



Schweizerischer Erdbebendienst
Service Sismologique Suisse
Servizio Sismico Svizzero
Servizi da Terratrembels Svizzer



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Erdbebengefährdung und induzierte Seismizität im Kanton Zug

Kurzgutachten

zu Händen Amts für Umweltschutz des Kantons Zug, 24. Januar 2014



Impressum

Herausgeber

Schweizerischer Erdbebendienst an der ETH Zürich
Sonneggstrasse 5
8092 Zürich

Autoren

Delano Landtwing, Toni Kraft, Stefan Wiemer

Titelbild

<http://www.parkhotel.ch/>

Auftraggeber

Amt für Umweltschutz des Kantons Zug
Erneuerbare Energien/Klima
Aabacherstrasse 5
6301 Zug

Zusammenfassung

Um die natürliche Erdbebengefährdung unter besonderer Berücksichtigung der Gefahr induzierter Erdbeben bei Tiefengeothermieprojekten im Kanton Zug einzuschätzen, hat der Schweizerische Erdbebendienst (SED) eine Bestandesaufnahme der in der Zentralschweiz bekannten Erdbeben gemacht. Die betrachtete Region umfasst ein Gebiet von 80 x 70 km Grösse, das den Kanton Zug mit mindestens 25km Zugabe über die Kantonsgrenzen hinaus einschliesst. Entsprechend der unterschiedlichen Datenlage wurden die aus historischen Quellen bekannten Erdbeben (bis 1974) und die von 1975 bis 2013 instrumentell erfassten Beben gesondert betrachtet.

Auf Zuger Kantonsgebiet sind in der historischen Aufzeichnungsperiode lediglich drei Ereignisse mit Intensitäten von maximal IV bis V aufgezeichnet worden. Die Herdtiefen der Ereignisse sind nicht bekannt. In der instrumentellen Aufzeichnungsperiode (ab März 1975) wurden 499 Ereignisse im Untersuchungsperimeter registriert. Die niedrigste registrierte Magnitude (M_L) betrug 0.5, die grösste M_L 4.2. Insgesamt haben sich in diesem Zeitraum 17 Erdbeben mit einer Stärke von $M_L > 3.0$ im Untersuchungsperimeter ereignet. Drei dieser Ereignisse haben Epizentren auf dem Kantonsgebiet Zug, haben sich aber alle in Tiefen von mehr als 25km ereignet. Zu erwähnen sind ausserdem vier Ereignisse mit $M_L > 3.0$ die unmittelbar nördlich des Kantons Zug (Gebiet Sihlwald) lokalisiert wurden. Das grösste dieser Erdbeben hatte eine Stärke von $M_L = 4.0$ (1984; nördl. Sihlbrugg). Auch die Herdtiefen dieser Beben waren grösser als 25km.

Das stärkste Beben im Untersuchungsgebiet, das M_L 4.2 Erdbeben von Zug, ereignete sich am 11. Februar 2012 um 11:45 Lokalzeit zwischen dem Zuger- und dem Ägerisee. Der Herd befand sich in einer Tiefe von 32 km nahe der Krusten-Mantel-Grenze. Das Beben wurde in grossen Teilen der ganzen Schweiz verspürt und hatte eine epizentrale Intensität von IV. Eine Besonderheit der Seismizität im südlichen Untersuchungsgebiet ist eine Serie von regen-induzierten Erdbeben im August 2005. Die ungewöhnliche Serie von 47 Erdbeben in nur 12 Stunden wurde nach vier Tagen intensivem Regenfall (über 300mm Niederschlag) in der Zentralschweiz beobachtet und hatte ihren Schwerpunkt in der Region Muotathal und Riemenstalden. Die Herdtiefen der Ereignisse befanden sich zwischen der Oberfläche und 5 km Tiefe. Die Herdtiefenverteilung im Untersuchungsgebiet zeigt einen Sprung in der maximalen Herdtiefe. Unter dem nördlichen Alpenvorland erstrecken sich die Erdbebenherde bis fast zur Krusten-Mantel Grenze in rund 35 km Tiefe, während unter den Alpen die Beben auf die oberen 15 bis maximal 20 km beschränkt sind.

Für 26 der seit 1975 in der hier betrachteten Region instrumentell erfassten Beben konnten Herdmechanismen erstellt werden. Aufgrund der Herdtiefenverteilung der Beben müssen sich Aussagen über das Spannungsfeld im Helvetikum auf die Oberkruste (oberste 10-15km) und im Bereich nördlichen Alpenvorlandes (inkl. Kantonsgebiet Zug) auf die Unterkruste beschränken. Die meisten Herdmechanismen in den beiden Bereichen sind vom Typ der horizontalen

Blattverschiebung, wobei im Alpenvorland eine Tendenz zu Abschiebungsmechanik und im Helvetikum eine Tendenz zu Überschiebungsmechanik zu erkennen ist.

Die aktuelle seismische Gefährdungskarte der Schweiz von 2004 zeigt für die Untersuchungsregion eine im schweizerischen Durchschnitt mittlere Gefährdung. Dabei ist die Gefährdung des Bereiches des Helvetikums geringfügig höher als die des nördlichen Alpenvorlandes. Das bedeutet, dass im gesamten Untersuchungsgebiet Schadensbeben möglich sind, aber seltener auftreten als etwa im Wallis, in Graubünden oder in Basel. Aus der jährlichen Magnituden-Häufigkeitsbeziehung des Untersuchungsgebietes lässt sich ablesen, dass pro Jahr etwa 1-2 Erdbeben mit Magnitude $M \geq 2.5$ zu erwarten sind. Ein Schadensbeben ($M \geq 5.0$) ist etwa alle 80 - 160 Jahre und ein Extremereignis mit Magnitude $M \geq 6$ etwa alle 800 -1600 Jahre zu erwarten.

Aufgrund der verfügbaren seismologischen Datengrundlage können dem Kantonsgebiet Zug weder besonders schlechte noch besonders günstige Voraussetzungen in Bezug auf die Gefährdung durch induzierte Erdbeben bei der Durchführung von Tiefengeothermieprojekten ausgestellt werden. Hierdurch unterscheidet sich der Kanton nicht von der restlichen Schweiz. Es ist unserer Auffassung nach in der Schweiz nicht zu erreichen, dass die Tiefengeothermie auch durch eine sorgfältige Standortwahl ohne seismisches Risiko zu betreiben ist. Dies gilt genauso für andere Technologien im Energiebereich. Es ist daher von essentieller Bedeutung, dass der lokale seismotektonische und geomechanische Kontext im Vorfeld jedes Projektes einer gründlichen Prüfung unterzogen wird.

Zwar zeichnet sich in der instrumentellen seismologischen Überwachungsphase (1975 bis heute) für den Kanton Zug eine Herdtiefenverteilung mit nur wenigen Beben in der Oberkruste (0-15km Tiefe) und dem Grossteil der Seismizität in Tiefen von mehr als 15km ab. Es wäre jedoch falsch dies als Anzeichen für eine besonders geringe Gefährdung durch induzierte Erdbeben zu deuten. Induzierte Erdbeben treten zwar in der Regel in den obersten 10km der Erdkruste nahe bei den auslösenden geotechnischen Projekten auf, ob die induzierte seismische Gefährdung jedoch der natürlichen seismischen Gefährdung folgt, ist derzeit nicht belegt.

Die Orientierung des tektonischen Spannungsfeldes in der Oberkruste des Kantons Zug sowie in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes ist nicht durch seismologische Daten oder ausreichend viele Spannungsmessungen aus Tiefbohrungen belegt. Eine qualitative Abschätzung des Spannungsfeldes ist nur aufgrund von Analogieschlüssen aus westlich und östlich angrenzenden Regionen möglich und mit entsprechend grossen Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten müssen bei der Analyse der Reaktivierbarkeit von Bruchsystemen in potenziellen Zielhorizonten von Tiefengeothermieprojekte adäquat berücksichtigt werden.

Im Kanton Zug traten wiederholt Erdbeben in grossen Tiefen von 25-35 km nahe der Grenze Erdkruste-Erdmantel auf, die Magnituden $M > 4.0$ erreicht haben. Aus heutiger Sicht ist nicht zu erwarten, dass Tiefengeothermieprojekte in der obersten Erdkruste (hier 2-5km Tiefe) einen direkten Einfluss auf die Auftretenswahrscheinlichkeit dieser Beben haben könnten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Auftrag und Leistungen.....	1
1.2	Ausgangslage	2
1.3	Untersuchungsperimeter	2
2	Natürliche Seismizität, Erdbebengefährdung- und Risiko.....	4
2.1	Datengrundlage	4
2.2	Historische Erdbeben im Untersuchungsgebiet	5
2.2.1	Nationaler Kontext: Erdbeben 250 - 1974 in der Schweiz und Umgebung.....	5
2.2.2	Ereignisse im Untersuchungsperimeter.....	6
2.3	Rezente Erdbeben im Untersuchungsgebiet.....	9
2.3.1	Nationaler Kontext: Erdbeben 1975-2012 in der Schweiz und Umgebung.....	9
2.3.2	Netzwerk im Untersuchungsperimeter	10
2.3.3	Ereignisse im Untersuchungsperimeter: Übersicht und Selektion	13
2.3.4	Zeitraum 1975 - 1984	18
2.3.5	Zeitraum 1985 - 2001	19
2.3.6	Zeitraum 2002 - 2013	20
2.3.7	Herdiefen	24
2.4	Herdmechanismen und Spannungsfeld	27
2.5	Seismische Gefährdung	32
3	Kenntnisstand induzierte Seismizität.....	36
3.1	Definition und Vorkommen	36
3.2	Ursachen und Mechanik.....	36
3.3	Induzierte Seismizität in der Tiefengeothermie	41
3.3.1	Typen der Geothermie.....	41
3.3.2	Hydrothermale Systeme	41
3.3.3	Petrothermale Systeme	42
3.3.4	Risiken induzierter Seismizität.....	42
4	Allgemeine Begutachtung der Eignung des Kantons Zug für Tiefengeothermieprojekte	45
5	Empfehlungen	47
6	Referenzen	51
	Anhang	53

1 Einleitung

1.1 Auftrag und Leistungen

Das Amt für Umweltschutz des Kantons Zug beauftragte am 3. September 2013 den Schweizerischen Erdbebendienst (SED) mit der Erstellung eines Kurzgutachten zur Erdbebengefährdung im Kanton Zug mit besonderer Berücksichtigung der Gefahr induzierter Erdbeben bei Tiefengeothermieprojekten.

Die offerierten und von uns ausgeführten *Leistungen* umfassen:

- Analyse der natürlichen Seismizität, Erdbebengefährdung- und Risiko im Kanton Zug (inklusive der Berücksichtigung des Magn. 4.2 Bebens am Zugerberg im Februar 2012).
- Kenntnisstand zu den Mechanismen der induzierten Seismizität bei Tiefengeothermieprojekten
- Allgemeine Begutachtung der Eignung des Kantons Zug für Tiefengeothermieprojekte hinsichtlich der Gefahr induzierter Seismizität
- Empfehlungen für allgemeine und standortspezifische Voruntersuchungen zur Abklärung von Erdbebengefährdung und – Risiko an zukünftigen Tiefengeothermiestandorten im Kanton Zug

Ein Schwerpunkt dieses Gutachtens liegt auf der Analyse der natürlichen Seismizität. Dies ist wichtig, da

- a) die natürliche Seismizität Hinweise auf aktive Verwerfungen geben kann.
- b) die natürliche Seismizität Hinweise auf das Spannungsfeld im Untergrund geben kann.
- c) es Stimmen in der Wissenschaft gibt, die darauf verweisen, dass aktivere seismische Regionen ein grösseres Risiko für Tiefengeothermieprojekte bergen.
- d) die natürliche Seismizität Aufschlüsse über Abminderungen der seismischen Wellen und über lokale Amplifikationseffekte gibt.

Wir möchten weiter darauf hinweisen, dass dieses Gutachten keine vollständige Risikostudie ist, sondern lediglich eine Analyse des aktuellen Wissensstandes über die natürliche Seismizität im Kanton Zug. Um das Risiko für einzelne Projekte zu ermitteln sind projektspezifische Risikostudien notwendig.

Der Schweizerische Erdbebendienst (SED, www.seismo.ethz.ch) an der ETH Zürich ist die Fachstelle des Bundes für Erdbeben. In dessen Auftrag überwacht er die Erdbebenaktivität in der Schweiz sowie im grenznahen Ausland und beurteilt die Erdbebengefährdung in der Schweiz. Im Falle eines Erdbebens informiert der SED Öffentlichkeit, Behörden und Medien über den Ort, die Stärke und mögliche Auswirkungen.

1.2 Ausgangslage

Im Zusammenhang mit möglichen zukünftigen Tiefengeothermieprojekten auf Zuger Kantonsgebiet stellt sich die Frage nach der allfällig verbundenen seismischen Gefährdung. Aktuelle und vergangene Tiefengeothermieprojekte haben wiederholt die seit Ende der 1970er Jahre bekannte Beobachtung bestätigt, dass bei der Injektion von Fluiden in den Untergrund Erdbeben ausgelöst werden können. Diese Beben sind in der Regel klein, können aber in seltenen Fällen auch verspürt werden oder Schäden verursachen (z.B. Soultz-sous-Forest (F) 2003, Basel (CH), 2006, Unterhaching (D) ab 2008, Landau (D) ab 2009 (alle Evans et al. 2012) und St. Gallen (CH), 2013 (Wiemer, 2013)).

Um mögliche Folgen geotechnischer Eingriffe in Tiefen von einigen Kilometern in der Erdkruste abzuschätzen, ist die Kenntnis über die Orientierung und Grösse der Gesteinsspannungen, sowie die Lage von aktiven oder leicht reaktivierbaren Verwerfungen unabdingbar. Darüber kann das Vorhandensein natürlicher Erdbeben Auskunft geben. Als Ausgangspunkt zur Bearbeitung der offerierten Fragestellungen (v.a. der Analyse der natürlichen Seismizität) dienen Daten vergangener Erdbeben im Untersuchungsgebiet. Als Quelle dient der Erdbebenkatalog der Schweiz (ECOS09), die Jahresberichte des SED (1978-2012) sowie die Liste aktueller Erdbeben aus der manuellen Routineauswertung (seit 2012).

1.3 Untersuchungsperimeter

Als Grundlage für den Untersuchungsperimeter dient das Gebiet des Kantons Zug. Zur besseren Beurteilung des regionalen Spannungsfeldes und der Einflüsse grösserer Erdbeben ausserhalb des Kantonsgebietes wurde der Untersuchungsperimeter um mindestens 25 km erweitert. So wird ausserdem berücksichtigt, dass die Lokationen historischer Beben nur mit einer grossen Ungenauigkeit bekannt sind. Als Referenz dient dabei eine Empfehlung der Internationalen Atomenergiebehörde (International Atomic Energy Agency, IAEA) in Wien zur Abschätzung der seismischen Gefährdung von Atomkraftwerken (International Atomic Energy Agency, 2002):

“3.9 Near regional studies should include a geographical area typically not less than 25 km in radius, although this dimension should be adjusted to reflect local conditions.”

Der Untersuchungsperimeter wurde gemäss der genannten Empfehlung anhand von vier Eckpunkten definiert, Tabelle 1.1 und Abbildung 1.1.

Tabelle 1.1: Koordinaten der Eckpunkte des Untersuchungsperimeters. Angegeben sind geographische Koordinaten (WGS84) sowie Schweizer Landeskoordinaten (CH1903).

Eckpunkte des Untersuchungsperimeter			
WGS84		CH1903	
47.489	8.036	645'000	260'000
47.479	9.097	725'000	260'000
46.849	9.077	725'000	190'000
46.859	8.029	645'000	190'000
<i>Dimensionen: 80 x 70 km; 5600 km²</i>			

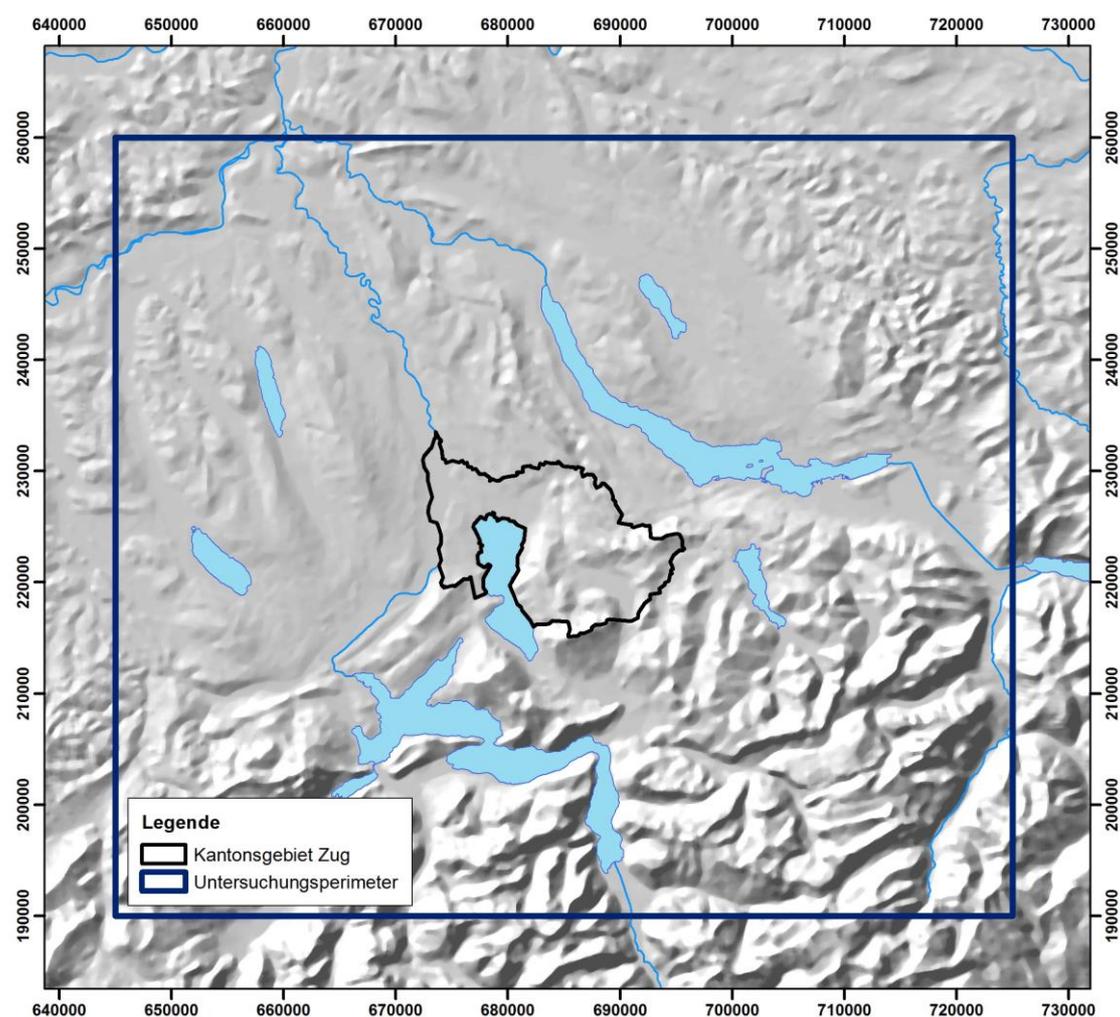


Abbildung 1.1: Perimeter des untersuchten Gebietes. Das Gebiet des Kantons Zug wurde um mindestens 25 km erweitert um den Richtlinien der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) zu entsprechen.

2 Natürliche Seismizität, Erdbebengefährdung- und Risiko

2.1 Datengrundlage

Als Grundlage dient die Datenbank des SED. Diese ist auf Grund des stetigen technischen Fortschritts in der Erdbebenregistrierung und Auswertung jedoch sehr heterogen. Obwohl in der Schweiz schon Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts erste Seismographen in Betrieb genommen wurden, kann erst ab 1975 von einem instrumentellen Zeitalter der Erdbebenbeobachtung gesprochen werden. Vor dieser Zeit beruhen die Kenntnisse fast ausschliesslich auf historischen Überlieferungen verspürter Erdbeben, welche mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet sind. Es muss also grundsätzlich zwischen den aus makroseismischen Beobachtungen (der Erdbeben-Auswirkungen) gewonnenen Daten (Kapitel 2.2) und den seit 1975 instrumentell erfassten Beben (Kapitel 2.3) unterschieden werden.

Das nationale Seismographennetz, welches ab 1975 in Betrieb war, wurde jedoch ebenfalls stetig weiterentwickelt. So liegen von 1975 – 1983 lediglich analoge Datensätze vor, d.h. es stehen lediglich Katalogdaten zur Verfügung. Ab 1984 wurden die Ereignisse erstmals digital erfasst, d.h. es liegen kurzperiodische Wellenform- und Katalogdaten vor. Seit 2002 verfügt der SED über ein digitales Breitbandnetz. Seither zeichnet das Netzwerk Breitband-Wellenformdaten auf, welche digital an die Zentrale in Zürich übertragen werden. Eine Übersicht über die einzelnen Perioden gibt Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Erfassung von Erdbebenereignissen im Spiegel der Zeit.

historisch	250 - 1975	Historische Überlieferungen
	1975 - 1983	Analog, keine digitalen Wellenformdaten; nur Katalogdaten
rezent; instrumentell erfasst	1984 – 2001	<i>1. Phase der digitalen Datenerfassung</i> Kurzperiodische Wellenformdaten und Katalogdaten
	1999 - 2001	Übergangsphase vom kurzperiodischen analogen Telemetrienetz zum Breitbandnetz
	2002 – 2013	<i>2. Phase der digitalen Datenerfassung</i> Digitales Breitbandnetz inkl. Wellenformdaten und Katalogdaten, digitale Datenübertragung

Die Datengrundlage für die Darstellung der historischen Seismizität liefert der im Jahr 2009 revidierte Erdbeben-Katalog der Schweiz ECOS-09 (Fäh et al., 2011). Dabei handelt es sich um eine vollständige Überarbeitung der historischen Erdbebendaten. Er umfasst Daten von 250 nach Christus bis 2008. Grundlage für die rezenten Ereignisse (ab 1975) bildet ebenfalls ECOS-09, wobei zusätzlich die seit 2008 registrierten Erdbeben aus den internen Datenbanken des SED bezogen werden.

2.2 Historische Erdbeben im Untersuchungsgebiet

2.2.1 Nationaler Kontext: Erdbeben 250 - 1974 in der Schweiz und Umgebung

Um die Erdbeben­­tätigkeit der Zentralschweiz in einen grösseren regionalen Zusammenhang zu stellen, zeigt Abbildung 2.1 die Epizentrenkarte der historischen Beben (250 – 1974) mit Epizentralintensitäten (I_0) von mindestens V. Die Intensität eines Erdbebens ist ein Mass für die an der Oberfläche verursachten Schäden und Auswirkungen auf Mensch, Umwelt und Infrastruktur. Die einzelnen Intensitätsstufen sind in der ‚European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)‘ niedergeschrieben (Grünthal, 1998). Die Intensität V zeichnet sich durch erste Gebäudeschäden in Form von Rissen im Verputz aus.

Es ist davon auszugehen, dass der Katalog über die gesamte in Abbildung 2.1 betrachtete Zeitperiode bei weitem nicht vollständig ist. Da historische Überlieferungen die Grundlage für den nicht-instrumentellen Erdbebenkatalog sind, spielt z.B. die Siedlungsdichte eine wichtige Rolle für die Abbildung von historischen Erdbebenereignissen. Ausserdem ist darauf hinzuweisen, dass die Genauigkeit der Erdbebenlokalisierung auf der Grundlage von historischen oder makroseismischen Berichten mit grossen Unsicherheiten behaftet ist, die je nach Datengrundlage im Bereich von $\pm 10 - 50$ km liegen können.

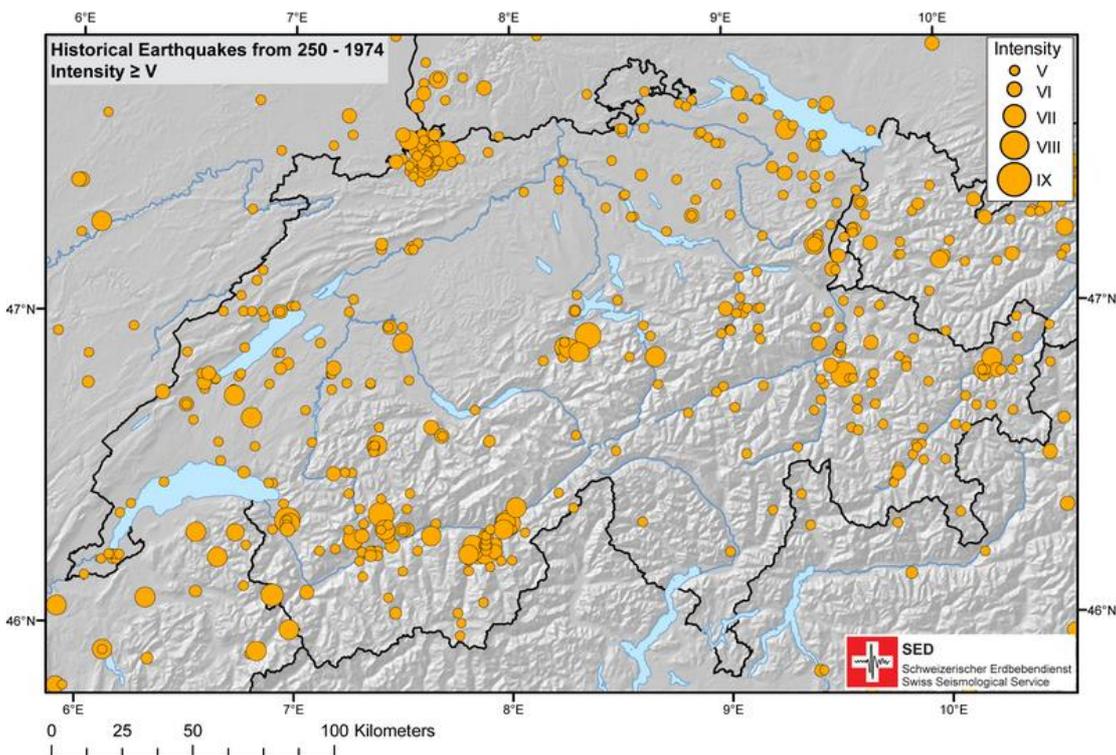


Abbildung 2.1: Historische Erdbeben in der Schweiz (250 – 1974) mit Epizentralintensitäten einer Intensität von mindestens V.

So wurde Basel im Jahre 1356 von einem der stärksten im vergangenen Jahrtausend in Mitteleuropa bekannten Beben heimgesucht, das über die gesamte Schweiz verspürt wurde und weithin Schäden angerichtet hat. Auch im Wallis sind in den letzten vier Jahrhunderten mehrere Erdbeben aufgetreten, die schwere Schäden zur Folge hatten. Relativ häufig sind Erdbeben ausserdem im Bündnerland, insbesondere im Engadin, und im Rheintal zwischen Chur und

dem Bodensee, zu verzeichnen gewesen. Vergleichsweise gering war hingegen die Erdbebenaktivität in der zentralen Nordschweiz sowie im Tessin. In Abbildung 2.1 zeichnet sich ausserdem auch die Zentralschweiz durch eine relative Konzentration von seismischer Aktivität aus – der Kanton Zug hingegen weist in sich keine grosse Erdbebenaktivität auf.

2.2.2 *Ereignisse im Untersuchungsperimeter*

Für eine detailliertere Betrachtung der Seismizität im Untersuchungsperimeter wurden die Daten aus dem Erdbeben-Katalog (ECOS-09) nach folgenden Kriterien selektiert:

- Bewertung „sicher“
- Datumsangabe vollständig (nicht unbedingt die Angabe der Uhrzeit)
- Datenquelle Schweizerischer Erdbebendienst (SED)
- Epizentralintensität > V (vor 1878) bzw. > IV (ab 1879)

Das erste nach diesen (und den Kriterien des ECOS-09) erfasste Erdbeben ist dasjenige von 1601 in Unterwalden. In den 400 Jahren seit diesem ersten historisch bekannten Beben im untersuchten Gebiet erweist sich die Datenlage jedoch als sehr heterogen. Starke Erdbeben in 1755 und 1855 im Wallis hatten zur Folge, dass das Bewusstsein für Erdbeben in der Schweiz markant gestiegen ist. Im Jahre 1878 wurde die Schweizerische Erdbebenkommission – die Vorläuferin des heutigen SED – gegründet. Ab dem Folgejahr wurden jeweils Erdbeben-Jahresberichte publiziert und somit die Datenlage gegenüber früher wesentlich verbessert. Eine Unterteilung des Datensatzes in eine Periode vor (Abbildung 2.2) und nach 1878 (Abbildung 2.3) drängt sich daher auf. Eine komplette Auflistung der abgebildeten Ereignisse ist in Anhang A2 zu finden.

Im Untersuchungsperimeter sind demnach seit 1601 drei Beben mit einer Epizentralintensität von VII und ein Beben mit einer Epizentralintensität von VIII aufgetreten. Das Beben von Unterwalden (1601, Intensität VIII) zählt dabei zu den acht stärksten Erdbeben in der Schweiz in den vergangenen 1000 Jahren. Knapp die Hälfte der in der ersten Karte dargestellten Beben sind in den Jahren 1774-1777 in der Gegend von Sarnen und des Urnersees zu finden. So auch ein Beben der Intensität VII. Zwei weitere Beben mit Intensität VII sind 1964 ebenfalls in der Region Sarnen beobachtet worden.

Auf Zuger Kantonsgebiet sind zwischen 1601 und 1975 lediglich drei Ereignisse (1907, 1938 und 1951) mit Intensitäten von maximal IV bis V aufgezeichnet worden (vgl. Tabelle 2.2). Die Herdtiefe der Ereignisse ist nicht bekannt, was für Erdbeben der historischen Periode die Regel darstellt. Es ist davon auszugehen, dass stärkere Beben – welche an der Oberfläche Schäden verursacht hätten – aufgezeichnet worden wären. Die historischen Nachforschungen ergeben unweigerlich, dass vor allem das südliche Untersuchungsgebiet in der Vergangenheit wiederholt von schadensverursachenden Erdbeben heimgesucht wurde. Im Kanton Zug selber wurden jedoch in dieser Periode keine markanten Ereignisse aufgezeichnet.

Tabelle 2.2: Historisch aufgezeichnete Erdbeben auf Zuger Kantonsgebiet.

Jahr	Monat	Tag	Koordinaten (CH)		M _w	Intensität	Ort
1907	03	11	686'800	220'900	3.1	IV	Unterägeri
1938	04	18	686'700	226'400	3.5	IV-V	Menzingen
1951	12	30	682'900	226'400	3.5	IV-V	Baar-Inwil

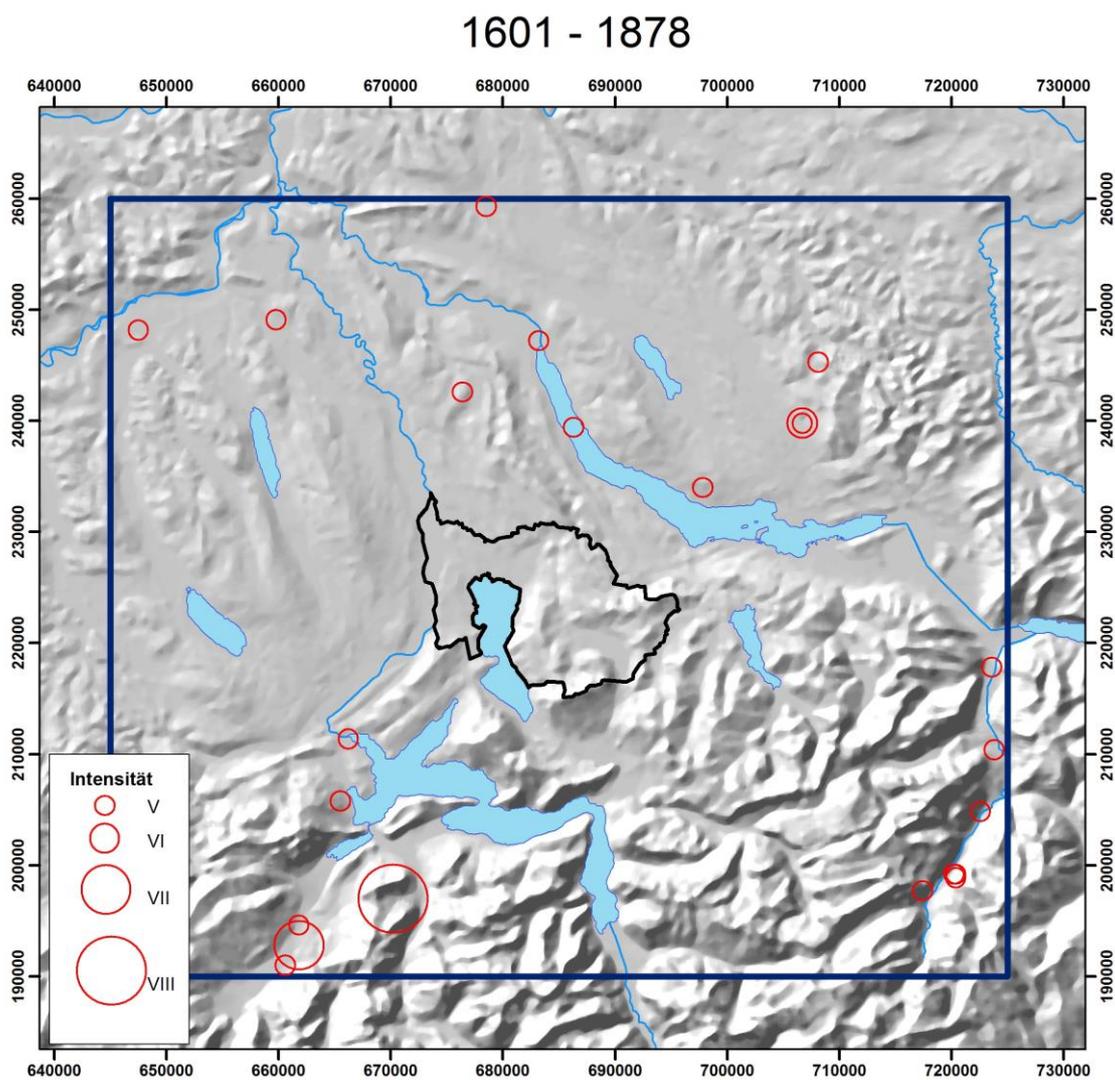


Abbildung 2.2: Epizentrenkarte historisch bekannter Erdbeben im Untersuchungsperimeter im Zeitraum 1601 – 1878, Intensität > V.

1878 - 1975

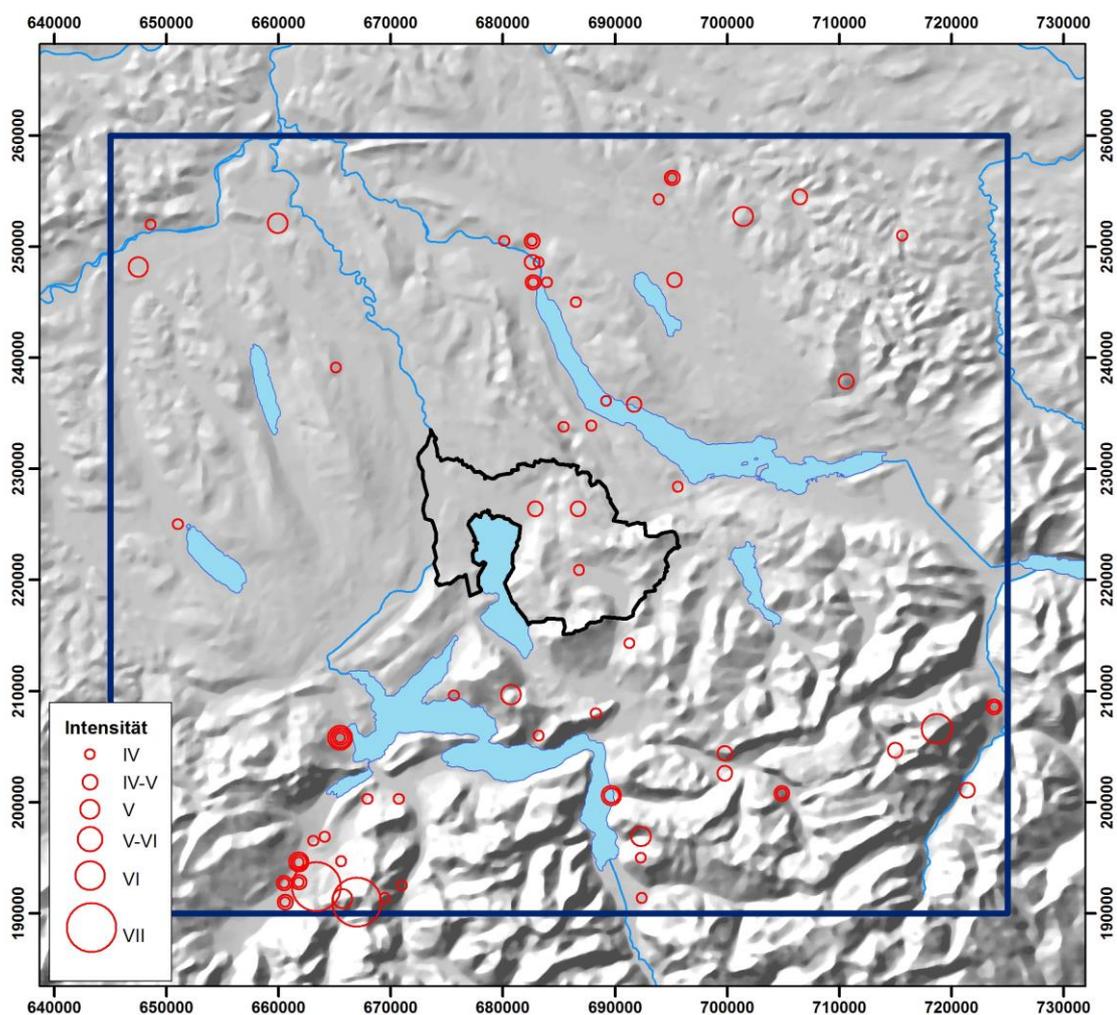


Abbildung 2.3: Epizentrenkarte historisch bekannter Erdbeben im Untersuchungsperimeter im Zeitraum 1879 – 1975, Intensität > IV.

2.3 Rezente Erdbeben im Untersuchungsgebiet

2.3.1 Nationaler Kontext: Erdbeben 1975-2012 in der Schweiz und Umgebung

Die Epizentren aller Beben ab Magnitude 2.0 (M_L), welche das nationale Erdbeben-Beobachtungsnetz in den Jahren 1975 bis 2012 in der Schweiz und Umgebung aufgezeichnet hat, sind in Abbildung 2.4 dargestellt. Die Magnitudenschwelle von 2.0 ist im wesentlichen willkürlich gewählt, denn zu Beginn dieser Periode ist der Katalog bestimmt nicht vollständig über das gesamte Gebiet für Beben ab Magnitude 2, während in den letzte Jahren die Detektionsempfindlichkeit in grossen Teilen der Schweiz wesentlich besser ist. Dies hängt mit der dem Ausbau und der damit verbundenen technischen Entwicklung des Nationalen Beobachtungsnetzes zusammen. Im Mittel ergibt sich jedoch ein repräsentatives Bild.

