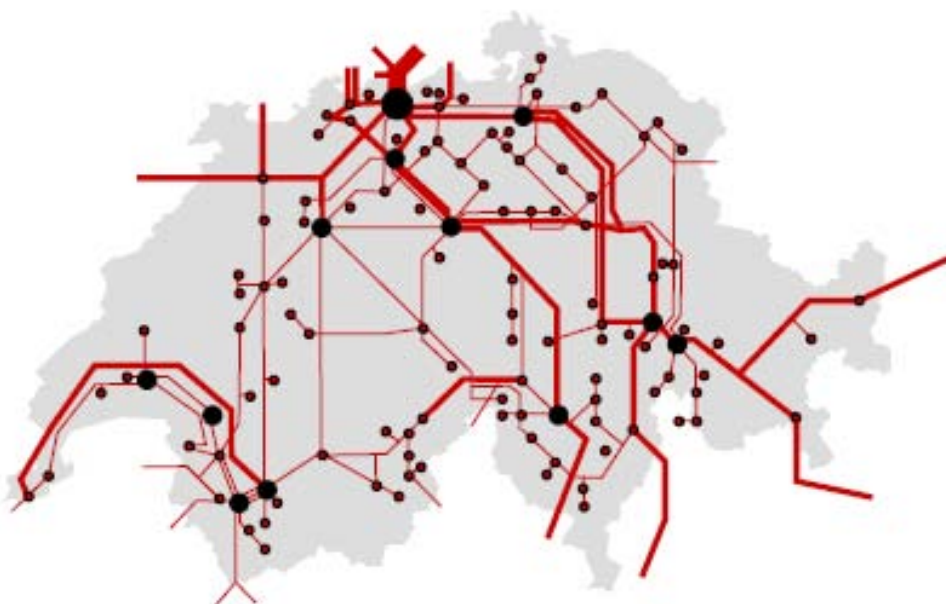


Erdbebensicherheit der elektrischen Energieverteilung in der Schweiz



1. Zwischenbericht

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt

RÉSONANCE Ingénieurs-Conseils SA

21 rue Jacques Grosselin
CH – 1227 CAROUGE (Genève)

Tel. +41 22 301 02 53
Fax +41 22 301 02 70
E-mail resonance@resonance.ch

Carouge, 15. Januar 2009

TB 285.01-1/MK

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Gefahrenprävention, CH-3003 Bern. Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Résonance Ingénieurs-Conseils SA, CH-1227 Carouge

Autor: Martin G. Koller, Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH

Begleitung BAFU: Blaise Duvernay, dipl. Bauing. ETH

Begleitgruppe:

- Adrien Guérig, Nordostschweizerische Kraftwerke (NOK)
- Urs Huber, Eidgenössisches Starkstrominspektorat (ESTI)
- Frau Bärbel Müller und Markus von Arx, Schweizerische Bundesbahnen (SBB)
- Pascal Müller, Elektrizitätswerke Zürich (ewz)
- Lambertus Noij und Walter Bleuel, Industrielle Werke Basel (IWB)

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Freigabe BAFU: 23. Januar 2009, Andreas Götz

Titelblatt: Höchstspannungsnetz der Schweiz

Zusammenfassung

Im Jahr 2004 hat eine Expertengruppe dem Bundesrat einen Bericht zur Erdbebenvorsorge bei sogenannten Lifelines-Infrastrukturen unterbreitet. Die Versorgung mit elektrischer Energie wurde darin als einer der prioritären Sektoren identifiziert, in dem ein Handlungsbedarf bezüglich Erdbebensicherheit bestehen dürfte.

Im Rahmen des Massnahmenprogrammes des Bundes 2005 – 2008 hat die Koordinationsstelle für Erdbebenvorsorge des Bundes das auf Erdbebeningenieurwesen spezialisierte Büro Résonance Ingénieurs-Conseils SA damit beauftragt, eine Bestandsaufnahme der heutigen Situation zu erarbeiten. Deren Erarbeitung wurde von einer Gruppe von Fachleuten aus der schweizerischen Elektrizitätsbranche sowie vom Eidgenössischen Strakstrominspektorat (ESTI) begleitet.

Die Ziele dieser Studie sind die Schwachstellen der elektrischen Energieverteilung bezüglich Erdbeben zu identifizieren, den Handlungsbedarf festzulegen, anwendbare Normen und Standards für die Schweiz zusammenzustellen, Beurteilungsverfahren für bestehende Anlagen zu entwickeln sowie typische konstruktive Sicherungsmassnahmen vorzuschlagen. Die Ergebnisse der Studie sollen als Basis dienen, um Vollzugshilfen für das ESTI im Rahmen der Bewilligung von Projekten zu entwickeln sowie die Elektrobranche zu sensibilisieren und mit praxistauglichen Lösungsansätzen zu unterstützen.

Erfahrungen im Ausland zeigen eindeutig, dass die mit Abstand grössten Schäden an der Infrastruktur der elektrischen Energieverteilung im Erdbebenfall bei Unterwerken in Freiluftbauweise beobachtet werden, während Freileitungen Erdbeben in der Regel recht gut überstehen. Je höher die Spannungsebene, desto verletzlicher sind die Unterwerke. Immer wiederkehrende Erdbebenschäden sind gebrochene Porzellanelemente und Schäden an Transformatoren infolge zu schwacher Verankerungen. Porzellanelemente brechen oft als Folge ungünstiger Interaktionen, wenn Leiterverbindungen nicht ausreichend flexibel sind. Aber auch harte Stösse infolge von Spiel in den Verankerungen oder Verstärkungen der Erdbebenbeschleunigungen infolge nachgiebiger Stützkonstruktionen können zu Schäden führen.

Der hier vorliegende Zwischenbericht gibt erste Empfehlungen zur Erdbebensicherung von Unterwerken in Abhängigkeit der Spannungsebene und der Erdbebenzone. Er dient als erste Orientierung für die Unternehmen der Elektrizitätswirtschaft. Zu den wichtigsten Empfehlungen gehören verbesserte Verankerungen insbesondere der Transformatoren, aber auch der anderen Hochspannungsapparate, losere Leiterverbindungen zwischen den einzelnen Apparaten sowie Absturz- und Kippsicherungen bei Notstrombatterien und Steuerschränken, inklusive Sicherung der oft vorhandenen Doppelböden.

Die Studie hat bisher noch nicht alle offenen Fragen bezüglich des Erdbebenverhaltens der elektrischen Energieverteilung auf Hochspannungsebene beantworten können. Die vorherrschenden Probleme sind qualitativ erkannt, deren quantitatives Ausmass im schweizerischen Umfeld ist aber in vielen Fällen noch unklar. Es wird deshalb in einer zweiten Phase geplant, anhand einiger Pilotstudien konkrete Erkenntnisse zum Ausmass der Probleme zu gewinnen sowie die Kosten möglicher Ertüchtigungsmassnahmen anhand konkreter Vorschläge abzuschätzen. Die Ergebnisse dieser zweiten Phase werden in einem Schlussbericht per Ende 2009 publiziert.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
1. Einleitung	6
1.1 Ausgangslage.....	6
1.2 Zielsetzung	6
1.3 Vorgehen	7
1.4 Terminologie.....	7
2. Erdbebengefährdung in der Schweiz	8
2.1 Charakteristik der Erdbebengefährdung in der Schweiz	8
2.2 Erdbebengefährdung gemäss der Norm SIA 261.....	11
3. Schadenerfahrungen bei Erdbeben	12
3.1 Qualitative Auswertung der Literatur.....	13
3.2 Quantitative Schadensschwellen	17
3.3 Plausibilitätsüberlegungen.....	18
3.4 Schlussfolgerungen	20
4. Bisherige Baupraxis in der Schweiz.....	20
4.1 Baupraxis bei den Gebäuden	20
4.2 Baupraxis bei den Einrichtungen	21
5. Normen und Richtlinien bezüglich Erdbebensicherheit	22
5.1 Normen und Richtlinien in der Schweiz	22
5.2 Normen auf europäischer Ebene.....	22
5.3 IEC-Normen und weitere IEC-Publikationen	23
5.4 USA-Spezifikationen (IEEE, ASCE)	25
6. Verletzlichkeit von Unterwerken	27
6.1 Elemente eines Unterwerkes	28
6.2 Schadensursachen bei Freiluftanlagen.....	32
6.3 Erkenntnisse aus Herstellerangaben.....	33
6.4 Pilotuntersuchung für das UW Chamoson	34
6.5 Schlussfolgerungen bezüglich Verletzlichkeit	36
6.5.1 Transformatoren	36
6.5.2 Leistungsschalter, Trenner, Strom- und Spannungswandler.....	38
6.5.3 Sekundärssysteme	39
6.5.4 Lagerung von Ersatzmaterial.....	40
7. Leitfaden zur Überprüfung von Unterwerken	41
7.1 Transformatoren	41
7.2 Leistungsschalter, Trenner, Strom- und Spannungswandler.....	41
7.3 Sekundärssysteme	42
8. Empfehlungen zur Erdbebensicherung von Unterwerken.....	42
8.1 Massnahmen bei Transformatoren.....	43
8.2 Massnahmen bei Höchstspannungsapparaten	45
8.3 Massnahmen bei Sekundärsystemen	47

9.	Weiteres Vorgehen	48
9.1	Pilotstudien Unterwerke	48
9.1.1	Transformatoren	48
9.1.2	Erdbebensicherung bei Höchstspannungsapparaten	48
9.1.3	Erdbebensicherung der Sekundärsysteme	49
9.2	Pilotstudie für eine Übertragungsleitung	49
9.3	Administrative Vorschläge	50
10.	Quellen	50
10.1	Normen und Richtlinien bezüglich Erdbebensicherheit	50
10.1.1	Schweizer Normen	50
10.1.2	Europäische Normen	50
10.1.3	IEC-Normen und weitere IEC-Publikationen	51
10.1.4	US-Standards und Richtlinien (IEEE, ASCE)	51
10.2	Weitere Literaturquellen	51
10.3	Bilder-Nachweise	52

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Seit dem Jahr 2000 verlangt der Bund, dass alle Neubauten, für die eine Bundesbewilligung benötigt wird oder die vom Bund subventioniert werden, nach den einschlägigen Normen erdbebensicher gebaut werden. Bei Gebäuden und Brücken handelt es sich seit dem Jahr 2003 um die SIA-Tragwerksnormen 260 bis 267, und insbesondere um die Norm SIA 261 [S1].

Bei Umbauten ist die Erdbebensicherheit zu überprüfen und notwendigenfalls zu verbessern, sofern dies mit vertretbaren Investitionen möglich ist. Hier wird seit dem Jahr 2004 in erster Linie auf das Merkblatt SIA 2018 [S2] abgestützt, das die Begriffe "verhältnismässige" und "zumutbare" Kosten sowie deren Berechnung definiert.

Im Bereich der elektrischen Energieversorgung im höheren Spannungsbereich ist das Eidgenössische Starkstrominspektorat (ESTI) für die Aufsicht verantwortlich. Bisher aber fehlen die nötigen Grundlagen zur Verletzlichkeit der Elemente der Energieversorgungsinfrastruktur sowie klare Normen-Vorschriften bezüglich Erdbebensicherheit, so dass das ESTI diese Verantwortung bisher kaum konkret wahrnehmen konnte. Die Tragwerksnormen SIA 260 bis 267 enthalten zwar gewisse Angaben zu sogenannt nichttragenden Bauteilen und Installationen. Diese sind aber für eine konkrete Anwendung und Überprüfung im Bereich der elektrischen Energieversorgung zu wenig spezifisch.

Im Jahr 2004 hat eine Expertengruppe dem Bundesrat einen Bericht zur Erdbebenvorsorge bei sogenannten Lifelines unterbreitet. Die elektrische Energieversorgung wurde darin als einer der prioritären Sektoren identifiziert, wo ein Handlungsbedarf bezüglich Erdbebensicherheit bestehen dürfte.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen des Massnahmenprogrammes des Bundes 2005 – 2008 hat die Koordinationsstelle für Erdbebenvorsorge des Bundes, angesiedelt beim Bundesamt für Umwelt (BAFU), das auf Erdbebeningenieurwesen spezialisierte Büro Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Carouge, damit beauftragt, eine Bestandesaufnahme der heutigen Situation zu erarbeiten. Behandelt wird die Energieverteilung auf den höheren Spannungsebenen, während die Kraftwerke als solche nicht berücksichtigt werden.

Die Studie soll,

- die Problematik aufgrund von Erfahrungen mit Erdbeben im Ausland darstellen,
- die bisherige Schweizer Baupraxis bezüglich erdbebensicheren Bauens der Elemente in der Hochspannungstechnik, insbesondere der Unterwerke, beschreiben,
- die entsprechenden Normen und Richtlinien bezüglich Erdbebensicherheit auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene zusammenstellen,
- die Verletzlichkeit der elektrischen Energieversorgung der Schweiz, insbesondere der Unterwerke, analysieren und den Handlungsbedarf identifizieren,
- Verfahren zur Ermittlung der Erdbebensicherheit von Unterwerken, z.B. anhand von einem Leitfaden, definieren,

- technische Massnahmen zur Erdbebenertüchtigung bestehender Unterwerke vorschlagen.

Die Bestandesaufnahme wird folgenden Zielen dienen:

- der Erarbeitung technischer Grundlagen zur Abschätzung der Konsequenzen von Erdbebenszenarien auf die elektrische Energieversorgung in der Schweiz,
- der Definition von Massnahmen auf Bundesebene, die zur Erfüllung der Bundesratsbeschlüsse im Bereich der Erdbebenvorsorge (Kontrolle von Projekten, systematische Erhebungen, ...) notwendig sind,
- der Sensibilisierung der Elektrizitätsbranche (Förderung der Selbstverantwortung) sowie der Erarbeitung technischer Grundlagen.

