtlich einer Erweiterung der Wohnfläche eines bestehenden Bauwerks – sind die Normen der Swisscodes 261 und folgende zu berücksichtigen. Für alle zwei- und mehrgeschossigen Gebäude (Wohnungen, Büros, Industriehallen, usw.) sind die Dimensionierung und die Projektpläne des Bauwerks von einem qualifizierten Bauingenieur zu kontrollieren und der zuständigen Behörde zur Genehmigung zu unterbreiten.

Bei Lifeline-Gebäuden (Spital, neuralgische Zentren, Feuerwehr-, Ambulanz- und Helikopterstützpunkte) und öffentlichen Gebäuden (Schulen, Schwimmbäder, Sportstadien, Theatersäle, grosse Einkaufszentren und Einrichtungen, die der Störfallverordnung StfV unterstellt sind) legt eine spektrale seismische Mikrozonierung das geeignete Beschleunigungssprektrum fest. Die Dimensionierung und Projektpläne des zu schützenden Bauwerks sind der zuständigen kantonalen Behörde zur Genehmigung zu unterbreiten.

Tabelle 12: Auszug aus einem kommunalen Bau- und Zonenreglement (BZR) für den Kanton Wallis (2003).

Erdbebenvorsorge und zu deren Umsetzung im Rahmen der kommunalen Nutzungsplanungen.

Die Nutzungsplanung sollte die in der Karte der Baugrundklassen vorgeschlagenen Zonen der Standorteffekte unbedingt beachten. Die Vorschriften zur Erdbebenvorsorge sind für die jeweiligen Zonen der Standorteffekte im kommunalen Bau- und Zonenregelment (Gemeindebaureglement) festzulegen (Tabelle 12, Beispiel Wallis), so dass sie für Behörden wie für Private verbindlich werden.

5.2 Aufgaben der Behörden, Auftragnehmer und Eigentümer

Der Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein (SIA) aktualisiert in seiner Eigenschaft als Berufsverband regelmässig seine technischen Empfehlungen (z. B. Swisscodes 2003), die so dem neuesten Stand der Kenntnisse und der Technik in der Baukunde angepasst werden. Die Normen werden von Experten erarbeitet und erfreuen sich einer grossen Nachfrage. Häufig sind sie Ausdruck der zu beachtenden Regeln der Baukunst und werden von den Gerichten entsprechend angewendet. Die Mehrzahl der Normen enthält jedoch eine Klausel, die Ausnahmen zulässt, sofern die gewählte Lösung zu einem gleichwertigen Resultat wie die in der Norm fixierte Vorschrift führt.

Die Berücksichtigung des Standorteffekts (Geologie und Topographie) zur Beurteilung der seismischen Einwirkung ist neu und wurde mit der SIA-Norm 261 «Einwirkung auf Tragwerke» (2003) eingeführt. Mit Hilfe einer Baugrundklasse und dem entsprechenden Antwortspektrum erlaubt die Mikrozonierung, ein Bauwerk so zu bemessen, dass die seismische Gefährdungszone und der Standorteffekt berücksichtigt sind.

Die seismische Mikrozonierung ist die lokale Ergänzung zu den Baunormen im Rahmen der Erdbebenvorsorge. Dies ist der Grund dafür, dass sie demselben Zweck dient wie sämtliche Baunormen: Der Sicherheit von Personen und Sachwerten. Die verschiedenen Akteure (Eigentümer, Architekt, Ingenieur, Gemeinde, Kanton und Bund) haben dabei verschiedene Aufgaben zu übernehmen.

Aufgaben der Behörden

Nach einem Entscheid des Bundesrats vom 11. Dezember 2000 sind die geltenden Normen der Erdbebenvorsorge von den Bundesbehörden zwingend zu beachten. So müssen:

> EDI, VBS, EFD und UVEK bei der Planung und Ausführung von neuen Anlagen des Bundes die bestehenden Erdbebenvorsorgenormen einhalten. Die entsprechenden Anforderungen müssen bereits bei der Ausschreibung formuliert werden.

Das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) präzisiert in einer Richtlinie vom 29. Mai 2000, dass:

> das UVEK lediglich Bauten und Anlagen unterstützt, welche bei der Planung konsequent die geltenden Normen der Erdbebenvorsorge einhalten.

Grundsätzlich ist es Sache jedes Kantons, im Rahmen seines Bau- und Planungsrechts die Beachtung der einschlägigen Vorschriften zur Erdbebenvorsorge zu verlangen und durchzusetzen. Als Beispiel können an dieser Stelle die Rechtsgrundlagen des Kantons Basel-Stadt zitiert werden:

Art. 59 Bau- und Planungsgesetz (BPG)

> Bauten und Anlagen müssen sicher sein. Sie müssen so konzipiert, erstellt, ausgestattet, betrieben und unterhalten werden, dass Menschen keinen vermeidbaren Gefahren ausgesetzt werden.

Art. 19 Bau- und Planungsverordnung (BPV)

> Wenn Gesetze und Verordnungen nichts anderes vorschreiben, müssen Bauten und Anlagen nach den anerkannten Regeln der Technik und der Baukunde erstellt, ausgestattet, betrieben und unterhalten werden. Das Bauinspektorat führt eine Liste der Normen und Richtlinien, die dem Stand der Technik und der Baukunde entsprechen.
> Es macht sie öffentlich zugänglich und gibt sie auf Verlangen ab.

Pflichten der Auftragnehmer (Architekten und Ingenieure)

Ingenieure und Architekten sind verpflichtet, bei ihrer Arbeit die anerkannten Regeln der Baukunde einzuhalten. Dazu kann gegebenenfalls auch die Beachtung von geologischen Standorteffekten gehören. Verletzen sie diese Pflicht, können sie strafrechtlich zur Verantwortung gezogen werden:

Art. 229 Strafgesetzbuch:

Wer vorsätzlich bei der Leitung oder Ausführung eines Bauwerkes oder eines Abbruches die anerkannten Regeln der Baukunde ausser Acht lässt und dadurch wissentlich Leib und Leben von Mitmenschen gefährdet, wird mit Gefängnis und mit Busse bestraft. Lässt der Täter die anerkannten Regeln der Baukunde fahrlässig ausser Acht, so ist die Strafe Gefängnis oder Busse.

Ingenieure und Architekten sind darüberhinaus gemäss Obligationenrecht verpflichtet, die Bauwerke entsprechend den Erwartungen der Kunden fachmännisch auszuführen. Wird die Anwendung der geltenden Vorschriften des SIA vertraglich vereinbart oder dem Kunden zugesichert, so müssen die Standorteffekte bei neuen Bauwerken berücksichtigt werden, sollen diese mängelfrei erstellt sein.

Die Berücksichtigung der Standorteffekte, welche die Anwendung der Grundsätze für die Erdbebensicherheitsbemessung von Gebäuden vervollständigt (Bachmann, 2002), wird für Ingenieure und Architekten bei den Vorstudien und den Projektstudien (neue Bauwerke oder Um- und Ausbau bestehender Bauwerke) durch Hinzuziehen der Karte der Baugrundklassen und der spektralen Mikrozonierungskarten mit ihren jeweiligen Spektren deutlich erleichtert.

Die Berücksichtigung des Standorteffekts (Mikrozonierung) ist in der Verwendungsvereinbarung (SIA 260) zwischen dem Bauleiter und seinen Auftragnehmern aufgeführt und ist Teil der Projektgrundlagen. Diese Studien greifen somit in den Prozess der Projektierungsphase von Bauten hinsichtlich der Erdbebeneinwirkung vor der öffentlichen Ausschreibung ein.
Die Kontrolle der Erdbebensicherheitsmassnahmen auf der Baustelle bei der Realisierung des Projekts kann durch Beizug der Mikrozonierungskarten vereinfacht werden, die ausserdem Zusatzinformationen über die Baugrundqualität in Form von geotechnischen Eigenschaften enthalten.

Haftung des Eigentümers eines Bauwerks

Der Eigentümer eines Bauwerks kann aufgrund von Artikel 58 des Obligationenrechts allenfalls haften, wenn eine Baute durch Nichtbeachtung der Standorteffekte fehlerhaft dimensioniert wurde und dadurch ein Schaden verursacht wurde:

Art. 58 Obligationenrecht

Der Eigentümer eines Gebäudes oder eines anderen Werkes hat den Schaden zu ersetzen, den diese infolge von fehlerhafter Anlage oder Herstellung oder von mangelhafter Unterhaltung verursachen. Vorbehalten bleibt ihm der Rückgriff auf andere, die ihm hierfür verantwortlich sind.

Anhang A: Fachbegriffe

Antwortspektrum: Grafik, welche die maximale Horizontalbeschleunigung des gesamten möglichen einfachen statischen Systems in einem bestimmten Beschleunigungsverlauf darstellt, s. auch Anhang C.