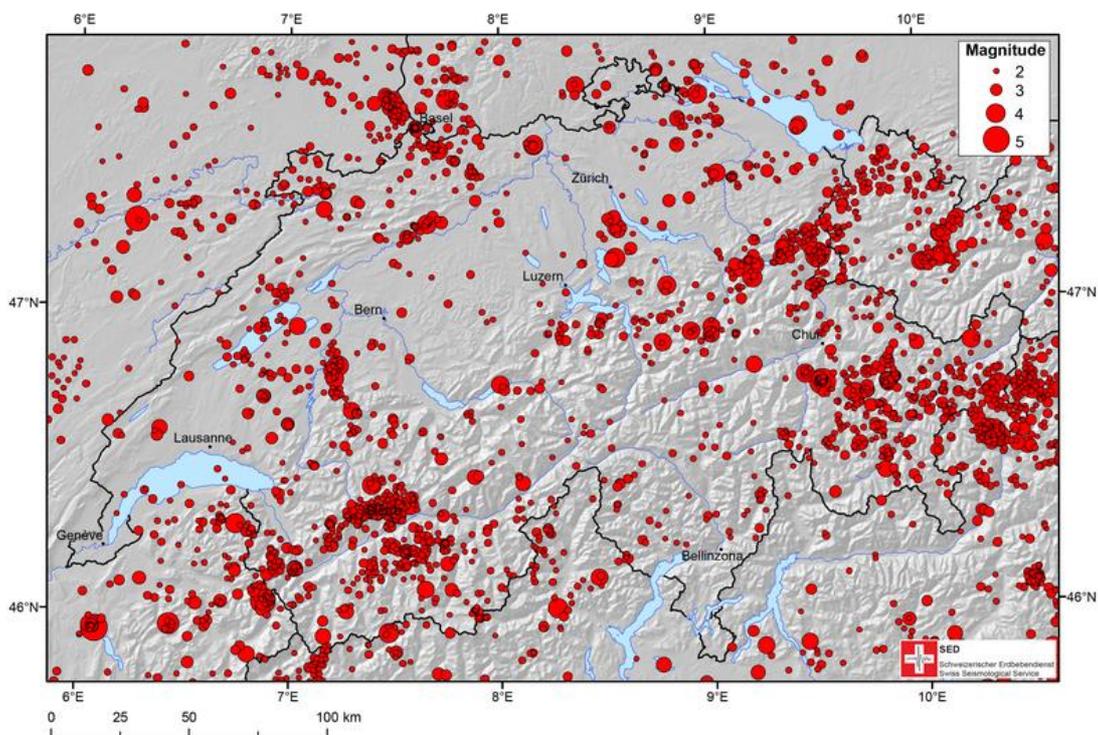


Abbildung 2.4: Epizentren der vom Schweizerischen Erdbebendienst seit 1975 erfassten Erdbeben mit Magnituden ab 2.0 (M_L).

Gesamthaft gesehen treten in der Epizentrenverteilung der instrumentellen Beobachtungen die gleichen regionalen Unterschiede auf wie in derjenigen der historischen Beben. So ist auch in den 38 Jahren seit 1975 eine Häufung der Erdbebenaktivität im Wallis, in Graubünden, im St. Galler Rheintal sowie in der Gegend von Basel zu verzeichnen gewesen. Die vier stärksten Erdbeben zwischen 1975 und 2012 in der Schweiz und Umgebung haben sich bei Vaz, Graubünden (1990, $M = 5.0$, $I_0 = VI$), bei Annecy, Frankreich (1996, $M = 5.1$, $I_0 = VIII$), bei Bormio, zwischen Münstertal und Veltlin (1999, $M = 5.0$, $I_0 = IV-V$) sowie bei Vallorcine, zwischen Martigny und Chamonix (2005, $M = 4.9$, $I_0 = V$) ereignet. Beachtenswerte Abweichungen zeigen sich jedoch im Oberwallis und in der Zentralschweiz. In beiden Gebieten war es in den 38 Jahren seit 1975 relativ ruhig.

2.3.2 Netzwerk im Untersuchungsperimeter

Wie einleitend im Kapitel 2.1 (Datengrundlage) erwähnt wurde, verfügt die Schweiz erst seit 1975 über ein nationales Seismographennetz. Zwar waren bereits vor dieser Zeit einzelne Stationen in Betrieb (z.B. ZUG bei Oberägeri), von einem Netzwerk kann aber erst ab besagtem Jahr gesprochen werden. Abbildung 2.5 zeigt alle Stationen, die im Perimeter (und in dessen nahem Umfeld) von 1974-2013 betrieben wurden. Stationen von besonderer Relevanz für die Erdbebenlokalisierung im Untersuchungsperimeter sind mit ihren Stationscodes gekennzeichnet und in Tabelle 2.3 aufgelistet. Zusätzlich können Inbetrieb- bzw. Ausserbetriebnahmen der einzelnen Stationen in Abbildung 2.6 graphisch betrachtet werden. Es fällt auf, dass der Perimeter ab 1984 mit deutlich mehr Stationen überwacht wird (1984: Beginn der ersten Phase der digitalen Datenerfassung). Ein weiterer starker Ausbau kann zwischen 1998 und 2001 beobachtet werden (Übergangsphase zum digitalen Breitbandnetz). Schliesslich kamen ab 2010 noch einmal zehn Stationen zum Netzwerk.

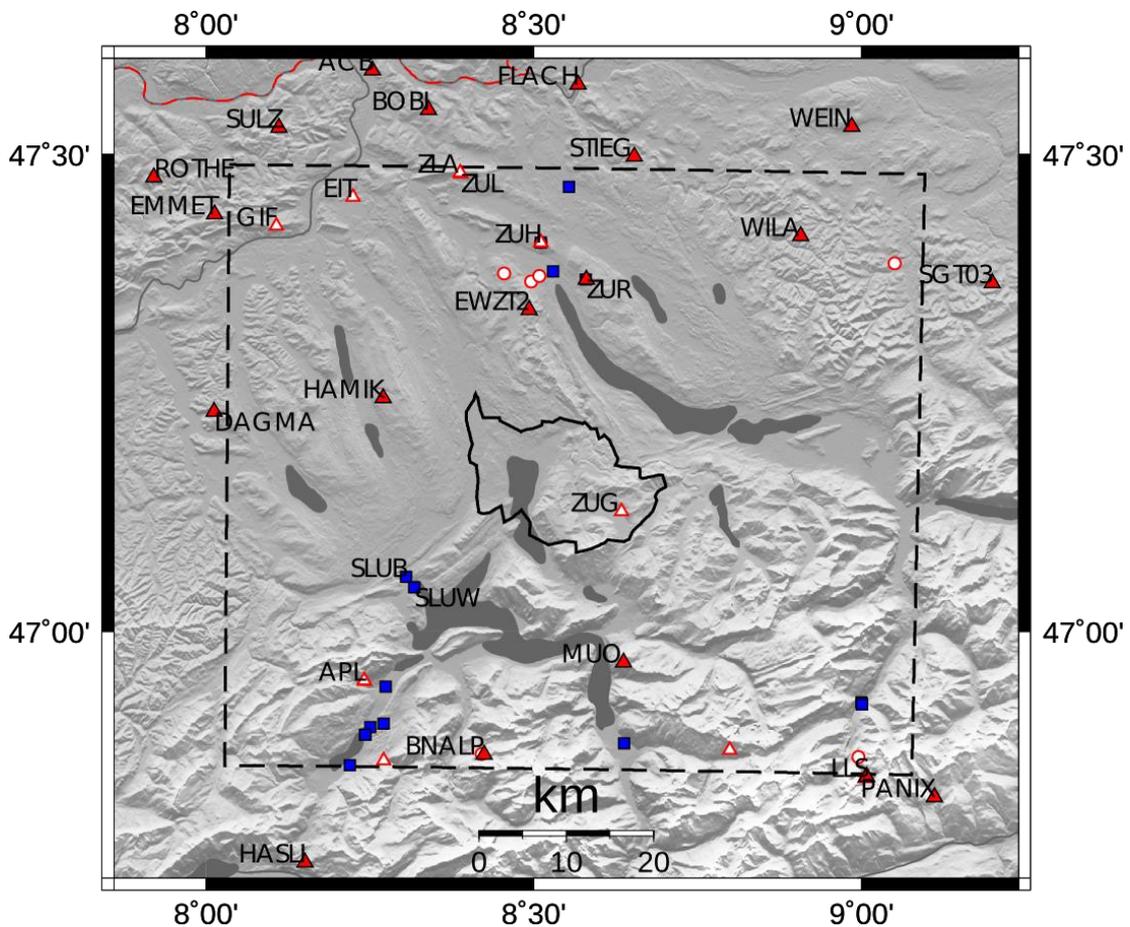


Abbildung 2.5: Karte des Untersuchungsperimeters mit den Standorten der seismischen Stationen. Hochempfindliche Stationen sind als rote Dreiecke gekennzeichnet, blaue Quadrate stellen Starkbebenstationen (Strong-motion) dar; offene Symbole kennzeichnen stillgelegte Stationen.

Tabelle 2.3: Seismische Stationen im Untersuchungsperimeter unterteilt nach Starkbebennetz (ssmNet), Breitbandnetz (sdsNet) und Stationen ausser Betrieb.

Station	Ort	Koordinaten		Betrieb	
		Lat.	Lon.	von	bis
<i>Hochempfindliche Stationen</i>					
APL	Alpnach	46.94827	8.24172	14.01.1991	05.08.2004
ACB	Acheberg	47.58755	8.25434	10.06.2003	
BOBI	Boebikon	47.54631	8.33985	04.12.2012	
BNALP	Bannalp	46.87049	8.42502	30.09.1998	
CHE	Cheisacher (→ SULZ)	47.52748	8.11153	22.11.1983	01.09.2000
DAGMA	Lutertal, Dagmarsellen	47.230884	8.012475	11.04.2013	
EMMET	Emmethof	47.43757	8.01358	25.01.2013	
EWZT2	Wettswil, ZR	47.33732	8.49319	29.08.2009	
FLACH	Flaach	47.57241	8.5679	11.09.2003	
HAMIK	Haemikon, Daelikerfeld, LU	47.24508	8.27061	19.12.2012	
HASLI	Hasliberg-Brienz	46.75681	8.15117	16.06.1999	
LLS	Linth-Limmern	46.84676	9.00825	12.10.1988	
MUO	Muotathal	46.96765	8.63706	24.11.1981	
PANIX	Lag da Pigniu	46.825743	9.111708	05.08.2011	
ROTHE	Rothenfluh	47.47612	7.92093	25.01.2013	
SGT03	Degersheim	47.365551	9.199445	23.01.2012	
STIEG	Stiegenhof, Oberembrach	47.4978	8.65405	11.12.2012	
SULZ	Cheisacher	47.52748	8.11153	01.09.2000	
WEIN	Weingarten	47.52873	8.98586	08.09.2003	
WILL	Wil (→ WILA)	47.41469	8.90766	16.01.1975	02.01.2002
WILA	Wila	47.41465	8.90753	12.01.2000	
EIT	Eiteberg	47.45548	8.22493	22.11.1983	31.08.2001
FLI	Flueli-Ranft	46.86394	8.27104	22.11.1983	31.08.2001
GIF	Gisliflue	47.42514	8.10791	22.11.1983	31.08.2001
ZUG	Oberägeri, ZG	47.12616	8.63416	25.06.1974	14.01.1975
ZUL	ZH-Laegern	47.47988	8.38888	01.01.1974	09.07.1986
ZLA	ZH-Laegern	47.48092	8.38830	11.07.1986	02.01.2002
ZUH	ZH-Hoenggerberg	47.40783	8.51146	01.06.1986	18.02.1998
ZUR	Degenried	47.36921	8.58088	01.01.1913	

Strong Motion Stationen (SSMnet)

SLUB	Luzern Bramberg	47.05792	8.30548	02.12.2011	
SLUW	Luzern Werkhofstr.	47.04631	8.31786	21.12.2010	

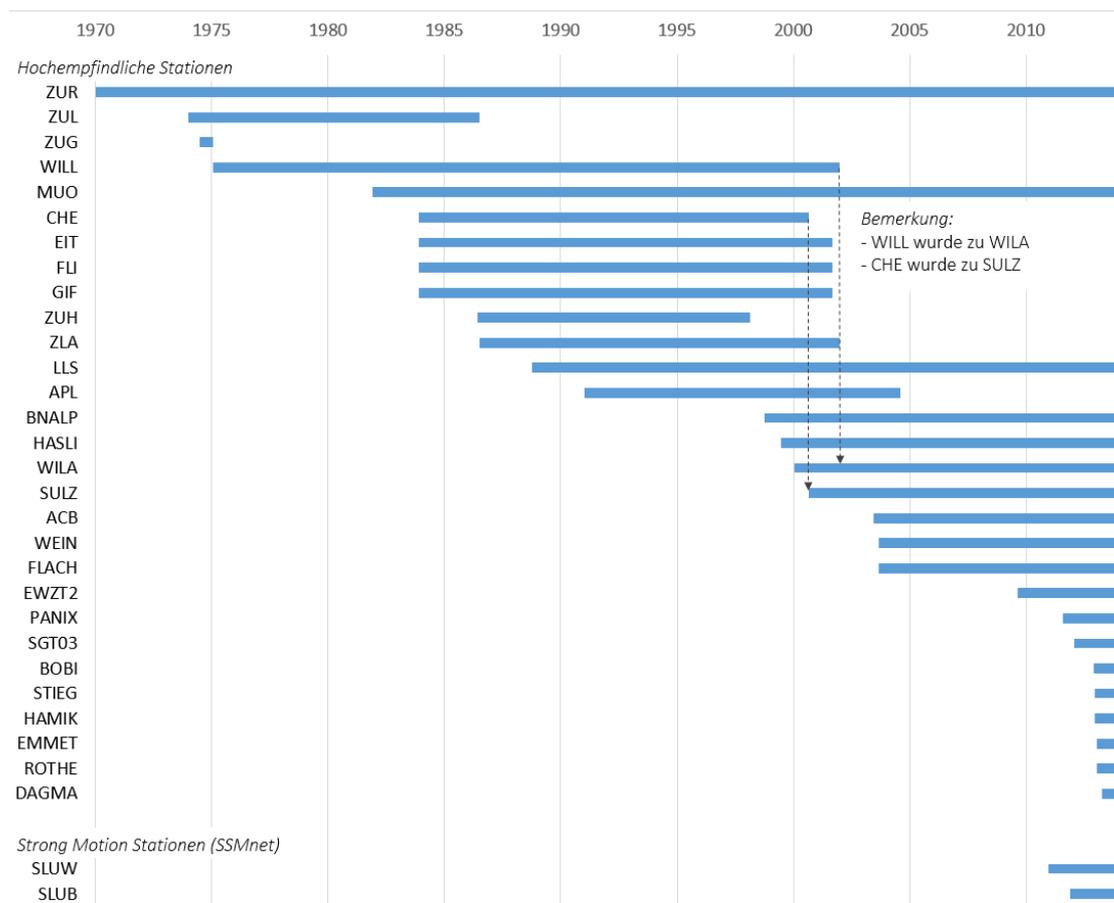


Abbildung 2.6: Übersicht über die Inbetriebnahme bzw. Ausserbetriebssetzung der Stationen im Untersuchungsperimeter im Spiegel der Zeit. Der stetige Ausbau des Netzwerkes im Laufe der Zeit wird deutlich sichtbar.

2.3.3 **Ereignisse im Untersuchungsperimeter: Übersicht und Selektion**

In der Zeitspanne von März 1975 bis Ende November 2013 wurden 499 Ereignisse im Untersuchungsperimeter registriert. Die niedrigste registrierte Magnitude (M_L) betrug 0.5, die grösste M_L 4.2. Es handelt sich dabei um das Erdbeben unterhalb Unterägeri vom 11.02.2012.

Wie im vorhergegangenen Kapitel diskutiert, hat sich das instrumentelle Stationsnetzwerk des SED zwischen 1975 und heute stetig weiterentwickelt. Die Instrumentierung wurde dem Stand der Technik angepasst und das Netzwerk dichter. Für die aufgezeichneten Erdbeben-Ereignisse bedeutet dies, dass die Qualität der Lokalisation und die Bestimmung der Magnitude sehr unterschiedlich sein können. Eine Analyse der Qualitätsmerkmale und ein Herausfiltern von gewissen Ereignissen macht daher Sinn.

Abbildung 2.7 zeigt für jedes der oben genannten 499 Ereignisse die für die Lokalisierung massgeblichen Parameter: Der Gap entspricht dem grössten am Epizentrum gemessenen Winkelabstand zwischen zwei benachbarten Stationen (ist der Gap < 180 Grad, dann liegt das Epizentrum innerhalb des Stationsnetzes, was die Zuverlässigkeit der Lokalisation erhöht); die minimale Epizentralentfernung entspricht der Distanz zwischen dem Epizentrum und der nächsten Station (eine vertrauenswürdige Tiefenbestimmung ist im Allgemeinen nur dann gegeben, wenn diese Distanz nicht wesentlich grösser ist als die Herdtiefe); Die Anzahl Beobachtungen entspricht der Anzahl der P- und S-Einsatzzeiten, die für die Lokalisation verwendet wurden (erst ab 5 Beobachtungen ist ein Minimum an Redundanz gegeben); der RMS-Wert der Laufzeit-Residuen beschreibt die Übereinstimmung zwischen den berechneten und den beobachteten Laufzeiten (ein kleines RMS ist zwar noch kein zuverlässiges Mass der Güte der Lokalisation, aber ein grosses RMS ist ein Zeichen einer nicht-vertrauenswürdigen Lokalisation). In Abbildung 2.7 fällt auf, dass insbesondere in den früheren Jahren die minimalen Epizentraldistanzen und das RMS vergleichsweise hoch sind, so dass die Lokalisierungen entsprechend unsicher sind.

Um die Ereignisse mit den unzuverlässigsten Lokalisierungen auszuscheiden, werden für alles weitere nur diejenigen Beben berücksichtigt, die folgende Mindestanforderungen erfüllen:

- GAP $< 220^\circ$ Grad
- min. Epizentraldistanz < 40 km
- min. Anzahl Beobachtungen = 5
- RMS < 0.6 Sekunden

Für manche der oben aufgeführten Mindestanforderungen wären kleinere Schwellenwerte idealer, bei der vorhandenen Datengrundlage würden dann jedoch zu viele Beben verloren gehen, weshalb die höheren Werte gewählt wurden.

Seismische Ereignisse 1975–2013 im Untersuchungsperimeter (ML >= 0)

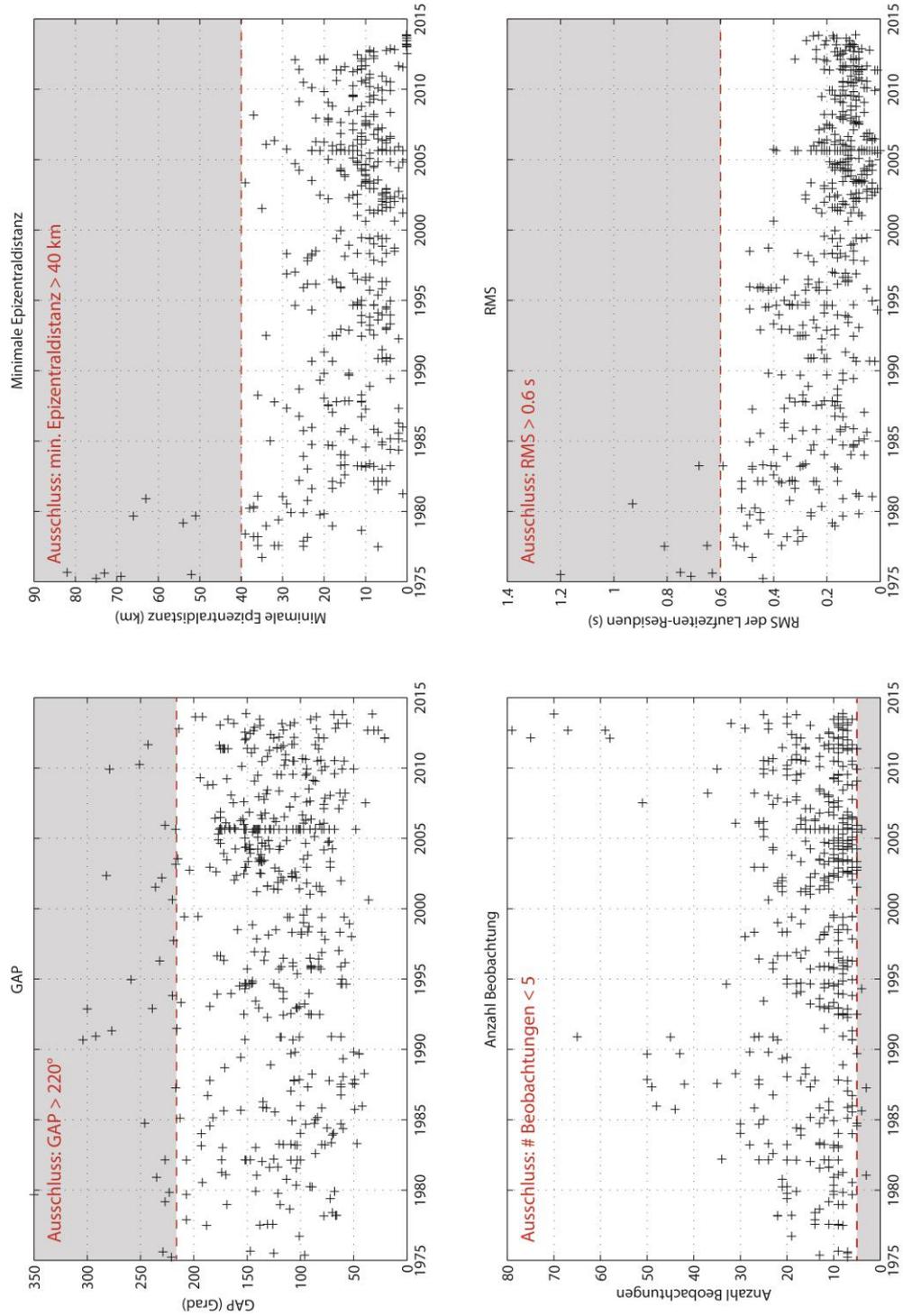


Abbildung 2.7: Statistik der Lokalisierparameter der 499 vom SED zwischen 1975 und 2013 erfassten Erdbeben in der Zentralschweiz. GAP ist der grösste Winkelabstand zwischen dem Epizentrum und zwei benachbarten Stationen in Grad; Minimale Epizentraldistanz ist die Entfernung zwischen Epizentrum und der nächsten Station; Anzahl Beobachtungen ist die Anzahl P- und S-Einsatzzeiten für die Lokalisierung; RMS der Laufzeiten-Residuen ist quadratische Mittel der Differenzen zwischen beobachteten und berechneten Laufzeit an allen Stationen. Die grau schattierten Bereiche markieren die Daten, welche auf Grund der Selektionskriterien herausgefiltert wurden: GAP > 220°; Minimale Epizentraldistanz < 40 km; Anzahl Beobachtungen < 5 und RMS > 0.6 s. Total wurden 36 Ereignisse herausgefiltert, wobei 463 Ereignisse die Qualitätskriterien erfüllten.

Bei der Festsetzung der Qualitätskriterien wurde darauf geachtet, dass Erdbeben mit Lokalmagnituden $M_L > 3$ möglichst erhalten bleiben. Die wegfallenden Beben sind zudem klein, am Rande des Perimeters oder es liegen besser bestimmte Ereignisse vor, welche erhalten bleiben. Die Selektion hat jedoch zur Folge, dass alle Ereignisse des Jahres 1975 wegfallen. Abbildung 2.8 zeigt die Ereignisse im Untersuchungsgebiet, wobei die durch die Selektionskriterien herausgefilterten Erdbeben gelb eingefärbt sind. Von total 499 Ereignissen erfüllten 36 die Selektionskriterien nicht. 463 Ereignisse entsprachen den Kriterien und verbleiben im Katalog. Anhang A3 enthält eine Liste aller Ereignisse, welche die Mindestanforderungen erfüllen.

Instrumentelle erfasste Erdbeben 1975 - 2013

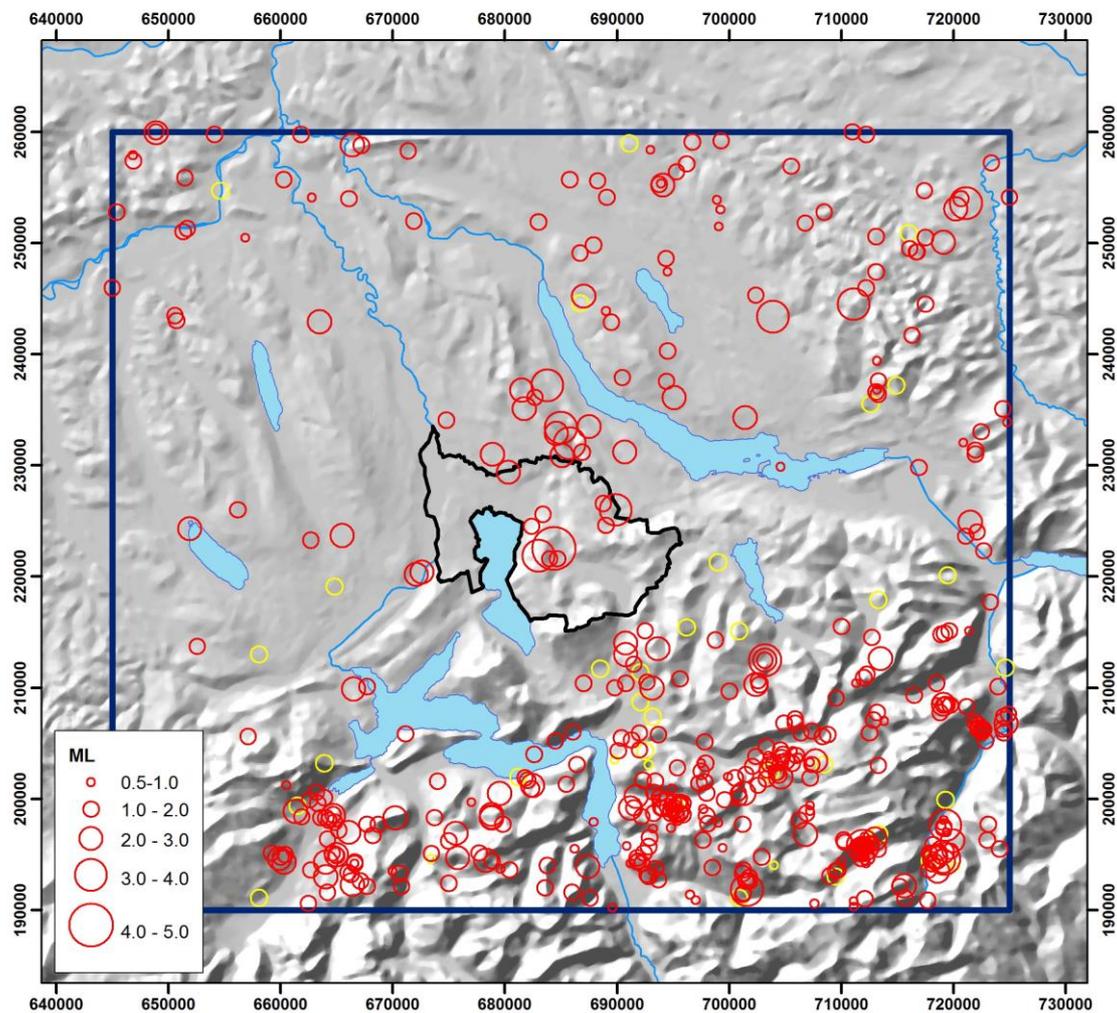


Abbildung 2.8: Instrumentell aufgezeichnete Erdbeben der Jahre 1975 – 2013 im Untersuchungsperimeter. Ereignisse, welche nicht den Selektionskriterien genügten, sind gelb eingefärbt. Die rot eingefärbten Ereignisse erfüllen die Kriterien. Von total 499 Ereignissen wurden 36 Ereignisse herausgefiltert. Es wurde darauf geachtet, dass Erdbeben der Stärke $M_L > 3.0$ nicht verloren gehen.

Die genannten zeitlichen Veränderungen des Stationsnetzes und damit der Detektionsschwelle (vgl. auch Kapitel 2.3.1) hat einen direkten Einfluss auf die aufgezeichneten Ereignisse. Abbildung 2.9 a) illustriert deutlich die Herabsetzung der Detektionsschwellen über die Jahre: Vor 2002 wurden z.B. kaum Ereignisse unter M_L 1.0 registriert. Abbildung 2.9 c) zeigt die kumulative Anzahl registrierter Erdbeben: Im Vergleich ist die Steigung dieser Kurven nach 1985 deutlich steiler als zuvor. Ab 2001 nehmen diese noch einmal deutlich zu. Speziell auffallend ist dabei ein senkrechter Sprung im Jahr 2005 (ebenfalls im Histogramm von Abbildung 2.9 d) zu beobachten): Dabei handelt es sich um induzierte Erdbeben die durch starke Regenfälle ausgelöst wurden. Diese Ereignisse werden später separat behandelt.

Anhand der Charakteristika der Statistiken und den Veränderungen im Stationsnetz ist es sinnvoll, die instrumentelle Periode in drei Abschnitte mit entsprechenden Epizentrenkarten zu unterteilen:

- 1975 – 1984 Analoges Stationsnetz
- 1985 – 2001 digitale Datenerfassung (kurzperiodische Wellenformdaten)
inkl. Übergang zum digitalen Breitbandnetz
- 2002 – 2013 digitales Breitbandnetz

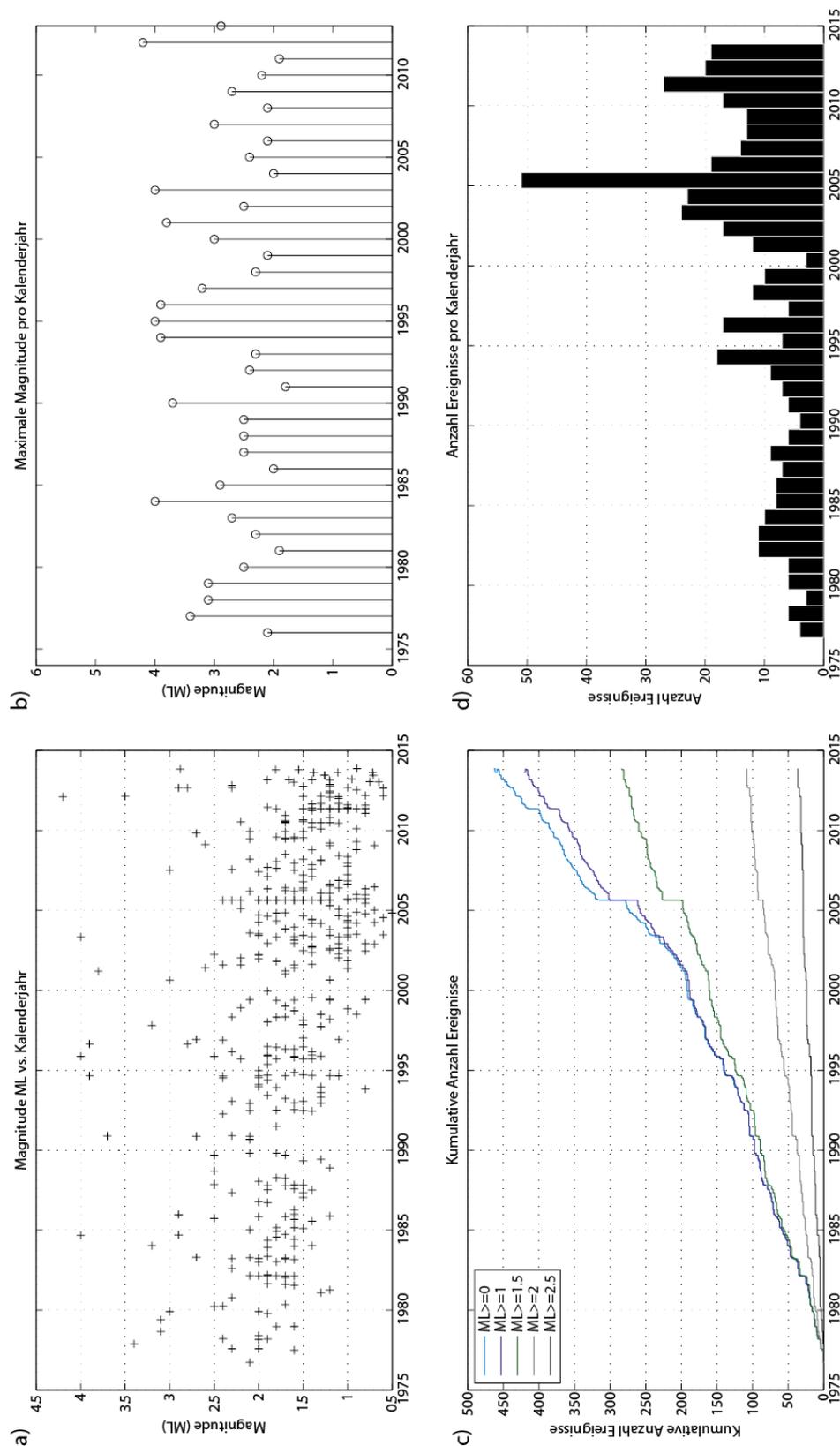


Abbildung 2.9: Magnituden- und Häufigkeits-Statistik der vom SED seit 1975 erfassten Erdbeben im Untersuchungsperimeter, die die Selektionskriterien erfüllen. Der Sprung in der kumulativen Häufigkeit und das Maximum im Histogramm der Anzahl Beben im Jahr 2005 wird durch die regen-induzierten Beben vom 22. bis 24. August 2005 im Bereich des Vierwaldstättersees verursacht.

2.3.4 Zeitraum 1975 - 1984

In den Jahren 1975 – 1984 ereigneten sich sechs Erdbeben mit einer Stärke von $M_L \geq 3.0$ im Untersuchungsperimeter (vgl. Tabelle 2.4). Vier dieser sechs Ereignisse wurden nördlich des Kantons Zug (Gebiet Sihlwald) lokalisiert. Das grösste dieser Erdbeben hatte eine Stärke von $M_L = 4.0$ (1984; nördl. Sihlbrugg). Alle diese Ereignisse haben sich in Tiefen grösser 25 km ereigneten. Das grösste registrierte Erdbeben hatte eine Stärke von $M_L 4.0$.

Tabelle 2.4: Erdbeben im Untersuchungsgebiet, im Zeitraum 1975 – 1984 mit einer Lokalmagnitude $M_L \geq 3$.

Jahr	Monat	Tag	Koordinaten (CH)		M_L	Tiefe (km)	Ort
1977	11	21	683800	237200	3.4	27	Gattikon
1978	8	28	711100	244500	3.1	25	Östl. Wetzikon
1979	5	26	685800	232000	3.1	31	Nördl. Sihlbrugg
1979	11	30	681500	236800	3.0	31	Albispass
1984	1	11	703900	243400	3.2	11	Wetzikon
1984	9	5	685000	233400	4.0	15	Nördl. Sihlbrugg

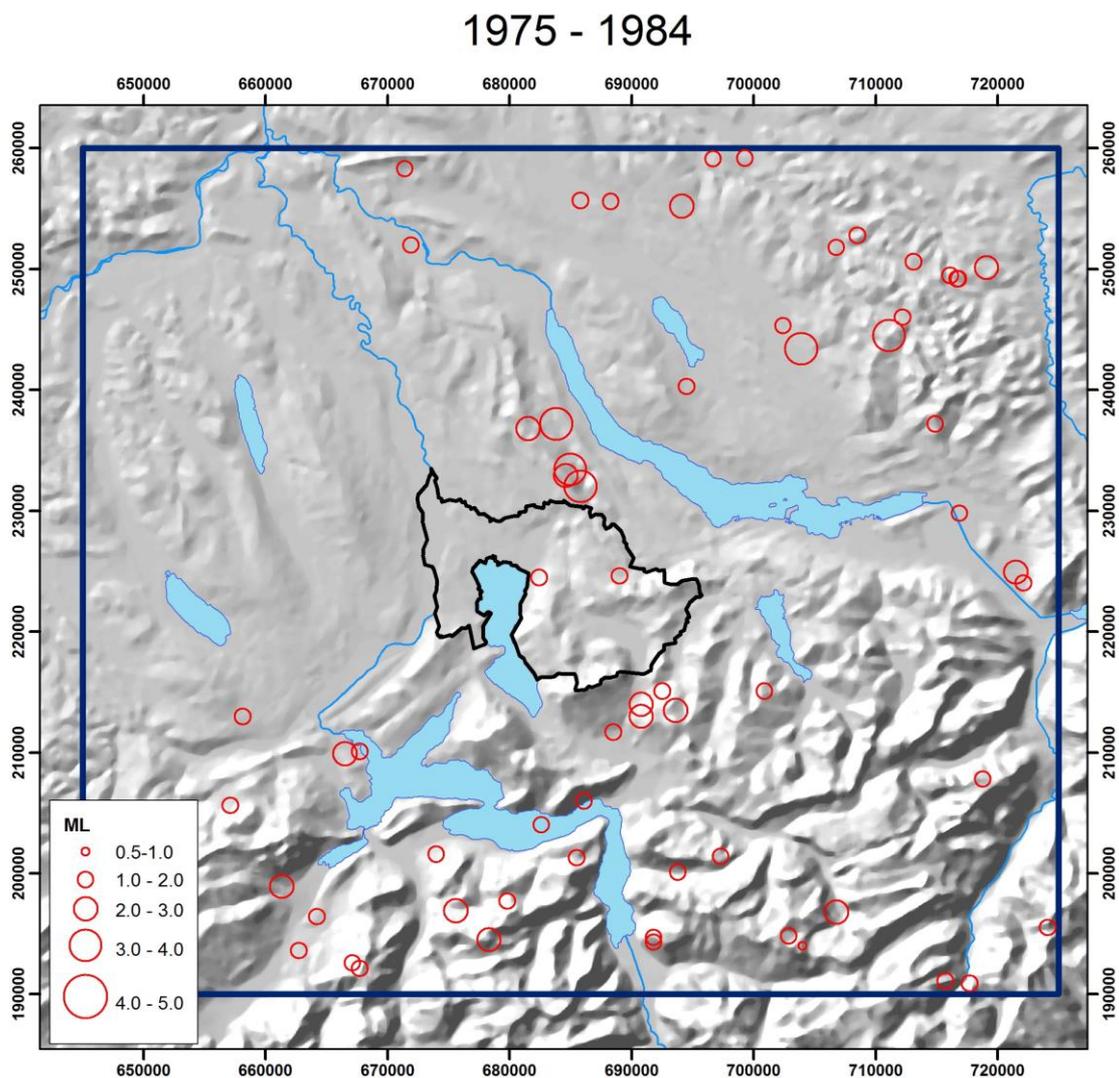


Abbildung 2.10: Instrumentell aufgezeichnete Erdbeben der Jahre 1975 – 1984 im Untersuchungsperimeter.

2.3.5 Zeitraum 1985 - 2001

Im Zeitraum 1985 – 2001 wurden sieben Erdbeben mit einer Stärke $M_L > 3.0$ registriert. Ein Beben (M_L 3.2, 23.10.1997) ereignete sich östlich von Menzingen, ein weiteres (M_L 4.0, 16.11.1995) bei Unteriberg. Die restlichen Ereignisse wurden entweder im Voralpenbereich oder bei Wil registriert.

Tabelle 2.5: Erdbeben im Untersuchungsgebiet, im Zeitraum 1985 - 2001 mit einer Lokalmagnitude $M_L \geq 3$. Beben auf dem Kantonsgebiet Zug sind fett hervorgehoben.