1.3 Vorgehen

Die vorliegende Bestandesaufnahme basiert auf einer ausführlichen Literaturstudie sowie auf dem Besuch von zwei Unterwerken (220/380 kV, Unterwerk Breite, Kanton Zürich, Erdbebenzone 1; Poste de couplage de Chamoson, Kanton Wallis, Erdbebenzone 3b). Für das Unterwerk Chamoson wurden die a priori verletzlichsten Hochspannungsapparate, soweit dies möglich war, mit Hilfe von Überschlagsrechnungen überprüft. Dies war nur möglich dank der Bereitschaft von EOS, mit Herrn Jaroslav Pisecky einen sehr erfahrenen Ingenieur als Ansprechpartner sowie weitere Fachkräfte für das Hervorsuchen von Plänen und weiteren technischen Unterlagen zur Verfügung zu stellen.

Die Erarbeitung der vorliegenden Bestandesaufnahme wurde von einer Expertengruppe begleitet, der folgende Personen (in alphabetischer Reihenfolge) angehörten:

- Blaise Duvernay, BAFU (Auftraggeber)
- Adrien Guérig, Nordostschweizerische Kraftwerke (NOK)
- Urs Huber, Eidgenössisches Starkstrominspektorat (ESTI)
- Frau Bärbel Müller und Markus von Arx, Schweizerische Bundesbahnen (SBB)
- Pascal Müller, Elektrizitätswerke Zürich (ewz)
- Lambertus Noij und Walter Bleuel, Industrielle Werke Basel (IWB)

Die Expertengruppe traf sich dreimal: einmal als Auftakt vor Beginn der eigentlichen Arbeiten, einmal im Laufe der Bearbeitung und einmal nach Abgabe eines vollständigen Berichtsentwurfs. Dieser Entwurf wurde von den Mitgliedern der Expertengruppe korreferiert; die abgegebenen Kommentare wurden anschliessend bei der Bereinigung des Berichts berücksichtigt.

1.4 Terminologie

Unter "Hochspannung" werden alle Spannungsniveaus von 1 kV und darüber verstanden. In der Schweiz ist zudem folgende Unterteilung üblich:

- Die Spannungsebenen 220 kV und 380 kV werden auch als "Höchstspannung" bezeichnet (höhere Spannungsebenen kommen in der Schweiz nicht vor).
- Die Spannungsebenen von 1 kV bis 36 kV werden auch "Mittelspannung" genannt.

- Zwischen den erwähnten Bereichen spricht man unverändert von "Hochspannung". Dieser Begriff ist somit insofern zweideutig, als dem Zusammenhang entnommen werden muss, ob im konkreten Fall vom gesamten Hochspannungsbereich (1 kV bis 380 kV) oder nur von einem mittleren Hochspannungsbereich (> 36 kV und < 220 kV) die Rede ist.

Im vorliegenden Bericht wird der Begriff "Hochspannung", wird nichts anderes erwähnt, für den gesamten Bereich ab 1 kV und darüber verwendet.

Des weiteren wird im vorliegenden Bericht der der Seemannssprache entlehnte Begriff "Lose" verwendet, der dem englischen "slack" entspricht. Ein Seil, das Lose aufweist, kann ohne nennenswerten Widerstand durchgestreckt werden, bevor grössere Kräfte im Seil entstehen. Genau dies ist wichtig bei Leiterverbindungen zwischen verschiedenen Hochspannungsapparaten. Die gängigeren Begriffe "Spiel" oder "Flexibilität" sind, auch wenn sie etwas Ähnliches bezeichnen, nicht ganz zutreffend.

2. Erdbebengefährdung in der Schweiz

2.1 Charakteristik der Erdbebengefährdung in der Schweiz

Die Schweiz weist im internationalen Vergleich eine mittlere Erdbebengefährdung auf (Bild 2.1). Starke Erdbeben sind eher selten. Im Wallis ist etwa alle hundert Jahre mit einem Erdbeben zu rechnen, das die Magnitude (M) 6 erreicht oder überschreitet. Bild 2.2 gibt eine anschauliche Übersicht über die relative Erdbebengefährdung in der Schweiz: Gefährdet sind vor allem das Wallis und der Raum Basel. Das mögliche Auftreten eines grösseren Schadenbebens kann aber nirgendwo in der Schweiz ausgeschlossen werden.

Von der Auftretenswahrscheinlichkeit her betrachtet wird die Gefährdung in der Schweiz von Erdbeben eher moderater Magnituden ($5 < M < 6$) dominiert, die in relativ geringer Entfernung zu einem gegebenen Standort auftreten. Im Raum Basel z.B. ist das wahrscheinlichste Szenario in bezug auf eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren ein Beben der Magnitude 5 bis 5.5 in einer Distanz von 10 bis 20 km (Bild 2.3: "schwärzeste" Flecken im Diagramm links unten). Mit zunehmender Wiederkehrperiode nehmen allerdings die Magnituden der Erdbeben zu, welche den grössten Beitrag zur Gefährdung liefern. Für eine Wiederkehrperiode von gut 1000 Jahren, wie sie von der Norm SIA 261 für die Bemessung sogenannter Lifeline-Bauwerke (Bauwerksklasse III) zugrunde gelegt wird (vgl. Kapitel 2.2), kann in Bild 2.3 zwischen den Angaben für die Wiederkehrperioden von 475 und 2500 Jahren interpoliert werden: Die massgebenden Szenarien sind Erdbeben mit Magnituden zwischen 5 und 6 mit einer Herddistanz von 10 bis 20 km.

Erst bei Wiederkehrperioden von mehreren Tausend Jahren liefern Erdbeben der Magnituden 6 bis 7 einen signifikanten Beitrag zur Gefährdung in Basel. Dies entspricht dem 1356er-Beben, das eine Moment-Magnitude M_w von 6.6 (gemäss deutschem Katalog) bis 6.9 (gemäss Schweizer Katalog) aufwies.

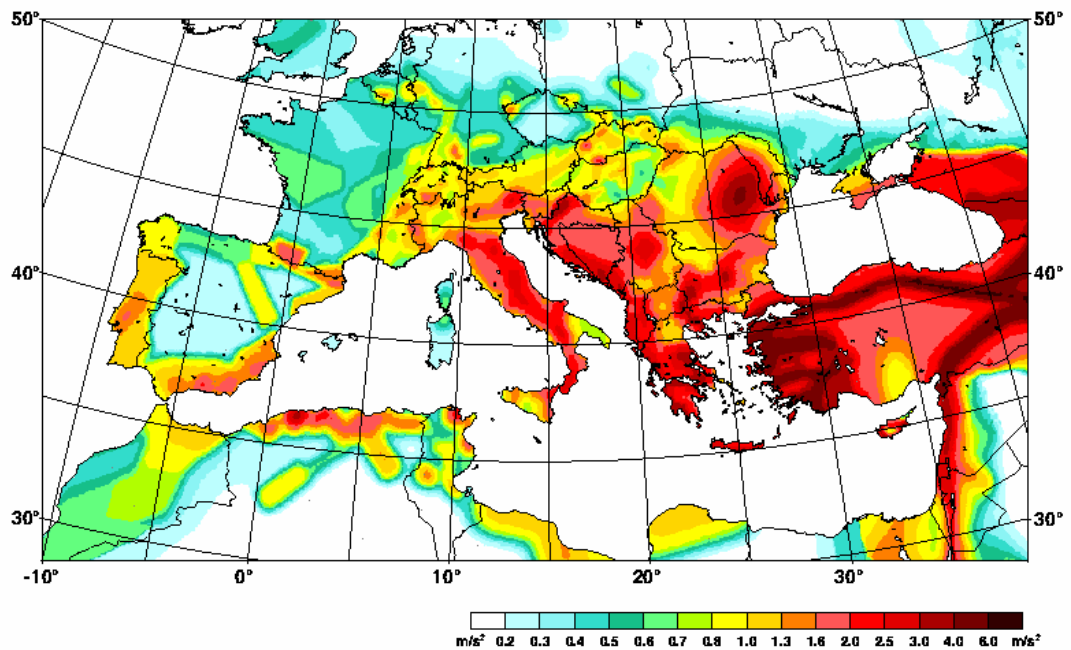


Bild 2.1: Erdbebengefährdung in Europa: Die Schweiz liegt im Bereich mittlerer Erdbebengefährdung (Quelle: SESAME-Projekt).

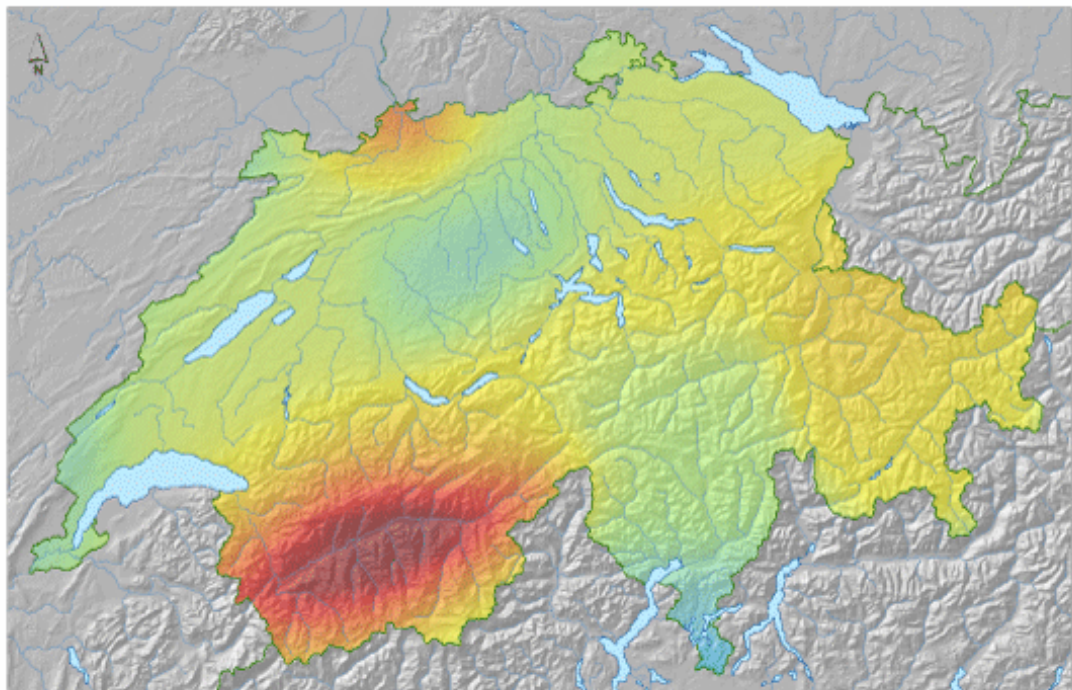


Bild 2.2: Gefährdungskarte für die Schweiz: dunkelrot entspricht der höchsten, blaugrün der niedrigsten Gefährdung (Quelle: SED).

Eine ähnliche Situation ist auch im Wallis vorhanden, während in Gebieten geringerer seismischer Gefährdung (grün bis grün-gelb in Bild 2.2) die dominanten Beiträge von Erdbeben geringerer Magnituden ausgehen. In bezug auf eine Wieder-

kehrperiode von gut 1000 Jahren sind das etwa für Zürich Magnituden von 4.5 bis 5.5.

Beben moderater Magnitude (< 5.5) können im hochfrequenten Bereich ($> \sim 5$ Hz) relativ grosse Beschleunigungswerte hervorrufen, die bei grösseren Gebäuden oder Brücken aber oft nur geringe Schäden bewirken, da sie im für diese Strukturen entscheidenden, tieferen Frequenzbereich (etwa 0.5 Hz bis einige wenige Hz) nur wenig Energie aufweisen. Wichtige Apparate und Anlagen von Unterwerken aber weisen in der Regel etwas höhere Eigenfrequenzen auf und könnten deshalb schon bei Erdbeben verhältnismässig geringer Magnitude gefährdet sein. Solche Erdbeben weisen aber nur relativ begrenzte Schadengebiete auf. Die Beschleunigungen fallen mit zunehmender Distanz vom räumlich wenig ausgedehnten Erdbebenherd relativ schnell ab; bei einem Beben der Magnitude 5.5 sind die Beschleunigungen in 15 km Epizentraldistanz nur noch halb so gross wie im Epizentrum (gleiche lokale Baugrundverhältnisse vorausgesetzt). Es ist daher eher unwahrscheinlich, dass zwei Höchstspannungs-Unterwerke gleichzeitig betroffen würden. Der Ausfall eines Unterwerkes allein aber hat oft dank der Redundanz der Stromversorgungsnetze nur beschränkte Auswirkungen auf die Versorgung.