Baugrundklasse: Die Norm SIA 261 definiert sechs Baugrundklassen, die für die in der Schweiz angetroffenen geologischen Verhältnisse repräsentativ sind. Diese Klassen werden bei der qualitativen Mikrozonierung berücksichtigt.

Bemessungsbeben: In den numerischen Simulationen für die spektrale Mikrozonierung berücksichtigtes Erdbeben. Dafür wird ein Beben ausgewählt, dessen Magnitude, Dauer, Epizentraldistanz und Herdtiefe für ein bestimmtes tektonisches Szenarium wahrscheinlich sind.

Beschleunigungsverlauf: Während eines Erdbebens instrumentell bestimmte Änderung der Bodenbeschleunigung, die als Funktion der Zeit dargestellt wird.

Bodenbeschleunigung: Zyklische Änderung der Bodengeschwindigkeit im Verlauf eines Erdbebens. Der Wert der Horizontalbeschleunigung ist generell höher als derjenige der Vertikalbeschleunigung und führt zu grösseren Bauwerksschäden.

Bodenverflüssigung: Durch ein Erdbeben induzierte momentane Erscheinung, die zu einem Totalverlust der Tragfähigkeit eines Lockergesteinsuntergrunds führt. Betrifft prinzipiell wassergesättigte und wenig verfestigte Sande und Silte.

Eintretenswahrscheinlichkeit: Wahrscheinlichkeit, mit der ein seismisches Ereignis einer bestimmten Intensität oder Magnitude an einem bestimmten Ort und in einem bestimmten Zeitintervall auftritt.

Epizentrum: Vertikale Projektion des Hypozentrums eines Bebens an die Oberfläche.

Erdbebengefährdung: Gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Erdbebenereignis einer gewissen Stärke in einem bestimmten Gebiet mit einer definierten Wiederkehrperiode auftritt. Sie wird statistisch auf Grundlage sämtlicher aufgezeichneter historischer Erdbeben ermittelt.

Erdbebenrisiko: Grösse, die im Allgemeinen in Millionen Franken pro Jahr angegeben wird und das Produkt aus seismischer Gefährdung und Wert der betroffenen Sachgüter sowie deren Verletzbarkeit darstellt.

Erdbebensignal (seismisches Signal): Genereller Ausdruck für das Frequenzspektrum, die Amplitude und Dauer einer seismischen Welle.

Erdbebenvorsorge: (auf Englisch: mitigation) bezeichnet die zu unternehmenden Handlungen aus Sicht der Verminderung der Auswirkungen eines Erdbebenereignisses.

Fundamentalfrequenz: «Natürliche» Schwingungsfrequenz eines Bodens oder eines Tragwerks mit maximaler Schwingungsamplitude.

Geschwindigkeitsprofil: Vertikalschnitt durch den Untergrund, der die Variabilität des Betrags der Scherwellengeschwindigkeit (S-Wellen) als Funktion der Tiefe angibt.

Hypozentrum (oder Erdbebenherd): Exakte Lokalisierung des erdbebenverursachenden Bruchs in der Tiefe und der Quelle der Ausbreitung der seismischen Wellen.

Impedanz: Physikalische Grösse, die einen Stoff als Produkt aus Dichte und Geschwindigkeit der Wellen, die ihn durchlaufen charakterisiert. Oft ist die Rede vom Impedanzkontrast zwischen zwei Stoffen, an deren Grenzfläche die durchquerenden Erdbebenwellen reflektiert und refraktiert werden.

Indikative Mikrozonierung: Vorläufiger Kartierungsschritt einer vollständigen Mikrozonierung, bei dem ein Gebiet im Massstab 1: 25'000 in die Baugrundklassen der Norm SIA 261 unterteilt wird.

Induzierte Effekte: Prozesse, wie Massenverlagerung, Bodenverflüssigung oder Thixotropie, die bei einem Erdbeben ausgelöst werden.

Intensität (MSK, EMS-98): Grösse zur Beschreibung der Erdbebenstärke 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 MSK- und EMS-98-Skalen werden am häufigsten verwendet.

Linear-äquivalent: Lineare Näherung an das nichtlineare Verhalten von Böden. Diese impliziert insbesondere, dass die Verstärkung des Erdbebensignals bei einem Lockergestein bezüglich des Signals im Fels proportional kleiner für die grossen als für die kleinen Belastungen ist.

Magnitude (nach Richter): Durch C.F. Richter eingeführte Grösse, mit der die an einer seismischen Quelle (Erdbebenherd) freigesetzte Energie auf einer offenen logarithmischen Skala bestimmt wird. Die entsprechenden Werte schwanken üblicherweise zwischen 1 und 9. Die Erhöhung der Magnitude um eine Grösseneinheit entspricht etwa der Freisetzung von 30-mal mehr Energie.

Nicht-lineares Verhalten: Änderung der bodenmechanischen Eigenschaften eines Baugrunds durch Einwirkung eines starken Bebens, die sich durch eine Verringerung der S-Wellengeschwindigkeit sowie Fundamentalfrequenz äussert.

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

Repräsentative Beschleunigung: Entspricht einem Anteil der Spitzenbeschleunigungswerte im für die häufigsten Bauwerke relevanten Frequenzbereich.

Seismische Makrozonierung: Kartierung im grossen Massstab zur Ausscheidung der verschiedenen Erdbebengefährdungszonen eines Lands oder einer bestimmten Region. Manchmal vereinfacht auch «seismische Zonierung» genannt.

Seismische Mikrozonierung nach SIA 261: Kartographische Stufe einer vollständigen Mikrozonierung, welche das Gebiet im Massstab 1: 25'000 in die Baugrundklassen nach Norm SIA 261 unterteilt.

Seismische Zonierung: Kartierung in grossem Massstab, bei der ein Gebiet in unterschiedliche Erdbebengefährdungszonen unterteilt wird.

Spektrale seismische Mikrozonierung: Untersuchungen mit dem Ziel der Quantifizierung der lokalen Standorteffekte durch Berechnung der standortspezifischen elastischen Antwortspektren. Dabei wird zwischen punktuellen Mikrozonierungsstudien (für ein einzelnes Gebäude) und spektralen Mikrozonierungskarten (für ein bestimmtes Gebiet) unterschieden.

Spitzenbeschleunigung: Wert der Maximalbeschleunigung aus einem Beschleunigungsverlauf, im Englischen so genannte peak ground acceleration (PGA).

Standorteffekt(e): Geologische, topographische und geometrische Verhältnisse, die im Wesentlichen zu einer Änderung des einfallenden Erdbebensignals (Verstärkung oder Abminderung) beitragen.

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

Triaxialversuch: Labormessung, mit der die mechanischen Eigenschaften einer Probe bestimmt werden. Unter allseitiger Belastung wird die Probe kontinuierlich deformiert, bis es zum Bruch kommt.

Verletzbarkeit: Qualitative oder quantitative Abschätzung der Schadensanfälligkeit eines oder mehrerer Gebäude desselben Typs für Erdbeben unterschiedlicher Stärke (i. A. schwach, mässig oder stark). Sie kann als Prozentsatz der Baukosten oder auf einer Skala zwischen 0 (keine Beschädigung) und 1 (Totalverlust) angegeben werden.

Wert (Betroffene Werte): Bezeichnet Personen, Sachwerte und Aktivitäten, die von einem Naturereignis bedroht werden können.

Wiederkehrperiode: Zeitintervall, das zwischen zwei Erdbebenereignissen derselben Intensität oder Magnitude liegt.

Anhang B: Intensitätsskala EMS-98

EMS Intensität	Definition	Beschreibung der beobachteten typischen Wirkungen (zusammengefasst)
I	Nicht fühlbar	Nicht fühlbar.
II	Kaum bemerkbar	Nur sehr vereinzelt von ruhenden Personen wahrgenommen.
III	Schwach	Von wenigen Personen in Gebäuden wahrgenommen. Ruhende Personen fühlen ein leichtes Schwingen oder Erschüttern.
IV	Deutlich	Im Freien vereinzelt, in Gebäuden von vielen Personen wahrgenommen. Einige Schlafende erwachen. Geschirr und Fenster klirren, Türen klappern.
V	Stark	Im Freien von wenigen, in Gebäuden von den meisten Personen wahrgenommen. Viele Schlafende erwachen. Wenige sind verängstigt. Gebäude werden insgesamt erschüttert. Hängende Gegenstände pendeln stark, kleine Gegenstände werden verschoben. Türen und Fenster schlagen auf oder zu.
VI	Leichte Gebäudeschäden	Viele Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Einige Gegenstände fallen um. An vielen Häusern, vornehmlich in schlechterem Zustand, entstehen leichte Schäden wie feine Mauerrisse und das Abfallen von z. B. kleinen Verputzteilen.
VII	Gebäudeschäden	Die meisten Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Möbel werden verschoben. Gegenstände fallen in grossen Mengen aus Regalen. An vielen Häusern solider Bauart treten mässige Schäden auf (kleine Mauerrisse, Abfall von Putz, Herabfallen von Schornsteinteilen). Vornehmlich Gebäude in schlechterem Zustand zeigen grössere Mauerrisse und Einsturz von Zwischenwänden.
VIII	Schwere Gebäudeschäden	Viele Personen verlieren das Gleichgewicht. An vielen Gebäuden einfacher Bausubstanz treten schwere Schäden auf, d. h. Giebelteile und Dachgesimse stürzen ein. Einige Gebäude sehr einfacher Bauart stürzen ein.
IX	Zerstörend	Allgemeine Panik unter den Betroffenen. Sogar gut gebaute gewöhnliche Bauten zeigen sehr schwere Schäden und teilweisen Einsturz tragender Bauteile. Viele schwächere Bauten stürzen ein.
X	Sehr zerstörend	Viele gut gebaute Häuser werden zerstört oder erleiden schwere Beschädigungen.
XI	Verwüstend	Die meisten Bauwerke, selbst einige mit gutem erdbebengerechtem Konstruktionsentwurf und guter Konstruktionsausführung, werden zerstört.
XII	Vollständig verwüstend	Nahezu alle Konstruktionen werden zerstört.