Jahr	Monat	Tag	Koordinaten (CH)		M_L	Tiefe (km)	Ort
1990	11	22	719200	194600	3.7	5	Linthal
1994	8	28	701600	191800	3.9	4	Unterschächen
1995	11	16	703200	212500	4.0	4	Unteriberg
1996	8	24	721100	253600	3.9	29	Südl. Wil
1997	10	23	689900	226000	3.2	30	Östl. Menzingen
2000	8	17	679500	200500	3.0	10	Südl. Beckenried
2001	3	17	719300	197600	3.8	3	Linthal

1985- 2001

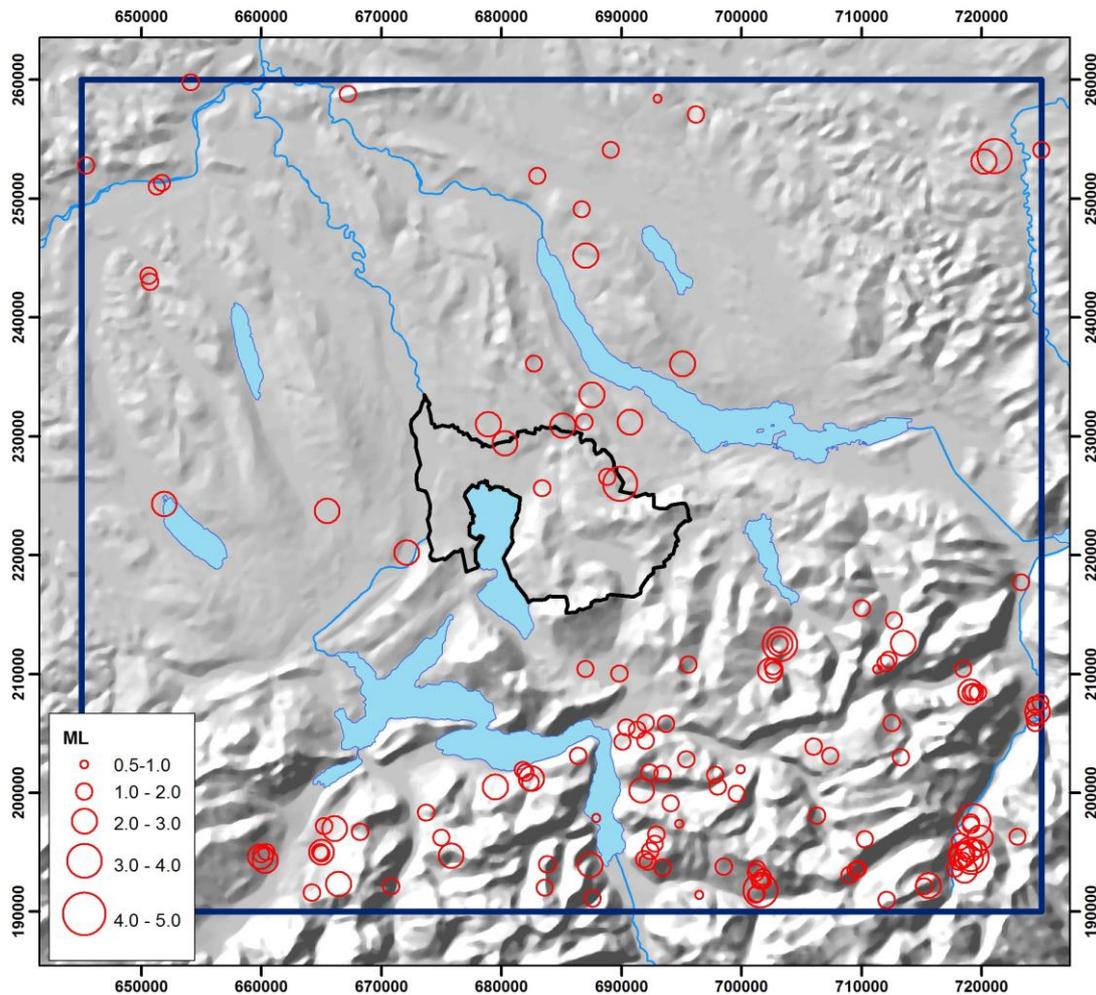


Abbildung 2.11: Instrumentell aufgezeichnete Erdbeben der Jahre 1985 - 2001 im Untersuchungsperimeter.

2.3.6 Zeitraum 2002 - 2013

Ab 2002 wurden vier Ereignisse mit Magnituden $M_L \geq 3.0$ im Untersuchungsperimeter aufgezeichnet. Zwei ereigneten sich 2012 südöstlich von Zug, wobei eines der beiden das M_L 4.2 Beben vom 11.02.2012 ist (vgl. spezielles Unterkapitel weiter unten). Die anderen beiden Erdbeben wurden im Voralpengebiet registriert. In diesem Zeitraum auffallend ist eine Häufung von Ereignissen (in Abbildung 2.12 blau markiert) zwischen dem 19.08. – 23.08.2005 im Voralpenbereich: Dabei handelt es sich um kleinere induzierte Erdbeben, welche durch starke Regenfälle ausgelöst wurden (vgl. Unterkapitel unten).

Tabelle 2.6: Erdbeben im Untersuchungsgebiet, im Zeitraum 2002 - 2013 mit einer Lokalmagnitude $M_L \geq 3$. Beben auf dem Kantonsgebiet Zug sind fett hervorgehoben.

Jahr	Monat	Tag	Koordinaten (CH)		M_L	Tiefe (km)	Ort
2003	5	6	711900	195800	4.0	3	Westl. Linthal
2007	7	12	701300	200500	3.0	0	Südl. Muotathal
2012	2	11	684400	222500	4.2	32	SE Zug
2012	2	24	683000	221900	3.5	32	SE Zug

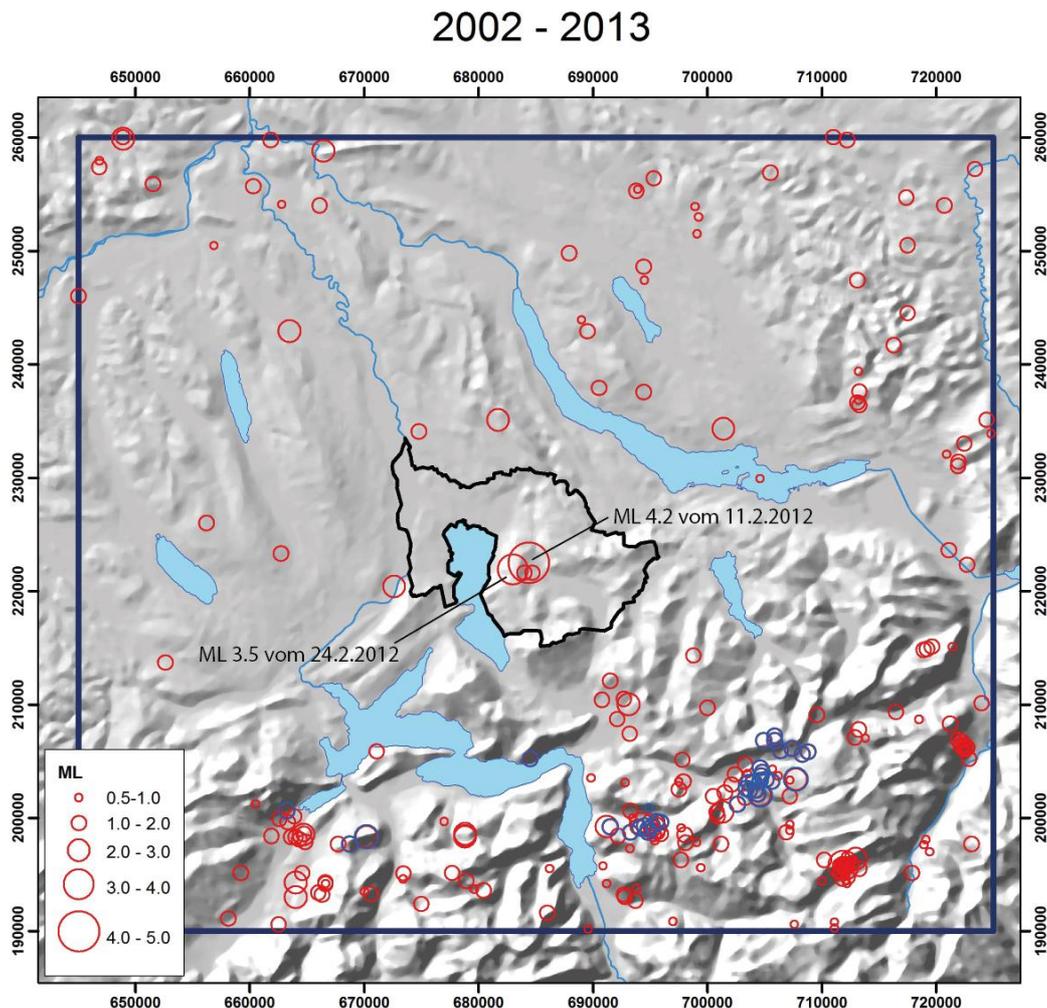


Abbildung 2.12: Instrumentell aufgezeichnete Erdbeben der Jahre 2002 - 2013 im Untersuchungsperimeter. Regeninduzierten Erdbeben zwischen 19. und 23. August, 2005 sind blau markiert.

In Tabelle 2.6 fällt auf, dass das M_L 3.0 Ereignis südlich von Muotathal eine Tiefe von 0 km aufweist. Dies kann auch bei anderen, hier nicht explizit aufgeführten Beben im Untersuchungsgebiet auftreten und hat folgenden Grund: Bei der Erdbebenlokalisierung sind die Herdtiefen allgemein mit grösseren Unsicherheiten behaftet als die Epizentralkoordinaten. Besonders wenn die Epizentralentfernung zur nächsten Station (D_{min}) ein Mehrfaches der Herdtiefe beträgt, ist mit grossen Fehlern in dieser Herdcoordinate zu rechnen. Für Beben im Kantonsgebiet Zug war D_{min} im gesamten instrumentellen Beobachtungszeitraum (ab 1975) nie kleiner als 15 km. Daraus muss geschlossen werden, dass die Zuverlässigkeit der Herdtiefenbestimmung für flache Erdbeben (bis ca. 15km Tiefe) in diesem Gebiet im besten Fall bei ± 5 km liegt und in der Regel grösser ausfällt.

Regen-induzierte Erdbeben im Sommer 2005 (Auszug aus Husen et al., 2007)

Zwischen dem 19. und 23. August 2005 ereignete sich eine unübliche Serie von 47 Erdbeben in nur 12 Stunden in der Zentralschweiz. Die Erdbeben wurden nach vier Tagen intensivem Regenfall (über 300mm Niederschlag) beobachtet. Abbildung 2.13 zeigt die Ereignisse in dieser Periode verglichen mit dem Niederschlag. Die höchste Seismizität wurde in der Region Muotathal und Riemenstalden registriert, einem bekannten Karstgebiet, welches speziell viel Niederschlag erhielt. Die hohe seismische Aktivität, verglichen mit der Hintergrundrate und der kurzen Zeitverschiebung zur Niederschlagsperiode lässt schlussfolgern, dass die Erdbeben durch die Regenfälle ausgelöst wurden. Die Herdtiefen der Ereignisse befanden sich zwischen der Oberfläche und 5 km Tiefe.

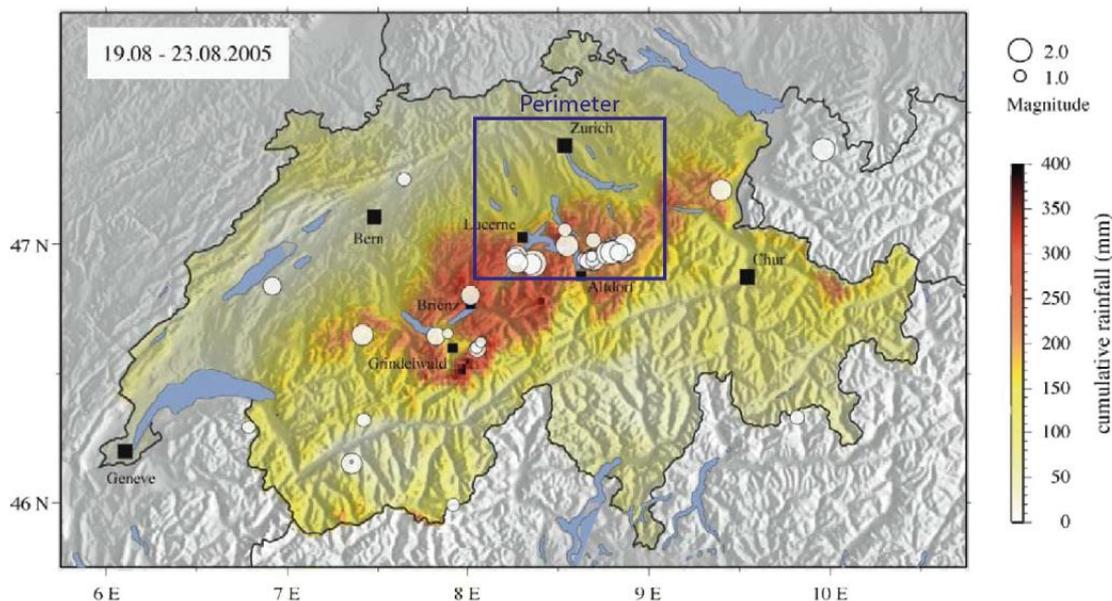


Abbildung 2.13: Niederschlagsmengen und Epizentren der regen-induzierten Erdbeben zwischen 19. und 23. August, 2005 (aus Husen et al. 2007). Der Untersuchungsperimeter ist blau umrandet.

Laut dem Modell von Husen et al. (2007) führte eine Erhöhung des Porendruckes an der Oberfläche auf Grund des starken Niederschlages zu einer lokalen Erhöhung Porendruckes in der

Tiefe. Dies wiederum hatte zur Folge, dass die Scherfestigkeit des porösen Gesteins reduziert wurde und es folglich brach (siehe auch Kapitel 3.2). Die Region war bereits in der Vergangenheit seismisch aktiv und es wurden Ereignisse ähnlicher Tiefen und Magnituden beobachtet. Husen et al. (2007) gehen davon aus, dass sich die Erdbeben auf bereits existierenden Brüchen ereigneten.

M_L 4.2 Ereignis bei Zug vom 11.02.2012

Auszug aus dem Jahresbericht 2012 des SED (Diehl et al., 2013)

Das M_L 4.2 Erdbeben von Zug ereignete sich am 11. Februar 2012 um 11:45 Lokalzeit zwischen dem Zuger- und dem Ägerisee. Es war das stärkste Erdbeben in der Schweiz seit dem M_L 4.3 Erdbeben bei Fribourg 1999 und dem M_L 4.9 Erdbeben bei Vallorcine 2005 (auf der französischen Seite der Grenze zwischen Martigny und Chamonix). Der Herd befand sich in einer Tiefe von 32 km. Auf Grund kurzer Distanzen (20 und 40 km) zu sieben Stationen konnte die Tiefe mit grosser Zuverlässigkeit bestimmt werden. Anhand eines kürzlich publizierten Modelles der Tiefe der Krusten-Mantel Grenze (Moho) (Wagner, Kissling, & Husen, 2012) ist bekannt das diese 34 km unter Zug liegt. Das M_L 4.2 Ereignis liegt somit praktisch auf dieser Grenze. Aus früheren Jahresberichten des SED ist bekannt, dass sich an derselben Stelle eine Gruppe anderer Erdbebenereignisse befindet (vgl. auch Abbildung 2.15).

In den zwei Wochen nach dem Hauptschock vom 11. Februar 2012 ereigneten sich drei Nachbeben mit ähnlicher Lokalität und Tiefe. Ein M_L 1.1 Ereignis ereignete sich in einer Tiefe von 28 km am 14. Februar, gefolgt von einem M_L 1.6 Ereignis in 29 km Tiefe am 18. Februar. Ein grösseres Nachbeben mit einer Stärke von M_L 3.5 und einer Tiefe von 32 km wurde am 24. Februar aufgezeichnet.

Das M_L 4.2 Hauptbeben wurde in grossen Teilen der ganzen Schweiz verspürt (vgl. Abbildung 2.14a). Weitaus weniger Meldungen gingen nach dem M_L 3.5 Nachbeben beim SED ein (vgl. Abbildung 2.14b). Die epizentrale Intensität (Intensität an der Oberfläche direkt über dem Beben) des Hauptbebens war IV mit einem relativ „flachen“ Intensitätsfeld typisch für tiefe Erdbeben. Es wurde eine maximale Intensität von V gemeldet, vermutlich hervorgerufen durch lokale Verstärkungseffekte.

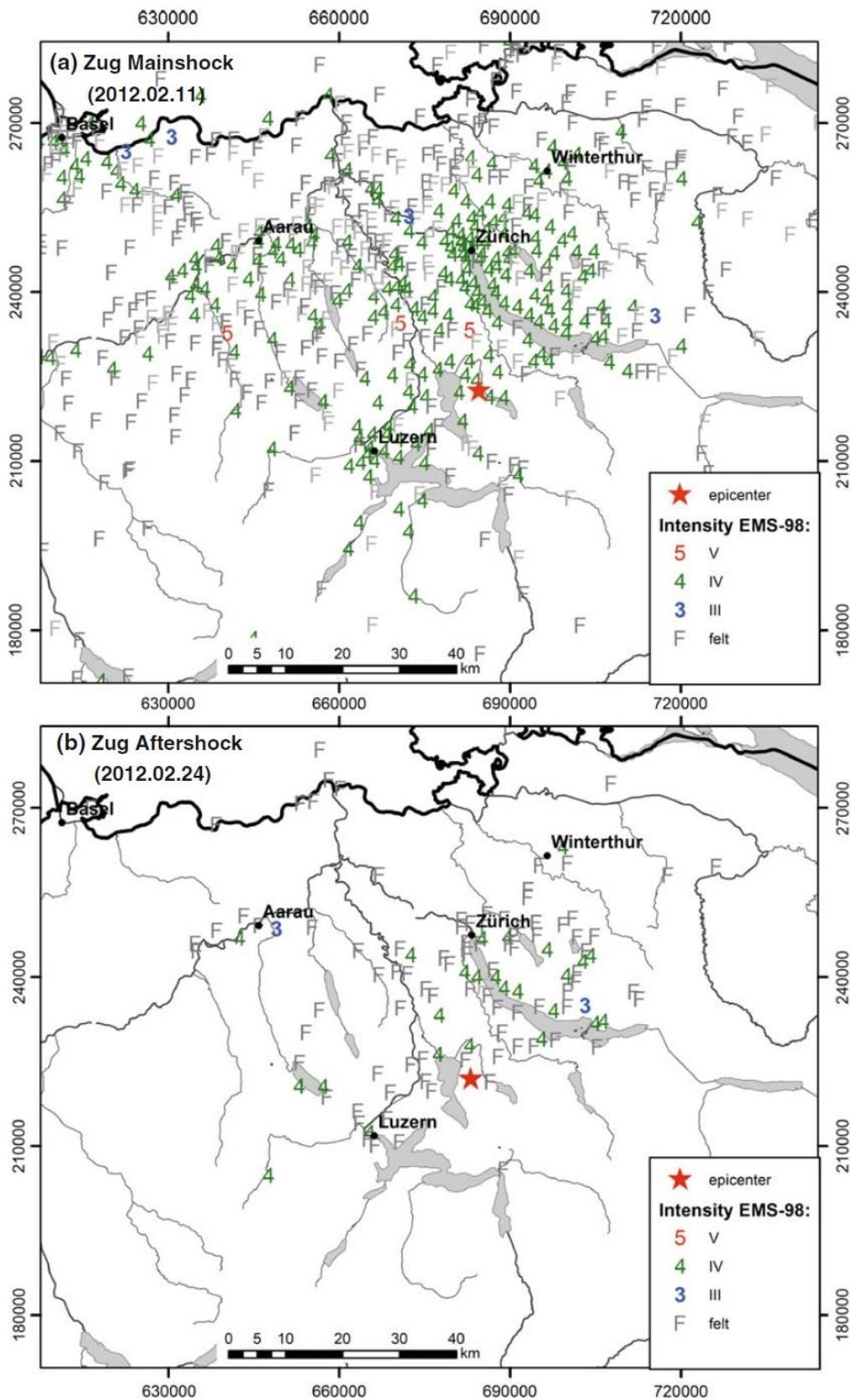


Abbildung 2.14: Makroseismische Intensitäten (EMS-98) des a) M_L 4.2 Zug Hauptschocks vom 11. Februar 2012 und b) dem stärksten Nachbeben mit einer Magnitude M_L 3.5 vom 24. Februar 2012.

2.3.7 Herdtiefen

Um die Hypozentren bzw. die Herdtiefen der selektierten Ereignisse im Untersuchungsperimeter (im Zeitraum 1975-2013) aufzuzeigen, wurde ein Profil senkrecht sowohl zum Alpenbogen als auch zum Verlauf der Tiefenisolinien der Kruste-Mantel-Grenze (Moho) erstellt (Abbildung 2.15). Es wurden alle Ereignisse mit einem maximalen Abstand von 35 km zur Profillinie projiziert.

Auffallend ist der Sprung in der maximalen Herdtiefe, der mit dem Übergang von der Molasse (im Mittelland) ins Helvetikum (Bereich der Voralpen) zusammenfällt. Unter dem nördlichen Alpenvorland erstrecken sich die Erdbebenherde bis fast zur Moho in rund 30 km Tiefe, während unter den Alpen, bei Mächtigkeiten der Erdkruste von 40 bis fast 60 km (in unserer Darstellung lediglich 40 km), die Beben auf die oberen 15 bis maximal 20 km beschränkt sind.

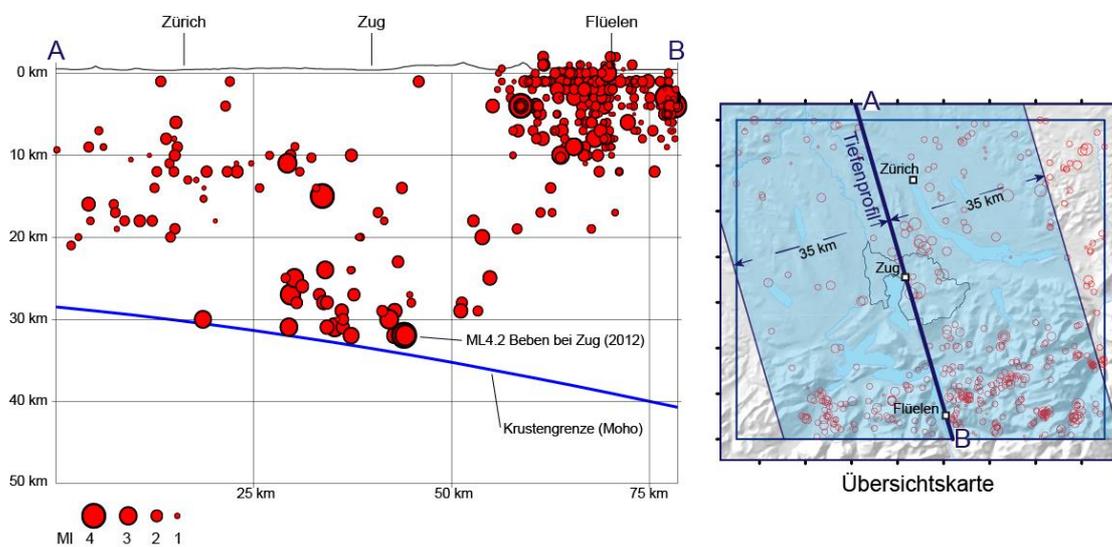


Abbildung 2.15: Tiefenprofil mit den Herdtiefen der selektierten Ereignisse im Untersuchungsperimeter (Zeitraum 1975-2013). Das Profil wurde senkrecht zum Alpenbogen gewählt.

Die Gründe für dieses Phänomen liegen im Verhalten der Gesteine bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen. Allgemein gilt, dass sich das Gestein bei tiefen Temperaturen, geringem Umgebungsdruck und hoher Verformungsrate spröde verhält. Es kommt dabei entweder zu einem Bruch, oder viel häufiger kommt es nach Überschreiten des Reibungswiderstandes zu einer plötzlichen und ruckartigen Verschiebung auf einer schon vorhandenen Bruchfläche. Bei höheren Temperaturen und langsamer Beanspruchung reagiert das Gestein duktil (plastische Verformung ohne dass es bricht) und beginnt allmählich zu fließen. Als Folge der Zunahme von Druck und Temperatur mit der Tiefe in der Erdkruste nimmt der Widerstand gegenüber spröder Verformung zu, während der Widerstand gegenüber duktiler Verformung abnimmt. Vereinfacht ergibt sich daher in einem gewissen Tiefenbereich ein Übergang zwischen einer spröden oberen Kruste und einer duktilen unteren Kruste. Das in vielen Teilen der kontinentalen Kruste beobachtete Abbrechen der Seismizität in einer Tiefe von 10 bis 20 km wird mit einem solchen spröde-duktilen Übergang gleichgesetzt. Die Tiefe dieses Überganges scheint in vielen Gebieten in erster Linie von dem an der Erdoberfläche gemessenen Wärmefluss und

damit von der Temperatur im Erdinneren, abhängig zu sein. Je wärmer die Bedingungen, desto weniger tief liegt der Abbruch seismischer Aktivität.

Die beschränkte Tiefenerstreckung der Beben unter den Alpen steht in gutem Einklang mit vielen anderen Beobachtungen weltweit. Eine Erklärung für die ungewöhnlich tiefen Erdbebenherde in der Nordschweiz ist hingegen nicht so einfach zu finden. Unter Berücksichtigung sowohl der aus dem Oberflächen-Wärmefluss in die Tiefe extrapolierten Temperaturen als auch der vermuteten Gesteinszusammensetzung der Unterkruste der Nordschweiz wäre zu erwarten, dass sich das Gestein ab einer Tiefe von rund 20 km duktil verhalten sollte und sich somit keine genügend hohe Spannungen aufbauen lassen, um Erdbeben auszulösen (N Deichmann & Rybach, 1989). Diese Aussage gilt für trockene Gesteine oder wenn die vorhandenen Fluide unter geringem Druck stehen. Nähert sich hingegen der Fluiddruck dem lithostatischen Druck, dann kann sich die Festigkeit des Gesteins gegenüber spröder Verformung genügend verringern, dass es auch in Zonen, in denen sonst ein duktileres Verhalten erwartet würde, zu bruchartigen Vorgängen kommt. Wie gross die Fluidmengen sein müssen, um zumindest stellenweise annähernd lithostatischen Druck zu erreichen und somit Erdbeben auszulösen, und ob die benötigten Mengen auch wirklich in der unteren Kruste der Nordschweiz vorhanden sind, bleibt eine offene Frage. Ausserdem stellt sich dann die Frage, warum dieser Mechanismus unter der Nordschweiz auftritt, in den meisten anderen Gebieten, insbesondere unter den Alpen, aber nicht existiert.

Beben mit Herdtiefen kleiner 15km

Die Erfahrung aus vergangenen geotechnischen Projekten hat gezeigt, dass die Injektion von Fluiden in oder nahe einer tektonisch aktiven Verwerfung induzierte Erdbeben mit unakzeptablen Magnituden verursachen kann (zuletzt z.B. in St. Gallen). Es ist deshalb ratsam die natürliche Seismizität in der Umgebung eines geplanten Tiefengeothermieprojektes daraufhin zu untersuchen, ob Hinweise auf aktive Störungen vorhanden sind und ob Erdbeben in unmittelbarer Nähe des geplanten Standortes aufgetreten sind. Von besonderem Interesse für diese Fragestellung sind die natürlichen Erdbeben in der Oberkruste (Tiefe < 15m).

Einschränkend muss vorausgeschickt werden, dass Erdbebenkataloge, wie sie bei der Routineauswertung eines Erdbebendienstes erstellt werden, in der Regel nicht die Auflösung und die Vollständigkeit liefern können, die nötig ist um Verwerfungen von wenigen Kilometern Länge zu identifizieren. Unter günstigen Umständen kann die Auflösung für einen Teil des Kataloges durch die Neuauswertung von digitalen Daten, mit Hilfe einer sog. Relativlokalisierung soweit verbessert werden, dass aktive Störungen erkannt werden können. In Abbildung 2.16 sind die instrumentell aufgezeichneten Erdbeben mit Herdtiefen kleiner 15km dargestellt, die im Untersuchungsgebiet aufgetreten sind.

1975 - 2013, 0-15 km Tiefe

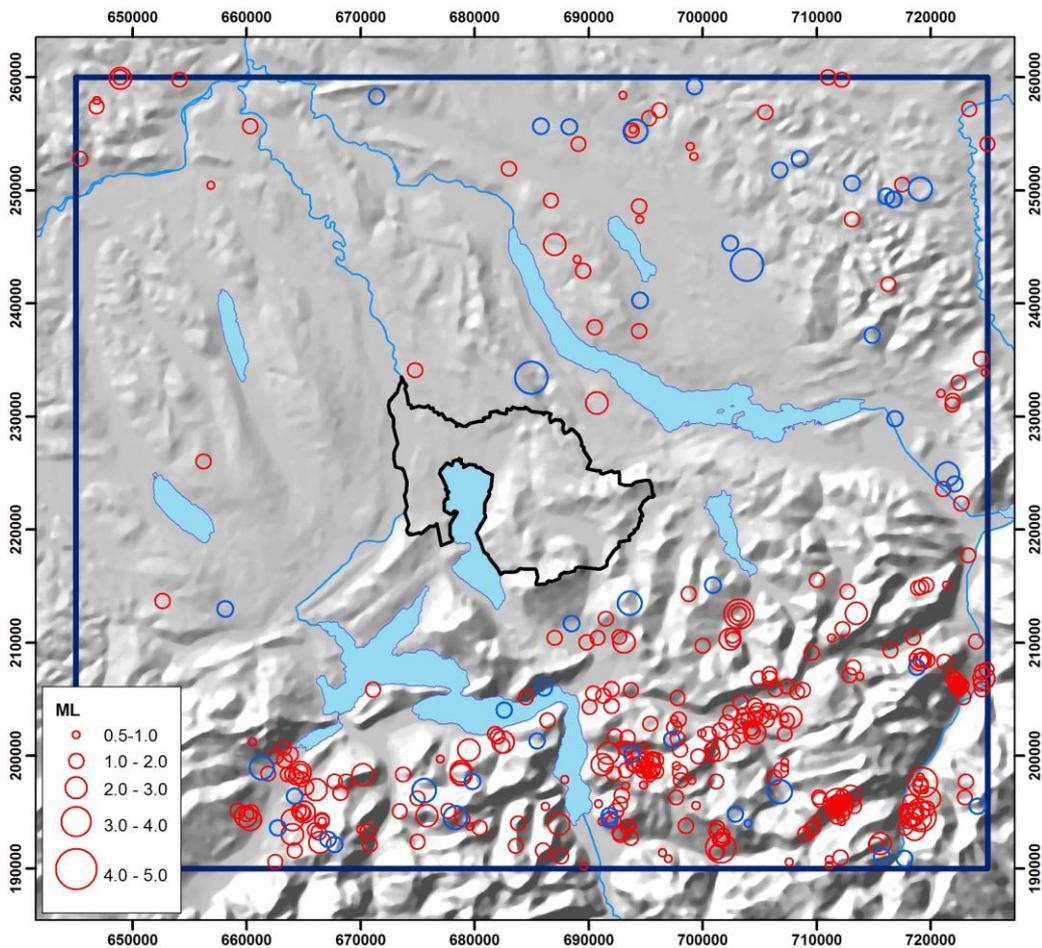


Abbildung 2.16: Instrumentell aufgezeichnete Erdbeben der Jahre 1975 - 2013 im Untersuchungsperimeter mit einer Tiefe kleiner oder gleich 15km. Beben vor 1984 sind in blau eingezeichnet.

Wie oben diskutiert, treten im voralpinen Bereich kaum Erdbeben in diesem Tiefenbereich auf. Im Helvetikum findet die Erdbebentätigkeit jedoch hauptsächlich in der Oberkruste statt. Für das Kantonsgebiet Zug ist bisher kein Beben bekannt, das sich in einer Tiefe von weniger als 15 km ereignet hat. Auch in der unmittelbaren Nachbarschaft des Kantons gibt es nur sehr wenige bekannte Beben dieser Art. Auf Grundlage des existierenden Erdbebenkataloges ist es deshalb nicht möglich, allfällige aktive Störungen im Kanton Zug oder seiner nächsten Umgebung zu identifizieren. Eine Neuauswertung digitaler Daten ist in diesem Bereich, sowie im gesamten voralpinen Bereich des Untersuchungsgebietes für den hier diskutierten Tiefenbereich nicht sinnvoll.

Aus der geringen Seismizität der Oberkruste des Kantons Zug und seiner nächsten Umgebung kann nicht abgeleitet werden, dass in diesem Bereich keine tektonisch aktiven Störungen existieren. Zum einen ist der hier betrachtete Zeitraum (1975-2013) in Anbetracht der geringen Erdbebenaktivität sehr kurz und es besteht die Möglichkeit, dass entsprechende Strukturen sich bisher einfach noch nicht abgezeichnet haben. Andererseits muss eine aktive tektonische Verwerfung nicht zwangsläufig auch seismisch aktiv sein.

Für den Bereich des Helvetikums erkennt man in Abbildung 2.16 mehrerer annähernd OW-orientierte lineare Strukturen in der Epizentrenverteilung der flachen Beben. Die Orientierung der Lineamente folgt in guter Näherung dem Streichen der helvetischen Front. Ob diese linearen Strukturen realen aktiven Verwerfungen entsprechen können mit dem hier betrachteten Erdbebenkatalog aus der Routineauswertung des SED nicht eindeutig entschieden werden. Eine Neuauswertung der digitalen Daten mit modernen Relokalisierungsmethoden könnte helfen diese Frage zu beantworten. Für den Kanton Zug ist diese Untersuchung jedoch nur von untergeordneter Bedeutung, da die linearen Strukturen zu weit vom Kantonsgebiet entfernt sind.

2.4 Herdmechanismen und Spannungsfeld

Die Beben im Untersuchungsgebiet sind Ausdruck der in diesem Gebiet vorherrschenden tektonischen Spannungen und sind typisch für die Seismizität im ganzen nördlichen Alpenvorland. Herdmechanismen konnten für 26 der seit 1975 instrumentell erfassten Beben in der hier betrachteten Region erstellt werden. Sie sind als stereographische Diagramme in Abbildung 2.16 dargestellt und ihre Parameter sind in Tabelle 2.7 zusammengefasst. Die im Kapitel über die Tiefenverteilung der Erdbeben aufgezeigte Zweiteilung des Untersuchungsgebietes tritt für die 26 bekannten Herdmechanismen noch deutlicher zutage. Im Bereich nordwestlich der Grenze zwischen Alpenvorland und Helvetikum (näherungsweise die Linie Luzern-Rapperswil) und im gesamten Kantonsgebiet Zug, sind nur Herdmechanismen für Beben in Tiefen von mehr als 15km bekannt. Im Bereich südöstlich dieser Linie sind hingegen, bis auf eine, nur Herdflächenlösungen für Beben mit weniger als 15 km Herdtiefe vorhanden.

1975–2012

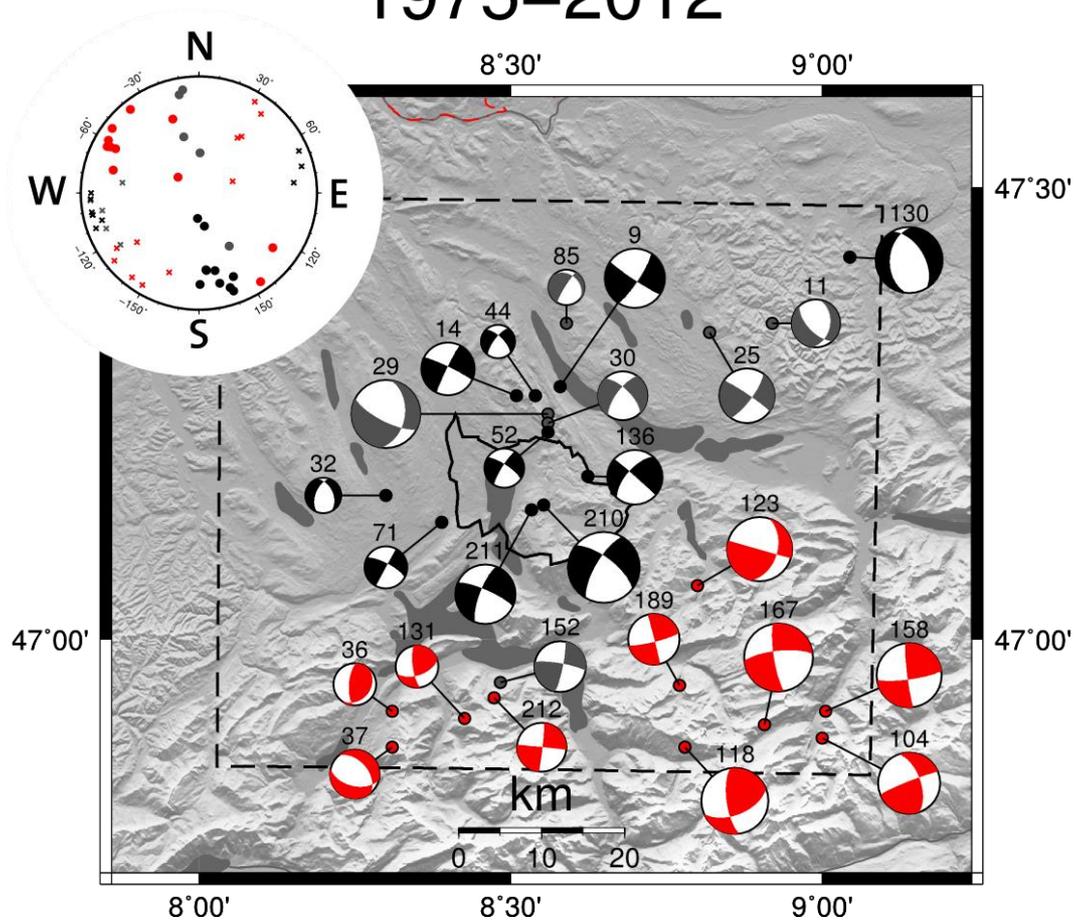


Abbildung 2.16: Karte der 26 bekannten Herdmechanismen im Untersuchungsgebiet für die Phase der instrumentellen Registrierung von 1975-2012. Die Grösse der Herdmechanismen skaliert mit der Magnitude der Beben, die Farbe entspricht den Herdtiefenbereichen: Rot: 0-10km; Grau:10-25km; Schwarz: 25-35km. Die Nummern der Herdmechanismen entsprechen denen in Tabelle 2.7. Oben links sind die P-Achsen (Kompressionsachse; Punkte) und T-Achsen (Extensionsachse; Kreuze) der Herdmechanismen in einem stereographischen Diagramm dargestellt.

Tabelle 2.7: Parameter der 26 bekannten Herdmechanismen im Untersuchungsgebiet für die Phase der instrumentellen Erdbebenüberwachung vom 1975-2012. Die in der letzten Spalte angegebenen Referenzen sind: K04 = Kastrup et al. (2004) und SED = Deichmann (2012) & Diehl et al. (2013).