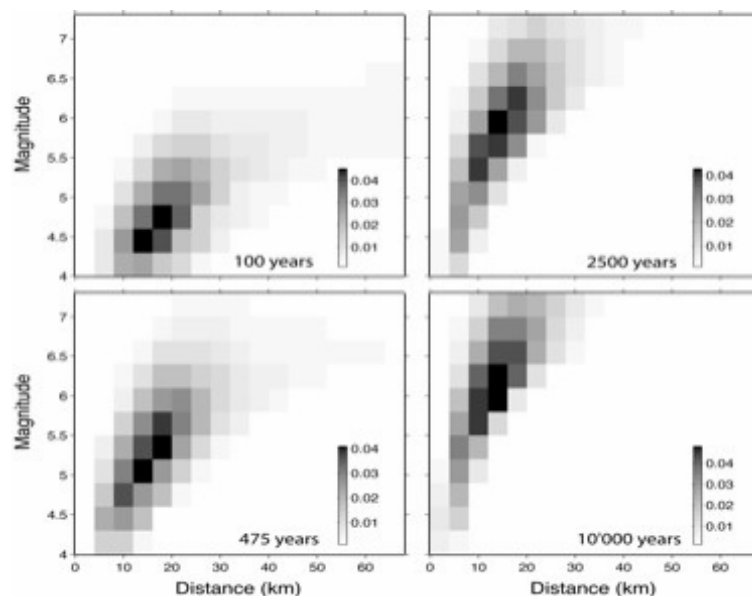


Bild 2.3: De-agregation der seismischen Gefährdung für Basel: je schwärzer, desto dominanter der Beitrag des entsprechenden Magnitude-Distanz-Paars zur Gefährdung (Quelle: SED).

Anders sieht das Ganze bei selteneren, eigentlichen Katastrophenereignissen aus. Je grösser die Magnitude, desto ausgedehnter ist das Hauptschadengebiet. Im Falle eines eigentlichen Katastrophenbebens wie dem Basler Beben von 1356 könnten mehrere Unterwerke des Höchstspannungsnetzes betroffen werden, so dass wohl ein nationaler Blackout zu erwarten wäre.

2.2 Erdbebengefährdung gemäss der Norm SIA 261

Die Norm SIA 261 definiert für die Schweiz vier Erdbebenzonen: 1, 2, 3a und 3b (Bild 2.4). Für jede Zone wird ein Referenzwert für die maximale Bodenbeschleunigung, a_{gd} , definiert, der für eine nominelle Wiederkehrperiode von 500 Jahren gilt (Tabelle 1).

"Gewöhnliche" Bauwerke sind auf Erdbeben mit einer Wiederkehrperiode von 500 Jahren zu bemessen. Dies bedeutet, dass die gemäss Norm zu berücksichtigenden Beschleunigungswerte eine Auftretens- oder genauer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 Jahren aufweisen. Bei Bauwerken mit sogenannter "Lifeline"-Funktion werden diese Beschleunigungswerte mit dem sogenannten Bedeutungsfaktor, γ , von 1.4 multipliziert. Man spricht hier von Bauwerken der sogenannten Bauwerksklasse (BWK) III. Die Multiplikation mit einem Faktor 1.4 entspricht einer Verlängerung der Wiederkehrperiode auf gut 1000 Jahre bzw. einer Verringerung der Überschreitenswahrscheinlichkeit auf knapp 5 % in 50 Jahren.

Da die Bodenbewegungen bei einem Erdbeben stark von der Geologie des lokalen Untergrunds abhängen, ist der Referenzwert, a_{gd} , zusätzlich mit einem sogenannten Baugrundfaktor, S , zu multiplizieren. In der Schweiz werden die Baugrundklassen C und E am häufigsten angetroffen. Bei der Klasse C handelt es sich um Lockergesteinsablagerungen mittlerer Steife mit einer Mächtigkeit grösser als 30 m, bei der Klasse E um Lockergesteinsablagerungen mittlerer oder geringer Steifigkeit, die auf Schichten deutlich höherer Steifigkeit in weniger als 30 m Tiefe aufliegen (vgl. Norm SIA 261 für genauere Definitionen). Die Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die maximalen Bodenbeschleunigungen, die sich für diese Baugrundklassen ergeben.

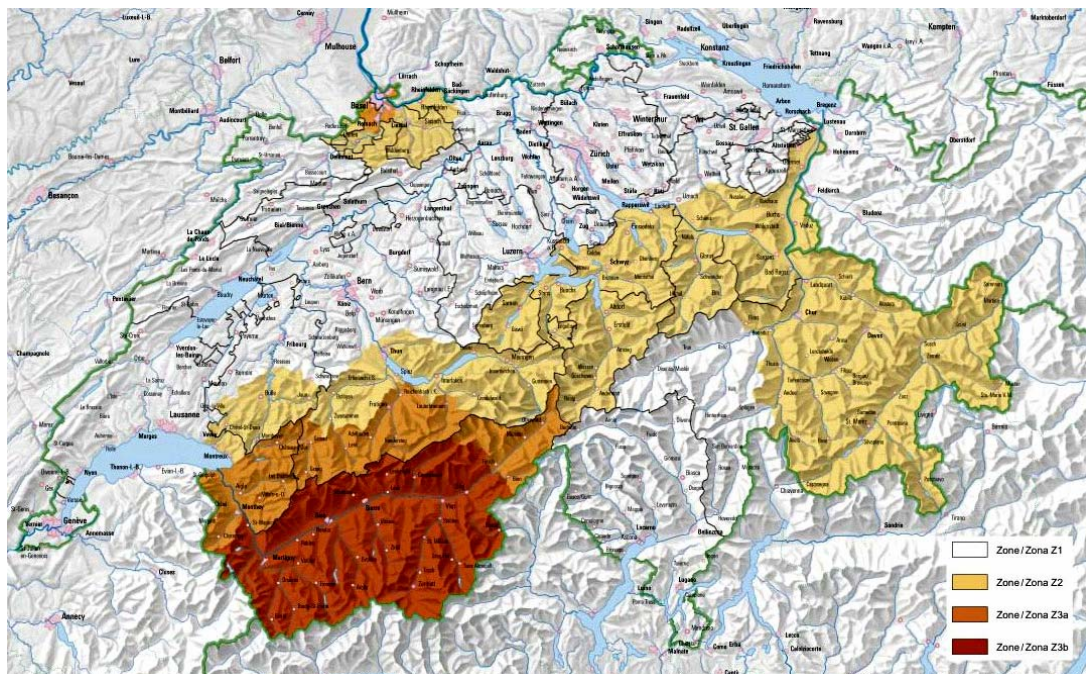


Bild 2.4: Erdbebenzonen der Schweiz gemäss der Norm SIA 261 aus dem Jahr 2003 (Quelle: SIA 261).

Zusätzlich zur maximalen Bodenbeschleunigung definiert die Norm SIA 261 auch den Frequenzgehalt der Bodenbewegungen, der ebenfalls stark von der lokalen Geologie beeinflusst wird, mit Hilfe sogenannter Antwortspektren. Diese zeigen, dass die Erdbebenbeschleunigungen von Bauwerken und Anlagen, je nach deren dynamischer Charakteristik, insbesondere der Grund-Eigenfrequenz, deutlich verstärkt werden können. Die bedeutendsten Verstärkungen treten im sogenannten Plateaubereich auf, der sich irgendwo zwischen 1 und 10 Hz befindet und dessen genaue Lage und Breite in erster Linie von der lokalen Geologie abhängt.

Tabelle 1: Maximale Bodenbeschleunigungen in m/s^2 gemäss der Norm SIA 261 (Details siehe Text), gerundet auf $0.1 m/s^2$, für die Bauwerksklasse III und die Baugrundklassen C und E.

Erdbebenzone	1	2	3a	3b
SIA 261-Referenzwert: a_{gd}	0.6	1.0	1.3	1.6
BWK III: $a_{gd} \times \gamma_f (=1.4)$	0.8	1.4	1.8	2.2
Baugrund C: $a_{gd} \times \gamma_f \times S(C) (=1.15)$	1.0	1.6	2.1	2.6
Baugrund E: $a_{gd} \times \gamma_f \times S(E) (=1.4)$	1.2	2.0	2.6	3.1

Die Norm SIA 261 muss, um einfach anwendbar zu bleiben, alle Untergrundverhältnisse, die in der Schweiz existieren, mit ein paar wenigen Baugrundklassen abdecken. Es erstaunt deshalb nicht, dass spezifische Standortstudien, bei denen der Einfluss der lokalen Geologie wesentlich genauer erfasst werden kann, zu von der Norm SIA 261 abweichenden Antwortspektren führen. Aus diesen und anderen Gründen, auf die hier nicht weiter eingetreten wird, unterschätzt die Norm SIA 261 die möglichen Beschleunigungen im hochfrequenten Bereich sehr oft, während häufig das Gegenteil – eine tendenzielle Überschätzung der Beschleunigungen – im tiefen Frequenzbereich zutrifft.

Schwellenwerte für Schäden werden in der Literatur oft in Funktion der maximalen Bodenbeschleunigung angegeben, auf Englisch "Peak Ground Acceleration" oder "PGA" genannt (vgl. Tabelle 2 in Kapitel 3.2). Andererseits ist bekannt – wird aber oft nicht ausreichend zur Kenntnis genommen –, dass Erdbebenschäden an Bauwerken nur sehr schlecht mit PGA-Werten korrelieren. Da wichtige Hochspannungsapparate und Anlagen in der Regel deutlich hochfrequenter sind als Bauwerke wie Gebäude oder Brücken, darf hingegen erwartet werden, dass Korrelationen zwischen Schäden und PGA-Werten (die vom hochfrequenten Energieanteil abhängen) bei diesen nicht allzu schlecht sein dürften. Trotzdem sind solche Schwellenwerte, ausgedrückt in PGA, nur als äusserst grobe Anhaltswerte zu verstehen!

3. Schadenerfahrungen bei Erdbeben

Das vorliegende Kapitel beschränkt sich auf Erfahrungen mit Übertragungs- und Verteilnetzen sowie Apparaten und Einrichtungen von Unterwerken. Die Problematik der Erdbebensicherheit von Gebäuden wird in Kapitel 5.1 angesprochen.

3.1 Qualitative Auswertung der Literatur

Einen ausgezeichneten Überblick über das Erdbebenverhalten von Stromversorgungssystemen, vor allem in den USA, gibt das ASCE-Manual [1] aus dem Jahr 1999. Der hier vorliegende Bericht stützt sich sehr stark auf diese Publikation der ASCE ("American Society of Civil Engineers") ab.

Freileitungen überstehen Erdbeben in der Regel gut. Ausnahmen bilden Fundationsversagen von Leitungsmasten infolge von Bodenverflüssigung sowie wegrutschende Masten bei erdbebeninduzierten Hanginstabilitäten. Gelegentlich wurden Kurzschlüsse und Brände beobachtet, wenn die Leiter unterschiedlicher Phasen wegen übermässiger Schwingungen miteinander in Kontakt kamen. Vereinzelt ergaben sich auch Probleme bei Leitungen, die an Gebäuden befestigt waren, die beim Erdbeben einstürzten.

Die mit Abstand bedeutendsten Schäden wurden bei Unterwerken in Freiluftbauweise beobachtet. Je höher die Spannungsebene, desto verletzlicher sind die einzelnen Elemente. Unterwerke mit tieferer Spannung verhielten sich in den USA bei Schadenbeben der letzten Jahrzehnte, die fast alle in Kalifornien auftraten, durchwegs gut. Dabei ist allerdings zu beachten, dass in Kaliforniens Unterwerken – im Gegensatz zur Situation in der Schweiz – zumindest die grundlegendsten Erdbebensicherungsmaßnahmen, wie etwa das Verankern von Transformatoren, eine Selbstverständlichkeit darstellen.

Eine detaillierte Statistik über Schäden an Apparaten von Unterwerken, basierend auf den wichtigsten Erdbeben der letzten beinahe hundert Jahre weltweit, wäre prinzipiell in der Dissertation von Bastami [2] aus dem Jahr 2007 zu finden. Da diese jedoch teilweise vertrauliche Daten enthält, durfte sie bisher nicht als Ganzes veröffentlicht werden. Bastami hat aber an der Weltkonferenz für Erdbebeningenieurwesen in Peking, 2008, einen Auszug aus dieser Statistik publizieren können [3]. An derselben Konferenz haben Khalvati und Hosseini Schäden an den Hochspannungsapparaten bei den letzten grossen iranischen Beben beschrieben [4].

Immer wiederkehrende Erdbebenschäden bei Höchstspannungs-Unterwerken in Freiluftbauweise sind gebrochene Porzellanelemente und Schäden an Transformatoren infolge zu schwacher Verankerungen. Porzellanelemente brechen oft als Folge ungünstiger Interaktionen verschiedener Elemente, die sich daraus ergeben, dass die Leiterverbindungen nicht mit ausreichend Löss versehen sind. Aber auch harte Stösse infolge von Spiel in den Verankerungen oder Verstärkungen der Erdbebenbeschleunigungen infolge nachgiebiger Stützkonstruktionen können zu Brüchen von Elementen aus Porzellan oder Aluminiumguss führen.

Erdbebenerfahrungen bei Unterwerken mit gekapselten Schaltanlagen liegen nur wenige vor. Es scheint, dass Unterwerke in gekapselter Bauweise zumindest moderate Erdbeben gut überstehen.

Studer Engineering, Zürich, hat im Jahre 2001 das Verhalten von Infrastrukturanlagen bei Erdbeben der vorangegangenen 10 Jahre für die IWB zusammengestellt [5]. Die Kapitel, welche die Elektrizitätsversorgungssysteme betreffen, wurden für die Erarbeitung des vorliegenden Berichts von den IWB freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Der Bericht [5] fasst das Verhalten der elektrischen Energieversorgung bei einigen wichtigen Erdbeben der letzten Jahre zusammen. An dieser Stelle seien beispielhaft

die Erfahrungen beim Northridge-Erdbeben (Kalifornien), dem Kocaeli-Erdbeben (Türkei) und dem Chi-Chi-Erdbeben (Taiwan) zitiert (Angaben aus [5] leicht ergänzt und mit Fotos illustriert; die angegebenen Magnituden entsprechen Moment-Magnituden M_w):

Northridge ($M_w = 6.7$, 1994)

- Versorgungsunterbrüche waren meistens auf Schäden bei Unterwerken zurückzuführen (Bilder 3.1 und 3.2).