Beschreibung der verschiedenen Stufen der Intensitätsskala EMS-98.

Anhang C: Definition und Verwendung von Antwortspektren

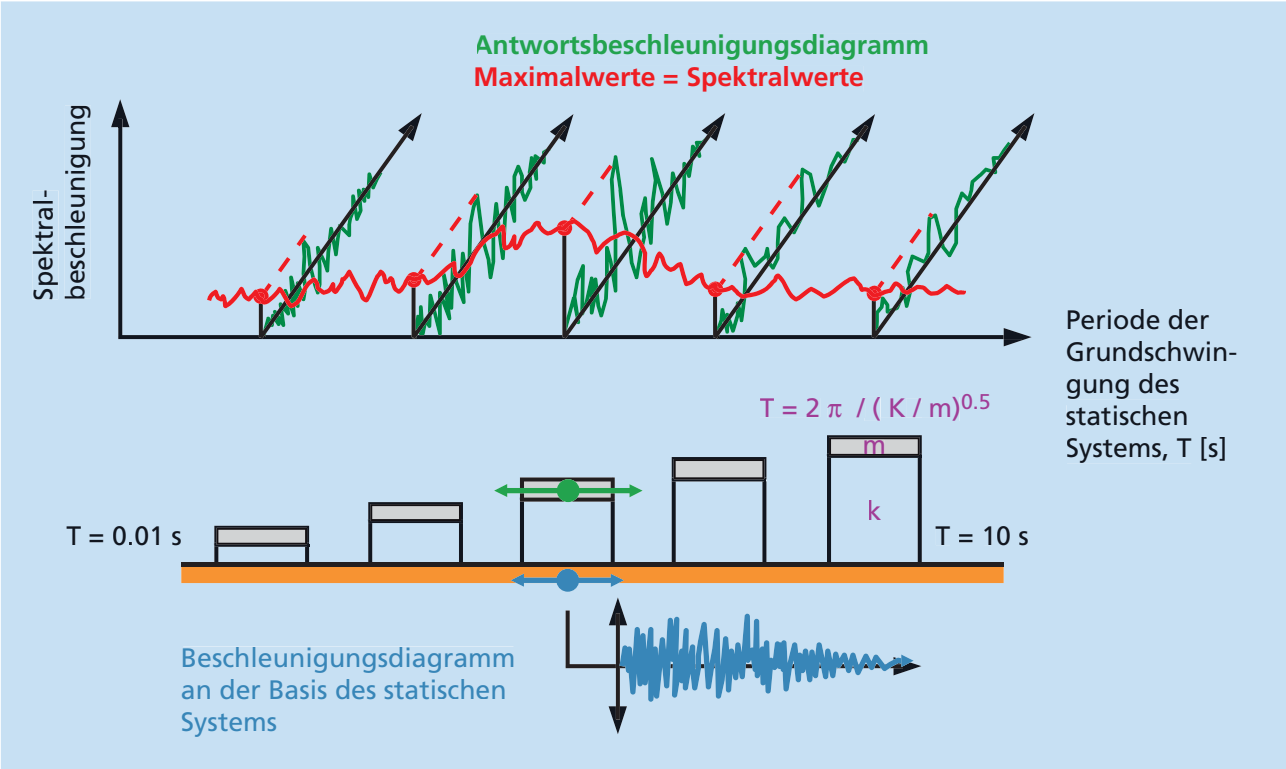
Elastische Antwortspektren

Der Begriff des elastischen Antwortspektrums wurde 1932 durch M.A. Biot als praktisches Instrument zur Charakterisierung von Bodenbewegungen und deren Einwirkungen auf Bauwerke eingeführt.

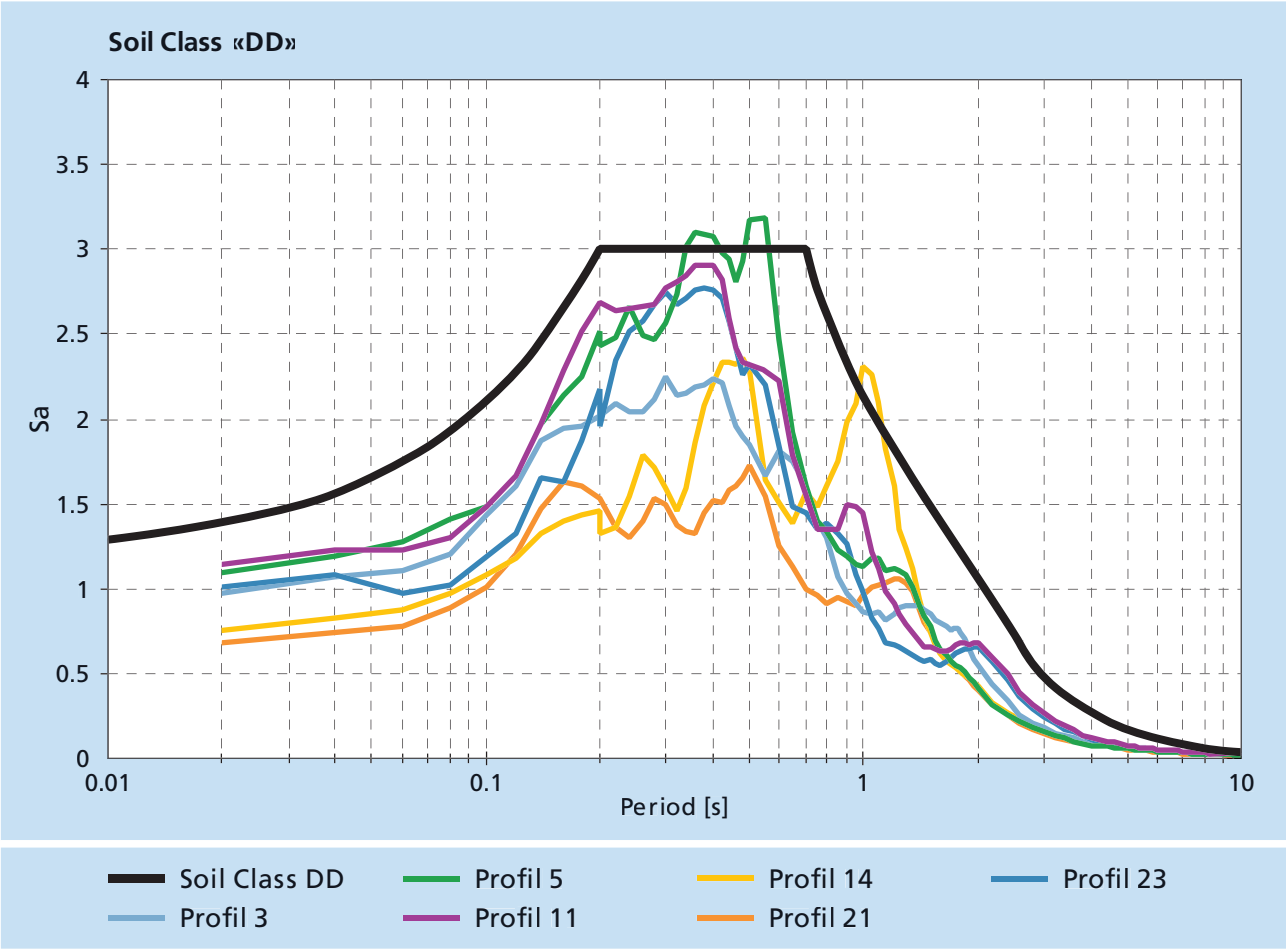
Das elastische Antwortspektrum bildet ein zentrales Instrument beim Erdbebeningenieurwesen. Es ermöglicht die Zusammenfassung zu einer Maximalantwort (bezüglich Versetzung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung), welche ein beliebiges Einmassenschwingersystem erfährt, das einem bestimmten Beschleunigungsverlauf unterliegt.