Nr.	Herdzeit		Koordinaten		Tiefe [km]	ML	Bruchfläche 1			Bruchfläche 2			P-Achse		T-Achse		Lokation	Ref.
	[UTC]	[UTC]	Lat.	Lon.			Strike	Dip	Rake	Strike	Dip	Rake	Strike	Dip	Strike	Dip		
9	1977-11-21	19:27	47.28	8.58	25	3.5	33	80	-5	124	85	-170	349	11	258	4	Horgenb	K04
11	1978-08-28	14:44	47.35	8.92	22	2.8	9	40	-46	137	62	-120	1	60	249	12	Baeretswil	K04
14	1979-11-30	00:44	47.27	8.51	27	3.1	296	84	-176	206	86	-6	161	7	251	1	Albis	K04
25	1984-01-11	14:11	47.34	8.82	11	3.2	36	76	5	304	85	166	351	6	259	13	Wetzikon	K04
29	1984-09-05	05:16	47.25	8.56	15	4.0	8	44	-26	117	72	-131	345	46	236	17	Albis	K04
30	1984-09-14	22:30	47.24	8.56	24	2.9	315	67	-158	216	70	-25	175	31	266	2	Albis	K04
32	1985-01-07	09:52	47.16	8.30	27	2.1	336	46	-125	201	54	-59	170	65	270	4	Hochdorf	K04
36	1985-09-29	23:36	46.92	8.31	1	2.5	39	26	122	184	68	75	285	22	70	64	Kerns	K04
37	1985-12-21	17:19	46.88	8.31	2	2.9	320	46	-63	104	50	-115	307	71	211	2	Sachselsn	K04
44	1986-10-08	03:12	47.27	8.54	28	2.0	315	66	-160	217	72	-25	174	30	267	4	Albis	K04
52	1987-05-05	20:29	47.23	8.56	29	2.3	304	75	-170	211	80	-15	167	18	258	4	Albis	K04
71	1988-09-11	23:01	47.13	8.39	29	2.5	298	74	180	28	90	16	162	11	254	11	Root	K04
85	1989-10-24	12:03	47.35	8.59	12	2.1	314	30	-166	212	83	-61	150	44	278	32	Zürich	K04
104	1990-11-22	15:51	46.89	9.00	5	3.6	341	60	6	248	85	150	298	17	200	24	Tödi	K04
118	1994-08-28	06:04	46.88	8.78	4	3.9	68	56	156	172	70	36	297	9	34	39	Schaecheental	K04
123	1995-11-16	05:57	47.06	8.80	4	3.8	16	45	0	286	90	135	341	30	231	30	Iberg	K04
130	1996-08-24	02:38	47.42	9.05	29	3.9	184	42	-63	330	53	-112	183	72	75	6	Kirchberg	SED
131	1996-12-07	05:34	46.91	8.43	2	2.5	172	74	36	70	56	160	297	11	36	37	Oberriickenbach	SED
136	1997-10-23	12:07	47.18	8.62	30	3.2	221	65	-2	312	88	-155	179	19	84	16	Menzingen	SED
152	2000-08-17	07:14	46.95	8.48	10	3.0	280	80	172	11	82	10	145	1	235	13	Beckenried	SED
158	2001-03-17	00:30	46.92	9.01	3	3.8	82	80	175	173	85	10	307	3	38	11	Linthal	SED
167	2003-05-06	22:00	46.91	8.91	3	4.0	264	74	-169	171	79	-16	127	19	218	3	Urnerboden	SED
189	2007-07-12	00:09	46.95	8.77	2	3.0	76	82	-178	346	88	-8	301	7	31	4	Muotathal	SED
210	2012-02-11	22:45	47.15	8.55	32	4.2	308	68	-160	210	72	-23	168	29	260	2	Zug	SED
211	2012-02-24	00:32	47.14	8.53	32	3.5	294	78	-164	201	74	-12	158	20	67	3	Zug	SED
212	2012-09-04	05:13	46.94	8.47	9	2.9	6	87	1	276	89	177	321	1	231	3	Beckenried	SED

Die meisten Herdmechanismen in den beiden Bereichen sind vom Typ der horizontalen Blattverschiebung, was darauf hindeutet, dass die minimale Hauptspannungsrichtung des rezenten tektonischen Spannungsfeldes im Allgemeinen subhorizontal ausgerichtet ist. Im Bereich der tiefen Beben ist eine leichte Abschiebungstendenz zu erkennen, die sich durch das vermehrte Auftreten von P-Achsen (Richtung maximaler Kompression) in der Nähe des Zentrums des stereographischen Diagrammes in Abbildung 2.16 abzeichnet.

Im Bereich der flachen Beben im Südosten des Untersuchungsgebietes ist eine Rotation der P-Achsen um ca. 45°- 50° im Gegenuhrzeigersinn gegenüber derjenigen der tiefen Beben des nordöstlichen Bereiches zu erkennen. Dies deutet auf eine entsprechende Rotation der horizontalen Hauptspannungsrichtungen in diesem Bereich hin. Entsprechende Ergebnisse haben Kastrup et al. (2004) bei der Herleitung des tektonischen Spannungsfeldes der Schweiz aus Erdbebenherdmechanismen der Jahre bis 1999 erhalten. Die Autoren fanden die Orientierung der kleinsten horizontalen Hauptspannung (Sh) im Alpenvorland im Bereich des Untersuchungsgebietes in Richtung ONO-WSW ausgerichtet (F5 in Abbildung 2.17). Im Bereich des Helvetikums des Untersuchungsgebietes (H3 in Abbildung 2.17) liegt die Orientierung von Sh jedoch in Richtung NO-SW. Zudem beobachten Kastrup et al. (2004) für das Helvetikum, neben den dominanten horizontalen Blattverschiebungen, eine leichte Tendenz zu Überschiebungen. Diese ist auch für das hier betrachtete Untersuchungsgebiet zu erkennen, aber nur sehr schwach ausgeprägt (vergl. vereinzelt nahe am Zentrum des stereographischen Diagrammes liegende T-Achsen (Richtung der maximalen Extension) in Abbildung 2.16).

Aufgrund der Herdtiefenverteilung der Beben mit bekannten Herdmechanismen im Untersuchungsgebiet müssen sich Aussagen über das Spannungsfeld im Helvetikum auf die Ober-

kruste (oberste 10-15 km) und im Bereich des Alpenvorlandes auf die Unterkruste beschränken. Dies bedeutet in letzter Konsequenz, dass im Untersuchungsgebiet keine verlässlichen Aussagen über das Spannungsfeld der obersten 10-15 km der Erdkruste im Bereich des Alpenvorlandes und des gesamten Kantonsgebietes Zug gemacht werden können. Leider liegen in diesen Bereichen auch kaum relevante Daten aus Tiefbohrungen vor die diese Lücke schliessen könnten. Eine kürzlich durchgeführte Re- und Neuinterpretation solcher Bohrlochdaten in der Nordschweiz listet im Untersuchungsgebiet einzig die Tiefbohrung Sonnengarten-GT1 in Zürich auf (Heidbach & Reinecker, 2013). Ob für weitere Bohrungen im Untersuchungsgebiet relevante Daten für eine Ableitung des Spannungsfeldes erhoben wurden und ob diese in ausreichender Qualität vorliegen, ist uns nicht bekannt.

Um zumindest qualitative Aussagen über das Spannungsfeld in den obersten 10-15 km der Erdkruste im Kanton Zug und dem Alpenvorland im Untersuchungsgebiet machen zu können, muss die Auswertung der Herdmechanismen auf ein grösseres Gebiet ausdehnt werden. In Abbildung 2.17 ist das Spannungsfeld der Schweiz, wie von Kastrup et al. (2004) und Marschall et al. (2013) aus Erdbebenherdmechanismen abgeleitet, in sieben tektonische Spannungsregime eingeteilt. Das nördlichste Symbol stellt das im Mittel in Westeuropa beobachtete Spannungsregime dar. Wie in der Abbildung zu sehen, zeichnet sich im Spannungsfeld des schweizerischen Alpenvorlandes (Symbole nördlich der Helvetischen Front (H.F.)) eine Rotation der Hauptspannungsrichtungen im Gegenuhrzeigersinn ab, je weiter man nach Westen wandert. Die Rotation folgt in guter Näherung dem Streichen des Alpenbogens und ist ein Indiz dafür, dass die Alpenbildung die treibende Kraft der tektonischen Spannungen in diesem Bereich darstellt.

Im Gegensatz zur Situation im Untersuchungsgebiet sind bei der Ableitung des Spannungsfeldes im gesamtschweizerischen Alpenvorland auch Herdmechanismen von Beben in den oberen 15 km der Erdkruste eingegangen. Im Alpenvorland zeigt sich somit im grösseren Umfeld des Untersuchungsgebietes ein Spannungsregime, dass von Blattverschiebungen mit Tendenz zu Abschiebungsmechanismen geprägt ist und dessen maximale horizontale Hauptspannungsrichtung (SH) von Richtung NNW-SSE im Osten auf Richtung NW-SO im Westen rotiert. Es ist deshalb anzunehmen, dass auch in der oberen Kruste des Alpenvorlandes im Untersuchungsgebiet, zumindest im regionalen Mittel, Spannungen vorherrschen, die sich in dieses Muster einfügen.

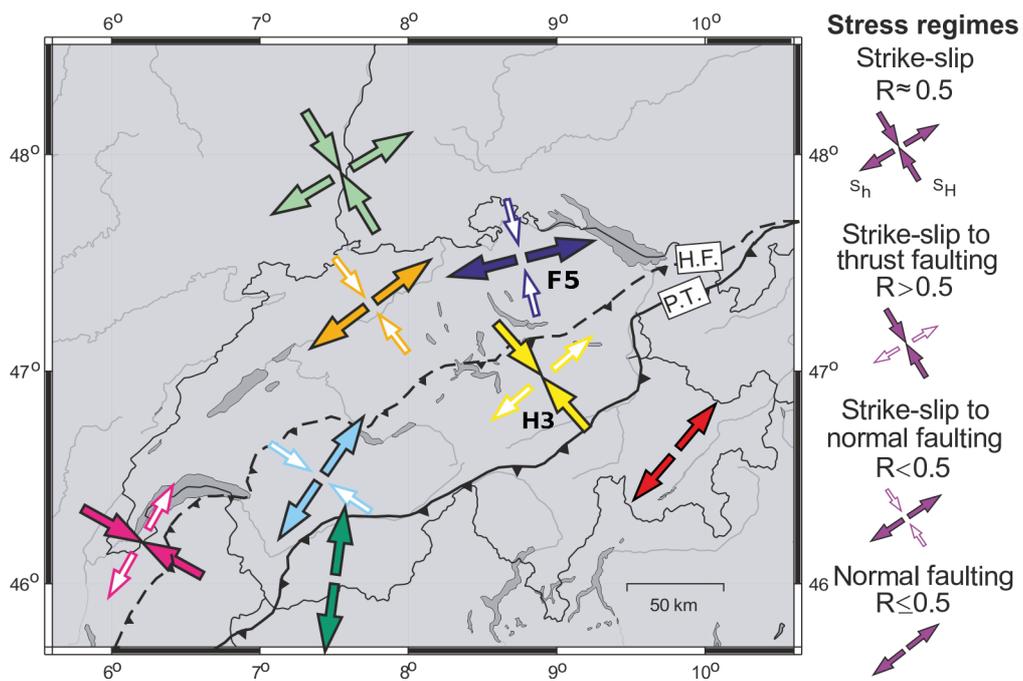


Abbildung 2.17: Karte der horizontalen Ausrichtung des Spannungsfeldes in der Schweiz, abgeleitet aus der Analyse von Erdbebenmechanismen (Kastrup et al. 2004, Marschall et al. 2013).

2.5 Seismische Gefährdung

Die aktuelle seismische Gefährdungskarte der Schweiz von 2004 (Abbildung 2.18, (Wiemer, Giardini, Fäh, Deichmann, & Sellami, 2009)) zeigt für die Untersuchungsregion eine im schweizerischen Durchschnitt mittlere Gefährdung. Dabei ist die Gefährdung des Bereiches des Helvetikums (Bereich der Voralpen) geringfügig höher als die des alpinen Vorlandes. Das bedeutet, dass im gesamten Untersuchungsgebiet Schadensbeben möglich sind, aber seltener auftreten als etwa im Wallis, in Graubünden oder in Basel. Die maximal möglichen Magnituden von Extremereignissen sind dabei unseres Wissens nach in der Untersuchungsregion nicht anders als im Rest der Schweiz bzw. der Alpenregion. Da es zudem keine verlässlichen Kartierungen der aktiven Verwerfung im kristallinen Grundgebirge gibt, sind auch Erdbeben bis hin zu einer Magnitude von etwa 7 in der gesamten Schweiz nicht auszuschliessen und möglich. Allerdings ist ihre Auftretenswahrscheinlichkeit im Untersuchungsgebiet sehr gering. An dieser Beurteilung der Gefährdung in der Untersuchungsregion wird sich prinzipiell auch im neuen Gefährdungsmodell der Schweiz, das im Jahr 2014 publiziert wird, nichts ändern.

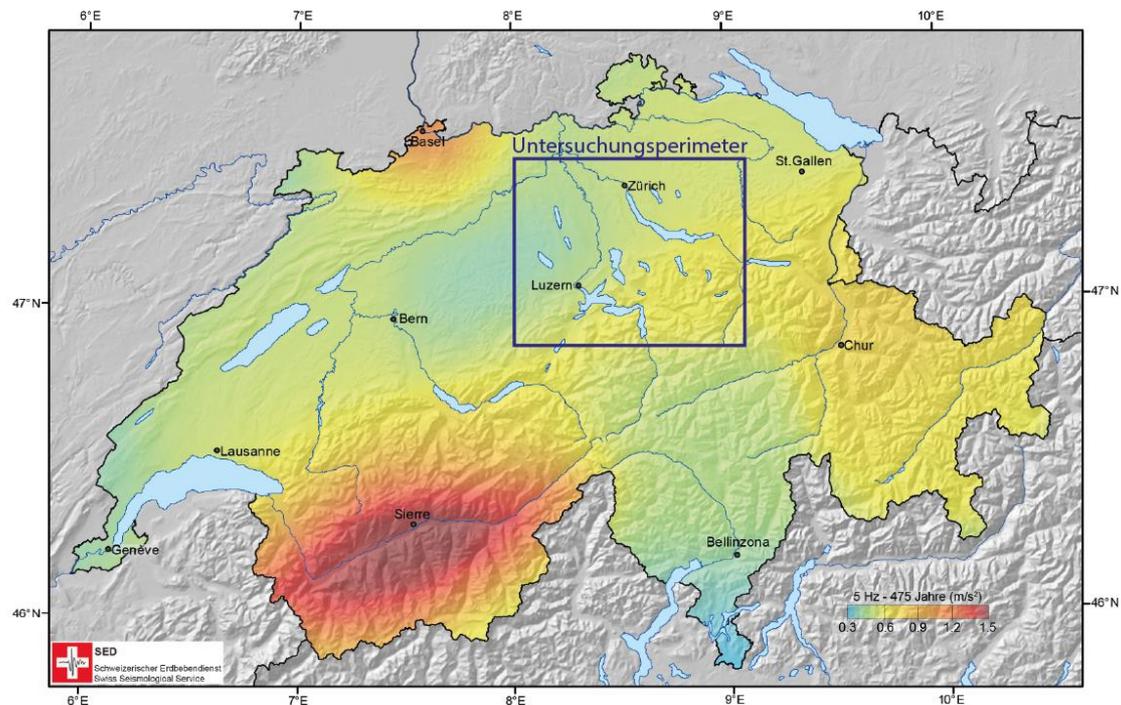


Abbildung 2.18: Seismische Gefährdungskarte der Schweiz mit blau eingezeichnetem Untersuchungsperimeter.

Um zu quantifizieren, wie häufig Erdbeben im Untersuchungsgebiet im Mittel erwartet werden, zeigen wir in Abbildung 2.19 die jährliche Magnituden-Häufigkeitsbeziehung. Daraus lässt sich ablesen, dass pro Jahr etwa 1-2 Erdbeben mit Magnitude ≥ 2.5 in dem 5600 km² grossen Untersuchungsgebiet zu erwarten sind. Ein Schadensbeben ($M \geq 5.0$) ist etwa mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.01 zu erwarten (d.h., etwa alle 80 - 160 Jahre), ein Extremereignis mit Magnitude ≥ 6.0 mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.001 (bzw. alle 800 - 1600 Jahre) oder Mag-

nitude ≥ 7.0 mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.00003 bzw. alle 30000 - 40000 Jahre, vgl. Abbildung 2.19.

Mit diesem Modell lässt sich auch eine Abschätzung der rein zufälligen Korrelation von natürlichen Erdbeben und dem Geothermieprojekt ableiten: Nimmt man an, dass Erdbeben in der unmittelbaren Umgebung des Bohrplatzes (< 3 km) mit dem Projekt assoziiert würden (~ 0.5 % des Untersuchungsgebietes), dann ergibt sich eine jährliche Wahrscheinlichkeit von etwa 0.5 – 1% einer rein zufälligen Korrelation von natürlicher Seismizität der Magnitude $M \geq 2.5$ und dem Geothermieprojekt. Ein natürlich auftretendes Schadensbeben ($M \geq 5.0$) in der unmittelbaren Umgebung des Bohrplatzes ist nur mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 0.00005 zu erwarten. Falls zukünftige Erdbeben im Untersuchungsgebiet mit einer ähnlichen Tiefenverteilung auftreten wie die bisher bekannten Beben, können diese Wahrscheinlichkeiten auf dem Kantonsgebiet Zug aufgrund der geringen Anzahl flacher Beben auch noch um den Faktor 2-3 geringer ausfallen.

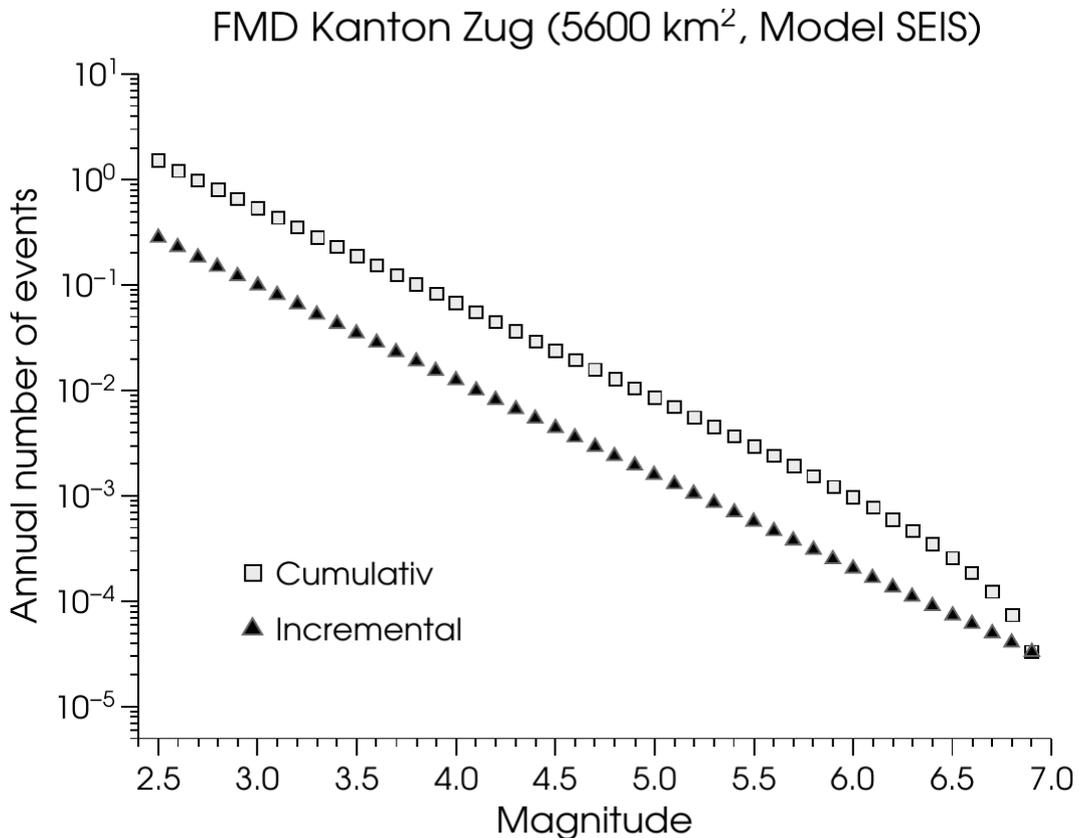


Abbildung 2.19: Kumulative und nicht-kumulative Magnituden-Häufigkeit von Erdbeben im Untersuchungsgebiet. Die Kurven geben an wie viele Erdbeben einer bestimmten Magnitude (nicht-kumulativ) oder grösser-gleich einer bestimmten Magnitude (kumulativ) pro Jahr im Untersuchungsgebiet zu erwarten sind. Die Herdtiefe ist hierbei unberücksichtigt.

Lokale Amplifikation

Auf Grund von lokalen Bodenbeschaffenheiten kann sich die Wirkung (Bodenbewegung) eines Erdbebens verstärken (Amplifikation) oder abschwächen. Es ist bekannt, dass z.B. weiche Böden wie sie bei grossen Schwemmebenen anzutreffen sind im Vergleich zu felsigem Untergrund die durch Erdbeben ausgelösten Bodenbewegungen verstärken. Als direkte Konsequenz können die Auswirkungen eines Erdbebens grösser sein. Dies kann z.B. eine Erklärung dafür sein, dass Erdbeben lokal, in eng benachbarten Bereichen, stärker oder schwächer verspürt werden. Bei stärkeren Schadensbeben kann es dadurch auf engem Raum starke Unterschiede im Grad der Beschädigung von Gebäuden geben.

Da der Untergrund in der Schweiz sehr heterogen ist (dieser reicht von felsigem Untergrund über Moränen bis hin zu grossen Schwemmebenen) ist es wichtig, diese lokalen Effekte bei einer Risikostudie miteinzubeziehen. Abbildung 2.20 zeigt die vom SED berechneten lokalen Amplifikationen in der Schweiz. Diese Karte ist bewusst in einem sehr grossen Massstab gewählt und dient hier lediglich als Beispiel. In einer Risikoanalyse sollte diese Thematik projektspezifisch im Detail erarbeitet werden.

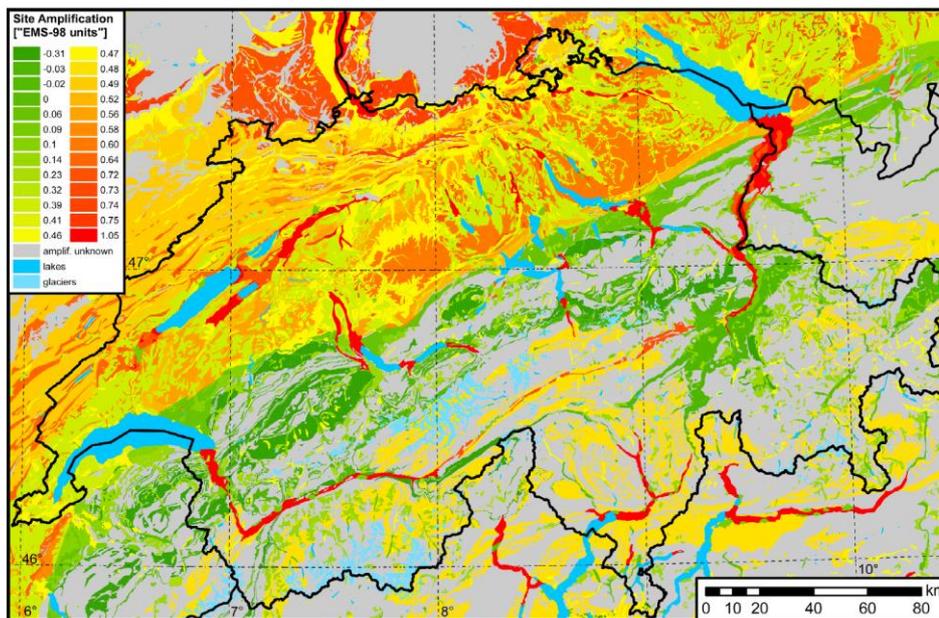


Abbildung 2.20: Indikative Karte der Amplifikation bei Erdbeben in der Schweiz (Fäh et al., 2011)

Erdbebenrisiko

Die Abschätzung der seismischen Gefährdung ist der erste Schritt, um das seismische Risiko zu beurteilen und zu begrenzen, was ein weiteres Tätigkeitsfeld des SED darstellt. Das seismische Risiko definiert sich als die Verknüpfung zwischen seismischer Gefährdung, lokalem Untergrund, Faktoren der betroffenen Werte (Siedlungsdichte und Raumnutzung) und der Verletzbarkeit (speziell Bausubstanz und Infrastruktur). Diese ist in Abbildung 2.21 schematisch dargestellt. Die indikative Erdbebenrisikokarte der Schweiz (Abbildung 2.22) zeigt, dass auch

in Regionen mit vergleichsweise niedrigerer Gefährdung aufgrund eines weichen Untergrundes und einer hohen Besiedelungsdichte – z.B. die Stadt Zürich – das finanzielle Erdbebenrisiko pro Quadratkilometer hoch ist.



Abbildung 2.21: Berechnung des Erdbebenrisikos

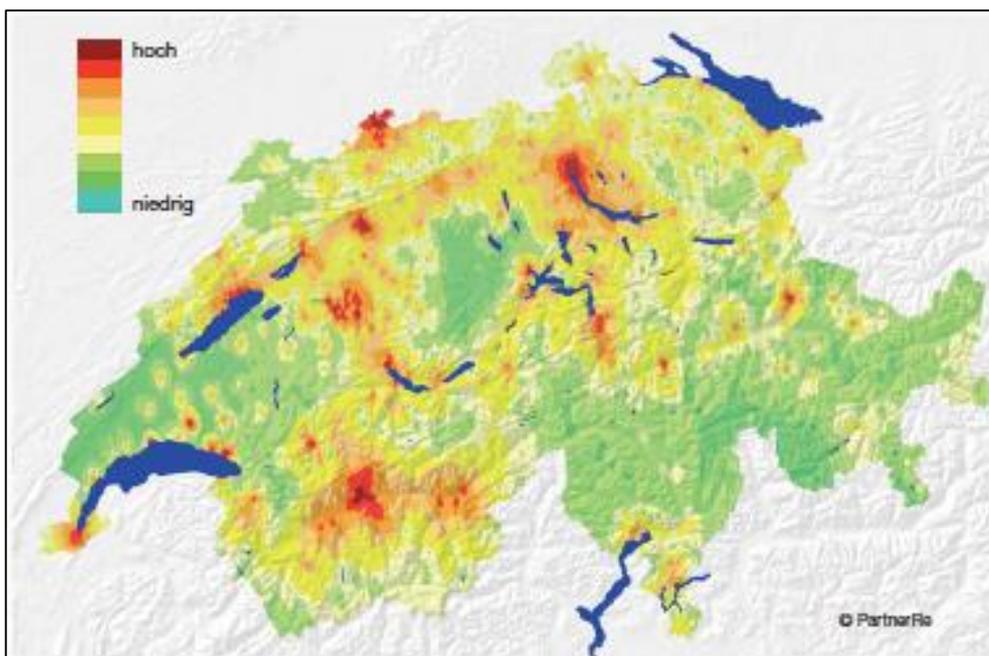


Abbildung 2.22: Indikatives Erdbebenrisiko der Schweiz (Quelle: SED/PartnerRe)

3 Kenntnisstand induzierte Seismizität

3.1 Definition und Vorkommen

Bei induzierter Seismizität handelt es sich um Erdbeben beliebiger Grössenordnung, welche durch *Eingriffe des Menschen* ausgelöst wurden. Induzierte Erdbeben können dann auftreten, wenn der natürliche Spannungszustand der Erdkruste durch anthropogene Einflüsse verändert wird (Ellsworth, 2013). Induzierte Seismizität wurde bisweilen in verschiedenen geotechnischen Projekten hervorgerufen, so z.B. beim Befüllen von grossen Stauseen, in der Bergbauindustrie, bei Abwasserinjektionen in tiefe Gesteinsschichten, bei der Ausbeutung von Öl- und Gasreservoirs und nicht zu vergessen in der unkonventionellen Erdgasförderung, dem Fracking. In der Schweiz sind induzierte Beben jedoch hauptsächlich durch die Vorkommnisse beim Deep Heat Mining Projekt in Basel (2006) und beim Tiefengeothermieprojekt St. Gallen (2013) bekannt. Einer breiten Öffentlichkeit weniger bekannt sind die induzierten Erdbeben an den Stauseen Lago di Vogorno (M3.0; 1965) und Lac d'Emmoson (M3.0; 1974-75) sowie diejenigen am Steinbruch Quinten (M3.8; 1997) oder beim Bau des NEAT-Tunnels durch den Gotthard (M2.4; 2005-07). Dieses Gutachten geht vor allem auf induzierte Seismizität bei Tiefengeothermieprojekten ein.

Innerhalb der induzierten Seismizität werden oft zwei grundsätzliche Typen unterscheiden:

- Getriggert: Durch menschlichen Einfluss verursachte Erdbeben, welche hauptsächlich tektonische Spannungen freisetzen (bereits vorgespanntes Gestein).
- Rein Induziert: Menschlich verursachte Beben, deren freigesetzte Spannungen hauptsächlich auf unnatürliche Weise aufgebaut wurden.
(Nicholson & Wesson, 1990)

Physikalisch unterscheiden sich induzierte Beben nicht von natürlich ausgelösten Erdbeben und auch die oben eingeführte Unterscheidung in „getriggert“ und „rein induziert“ ist hauptsächlich akademischer Natur. Es ist daher sehr schwer bzw. fast nicht möglich, die Unterscheidung dieser zwei Typen induzierter Seismizität zu konsequent durchzuhalten. Hier werden wir in beiden Fällen nur von induzierten Beben sprechen.

3.2 Ursachen und Mechanik

Natürliche, tektonische Erdbeben werden durch einen Spannungsaufbau im Gestein (verursacht durch die Plattentektonik) hervorgerufen. Dabei hält jedes Gestein ein bestimmtes Mass an Spannung aus, bevor es bricht. Diese so genannte Scherfestigkeit ist für jeden Gesteinstyp unterschiedlich. Übersteigt die von den Gesteinsspannungen verursachte Scherspannung auf eine potenzielle Bruchfläche die Scherfestigkeit, bricht das Gestein. Die beiden nun durch einen Bruch getrennten Gesteinsblöcke verschieben sich relativ zueinander und die aufgebaute Energie entlädt sich in Form eines Erdbebens. Durch Spannungsänderungen im Untergrund können auch bereits vorhandene Brüche reaktiviert werden.

Zur Erklärung von Bruchvorgängen wird in den Geowissenschaften oft das einfache ‚*Coulomb Bruchkriterium*‘ verwendet. Dazu ein kleiner Exkurs: Das auf ein Gesteinspaket im Untergrund wirkende Spannungsfeld kann durch drei aufeinander senkrecht stehenden Hauptspannungen σ_1 (Sigma 1), σ_2 (Sigma 2) und σ_3 (Sigma 3), beschrieben werden. Wobei jeweils gilt:

- $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$
- $\sigma_1 - \sigma_3$ ist die Differentialspannung.

Nach der Theorie von Anderson (1905; 1972) kann man anhand der vertikal orientierten Hauptspannung drei tektonische Spannungsregime unterscheiden (siehe Abbildung 3.1). In einem Abschiebungsregime (normal faulting) ist σ_1 vertikal, in einem horizontalen Blattverschiebungsregime (strike slip) ist σ_2 vertikal und in einem Überschiebungsregime (thrust faulting) ist σ_3 vertikal orientiert. Die beiden anderen Hauptspannungen sind dabei jeweils jeweils horizontal ausgerichtet.

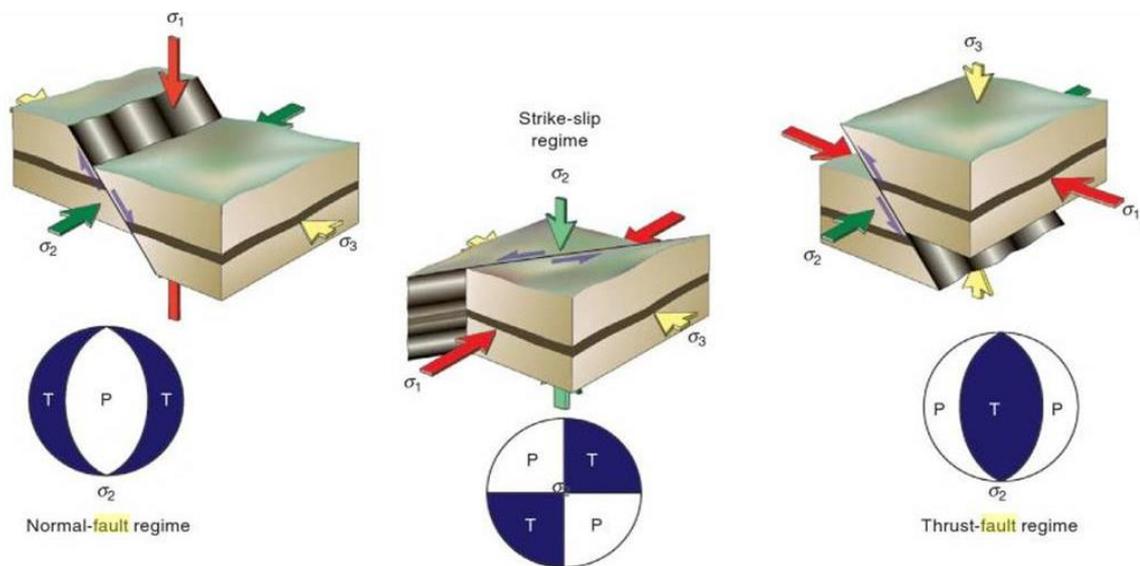


Abbildung 3.1: Bruchtheorie nach Anderson (1905; 1972) Die tektonischen Spannungsregime unterscheiden sich anhand vertikalen Ausrichtung der Hauptspannungen σ_1 (Sigma 1), σ_2 (Sigma 2) und σ_3 (Sigma 3). . Es gilt: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

Bei Tiefengeothermieprojekten kommt hinzu, dass Wasser in die Gesteinsschichten injiziert (eingepumpt) wird. Dies führt zu einer Erhöhung des Porendrucks im Gestein und hat direkt einen Einfluss auf das Mohr-Coulomb Bruchkriterium. Es kann dadurch zu (Mikro-) Brüchen im Gestein kommen. Dies ist in der Regel durchaus gewollt und notwendig, um die Permeabilität (Durchlässigkeit) zu erhöhen. Allerdings lässt sich die maximale Grösse der Erdbeben nur begrenzt steuern. Abbildung 3.2 zeigt die Vorgänge bei einer Injektion, wie Sie in Tiefengeothermieprojekten vorkommen kann.

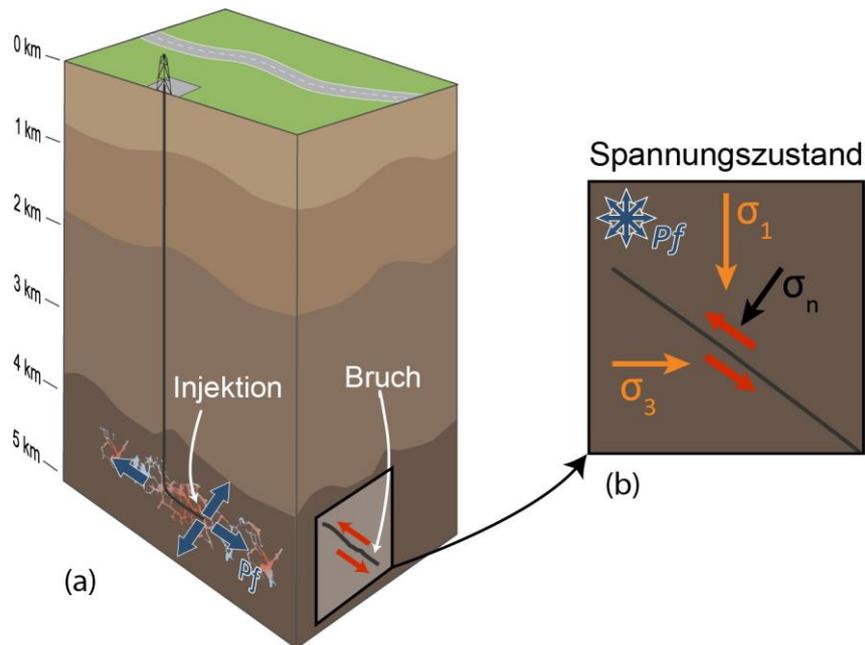


Abbildung 3.2: Spannungszustände im Kontext eines Tiefengeothermieprojektes. (a): Über ein Bohrturm wird Wasser mit Druck ins Gestein injiziert (eingepumpt), dies erhöht den Porendruck (P_f) im Gestein. Brüche welche im Gestein vorhanden sind, sind davon ebenfalls betroffen. (b) Die Situation dargestellt in einem Blockdiagramm im Kontext mit den Hauptspannungen σ_1 und σ_3 . σ_n ist hierbei die Normalspannung, senkrecht zum Bruch.

Um die Mechanismen zu verstehen die zu induzierten Erdbeben führen bedarf es der Erklärung des eingangs erwähnten *Coulomb Bruchkriteriums*. Das Diagramm in Abbildung 3.3 (a) ist eine zweidimensionale Darstellung des Coulomb Bruchkriteriums in einem Mohr Diagramm. Auf der horizontalen Achse werden die senkrecht auf eine Fläche wirkenden Normalspannungen σ_n aufgetragen. Die vertikale Achse repräsentiert die Scherspannung τ . Die Punkte σ_1 und σ_3 auf der horizontalen Achse entsprechen jeweils Flächen, die senkrecht bzw. parallel zur maximalen Hauptspannung ausgerichtet sind. σ_1 und σ_3 definieren ausserdem den so genannten ‚Mohr-kreis‘. Ein Punkt des Mohrkreises gibt an welche Scherspannung τ_s durch das Spannungsfeld (σ_1, σ_3) auf einer Fläche verursacht wird, deren Flächennormale den Winkel Θ mit der maximalen Hauptspannung aufspannt. Das *Coulomb Bruchkriterium* wird im Mohr-Diagramm als nach rechts aufsteigende Gerade dargestellt. Jeder Punkt der Geraden gibt die Scherfestigkeit des Gesteins bei einer bestimmten Normalspannung σ_n an. Zur Beschreibung des *Coulomb Bruchkriteriums* werden folgende Parameter verwendet:

- σ_n = vertikale Spannung (senkrecht zur Bruchfläche)
- τ_0 = Kohäsion des Gesteins
- τ_s = Scherspannung
- ϕ = Winkel der inneren Reibung
- μ = Reibungskoeffizient
- Θ = Orientierung der Bruchfläche
- P = Porenflüssigkeitsdruck im Gestein

Für Punkte des Mohrkreises, die oberhalb der Geraden liegen, ist das Bruchkriterium erfüllt: „Scherspannung (τ_s) auf der Fläche mit Orientierung Θ “ > „Scherfestigkeit des Gesteins bei

Normalspannung σ_n . Punkte darunter liegen im stabilen Bereich. Für ein Gesteinspaket, dessen Mohrkreis vollständig im stabilen Bereich, aber nahe am Coulomb-Bruchkriterium liegt, kann durch geringfügige Änderungen in den Werten der Parameter σ_1 , σ_3 , μ , τ_0 oder P erreicht werden, dass Bereiche des Mohrkreises in den instabilen Bereich oberhalb der Coulomb-Geraden wandern. Das bedeutet, dass für Flächen mit bestimmten Orientierungen (alle Θ deren zugehörige Punkte des Mohrkreises im instabilen Bereich des Mohr-Diagramms liegen) Brüche auftreten können. Wenn die oben genannten Parameter durch anthropogene Einflüsse verändert werden und sich ein Teil der freigesetzten Energie seismisch entlädt, spricht man von induzierten Erdbeben.

Ein für die induzierte Seismizität in Verbindung mit der Tiefengeothermie besonders wichtiger Parameter ist der Porenfluiddruck P im Gestein. In einem wassergesättigten Gesteinskörper wirkt der Porenfluiddruck den tektonischen Spannungen in alle Richtungen entgegen und trägt so einen Teil der auf das Gestein wirkenden tektonischen Last. Im Mohr-Diagramm bewirkt eine Änderung des Porenfluiddrucks eine Verschiebung des Mohrkreises auf der horizontalen Achse um den Betrag P . Die Grösse des Mohrkreises bleibt dabei unverändert. Wird der Porendruck erhöht, z.B. durch Injektion von Wasser in das Gestein, verschiebt sich der Mohrkreis nach Links auf das Coulomb-Bruchkriterium zu (vgl. Abbildung 3.3b). Eine weitere Möglichkeit ist die Erhöhung von lediglich σ_1 : Dies kann bei einer massiven Erhöhung der vertikalen Last in einem tektonischen Abschiebungsregime der Fall sein, z.B. beim Bau und der anschliessenden Füllung eines Staudammes (vgl. Abbildung 3.3C, Beispiel: Lac d'Emosson 1974-75). Eine Verringerung von σ_3 wiederum kann ebenfalls zum Erreichen des Bruchkriteriums führen (vgl. Abbildung 3.3d). Dies kann z.B. bei der drastischen Verringerung der vertikalen Last in einem tektonischen Überschiebungsregime der Fall sein, z.B. durch den grossräumigen Abbau von Gestein in einem Steinbruch (Beispiel: Steinbruch Quinten 1997)

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Änderungen von Hauptspannungen und Porendrücke besteht die Möglichkeit, dass sich die konstituierenden Parameter des Bruchkriteriums μ und τ_0 selber ändert. Dies könnte beispielsweise durch die chemische Einwirkung von Säure auf das Gestein bei einer Säurestimulation geschehen. Dieser Auslösemechanismus ist bisher jedoch bei der Untersuchung der induzierten Seismizität kaum untersucht worden und ist Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten am SED.