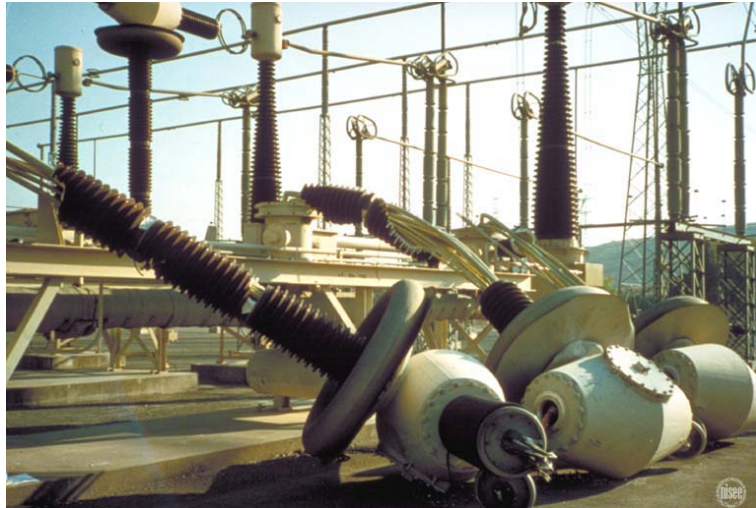


Bild 3.1 Northridge, 1994: zerstörte, ausgesprochen kopflastige 500 kV-SF6-Leistungsschalter der 70er-Jahre.



Bild 3.2 Northridge, 1994: geborstene Transformator-Durchführung (500 kV).

- Am schadenanfälligsten erwiesen sich Unterwerke mit Spannungsebenen von 230 kV und 500 kV. 154-kV-Unterwerke erlitten vergleichsweise wenig Schäden.
- Schäden an 230 kV- und 500 kV-Ausrüstungen ergaben sich bereits in Gebieten mit nur 1.5 m/s^2 maximaler Bodenbeschleunigung. Bei früheren Erdbeben traten solche Schäden sogar schon bei geringeren Beschleunigungen auf. Die meisten Schäden ergaben sich bei Porzellanisolatoren. Das Schadensausmass war grösser mit steigender Spannung und steigendem Alter.
- Bei Schäden in Unterwerken spielte die gegenseitige Interaktion von verschiedenen Apparaten oft eine grosse Rolle, oder das Initialversagen eines benachbarten Apparates führte zu ausgedehnten Schäden.
- Es ergaben sich verschiedene Ölverluste bei Transformatoren.

Kocaeli ($M_w = 7.4$, 1999)

- In der ganzen Türkei ergab sich ein Versorgungsunterbruch unmittelbar nach dem Erdbeben infolge des Ausfalls eines zentralen 380 kV-Unterwerks in Adapazari (Brüche von Porzellan-Elementen, Umkippen oder Beschädigung von Apparaten infolge ungenügender oder fehlender Verankerungen).
- Die Versorgung wurde innerhalb von 12 h für den Grossteil des Landes wiederhergestellt, nicht zuletzt dank relativ grosser Mengen verfügbarer Ersatzteile. Im Schadengebiet dauerte der Ausfall jedoch mehrere Tage, was die Rettungsarbeiten stark behinderte.
- 154 kV-Unterwerke erlitten nur wenige Schäden.
- In den Zonen stärkster Erschütterungen waren auch Verteiltransformatoren häufig beschädigt.
- Freileitungen und Masten zeigten keine Schäden, ausser direkt im Bereich der Verwerfung.



Bild 3.3 *Kocaeli, 1999: zerstörte, kopflastige Leistungsschalter in einem UW in Adapazari (Spannungsebene unbekannt) (Foto: A.S. Whittaker).*

Chi-Chi ($M_w = 7.6$, 1999)

- Bei den Unterwerken Chungliao und Tienlun traten grosse Schäden an Transformatoren und weiteren nicht genügend verankerten Einrichtungen auf (vgl. Bilder 3.4 und 3.5); zahlreiche Isolatoren wurden beschädigt.
- 345 kV-Leitungen fielen aufgrund von Hangrutschungen und mitgerissenen Masten aus.
- Mehrtägiger Versorgungsunterbruch im Norden der Insel infolge des Ausfalls obengenannter Anlagen.

Bei den hier aufgeführten Erdbeben ist zu beachten, dass diese grössere Magnituden aufwiesen, als in der Schweiz (abgesehen vom Beispiel Northridge) zu erwarten sind. Trotzdem dürfte die Schlussfolgerung, dass in erster Linie die Höchstspannungs-Unterwerke verletzlich sind, vorbehaltlos auf die Schweiz übertragbar sein.



Bild 3.4: Umgekippte Batterien und Steuerschränke im Unterwerk Chungliao nach dem Chi-Chi-Beben ($M_w = 7.6$), Taiwan, 1999 (Fotos: ASCE-TCLEE bzw. EQE International Inc., aus [2]).



Bild 3.5: Das Versagen der Schwingungsdämpfung mit Gussgehäuse eines Notstromgenerators hat zum Bruch der Treibstoffleitung geführt; Chi-Chi-Beben ($M_w = 7.6$), Taiwan, 1999 (Fotos: ASCE-TCLEE, aus [2]).

Auch eine Durchsicht der technischen Berichte (z.B. [6]) und zahlreichen Erkundungsberichte über Erdbeben der AFPS ("Association française du génie parasismique") bestätigt, dass bei elektrischer Verteilung in erster Linie Höchstspannungs-Unterwerke verletzlich sind.

3.2 Quantitative Schadensschwellen

Die konkreten Erfahrungen mit Erdbebenschäden stammen mehrheitlich von weit entfernten Ländern und darüber hinaus oft von stärkeren Beben, als in der Schweiz zu erwarten sind. Beim Versuch, diese Erfahrungen auf die Schweiz zu übertragen, stellen sich deshalb die folgenden Fragen:

- Wie weit entsprechen die Apparate der Unterwerke, die in weit entfernten Regionen Schäden erlitten haben, in ihrer Bauart den in der Schweiz verwendeten Apparaten?
- Sind die Apparate, die in seismisch sehr aktiven Zonen Schäden erlitten haben, für die moderate Erdbebengefährdung der Schweiz eventuell genügend resistent?

Zur ersten Frage: Die meisten Hersteller typischer Apparate liefern in zahlreiche Länder, und zum Teil sogar weltweit. Es darf deshalb davon ausgegangen werden, dass sich die Hochspannungs-Apparate in ihrer Bauart ähnlich sind. Gewisse Elemente, wie etwa Durchführungen, um ein Beispiel zu nennen, werden aber zumindest in neuerer Zeit für unterschiedliche seismische Qualifikationen hergestellt. Aus den IEC-Normen (siehe Kapitel 5.3) geht aber andererseits klar hervor, dass keine seismischen Anforderungen eingehalten werden müssen, wenn keine seismische Qualifikation verlangt wird, und die Schweizer Elektrizitätswerke dürften solche Qualifikationen von den Herstellern bisher nur in den seltensten Fällen verlangt haben. Ältere Apparate dürften selbst in den bekannten Erdbebengebieten kaum auf Erdbeben ausgelegt worden sein.

Eine gewisse Differenzierung ist allenfalls bezüglich dem Alter der Anlagen und der Qualität des Unterhalts (z.B. visuelle Inspektion) möglich. Das Durchschnittsalter der Hochspannungsapparate dürfte in den USA grösser sein als in der Schweiz und daher sind sie eher verletzlich. In den letzten 20 Jahren wurden Fortschritte bei der mechanischen Festigkeit der Porzellanisolatoren erzielt. Darüber hinaus ist durch die Weiterentwicklung der Apparate mit SF₆-Isolation und Silikonisolatoren eine klare Tendenz zu geringeren Massen in der Höhe festzustellen. Trotzdem bleiben die grundlegenden Probleme, wie ungenügende Verankerungen oder zuwenig Lose in den Leiterverbindungen, die gleichen. Es ist deshalb durchaus vernünftig, die weltweiten Erfahrungen in erster Näherung als auf die Schweiz übertragbar zu betrachten.

Zur zweiten Frage: Die Beschreibungen von Erdbebenschäden bei Unterwerken, die sich in der Literatur finden lassen, sind praktisch immer qualitativer Natur, d.h. die zugehörige maximale Bodenbeschleunigung ist kaum bekannt, und der Frequenzgehalt der aufgetretenen Beschleunigungen noch viel weniger. Diese Parameter stünden nur zur Verfügung, wenn die Unterwerke zur Zeit des Erdbebens mit Starkbeben-Seismographen bestückt gewesen wären. Bei der Durchsicht der Literatur wurde aber kein solcher, ausreichend dokumentierter Fall gefunden. Es ist deshalb äusserst schwierig, konkrete quantitative Angaben darüber zu finden, ab welchen Bodenbeschleunigungen oder -verschiebungen Schäden aufgetreten sind.

Im Internet konnte eine Tabelle unbekannten Datums von L. Kempner von der "Bonneville Power Administration" gefunden werden, die hier in angepasster Schreibweise (Beschleunigungen in m/s^2 , $10 \text{ m/s}^2 = 1 \text{ g}$) als Tabelle 2 wiedergegeben wird. Es ist unbekannt, ob die Daten, die der Tabelle zugrunde liegen, überwiegend von Unterwerken stammen, für die beim Bau keine oder keine wesentlichen Erdbebenvorkehrungen getroffen worden waren. Dies ist aber wahrscheinlich der Fall, da anzunehmen ist, dass Schäden bei den Erdbeben der letzten Jahrzehnte auch oder sogar in erster Linie bei älteren Anlagen auftraten, die selbst in Kalifornien noch nicht auf Erdbeben ausgelegt worden waren. Dies würde dann tatsächlich bedeuten, dass sich die in der Tabelle 2 enthaltenen Schwellenwerte de facto auf Unterwerke beziehen, die nicht auf Erdbeben ausgelegt worden waren.

Die Tabelle 2 zeigt eindrücklich, dass die kritische maximale Bodenbeschleunigung, ab der mit Erdbebenschäden zu rechnen ist, mit abnehmender elektrischer Spannung stark anwächst. Eine Ausnahme bilden die Transformatoren, wo zumindest für die drei berücksichtigten Spannungsebenen kein solcher Trend feststellbar ist. Dies ist kohärent mit den Beobachtungen beim Erdbeben von Kocaeli (1999), wo offenbar auch zahlreiche Schäden bei Verteiltransformatoren beobachtet wurden.

Tabelle 2: Schwellenwerte, in m/s^2 , für Schäden an elektrischen Apparaten von Freiluft- Unterwerken (nach L. Kempner).

APPARATE-TYP	500 kV	230 kV	115 kV
Freiluft-Leistungsschalter	0.5	1.0	2.0 - 3.0
Stromwandler	1.0	2.0 - 3.5	5.0
Überspannungsableiter	1.0	2.0 - 3.5	7.5
Trenner	1.0	2.0	6.0
unverankerte Transformatoren	1.5	1.5	1.5
Starre Sammelschienen	2.0	2.0 - 3.5	7.5
"Dead-Tank"-Leistungsschalter	4.0	5.0	> 7.0

3.3 Plausibilitätsüberlegungen

Die Erfahrung, dass Freiluft-Unterwerke um so verletzlicher sind, je höher die Spannungsebene ist, lässt sich physikalisch relativ einfach nachvollziehen und ist deshalb absolut plausibel.

Generell gilt, dass die Einrichtungen von Unterwerken um so grösser sind, je höher die Spannungsebene ist. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass der Mindestabstand zwischen den einzelnen Phasen, um ein Überschlagen zu verhindern, mit steigender Spannung zunimmt, womit alle Isolatoren und Durchführungen automatisch grösser ausgebildet werden müssen. Die Mindestabstände zum Boden, die in einem Unterwerk eingehalten werden müssen, betragen in der Schweiz 6.05 m bei 380 kV, 4.45 m bei 220 kV und 3.35 m bei 110 kV – 1 kV weniger erlaubt 1 cm weniger Abstand.

Was die Grösse von Isolatoren anbelangt, ergeben sich in bezug auf Erdbeben gleichzeitig vier verschiedene Massstabeffekte, die grundsätzlich alle in die gleiche Richtung grösserer Vulnerabilität für grössere Dimensionen wirken:

1. Die maximale Biegespannung eines stabförmigen Isolators beträgt ($\sigma_{\max}$: maximale Biegespannung; M: Biegemoment; I: Flächenträgheitsmoment; r: Radius des Isolators):

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{I} r . \quad (1)$$

Sei λ der lineare Massstabsfaktor. Dann nimmt die Masse des Isolators mit λ^3 und der Hebelarm in Bezug auf den Fusspunkt mit λ zu, so dass das Biegemoment am Fusspunkt, M, infolge horizontaler Trägheitskräfte bei gegebenem Wert der effektiven Beschleunigung (Spektralbeschleunigung) proportional zu λ^4 wird. Andererseits nimmt das Flächenträgheitsmoment, I, unter dem Bruchstrich ebenfalls mit λ^4 zu, so dass der Quotient M/I von λ unabhängig wird. Damit verbleibt in Gleichung (1) eine Zunahme um λ , da r zu λ proportional ist. Bei gleicher horizontaler Beschleunigung ergeben sich also in grösseren Isolatoren grössere maximale Biegezugspannungen, und diese sind bei spröden Materialien wie Porzellan für den Bruch verantwortlich. In anderen Worten: Eine gegebene Bruchspannung wird bei grösseren Isolatoren schon für geringere horizontale Beschleunigungen erreicht.