Am häufigsten wird das elastische Beschleunigungsantwortspektrum verwendet. In geglätteter Form und analytisch in den Baunormen definiert, stellt es die seismische Gefährdung dar und dient als Basis für die Erstellung des Bemessungsspektrums. Letzteres bestimmt die seismischen Einwirkungen für die Bemessung der Strukturen.

Die Erstellung eines elastischen Beschleunigungsantwortspektrums ist schematisch in Figur C1 dargestellt. Ein Beschleunigungsverlauf wird auf eine Reihe von linearen Einmassenschwingersystemen mit 5 % viskoser Dämpfung angewendet. Während dieser Anregung wird die Maximalbeschleunigung der Masse für jedes System bestimmt. Dabei handelt es sich um die elastische Spektralbeschleunigung für die Fundamentalperiode des Systems. Die Serie von Einmassenschwingersystemen deckt dabei die gesamte interessierende Bandbreite der Fundamentalperiode (i. A. von 0.01 bis 10 s) ab. Auf diese Weise wird das Antwortspektrum Punkt für Punkt konstruiert. Das Vorgehen



Figur C1: Schema der Erstellung eines Antwortspektrums.
Zur Definition eines normierten elastischen Antwortspektrums müssen elastische Antwortspektren für mehrere Zeitverläufe erstellt werden, welche die Variabilität der Erdbebengefährdung des gewünschten Studiengebietes darstellen. In Abhängigkeit von der Variabilität der Ergebnisse wird für die berechneten Antwortspektren eine umhüllende und analytisch definierte Glättungskurve ausgewählt (siehe Figur C2).



Figur C2: Idealisierte Umhüllende des elastischen Beschleunigungsantwortspektrums anhand von mittleren elastischen Antwortspektren, die für 6 Standorte mit einer vergleichsweise ähnlichen Geologie (bezeichnet als Klasse DD) bestimmt wurden. Für jeden Standort wurde das elastische Antwortspektrum als Mittelwert von 8 elastischen Antwortspektren berechnet, die durch 8 verschiedene Beschleunigungsverläufe generiert wurden. Quelle: Löw et al., 2002.

ist analog für die Bestimmung der elastischen Versetzungs- und Geschwindigkeitsantwortspektren.

Figur C2 zeigt die Variabilität der möglichen Spektralwerte für bestimmte Zustände (Gefährdungszone und Baugrundklasse) sowie die Wahl der normierten Spektren, mit denen man sich auf der sicheren Seite bewegt.

Bemessungsantwortspektren

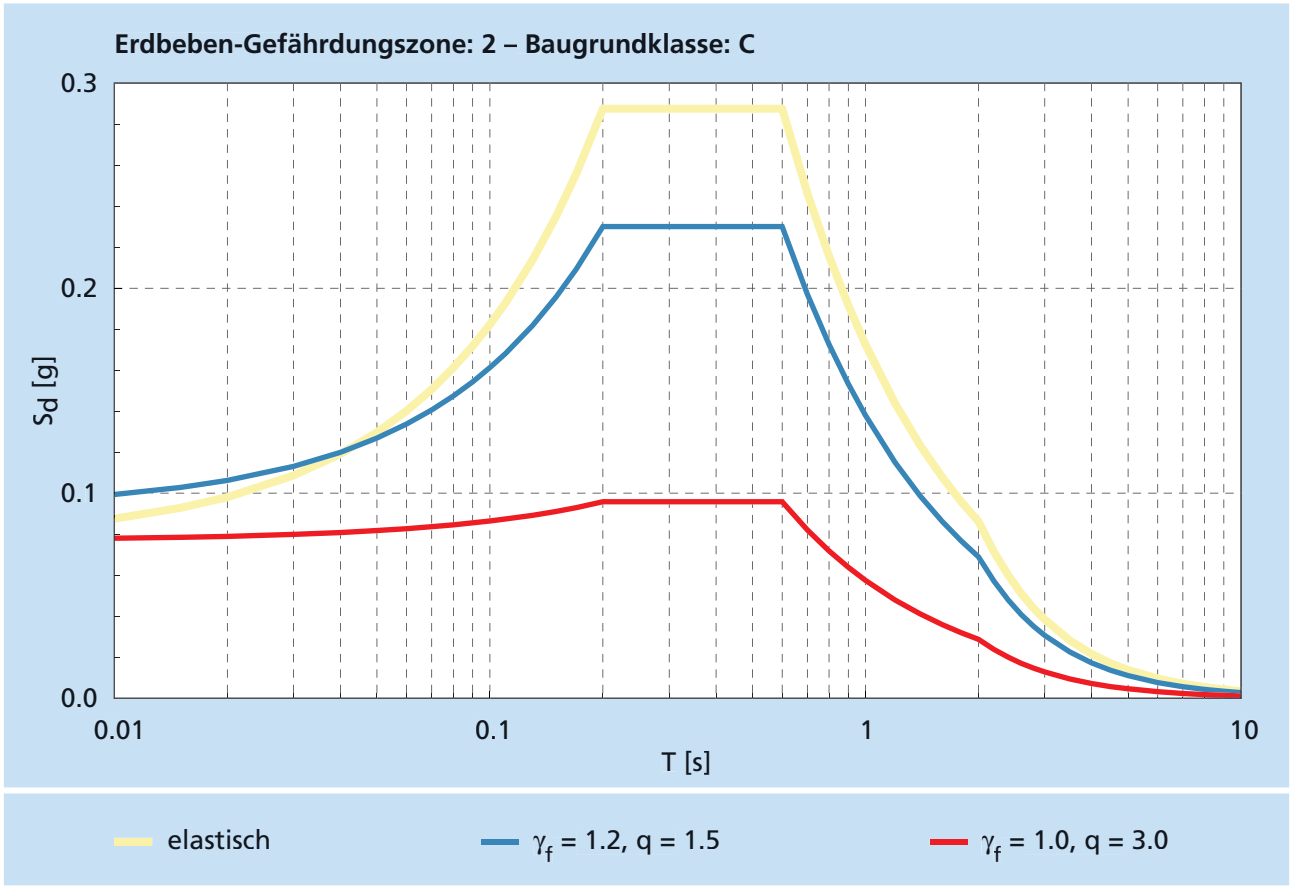
Die Bemessungsantwortspektren werden anhand von elastischen Antwortspektren und unter Berücksichtigung des Verhaltensbeiwerts und des Bedeutungsfaktors definiert, die entsprechend als q und γ_f in der SIA-Norm 261 bezeichnet sind.

Das Verhaltensbeiwert q ermöglicht eine Dämpfung der elastischen Spektralwerte für die Bemessung entsprechend dem Potential für Energiedissipation der Struktur. Je mehr die Struktur Energie ohne sprödes Versagen abbauen kann, desto grösser ist der Faktor q und desto kleiner sind die spektralen Bemessungswerte im Vergleich zu den elastischen Spektralwerten.

Der Bedeutungsfaktor γ_f ist ein Multiplikationsfaktor entsprechend der Bauwerksklasse in Tabelle 26 der SIA-Norm 261.

Figur C3 zeigt den Unterschied zwischen dem elastischen Antwortspektrum und dem Bemessungsspektrum für zwei verschiedene Fälle.

- q = 1.5 und γ_f =1.2 (unarmiertes Mauerwerk, nicht duktile Struktur, Bauwerksklasse II)
- q = 3.0 und γ_f = 1.0 (Stahlbeton, duktile Struktur, Bauwerksklasse I).



Figur C3: Unterschied zwischen dem elastischen Antwortspektrum und 2 möglichen Bemessungsspektren gemäss SIA-Norm 261 für die Baugrundklasse C und die Erdbeben-Gefährdungszone 2.