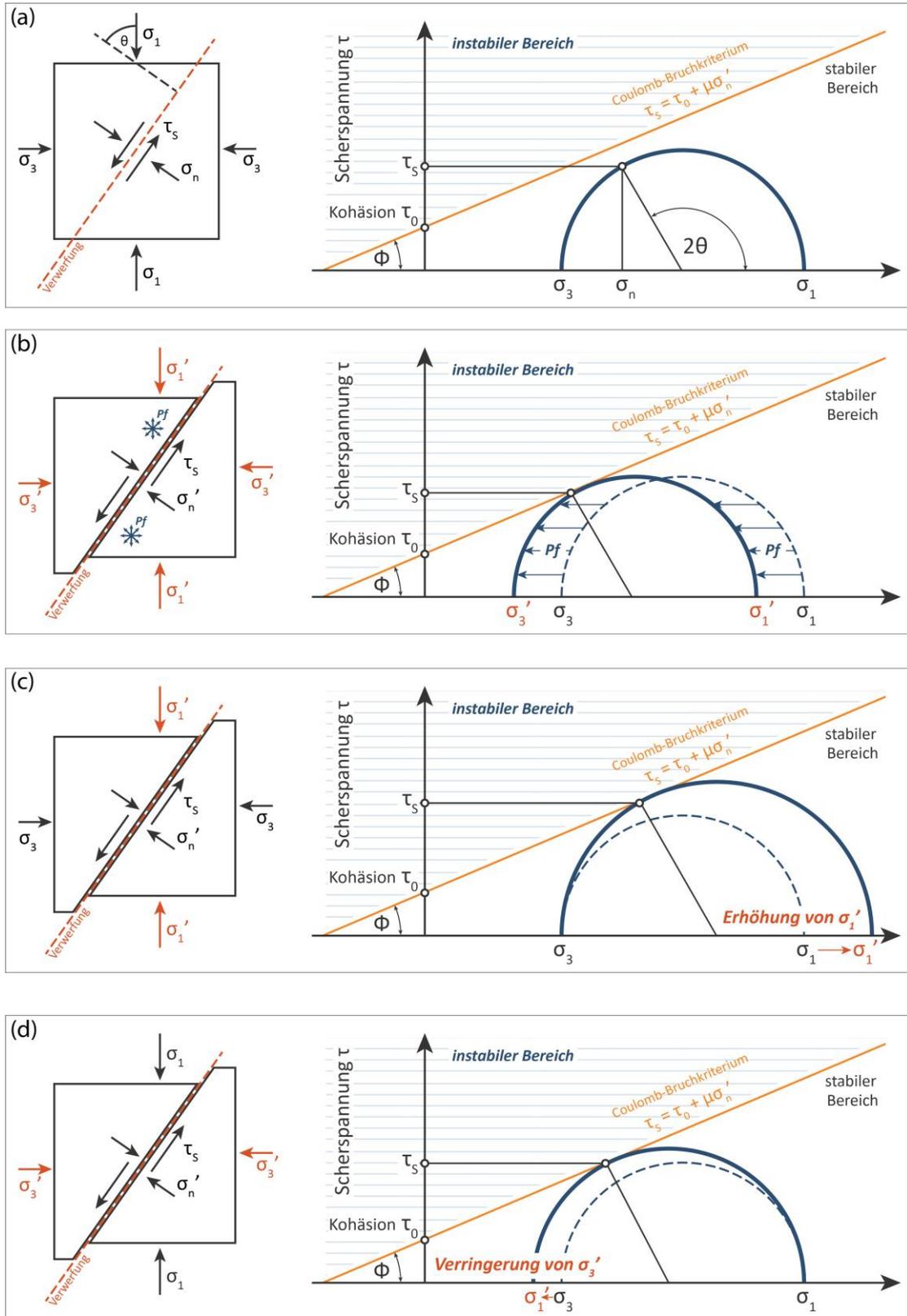


Abbildung 3.3: (a) Mohrkreis im zweidimensionalen Mohrdiagramm. Das orange eingezeichnete Bruchkriterium wird in diesem Beispiel nicht erreicht. (b) Durch eine Erhöhung des Porendruckes werden die Hauptspannungen σ_1 und σ_3 verringert und das Bruchkriterium somit erreicht. Bei einer Erhöhung der Hauptspannung σ_1 (c) bzw. bei einer Verringerung der Hauptspannung σ_3 (d) verändert sich der Mohrkreis ebenfalls und das Bruchkriterium kann erreicht werden.

3.3 Induzierte Seismizität in der Tiefengeothermie

3.3.1 Typen der Geothermie

Grundsätzlich lassen sich Geothermieprojekte anhand der Tiefenlage der erschlossenen geothermischen Ressourcen in die Kategorien „oberflächennahe Geothermie“ und „Tiefengeothermie“ einteilen. Typische Anwendungen der oberflächennahen Geothermie sind Grundwasserwärmepumpen, Erdwärmesonden und Erdwärmesondenfelder – Nutzungsmethoden, welche in der Schweiz weit verbreitet sind. In der Regel wird ab einer Tiefenlage von 400-500 m von Tiefengeothermie gesprochen. Die Tiefengeothermie kann weiter nach der Temperatur des geothermischen Reservoirs und der Art seiner Ausbeutung aufgegliedert werden. Die Stromerzeugung durch Geothermie wird weltweit durch Hochenthalpie-Lagerstätten dominiert, die an vulkanische Gebiete gebunden sind und bei denen Temperaturen von mehreren Hundert Grad genutzt werden können. Niederenthalpie-Lagerstätten finden sich ausserhalb vulkanischer Regionen, bei denen in der Regel tiefe Bohrungen nötig sind um Temperaturen von 100-200 °C zu erreichen. Bei den Niederenthalpie-Lagerstätten können weitere drei Typen der Ausbeutungsweise unterschieden werden: Hydrothermale und petrothermale Systeme sowie tiefe Erdwärmesonden. Prominente Beispiele sind die Projekte Basel (2006, petrothermal), St. Gallen (2013, hydrothermal), Zürich (2010, tiefe Erdwärmesonde).

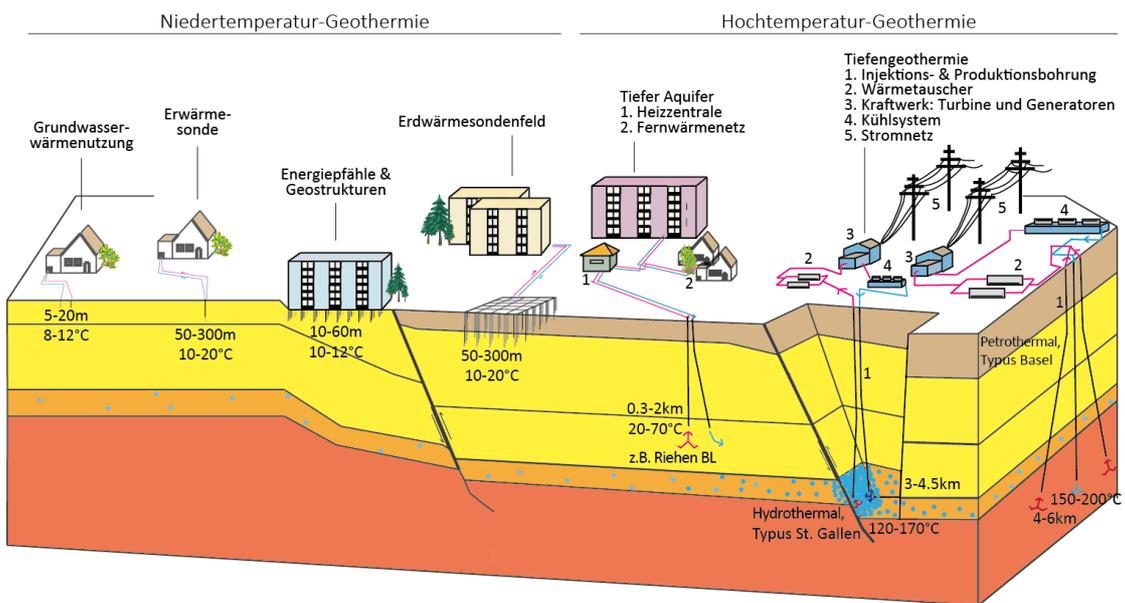


Abbildung 3.4: Die geothermische Nutzung des Untergrundes kann grundsätzlich in zwei Bereiche eingeteilt werden: Die Nieder- und die Hochtemperatur-Geothermie. Die Niedertemperaturgeothermie beinhaltet unter anderem weit verbreitete Systeme wie Grundwasserwärmepumpen, Erdwärmesonden und Erdwärmesondenfelder. Die Hochtemperatur-Geothermie hingegen erreicht Tiefen bis zu mehreren Kilometern. Es wird wiederum zwischen hydrothermalen und petrothermalen Systemen unterschieden. Bei hydrothermalen Systemen werden Gesteinsschichten angebohrt, in welchen bereits eine hohe Durchlässigkeit vorhanden ist und idealerweise Wasser zirkuliert. Im Falle von petrothermalen Systemen weist das Gestein keine ausreichende Durchlässigkeit auf. Diese muss mittels Einpumpen von Wasser künstlich erzeugt werden.

3.3.2 Hydrothermale Systeme

Bei hydrothermalen Systemen wird eine durchlässige Gesteinsschicht angebohrt, in welcher bereits Wasser zirkuliert (= Aquifer). Dieses wird mittels einer Produktionsbohrung abgepumpt

und in einer zweiten Injektionsbohrung wieder eingepumpt (Douplettensystem). Es existieren aber auch Lösungen mit einer einzelnen Bohrung. In der Regel wird auch beim Bau einer hydrothermalen Geothermianlage eine chemische (z.B. mittels Säure) oder hydraulisch (einpumpen von Wasser) Stimulation des Gesteins durchgeführt, um die Durchlässigkeit in der Umgebung der Tiefbohrung zu erhöhen und eine Anbindung an den Grundwasserleiter zu schaffen. Tiefen und Temperaturen solcher Aquifere können aufgrund lokaler Geologie sehr unterschiedlich sein: In Riehen (Basel-Land) wurde 65°C warmes Wasser aus einer Tiefe von 1547 m erschlossen, in Schlattigen (Thurgau, im Bau) mit ca. 62°C in ca. 1800 m Tiefe und in St. Gallen in 4400 m Tiefe (Temperatur nicht bekanntgegeben, geschätzt 120°C – 140°C). Während die Wärme bei niedrigeren Temperaturen bereits zu Heizzwecken genutzt werden kann, ist mit der existierenden Technologie Stromerzeugung erst ab ca. 120°C ökonomisch sinnvoll, wobei der Wirkungsgrad mit der Temperatur zunimmt.

3.3.3 **Petrothermale Systeme**

Im Gegensatz zu hydrothermalen Systemen werden bei petrothermalen Systemen Gesteinsschichten mit niedriger Durchlässigkeit angebohrt. Es zirkuliert kaum Wasser auf natürliche Weise. Mittels Einpumpen von Wasser mit hohem Druck (hydraulische Stimulation) können überwiegend kleine Brüche im Gestein erzeugt werden. Diese sollen die Durchlässigkeit des Gesteins erhöhen und so die Zirkulation von Wasser ermöglichen (vgl. Mechanismen im Kapitel 3.2). Diese Systeme werden auch ‚*Enhanced Geothermal Systems (EGS)*‘ genannt. Beim Aufbrechen des Gesteins entstehen Erschütterungen – kleine Erdbeben. Diese können – je nach Grösse des Bruches – an der Oberfläche verspürt werden. Im Idealfall bleiben diese aber unter der Spürbarkeitsgrenze. Im Vergleich mit hydrothermalen Systemen bietet dieses System den Vorteil, dass tiefere Zielhorizonte mit dementsprechend höheren Temperaturen (> 100°C) angebohrt werden können. Dies wirkt sich positiv auf eine mögliche Stromerzeugung aus.

3.3.4 **Risiken induzierter Seismizität**

Allgemein

Es besteht sowohl bei petrothermalen als auch bei hydrothermalen Systemen das Risiko, dass es zu induzierter Seismizität kommt. Speziell die Ereignisse in St. Gallen 2013 haben gezeigt, dass auch hydrothermale Systeme nicht risikofrei sind.

Bei petrothermalen Systemen ist induzierte Seismizität Fluch und Segen zugleich: Um die Wasserdurchlässigkeit des Gesteins künstlich zu vergrössern, ist das Erzeugen kleiner Brüche - d.h. kleiner Erdbeben - notwendig, welche meistens nicht gespürt werden (sog. Mikroerdbeben). Anhand der Lokalisierung genau dieser Mikroerdbeben können auch wertvolle Informationen über das erzeugte Reservoir gewonnen werden (z.B. Lage und Ausdehnung des erzeugten Reservoirs für die Planung der Landepunkte von Produktionsbohrungen). Im ungünstigen Fall besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass grössere, bisher unbekannte und eventuell vorgespannte Verwerfungen stimuliert werden. Werden diese reaktiviert, kann dies zu deutlich

spürbaren Erdbeben, im Extremfall zu Schadenbeben führen.

Da bei hydrothermalen Systemen bereits von einer natürlichen Wasserdurchlässigkeit ausgegangen wird, ist eine Stimulation nicht im selben Mass notwendig, wie dies bei petrothermalen Systemen der Fall ist. Trotzdem besteht die Möglichkeit, dass Verwerfungen angebohrt oder beeinflusst werden, die tektonisch vorgespannt sind. Da sich tektonische Vorspannungen nicht seismisch abbilden lassen, kann, wie das Beispiel St. Gallen zeigt, auch mit ausgiebigen Vorstudien (z.B. 3D-Seismik) nicht ausgeschlossen werden, dass die angebohrte Verwerfungszone kritisch tektonisch vorgespannt ist. Es verbleibt somit auch in primär hydrothermalen Projekten immer ein Risiko, dass spürbare Erdbeben, oder mit kleiner Wahrscheinlichkeit auch Schadensbeben, ausgelöst werden.

Allgemein kann jedoch gesagt werden, dass die bisher durch geothermische Projekte ausgelösten Ereignisse im Vergleich zu anderen geotechnischen Projekten weniger stark ausgefallen sind. Zudem lässt sich durch geeignete Interventions- bzw. Reaktionsmassnahmen, wie etwa Ampelsystemen, das Risiko von Schadensbeben deutlich senken. Weltweit am schwerwiegendsten waren die Folgen von Erdbeben, die mit dem Aufstau von grossen Stauseen in Verbindung stehen. Tabelle 3.1 vergleicht die grössten durch geothermische und andere geotechnischen Projekte ausgelöste (induzierte) Erdbeben.

Risikoabschätzung während verschiedenen Projektstufen

Um die genannten Risiken soweit wie möglich zu mindern sind Risikoanalysen während verschiedener Projektstufen notwendig. Da mit zunehmendem Projektfortschritt mehr Kenntnisse über den Untergrund vorhanden sind, sollten die Risikostudien entsprechend auf den neuesten Stand gebracht werden. Zudem kann eine frühzeitige Überwachung des Untergrundes mittels seismischem Monitoring wertvolle Erkenntnisse über die Hintergrundseismizität und später über die induzierte Seismizität liefern. Abbildung 3.5 gibt einen schematischen Überblick über die verschiedenen Projektphasen und die entsprechenden Risikoanalysen.

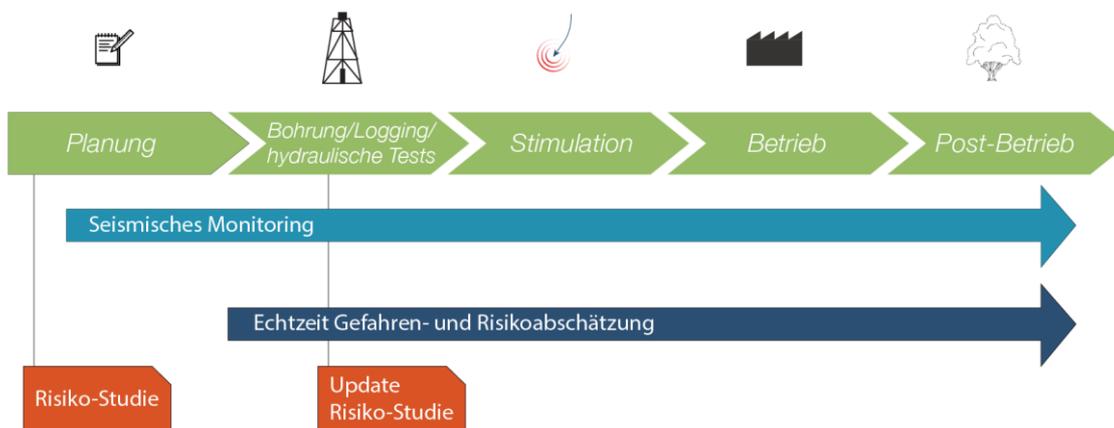


Abbildung 3.5: Projektzyklus eines Tiefengeothermieprojektes mit begleitenden Massnahmen zur Risikoabschätzung.

Table 3.1: Vergleich der grössten aufgetretenen induzierten Erdbeben, sortiert nach Typ bzw. unterteilt in Tiefengeothermie und nicht-Tiefengeothermie.**Grösste Ereignisse ausserhalb der Tiefengeothermie***Stauseen*

Koyna (1982):	$M_L = 6.3$
Killari (1993):	$M_L = 6.1$
Aswan (1981):	$M_L = 5.6$

Langzeit Fluid-Injektionen

Prague, Oklahoma	$M_L = 5.7$
Rocky Mountain Arsenal (Denver): Basement at 3.7 km:	$M_L = 5.5$ (1 Jahr nach Stopp)
Paradox Valley Colorado: Fault in limestone at 4.55 km:	$M_L = 4.3$ (nach 4 Jahren Injektion)
Ashtabula-NY: Sandstone above basement at 1.7 km:	$M_L = 3.8$ ($M_L = 4.2$ 14 Jahre nach Stopp)

Fluid Extraktionen

Lacq, SW France: Production of gas, SW France:	$M_L = 4.0$
Netherlands: : Production of gas:	$M_L = 3.5$

Minen

South African gold mines:	$M_L = 4.0$
Mines in the Ruhr region, Germany:	$M_L = 3.0$
NEAT-Gotthard (Faido):	$M_L = 2.4$

Grösste Ereignisse in der Tiefengeothermie

Fenton Hill, New Mexico (2.8 km & 4.2 km reservoirs):	$M_m \sim 1.5$
Bad Urach, Deutschland (4.3 km Reservoir)	$M_L = 1.8$
Rosemanowes, Cornwall (2.2 km Reservoir):	$M_L = 2.0$
Soultz, Frankreich (3.5 km Reservoir):	$M_L \sim 2.0$
Soultz, Frankreich (5 km Reservoir):	$M_L = 2.9$ (verspürt)
Basel, Schweiz (5.0 km Reservoir):	$M_L = 3.4$ (stark verspürt – kleinere Schäden)
St. Gallen, Schweiz (hydrothermal)	$M_L = 3.5$
Cooper Basin, Australien (4.1 km):	$M_L = 3.7$ (verspürt)

4 Allgemeine Begutachtung der Eignung des Kantons Zug für Tiefengeothermieprojekte

Aufgrund der verfügbaren seismologischen Datengrundlage und unserem Verständnis der induzierten Seismizität können dem Kantonsgebiet Zug generell weder besonders schlechte noch besonders günstige Voraussetzungen für die Eignung in Bezug auf die Gefährdung durch induzierte Erdbeben bei der Durchführung von Tiefengeothermieprojekten ausgestellt werden. Hierdurch unterscheidet sich der Kanton nicht von der restlichen Schweiz. Es ist unserer Auffassung nach in der Schweiz nicht zu erreichen, dass die Tiefengeothermie auch durch eine sorgfältige Standortwahl vollständig ohne seismisches Risiko zu betreiben ist, denn die Erdkruste im Alpenbereich ist typischerweise überall kritisch vorgespannt. Speziell ist es nur sehr begrenzt möglich vor einer Bohrung und Teststimulation verlässlich vorher zu sagen wie seismisch aktiv der Untergrund reagieren wird: Das sogenannte seismogene Potential des Untergrunds ist generell nicht bekannt und kann auch über wenige Kilometer Distanz stark schwanken. Indikative lassen sich die folgenden Tendenzen zur Abschätzung des seismogenen Potentials geben:

- Je tiefer ein Projekt ist desto grösser ist das Potential auch grössere Beben auszulösen.
- Das seismogene Potential ist höher im kristallinen Basement als in Sedimenten.
- Je näher seismisch aktive Verwerfungszonen sind, desto höher das Risiko Erdbeben auf dieser Verwerfungszone auszulösen.
- Je höher die Porendruckänderungen und je grösser das davon betroffene Gebiet, umso mehr und grössere Beben sind zu erwarten.
- In hydrothermal geothermischen Projekten treten die grössten Erdbeben typischerweise im Betrieb auf; in petrothermalen oft unmittelbar während oder kurz nach der Reservoirstimulation.
- Je konservativer ein Ampelsystem eingestellt wird, umso geringer die Wahrscheinlichkeit von Schadensbeben. Allerdings sinken damit gleichzeitig die Erfolgchancen des Projektes.

Zwar zeichnet sich in der instrumentellen seismologischen Überwachungsphase (1975 bis heute) für den Kanton Zug eine Herdtiefenverteilung mit nur wenigen Beben in der Oberkruste (0-15 km Tiefe) und dem Grossteil der Seismizität in Tiefen von mehr als 15 km ab. Es wäre jedoch falsch dies als Anzeichen für eine besonders geringe Gefährdung durch induzierte Erdbeben zu deuten. Induzierte Erdbeben treten zwar in der Regel in den obersten 10 km der Erdkruste nahe bei den auslösenden geotechnischen Projekten auf, ob die induzierte seismische Gefährdung jedoch der natürlichen seismischen Gefährdung folgt, ist derzeit nicht belegt. Obwohl sich ein solcher Zusammenhang in manchen Studien anzudeuten scheint (z.B. Evans et al. (2012)), treten doch immer wieder Gegenbeispiele für diese Beobachtung auf (z.B. Gischig & Wiemer (2013)). Dies deutet an, dass die Anzahl der gut dokumentierten Fallstudien,

die zur Untersuchung dieser Fragestellung herangezogen werden können zu klein ist, um verlässliche Antworten zu geben. Diese Aussage gilt auch für die Beurteilung der seismischen Reaktion des Untergrundes auf geotechnische Eingriffe, aufgrund anderer geologischer, geophysikalischer oder projekttechnischer Parameter (Evans et al., 2012).

Nicht zuletzt die Erfahrung aus dem Geothermieprojekt der Stadt St. Gallen zeigt, dass es ratsam ist, grosse und bekannte aktive seismische Verwerfungen möglichst zu meiden. Dies gilt im besonderen Masse bei der Injektion von Fluiden in den tiefen Untergrund. Ebenso hat sich gezeigt, dass die Einschätzung der seismischen Aktivität bzw. der tektonischen Vorspannung einer bestimmten Verwerfung sehr schwer wenn nicht gar unmöglich ist. In den seltensten Fällen liegen seismologische Daten in ausreichender räumlicher Auflösung und über ausreichend lange Zeiträume vor, um die Seismizität einzelner bekannter Störungen zuzuordnen. Bei der Beurteilung der Aktivierbarkeit einer bestimmten Störung durch natürlich tektonische Vorgänge oder geotechnische Eingriffe ist man deshalb einzig auf geomechanische Analysen der Störung im rezenten Spannungsfeld angewiesen.

Wie oben dargelegt, ist die Orientierung des tektonischen Spannungsfeldes in der Oberkruste des Kantons Zug sowie in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes, nicht durch seismologische Daten oder ausreichend vielen Spannungsmessungen aus Tiefbohrungen belegt. Eine qualitative Abschätzung des Spannungsfeldes ist nur aufgrund von Analogieschlüssen aus westlich und östlich angrenzenden Regionen möglich und mit entsprechend grossen Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten müssen bei der Analyse der Reaktivierbarkeit von Bruchsystemen in potenziellen Zielhorizonten von Tiefengeothermieprojekten (Tiefen kleiner 5 km) adäquat berücksichtigt werden.

Im Kanton Zug treten wiederholt Erdbeben in grossen Tiefen von 25-35 km nahe der Grenze Erdkruste-Erdmantel auf, die Magnituden $M_L > 4.0$ erreicht haben. Aus heutiger Sicht ist nicht zu erwarten, dass Tiefengeothermieprojekte in der obersten Erdkruste (hier 2-5 km Tiefe) einen direkten Einfluss auf die Auftretenswahrscheinlichkeit dieser Beben haben könnten. Es kann nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, dass die seismischen Wellen eines möglichen induzierten Erdbebens in der Oberkruste ein tiefes Erdbeben dynamisch triggern können. Aus der Beobachtung der natürlichen Seismizität im Untersuchungsgebiet ist ein solcher Zusammenhang allerdings nicht bekannt.

5 Empfehlungen

Allgemein

- Aus dem hier betrachteten regionalen Kontext können wir nicht schliessen, ob einzelne Projekte per se ein höheres oder niedrigeres seismisches Risiko mit sich bringen. Jedes Projekt muss individuell in seinem lokalen geologischen und tektonischen Kontext betrachtet werden. Projektbezogene Risikostudien müssen dem Rechnung tragen (vgl. Punkt Risikostudien).
- Beim aktuellen Kenntnisstand der Wissenschaft sollte vermieden werden, dass bekannte und grosse tektonisch aktive Verwerfungen stimuliert werden.
- In den derzeit verfügbaren seismologischen Datengrundlagen kann im Kanton Zug keine solchen Verwerfungszonen identifiziert werden. Dass in diesem Bereich tektonisch aktive Störungen existieren, kann aber nicht ausgeschlossen werden. Das beschränkte Wissen über den Untergrund führt leider zu hohen Unsicherheiten in der Vorhersage bezüglich des seismischen Risikos. Es bleibt daher immer ein Restrisiko für spürbare Beben, oder im schlimmsten Fall sogar Schadensbeben.
- Während aller Phasen eines Tiefengeothermieprojektes ist es wichtig schnell und gut über die seismische Reaktion der Erdkruste auf geotechnische Eingriffe informiert zu sein, um bei ungewöhnlich heftigen Reaktionen des Untergrundes frühzeitig Gegenmassnahmen einleiten zu können (vgl. Punkt Monitoring).
- Die Erfahrung aus vergangen Projekten deuten an, dass entsprechende vordefinierte Massnahmen- und Reaktionspläne (sog. Ampelsysteme) beim Management der hydraulischen Operationen (Injektions- und Produktionsprogramm) dieses Risiko deutlich reduzieren können.

Seismische Voruntersuchung

- Eine Voruntersuchung bei spezifischen Projekten mit einer 2D - oder 3D Seismik zur Identifikation von Bruchsystemen in der Nähe der Zielhorizonte ist aus seismologischer Sicht nicht zwingend. Obwohl durch derartige Voruntersuchungen wichtige Informationen gewonnen werden können, ist der Nutzen leider auch limitiert.
- Eine 2D- bzw. 3D Seismik kann zwar Aufschlüsse über die Strukturen im Sedimentgestein (Mesozoikum) geben. Das kristalline Grundgebirge wird jedoch nur mit einer sehr geringen Auflösung abgebildet. Dies ist besonders dann problematisch, wenn es um EGS Projekte geht, welche häufig auf die geologischen Einheiten des Grundgebirges abzielen. Die Erkenntnisse über die Strukturen der darüber liegenden Sedimentgesteine können jedoch unter Umständen Aufschluss über mögliche grössere Verwerfungen im Kristallin geben.
- Mittels seismischer Daten können lediglich die Orientierung und der Versatz einer Verwerfung bestimmt werden. Ob die Verwerfung tektonisch vorgespannt oder aktiv ist

lässt sich aus diesen Daten nicht direkt ablesen. Das Reaktivierungspotential der jeweiligen Verwerfung lässt sich nur aus geomechanischen Überlegungen unter Berücksichtigung des tektonischen ableiten und ist stets mit grossen Unsicherheiten behaftet. Erschwerend kommt hinzu, dass oft nur die Orientierung des tektonischen Spannungsfeldes im regionalen Kontext annäherungsweise erschlossen ist, schon die Amplituden der horizontalen Hauptspannungen sind meist nicht bekannt. Dass die lokalen Abweichungen vom regionalen Trend im lokalen Kontext dramatisch sein können, haben Untersuchungen in Tiefbohrungen weltweit bestätigt.

Risikostudien

- Für jedes Tiefengeothermieprojekt sollte eine projektspezifische seismische Risikostudie durchgeführt werden. Diese sollte folgende Punkte beinhalten:
- Einbezug der natürlichen Seismizität (analog diesem Gutachten, evtl. mit weiterführenden Analysen, z.B. Relativlokalisierung).
- Berechnung von Erschütterungsszenarien für mögliche induzierte Ereignisse (auch extreme Ereignisse mit geringer Wahrscheinlichkeit sollten miteinbezogen werden).
- Einbezug bestehender Mikrozonierung des Untergrundes (Amplifikationseffekte der Bodenbewegungen).
- Identifikation von Verwerfungen im Umkreis von mindestens 5km um den geplanten Standort.
- Erarbeitung eines Massnahmenkonzeptes (Monitoring, Reaktionsschema) zur Linderung der induzierten Seismizität nach aktuellem Stand der Wissenschaft.

Monitoring

- Eine adäquate Überwachung der Seismizität ist bei allen Tiefengeothermieprojekten höchst empfehlenswert. Einerseits wird so sichergestellt, dass die seismische Reaktion des Untergrundes auf die geotechnische Operation schnell und genau erkannt wird und frühzeitig Gegenmassnahmen ergriffen werden können. Andererseits besteht nur so die Hoffnung eine Unterscheidung von natürlicher und mit dem Projekt verbundener induzierter Seismizität nach bestem Wissen treffen zu können und somit im Streitfall belastbare Entscheidungsgrundlagen zu haben.
- Das aktuelle Messnetzwerk des SED ist nicht ausreichend dicht, um im Kanton Zug und seiner nahen Umgebung die nötige Detektionsschwelle und Lokalisierungsgenauigkeit zu erreichen, die notwendig sind um die seismologische Grundüberwachung eines Tiefengeothermieprojektes sicherzustellen. Die Anforderungen an eine solche Grundüberwachung wurden kürzlich von einer Expertengruppe (vgl. Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität – Positionspapier des FKPE, 2012) unter massgeblicher Beteiligung des SED zusammengestellt und sind diesem Gutachten beigelegt (Anhang A4).
- Wir empfehlen, dass mindestens 6 Monate vor dem Beginn eines zukünftigen

Projektes ein lokales temporäres seismologisches Überwachungsnetz in Betrieb genommen wird, das die Anforderungen der FKPE-Empfehlung erfüllt. Es sollte sichergestellt sein, dass der SED als zuständige Fachstelle des Bundes für Warnung und Alarmierung, die erhobenen Wellenformdaten bei Bedarf in Echtzeit problemlos in sein Überwachungssystem integrieren kann. Der SED kann den Betrieb eines solchen Überwachungsnetzes selbst übernehmen.

- Neben den erhobenen seismologischen Daten sollten sämtliche relevanten Projektdaten und -informationen für Forschung und Lehre frei zugänglich sein.

Transparenz und Entscheidungen

- Wir empfehlen auf jeden Fall die Bevölkerung offen und transparent über entsprechende Projekte und deren Risiken und Potentiale im Vorfeld zu informieren und sie über alle Projektphasen hinweg über sämtliche Projekt ereignisse auf dem Laufenden zu halten.
- Speziell ist es wichtig anzuerkennen und offen zu diskutieren, dass Tiefengeothermieprojekte – wie die meisten Technologien – nicht vollständig ohne Risiko sind. Die Aufgabe einer Risikostudie ist es, dieses Risiko (z.B. von Schadensbeben) so weit wie möglich zu quantifizieren und Massnahmen zu definieren wie es weiter reduziert werden kann. Die Entscheidung ob dieses Risiko tragbar ist muss dann eine politische bzw. eine Gesellschaftliche sein.

6 Referenzen

- Anderson, E. M. (1905). The dynamics of faulting. *Transactions of the Edinburgh Geological Society*, 8(3), 387–402. doi:10.1144/transed.8.3.387
- Anderson, Ernest Masson. (1972). *The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain*. New: Hafner Publishing Company.
- Deichmann, N., & Rybach, L. (1989). Earthquakes and temperatures in the lower crust below the northern Alpine foreland of Switzerland. ... *and processes of earth's lower crust*, 51. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/GM051p0197/summary>
- Deichmann, Nicholas, & SED. (2012). *Earthquakes in Switzerland and surrounding regions 1996-2011*.
- Diehl, T., Deichmann, N., Clinton, J., Husen, S., Kraft, T., Plenkers, K., ... Woessner, J. (2013). Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2012. *Swiss Journal of Geosciences*, 106(3), 543–558. doi:10.1007/s00015-013-0154-4
- Ellsworth, W. L. (2013). Injection-Induced Earthquakes. *Science*, 341, 1225942–1 – 1225942–7. doi:10.1126/science.1225942
- Evans, K. F., Zappone, A., Kraft, T., Deichmann, N., & Moia, F. (2012). A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO2 reservoirs in Europe. *Geothermics*, 41, 30–54. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0375650511000472>
- Fäh, D., Giardini, D., Kaestli, P., Deichmann, N., Gisler, M., Schwarz-Zanetti, G., ... Allmann, B. (2011). *ECOS-09 Earthquake Catalogue of Switzerland Release 2011 Report and Database. Public catalogue, 17. 4. 2011. Swiss Seismological Service ETH Zurich*.
- FKPE (2012): Baisch, S., Fritschen, R., Groos, J., Kraft, T., Plenefisch, Th., Plenkers, K., Ritter J. & Wassermann, J. (2012).
- Gischig, V. S., & Wiemer, S. (2013). A stochastic model for induced seismicity based on non-linear pressure diffusion and irreversible permeability enhancement. *Geophysical Journal International*, 194(2), 1229–1249. doi:10.1093/gji/ggt164
- Grünthal, G. (1998). *European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)*. (R. M. W. Musson, J. Schwarz, & M. Stucchi, Eds.) (Vol. 15). Luxembourg: Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie.
- Heidbach, O., & Reinecker, J. (2013). Analyse des rezenten Spannungsfelds der Nordschweiz. *NAGRA Arbeitsbericht, NAB 12-05(April)*, 146.
- Husen, S., Bachmann, C., & Giardini, D. (2007). Locally triggered seismicity in the central Swiss Alps following the large rainfall event of August 2005. *Geophysical Journal International*, 171(3), 1126–1134. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03561.x
- International Atomic Energy Agency. (2002). *Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants*. Vienna.
- Kastrup, U. (2004). Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine foreland derived from inversion of fault plane solutions. *Journal of Geophysical Research*, 109(B1), B01402. doi:10.1029/2003JB002550

Marschall, I., Deichmann, N., & Marone, F. (2013). Earthquake focal mechanisms and stress orientations in the eastern Swiss Alps. *Swiss Journal of Geosciences*, 106(1), 79–90. doi:10.1007/s00015-013-0129-5

Wagner, M., Kissling, E., & Husen, S. (2012). Combining controlled-source seismology and local earthquake tomography to derive a 3-D crustal model of the western Alpine region. *Geophysical Journal International*, 191(2), 789–802. doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05655.x

Wiemer, S., Giardini, D., Fäh, D., Deichmann, N., & Sellami, S. (2009). Probabilistic seismic hazard assessment of Switzerland: best estimates and uncertainties. *Journal of Seismology*, 13(4), 449–478. doi:10.1007/s10950-008-9138-7

Wiemer, S. (2013), Vortrag über vorläufige Ergebnisse der Analyse der induzierten Erdbebensequenz von St Gallen. Medienkonferenz der Sankt Galler Stadtwerke, St. Gallen 27.07.2013. http://www.seismo.ethz.ch/sed/news/Chronologie_SG/index/#28.08.2013.

Anhang

- Anhang A1: Makroseimische Intensitätskala nach EMS-98
- Anhang A2: Liste historischer Ereignisse im Untersuchungsperimeter
- Anhang A3: Liste rezenter Ereignisse im Untersuchungsperimeter
- Anhang A4: Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität – Positionspapier des FKPE

Anhang A1: Makroseismische Intensitätskala nach EMS-98

EMS-98 Intensität	Gefühlt	Auswirkungen	Magnitude (Näherungswerte)	Gebäudeschäden (Mauerwerk)
I	Nicht fühlbar	Nicht fühlbar	2	
II-III	Schwach	Von wenigen Personen in Gebäuden wahrgenommen. Ruhende Personen fühlen ein leichtes Schwingen oder Schütteln.		
IV	Leicht	Im Freien vereinzelt, in Gebäuden von den meisten Personen wahrgenommen. Einige Schlafende erwachen. Geschirr und Fenster klirren, Türen klappern.	3	
V	Moderat	Im Freien von wenigen, in Gebäuden von vielen Personen wahrgenommen. Viele Schlafende erwachen, wenige reagieren verängstigt. Gebäude werden insgesamt erschüttert. Hängende Gegenstände pendeln stark, kleine Gegenstände werden verschoben. Türen und Fenster schlagen auf oder zu.		
VI	Stark	Viele Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Einige Gegenstände fallen um. An vielen Häusern, vornehmlich in schlechterem Zustand, entstehen leichte Schäden wie feine Risse im Mauerwerk oder Verputz.	4	
VII	Sehr stark	Die meisten Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Möbel werden verschoben. Gegenstände fallen aus Regalen. An solide gebauten Häusern treten häufig mässige Schäden auf (kleine Mauerrisse, Schäden am Verputz, Herabfallen von Ziegeln). Vor allem Gebäude in schlechterem Zustand erleiden grössere Mauerrisse und Zwischenwände stürzen ein.		
VIII	Heftig	Viele Personen verlieren das Gleichgewicht. An den meisten Gebäuden mit einfacher Bausubstanz treten schwere Schäden auf, beispielsweise stürzen Gibelteile und Dachsimse ein.	5	
IX	Sehr heftig	Allgemeine Panik. Sogar gut gebaute Bauten zeigen sehr schwere Schäden und tragende Bauteile stürzen teils ein. Viel schwächere Bauten stürzen ein.		
X+	Extrem	Die meisten Bauwerke, selbst sehr solide gebaute, erleiden schwere Beschädigungen oder stürzen ein.	6	
			7	

Quelle:

Grünthal, G. (1998). *European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)*. (R. M. W. Musson, J. Schwarz, & M. Stucchi, Eds.) (Vol. 15). Luxembourg: Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie.