2. Die Bruchspannung selbst unterliegt bei spröden Materialien wie Porzellan einem Massstabeffekt. Der Bruch geht bei einem spröden Material von einer lokalen Fehlstelle des Materials aus, und die Wahrscheinlichkeit, dass in einem Isolator eine relevante Fehlstelle im Bereich der höchsten mechanischen Spannungen auftritt, ist um so grösser, je grösser der Isolator ist. Dies führt dazu, dass die Wahrscheinlichkeit gross ist, dass ein grösserer Isolator schon für geringere mechanische Spannungen bricht als ein kleinerer. Betrachtet man den oberflächennahen Bereich in der Nähe des Einspannungsquerschnitts als massgebend (dort treten die höchsten Biegezugspannungen auf), dann ergibt sich eine Zunahme der Wahrscheinlichkeit eines Bruches bei gegebener Biegezugspannung um etwa λ .
3. Ein verschiebungsbezogener Massstabeffekt ergibt sich daraus, dass die Verschiebungen, die sich am Kopf eines Apparates ergeben, bei gleicher effektiver Beschleunigung (Spektralbeschleunigung) um so kleiner sind, je höher die Eigenfrequenz des betrachteten Apparates ist, und kleinere Apparate haben automatisch höhere Eigenfrequenzen. Es braucht deshalb zwischen höherfrequenten Apparaten deutlich weniger Lose in den Leiterverbindungen als zwischen tieferfrequenten, um ungünstige Interaktionen unter benachbarten Apparaten zu verhindern.
4. Ein weiterer, potentieller Massstabeffekt ergibt sich aus der Frequenzcharakteristik von Erdbeben. Der maximale Energiegehalt von Erdbeben liegt, je nach Magnitude, etwa im Frequenzbereich von 1 Hz bis 10 Hz. Die Apparate von Unterwerken einer nicht allzu hohen Spannungsebene weisen Eigenfrequenzen auf – massgebend ist in erster Linie der Energieinhalt des Erdbebens bei dieser Eigenfrequenz –, die oberhalb dieses Bereiches liegen. Die Eigenfrequenzen der Apparate der höchsten Spannungsebenen hingegen liegen oft im Bereich maximalen Energieinhaltes. Im konkreten Fall hängen diese Eigenfrequenzen (oder genauer: Grundeigenfrequenzen) nicht nur von der Grösse der Apparate, sondern auch von deren Aufstellung ab: Hohe, tendenziell nachgiebige Unterbauten wirken sich in der Regel ungünstig aus.

Beachtet man, dass all diese Massstabseffekte gemeinsam auftreten, ist es nicht weiter verwunderlich, dass die kritische maximale Bodenbeschleunigung, ab der Erdbebenschäden auftreten, in der Tabelle 2 mit abnehmender Spannungsebene so stark zunimmt.

Wie unter Punkt 3.2 erwähnt, scheint bei Transformatoren kein so starker Massstabseffekt feststellbar zu sein. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass bei unverankerten Transformatoren oft Schäden infolge Abhebens – oder vielmehr infolge des Stosses beim Zurückfallen nach dem Abheben – auftreten. Das Abheben aber ist in erster Linie eine Frage der Höhe des Massenschwerpunktes im Vergleich zur Grösse der Standfläche, und dieses Verhältnis kann je nach Bauart auch bei kleineren Transformatoren ungünstig sein.

3.4 Schlussfolgerungen

Die Erdbebenprävention bei der elektrischen Energieversorgung sollte in erster Linie bei den Höchstspannungs-Unterwerken ansetzen. Erstens handelt es sich bei diesen eindeutig um die verletzlichsten Elemente im Versorgungssystem, und zweitens sind auch die Auswirkungen geographisch um so weitreichender, je höher die Spannungsebene des Unterwerkes ist.

Berücksichtigt man die heutzutage ausgesprochen langen Lieferfristen für Apparate von Unterwerken – bei Transformatoren betragen die Lieferfristen zwei bis drei Jahre –, wäre es verfehlt, sich allein auf die Redundanz im Netz zu verlassen. Selbst im Fall nur eines einzigen, stark beschädigten Unterwerkes dürfte dieses infolge der langen Lieferfristen von Ersatzapparaten für längere Zeit ausser Betrieb bleiben, und während dieser Zeit wäre die potentielle Störungsanfälligkeit des Netzes wesentlich erhöht, da dann die sogenannte "n-1"-Redundanz unter Umständen nicht mehr gegeben wäre. Darüber hinaus könnten bei seltenen Katastrophenbeben auch mehrere Unterwerke aufsmal beschädigt werden (vgl. Kapitel 2.1), so dass die Redundanz des Netzes nicht mehr ausreichen könnte, um einen Blackout zu vermeiden.

4. Bisherige Baupraxis in der Schweiz

4.1 Baupraxis bei den Gebäuden

Die Tragwerksnormen des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) enthalten ab 1970 gewisse rudimentäre Erdbebenvorschriften für allgemeine Bauwerke; die entsprechenden Bestimmungen waren aber aus heutiger Sicht in den meisten Fällen bei weitem ungenügend, und zudem wurden sie von den Bau-schaffenden oft nicht berücksichtigt. Erst die Norm SIA 160 von 1989 führte moderne Erdbebenbestimmungen in der Schweiz ein, aber auch diese blieben oft unbeachtet.

Kernkraftwerke und Talsperren bilden eine Ausnahme, da für diese strenge gesetzliche Auflagen gelten. Kernkraftwerke wurden von allem Anfang an auf Erdbeben ausgelegt; ja der Bau der Kernkraftwerke war, sowohl in der Schweiz wie auch weltweit, geradezu der Anstoss für die Entwicklung des Erdbebeningenieurwesens. Talsperren wurden schon in frühen Jahren auf eine zusätzliche horizontale Ersatz-

kraft bemessen, die 10 % des Eigengewichts der Talsperre entsprach. Selbstverständlich ist dieser Ansatz aus heutiger Sicht bei weitem ungenügend, weshalb einige Talsperren der Schweiz in den letzten zehn bis zwanzig Jahren mit modernen Methoden überprüft wurden.

Die neuen Tragwerksnormen des SIA, im Jahr 2003 in Kraft gesetzt [S1], brachten eine deutliche Verschärfung der Erdbebenbestimmungen gegenüber denjenigen aus dem Jahr 1989. Diese neuen Bestimmungen werden mittlerweile dank zahlreichen Sensibilisierungskampagnen bei den Ingenieuren und Architekten, wenn auch nicht lückenlos, so doch vermehrt angewendet.

Eine Konsequenz der beschriebenen Situation ist, dass wahrscheinlich die meisten Gebäude von Unterwerken, in denen die Steuerung und Überwachung der Unterwerke untergebracht ist, gemessen an den SIA-Normen von 2003 eine ungenügende Erdbebensicherheit aufweisen. Zur Beurteilung dieser Gebäude steht theoretisch das Merkblatt SIA 2018, "Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben" [S2], zur Verfügung. Dieses Merkblatt enthält Kriterien, die es erlauben zu beurteilen, ob eine Erdbebenertüchtigung notwendig ist oder nicht, falls die vorhandene Erdbebensicherheit die erwähnten Normen von 2003 nicht erfüllt. Diese Kriterien sind aber auf die Gewährleistung einer vertretbaren Personensicherheit ausgerichtet und sollten für die spezifische Situation von Unterwerken, bei denen die Versorgungssicherheit im Vordergrund steht, weiterentwickelt werden.

Die Problematik der Erdbebensicherheit der wichtigen Gebäude von Unterwerken ist, im Gegensatz zur Situation bei den Apparaten, unabhängig von der Spannungsebene.

Massnahmen zur Verbesserung der Erdbebensicherheit von Gebäuden von Unterwerken wurden erst in wenigen Einzelfällen ergriffen. Als z.B. beim Unterwerk Wasgenring, einem zentralen Element der Elektrizitätsversorgung Basels, eine umfassende Anlagenerneuerung mit entsprechenden baulichen Anpassungen bevorstand, wurde auch die Erdbebensicherheit der Gebäudehülle untersucht und mit einem Aufwand von über einer halben Million Schweizer Franken verbessert.

4.2 Baupraxis bei den Einrichtungen

An der ersten Besprechung der in der Einleitung erwähnten Expertengruppe vom 22. Februar 2008 stellte sich heraus, dass die Erdbebensicherheit bei den Einrichtungen der elektrischen Energieversorgung in der Schweiz bisher, von wenigen Ausnahmen abgesehen, kein Thema war. Dies gilt nicht für die Kernkraftwerke und Talsperren, bei denen die sicherheitsrelevanten Einrichtungen auf Erdbeben ausgelegt sind. Unterwerke allerdings, welche die Spannung beim Ausgang aus einem Kraftwerk für den Energietransport hochtransformieren, weisen in der Regel dieselben Schwachstellen auf wie die übrigen Unterwerke.

Eine erwähnenswerte Ausnahme bezüglich fehlender Erdbebenbemessung bei Verteilnetzen stellen die Industriellen Werke Basel (IWB) dar, die schon seit einigen Jahren bei Neu- und Umbauten von den Apparate-Lieferanten Konformitätserklärungen bezüglich Erdbebensicherheit verlangen.

Gemäss den Vertretern der SBB in der Expertengruppe werden die Gebäude der Unterwerke der SBB gemäss den SIA-Normen auf Erdbeben ausgelegt, allerdings nur gemäss den Anforderungen für die BWK I (während, gemäss Tabelle 26 der

Norm SIA 261, eine um den Faktor 1.2 strengere Auslegung für die BWK II gefordert wäre). Die elektrischen Apparate wurden aber auch hier bisher kaum auf Erdbeben ausgelegt.

5. Normen und Richtlinien bezüglich Erdbebensicherheit

5.1 Normen und Richtlinien in der Schweiz

Die bereits erwähnten Tragwerksnormen des SIA (insbesondere [S1]), die Normen SIA 260 bis 267 aus dem Jahr 2003, enthalten Erdbebenbestimmungen und decken theoretisch die gesamte Problematik der Erdbebensicherheit von Bauten und Anlagen in der Schweiz ab – abgesehen von Kernanlagen und Talsperren, für die strengere gesetzliche Auflagen gelten. Die generellen, nicht materialspezifischen Erdbebenbestimmungen sind in der Norm SIA 261 enthalten. Die SIA-Tragwerksnormen entsprechen im wesentlichen den Eurocodes, sind aber deutlich knapper gehalten. Für Spezialfälle, die in den SIA-Normen nicht behandelt sind, ist deshalb auf die Eurocodes zurückzugreifen.

Die Tragwerksnormen des SIA sind in erster Linie auf Bauwerke wie Gebäude, Brücken und Tunnel ausgerichtet, enthalten aber auch gewisse Bestimmungen zu Anlagen und Installationen sowie nichttragenden Bauteilen. Diese sind aber für eine konkrete Anwendung und Überprüfung im Bereich der elektrischen Energieversorgung zu wenig spezifisch. Entsprechend werden sie kaum beachtet (vgl. Kapitel 4) und sind vielen Verantwortlichen der Elektrizitätsbranche wahrscheinlich nicht einmal bekannt.

Spezifische Schweizer Erdbebenbestimmungen für die Elektrizitätsbranche gibt es nicht. Zur Anwendung gelangen europäische Normen der CENELEC (Kapitel 5.2), die ihrerseits in der Regel IEC-Normen (Kapitel 5.3) übernehmen.

5.2 Normen auf europäischer Ebene

Das Europäische Komitee für Normung (CEN, Comité européen de normalisation) ist für die Tragwerksnormen auf europäischer Ebene verantwortlich. Die Vorschriften für erdbebensicheres Bauen sind im Eurocode 8 (EC 8) [E8] enthalten. Auch der EC 8 enthält, wie die Norm SIA 261, Bestimmungen zu Anlagen und Installationen. Aber auch diese sind für eine konkrete Anwendung und Überprüfung im Bereich der elektrischen Energieversorgung zu wenig spezifisch und vielen Verantwortlichen der Elektrizitätsbranche wahrscheinlich unbekannt.

Für die Standardisierung elektrischer Apparate im europäischen Raum ist das Europäische Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC) zuständig. Zur Zeit sind der CENELEC 30 europäische Länder angeschlossen. Die CENELEC übernimmt in der Regel die ansonsten relativ unverbindlichen IEC-Normen (Kapitel 5.3). Sucht man auf der Webseite der CENELEC nach Normen, wird man auf die nationalen Mitglieder, in der Schweiz auf electrosuisse, verwiesen.

Gibt man auf der Normenverkaufsseite von electrosuisse die Suchbegriffe "Erdbeben" oder "seismisch" ein, so werden insgesamt sieben in der Schweiz übernommene europäische Normen angezeigt. Es handelt sich dabei um die Erdbebenqualifikation von Hochspannungs-Leistungsschaltern [E4] sowie Hochspan-

nungs-Schaltgeräten und –Schaltanlagen [E6, E7], um seismische Prüfungen für Schränke und Gestelle [E5] von elektronischen Einrichtungen sowie um Schwing-, Schock-, Dauerschock- und Erdbebenprüfungen an Messrelais und Schutzeinrichtungen [E1, E2, E3].