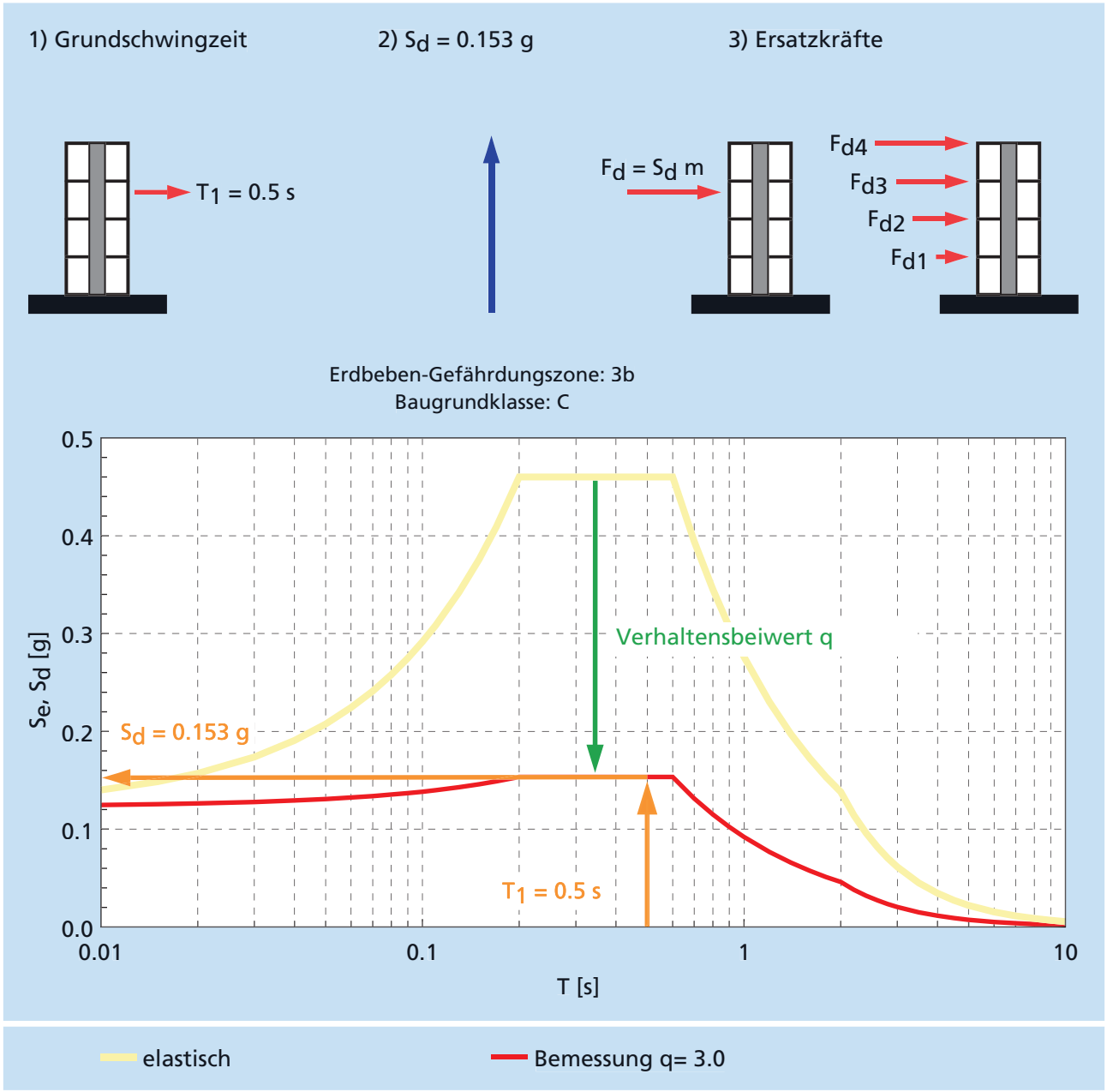
Figur C3 zeigt die Bedeutung des Entscheids des Ingenieurs, da der Faktor q die spektralen Bemessungswerte stark beeinflusst.

Verwendung der Antwortspektren

Die elastischen Antwortspektren definieren die seismische Gefährdung und ermöglichen einen quantitativen Vergleich des zu erwartenden Einwirkungsniveaus unter verschiedenen Umständen.

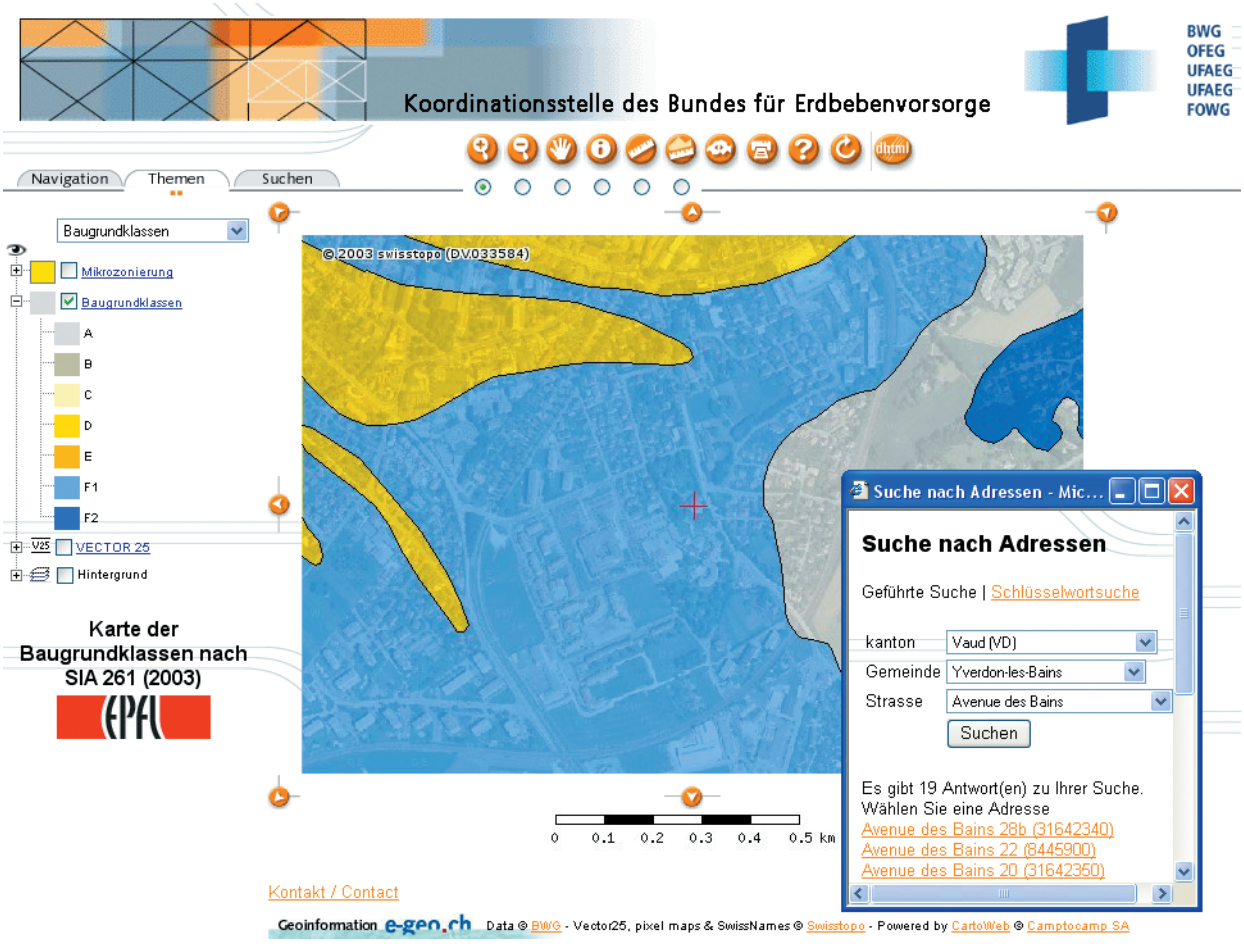
Bemessungsspektren ermöglichen die Bestimmung der seismischen Einwirkung auf Strukturen, wobei deren Bedeutung und Duktilität berücksichtigt wird. Das Verwendungsprinzip ist wie folgt schematisch für das sogenannte Ersatzkraftverfahren erklärt:

- Der Ingenieur bestimmt die fundamentale Fundamentalperiode T_1 seiner Tragstruktur mit Hilfe eines Modells oder einer Schätzformel.
- Er bestimmt das Bemessungsspektrum entsprechend der Gefährdungszone, der Baugrundklasse, des Verhaltensbeiwerts q und des Bedeutungsfaktors γ_f.
- Er bestimmt den Bemessungswert der Spektralbeschleunigung S_d, welcher der bestimmten fundamentalen Eigenperiode T_1 entspricht.
- Er bestimmt danach die seismischen Bemessungseinwirkungen auf die Tragstruktur entsprechend S_d und der Masse der Tragstruktur gemäss den Vorschriften der SIA-Norm 261.



Figur C4: Verwendung des Bemessungsspektrums beim Ersatzkraftverfahren.

Anhang D: Interaktive Karten der Baugrundklassen über das Internet



Figur D1: Die Karten der Baugrundklassen sind interaktiv über das Internet unter der Adresse www.bwg.admin.ch abrufbar. Mit Hilfe einer Suchfunktion (Koordinaten oder Adressen) kann die Parzelle oder das Objekt lokalisiert werden. Auf schnelle Art und Weise sind nun Informationen über die Baugrundklasse nach der Norm SIA 261, elastische Antwortspektren, Erdbeben-Gefährdungszone und historische Schadenbeben einsehbar. Beispiel aus dem Kanton Waadt, (EPFL, 2003).

Verzeichnis der Figuren und Tabellen

Figur 1: Übersicht der während des Erdbebens von Basel 1356 verursachten Gebäudeschäden und Modellierung der Standorteffekte (nach Fäh et al., Schweizerischer Erdbebendienst SED, 1997).