Anhang A2: Katalog historische Erdbeben

Alle Ereignisse befinden sich im Untersuchungsperimeter und wurden nach folgenden Kriterien selektiert:

Bewertung „sicher“

Datumsangabe vollständig (nicht unbedingt die Angabe der Uhrzeit)

Datenquelle Schweizerischer Erdbebendienst (SED)

Epizentralintensität > V (vor 1878) bzw. > IV (ab 1879)

year	month	day	appraisal	lat	lon	CH_xkoord	CH_ykoord	Loc_err_EW	Loc_err_NS	source	Mw	Mw_err	epi_intensitpi	int_nun	max_intensity	num_int_obs	epi_area
1601	9	18	certain	46.92	8.36	670200	197000	<= 100	<= 100	"SED (ECOS-09)"	5.9	<= 0.5	VIII	8	""	58	"Unterwalden"
1604	11	11	certain	46.9	8.25	661800	194600	<= 100	<= 100	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Unterwalden"
1644	4	20	certain	47.38	8.07	647500	248200	<= 20	<= 20	"SED (MECOS-99)"	3.9	<= 1	V	5	""	""	"Aarau"
1650	10	27	certain	47.25	8.73	697800	234000	<= 100	<= 100	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Staefa"
1650	10	27	certain	47.38	8.07	647500	248200	<= 50	<= 50	"SED (MECOS-99)"	3.9	<= 1	V	5	""	""	"Aarau"
1651	3	26	certain	47.48	8.48	678500	259300	<= 100	<= 100	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Niederhasli"
1665	3	1	certain	47.03	9.07	723800	210400	<= 20	<= 20	"SED (MECOS-99)"	3.9	<= 1	V	5	""	""	"Glarus"
1674	12	16	certain	47.3	8.58	686300	239400	<= 100	<= 100	"SED (ECOS-09)"	4.5	<= 1	V	5	"v"	7	"Thalwil"
1701	8	24	certain	46.93	9.02	720400	198900	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Linthal"
1701	8	31	certain	46.93	9.02	720200	199200	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Linthal"
1701	9	1	certain	46.93	9.02	720200	199200	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Linthal"
1701	9	2	certain	46.93	9.02	720200	199200	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Linthal"
1701	9	4	certain	46.93	9.02	720200	199200	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	2	"Betschwanden-Linthal"
1701	9	7	certain	46.92	8.98	717400	197700	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"v"	6	"Betschwanden"
1701	9	10	certain	46.93	9.02	720200	199200	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Linthal"
1701	9	13	certain	46.93	9.02	720200	199200	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Linthal"
1701	12	12	certain	46.93	9.02	720400	198900	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Linthal"
1701	12	30	certain	46.93	9.02	720200	199200	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Linthal"
1702	2	24	certain	46.93	9.02	720400	199200	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	2	"Betschwanden-Linthal"
1702	10	2	certain	46.93	9.02	720400	198900	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Linthal"
1705	6	3	certain	47.1	9.07	723600	217800	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	2	"Mollis-Naefels"
1725	6	30	certain	46.98	9.05	722600	204800	<= 20	<= 20	"SED (MECOS-99)"	3.9	<= 1	V	5	""	""	"Glarus"
1765	4	7	certain	46.87	8.23	660600	191000	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 0.5	V	5	"VI"	4	"Sachselsn"
1777	2	7	certain	46.88	8.25	661800	192800	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	5.1	<= 0.5	VII	7	"VII"	19	"Sarnen"
1777	3	23	certain	47	8.3	665500	205800	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Sarnen"
1777	3	27	certain	46.9	8.25	661800	194600	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"VI"	1	"Sarnen"
1779	5	10	certain	47	8.3	665500	205800	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Sarnen"
1781	5	11	certain	47.37	8.54	683200	247200	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Zuerich"
1783	8	11	certain	47.05	8.31	666200	211400	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Luzern"
1836	10	25	certain	47	8.3	665500	205800	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	1	"Sarnen"
1837	1	24	certain	47.39	8.23	659800	249100	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	4.4	<= 1	V	5	"V"	46	"Dottikon-Othmarsingen"
1861	11	14	certain	47.35	8.87	708100	245300	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	4	<= 0.5	V	5	"IV"	29	"Bauma"
1874	2	20	certain	47.33	8.45	676400	242600	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	4.1	<= 0.5	V	5	"V"	15	"Bremgarten"
1877	5	2	certain	47.3	8.85	706700	239800	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	4.4	<= 0.5	VI	6	"VI"	71	"Hinwil"
1877	5	3	certain	47.3	8.85	706700	239800	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.9	<= 1	V	5	"felt"	2	"Hinwil"
1879	1	25	certain	46.867	8.65	692400	191400	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Sattel"
1881	2	5	certain	47.073	8.641	691300	214300	<= 20	<= 20	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Sattel"
1881	3	2	certain	47.2	8.7	695600	228400	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.2	<= 1	IV	4	"felt"	1	"Richterswil"
1882	2	11	certain	47	8.3	665500	205800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Sarnen"
1886	11	16	certain	46.917	8.65	692300	196900	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.9	<= 1	V	5	""	""	"Flueelen"
1888	3	10	certain	47.383	8.541	683200	248600	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	"IV"	""	"Zuerich"
1888	3	18	certain	47.383	8.533	682600	248600	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	""	"Zuerich"
1888	3	19	certain	47.367	8.55	683900	246800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Zuerich"
1890	3	7	certain	47.4	8.97	715600	251000	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Fischingen"
1902	1	21	certain	47	8.3	665500	205800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.9	<= 1	V	5	""	""	"Sarnen"
1902	1	21	certain	46.867	8.233	660600	191000	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Sarnen"
1902	12	6	certain	47	8.3	665500	205800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	4.3	<= 1	V-VI	55	""	""	"Sarnen"
1905	8	16	certain	47.367	8.7	695300	247000	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	""	"Naenikon"
1907	2	21	certain	47.033	8.433	675600	209600	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Weggis"
1907	3	11	certain	47.133	8.583	686800	220900	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Unteraegeri"
1909	8	20	certain	46.917	8.267	663100	196500	<= 5	<= 5	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Kaegiswil-Sarnen"
1910	7	6	certain	47.267	8.65	691700	235800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	""	"Meilen"
1913	4	21	certain	47.25	8.6	687900	233900	<= 5	<= 5	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Horgen"
1913	10	6	certain	46.95	9.033	721400	201100	<= 5	<= 5	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	""	"Diesbach GL"
1915	6	24	certain	46.95	8.617	689700	200600	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	""	"Sisikon UR"
1915	6	26	certain	46.95	8.617	689700	200600	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.9	<= 1	V	5	""	""	"Sisikon UR"
1915	7	4	certain	46.95	8.617	689700	200600	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	""	"Sisikon UR"
1915	7	13	certain	47.25	8.6	687900	233900	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Horgen"
1916	7	17	certain	47.4	8.5	680100	250500	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Zuerich"
1917	1	28	certain	47.27	8.617	689200	236100	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Zuerichsee (Meilen-Herrlibe"
1917	2	9	certain	47	8.3	665500	205800	<= 50	<= 50	"SED (MECOS-99)"	3.9	<= 1	V	5	"V"	4	"Sarnen"
1917	2	10	certain	46.883	8.233	660500	192700	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	""	"Wilen-Sarnen"
1917	2	19	certain	46.883	8.233	660500	192700	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Wilen-Sarnen"
1917	2	22	certain	46.883	8.233	660500	192700	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	""	"Wilen-Sarnen"
1917	5	14	certain	46.883	8.25	661800	192800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	""	"Sachselsn"
1917	5	14	certain	46.883	8.25	661800	192800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Sachselsn"
1917	6	13	certain	46.883	8.233	660500	192700	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	""	"Wilen-Sarnen"
1917	6	13	certain	46.883	8.25	661800	192800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	""	"Sachselsn"
1917	6	14	certain	46.883	8.233	660500	192700	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV	45	""	""	"Wilen-Sarnen"
1917	6	22	certain	46.883	8.233	660500	192700	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Wilen-Sarnen"
1917	6	22	certain	46.883	8.233	660500	192700	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV	45	""	""	"Wilen-Sarnen"
1917	6	22	certain	47	8.3	665500	205800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Sarnen"
1917	6	23	certain	47	8.3	665500	205800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	""	"Sarnen"
1917	8	9	certain	46.883	8.233	660500	192700	<= 5	<= 5	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	""	"Wilen-Sarnen"
1917	8	23															

1940	11	7	certain	46.967	8.75	699800	202600	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	"Muotathal SZ"	
1948	7	5	certain	47.45	8.7	695100	256200	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	"Kempththal"	
1948	8	2	certain	47.45	8.7	695100	256200	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Kempththal"	
1948	8	3	certain	47.45	8.7	695100	256200	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Kempththal"	
1948	8	3	certain	47.45	8.7	695100	256200	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Kempththal"	
1948	8	4	certain	47.433	8.683	693900	254300	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Effretikon"	
1948	8	6	certain	47.45	8.7	695100	256200	<= 5	<= 5	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	"Kempththal"	
1948	9	17	certain	47.45	8.7	695100	256200	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	"Kempththal"	
1948	11	16	certain	47.45	8.7	695100	256200	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Kempththal"	
1948	11	23	certain	47.417	8.783	701400	252700	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.9	<= 1	V	5	""	"Weisslingen"	
1948	11	30	certain	47.45	8.7	695100	256200	<= 5	<= 5	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Kempththal"	
1950	4	7	certain	47.3	8.3	665100	239100	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Boswil AG"	
1951	12	30	certain	47.183	8.533	682900	226400	<= 5	<= 5	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	"Baar-Inwil"	
1955	1	31	certain	46.983	8.75	699800	204400	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	"Muotathal SZ"	
1960	5	7	certain	47.367	8.533	682700	246800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Zuerich"	
1960	5	10	certain	47.367	8.533	682700	246800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	"Zuerich"	
1960	5	20	certain	47.367	8.533	682700	246800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Zuerich"	
1960	11	8	certain	46.9	8.25	661800	194600	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Sarnen"	
1961	5	12	certain	47	8.3	665500	205800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Sarnen"	
1964	2	17	certain	46.88	8.27	663400	192400	<= 20	<= 20	"SED (ECOS-09)"	4.8		VII	7	"VII"	93	"Sarnen"
1964	2	17	certain	46.9	8.3	665600	194700	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Sarnen"	
1964	2	18	certain	46.92	8.28	664100	196900	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Sarnen"	
1964	2	25	certain	46.88	8.37	671000	192500	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Sarnen"	
1964	3	11	certain	46.87	8.3	665700	191300	<= 20	<= 20	"SED (ECOS-09)"	4.2	<= 1	V	5	"V"	31	"Sarnen"
1964	3	13	certain	46.87	8.35	669500	191400	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Sarnen"	
1964	3	14	certain	46.867	8.317	667000	191000	<= 20	<= 20	"SED (ECOS-09)"	5.3		VII	7	"VII"	362	"Sarnen"
1964	3	14	certain	46.9	8.25	661800	194600	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.9	<= 1	V	5	""	"Sarnen"	
1964	3	16	certain	46.9	8.25	661800	194600	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Sarnen"	
1964	5	12	certain	46.9	8.65	692300	195000	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Sarnen"	
1964	6	18	certain	46.95	8.33	667900	200300	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Sarnen"	
1964	11	11	certain	46.9	8.25	661800	194600	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	"Sarnen"	
1965	2	10	certain	46.95	8.367	670700	200300	<= 20	<= 20	"SED (ECOS-09)"	3.5	<= 1	IV	4	"IV"	23	"Sarnen"
1965	8	20	certain	46.9	8.25	661800	194600	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Sarnen"	
1966	2	12	certain	46.95	8.817	704900	200800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.5	<= 1	IV-V	45	""	"Duerrnenboden-Bisstal SZ"	
1966	3	4	certain	46.9	8.25	661800	194600	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Sarnen"	
1966	3	16	certain	47.417	8.233	659900	252100	<= 50	<= 50	"SED (ECOS-09)"	3.5	<= 1	V	5	"V"	100	"Maegenwil"
1966	4	22	certain	46.9	8.25	661800	194600	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Sarnen"	
1970	7	23	certain	47	8.3	665500	205800	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Sarnen"	
1971	5	3	certain	47.417	8.083	648600	252000	<= 10	<= 10	"SED (MECOS-99)"	3.1	<= 1	IV	4	""	"Biberstein AG"	
1971	9	29	certain	47	9	718700	206600	<= 50	<= 20	"SED (ECOS-09)"	4.9		VI	6	"VI"	297	"Glarus"

Anhang A3: Katalog rezente Erdbeben (Instrumentelle Messung)

Alle Ereignisse befinden sich im Untersuchungsperimeter und wurden nach folgenden Kriterien selektiert:

GAP < 220° Grad
D_MIN < 40 km (min. Epizentraldistanz)
N_OBS min. 5 (min. Anzahl Beobachtungen)
RMS < 0.6 Sek.

year	month	date	hour	minute	second	lat	lon	CH_xkoord	CH_ykoord	depth	ML	RMS	GAP	D_MIN	N_OBS
1976	9	23	16	58	23.9	47.442	8.687	694100	255200	6	2.1	0.48	101	35	19
1977	6	30	3	55	31.3	47.416	8.392	671900	252000	18	1.6	0.51	188	7	8
1977	7	30	0	42	59.1	47.165	9.042	721500	224900	10	2.3	0.54	131	31	14
1977	7	30	1	44	0.3	47.157	9.05	722100	224000	10	2	0.37	131	32	11
1977	11	21	19	27	40.4	47.282	8.547	683800	237200	27	3.4	0.31	207	25	14
1978	3	1	5	44	27.2	46.917	8.283	664200	196400	0	2	0.55	78	24	22
1978	3	13	4	18	43.3	47.04	8.33	667700	210100	28	1.9	0.35	67	37	22
1978	3	17	19	20	39.4	47.038	8.315	666500	209900	29	2.4	0.29	66	36	19
1978	5	27	22	36	0.9	47.168	8.613	689000	224600	23	2	0.42	70	39	14
1978	8	28	14	44	39.9	47.343	8.91	711100	244500	25	3.1	0.31	110	11	13
1978	12	18	12	31	40.5	47.477	8.723	696700	259100	18	1.8	0.17	119	18	8
1978	12	22	15	3	51.8	46.963	8.412	674000	201600	17	1.6	0.5	169	34	9
1979	5	26	20	9	12.8	47.235	8.573	685800	232000	31	3.1	0.45	72	31	20
1979	10	10	0	23	28.8	46.892	8.263	662700	193600	1	1.9	0.49	121	21	20
1979	11	30	0	44	52.8	47.278	8.517	681500	236800	31	3	0.26	68	25	18
1979	12	1	9	46	8.2	47	8.19	657100	205600	18	2	0.45	142	28	10
1980	3	25	15	27	50.6	47.072	8.635	690800	214000	20	2.5	0.52	89	38	21
1980	3	31	1	8	48.6	47.063	8.635	690800	213000	25	2.4	0.47	91	37	20
1980	5	7	23	36	34.1	47.082	8.658	692500	215100	29	1.7	0.22	104	37	10
1980	10	10	16	22	25.9	46.94	8.245	661300	198900	1	2.3	0.34	113	24	21
1981	2	2	11	43	9.9	47.168	8.527	682400	224500	18	1.3	0.08	170	36	9
1981	4	6	16	21	18.6	47.473	8.387	671400	258300	9	1.2	0.09	174	1	8
1981	7	23	2	56	59.6	46.9	9.068	724100	195500	9	1.6	0.23	104	7	13
1981	8	12	17	40	8.8	46.882	8.32	667100	192600	1	1.7	0.52	129	23	11
1981	8	21	12	18	59.2	46.898	8.79	702900	194800	12	1.9	0.32	121	18	11
1982	1	12	22	56	18.3	47.477	8.757	699300	259200	12	1.7	0.37	136	16	15
1982	2	17	0	15	51.6	47.012	9.002	718800	207800	8	1.7	0.24	109	18	18
1982	2	20	16	40	39.9	47.41	8.855	706800	251800	1	1.6	0.44	100	8	9
1982	2	20	17	11	59	47.398	8.938	713100	250600	4	1.7	0.38	207	5	9
1982	2	21	0	10	21.5	47.418	8.878	708500	252800	4	1.7	0.52	103	6	11
1982	2	22	9	5	53.8	47.385	8.985	716700	249200	6	2	0.25	151	7	20
1982	2	23	21	39	44.6	47.387	8.978	716100	249500	6	1.8	0.34	147	6	24
1982	2	23	21	43	34.6	47.385	8.987	716800	249200	6	1.9	0.32	152	7	26
1982	2	25	5	39	56.4	47.392	9.018	719100	250100	12	2.1	0.46	174	7	26
1982	3	17	15	59	58.7	47.21	8.983	716900	229800	1	1.9	0.33	125	26	34
1982	8	9	7	37	40.1	46.915	8.842	706800	196800	1	2.3	0.4	86	15	23
1983	1	4	21	26	53.6	46.958	8.718	697300	201400	0	2	0.48	173	6	10
1983	1	8	13	11	12	46.878	8.328	667700	192100	12	1.8	0.16	142	24	9
1983	2	27	18	27	36.2	47.357	8.925	712200	246000	25	1.6	0.17	193	10	9
1983	3	14	2	49	29.9	46.898	8.645	691800	194700	2	1.7	0.3	103	8	10
1983	3	14	2	51	4.6	46.895	8.645	691800	194300	1	1.7	0.48	105	8	10
1983	3	21	0	59	32.4	47.067	8.672	693600	213500	4	2.3	0.39	77	11	28
1983	3	27	22	15	1.7	46.927	8.487	679800	197700	4	2	0.59	80	12	20
1983	4	3	16	16	9.4	46.862	8.957	715700	191100	1	1.7	0.41	109	4	12
1983	4	10	12	51	3.5	46.92	8.432	675600	196900	1	2.1	0.29	120	16	13
1983	4	23	0	4	38.1	46.898	8.467	678300	194500	4	2.7	0.44	47	15	24
1983	5	14	19	12	58.3	46.983	8.525	682600	204000	5	1.9	0.28	71	9	13
1983	11	30	10	45	58.7	47.308	8.69	694500	240300	10	1.9	0.35	70	25	17
1984	1	4	2	12	41.3	47.448	8.577	685800	255700	14	1.6	0.06	193	15	6
1984	1	11	9	17	35.6	47.352	8.795	702400	245300	10	1.4	0.21	100	16	9
1984	1	11	14	11	57.8	47.335	8.815	703900	243400	11	3.2	0.11	69	16	30
1984	5	13	11	8	6.8	46.86	8.984	717700	190900	1	1.9	0.26	60	2	17
1984	6	3	4	5	42.8	46.947	8.672	693800	200100	2	1.6	0.4	75	4	18
1984	7	27	9	9	47	47.447	8.61	688300	255600	1	1.8	0.1	185	10	5
1984	9	5	5	16	49.3	47.247	8.562	685000	233400	15	4	0.1	95	18	26
1984	9	14	22	30	29.4	47.243	8.557	684600	232900	24	2.9	0.14	62	19	30
1984	9	25	6	34	52.9	47.001	8.572	686100	206000	7	1.7	0.25	87	6	13

1984	12	7	11	46	0.1	46.959	8.563	685500	201300	2	1.8	0.49	108	6	10
1985	1	7	9	52	31.5	47.162	8.303	665500	223700	27	2.1	0.08	86	33	25
1985	2	10	6	35	57.6	46.875	8.536	683600	192000	3	1.5	0.18	213	13	7
1985	2	24	21	44	14.7	47.412	8.125	651700	251300	16	1.6	0.06	182	2	12
1985	3	3	2	35	59.9	46.998	8.672	693700	205800	1	1.8	0.33	84	4	15
1985	7	23	6	33	25	46.985	8.624	690100	204300	1	1.4	0.45	124	2	6
1985	9	6	16	35	36.5	46.972	8.851	707400	203100	7	1.6	0.15	156	16	11
1985	9	29	23	36	3.3	46.922	8.308	666100	197000	1	2.5	0.29	49	25	44
1985	11	2	6	52	13.7	46.902	8.652	692400	195100	1	1.7	0.24	132	8	13
1985	11	2	7	53	40.4	46.894	8.649	692200	194200	1	2	0.15	80	8	27
1985	11	17	23	3	48.8	46.97	8.929	713300	203000	17	1.2	0.1	135	15	7
1985	12	21	17	19	22.9	46.88	8.311	666400	192300	8	2.9	0.36	42	23	48
1985	12	29	12	30	46.3	46.961	8.653	692300	201700	0	1.6	0.13	100	1	6
1986	4	12	0	34	32.6	46.986	8.649	692000	204400	1	1.6	0.36	135	2	11
1986	9	19	17	1	2	47.427	9.097	725000	254100	1	1.9	0.14	187	11	6
1986	10	8	3	12	7.3	47.272	8.533	682700	236100	28	2	0.17	62	26	23
1987	1	18	2	11	29.5	46.996	8.919	712500	205900	19	1.5	0.06	109	18	7
1987	5	1	11	32	46	46.96	8.667	693400	201600	1	1.5	0.36	93	2	15
1987	5	5	20	29	2.8	47.225	8.564	685100	230900	29	2.3	0.15	62	29	49
1987	7	8	0	51	0.5	47.017	9.006	719100	208400	6	1.4	0.17	62	19	26
1987	7	14	3	37	39.6	47.018	9.009	719300	208500	6	1.9	0.24	49	19	42
1987	7	31	4	31	47.7	47.018	9.009	719300	208500	0	1.6	0.22	51	19	35
1987	10	9	18	33	39.3	46.886	8.879	709700	193600	1	1.6	0.32	106	11	7
1987	10	11	20	36	57.3	47.043	8.698	695600	210800	19	1.7	0.28	73	32	17
1987	10	19	6	46	45.3	47.388	8.588	686700	249100	12	1.9	0.16	185	17	14
1987	10	27	21	37	41.9	46.881	8.87	709000	193100	1	1.5	0.29	106	11	9
1987	11	5	16	58	54.3	47.017	9.014	719700	208400	1	1.6	0.18	101	15	26
1987	11	9	14	7	10.7	47.018	9.006	719100	208500	2	2.5	0.21	49	14	50
1988	1	19	10	11	3.4	46.874	8.282	664200	191600	1	2	0.34	60	20	20
1988	4	4	15	36	58.3	47.177	8.54	683400	225600	17	1.7	0.16	89	36	16
1988	4	12	5	39	7.8	46.885	8.876	709500	193500	4	1.8	0.29	40	11	31
1988	9	11	23	1	54.4	47.13	8.39	672100	220200	29	2.5	0.16	171	26	16
1988	11	24	1	53	36.2	47.04	8.585	687000	210400	1	1.2	0.27	128	9	8
1989	5	2	22	49	24.3	47.035	8.999	718500	210400	1	1.5	0.14	60	21	21
1989	6	9	1	30	39.7	47.478	8.331	667200	258800	18	1.3	0.1	156	4	20
1989	9	5	5	10	4.7	47.037	8.787	702400	210300	4	2.5	0.3	45	14	50
1989	9	13	12	53	51.7	47.037	8.787	702400	210300	4	2.5	0.37	45	14	43
1989	9	13	13	3	22.4	47.04	8.79	702600	210600	4	1.7	0.2	109	14	5
1989	10	24	12	3	25.7	47.353	8.591	687000	245200	12	2.1	0.14	105	20	24
1989	10	26	17	32	12.2	47.037	8.791	702700	210300	4	1.8	0.42	50	14	28
1990	9	3	21	50	32.1	47.169	8.124	651900	224300	27	2.1	0.09	107	23	22
1990	9	11	5	13	25.8	46.898	8.231	660300	194300	0	2.1	0.04	152	5	6
1990	11	17	17	19	31.4	46.899	9.002	719000	195200	5	2.1	0.2	118	6	27
1990	11	18	3	27	10.6	46.883	8.996	718600	193500	5	2.7	0.26	101	4	45
1990	11	18	3	29	25.7	46.907	9.013	719900	196200	4	2.1	0.21	119	7	23
1990	11	22	15	51	19.3	46.893	9.004	719200	194600	5	3.7	0.27	62	5	65
1990	11	29	17	46	0.1	46.891	9.002	719100	194400	4	2.3	0.25	71	5	26
1991	7	1	12	58	11.2	46.899	8.997	718700	195200	1	1.8	0.22	216	6	12
1992	4	10	12	19	55.6	46.948	8.644	691700	200200	2	2.4	0.22	131	2	7
1992	6	12	11	47	51.3	46.893	8.539	683800	194000	12	1.4	0.1	116	11	8
1992	6	25	22	31	23.4	47.002	9.08	724700	206800	8	2.1	0.31	82	18	9
1992	6	25	23	11	13.8	46.994	9.077	724500	205900	10	1.5	0.3	90	17	7
1992	7	1	4	54	11.5	47.009	9.082	724900	207600	10	1.8	0.29	153	34	5
1992	7	4	3	6	8.8	46.997	9.075	724400	206300	8	1.8	0.28	92	17	9
1992	7	18	7	25	15.5	47.036	8.621	689800	210000	3	1.6	0.17	109	8	8
1992	12	6	10	58	43	46.904	8.293	665000	195000	0	2.1	0.34	103	5	9
1992	12	13	18	26	37.4	46.927	8.835	706300	198100	7	1.3	0.17	139	16	12
1992	12	15	17	55	45.4	46.903	8.293	665000	194900	2	1.6	0.37	104	5	9
1993	1	19	23	33	2.3	46.872	8.956	715600	192200	1	2.3	0.24	101	5	13
1993	1	23	18	7	41.2	46.871	8.951	715200	192100	0	1.5	0.08	185	5	11
1993	3	27	20	33	0.6	46.889	8.665	693400	193700	1	1.7	0.29	96	9	15
1993	4	30	4	42	45.5	46.971	8.693	695400	202800	1	1.3	0.4	212	4	10
1993	6	7	21	52	45.8	47.459	8.715	696200	257100	8	1.9	0.12	142	11	25
1993	8	12	20	14	38.9	46.907	8.658	692800	195700	1	1.3	0.25	116	7	13
1993	10	29	0	50	16.6	47.471	8.674	693000	258400	10	0.8	0.12	220	9	6
1993	12	5	6	33	45.7	46.889	8.732	698500	193800	7	1.8	0.13	178	11	8

1993	12	19	21	43	48.1	46.884	8.986	717800	193600	2	1.3	0.16	165	4	9
1993	12	21	23	3	55	46.914	8.659	692900	196500	1	2	0.38	92	6	18
1994	2	9	18	2	15.2	46.908	9.054	723000	196300	2	2	0.21	116	7	17
1994	5	23	6	17	11.4	46.903	8.227	660000	194800	0	1.9	0.49	120	5	12
1994	7	6	3	5	16.6	46.901	8.226	659900	194600	1	2.4	0.43	157	5	10
1994	7	16	3	28	18.1	46.905	8.233	660400	195000	1	2	0.42	152	5	10
1994	8	22	16	5	39.8	47.27	8.697	695100	236100	28	2.4	0.18	57	27	33
1994	8	26	0	32	39.9	46.896	8.646	691900	194400	1	1.1	0.39	125	8	9
1994	8	28	6	4	45.3	46.871	8.772	701600	191800	4	3.9	0.34	61	12	15
1994	8	28	14	57	41.5	46.884	8.767	701200	193300	1	1.2	0.21	148	12	12
1994	8	29	2	4	56.3	46.867	8.767	701200	191400	4	2	0.33	62	11	20
1994	8	29	10	48	13.9	46.881	8.775	701800	192900	1	1.7	0.28	148	13	20
1994	8	29	15	16	42.7	46.887	8.769	701300	193600	1	1.7	0.2	151	13	15
1994	9	5	19	14	58.5	46.878	8.775	701800	192600	1	1.4	0.31	146	12	18
1994	9	9	4	46	28.4	46.862	8.91	712100	191000	6	1.9	0.1	152	8	11
1994	9	23	3	39	13.8	46.878	8.771	701500	192600	0	1.5	0.34	145	12	17
1994	11	12	1	26	21.3	46.878	8.368	670800	192100	1	1.6	0.28	145	12	8
1994	12	28	22	18	47.6	46.868	8.768	701300	191500	4	2	0.36	61	11	20
1995	5	19	9	49	6.1	46.95	8.727	698000	200500	3	1.9	0.32	103	7	8
1995	9	19	16	14	15.2	46.963	8.517	682000	201700	5	1.4	0.23	150	9	10
1995	9	19	16	24	6.3	46.955	8.522	682400	200900	6	1.5	0.42	90	9	8
1995	9	19	16	40	46.5	46.964	8.515	681800	201900	0	1.8	0.28	120	9	15
1995	9	19	18	8	34.8	46.958	8.523	682500	201200	7	2.2	0.2	81	9	23
1995	10	24	7	3	9.3	47.488	8.157	654100	259800	15	1.6	0.05	90	6	10
1995	11	16	5	57	21.3	47.057	8.798	703200	212500	4	4	0.41	62	16	12
1995	11	16	6	12	18	47.057	8.798	703200	212500	4	1.6	0.46	118	16	11
1995	11	16	17	35	12.4	47.057	8.798	703200	212500	4	2.5	0.44	83	16	13
1995	11	21	23	4	29.9	47.057	8.798	703200	212500	4	1.3	0.39	90	16	7
1995	11	27	12	37	27.9	47.073	8.924	712700	214500	1	1.9	0.24	107	25	12
1995	12	16	12	51	56.7	47.057	8.798	703200	212500	4	1.9	0.45	90	16	8
1995	12	16	22	39	30.1	47.057	8.798	703200	212500	4	1.4	0.49	90	16	8
1996	2	28	23	1	24.8	47.056	8.934	713500	212600	8	2.3	0.27	58	24	23
1996	2	28	23	13	29.4	47.041	8.914	712000	210900	17	1.4	0.16	107	22	8
1996	5	1	12	7	45.9	46.905	8.991	718200	195900	3	1.7	0.13	172	6	8
1996	5	1	13	39	7	46.924	8.296	665200	197200	7	1.6	0.12	134	5	7
1996	6	9	6	29	5.8	47.337	8.111	650700	243000	19	1.8	0.12	83	10	26
1996	6	23	19	8	26.2	47.007	9.077	724500	207400	10	1.5	0.36	116	18	9
1996	6	27	18	24	47.3	46.878	8.772	701600	192600	5	1.9	0.27	91	12	17
1996	8	24	2	38	22.4	47.423	9.045	721100	253600	29	3.9	0.12	178	10	20
1996	8	24	2	42	25	47.419	9.033	720200	253100	29	2.8	0.14	175	9	22
1996	11	22	12	19	35.1	47.227	8.482	678900	231000	31	2.4	0.09	80	29	18
1996	12	7	4	49	20	46.914	8.424	675000	196200	3	1.1	0.13	143	13	9
1996	12	7	5	34	28.4	46.9	8.434	675800	194700	2	2.7	0.17	133	13	11
1997	1	7	21	17	12.6	47.1	9.064	723300	217700	12	1.5	0.18	64	27	16
1997	9	27	15	30	44.4	46.899	9.011	719700	195300	2	1.3	0.25	219	6	9
1997	10	23	12	7	1.5	47.18	8.626	689900	226000	30	3.2	0.06	77	24	13
1997	11	9	13	58	5.9	46.919	8.335	668200	196700	8	1.5	0.1	141	8	6
1998	1	9	5	1	9.6	47.186	8.611	688800	226600	29	1.9	0.16	52	24	29
1998	2	18	17	24	18.9	46.979	8.833	706000	203900	4	1.5	0.13	130	15	12
1998	3	11	4	8	51.7	47.083	8.889	710000	215500	10	1.2	0.27	99	23	12
1998	4	26	12	43	53.5	47.044	8.917	712300	211200	14	1.8	0.21	108	23	9
1998	4	29	18	10	53.3	47.212	8.5	680300	229400	31	2.3	0.18	63	29	27
1998	5	1	16	15	17.5	47.342	8.109	650600	243500	20	1.7	0.15	80	9	21
1998	5	3	15	31	1.6	46.867	8.589	687600	191100	3	1.8	0.31	99	12	12
1998	5	6	14	57	4.7	47.426	8.042	645400	252800	9	1.7	0.18	93	5	20
1998	7	1	4	34	44.7	46.999	8.649	692000	205900	1	1.3	0.49	123	3	9
1998	7	5	8	4	9.3	47.037	8.904	711300	210400	7	0.9	0.1	159	22	7
1998	9	22	4	48	7.1	46.994	8.64	691300	205300	1	1.6	0.42	92	3	11
1998	11	8	2	41	36.5	46.922	8.684	694800	197400	3	1	0.16	145	6	8
1998	12	3	14	46	3.8	47.248	8.595	687500	233500	28	2.2	0.11	54	14	17
1999	1	4	14	33	15.1	47.433	8.621	689100	254100	12	1.7	0.1	97	8	22
1999	5	22	7	57	28.7	46.944	8.748	699600	199900	3	1.8	0.18	80	9	10
1999	5	24	19	3	8.6	46.975	8.575	686400	203100	3	1.2	0.18	112	5	10
1999	5	27	3	17	48.2	46.904	8.291	664900	195000	3	1.6	0.07	110	6	8
1999	5	29	20	11	16.1	47.227	8.637	690700	231200	10	2.1	0.15	59	17	19
1999	6	8	17	4	42.8	46.963	8.752	699900	202000	3	0.8	0.09	209	9	6

1999	6	13	7	21	6.2	46.908	8.888	710300	196100	8	1.2	0.05	196	11	6
1999	7	21	22	22	50	46.933	8.408	673700	198300	9	1.4	0.21	97	7	10
1999	12	17	10	32	36.8	47.227	8.587	686900	231200	30	1.9	0.17	94	16	16
2000	8	17	7	14	7.5	46.952	8.484	679500	200500	10	3	0.12	36	10	24
2000	8	23	4	50	58.7	46.996	8.628	690400	205500	3	1.2	0.4	220	3	6
2001	1	10	21	2	54.1	47.409	8.12	651300	251000	17	1.7	0.07	91	12	15
2001	3	17	0	29	59.8	46.92	9.006	719300	197600	3	3.8	0.22	80	8	21
2001	3	20	2	40	43.8	46.919	9.004	719100	197500	4	1.7	0.11	80	1	17
2001	3	21	0	40	13.9	46.917	9.003	719100	197300	5	1.7	0.08	141	8	16
2001	5	18	12	51	23.3	46.928	8.594	687900	197900	2	1	0.15	121	6	13
2001	5	30	3	35	39.9	46.959	8.725	697800	201500	2	1.6	0.16	125	7	11
2001	6	2	8	12	4.1	46.892	8.586	687400	193900	6	2.6	0.16	101	9	16
2001	8	5	10	16	8.1	46.894	8.994	718400	194700	4	2.4	0.17	82	4	21
2001	8	5	10	59	59.7	46.891	8.993	718400	194300	5	1.6	0.16	131	5	15
2001	8	5	14	59	52.7	46.895	8.992	718300	194800	4	2.2	0.18	85	4	22
2001	8	17	3	3	22.4	46.89	8.99	718100	194200	4	1.4	0.1	131	5	12
2001	10	24	3	39	59.5	47.414	8.54	683000	251900	9	1.8	0.13	94	6	22
2001	11	15	4	26	35.5	46.868	8.705	696500	191400	9	1	0.14	121	12	11
2001	12	24	11	38	19.6	46.938	8.676	694100	199100	3	2	0.21	62	5	21
2002	1	11	9	30	22.4	46.939	8.637	691200	199200	3	2.2	0.14	116	3	12
2002	1	16	8	46	12.9	46.89	8.495	680400	193600	8	1.1	0.09	162	6	6
2002	3	18	20	49	44.7	47.365	8.036	645000	246000	18	2	0.1	104	19	21
2002	3	26	4	32	13.3	46.904	8.46	677700	195100	10	2	0.08	118	4	15
2002	3	31	19	39	27.4	46.898	8.28	664000	194300	3	2.5	0.05	108	1	9
2002	4	21	2	47	57.6	47.074	8.74	698800	214300	2	1.1	0.09	108	14	11
2002	5	13	12	4	3.7	46.951	8.666	693300	200600	3	1.4	0.19	160	3	10
2002	6	24	1	58	49.6	46.858	8.615	689600	190200	4	0.8	0.03	153	13	6
2002	6	25	16	29	51.7	47.032	9.071	724000	210100	2	1.5	0.16	108	21	14
2002	6	30	19	15	39.5	46.922	8.664	693200	197300	2	1	0.28	137	6	10
2002	7	13	8	24	27.4	46.91	8.887	710200	196300	4	1.2	0.11	138	12	7
2002	8	13	0	30	46.8	46.968	8.721	697500	202500	2	1.2	0.09	105	6	7
2002	8	18	1	45	19.5	46.897	8.475	678900	194400	9	1.1	0.08	179	5	8
2002	9	4	20	16	40.9	46.888	8.366	670600	193300	1	1.4	0.02	120	5	7
2002	9	30	3	11	34.1	46.946	8.271	663300	199600	2	1.4	0.05	204	2	5
2002	11	22	11	41	46.4	46.891	8.484	679600	193700	9	0.7	0.05	124	5	9
2002	12	6	23	58	45.7	46.897	8.314	666600	194200	9	1.1	0.03	151	8	6
2002	12	8	2	17	48.1	46.897	8.314	666600	194200	9	0.8	0.03	151	8	5
2002	12	8	11	23	29.1	46.898	8.314	666600	194300	9	1.1	0.01	152	8	6
2002	12	10	7	8	36.4	46.906	8.217	659200	195100	5	1.1	0.03	185	5	5
2002	12	12	2	19	48.6	46.89	8.306	666000	193400	9	1.9	0.18	72	8	27
2002	12	12	2	44	30.9	46.888	8.31	666300	193200	10	1.6	0.21	94	9	25
2003	2	26	5	53	55.7	47.342	8.995	717500	244500	19	1.6	0.21	217	11	12
2003	5	6	21	59	43.4	46.905	8.908	711900	195800	3	4	0.18	72	8	17
2003	5	7	3	44	28.3	46.904	8.908	711900	195700	5	1.1	0.03	136	10	6
2003	5	7	11	13	55.5	46.906	8.909	711900	195900	4	1.8	0.09	137	10	9
2003	5	7	22	28	21.1	46.91	8.916	712500	196300	5	1	0.03	139	10	5
2003	5	12	14	29	34.4	47.396	8.996	717500	250500	2	1.4	0.26	149	39	8
2003	5	12	21	32	23.9	46.906	8.917	712500	195900	5	1.6	0.07	137	10	11
2003	6	10	22	53	34.5	46.906	8.907	711800	195900	4	1.2	0.07	137	10	7
2003	6	10	22	57	23.1	46.9	8.905	711600	195200	4	1.5	0.1	134	10	9
2003	6	14	5	33	59.2	46.903	8.908	711900	195600	4	1.2	0.1	136	10	9
2003	6	14	5	47	49.7	46.905	8.904	711600	195800	5	2	0.14	136	10	13
2003	6	21	23	15	40.1	46.897	8.91	712000	194900	6	1	0.06	169	9	7
2003	6	21	23	43	25.6	46.9	8.909	711900	195200	5	0.6	0.07	138	10	7
2003	7	8	21	30	18.6	47.213	8.821	704600	229900	32	0.9	0.08	97	23	13
2003	7	21	9	16	59.1	47.434	8.996	717400	254700	32	2	0.07	215	7	9
2003	8	5	0	0	51.6	46.91	8.923	713000	196400	5	2.1	0.09	139	10	10
2003	10	21	3	32	2.8	47.281	8.937	713300	237600	24	1.2	0.13	93	15	19
2003	11	7	23	33	56.7	46.906	8.911	712100	195900	5	1.7	0.11	137	10	10
2003	12	6	8	28	12.3	46.977	8.835	706200	203700	3	1	0.05	172	15	8
2003	12	14	11	26	6.2	47.427	9.039	720700	254000	28	1.6	0.07	147	10	12
2004	3	8	17	4	23	47.27	8.937	713300	236400	20	1.3	0.12	78	16	23
2004	3	17	8	3	49.6	46.932	8.843	706900	198700	4	1.4	0.06	147	16	8
2004	3	18	15	59	46.2	46.905	8.745	699400	195600	6	0.9	0.05	120	11	8
2004	3	28	13	4	40.8	46.912	8.911	712100	196600	4	1	0.11	140	10	8
2004	3	30	23	58	37.4	47.077	9.038	721400	215100	10	0.7	0.05	129	26	10