Wie aus Kapitel 4.2 hervorgeht, werden die erdbebenspezifischen Normen der CENELEC, obwohl theoretisch von der Schweiz übernommen, in der Praxis bisher kaum beachtet. Der Grund hierzu liegt zweifellos bei einer mangelnden Sensibilisierung der Elektrobranche bezüglich seismischen Risikos.

5.3 IEC-Normen und weitere IEC-Publikationen

Die "International Electrotechnical Commission (IEC)" ist eine branchenspezifische, weltweit abgestützte Normenkommission, die eng mit der "International Organization for Standardization (ISO)" zusammenarbeitet. Die IEC hat zahlreiche technische Publikationen unterschiedlicher Bezeichnungen veröffentlicht. In erster Linie handelt es sich um Internationale Normen ("International Standards"), Technische Spezifikationen ("Technical Specifications") und Technische Berichte ("Technical Reports").

IEC-Normen sind nicht so verbindlich wie CENELEC-Normen (sofern sie mit denen nicht wortgleich sind). Im Zusammenhang mit einer Verordnung könnte aber als Stand der Technik durchaus auch auf eine IEC-Publikation zurückgegriffen werden, wenn nichts anderes vorhanden ist.

Verschiedene IEC-Publikationen ([E7], [I2], [I3]) definieren eine seismische Qualifikation von Hochspannungsapparaten. Dabei werden drei Qualifikationsstufen unterschieden: niedrig ("low"), mittel ("moderate") und hoch ("high"), "AF2", "AF3" bzw. "AF5" oder umgangssprachlich "0.2 g", "0.3 g" bzw. "0.5 g" genannt. Diese Stufen entsprechen maximalen Bodenbeschleunigungen von 2, 3 bzw. 5 m/s² (in den IEC-Publikationen "Zero Period Acceleration ZPA" genannt). Der zugehörige Frequenzgehalt der zu berücksichtigenden Erdbebeneinwirkung wird wie üblich anhand von Antwortspektren definiert (in den IEC-Publikationen "Required Response Spectra RRS" genannt). Als seismisch qualifiziert gilt ein Apparat, wenn er das der jeweiligen Qualifikationsstufe entsprechende RRS entweder rechnerisch oder experimentell übersteht, ohne dass seine Funktion wesentlich beeinträchtigt wird.

Achtung: Eine seismische Qualifizierung durch die Apparatehersteller erfolgt nur, falls eine solche vom Besteller ausdrücklich verlangt wird.

Bild 5.1 zeigt einen Vergleich der in der Norm SIA 261 definierten Antwortspektren für die Zone 2, BWK III, und die am weitesten verbreiteten Baugrundklassen C und E mit dem Antwortspektrum, das gemäss IEC für die Qualifikation der Stufe AF2 verwendet wird. Die gezeigten Spektren gelten für eine Dämpfung von 2 %, da dieser Wert in [I3] für rechnerische Nachweise von Leistungsschaltern vorgegeben wird. Der Vergleich zeigt, dass das Spektrum der Qualifikationsstufe AF2 gerade etwa die Spektren der Norm SIA 261 für die Zone 2 abdeckt. Dass das SIA-Spektrum für die Baugrundklasse E das IEC-Spektrum teilweise leicht überschreitet, kann in Anbetracht der ohnehin nur ungenau bekannten Gefährdung (d.h. SIA-Spektren) toleriert werden. Aus Bild 5.1 kann aber auch unmittelbar geschlossen werden, dass die Qualifikationsstufe AF2 für die Zone 3a (und natürlich auch 3b) nicht ausreicht; die Spektren für die Zone 3a wären um den Faktor 1.3 höher und damit vom IEC-Spektrum der Qualifikationsstufe AF2 nicht mehr abgedeckt.

Bild 5.2 zeigt einen analogen Vergleich für die Zone 3b und die IEC-Qualifikationsstufe "mittel", "AF3" oder "0.3 g". Zusätzlich zu den beiden Spektren der Norm SIA 261 für die Baugrundklassen C und E ist als Beispiel auch ein standortspezifisches Spektrum für Monthey, gültig im Bereich des Talrandes, dargestellt. Es zeigt sich, dass die Anforderungen der Norm SIA 261 in der Zone 3b von der Qualifikationsstufe AF3 nur knapp abgedeckt werden. Trotzdem darf davon ausgegangen werden, dass die Anforderungen der Norm SIA 261 für die Zonen 3a und 3b von der Qualifikationsstufe AF3 erfüllt werden.

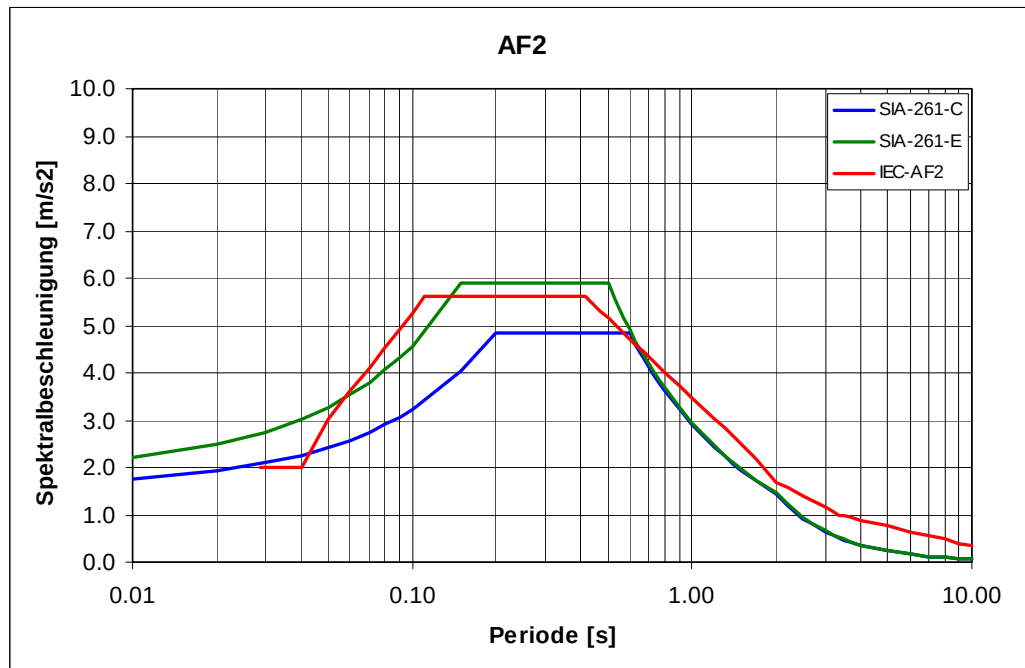


Bild 5.1: Vergleich der Antwortspektren gemäss Norm SIA 261 für die Zone 2, Baugrundklassen C und E (BWK III, Dämpfung 2 %), mit dem gemäss IEC zu berücksichtigenden Antwortspektrum für die Qualifikationsstufe AF2.

Beim standortspezifischen Spektrum von Monthey ergibt sich bei einer Periode von 1 s eine Überschreitung von über 50 %, was theoretisch nicht mehr tolerierbar ist. Höchstspannungs-Apparate weisen aber höhere Frequenzen (kürzere Perioden) auf, so dass dieses Überschreiten bei 1 s kaum von praktischer Bedeutung sein dürfte.

Die in den zitierten IEC-Publikationen definierten und in den Bildern 5.1 und 5.2 gezeigten Spektren für die seismische Qualifikation gelten a priori nur für Apparate, die sich steif auf dem Boden abstützen. Ist eine flexible Unterkonstruktion oder der Einsatz in einem Obergeschoss eines Gebäudes vorgesehen, ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass die Erdbebenbeschleunigungen, die auf den Apparat einwirken, stärker sein können als bei steifer Aufstellung auf dem Boden oder im Erdgeschoss eines Gebäudes. In solchen Fällen müsste unter Umständen eine höhere Qualifikationsstufe für den Apparat verlangt werden. Es ist in vielen Fällen aber auch möglich, vom Hersteller eine Qualifikation eines Apparates inklusive flexibler Unterkonstruktion zu erhalten.

GIS-Anlagen werden durch die Publikation [I5] abgedeckt.

Weitere IEC-Publikationen, welche Relais und Racks betreffen, sind: [I4],[E3], [E5].

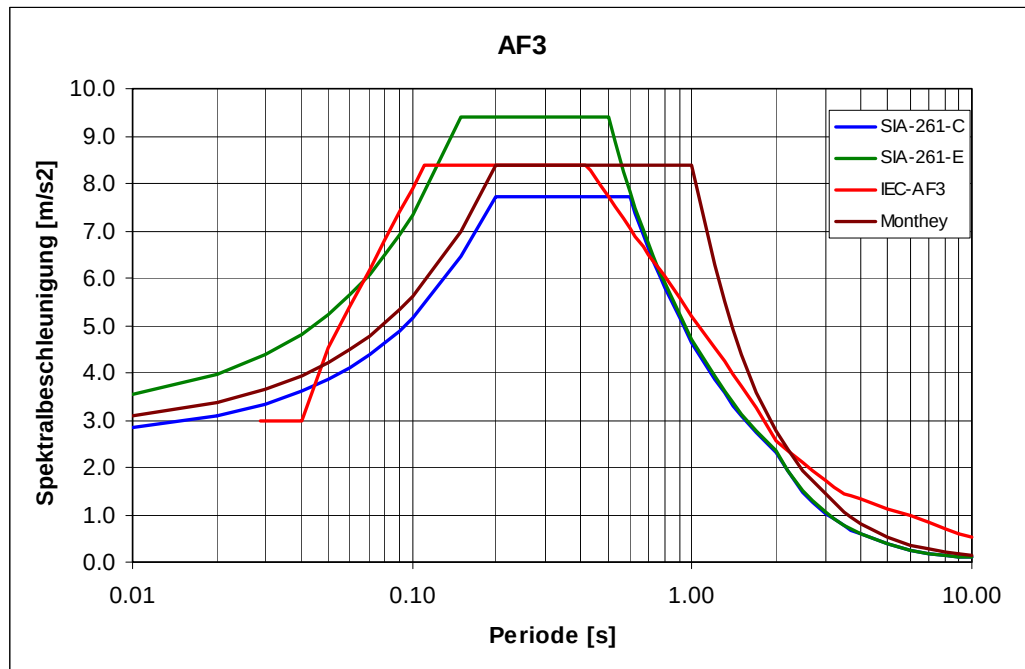


Bild 5.2: Vergleich der Antwortspektren gemäss Norm SIA 261 für die Zone 3b, Baugrundklassen C und E (BWK III, Dämpfung 2 %) und eines standortspezifischen Spektrums für Monthey mit dem gemäss IEC zu berücksichtigenden Antwortspektrum für die Qualifikationsstufe AF3.

5.4 USA-Spezifikationen (IEEE, ASCE)

Bezüglich Erdbebensicherheit der elektrischen Energieverteilung stehen in den USA die Normen ("Standards") und Empfehlungen des IEEE ("Institute of Electrical and Electronics Engineers") im Vordergrund. Es ist jedoch zu beachten, dass die Befolgung dieser Normen selbst in den USA freiwillig ("wholly voluntary") ist.

Die im hiesigen Zusammenhang wichtigste Norm ist der IEEE Std 693-2005 [U1], "Recommended Practice for Seismic Design of Substations". Diese Norm gleicht eher einem Lehrbuch und Leitfaden als einer Norm im üblichen Sinn; sie enthält ausführliche Erklärungen und zahlreiche, zweifellos wertvolle Hinweise für die Bemessung und Überprüfung von elektrischen Apparaten bezüglich Erdbebensicherheit.

Der IEEE Std 693-2005 definiert drei seismische Qualifikationsstufen – hoch ("high"), mittel ("moderate") und niedrig ("low") –, die sich jedoch in keiner Art und Weise mit denjenigen der IEC decken. Dabei wird darauf hingewiesen, dass Unterbauten von Apparaten die Erdbebenbeschleunigungen deutlich verstärken können und daher entweder das gesamte System getestet werden muss, oder aber diese Beschleunigungsverstärkungen bei der Wahl der notwendigen Qualifikationsstufe rechnerisch zu berücksichtigen sind.

Die Qualifikationsstufen "hoch" und "mittel" sind über Antwortspektren definiert, die wie bei den IEC-Normen "Required Response Spectra (RRS)" genannt werden. Diese RRS definieren Anregungsniveaus, welche die Apparate ohne Schäden und ohne jegliche Funktionseinbussen überstehen müssen. Die einzuhaltenden Bedingungen, z.B. maximale zulässige mechanische Spannungen, sind so definiert, dass die Apparate bei einer doppelt so starken Anregung ("performance level" genannt) noch immer keine oder nur geringe strukturelle Schäden erleiden und in der Mehrzahl funktionstüchtig bleiben würden. Dieses Qualifikationskonzept erlaubt, Apparate schadenfrei zu testen und somit die (erfolgreich) getesteten Apparate weiter verwenden zu können.

Für die Qualifikationsstufe "niedrig" sind nur wenige einfache Regeln zu beachten; es sind insbesondere eine minimale Verankerung sowie genügend Lose in den Leiterverbindungen sicherzustellen. Der IEEE Std 693-2005 beschreibt diese Stufe folgendermassen: "The low seismic level represents the performance that can be expected when good construction and seismic installation practices are used, but when no special consideration is given to the seismic performance of the equipment."

Die RRS für die Qualifikationsstufen "hoch" und "mittel" weisen maximale Bodenbeschleunigungen ("Zero Period Acceleration ZPA" genannt) von 0.25 g bzw. 0.5 g auf. Für die Qualifikationsstufe "niedrig" wird angenommen, dass Anregungen bis zu einer maximalen Bodenbeschleunigung von 0.05 g (0.1 g bzgl. "performance level") abgedeckt sind.