Figur 2: Verbreitung der historischen schadenverursachenden Erdbeben. Quelle SED (ECOS), 2003 (nach Fäh et al., Schweizerischer Erdbebendienst SED, 2003).

Figur 3: In der Schweiz beobachtete Epizentren und Magnituden, die im ECOS-Katalog verzeichnet sind. Quelle: SED, 2003 (nachbearbeitet).

Figur 4: Statistische Verteilung der Risiken in der Schweiz. Quelle: KATARISK, 2003.

Figur 5: Berechnungsmodell zur Abschätzung von Erdbebenschäden unter Berücksichtigung der Standorteffekte (Mikrozonierung).

Figur 6: Erdbebengefährdungskarte der Schweiz mit den Bemessungswerten der Horizontalbeschleunigung in cm/s2 für eine Wiederkehrperiode von 500 Jahren, Quelle: SED, 2003.

Figur 7: Karte der Erdbeben-Gefährdungszonen der Schweiz gemäss SIA 261 (2003).

Figur 8: Selektionsverfahren für die Mikrozonierung bei punktuellen Bauwerken (links) oder raumplanerischen Aufgaben (rechts).

Figur 9: Ein Erdbeben ist das Ergebnis einer abrupten Freisetzung von Energie entlang einer Bruchfläche in der Tiefe.

Figur 10: Erdbeben der Magnitude 6.0 im italienischen Friaul. Seismogramm vom 15. September 1976 der Sation Forgaria-Cornio, die sich auf kompaktiertem Lockergestein in 14 km Distanz zum Epizentrum befand. Die Messungen des Erdbebens im Friaul sind ebenfalls repräsentativ für potentielle Schweizer Beben.

Figur 11: Einfluss der lokalen Untergrundverhältnisse auf die Erdbebenerschütterungen.

Figur 12: Topographische Standorteffekte des Erdbebens von Algier/Boumerdès (2003) mit Konzentration der Schäden auf die überhängenden Steilwände des Tals.

Figur 13: Auswirkungen auf den Standort je nach Beschaffenheit des Lockergesteins.

Figur 14: Bergsturz am Südhang des Rawylhorns ausgelöst durch das Erdbeben vom 30. Mai 1946 in Sierre (Magnitude 6, dabei stürzten 5 Millionen Kubikmeter Felsmaterial in die Tiefe).

Figur 15: Durch das Erdbeben vom 13. Januar 2001 ausgelöster kreisförmiger Erdrutsch an der Carretera de San Vincente (El Salvador).

Figur 16: Einsinken eines Wohngebäudes nach hinten als Folge der Bodenverflüssigung seines Baugrunds (Erdbeben von Izmit, Türkei, 1999).

Figur 17: Fundamentalfrequenzmessungen von Lockergesteinen in der Region von Yverdon (Widmer et al., 2003).

Figur 18: Resonanzerscheinung (B) zwischen Boden und Bauwerk, die bei einer bestimmten Frequenz erzeugt wird (Weidmann, 2002).

Figur 19: Bereich der Fundamentalperioden bestimmter Bauwerkstypen in Zusammenhang mit den Antwortspektren der in der Norm SIA 261 (2003) beschriebenen Baugrundklassen.

Figur 20: Ausschnitt aus der Karte der Baugrundklassen nach SIA 261 des Blatts Yverdon-les-Bains im Massstab 1: 25'000 (Widmer, 2002).

Figur 21: Antwortspektren der Baugrundklassen gemäss Norm SIA 261.

Figur 22: S-Wellengeschwindigkeit in der Region Brig (CREALP/Résonance/Tissières 2001, unpubliziert, nachbearbeitet).

Figur 23: Dreidimensionale Ansicht der Region Brig und spektrale seismische Mikrozonierungskarte (CREALP/Résonance/Tissières 2001, unpubliziert).

Figur 24: Ausschnitt der spektralen seismischen Mikrozonierungskarte der Region Brig. Vergleich der erhaltenen elastischen Antwortspektren mit denjenigen der SIA-Norm 261 für die Erdbebenzone 3b und die betreffenden Baugrundklassen (CREALP/Résonance/Tissières 2001, unpubliziert).

Figur 25: Antwortspektren für Basel und für verschiedene Wiederkehrperioden, gültig auf einem Felsuntergrund. Ausschnitt aus der Webseite des Schweizerischen Erdbebendienstes (nach http://histserver.ethz.ch/hazard, nachbearbeitet).

Figur 26: Übersicht über die Messpunkte in der Region Basel, an welchen Bodenunruhemessungen vorgenommen wurden (nach Kind, 2002, nachbearbeitet).

Figur 27: Fundamentalfrequenz der Lockersedimente in Basel. Bekannte Verwerfungen sind durch schwarze Linien gekennzeichnet, die Kantonsgrenze durch die roten Linien (Kind 2002; Kind et al., 2003, nachbearbeitet).

Figur 28: Standorte für die Messung der Wellengeschwindigkeiten in Basel, typische Anordnung für eine Arraymessung, und Ergebnis der Messungen am östlichsten Standort (nach Kind, 2002; Kind et al., 2003).

Figur 29: Resultierendes 3D Modell, Schnitt durch das Modell von Westen nach Osten, und physikalische Parameter und deren Unsicherheiten (nach Kind, 2002; Kind et al., 2003).

Figur 30: Mikrozonierung der Stadt Basel: Spektrale Amplifikation in den fünf Zonen innerhalb der Stadt Basel (Kind, 2002; Kind et al., 2003). In der Karte sind die Umrisse der Stadt und die Gewässer dargestellt. Eine Strich-punktierte Linie bezeichnet den Rheingrabenrand. Die Lage der 2D Sektionen der Simulationen sind als gepunktete Linien eingezeichnet. Die Farben in den Flächen entsprechen den Farben der Amplifikationskurven. Bei den Amplifikationskurven wird jeweils die mittlere Amplifikation (blaue durchgezogene Linie) und die maximale Amplifikation (rote gestrichelte Linie) über eine Vielzahl von möglichen Erdbeben gezeigt.

Figur 31: Antwortspektren der Norm SIA261 verglichen mit den Werten aus der spektralen Mikrozonierung für die Zone 2 (hellblaue Zone in Figur 5) und Zone 4 (orangefarbene Zone in Figur 30) (nach Fäh et al., 2004).

Figur C1: Schema der Erstellung eines Antwortspektrums.

Figur C2: Idealisierte Umhüllende des elastischen Beschleunigungs-Antwortspektrums anhand von mittleren elastischen Antwortspektren, die für 6 Standorte mit einer vergleichsweise ähnlichen Geologie (bezeichnet als Klasse DD) bestimmt wurden. Für jeden Standort wurde das elastische Antwortspektrum als Mittelwert von 8 elastischen Antwortspektren berechnet, die durch 8 verschiedene Beschleunigungsverläufe generiert wurden. Quelle: Löw et al., 2002.

Figur C3: Unterschied zwischen dem elastischen Antwortspektrum und 2 möglichen Bemessungsspektren gemäss SIA-Norm 261 für die Baugrundklasse C und die Gefährdungszone 2.

Figur C4: Verwendung des Bemessungsspektrums beim Ersatzkraftverfahren.

Figur D1: Die Karten der Baugrundklassen sind interaktiv über das Internet unter der Adresse www.bwg.admin.ch abrufbar. Mit Hilfe einer Suchfunktion (Koordinaten oder Adressen) kann die Parzelle oder das Objekt lokalisiert werden. Auf schnelle Art und Weise sind nun Informationen über die Baugrundklasse nach der Norm SIA 261, elastische Antwortspektren, Erdbeben-Gefährdungszone und historische Schadenbeben einsehbar. Beispiel aus dem Kanton Waadt, (EPFL, 2003).

Tabelle 1: Bauwerksklassen (BWK) gemäss Norm SIA 261 (2003).

Tabelle 2: Charakterisierung der Mikrozonierung gemäss Norm SIA 261 und der spektralen seismischen Mikrozonierung.

Tabelle 3: Kriterien für die Wahl der Mikrozonierungsart.

Tabelle 4: Untersuchung der Geländestabilität unter Erdbebeneinwirkung.

Tabelle 5: Das Kriterium der Korngrössenverteilung für gesättigte und wenig kompaktierte Böden:

Tabelle 6: Untersuchung der Bodenverflüssigung bei einem Erdbeben.

Tabelle 7: Beschreibung der Baugrundklassen nach der Norm SIA 261 (2003). Ein Beispiel für eine solche Karte der Baugrundklasse, die strikt der Norm SIA 261 entspricht, ist in Figur 20 dargestellt; dabei handelt es sich um die Mikrozonierungskarte des Blatts Yverdon-les-Bains im Massstab 1: 25'000.

Tabelle 8: Entscheidungshilfe bei der Zuweisung einer Baugrundklasse nach SIA 261 zu einer geologischen Formation (CREALP, 2004).