2004	3	31	16	25	37	46.934	8.847	707200	198900	4	0.7	0.03	148	16	5
2004	4	2	7	11	55.9	46.904	8.913	712200	195700	6	1	0.14	161	10	6
2004	4	5	20	17	34.9	46.901	8.904	711600	195300	4	2	0.17	70	10	15
2004	5	10	15	44	22.7	47.455	9.076	723400	257200	13	1.8	0.13	152	11	23
2004	5	20	13	29	12.1	46.938	8.848	707200	199400	4	1	0.06	151	16	7
2004	6	4	2	30	4.2	46.93	8.29	664800	197900	1	1.4	0.15	119	2	7
2004	6	13	17	12	41.6	47.04	8.635	690800	210400	2	1.4	0.18	133	8	9
2004	7	18	19	1	3.6	46.894	8.636	691200	194200	5	0.6	0.04	148	8	6
2004	8	24	9	18	41.7	46.961	8.797	703300	201800	3	1.9	0.16	95	12	11
2004	8	24	10	13	39.7	46.979	8.8	703500	203900	3	1	0.03	175	12	7
2004	8	26	3	30	10.1	46.904	8.913	712200	195700	5	1.5	0.12	136	10	11
2004	9	3	20	35	49.1	46.904	8.909	711900	195700	5	1.1	0.17	136	10	9
2004	9	19	15	22	5.2	47.142	9.058	722700	222300	1	2	0.17	74	27	12
2004	10	19	1	2	43.7	47.408	8.753	699100	251500	18	0.8	0.15	73	12	16
2004	11	1	19	0	20.5	46.934	8.28	664000	198300	1	1.8	0.14	130	1	7
2004	11	6	0	47	46.7	46.946	8.668	693500	200000	3	0.5	0.19	130	4	8
2004	11	6	9	44	16.6	46.991	8.725	697800	205100	2	1.7	0.13	113	7	10
2004	11	23	21	12	12.2	46.859	8.851	707600	190600	5	0.9	0.04	177	12	6
2005	1	11	22	45	12.7	47.02	8.999	718500	208700	7	0.7	0.12	152	19	9
2005	2	1	13	19	21.2	46.896	8.914	712300	194800	8	1.1	0.08	140	9	6
2005	2	14	18	49	56.9	47.263	8.519	681700	235100	26	2.2	0.11	87	13	25
2005	4	25	7	23	1.8	46.924	8.768	701200	197700	2	1.2	0.12	177	11	8
2005	6	18	15	14	1.8	46.906	8.571	686200	195500	5	0.8	0.01	145	9	5
2005	8	22	15	13	38.1	46.933	8.362	670200	198300	2	2.4	0.26	104	21	14
2005	8	22	21	9	52.3	46.994	8.551	684500	205200	1	2	0.26	128	7	15
2005	8	22	21	27	39.8	46.955	8.788	702600	201200	9	1.4	0.03	152	12	6
2005	8	22	23	17	16.6	46.972	8.801	703600	203100	6	1.5	0.06	78	12	9
2005	8	22	23	20	9.8	46.962	8.814	704600	202000	3	2.3	0.32	48	13	25
2005	8	23	0	3	49.9	46.955	8.27	663200	200600	1	1.9	0.39	102	1	16
2005	8	23	0	6	25.1	46.937	8.685	694800	199000	0	1.6	0.14	133	5	11
2005	8	23	0	19	25.6	46.997	8.839	706400	205900	2	1.4	0.05	144	16	6
2005	8	23	1	24	37.9	46.942	8.699	695900	199600	2	1.8	0.16	101	6	13
2005	8	23	1	39	5.1	46.966	8.809	704200	202400	3	1.3	0.07	107	13	7
2005	8	23	2	5	57.1	46.934	8.685	694800	198700	2	1.7	0.14	113	5	11
2005	8	23	2	8	17.2	46.938	8.676	694100	199100	0	1.7	0.21	138	5	9
2005	8	23	2	21	9.3	46.939	8.681	694500	199300	2	1.6	0.19	113	5	9
2005	8	23	2	24	55.1	46.977	8.816	704700	203700	2	1.9	0.24	68	14	15
2005	8	23	2	36	16.9	47.005	8.819	704900	206800	1	1.5	0.13	143	14	6
2005	8	23	2	39	22.5	47.009	8.832	705900	207200	1	1.3	0.13	141	15	5
2005	8	23	2	42	21.9	47.005	8.832	705900	206800	0	1.7	0.16	142	15	7
2005	8	23	2	55	35.5	46.984	8.815	704600	204400	2	1.3	0.08	151	14	6
2005	8	23	2	56	53.7	46.98	8.817	704800	204000	2	1.6	0.05	153	14	7
2005	8	23	3	5	28.1	46.966	8.81	704300	202400	3	1.8	0.14	91	13	11
2005	8	23	3	12	35.3	46.975	8.821	705100	203400	3	1.5	0.17	100	14	8
2005	8	23	3	17	37.4	46.939	8.641	691500	199200	1	1.2	0.05	174	3	7
2005	8	23	4	1	3.1	46.973	8.827	705600	203200	5	1.4	0.04	175	14	6
2005	8	23	4	13	32.1	46.943	8.695	695600	199700	3	1.8	0.14	138	5	8
2005	8	23	4	19	38.2	46.994	8.863	708300	205600	3	1.6	0.26	120	17	11
2005	8	23	4	54	3.4	46.974	8.855	707700	203400	2	2.2	0.16	73	17	18
2005	8	23	5	44	4.2	46.973	8.807	704000	203200	5	1.6	0.07	176	13	8
2005	8	23	5	49	22.7	46.963	8.811	704400	202100	0	1.2	0.02	217	13	5
2005	8	23	6	3	18.6	46.974	8.815	704600	203300	2	1.6	0.06	171	13	8
2005	8	23	7	41	27.4	46.996	8.87	708800	205800	10	2	0.31	140	18	8
2005	8	23	7	49	15.6	46.934	8.665	693300	198700	1	1.3	0.08	152	4	5
2005	8	23	10	22	34.9	46.968	8.798	703400	202600	1	2	0.2	80	12	10
2005	8	23	19	15	33.8	46.954	8.686	694900	200900	1	1	0	142	4	5
2005	8	23	19	48	29.9	46.928	8.342	668700	197700	3	1.9	0.15	104	23	11
2005	8	23	21	34	52.3	46.999	8.852	707400	206100	1	1.5	0.15	142	17	6
2005	8	24	1	59	38.8	46.949	8.262	662600	199900	1	1.5	0.11	97	23	12
2005	8	24	10	18	19.2	46.935	8.252	661900	198400	4	1.8	0.19	125	21	9
2005	8	29	2	45	58.1	46.933	8.699	695900	198600	2	2	0.2	86	6	16
2005	8	29	12	52	43.8	46.943	8.687	695000	199700	1	1.6	0.22	129	5	11
2005	8	31	17	6	55.3	46.928	8.329	667700	197700	5	1.2	0.13	139	23	6
2005	9	26	10	6	12.8	46.973	8.848	707200	203300	5	1	0.07	175	16	7
2005	9	29	10	42	56.5	46.928	8.692	695400	198000	1	0.8	0.4	162	6	7
2005	10	2	22	6	20.9	47.274	8.936	713200	236800	20	0.9	0.11	167	29	12

2005	12	26	1	14	39.3	46.96	8.235	660500	201200	1	0.8	0.25	153	18	7
2005	12	29	21	4	34.3	47.297	8.937	713200	239400	30	0.9	0.13	82	13	17
2006	1	30	3	38	50.5	47.272	8.935	713100	236600	20	1.2	0.17	78	16	31
2006	1	31	3	50	5.7	47.159	8.267	662700	223300	24	1.3	0.14	97	34	26
2006	2	8	5	50	41.1	46.971	8.782	702100	202900	6	1.3	0.14	170	11	8
2006	3	11	11	23	29.8	47.49	8.089	648900	260000	12	1.6	0.22	123	5	25
2006	3	11	11	24	1	47.489	8.088	648900	259900	13	2.1	0.21	123	5	26
2006	4	2	23	2	23.8	47.026	8.973	716500	209300	2	1.7	0.23	156	20	14
2006	4	11	18	1	5.5	47.256	9.084	724400	235100	6	1.5	0.17	95	22	16
2006	5	12	13	27	6.6	47.074	8.132	652600	213700	14	1.9	0.11	90	32	14
2006	5	14	11	6	22.8	46.932	8.69	695200	198500	-1	0.8	0.03	154	6	6
2006	5	27	20	28	27.6	47.055	8.644	691500	212100	0	1.1	0.15	136	10	8
2006	5	29	17	12	33.7	46.938	8.689	695100	199200	0	1.5	0.2	125	5	17
2006	6	7	22	17	55	46.987	8.798	703300	204700	5	1.7	0.05	180	12	8
2006	6	26	2	52	3.6	46.937	8.723	697700	199100	5	0.7	0.02	175	7	6
2006	7	12	5	14	12.3	46.939	8.673	693900	199200	0	1.2	0.03	115	4	6
2006	8	27	14	32	22	46.893	8.883	710000	194400	7	1	0.12	137	11	7
2006	8	28	23	27	17	46.932	8.651	692200	198400	-1	1.2	0.06	98	4	10
2006	10	16	20	40	2.8	46.932	8.727	698000	198500	-2	1.5	0.17	133	8	13
2006	11	8	4	49	2.5	47.436	8.272	662800	254100	19	1	0.05	148	16	11
2006	11	18	5	50	29.5	46.979	8.786	702400	203800	6	1.1	0.04	175	11	7
2007	2	14	1	14	53.8	46.934	8.275	663600	198300	-2	1.9	0.23	64	13	16
2007	2	14	6	54	26.1	47.456	8.839	705500	256900	13	1.4	0.1	78	7	15
2007	3	23	20	41	5.9	46.974	8.726	697900	203200	-1	1.5	0.21	110	7	10
2007	4	2	21	55	33.8	46.974	8.721	697500	203200	-1	1	0.18	110	6	9
2007	6	1	1	41	55	46.946	8.765	700900	200100	2	2	0.19	78	10	23
2007	7	11	19	27	45.5	46.962	8.76	700500	201900	4	1.6	0.08	163	9	10
2007	7	12	0	9	32.8	46.949	8.771	701300	200500	0	3	0.2	39	10	51
2007	7	27	23	2	8.5	47.478	8.32	666400	258800	16	2.3	0.08	94	13	20
2007	8	9	21	41	38.5	46.949	8.764	700800	200500	6	1.4	0.1	153	10	11
2007	8	24	18	8	57.6	46.961	8.848	707200	201900	-2	1.8	0.09	91	16	9
2007	9	15	19	51	26	47.016	9.034	721200	208300	6	1.9	0.08	60	19	18
2007	10	7	22	57	12.3	46.901	8.907	711800	195300	7	1	0.11	134	10	6
2007	11	8	20	38	40.5	47.007	8.925	712900	207100	7	1.4	0.14	77	19	22
2007	12	16	6	42	4.5	46.89	8.358	670000	193500	5	1	0.15	139	22	11
2007	12	17	1	56	26.1	46.88	8.423	675000	192400	2	1.6	0.11	105	19	18
2008	1	21	6	11	8.9	47.383	8.69	694400	248600	12	1.8	0.15	72	8	24
2008	1	25	2	14	21.8	46.964	8.774	701500	202200	5	1.3	0.09	165	10	11
2008	3	3	2	39	2.7	47.184	8.181	656200	226000	14	1.3	0.13	132	37	12
2008	3	17	0	8	22.7	47.036	8.665	693100	210000	7	2.1	0.18	58	8	37
2008	3	17	1	8	10	47.04	8.659	692700	210500	7	1.5	0.21	63	8	27
2008	5	12	0	15	6.6	47.341	8.618	689000	243900	11	1	0.06	120	4	13
2008	6	7	19	4	54.6	46.95	8.279	663900	200100	1	1.1	0.14	131	14	8
2008	7	10	20	20	29.1	47.317	8.978	716300	241700	0	1.7	0.11	92	12	13
2008	10	15	2	41	45.1	47.032	8.755	700000	209700	0	1.4	0.09	187	11	6
2008	10	24	21	19	7.2	47.006	8.936	713800	207000	11	0.9	0.11	182	18	7
2009	1	26	3	40	40	47.013	8.928	713200	207800	6	1.2	0.14	86	19	9
2009	1	28	17	28	10.2	46.891	8.912	712200	194200	8	0.7	0.06	143	9	5
2009	2	16	12	14	58.5	47.132	8.397	672600	220400	32	2.6	0.15	88	26	18
2009	3	27	3	17	1.2	47.369	8.937	713100	247400	11	1.2	0.09	169	6	10
2009	4	22	3	1	24	47.372	8.691	694500	247400	11	0.9	0.17	194	8	10
2009	6	24	12	49	38.4	46.936	8.289	664700	198500	-1	2.1	0.22	95	13	20
2009	6	26	22	3	42.9	46.912	8.722	697700	196300	-1	1.7	0.08	140	9	9
2009	7	7	8	8	18.4	47.453	8.703	695300	256400	11	1.6	0.15	118	13	18
2009	7	13	17	24	55.8	46.865	8.259	662500	190600	7	1.7	0.11	122	13	7
2009	7	18	16	42	50.4	46.932	8.284	664300	198100	1	1.5	0.1	107	13	9
2009	8	3	10	21	50.6	47.483	8.912	711000	260000	10	1.6	0.17	68	8	25
2009	8	6	23	5	36.6	46.937	8.29	664700	198600	-1	1.8	0.13	94	13	17
2009	11	2	12	14	35.3	47.253	8.78	701400	234300	32	2.7	0.1	80	20	23
2009	12	8	3	7	54.3	46.937	8.693	695400	199100	8	2.1	0.19	50	6	35
2009	12	8	5	16	18.7	46.934	8.695	695600	198700	8	1.7	0.18	61	6	25
2009	12	8	8	47	47.3	46.933	8.691	695300	198600	7	1.5	0.14	94	6	20
2010	2	5	7	17	23.6	47.481	8.929	712200	259800	13	1.3	0.05	77	7	13
2010	2	13	23	30	50.7	47.246	9.089	724800	233900	1	0.9	0.06	155	23	8
2010	3	13	8	10	20.6	46.902	8.927	713300	195500	6	1.4	0.14	115	9	20
2010	6	18	20	41	49.2	46.904	8.913	712200	195700	6	1.1	0.11	136	10	9

2010	7	2	4	33	19.9	47.076	9.01	719200	214900	6	1.3	0.14	84	25	16
2010	7	2	5	2	27.7	47.077	9.015	719600	215100	8	1.7	0.12	59	25	24
2010	7	2	6	27	34.2	47.076	9.01	719200	214900	5	1.4	0.14	107	25	10
2010	7	2	6	51	48.2	47.075	9.006	718900	214800	5	1.2	0.1	106	25	6
2010	7	13	11	28	24.7	46.941	8.677	694200	199500	7	2.2	0.12	68	4	25
2010	7	24	3	57	17.1	46.936	8.69	695200	198900	8	1.7	0.14	81	5	17
2010	7	29	3	42	15.9	47.487	8.26	661800	259800	21	1.5	0.05	114	11	19
2010	8	16	9	11	39	47.435	8.316	666100	254000	18	1.7	0.07	95	17	18
2010	9	4	14	59	20.3	47.287	8.636	690500	237900	12	1.5	0.09	98	10	23
2010	10	25	3	40	23.3	46.894	8.907	711800	194600	2	1.2	0.08	131	9	13
2010	12	13	4	56	35.5	46.898	8.987	717900	195100	2	1.7	0.11	114	6	18
2011	1	30	11	37	47.5	46.856	8.897	711100	190300	1	0.8	0.08	146	9	9
2011	4	3	8	38	8.3	47.451	8.239	660300	255700	7	1.4	0.08	129	13	7
2011	5	13	19	41	11.3	47.003	9.043	721900	206900	6	1.2	0.01	175	17	5
2011	5	14	0	21	51.6	46.997	9.053	722700	206200	-1	1.4	0.09	172	17	7
2011	5	14	1	31	51.5	47.003	9.043	721900	206900	6	1	0.02	175	17	5
2011	5	14	3	59	34.5	47.001	9.046	722200	206700	8	1.8	0.19	83	17	16
2011	5	14	5	42	23.7	46.998	9.051	722500	206300	9	1.3	0.1	172	17	6
2011	5	14	6	1	43.5	46.996	9.051	722500	206100	10	1.1	0.09	172	17	7
2011	5	14	8	43	44	46.999	9.047	722200	206400	4	1.5	0.14	173	17	11
2011	5	14	13	1	7.8	46.996	9.051	722500	206100	-1	0.9	0.1	172	17	6
2011	5	14	13	43	52.1	46.995	9.051	722500	206000	9	1.1	0.1	171	17	7
2011	5	15	10	32	38.2	46.988	9.056	722900	205200	12	1.1	0.09	168	16	5
2011	5	15	18	1	49.7	46.998	9.051	722500	206300	-1	1.1	0.11	172	17	6
2011	5	15	19	3	0.4	46.998	9.047	722200	206300	-1	1.2	0.1	173	17	6
2011	5	16	0	42	27.3	46.995	9.051	722500	206000	9	0.8	0.11	171	17	6
2011	5	19	11	5	43.5	46.996	9.051	722500	206100	9	1.2	0.07	172	17	6
2011	5	22	22	14	7.9	47.422	8.755	699200	253000	14	0.8	0.09	150	12	10
2011	5	22	22	23	29	47.43	8.751	698900	253900	13	1	0.07	143	12	8
2011	5	30	1	33	16.9	47.003	9.043	721900	206900	8	1.4	0.21	122	26	7
2011	6	12	4	53	4.6	47.444	8.685	693900	255400	8	1	0.07	122	11	16
2011	6	14	3	41	10.8	47.443	8.683	693800	255300	10	1.9	0.15	118	11	21
2011	8	2	0	56	13.3	46.915	9.007	719400	197000	3	0.8	0.13	116	1	12
2011	8	12	1	15	54.4	46.983	8.829	705700	204300	-1	1	0.08	176	15	8
2011	8	30	21	32	6.8	46.871	8.568	686000	191600	8	1.4	0.14	86	11	18
2011	9	10	9	30	6.6	46.885	8.656	692700	193200	2	1.3	0.1	106	10	11
2011	9	10	9	31	55.2	46.883	8.657	692800	193000	4	1.1	0.13	108	10	9
2012	1	3	16	23	58.5	46.905	8.288	664600	195100	-1	1.1	0.2	152	11	7
2012	2	6	7	30	53	47.154	9.037	721100	223600	0	1.2	0.1	151	27	9
2012	2	11	22	45	26.8	47.149	8.553	684400	222500	32	4.2	0.21	21	21	58
2012	2	14	18	15	50.7	47.141	8.547	684000	221600	27	1.1	0.09	125	20	13
2012	2	18	9	4	3.8	47.141	8.556	684700	221600	28	1.5	0.15	78	20	17
2012	2	24	0	32	29.8	47.144	8.534	683000	221900	32	3.5	0.32	21	20	75
2012	2	28	6	8	24.1	46.88	8.669	693700	192700	4	1.3	0.24	83	10	18
2012	3	4	5	28	4.5	46.86	8.897	711100	190800	4	0.6	0.11	106	11	10
2012	3	12	17	45	3.7	46.945	8.451	677000	199700	3	0.8	0.08	120	8	8
2012	5	18	16	7	3.4	46.925	8.728	698100	197800	4	1.2	0.16	128	8	19
2012	6	16	12	59	48	46.932	8.843	706900	198700	7	1.2	0.15	147	12	11
2012	7	19	0	36	53.4	46.92	9.001	718900	197600	3	0.9	0.14	152	0	11
2012	8	27	2	51	56.5	46.925	9.004	719100	198100	2	0.6	0.08	144	9	7
2012	9	4	1	6	14.7	46.932	8.474	678800	198300	9	2.3	0.15	37	8	59
2012	9	4	2	51	44.9	46.933	8.474	678800	198400	9	2.8	0.16	27	8	79
2012	9	4	5	13	24.6	46.935	8.474	678800	198600	9	2.9	0.17	31	8	67
2012	9	9	14	28	35.8	46.89	8.67	693800	193800	2	1	0.1	116	9	8
2012	10	5	19	14	33.6	47.332	8.624	689500	242900	14	1.5	0.13	85	5	24
2012	10	15	12	56	39.7	47.453	8.122	651500	255900	20	1.2	0.04	214	9	8
2012	10	29	14	16	23.8	46.886	8.279	664000	193000	2	2.3	0.24	67	3	29
2012	11	20	1	4	36.8	46.92	9.056	723100	197700	4	1.2	0.07	143	4	9
2013	1	20	13	52	0	46.862	8.7107	696994.94	190883.24	7.2383	0.8	0.117	175	0.0534	7
2013	1	10	10	44	0	47.282	8.6867	694422.5	237543.88	10.311	1.6	0.097	138	0.1131	15
2013	1	15	15	24	0	46.9066	8.6314	690874.38	195743.58	0.3066	0.6	0.112	110	0.0627	9
2013	2	27	23	24	0	47.3933	8.6032	687919.02	249813.56	15.338	1.2	0.098	117	0.027	20
2013	3	5	0	18	0	47.2191	9.0485	721933.94	231041.42	8.4824	1.7	0.165	64.8	0.0863	24
2013	3	5	4	30	0	47.2221	9.049	721966.26	231383.18	8.6475	1.9	0.209	56.5	0.0832	32
2013	3	5	0	41	0	47.2366	9.0558	722442.46	233007.5	8.7617	1.4	0.126	162	0.068	9
2013	3	20	10	4	0	47.2285	9.0351	720896.51	232066.24	11.098	1	0.105	106	0.1765	7

2013	6	16	18	51	0	46.9242	8.7391	699047.12	197828.74	-0.48	0.7	0.116	168	0.0809	8
2013	6	17	16	52	0	46.9029	8.4025	673441.98	195094.8	3.6836	1.3	0.203	90.4	0.0348	10
2013	6	18	12	2	0	46.9998	8.3737	671115.6	205843.16	-0.557	1.3	0.277	138	0.0741	6
2013	10	19	6	41	0	46.9411	8.6933	695529.39	199658.59	0.0146	1.6	0.251	60.7	0.0468	18
2013	10	21	20	9	0	47.0236	8.8796	709541.2	209062.32	10.311	1.8	0.177	68.5	0.1297	25
2013	11	3	21	42	0	47.3342	8.2781	663451.94	242930.02	30.052	2.9	0.231	32.5	0.1458	70
2013	8	20	4	28	0	47.2534	8.4265	674776.79	234080.77	8.9395	1.4	0.173	84.9	0.0956	20
2013	8	21	14	26	0	47.4657	8.06	646851.04	257395.49	9.3711	1.1	0.163	199	0.0424	9
2013	8	21	15	52	0	47.4706	8.0599	646840.11	257941.1	8.9648	0.7	0.127	192	0.0458	8
2013	11	17	9	53	0	47.4027	8.1917	656846.78	250479.92	10.539	0.9	0.092	151	0.1251	8

Position des FKPE e.V. zur Induzierten Seismizität

Präambel

Das Forschungskollegium Physik des Erdkörpers e.V. (FKPE) koordiniert eine Stellungnahme der führenden deutschen Geophysik-Institutionen zum Umgang mit dem Auftreten von anthropogen verursachten Erdbeben. Derartige seismische Ereignisse können im Zusammenhang mit bergbaulichen Tätigkeiten, der Errichtung und dem Betrieb von Stauseen oder der Entnahme oder Einlagerung von Flüssigkeiten und Gasen im Untergrund stehen, beispielsweise bei der Erdölförderung, bei der Gasförderung mit und ohne Fracking, bei der Tiefen Geothermie sowie bei der CO₂-Speicherung im Untergrund. Derzeit werden drei Positionspapiere bearbeitet, welche die Themenkomplexe der seismischen Überwachung, der Unterscheidung zwischen natürlicher und induzierter Seismizität sowie des Begutachtungsprozesses behandeln. Die Positionspapiere geben jeweils allgemeine Empfehlungen hierzu, ersetzen jedoch nicht die eingehende Prüfung der potentiellen seismischen Gefährdung einer geplanten oder sich im Betrieb befindlichen Anlage.

Das vorliegende, erste Positionspapier benennt die Grundlagen, welche für die Erfassung flacher und schwacher Seismizität relevant sind. Diese orientieren sich am aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik unter Berücksichtigung von Aspekten der praktischen Umsetzbarkeit. Entsprechend setzt sich das Autorenteam aus erfahrenen Seismologen von Hochschulen, Behörden sowie der Industrie zusammen. Die vorgeschlagene Überwachung seismischer Emission ersetzt nicht die Erfassung der Einwirkung seismischer Wellen auf Gebäude und Menschen nach DIN 4150 (Immission). Es wird jedoch empfohlen, emissions- und immissionsrelevante Parameter messtechnisch zu kombinieren.

Die beschriebenen Messnetze sind so ausgelegt, dass je nach Anforderung oder Auflagen durch die zuständige Genehmigungsbehörde Mikroseismizität detektiert oder lokalisiert werden kann. Die Anforderungen an die Registrierqualität orientieren sich daran, schwächste spürbare Ereignisse durch eine zehnfach empfindlicher eingestellte Messtechnik sicher zu erfassen. Die empfohlenen Empfindlichkeiten werden von bereits existierenden Überwachungsnetzen auch unter schwierigen äußeren Bedingungen eingehalten.

Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität – Positionspapier des FKPE

Kollektives Autorenteam (alphabetische Liste) für den Milestone 1 „Seismische Überwachung“ der Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ des Forschungskollegiums Physik des Erdkörpers e.V. (FKPE):

Dr. Stefan Baisch, Q-con GmbH, Bad Bergzabern

Dr. Ralf Fritschen, DMT GmbH, Essen

Dr. Jörn Groos, Karlsruher Institut für Technologie, Geophysikalisches Institut

Dr. Toni Kraft, Schweizerischer Erdbebendienst an der ETH-Zürich, Zürich

Dr. Thomas Plenefisch, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Dr. Katrin Plenkens, Erdbebendienst an der ETH-Zürich, Zürich

Priv.-Doz. Dr. Joachim Ritter, Karlsruher Institut für Technologie, Geophysikalisches Institut

Dr. Joachim Wassermann, Ludwig-Maximilians Universität, München

Kontakt: www.fkpe.org

Empfehlung

Die vorliegende Empfehlung beschreibt die messtechnischen Voraussetzungen zur Erfassung von induzierter Seismizität im Zusammenhang mit geotechnischen Anlagen. Unter geotechnischen Anlagen werden im Folgenden untertägige Anlagen zur Gewinnung von Rohstoffen (z.B. Bergwerkstätigkeiten, tiefe geothermische Energie, Kohlenwasserstoffe) oder zur Tiefenlagerung (z.B. Verpressen von flüssigen Abfällen, CO₂-Speicherung, möglicherweise auch Speicherung von Erdgas etc.) verstanden. Die Empfehlung beschränkt sich auf die messtechnischen Mindestanforderungen zur sicheren Erfassung aller möglicherweise spürbaren induzierten Erdbeben (ab einer Schwinggeschwindigkeit von 0,3 mm/s), die im Zusammenhang mit der geotechnischen Anlage stehen. Es sei darauf hingewiesen, dass ein Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse mit den beschriebenen Maßnahmen im Allgemeinen nicht möglich ist, da schwächere Erdbeben nicht in ausreichender Vollständigkeit erfasst werden.

Der notwendige technische Aufwand für eine Überwachung induzierter seismischer Ereignisse an geotechnischen Anlagen hängt entscheidend von der Art der geotechnischen Anlage und damit den Anforderungen der Genehmigungsbehörde an die Überwachung ab. Wird beispielsweise nur eine generelle Beobachtung der Seismizität gefordert, so kann dies mit einer 3-Komponenten-Messstation erreicht werden, die die unten beschriebenen Anforderungen an die Messgenauigkeit und Datenverfügbarkeit erfüllt. Wird eine Lokalisierung der Ereignisse, eine Erfassung der raum-zeitlichen Entwicklung der Seismizität oder eine Diskriminierung zwischen

natürlicher und induzierter Seismizität gefordert, dann ist ein umfangreicherer instrumenteller Aufwand erforderlich.

1) **Messgenauigkeit**

Es muss an den einzelnen Messstellen eine Kompressionswelle mit der Schwinggeschwindigkeitsamplitude von $6 \mu\text{m/s}$ bei einem Signal-Stör-Verhältnis von mindestens 3 im Frequenzbereich 5-40 Hz gemessen werden können. Dies stellt eine Mindestanforderung dar. Es wird empfohlen, ein Signal-Stör-Verhältnis größer 6 zu erreichen. Es müssen 3 orthogonale Komponenten der Schwinggeschwindigkeit erfasst werden, wobei die Genauigkeit der Zeitbasis mindestens im Millisekundenbereich liegen muss.

2) **Betrieb eines Messnetzes**

Sollen über eine generelle Beobachtung hinausgehend Herdparameter bestimmt werden, dann müssen mindestens 5 Messstationen im Umfeld einer geotechnischen Anlage (in einer Entfernung $<15 \text{ km}$ von der geotechnischen Anlage) kontinuierlich betrieben werden. Die Aufstellungsorte sollen so gewählt werden, dass erstens die Messgenauigkeit nach 1) erfüllt und zweitens eine präzise Hypozentralbestimmung (2σ -Genauigkeit horizontal: $\pm 500 \text{ m}$, vertikal: $\pm 2000 \text{ m}$) im Reservoirbereich und dem direkten Umfeld erreicht werden.

3) **Datenintegration**

Emissionsmessungen zur Quellcharakteristik und Immissionsmessungen (DIN 45669) zur Beurteilung von Erschütterungen (DIN 4150) sollen zusammengeführt werden, um eine möglichst umfangreiche Datenbasis für seismologische Analysen zu erhalten. Seismologische Messdaten ausgewählter Betreiberstationen sollen den zuständigen seismologischen Diensten zur Erfüllung ihrer Aufgaben zur Verfügung gestellt werden. Umgekehrt, sollen seismologische Messdaten von Industrie, Ämtern und Forschungsinstitutionen in das Betreibermessnetz integriert werden.

4) **Transparenz**

Es wird empfohlen, Messdaten in zentralen Datenbanken offen zu legen, um Transparenz, Überprüfbarkeit und die Anwendung weitergehender Auswerteverfahren zu ermöglichen.

Anmerkungen, Ausführungshinweise:

Zu 1) Messgenauigkeit

- Alle seismischen Ereignisse, die zu Bodenbewegungen mit maximalen Bodenschwinggeschwindigkeiten oberhalb der Spürbarkeitsgrenze (0,3 mm/s in seltenen Fällen, vgl. DIN 4150-2¹) führen, sollen lokalisiert werden. Dieses Vorgehen erlaubt die zeitnahe Katalogisierung und Veröffentlichung aller potentiell spürbaren Ereignisse. Bei einer Herdtiefe von etwa 2 km bis 5 km und im Umfeld eines sedimentären Beckens entspricht diese Anforderung in etwa der Lokalisierung aller Erdbeben ab einer Lokalmagnitude M_L von 1,0. In anderen Gebieten kann M_L einen anderen Wert annehmen (abhängig von Herdtiefe, Verstärkungsfaktoren der oberflächennahen Sedimentschichten usw.). Um sich von der Lokalmagnitude und ihren Unsicherheiten (Stationsmagnitude, Mittelung, fehlende Aussagekraft bzgl. der Intensität bzw. Auswirkung) zu lösen, soll hier im Folgenden die Bodenschwinggeschwindigkeit als Orientierungsmaß dienen.
- Zudem soll ggf. eine Gutenberg-Richter-Relation aus genügend kleineren Ereignissen erstellt werden können, um eine Prognose für stärkere Ereignisse aufstellen zu können. Ein relevantes stärkeres Ereignis liegt vor, falls die maximale Bodenschwinggeschwindigkeit die Anhaltswerte für mögliche Gebäudeschäden nach DIN 4150-3 (3 mm/s für empfindliche Gebäude, 5 mm/s für Wohngebäude) überschreiten könnte. Dementsprechend sollten auch hierfür alle Ereignisse mit einer maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit von 0,3 mm/s im Epizentralgebiet zuverlässig lokalisiert werden.
- Um eine Entwicklung hin zu spürbaren Ereignissen rechtzeitig zu beobachten, müssen zudem auch Ereignisse unterhalb der Spürbarkeitsgrenze (0,3 mm/s in seltenen Fällen, vgl. DIN 4150-2) zuverlässig detektiert werden. Auf Grundlage der Gutenberg-Richter-Relation wird hierfür die Detektion aller Ereignisse mit einer maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit größer 0,03 mm/s im Epizentralgebiet empfohlen. Die maximale Bodenschwinggeschwindigkeit tritt in der Regel auf einer der Horizontal-Komponenten auf.

¹ Dieser Wert gilt für Messungen am Fundament von Gebäuden. Die DIN 4150-2 nennt als Spürbarkeitsgrenze KB_{Fmax} -Werte von 0,1 bis 0,2. Der KB_{Fmax} -Wert (maximale bewertete Schwingstärke) ist hierbei das Maximum des leitenden Effektivwertes eines frequenzbewerteten Erschütterungssignals, dessen Bestimmung in der DIN 4150-2 erläutert wird. Den Wert $v_{max} = 0,3$ mm/s enthält man unter der Berücksichtigung, dass Erschütterungen zu den Obergeschossen hin verstärkt werden und dass der KB_{Fmax} Wert für Einzelereignisse kurzer Dauer ca. 1/3 des v_{max} Wertes beträgt.

- Um seismische Ereignisse detektieren und Einsatzzeiten für die Lokalisierung bestimmen zu können, ist die Messung und Identifizierung sowohl der P- als auch der S-Wellen eines Ereignisses notwendig. Zur Phasenidentifikation und Einsatzzeit-Bestimmung ist mindestens ein Signal-Stör-Verhältnis von 3 notwendig. Es müssen 3-Komponenten (1 vertikaler und 2 orthogonal horizontale Sensoren) verwendet werden.
- Die zuverlässige Detektion von seismischen Ereignissen mit maximalen Bodenschwinggeschwindigkeiten von 0,03 mm/s bzw. 30 $\mu\text{m/s}$ an einer Messstelle erfordert die Messung und Identifikation der Kompressionswelle (P-Ersteinsätze) mit z.T. wesentlich geringeren Bodenschwinggeschwindigkeiten. Um von der maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit eines Ereignisses (i.d.R. die Scherwelle oder die Oberflächenwelle) auf die Maximalamplitude der Kompressionswelle (P-Welle) zu schließen, wird ein empirischer Faktor von 0,2 angesetzt. Dies führt zu einer im Epizentralgebiet mindestens aufzulösenden Schwinggeschwindigkeit von 6 $\mu\text{m/s}$ für den P-Ersteinsatz.
- Für die Lokalisierung von Ereignissen mit einer maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit $> 0,3 \text{ mm/s}$ im Epizentralgebiet müssen die Einsatzzeiten der P-Ersteinsätze an allen Messstellen des Netzwerkes bestimmt werden können. Die aufzulösende Schwinggeschwindigkeit an weiter entfernten ($> 5 \text{ km}$ zum Epizentrum) Messstellen kann dabei auch weniger als 6 $\mu\text{m/s}$ betragen. Dies sollte bei der Bewertung der Rauschamplituden an den einzelnen Messstellen berücksichtigt werden.
- Ab einem Signal-Stör-Verhältnis (*SNR*) von etwa 3 können eine seismische Welle zuverlässig identifiziert und ihre Einsatzzeit bestimmt werden. Dies ist das entscheidende Kriterium der Messung und erfordert somit Rauschamplituden, die mindestens geringer als $6/3 \mu\text{m/s}$ bzw. 2 $\mu\text{m/s}$ sind. Es wird jedoch dringend empfohlen, Rauschamplituden unter 1 $\mu\text{m/s}$ anzustreben. Als Bezugsgröße für die Berechnung des Signal-Stör-Verhältnisses im Zeitbereich soll das Amplitudenintervall verwendet werden, welches 95% der Amplitudenwerte (*I95*) der untersuchten mittelwertfreien Zeitreihe des seismischen Rauschens enthält (siehe Abb.). *I95* sollte mindestens innerhalb von $\pm 2 \mu\text{m/s}$, besser unter $\pm 1 \mu\text{m/s}$, liegen. Kann *SNR* > 3 bei Messungen an der Oberfläche nicht erreicht werden (z.B. wegen zu starkem Hintergrundrauschen), dann soll im Bohrloch gemessen werden. Der Richtwert *I95* (s.u.) muss im Dauerbetrieb (24/7) eingehalten werden. Um das Signal-Stör-Verhältnis an einer potenziellen Messstation zu bestimmen, werden Testmessungen über mehrere Tage vor deren Einrichtung empfohlen. Diese Testmessungen sollen die Variation der mittleren Rausch-Messamplituden bestimmen (*I95*) sowie das Auftreten von transienten Störsignalen im Mess-Frequenzbereich abschätzen.

Zur Rauschanalyse von Standorten siehe auch: Groos J. & Ritter, J., 2010. Seismic noise: A challenge and opportunity for seismological monitoring in densely populated areas. In Ritter, J. and Oth, A. (eds.), *Proceedings of the workshop Induced Seismicity*, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 30, 157 pp., ISBN N° 978-2-91989-709-4).

- Die zu messenden Frequenzen an der Erdoberfläche umfassen etwa 5 Hz (S-Welle) bis 40 Hz (P-Welle) für Erdbeben mit Lokalmagnituden $M_L < \sim 3$. Für stärkere Ereignisse können kleinere Frequenzen angeregt werden. Deshalb müssen mindestens 4,5 Hz Geophone eingesetzt werden, die Messung tieferer Frequenzen ist optional. Die Abtastrate muss mindestens 100 Hz betragen. In Bohrlöchern sollte versucht werden, Signale mit einem Frequenzgehalt bis mindestens 80 Hz zu messen (200 Hz Abtastrate), da dort höhere Frequenzen beobachtet werden können.
- Die Genauigkeit der Zeitbasis der seismischen Messdaten muss im Bereich von Millisekunden liegen. Dies ist z.B. für die Berechnung präziser Relativlokalisierungen der seismischen Ereignisse notwendig (s.u.). Eine Zeitsynchronisation im Bereich von Millisekunden oder präziser ist bei standardmäßiger Synchronisation der Uhr der Datenerfassung mit einem externen Zeitzeichen problemlos realisierbar. Es wird empfohlen, die Zeitsynchronisation über GPS (Global Positioning System) durchzuführen.

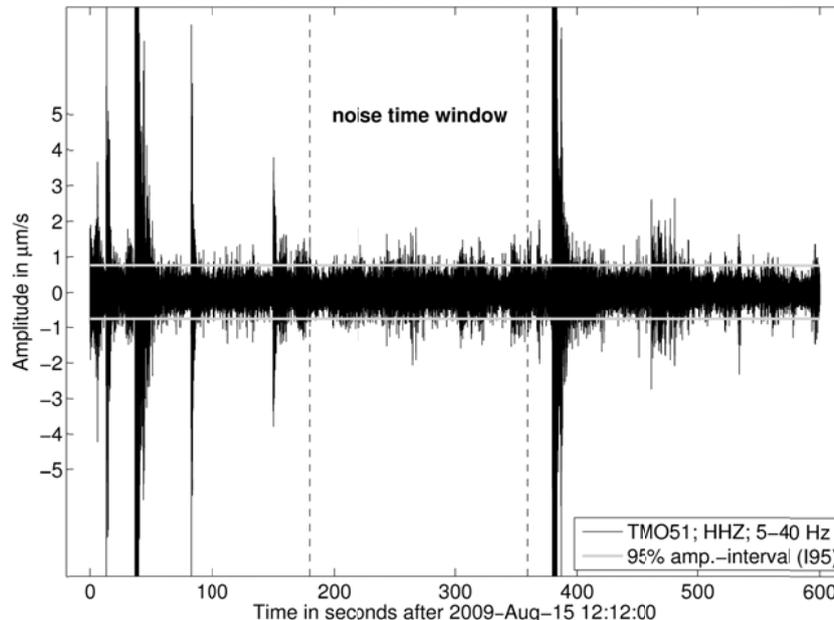


Abb.: Darstellung des Amplitudenintervalls I_{95} (zwischen den grauen Linien) zur Evaluierung des Rauschpegels. Innerhalb I_{95} befinden sich 95% der gemessenen Amplitudenwerte. Transiente Rauschereignisse können diese Amplitude kurzfristig übertreffen. Die größeren, in dieser Darstellung teilweise saturierten Ereignisse sind induzierte Erdbeben. Der Standort TMO51 befindet sich im Oberrheingraben (Oberflächenstation an einem Ortsrand), I_{95} liegt hier unterhalb der geforderten $\pm 2 \mu\text{m/s}$.