Das beschriebene zweistufige Konzept passt im Prinzip gut zu demjenigen der Norm SIA 261 für Bauwerke der BWK III. Die Norm SIA 261 verlangt einerseits, dass die Strukturen der BWK III das Bemessungsbeben ohne Einsturzgefahr überstehen müssen, und andererseits, dass die uneingeschränkte Gebrauchstauglichkeit für das halbe Bemessungsbeben garantiert werden muss. Es ist deshalb sinnvoll, die RRS nach IEEE mit den durch 2 dividierten (vorerst für die BWK III mit 1.4 multiplizierten) Antwortspektren der Norm SIA 261 zu vergleichen. Bild 5.3 zeigt einen solchen Vergleich zwischen dem RRS gemäss IEEE für die Qualifikationsstufe "mittel" und entsprechenden, für die Gebrauchstauglichkeit relevanten Antwortspektren der SIA 261 für die Zone 3b.

Hier sei noch auf ein Detail hingewiesen, das bei der Beurteilung, ob bei einem Transformator mit Abheben zu rechnen ist, von Bedeutung sein kann: Die IEEE-Spektren weisen für Frequenzen > 33 Hz keine Amplifikation bezüglich der maximalen Bodenbeschleunigung auf, während die Amplifikation bei den SIA-Spektren bei 33 Hz und 2 % Dämpfung bereits 1.2 beträgt.

Aus Bild 5.3 geht hervor, dass die IEEE-Qualifikationsstufen für die schweizerischen Verhältnisse schlecht abgestuft sind. Selbst für die Anforderungen in der Zone 3b schießt die Qualifikationsstufe "mittel" weit über das Ziel hinaus. Von der Qualifikationsstufe "niedrig" aber wird nur gerade die Zone 1 abgedeckt. Dies allerdings ist von praktischem Interesse, können doch die Empfehlungen des IEEE Std 693-2005 unmittelbar auf die Zone 1 angewendet werden.

Erwähnenswert ist, dass der IEEE Std 693-2005 auch Konfigurationen von Leiterverbindungen empfiehlt, die eine ausreichende Flexibilität sicherstellen und gleichzeitig erlauben sollten, die notwendigen Abstände zwischen den einzelnen Phasen oder zum Boden aufrecht zu erhalten. Weiter sind ausführliche, konservative Angaben zur quantitativen Ermittlung der notwendigen Lose in den Leiterverbindungen enthalten. Eine vertiefte Behandlung dieses Themas, mit differenzierteren Formeln

zur Bestimmung der Länge der Leiterverbindungen, lässt sich im IEEE Std 1527-2006 [U2] finden.

Der IEEE Std 693-2005 betont, dass steife Verankerungen notwendig sind, damit kein Spiel entsteht, da Spiel zu harten Anschlägen mit hohen mechanischen Spannungsspitzen und damit schliesslich zu Porzellanbruch führen kann. Der IEEE Std 693-2005 empfiehlt deshalb, die Verankerungen für alle Hochspannungsapparate als Schweissverbindungen zwischen der Basis des Apparates und einer fest im Fundament beton verankerten Stahlplatte auszubilden. Für die Auslegung und Bemessung der Fundationen wird auf den "ASCE Substation Structure Design Guide" [U3] verwiesen.

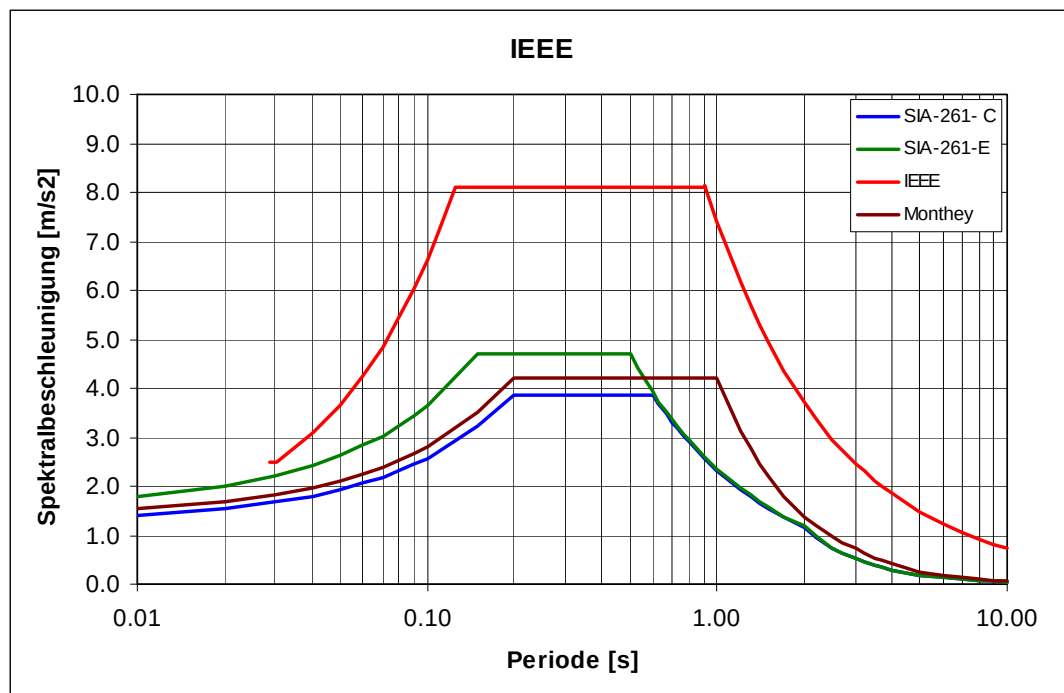


Bild 5.3: Vergleich des RRS gemäss IEEE für die Qualifikationsstufe "mittel" mit den entsprechenden (halben) SIA-Antwortspektren der Norm SIA 261 für die Zone 3b, Baugrundklassen C und E (BWK III, Dämpfung 2 %), inkl. eines standortspezifischen Spektrums für Monthey.

6. Verletzlichkeit von Unterwerken

Wie die Erfahrungen bei starken Erdbeben zeigen, hängt die Versorgungssicherheit der elektrischen Energieversorgung in erster Linie vom Erdbebenverhalten der Unterwerke ab. Im Vordergrund stehen dabei die höchsten Spannungsebenen (vgl. Kapitel 3). Das vorliegende Kapitel gibt deshalb nach einer kurzen Vorstellung der wichtigsten Elemente eines Unterwerks eine Übersicht über die Erkenntnisse, die zur Verletzlichkeit von Unterwerken gewonnen werden konnten.

6.1 Elemente eines Unterwerkes

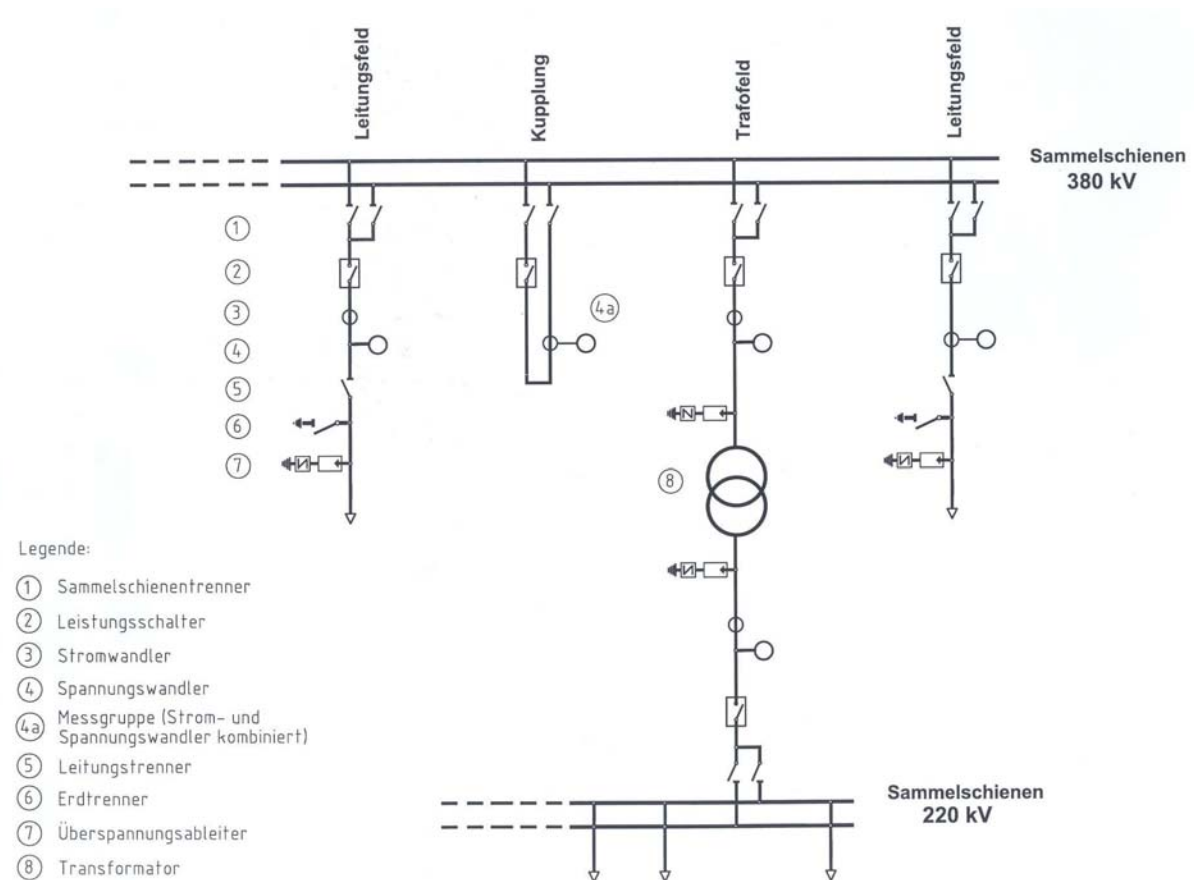


Bild 6.1: 1-poliges-Übersichtsschema eines Höchstspannungsunterwerkes.

Bild 6.1 zeigt ein Schema eines Höchstspannungsunterwerkes (UW). Im Zentrum steht ein Transformator, der die beiden Spannungsebenen 380 kV und 220 kV miteinander verknüpft. Einfachheit halber ist nur eine Phase gezeichnet; in Wirklichkeit sind selbstverständlich jeweils drei Phasen vorhanden.

Die im UW ankommenden Leitungen werden pro Spannungsebene über eine – hier je doppelt ausgebildete – Sammelschiene miteinander verbunden. Die Sammelschienen unterschiedlicher Spannungsebenen stehen ihrerseits über ein sogenanntes Transformatorenfeld miteinander in Verbindung. Zwischen den Leitungen und den Sammelschienen wie auch zwischen dem Transformator und den Sammelschienen werden für den Betrieb des UW mehrere Hochspannungsapparate benötigt, die im folgenden kurz vorgestellt werden.

Das Verwenden von je zwei parallelen Sammelschienen erlaubt, die eine oder andere für Unterhaltszwecke ohne Probleme ausser Betrieb nehmen zu können. Die beiden parallelen Sammelschienen können über das sogenannte Kupplungsfeld miteinander verbunden werden.

In Bild 6.2 sind Leistungsschalter mit Porzellanisolatoren zu sehen, die eine unter Spannung stehende Leitung selbst bei sehr hohem Stromfluss infolge Kurzschlusses zu unterbrechen vermögen. Die obenliegende Masse ist – obwohl deutlich geringer als bei älteren Modellen – verhältnismässig hoch, was bei Erdbeben infolge Träg-

heitskräften zu hohen Biegemomenten am Fuss des Stützisolators führen kann. Diese Apparate sind deshalb bezüglich Erdbeben potentiell relativ verletzlich.



Bild 6.2 Leistungsschalter mit Porzellanisolatoren für 380 kV.

Bild 6.3 zeigt Sammelschientrenner in Form von Scherentrennern. Der Sammelschientrenner ermöglicht ein sicheres und sichtbares Abkoppeln der Leitung von der Sammelschiene, sobald kein Strom mehr in der Leitung fließt. In der Regel ist auf beiden Seiten eines Leistungsschalters ein Trenner vorhanden (Bild 6.1), so dass der Leistungsschalter zu Unterhaltszwecken ausser Betrieb genommen werden kann.



Bild 6.3 220 kV-Scherentrenner (Pantographen) in offenem (vorne) und geschlossenem (hinten) Zustand.

Bild 6.4 zeigt Kombiwandler zur Messung von Strom und Spannung. Diese Apparate dienen der Verrechnung der durch das UW geflossenen Energie sowie den Schutz-einrichtungen.



Bild 6.4 Messgruppe für 380 kV (Strom- und Spannungswandler kombiniert).

In Bild 6.5 ist ein Drehtrenner mit Erder zu sehen. Dieser Apparat dient dazu, eine ausser Betrieb genommene Leitung vom UW zuverlässig abzukoppeln und zu erden, so dass Unterhaltsarbeiten an einer garantiert spannungsfreien Leitung vorgenommen werden können.

Bild 6.6 zeigt einen Überspannungsableiter für 220 kV. Dieser schützt die übrigen elektrischen Apparate gegen vorübergehende elektrische Überspannungen, die sich beispielsweise bei einem Blitzeinschlag ergeben.



Bild 6.5 380 kV-Drehtrenner mit Erder.



Bild 6.6 220 kV-Überspannungsableiter.