Tabelle 9: Basisdaten für seismische Mikrozonierungsstudien.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Evaluationsmethoden für Standorteffekte.

Tabelle 11: Vorgehen zur Erstellung der Erdbebenmikrozonierung der Untersuchungsgebiete Brig, Visp und Monthey.

Tabelle 12: Auszug aus dem Artikel zum kommunalen Bau- und Zonenreglement BZR für den Kanton Wallis (2003).

Bibliographie

Normen und Empfehlungen

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.

AFPS (1993): Guide méthodologiques pour la réalisation d'études de microzonage sismique, 21 p. et annexes.

Eurocode 8 (1994): Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben. Teil 1–1: Grundlagen – Erdbebeneinwirkung und allgemeine Anforderungen an Bauwerke. Europäische Vornorm ENV 1998–1–1, CEN, Brüssel.

JGS (1999): Manual for zonation on seismic geotechnical hazards (revised version). Japanese Geotechnical Society, 115 p. and annexes.

Mayer-Rosa, D. & Jimenez, M.J. (2000): Seismic zoning, state-of-the-art and recommendations for Switzerland. LHG, Geol. Ber. 26, 75 p. and annexes.

SIA (1989): Norm 160, Einwirkungen auf Tragwerke. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürch.

SIA (2003): Norm 261, Einwirkungen auf Tragwerke. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürch, 75 p.

Abschätzung der Standorteffekte

Abraham, O., Blanchard, D. & Hévin, G. (1997): Exemples d'utilisation des ondes de surface pour la reconnaissance d'objets du génie civil. Colloque GEOFCAN, Géophysique des sols et des formations superficielles, Bondy, France, 81–85.

Aki, K. (1957): Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors. Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ. 35, 415–457.

Aki, K. (1988): Local site effects on strong ground motion. Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 11: Recent advances in ground motion evaluation, 20,103–155.

Aki, K. (1993): Local site effects on weak and strong ground motion. Tectonophysics, 218, 93–111.

Aki, K. & Larner, K.L. (1970): Surface motion of a layered medium having irregular interface due to incident plane SH waves. J. Geophys. Res., 75, 933–954.

Ambraseys, N., Smit, P., Berardi, R., Rinaldis, D., Cotton, F. & Berge-Thierry, C. (2000): European Strong Motion Database. European Commission, Directorate General XII, Science, Research and Development, Environment and Climate Programme, CD-ROM.

Bard, P.Y. & Riepl-Thomas, J. (1999): Wave propagation in complex geological structures and their effects on strong ground motion. In: Wave Motion Problems in Civil Engineering, Computational Mechanics Publications, Southampton, 57.

Bay, F. (2002): Ground Motion Scaling in Switzerland: Implications for Hazard Assessment. Dissertation Nr. 14567, ETH 2002.

Boatwright, J., Fletcher, J.B. & Fumal, T.E. (1991): A general inversion scheme for source, site and propagation characteristics using multiply recorded sets of moderate size earthquakes. Bull. Seism. Soc. Am., 81, 1754–1782.

Borcherdt, R.D. (1970): Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. Bull. Seism. Soc. Am., 60, 29–61.

Borcherdt, R.D. (1994): Estimate of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). Earthquake Spectra, 10, 617–653.

Bouchon, M. (1981): A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media. Bull. Seism. Soc. Am., 71, 959–971.

Bour, M. (1993): Simulation de forts mouvements du sol à partir de petits séismes utilisés comme fonctions de Green empiriques. PhD thesis, Université Louis Pasteur, Strasbourg.

Cotton, F., Berge, C., Lemeille, F., Pitarka, A., Lebrun, B. & Vallon, M. (1998): Three-dimensional simulation of earthquakes and seismic hazard in the Grenoble's basin (Western Alps). 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France.

CyberQuake (1998): User's Guide. Version 1.1 (Version 2 in Bearbeitung). BRGM, Orléans.

Duval, A.-M. (1994): Détermination de la réponse d'un site aux séismes à l'aide du bruit de fond: Evaluation expérimentale. Thèse de Doctorat, Paris VI, 265.

Fäh, D., Kind, F. and Giardini, D. (2001): A theoretical investigation of average H/V ratios. Geophysical Journal Int., 145, 535–549.

Fäh, D., Kind, F. & Giardini, D. (2001): Structural information extracted from microtremor wavefields. Submitted to the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, England, paper n° 819.

Fäh, D. & Suhadolc, P. (1994): Application of numerical wave-propagation techniques to study local soil effects: the case of Benevento (Italy). PAGEOPH, Vol. 134, No. 4, 513–536.

Fäh, D., Rüttener , E., Noack, T. and Kruspan, P. (1997). Microzonation of the city of Basel. Journal of Seismology, 1, 87–102.

Fäh, D., D. Giardini, F. Bay, F. Bernardi, J. Braunmiller, N. Deichmann, M. Furrer, L. Gantner, M. Gisler, D. Isenegger, M.J. Jimenez, P. Kästli, R. Koglin, V. Masciadri, M. Rutz, C. Scheidegger, R. Schibler, D. Schorlemmer, G. Schwarz- Zanetti, S. Steimen, S. Sellami, S. Wiemer, J. Wössner, (2003). Earthquake Catalogue Of Switzerland (ECOS) And The Related Macroseismic Database . Eclogae geol. Helv, 96, 219–236.

Fäh, D., Kind, F., Gisler, M., Sellami, S., Becker, A., Ferry, M., Giardini, D., Zechner, E., Huggenberger, P. (2003): Spektrale Mikrozonierung und Gefährdungsanalyse für Basel Stadt. Ein Bericht zuhanden des Kantons Basel Stadt, Schweizerischer Erdbebendienst ETH Zürich, 20.11.2003.

Field, E.H, Hough, S.H. & Jacob, K.H. (1990): Using microtremors to assess potential earthquake site response: A case study in Flushing Meadows, New York City. Bull. Seism. Soc. Am., 80, 1456–1480.

Field, E.H. & Jacob, K. (1995): A comparison and test of various site response estimation techniques, including three that are non reference-site dependent. Bull. seism. Soc. Am., 85, 1127–1143.

Frischknecht, C. (2000): Seismic soil amplification in alpine valleys. A case study: the Rhône valley, Valais, Switzerland. Terre & Environnement, Sciences de la Terre, Université de Genève.

Graves, R.W. (1995): Preliminary analysis of long period basin response in the Los Angeles region from the 1994 Northridge earthquake. Geophys. Res. Let., 22, 101–104.

Hartzell, S.H. (1978): Earthquake aftershocks as Green's functions. Geophys. Res. Let., 5, 104–107.

Hutchings, L. (1994): Kinematic earthquake models and synthesised ground motion using empirical Green's functions. BSSA, 84, 1028–1050.

Horike, M., (1985): Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas, J. Phys. Earth 33, 59–96.

Irikura, K. (1983): Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes. Bull. Disas. Prev. Inst., Kyoto Univ., 33, 63–104.

Irikura, K. (1986): Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's functions. Proc. 7th Jap. Earth. Eng. Symp., 151–156.

Irikura, K. & Kamae, K. (1994): Estimation of strong ground motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique. Annali di Geofisica, XXXVII–6, 1721–1743.

Jongmans, D. & Campillo, M. (1993): A study of the response of the Ubaye valley (France) for incident SH and SV waves: comparison between measurements and modeling. Bull. Seism. Soc. Am., 83, 907–924.

Jongmans, D. & Campillo, M. (1993): The determination of soil attenuation by geophysical prospecting and the validity of measured Q values for numerical simulations. Int. Jour. Soil Dynamics and Earth. Eng., 12, 149–158.

Jongmans, D. & Demanet, D. (1993): The importance of surface waves in vibration study and the use of Rayleigh waves for determining the dynamic characteristics of soils. Engineering Geology, 34, 105–113.

Kind, F. (2002). Development of Microzonation Methods: Application to Basle, Switzerland. Dissertation Nr.14548, ETH 2002.

Kind, F., Fäh, D., Zechner, E., Huggenberger, P., Giardini, D. (2003): Seismic zonation from a 3D seismic velocity reference model of the area of Basle, Switzerland. BSSA, Submitted.

Lachet, C. & Bard, P.-Y. (1994): Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. J. Phys. Earth, 42, 377–397.

Lermo, J. & Chavez-Garcia, F.J. (1993): Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. Bull. Seism. Soc. Am., 83, 1574–1594.

Löw, S., Koller, M. & Studer, J. A. (2002): Bodenprofile und Übertragungsfunktionen für die neuen Swisscodes. Resultate der Verstärkungsberechnungen. Unpubliziert.

Lussou, P., Bard, P.Y., Cotton, F. & Fukushima, Y. (2001): Seismic Design Regulation Codes: Contribution of K-Net data to site effect evaluation. Journal of Earthquake Engineering, Vol. 5, 13–33.

Moczo, P. (1989): Finite-difference technique for SH-waves in 2-D media using irregular grids – Application to the seismic response problem. Geophys. J. Int., 99, 321–329.