Zu 2) Betrieb eines Messnetzes

- Die Konfiguration eines Messnetzes orientiert sich an den zu erzielenden Ergebnissen einer Überwachungsmaßnahme: Detektion von Einzelereignissen, Präzision der Hypozentralparameter-Bestimmung (geographische Breite und Länge sowie Tiefe und Herdzeit) sowie den lokalen Gegebenheiten (Signal-Stör-Verhältnisse, Genehmigungen für Messstandorte, Infrastruktur etc.).
- Ist im Rahmen einer generellen Beobachtung nur die sichere Detektion einzelner spürbarer Ereignisse gefordert, so genügt eine Messstation, die den unter 1) genannten Anforderungen entspricht, wenn zusätzlich eine hohe Datenverfügbarkeit von mindestens 98.5% garantiert werden kann.
- Soll darüber hinaus eine Lokalisierung von seismischen Ereignissen angestrebt werden, sollte diese zumindest die Bestimmung der Epizentralkoordinaten mit ± 500 m Genauigkeit erreichen (die Unsicherheit ist hier 2σ). Neben gut bestimmten P- und S-Welleneinsatzzeiten (Kompressions- und Scherwellen) benötigt man hierfür auch ein präzises Geschwindigkeitsmodell.
- Die Bestimmung der Hypozentraltiefe hängt stark von der Güte des seismischen Geschwindigkeitsmodells ab, vor allem für die Scherwellen. Es wird empfohlen, das Geschwindigkeitsmodell und/oder die Laufzeiten zu kalibrieren. Dies kann beispielsweise mit Kalibrationsschüssen in Bohrlöchern, initialen Stimulationseignissen, Sonic-Log- / Full-Wave-Sonic-Log-Messungen oder durch VSP-Messungen (vertical seismic profiling) erfolgen. Unsicherheiten von ± 2000 m (2σ) in der Hypozentraltiefen-Bestimmung sollen nicht überschritten werden.
- Zum Erreichen der oben genannten Lokalisierungsziele sind verschiedene Messkonfigurationen denkbar. Es sind erfahrungsgemäß mindestens 5 Messstationen notwendig. Es ist weiterhin zu bedenken, dass wegen technischer Stationsausfälle, unzureichenden Beobachtungsmöglichkeiten (Stationslage auf Nodalfläche, ungewöhnliche Rauschereignisse etc.) u.U. eine Redundanz zusätzlich notwendig ist. Um eine gute Tiefenlokalisierung zu erreichen, sollen nicht alle Stationen in derselben Entfernung von der möglichen Quelle platziert sein. Die Azimutwinkel zwischen den Stationen sollen möglichst gleich und klein sein, um eine gute horizontale Auflösung der Lokalisierung zu erreichen. Es soll kein Azimutbereich größer 90° von der seismischen Quelle ohne Messstation entstehen.
- Neben den oben beschriebenen absoluten Lokalisierungen wird auch auf die Technik der relativen Lokalisierung hingewiesen. Entsprechend bestimmte

Hypozentren sind untereinander sehr genau festgelegt und helfen beispielsweise, die Entwicklung der Seismizität im Reservoir zu charakterisieren.

- Der Nachweis zur Auflösungsfähigkeit des Netzwerks sollte durch numerische Modellierungen vor Beginn der Überwachung erbracht werden.
- Stand der Technik ist die kontinuierliche Echtzeit-Datenübertragung (wenige Sekunden Zeitverzögerung) in ein Datenzentrum (z.B. beim Anlagenbetreiber und/oder ein öffentliches Datenportal), automatische Qualitätskontrolle der Registrierungen und automatische Detektion sowie Meldung (z.B. an Anlagenbetreiber u.a.). Bei technischen Problemen der Datenübertragung muss ggf. im Hybrid-Modus (z.B. nur Übertragung von Stationszustand (*state of health*) und getriggerten Ereignis-Wellenformen) oder gar teilweise ohne Echtzeit-Datenübertragung gemessen werden. Die Weiterentwicklung der Mobilfunktechnik (LTE-Standard etc.) wird heute noch auftretende Probleme aber in Kürze lösen.
- Im Hinblick auf eine online Datenübertragung, die kompatibel mit anderen seismologischen Einrichtungen ist, wird empfohlen, die Schnittstellen und das Datenformat vor Beginn der Einrichtung des Netzwerkes mit beteiligten Behörden, Datenzentren etc. abzusprechen. Als Austauschformate werden empfohlen: 1) SEED (SEED Reference Manual, 2010) und 2) GSE2.1 (GESTT-3, 1997). Auch die Metadaten sollen in den entsprechenden Formaten bereitgestellt und ausgetauscht werden. Es wird auf die Möglichkeit von SeedLink (Heinloo, 2000) und ArcLink zur standardisierten Datenübertragung hingewiesen.

GESTT-3, Provisional GSE2.2 –Message Formats and Protocols, Operations Annex 3. May 1997, GSE Technical Test 3.

(www.seismo.ethz.ch/prod/autodrm/provisional_GSE2.1.pdf).

Heinloo, A., 2000. SeedLink design notes and configuration tips.

(geofon.gfz-potsdam.de/geofon/seiscomp/seedlink.html).

ArcLink ist ein Protokoll zur Datenabfrage von archivierten Wellenform- und Metadaten über TCP/IP Verbindungen.

(www.seiscomp3.org/wiki/doc/applications/arclink).

SEED Reference Manual, 2010. SEED Reference Manual, Standard for the Exchange of Earthquake Data, SEED Format Version 2.4, May 2010. Incorporated Research Institutions for Seismology, Washington, DC.

Zu 3) Datenintegration relevanter stärkerer seismischer Ereignisse

- Verknüpfung von Messungen nach DIN 45669 zur Beurteilung von Schäden nach DIN 4150 mit Messungen zur klassischen Überwachung: Generell können DIN-konforme Messungen zur Beweissicherung in Gebäuden auch zur Lokalisierung etc. von Ereignissen verwendet werden. Oft sind die Empfindlichkeiten jedoch geringer als in 1) vorgegeben, d.h. die Wellenformen der DIN-konformen Messungen sind nur für stärkere Ereignisse auswertbar. Die Hinzunahme der Daten der DIN-konformen Messungen zu der seismologischen Auswertung ist aber anzustreben, da hierdurch zusätzliche Informationen zur Charakterisierung größerer Ereignisse geliefert werden (z.B. zusätzlich abgedeckte Azimute bei Herdflächenlösungen usw.).
- Nicht DIN-konforme Messstationen, die aber modernen seismologischen Ansprüchen genügen, übertreffen technisch oft die Anforderungen der DIN 45669. Durch digitale Filterung können dann DIN-konforme Messungen simuliert werden. Wichtig ist, dass das Seismometer mindestens alle drei Jahre kalibriert wird, indem die Übertragungsfunktion zwischen 1 Hz und 80 Hz auf geeignete Normale zurückgeführt wird (siehe DIN 45669).
- Den staatlichen Diensten soll zur Erfüllung ihrer Aufgaben der Zugriff auf ausgewählte seismologische Betreiberdaten gewährt werden. Dies ist insbesondere deshalb notwendig, damit nach dem Auftreten eines spürbaren induzierten Erdbebens belastbare Aussagen zu Ort und möglicher Ursache des Ereignisses möglich sind.
- Umgekehrt sollen in den Überwachungssystemen der Betreiber auch seismologische Messdaten von staatlichen Diensten und Forschungsinstitutionen herangezogen werden. Hierdurch werden die Unsicherheiten der Herdparameter u.U. verringert.

Zu 4) Transparenz

- Eine seismische Überwachung sollte transparent sein: Gegenüber den Behörden und gegenüber der betroffenen Bevölkerung.
- Eine online Offenlegung der seismischen Wellenformen (alle oder ausgewählte Messstationen), z.B. über das Datenportal der BGR oder eine Webseite des Betreibers, kann die Transparenz der seismischen Überwachung fördern (proaktive Öffentlichkeitsarbeit etc.).
- Bereits eine teilweise Offenlegung der Registrierungen von beispielsweise nur 2 Messstationen pro geotechnischer Anlage kann die überprüfbare seismische Überwachung in Kombination mit den staatlichen Messnetzen deutlich verbessern, ohne schützenswerte Betriebsgeheimnisse aus dem Reservoirbereich offen zu legen. Dies erlaubt beispielsweise die schnelle Überprüfung der Hypozentralparameter seismischer Ereignisse durch Behörden oder die unterstützende Auswertung durch Forschungsinstitute.
- Bei eng zusammenstehenden geotechnischen Anlagen können Stationen mit offen vorliegenden Daten gemeinsam genutzt werden. Die Abstimmung der Stationsstandorte verschiedener Betreiber kann insgesamt eine Reduzierung der erforderlichen Stationsanzahl möglich machen.
- Wenn die seismischen Daten verschiedener Netzwerke in einem gemeinsamen Datenformat zugänglich vorliegen, dann können sie dahingehend ausgewertet werden, dass die Prozesse der induzierten Seismizität besser verstanden werden. Verschiedene Auswertemethoden (z.B. Herdflächenlösungen) können nur mit einer integrierten Datenbasis mehrerer kleiner Netzwerke zuverlässig durchgeführt werden.

Haftungsausschluss:

Diese Empfehlung wurde von den beteiligten Autoren gemeinsam nach ihrem besten Wissen und Verständnis auf der Grundlage der wissenschaftlichen Erkenntnis zum derzeitigen Zeitpunkt (2011) erarbeitet. Eine Haftung der Autoren oder der durch sie vertretenen Institutionen für jegliche Folgen aus der Anwendung dieser Empfehlung wird ausdrücklich ausgeschlossen.

Anhang

A1 Hinweise zur Standortsuche und -auswahl

A1.1 Allgemeine Überlegung zur Standorteignung

Der Standort einer seismologischen Station hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der aufgezeichneten Erdbebensignale. Durch die sorgfältige Standortsuche und -auswahl lassen sich vor allem die beiden folgenden Qualitätskriterien beeinflussen:

- *Geringes Störsignalniveau im Frequenzbereich des Erdbebensignals:*
Seismologische Störsignale stammen aus den unterschiedlichsten Quellen. Im Frequenzbereich 5-40 Hz, der für die hier diskutierte Anwendung relevant ist, sind hauptsächlich meteorologische und anthropogene Störquellen für Störsignale verantwortlich.
- *Geringe Verfälschung des Erdbebensignals durch die lokale Geologie:*
Das Schwingungsverhalten des lokalen Standortuntergrundes wird von der lokalen Geologie und Morphologie beeinflusst. Erdbebenwellen können dadurch verstärkt oder abgeschwächt werden.

Neben den rein seismologischen Auswahlkriterien sind auch technische und logistische Überlegungen bei der Auswahl eines möglichen Standortes wichtig. Hierzu zählen:

- *Verfügbarkeit von technischer Infrastruktur (z.B. Strom, Datenleitung):*
Permanente Stromversorgung und Datenverbindung sind generell zu bevorzugen, da hierdurch die Verfügbarkeit der Station erhöht und der Wartungsaufwand verringert wird.
- *Zugänglichkeit und Sicherheit des Standortes:*
Funktionsstörungen müssen schnell zu beheben sein und Vandalismus an der Station vermieden werden. Auch die Anfälligkeit gegenüber Naturgewalten (z.B. Blitzschlag) sollte berücksichtigt werden.
- *Kosten der Umsetzung:*
Oft können Baukosten durch die Nutzung geeigneter vorhandener Infrastruktur vermieden werden.

A1.2 Standortsuche:

In einem ersten Schritt wird eine auf die Art der geotechnischen Anlage abgestimmte idealisierte Geometrie des Überwachungsnetzes festgelegt (siehe A2). Ausgehend von den idealisierten Standorten sollten Suchregionen für jeden möglichen Standort mit einem Suchradius r in Abhängigkeit der mittleren Ausdehnung des Überwachungsnetzwerkes ($\langle D \rangle$) definiert werden:

$$r = \frac{\langle D \rangle}{10} < 2 \text{ km} \quad (\text{Gl. A1})$$

Die eigentliche Standortsuche kann dann in folgende Schritte gegliedert werden:

A1.2.1 Vorauswahl möglicher Standorte:

Durch eine sorgfältige Vorauswahl möglicher Standorte können unnötige kostenintensive Feldarbeiten vermieden werden. Grundlage der Vorauswahl sollten aktuelle topographische und geologische Karten der Suchregion sein (Maßstab möglichst 1:25.000), anhand derer mögliche Standorte und Störquellen identifiziert werden können. Sehr hilfreich sind auch Online-Kartendienste, die eine Darstellung von aktuellen Luftbildern und zusätzlichen GIS-Daten erlauben. Ein herausragendes Beispiel für einen solchen Dienst findet sich bei SwissTopo (<http://map.geo.admin.ch>).

Mit Hilfe der Kartenanalyse werden vorrangig Ausschlussregionen um bekannte Störquellen festgelegt. Eine Liste möglicher Störquellen, mit Bewertung ihres Störniveaus und des möglichst einzuhaltenden Mindestabstandes, ist in Tabelle A1 gegeben. Standorte sollten nur außerhalb der Ausschlussregionen gesucht werden. Eine Liste möglicher geeigneter Standorte findet sich in Tabelle A2. Danach wird die Geologie der Standorte bewertet, wie in Tabelle A3 beispielhaft gezeigt.

Störquellen	Störniveau	Abstand	N
Industriegebiete, urbane Gebiete, Kraftwerke, Sägewerke, Pumpwerke, rotierende Groß-Maschinen, Sendemasten, Hochspannungsleitungen, Bahnlinien, Straßen, Fließgewässer, ...	hoch	1 km	0
Wald, landwirtschaftlich genutzte Flächen, ...	mittel	0,5 km	0,5
Grasland, niedrige Vegetation, offene Flächen, ...	gering	0 km	1

Tabelle A1: Liste möglicher Störquellen und deren Beurteilung.

Standort	Eignung	S
Bunker, WBH ohne Pumpen, Felsenkeller, Keller eines selten genutzten Hauses, ebenerdiger Schacht mit Fundament, ...	sehr gut	1
Keller eines wenig genutzten Gebäudes, ...	mittel	0.5
Keller eines täglich genutzten Gebäudes, ...	schlecht	0

Tabelle A2: Liste möglicher geeigneter Standorte und deren Beurteilung.

Geologie	Eignung	G
Kristallin, kompetente Gesteinskomplexe mit geringer Verwitterungsschicht, ...	sehr gut	1
Gut verfestigte Sedimentgesteine, ...	mittel	0.5
Sedimentbecken, Quartär, ...	schlecht	0

Tabelle A3: Liste möglicher geologischer Untergründe an Stationsstandorten und deren Beurteilung.

Die in den Tabellen A1 bis A3 gegebenen Werte N, S und G können zur systematischen Beurteilung und Priorisierung P der Standorte herangezogen werden:

$$P = w_N \cdot N + w_G \cdot G + w_S \cdot S \quad (\text{Gl. A2})$$

Die in der Gleichung A2 enthaltenen Gewichte der einzelnen Bewertungsparameter können anwendungsbezogen angepasst werden, sollten aber wie folgt angeordnet sein:

$$w_N > w_S \geq w_G \quad (\text{Gl. A3})$$

In jeder Suchregion sollten möglichst mindestens zehn potenzielle Standorte bewertet werden. Aus diesen Standorten sollten mindestens die fünf Standorte mit den höchsten Prioritäten P für die Standorterkundung vor Ort ausgewählt werden.

Anmerkung:

Es kann nötig sein, Suchregionen zu verlegen, weil keine Standorte mit ausreichend hoher Qualität gefunden werden können. Dies sollte immer in der Form geschehen, dass die ideale Netzgeometrie möglichst wenig verzerrt wird. Dabei hat die Beibehaltung der azimutalen Gleichverteilung der idealen Standorte höhere Priorität, als deren Stationsabstand vom Zentrum (Standort der geotechnischen Anlage). Die Suchregion im Zentrum des Netzwerkes sollte nicht verschoben werden. In dicht besiedelten Gebieten kann es von Vorteil sein, computergestützte Optimierungsverfahren zur Bestimmung der idealen Netzwerkgeometrie einzusetzen und dabei ein Modell der erwarteten Bodenunruhe zu berücksichtigen (siehe A2.2).

A1.2.2 Standorterkundung im Feld

Bei der Standorterkundung müssen die bei der Vorauswahl getroffenen Bewertungen vor Ort überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Zusätzlich zu den oben genannten Punkten müssen folgende Abklärungen vorgenommen werden:

- 1) Ist die erforderliche technische Infrastruktur (Zeitzeichenempfang, Datenanbindung und Stromversorgung) vorhanden ? (I)
- 2) Ist der Standort für Wartungsarbeiten zugänglich ? (Z)
- 3) Ist der Standort sicher (Vandalismus, Blitzschlag, ...) ? (V)
- 4) Ist die Umsetzung wirtschaftlich sinnvoll ? (K)
- 5) Ist das Einverständnis des Eigentümers zu Bau und Betrieb vorhanden ? (U)

Die Standorterkundung sollte schriftlich und mit aussagekräftigen Bildern umfassend dokumentiert und die voraussichtlichen Standorte der Stationskomponenten möglichst genau festgelegt werden. Anschließend müssen die Standortprioritäten P neu berechnet werden:

$$P = (w_N \cdot N + w_G \cdot G + w_I \cdot I + w_V \cdot V + w_Z \cdot Z + w_K \cdot K) \cdot U \quad (\text{Gl. A4})$$

In der Gleichung A4 können die Bewertungsparameter (N, G, I, Z, V, K, U) Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Die zugehörigen Gewichte sind anwendungsbezogen anzupassen, sollten jedoch wie folgt angeordnet sein:

$$w_N > w_I \geq w_V \geq w_Z \geq w_G \geq w_K \quad (\text{Gl. A5})$$

A1.2.3 Testmessungen an geeigneten Standorten

Nach der Standorterkundung sollten in jeder Suchregion wenigstens an den drei Standorten mit der höchsten Priorität Testmessungen durchgeführt werden. Ziel der Testmessung ist den Bewertungsparameter N, der das höchste Gewicht bei der Bewertung der Standortqualität hat, aus einer objektiven Messung ableiten zu können.

Die Testmessung sollte möglichst mit Messgeräten durchgeführt werden, die denselben technischen Spezifikationen genügen wie die im späteren Dauerbetrieb eingesetzten Geräte. Wichtig sind hier vor allem die Gesamtempfindlichkeit und Dynamik des Messsystems sowie die Bandbreite des Messaufnehmers. Auch die Betriebsparameter der Testmessung, im Besonderen die Abtastrate und die Vorverstärkung des Messaufnehmers, müssen identisch zum Dauerbetrieb gewählt werden.

Die Testmessung kann im Batteriebetrieb mit lokaler Datenspeicherung erfolgen. Auf die kontinuierliche Datenaufzeichnung kann jedoch nicht verzichtet werden. Eine Synchronisation des Messgerätes mit einer absoluten Zeitbasis (z.B. über GPS) ist

wünschenswert, die Abweichung der Absolutzeit der internen Uhr sollte jedoch wenigstens im Bereich weniger Sekunden liegen.

Um einen Eindruck von der Bodenunruhe des Standortes im Frequenzbereich von 5-40 Hz zu gewinnen, kann eine Messdauer von wenigen Stunden an einem typischen Werktag ausreichend sein. Es wird jedoch empfohlen, die Testmessung für wenigstens 7 Tage durchgehend zu betreiben, um möglichst alle transienten Störsignale zu erfassen. So erhöht sich auch die Wahrscheinlichkeit, ein lokales Erdbeben aufzuzeichnen und zur Beurteilung der Standortqualität heranziehen zu können.

Während der Testmessung sollten alle bekannten lokalen Störsignalquellen kurzzeitig in Betrieb genommen werden (z.B. Belüftungsanlagen, Wasserbehälter-Befüllung, usw.), um diese beurteilen zu können. Hierüber sollte ein Protokoll geführt werden, um die Signale bei der Auswertung der Testmessung zuordnen zu können.

A1.2.4 Bewertung der Testmessungen und Standortauswahl

Die Beurteilung der Testmessung sollte von einer Fachperson mit Erfahrung in der Auswertung seismologischer Daten erfolgen. Die Datenanalyse sollte dabei sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich erfolgen. Beispiele der jüngeren wissenschaftlichen Literatur zu diesem Themengebiet finden sich in der Liste der weiterführenden Literatur.

Folgende Punkte sollten in die Standortbewertung eingehen:

- Störsignalniveau im Frequenzbereich 5-40 Hz (z.B. /95) (F)
 - akzeptabel < 2000 nm/s; gut < 500 nm/s ; sehr gut < 100 nm/s
- Monofrequente Störsignale im Frequenzbereich 5-15 Hz (M)
 - akzeptabel <500 nm/s; gut < 200 nm/s ; sehr gut < 50 nm/s
- Transiente Störsignale im Frequenzbereich 5-15 Hz (T)
 - akzeptabel <500 nm/s; gut < 200 nm/s ; sehr gut < 50 nm/s
- Unsicherheit der Einsatzzeitbestimmung von Lokalbeben (Q)
 - akzeptabel $\pm 0,1$ s; gut $\pm 0,05$ s; sehr gut $\pm 0,025$ s
 - falls kein Lokalbeben aufgezeichnet: $Q = G / 1.25$

Die Bewertungsparameter (F, M, T, Q) können Werte zwischen 0 und 1 annehmen (z.B. akzeptabel = 0,5, gut = 0,8, sehr gut = 1 und 0 sonst). Damit kann die objektive Bewertung des Störsignalniveaus N mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$N = w_L \cdot L + w_M \cdot M + w_T \cdot T + w_Q \cdot Q \quad (\text{Gl. A6})$$

Die zugehörigen Gewichte sind anwendungsbezogen anzupassen, sollten jedoch wie folgt angeordnet sein:

$$w_L > w_M \geq w_T > w_Q \quad (\text{Gl. A7})$$

Abschließend kann die endgültige Standortbewertung durch Einsetzen des neuen Bewertungsparameters N aus Gleichung A6 in Gleichung A4 berechnet werden. Am Standort mit der höchsten Priorität sollte die seismologische Station errichtet werden.

Weiterführende Literatur

- Bormann, P., 1998. Conversion and comparability of data presentations on seismic background noise, *J. Seismol.*, **2**, 37-45
- Bormann, P., 2002. Seismic signals and noise. In Bormann, P. (ed.), *IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice*, 1, GeoForschungsZentrum, Potsdam, Chapter 4. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP_r1_ch4 bzw.: <http://www.gfz-potsdam.de/portal/cms/Bibliothek/Publizieren/C-Verlag/zu+Vetrieb/New+Manual+of+Seismological+Observatory+Practice+NMSOP;jsessionid=92B6130B99806506827A031D02869B69> (freie Online-Publikation)
- Groos J. & Ritter, J., 2010. Seismic noise: A challenge and opportunity for seismological monitoring in densely populated areas. In Ritter, J. and Oth, A. (eds.), *Proceedings of the workshop Induced Seismicity*, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, **30**, 157 pp., ISBN N° 978-2-91989-709-4)
- McNamara, D.E., & Boaz, R.I., 2011. PQLX: A seismic data quality control system description, applications, and users manual: U.S. Geological Survey Open-File Report 2010–1292, 41 p.
- Trnkoczy, A., Bormann, P., Hanka, W., Holcomb, L.G & Nigbor, L.R, 2002. Site selection, preparation and installation of seismic stations. In Bormann, P. (ed.), *IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice*, 1, GeoForschungsZentrum, Potsdam, Chapter 7. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP_r1_ch7 bzw.: <http://www.gfz-potsdam.de/portal/cms/Bibliothek/Publizieren/C-Verlag/zu+Vetrieb/New+Manual+of+Seismological+Observatory+Practice+NMSOP;jsessionid=92B6130B99806506827A031D02869B69> (freie Online-Publikation)

A2 Typische Überwachungsszenarien

Im Folgenden werden grundsätzliche Empfehlungen für die Durchführung einer Überwachung anhand von drei typischen Szenarien gegeben.

A2.1 Detektion mit einer Einzelstation

Eine generelle Beobachtung (Detektion) von seismischen Ereignissen im unmittelbaren Umfeld einer geotechnischen Anlage ist grundsätzlich mit einer einzelnen 3-Komponenten-Messstation möglich, die den in 1) genannten Kriterien genügt. Diese Form der Überwachung ermöglicht im Wesentlichen den Nachweis von seismischen Ereignissen und die Bestimmung von Ereignisraten. Unter günstigen Umständen kann die Größenordnung der Lokalmagnitude, die Herdzeit und Entfernung von Ereignissen grob geschätzt werden.

Es empfiehlt sich eine Aufstellung der Einzelstation an einem geeigneten Standort (siehe A1) nahe der zu erwartenden Epizentren bzw. der Lage des geotechnisch genutzten Volumens im Untergrund. Bei der Überwachung mit einer Station ist die Diskriminierung zwischen seismischen Ereignissen und transienten Störsignalen (z.B. Straßenverkehr, Schienenverkehr, Industrieanlagen) erschwert. Die Häufigkeit von transienten lokalen Störsignalen hat daher bei der Standortauswahl eine hervorgehobene Bedeutung.

Eine Integration der Einzelstation in bestehende lokale oder regionale Netzwerke zur seismischen Überwachung (z.B. Landeserdbebendienst) sollte im Sinne einer transparenten Überwachung angestrebt werden. In diesem Fall empfiehlt sich eine frühzeitige Abstimmung der dazu notwendigen technischen Voraussetzungen sowie bei der Standortauswahl.

Grundsätzlich können auch die Daten von Messstellen nach DIN 45669 verwendet werden, falls die unbewertete Bodenschwinggeschwindigkeit als kontinuierlicher Datenstrom zur Verfügung steht und am Fundament eines Gebäudes oder im Freifeld gemessen wird.

Die grundsätzlichen technischen Voraussetzungen hinsichtlich der Datenübertragung, Datenspeicherung und Datenauswertung für die seismische Überwachung mit einer Einzelstation unterscheiden sich beim heutigen Stand der Technik nicht von denen für die Überwachung mit einem Netzwerk. Bei der technischen Realisierung sollte daher von Beginn an die optionale Erweiterung der Überwachung mit einem seismischen Netzwerk eingeplant werden. Dies betrifft insbesondere die Auswahl der verwendeten Software. Es steht eine Reihe geeigneter kommerzieller sowie freier und speziell anpassbarer Softwareprodukte zur Datenerfassung, Datenspeicherung und Datenauswertung zur Verfügung.

Die Kernkomponenten seismischer Stationen (Seismometer, Datenrekorder) sind in der Regel nicht innerhalb weniger Tage am Markt verfügbar. Um eine

Datenverfügbarkeit von 98,5 % (359,5 von 365 Tagen pro Jahr) zu erreichen, sollten alle kritischen Komponenten vorrätig gehalten oder eine zweite identische Station betrieben werden.

Anmerkung:

Die Detektion von seismischen Ereignissen mit nur einer Station ist keine einfache Aufgabe. Einfache Detektionsalgorithmen, wie sie in den meisten seismischen Netzwerken zum Einsatz kommen, reagieren auf das Überschreiten einer vorgegebenen Signalamplitude. Wird dieser Schwellwert niedrig angesetzt, um kleiner Ereignisse zuverlässig zu erfassen, bedeutet dies im Allgemeinen auch, dass die Anzahl der Fehldetektionen ansteigt und ein hoher Bedarf an manueller Nachbearbeitung entsteht. Fortgeschrittene Detektionsalgorithmen können die Anzahl der Fehldetektionen deutlich reduzieren, müssen aber von erfahrenen Fachpersonen auf die lokalen Gegebenheiten angepasst und gepflegt werden.

Weiterführende Literatur

Agius, M. R. & Galea, P., 2011. A single-station automated earthquake location system at Wied Dalam station, Malta. *Seismological Research Letters*, **82**, 545-559.

A 2.2 Lokalisierung seismischer Ereignisse

A 2.2.1 Isolierte geotechnische Anlage

Eine isolierte geotechnische Anlage liegt vor, wenn sich in einem Umkreis von 20 km keine weitere seismisch zu überwachende geotechnische Anlage befindet.

In diesem Fall sollte ein seismisches Netzwerk mit mindestens 5 seismischen Stationen, die jeweils den Kriterien in 1) genügen, eingerichtet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass unter optimalen Voraussetzungen auch Netzwerke mit nur 3 oder 4 Stationen für eine Lokalisierung verwendet werden können. Solche Netzwerke setzen für eine Lokalisierung jedoch eine hochpräzise Bestimmung sowohl von P- als auch S-Einsatzzeiten voraus und bieten außerdem keinerlei Redundanz gegenüber Stationsausfällen. Es wird deshalb davon abgeraten, Netzwerke zur Lokalisierung mit weniger als 5 Stationen im Regelbetrieb zu betreiben.

Die Geometrie des seismischen Netzwerkes ist von den zu erwartenden Hypozentren, der lokalen geologischen Struktur, der Lage und Art anderer seismischer Quellen (Straßenverkehr, Industrie) sowie der mit vertretbarem Aufwand betreibbaren möglichen Stationsstandorte abhängig. Bei ausgedehnten geotechnischen Anlagen (Ausdehnung >1 km; z.B. große Kohlenwasserstoff-Reservoirs) ist in der Regel eine größere Anzahl an seismischen Messstellen notwendig, um die geforderte Lokalisierungsgenauigkeit im gesamten

Ausdehnungsgebiet der Anlage zu gewährleisten. Es wird empfohlen, in einem solchen Fall die Einhaltung der Lokalisierungsgenauigkeit durch computergestützte Verfahren im Vorfeld zu simulieren und zu verifizieren.

In Abbildung A1 ist eine Stationsgeometrie angegeben, die im idealisierten Fall einer eng begrenzten geotechnischen Anlage (Ausdehnung < 1 km), als optimal in Bezug auf die Erdbebenlokalisierung gelten kann. Dabei werden 4 seismische Stationen im gleichen Winkelabstand auf einem Kreis mit Radius R um die geotechnische Anlage angeordnet. Eine Messtation wird im Zentrum des Kreises direkt über der Anlage installiert. Der Radius R des Messnetzwerkes kann mit der erwarteten Herdtiefe der Seismizität über die Faustregel (Steinberg & Rabinowitz, 2003):

$$R \geq 2 \cdot \text{erwartete Herdtiefe}$$

bestimmt werden. Es wird jedoch empfohlen, den tatsächlichen optimalen Radius anhand von computergestützten Simulationen unter Verwendung eines Modells der lokalen Untergrundstruktur (seismische P- und S-Wellengeschwindigkeit) genauer abzuschätzen.

Eine obere Schranke für den Radius R ist außerdem durch die Anforderung gegeben, auch an den Kreisstationen Erdbeben, die im Zentrum des Netzes stattfinden und eine Größenordnung unter der Fühlbarkeitsgrenze liegen, mit einem Signal-Stör-Verhältnis von 3 aufzeichnen zu können. Aus diesem Grund sind Stationsradien größer 15 km bei der Überwachung eng begrenzter geotechnischer Anlagen in der Regel nicht sinnvoll.

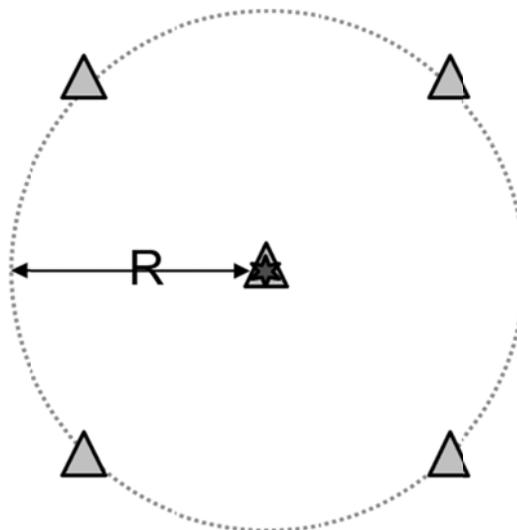


Abb. A1: Optimale Geometrie eines Stationsnetzwerkes mit 5 Stationen (Dreiecke) zur Lokalisierung von Erdbeben im Zentrum des Netzwerkes. Vereinfachende Annahmen: Homogenes Geschwindigkeitsmodell, gleiche Störsignalniveaus an den Stationsstandorten und geringe (< 1 km) Ausdehnung der geotechnischen Anlage.

Es empfiehlt sich, in einem ersten Schritt eine größere Anzahl möglicher Standorte anhand der Kriterien aus A1 in einem Umkreis von 15 km zu bestimmen. Dabei ist auf eine gleichmäßige azimutale Abdeckung zu achten. Für die endgültige Auswahl der Stationsstandorte des seismischen Netzwerkes empfiehlt sich die Verwendung computergestützter Verfahren zur Optimierung seismischer Netzwerke (siehe weiterführende Literatur).

Es wird empfohlen, die technischen Voraussetzungen für Datenübertragung, Datenspeicherung und Datenauswertung so zu gestalten, dass ein Datenaustausch mit seismologischen Diensten oder Behörden technisch jederzeit möglich ist. Es stehen dazu geeignete kommerzielle und freie Softwareprodukte zur Verfügung.

Falls ein Immissionsnetz mit Messstellen nach DIN 45669 besteht, wird die Einbindung geeigneter Messstellen in die Datenerfassung des seismischen Messnetzes empfohlen. Eine geeignete Messstelle liegt vor, falls die unbewertete Bodenschwinggeschwindigkeit als kontinuierlicher Datenstrom zur Verfügung steht und am Fundament eines Gebäudes oder im Freifeld gemessen wird. Mit dieser Maßnahme werden Redundanzen geschaffen, um den Ausfall von Messstationen des seismischen Netzwerkes kurzfristig zu überbrücken.

A 2.2.2 Gruppierung geotechnischer Anlagen

Unter einer Gruppierung geotechnischer Anlagen (GgA) wird im Folgenden eine Gruppe von seismologisch zu überwachenden geotechnischen Anlagen verstanden, die sich über einen zusammenhängenden Graphen mit einer maximalen Kantenlänge von 20 km verbinden lassen (siehe Beispiel in Abb. A2).

Eine GgA bietet den Vorteil, Stationen des seismischen Überwachungsnetzes so zu platzieren, dass sie von benachbarten Projekten gemeinsam genutzt werden können. Dadurch kann die Anzahl der zur seismologischen Überwachung benötigten Stationen oft stark reduziert werden. Im ungünstigsten Fall einer linearen Anordnung von N Anlagen sind dies N-1 eingesparte Stationen. Bei günstiger Geometrie kann die Einsparung bei 50% und mehr liegen (siehe dazu Abb. A2).

Zur Planung des Überwachungsnetzes für eine GgA sollte ein computergestützter Optimierungsalgorithmus verwendet werden. Idealerweise sollte dabei auch ein Modell des anthropogenen Störsignalniveaus im Untersuchungsgebiet berücksichtigt werden. Auch für den Fall, dass eine GgA aus einer isolierten geotechnischen Anlage entsteht oder nachträglich erweitert wird, ist eine computergestützte Netzwerkplanung zu empfehlen. In der Liste weiterführender Literatur finden sich dazu ausgewählte Fallbeispiele zur Netzwerkoptimierung.

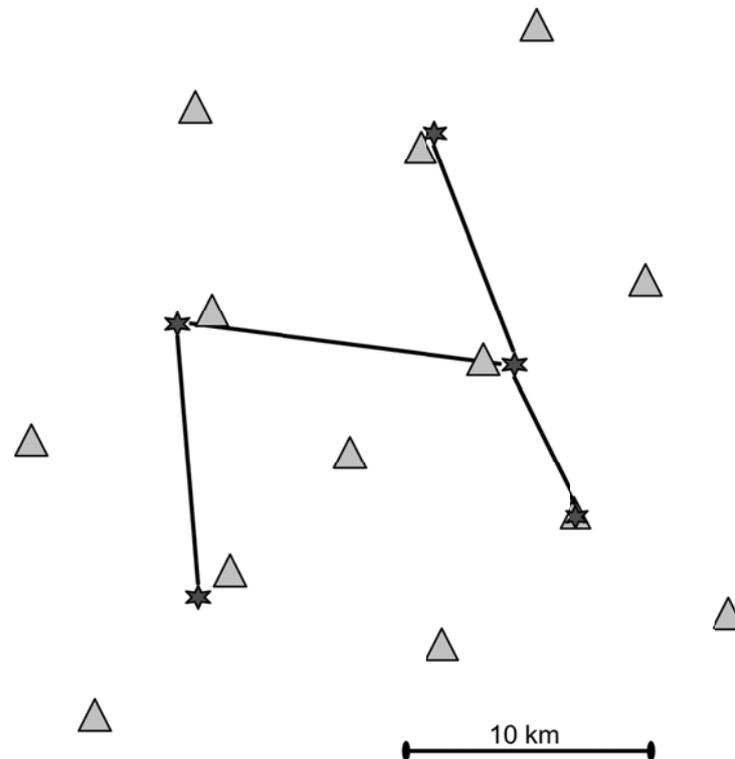


Abb. A2: Skizze einer Gruppierung geotechnischer Anlagen (Sterne). Die Kanten des zusammenhängenden Graphen, der die Anlagen verbindet, sind weniger als 20 km lang (schwarze Linien). Die Anzahl der zur Überwachung aller 5 Anlagen benötigten seismologischen Stationen (Dreiecke) kann in diesem hypothetischen Beispiel von 25 auf 13 gesenkt werden.

Neben rein ökonomischen Gründen spricht auch die potenzielle Verbesserung der seismologischen Auswertung für eine gemeinsam koordinierte Überwachung einer GgA. So kann sich dadurch die Qualität der Lokalisierung verbessern und auch die Bestimmung des Bruchprozesses (Herdmechanismus) möglich werden.

Die technischen und qualitativen Anforderungen an die Stationen eines GgA-Überwachungsnetzes unterscheiden sich nicht von denen zur Überwachung einer isolierten geotechnischen Anlage. Entscheidend ist jedoch, dass die Daten aller Stationen in Echtzeit ausgetauscht werden und einheitliche Standards für die Datenübertragung, das Datenformat und die Beschreibung der Metadaten festgelegt werden. Bei den deutschen Erdbebendiensten haben sich dabei, wie in den meisten anderen Ländern weltweit, SEED (Standard for the Exchange of Earthquake Data) und SeedLink durchgesetzt. Es wird deshalb auch hier empfohlen, diese Standards zu nutzen.

Es wird empfohlen, die Daten des GgA-Überwachungsnetzes an einer Stelle zusammenzuführen und eine zentrale Auswertung und Datenspeicherung durchzuführen. So können auch hier die Kosten für Beschaffung, Betrieb und Personal optimiert werden. Eine zentralisierte Auswertung hat weiter den Vorteil,

dass für den Fall des Auftretens von induzierter Seismizität einheitliche Alarmierungskonzepte und klare Kommunikationswege definiert werden können.

Seismologische Dienste haben die nötige Erfahrung mit dem Betrieb von lokalen und regionalen Überwachungsnetzen. Im Besonderen sind die Erdbebendienste sehr gut mit den lokalen Besonderheiten der Erdbebensignale und deren Auswertung vertraut. Außerdem sind die Kommunikationswege von und zu Behörden und Bevölkerung durch die Informationspflicht der Dienste über die natürliche Seismizität erprobt und etabliert. Es ist deshalb sehr empfehlenswert, die Erdbebendienste frühzeitig in die Überwachung einzubeziehen.

Die Finanzierung der seismologischen Überwachung einer GgA kann über einen gemeinsamen Überwachungsfond geschehen, in den die Betreiber der betroffenen geotechnischen Anlagen anteilig einzahlen, um die Kosten für Geräte, Wartung, Betrieb und Personal gerecht zu verteilen.

Weiterführende Literatur

- Hardt, M. & Scherbaum, F., 1994. The design of optimum networks for aftershock recordings. *Geophysical Journal International*, **117**, 716-726.
- Kraft, T., Mignan, A., Husen, S. & Giardini D., 2012. Optimization of a large-scale microseismic monitoring network in northern Switzerland, *submitted to Geophysical Journal International*.
- Maurer, H., Curtis, A. & Boerner, D. E., 2010. Recent advances in optimized geophysical survey design. *Geophysics*, **75**, 75A177-75A194.
- Steinberg, D. M. & Rabinowitz, N., 2003. Optimal seismic monitoring for event location with application to On Site Inspection of the Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty. *Metrika*, **58**, 31-57.