Moczo, P. & Bard, P.Y. (1993): Wave diffraction, amplification and differential motion near strong lateral discontinuities. Bull. Seism. Soc. Am., 83, 85–106.

Nakamura, Y. (1989): A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface. QR RTRI, 30, 25–33.

Olsen, K.B. & Archuleta, R. (1996): 3-D simulation of earthquakes in the Los Angeles fault system. Bull. Seism. Soc. Am., 86, 575–596.

Olsen, K.B., Pechman, J.C. & Schuster, G.T. (1995): Simulation of 3-D elastic wave propagation in the Salt Lake basin. Bull. Seism. Soc. Am., 85, 1688–1710.

Pavic, R., Koller, M.G., Bard, P.Y. & Lacave-Lachet, C. (2000): Ground motion prediction with the empirical Green's function technique: an assessment of uncertainties and confidence level. Journal of Seismology, 4, 59–77.

Pellissier, V., Delessert, F., Maffioletti, W. (2004): Prise en compte de l'aléa sismique dans le domaine de la construction. Contexte légal et aspects juridiques. In Vorbereitung.

Résonance Ing.-Conseils SA, Geologiebüro Rovina&Partner AG, Tissières bureau d'ing. (2000): Praxisbezogene seismische Mikrozonierung der Region Brig-Visp (Wallis). Unveröffentlicher Bericht für Staat Wallis, 65 Seiten.

Riepl-Thomas, J. & Cotton, F. (1999): Les effets de site, importance, compréhension et estimation. Cahier Technique n° 17, Association Française du Génie Parasismique, 41–61.

Rodriguez-Marek, A., Bray, J.D. & Abrahamson, N.A. (2000): A geotechnical seismic site response evaluation procedure. Proceedings of the 12th World Conference of Earthquake Engineering, Paper no. 1590.

Sabetta, F. & Pugliese, A. (1996): Estimation of response spectra and simulation of non-stationary earthquake ground motions. Bull. Seism. Soc. Am., 86, 337–352.

Satoh, T., Kawase, H., Iwata, T. Higaski, S., Sato, T., Irikura, K. and Huang, H. C. (2001): S-wave velocity structure of Taichung basin, Taiwan estimated from array and single-station records of microtremors, Bull. Seism. Soc. Am. 91, 1267–1282.

Schnabel, B., Lysmer, J. & Seed, H.B. (1972): SHAKE – a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report EERC, 72–12.

Steidl, J.H., Tumarkin, A.G. & Archuleta, R.J. (1996): What is a reference site? Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 86(6), 1733–1748.

Studer, J.A., Koller, M. & Löw, S. (2003): Definition von seismischen Bodenprofilklassen für die Swisscodes. Phase 3. Unpubliziert.

Tiedemann, H. (1992): Earthquakes and volcanic eruptions: a handbook on risk assessment. Swiss Reinsurance Company, 951 p.

Tumarkin, A.G. & Archuleta, R.J. (1994): Empirical ground motion prediction. Annali di Geofisica, XXXVII–6, 1691–1720.

Yamanaka, H., Takemura, M., Ishida, H. and Niea, M. (1994): Characteristics of long-period microtremors and their applicability in exploration of deep layers, Bull. Seism. Soc. Am. 84, 1831–1841.

Erdrutsch

Leroi, E., Terrier, M. & Mouroux, P. (1995): GIS-based hazard scenarios for mass movements: evaluating triggering phenomena when mapping slope instability. Proc. 5th Intern. Conf. on seismic zonation, Nice, AFPS Ouest, Ed 1315–1324.

Newmark, N.M. (1965): Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique, 15, 139–160.

Sitas, N. & Khazal, B. (2001): Characteristics of seismically induced landslides in recent earthquakes. Proc. Intern. Conf. on Landslides, Davos, Switzerland, Ed. Kühne M., United Eng. Foundation, Inc. VGE-Verlag, 227–237.

Tika, TH. & Pitilakis, K. (1995): The evaluation of earthquake induced displacements of landslide for Seismic zonation. Proc. 5th Intern. Conf. on seismic zonation, Nice, AFPS Ouest, Ed.1691–1698.

Bodenverflüssigung

Cui, J. & Men, F.L. (1995): On the role of Raleigh Wave in microzonation of soil liquefaction potential. Proc. 5th Intern. Conf. on seismic zonation, Nice, AFPS Ouest, Ed, 1490–1497.

Finn, W.D.L., Lee, K.W. & Martin, G.R. (1976): An effective stress model for liquefaction. ASCE Convention, Preprint 2752, Philadelphia, 169–198.

Kramer, S.L. (1996): Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey.

Seed, H.B. (1976): Evaluation of soil liquefaction effects on level ground during earthquakes. ASCE Nat. Conv. Philadelphia, Prepint 2752, 1–104.

Seed, H.B., Martin, P.P. & Lysmer, J. (1976): Pore-water pressure changes during soil liquefaction. J. Geot. Eng. Div. ASCE, No. 102, GT4, 323–346.

Studer, J.A. & Koller, M.G. (1997): Bodendynamik, Springer, 262 p.

Tissières, P. (1991): Dimensionnement des fondations superficielles et profondes sous l'effet d'un séisme. Ingénieurs et architectes suisses, 26, 11.12.1991, 591–596.

Tone

Ansal, A.M. (2001): Geotechnical aspects of seismic assessment and retrofit. Proc. of 20th Europ. Reg. Earthquake Eng. Seminar, Sion, SGEB, 9–22.

Berg- und Felssturz

Marietan, I. (1946): Le tremblement de terre du 25 janvier 1946. Bull. Murithienne, 63, 70–87.

Shon, K.J., Su, M.B & Wang, C.F. (2001): On the Chiufengershau landslide triggered by the Chi-Chi earthquake in Taiwan. Proc. Intern. Conf. on Landslides, Davos, 319–328.

Wanner, E. & Grütter, M. (1950): Etudes sur les répliques du tremblement de terre du Valais de 1946 à 1950. Bull. Murithienne, 67, 23–42.

Karte der Baugrundklassen

Beer, C. (1996): Erdbeben-Mikrozonierung in der Region Nidwalden und Obwalden. Mitt. der SGBF, 132, 13–20.

Beer, C. (1997): Erdbebengefährdung in Abhängigkeit vom Geologischen Untergrund. Diss. Nr.11740, Eidg. tech. Hochsch. Zürich (ETHZ).

CREALP (2004): Carte des sols de fondation pour le micozonage sismique de la Vallée du Rhône (VS) au 1: 25'000. Zone Brig-Léman.

Noack, T., Fäh, D. und Kruspan, P. (1999): Erdbebenmikrozonierung für den Kanton Basel-Stadt, LHG, Geol. Ber. 24, 80 S.

Wagner, J.-J., Frischknecht, C., Rosset, P., Sartori, M., Schindler, C., Beer, C., Mayer-Rosa, D., Rüttener, E. & Smit, P. (2000): Contribution au zonage sismique dans la vallée du Rhône, entre Sion et Brigue (Rapport SISVAL), Beitrag zur seismischen Zonierung des Rhonetals zwischen Sitten und Brig. Rapp. Géol., Serv. Hydrol. Géol. Nat., 25.

Widmer, F. (2002): Projet pilote de microzonage sismique dans le secteur d'Yverdon. Postgrade en Géologie de l'ingénieur et de l'Environnement, travail de diplôme, EPFL – OFEG, 71 p.

Widmer, F., Duvernay, B., Fäh, D. & Parriaux, A. (2003): Projet pilote de microzonage sismique à Yverdon (VD). Bull. Geol. Appl.

Weitere

Bachmann, H. (2002): Conception parasismique des bâtiments – Principes de base à l'attention des ingénieurs, architectes, maîtres d'ouvrages et autorités. Directives de l'OFEG, Bienne.

CREALP (2000): Guide de construction parasismique. Département des transports, de l'équipement et de l'environnement. Rapport 99.06.

ECOS (2002): Siehe Internetseite: http://histserver.ethz.ch

EMS (1998): European Macroseismic Scale. Grünthal, G. (Ed.). Cah. Europ. de Géodynamique et de Sismologie 15.

KATARISK (2003): Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Bundesamt für Bevölkerungsschutz.

MSK (1964): Seismic Intensity Scale. Acad. Sci U.S.S.R., Sov. Geophys. Comm.

OFEG (2003): Appréciation de la sécurité parasismique des ouvrages de la Confédération. Principes et directive. Office fédéral des eaux et de la géologie, Centrale de coordination pour la mitigation des séismes.

Weidmann, M. (2002): Erdbeben in der Schweiz. Verlag Desertina, Chur, Schweiz.

Zechner, E., Kind, F., Fäh, D., Huggenberger, P. (2001): 3-D Geological model of the Southern Rhinegraben compile on existing geological data and geophysical reference modeling, submitted (2004) to Geol. Rundschau.