In Bild 6.7 ist ein 220 kV/150 kV-Transformator zu sehen, der wie die meisten Transformatoren in der Schweiz auf Rädern steht. Im Verhältnis zur Spurweite liegt der Massenschwerpunkt bei diesem Transformator relativ hoch, was bei einem starken Erdbeben ein zeitweiliges Abheben der Räder mit anschliessendem Aufprall zur Folge haben kann. Ein vollständiges Umkippen hingegen ist bei den in der Schweiz zu erwartenden Erdbeben unwahrscheinlich.



Bild 6.7 220 kV/150 kV-Transformator.

6.2 Schadensursachen bei Freiluftanlagen

Grundsätzlich lassen sich drei verschiedene Ursachen für Schäden an Höchstspannungsapparaten feststellen:

- Trägheitskräfte infolge der seismischen Bodenbeschleunigungen,
- Interaktionskräfte aufgrund von Relativverschiebungen von Apparaten, die über Leiter miteinander verbunden sind, die nicht genügend Lose aufweisen, um die Relativverschiebungen kompensieren zu können, ohne straff zu werden,
- Trägheitskräfte infolge von Stößen: Solche ergeben sich bei flexiblen Verankerungen oder solchen, die Spiel aufweisen; der Apparat wird beschleunigt und "fährt" hart in einen Anschlag, was Beschleunigungsspitzen hervorrufen kann, die deutlich höher sind als die seismischen Bodenbeschleunigungen als solche. Bei vorübergehendem Abheben von Transformatoren ergeben sich ebenfalls harte Stöße beim Wiederaufsetzen.

Alle diese Ursachen führen typischerweise zu Brüchen in Teilen aus Porzellan oder Aluminiumguss, während sich Kunststoffisolatoren in der Regel besser verhalten. Bei Transformatoren treten oft Ölverluste aus unterschiedlichen Gründen auf, beispielsweise infolge eines Auspressens einer Dichtung bei einer Durchführung (vgl. Bild 6.11). Bei der Schadenaufnahme nach einem Erdbeben ist jedoch oft nicht eindeutig klar, welche der genannten Ursachen für die Entstehung eines konkreten Schadens verantwortlich war.

Sowohl die Trägheitskräfte wie auch die Relativverschiebungen am Kopf der Apparate können deutlich zunehmen, wenn die Apparate auf (zu) flexiblen Unterbauten montiert sind. Die Eigenfrequenz des Systems Apparat-Unterbau nimmt mit zunehmender Flexibilität des Unterbaus ab und kann sich dadurch, zumindest bei relativ steifen Apparaten, in den Bereich grösster Amplifikationen (Plateaubereich) ver-

schieben. Bei abnehmender Frequenz nehmen auch die Verschiebungen am Kopf des Apparates zu, im Plateaubereich des Beschleunigungsspektrums sogar quadratisch mit der Frequenzabnahme. Flexible Unterbauten wirken sich deshalb in der Regel ungünstig aus.

Elastomerlager unter Transformatoren zur Körperschallisolation können sich im Erdbebenfall ähnlich ungünstig auswirken.

Das bereits in Kapitel 3.1 zitierte ASCE-Manual [1] misst der Problematik harter Stösse grosse Bedeutung zu. So wird insbesondere darauf hingewiesen, dass zwischen dem Widerstand und der Steifigkeit einer Verankerung unterschieden werden muss. Bei einer Verankerung mit Bolzen und, was aus Toleranzgründen üblich ist, länglichen Löchern in den zu verbindenden Teilen, können harte Stösse auftreten, auch wenn die Verankerung imgrunde genommen ausreichend widerstandsfähig wäre. Diese Problematik ist besonders bei Transformatoren von Bedeutung, da hier grosse Massen und damit grosse Kräfte im Spiel sind.

6.3 Erkenntnisse aus Herstellerangaben

Die aus Schweizer Sicht wichtigsten Hersteller elektrischer Apparate wurden im Rahmen einer kleinen Umfrage mit Fragen zur Erdbebenverletzlichkeit ihrer Freiluft-Apparate konfrontiert. Befragt wurden (in alphabetischer Reihenfolge) ABB, Alpha, Areva, Siemens und Trench (Nachfolger von Haefely und im Eigentum von Siemens). Die erhaltenen Antworten – sehr unterschiedlich in ihrer Vollständigkeit – bezogen sich in der Regel auf heute lieferbare Apparate; es blieb unklar, ob und inwiefern diese auch auf ältere Apparate zutreffen.

Die wichtigsten Aussagen, die sich aus der Umfrage ergaben, sind:

- Alle Standardausführungen von SF6-Leistungsschaltern der ABB erfüllen die Qualifikationsstufe AF3 nach IEC 62271-300 und "mittel" (0.25 g) gemäss IEEE 693.
- Die SF6-Leistungsschalter in Porzellan-Ausführung von Areva sind bis zur Qualifikationsstufe AF3 ohne Mehrpreis lieferbar.
- Die einfachunterbrechenden SF6-Schalter von Siemens wurden mit 0.5 g und die mehrfachunterbrechenden Schalter mit 0.3 g geprüft – offenbar in der Standardausführung. Eine Auslegung auf höhere Anforderungen ist möglich.
- Eine Überprüfung der Erdbebenfestigkeit der Transformatoren erfolgt bei Siemens nur, falls vom Kunden gefordert; dies ist aber für europäische Kunden kaum der Fall, zumal der rechnerische Nachweis sehr aufwendig ist und sich auf die Hauptteile (Kern, Wicklung, Durchführung) beschränken muss. Die Transformatoren sind im Hinblick auf den Transport – gemäss den Angaben des Vertreters von Siemens – wie folgt ausgelegt: in Längsrichtung auf 1.0 g, in Querrichtung auf 0.8 g und in vertikaler Richtung auf 1.5 g. Anmerkung: Diese Aussage erstaunt in Anbetracht der oft beobachteten Erdbebenschäden an Transformatoren (insbesondere Ölverluste). Es wäre zu überprüfen, ob die Transformatoren beim Transport eventuell besonders gesichert sind; grosse Transformatoren (220/380 kV) werden in der Regel ohne Öl transportiert, was die Massenträgheitskräfte vermindert.
- Sowohl Alpha wie Trench vertreten den Standpunkt, dass die Verantwortung für die Steifigkeit der Unterbauten beim Besteller liegt; rechnerische Erdbebennachweise für einzelne Apparate erfolgen üblicherweise für starren Untergrund.

- Aus einer detaillierten FE-Berechnung eines 550 kg schweren Schwenktrenners mit Porzellanisolator von Siemens, unter Berücksichtigung eines 2 bis 3 m hohen Unterbaus, ergibt sich eine Eigenfrequenz für horizontale Schwingungen von 6 Hz. Gerechnet wurde mit einer Porzellan-Bruchspannung bei Biegezug (deren Bestimmung ist nicht näher beschrieben) von 55 MPa und einer zugehörigen zulässigen Spannung von 27.5 MPa.
- Gemäss Angaben von ABB und Trench liegen die Eigenfrequenzen von Höchstspannungsapparaten typischerweise im Bereich von einigen Hertz.
- Die Mehrkosten für eine erdbebenresistente Ausführung (wahrscheinlich ist die Qualifikationsstufe AF5 gemeint) eines Pantographentrenners werden von Alpha mit 2 bis 3 % beziffert.
- Gemäss Auskunft von Areva sind GIS-Anlagen bis AF2-3 (0.25 bis 0.3 g) erdbebenresistent. Zur Einhaltung der Anforderungen AF5 ist mit einem Mehrpreis pro Schaltfeld mit Kabelabgang von 1 % zu rechnen; bei Feldern mit SF₆-Luftdurchführungen kann der Mehraufwand auch grösser ausfallen. Insbesondere sind Verstärkungen bei den Unterbauten notwendig.

Bezüglich GIS-Anlagen antwortete Areva auf die Frage nach der Erdbebenresistenz wie folgt: "Aus unseren bisherigen weltweiten Erfahrungen mit GIS-Anlagen, welche einem starken Erdbeben ausgesetzt waren, können wir generell schliessen, dass die GIS-Anlagen selber auch starken Beben ohne Schäden widerstehen können, wenn die Gerüste (und das Gebäude) entsprechend ausgelegt sind. Anlagen ohne Verstärkung erlitten teilweise Schäden an den Stützgerüsten, wurden ansonsten jedoch nicht beschädigt und konnten nach Reparatur wieder in Betrieb gehen."

6.4 Pilotuntersuchung für das UW Chamoson

Untersucht wurden – anhand einfacher Überschlagsrechnungen – die Transformatoren sowie je ein typischer Vertreter der Leistungsschalter, der Strom- und der Spannungswandler. Diese Berechnungen gestalteten sich insofern schwierig, als in den Archiven von EOS nur lückenhafte Angaben zu den mechanischen Eigenschaften der untersuchten Apparate gefunden werden konnten. Insbesondere blieb bei allen Apparaten der genaue "Einspannquerschnitt" unbekannt – es war jeweils nicht einmal klar, ob ein Porzellanquerschnitt oder ein Aluminiumussteil zur Aufnahme des Fussbiegemomentes ("base moment") aus Erdbeben massgebend wird. Die Resultate sind deshalb nur als Hinweise auf generelle Tendenzen zu verstehen.

Für die Berechnungen wurde aufgrund der Baugrundklassen-Karte des CREALP das Spektrum für die Baugrundklasse D verwendet.

Die Beurteilung des Verhaltens der Transformatoren (mit ihren Fundamenten) war nur mit grosser Unschärfe möglich, da deren Eigenfrequenzen nicht näher bekannt sind. Aber selbst unter günstigen Voraussetzungen (quasi starres Verhalten des Transformators als solchen; steifes, ausgedehntes Fundament, das kein namhaftes Rocking zulässt) würden alle grossen Transformatoren (380/220 kV, 220/150 kV, 220/16 kV) beim Auftreten eines Bemessungsbebens gemäss der Norm SIA 261 mit hoher Wahrscheinlichkeit abheben. Wie ausgeprägt dieses Abheben wäre, ob nur leicht oder ausgeprägt, ist ohne vertieftere Untersuchungen nicht zu beurteilen.

Für einen Leistungsschalter von Alstom (Typ HGF 115/2C FKF 2-6, Gesamtmasse 1400 kg, Spannungsebene 220 kV) wurden im Archiv von EOS technische Unterlagen

gefunden, die neben den Massen der einzelnen Elemente auch maximale horizontale Kräfte angeben, die an den Leiteranschlüssen wirken können, ohne den Stützisolator zu überlasten. Der zur Berechnung dieser Kräfte verwendete Sicherheitsfaktor geht leider nicht aus den Unterlagen hervor. Rechnet man die "statisch + dynamisch" maximal zulässige Kraft mit Hilfe der Massen der Löschkammern auf eine äquivalente Erdbebenbeschleunigung um – unter der optimistischen Annahme, die gleichzeitig vorhandene statische Kraft sei vernachlässigbar klein –, so ergeben sich etwa 30 % der Plateaubeschleunigung des Bemessungsbebens. Auch wenn der verwendete Sicherheitsfaktor für den Lastfall Erdbeben wohl etwas reduziert werden dürfte, das Verdikt bleibt klar: Das Bemessungsbeben gemäss SIA 261 würde mit hoher Wahrscheinlichkeit zum Bruch des Stützisolators und damit zum Totalschaden des Leistungsschalters führen. Einzig in der Zone 1 würde der Leistungsschalter das Bemessungsbeben wahrscheinlich ohne wesentliche Schäden überstehen.

Im weiteren wurde ein typischer Kopfstromwandler (grosse Masse oben) von damals Haefely (IOSK 300 G2, Gesamtmasse: 1260 kg, Spannungsebene 220 kV) untersucht. Allein aufgrund des in Chamoson wegen Überflutungsgefahr relativ hohen Unterbaus (2.6 m hoch) läge die Eigenfrequenz selbst bei starrem Stromwandler bei nur 2.6 Hz. Weist der Stromwandler seinerseits für starre Fusspunkt-Einspannung eine Eigenfrequenz von einigen Hertz auf, ergibt sich eine Eigenfrequenz des Gesamtsystems Wandler-Unterbau von wohl etwa 1.5 bis 2 Hz, also im Plateaubereich des Bemessungsspektrums der Baugrundklasse D (Plateau von 1.25 bis 5 Hz). Unter der Annahme einer effektiven Porzellanwandstärke des Stützisolators von 25 mm (aus den verfügbaren Unterlagen geht keine Wandstärke hervor) ergibt sich (unter Berücksichtigung eines Verhaltensfaktors von $q = 1.5$) eine maximale Biegezugsspannung von nur 19 MPa. Zulässige Biegezugsspannungen dürften aber bei Höchstspannungsapparaten deutlich über 20 MPa liegen (vgl. Kapitel 6.3: bei einer Siemens-Berechnung werden 27.5 MPa angenommen).

Da der untersuchte Stromwandler eher einen ungünstigen Fall darstellt (ausgesprochen kopflastig, relativ massereich, flexibler Unterbau, ungünstige Baugrundklasse D), darf gefolgert werden, dass die Trägheitskräfte, die einem Bemessungsbeben gemäss der Norm SIA 261 entsprechen, selbst in der Zone 3b in der Regel nicht zum Bruch des Porzellanisolators führen dürften. Dies heisst aber nicht, dass der Stromwandler das Erdbeben überstehen würde; das Problem liegt anderswo:

Geht man von einer Eigenfrequenz von 1.5 Hz aus, so ergibt sich mit einer Plateaubeschleunigung von 9.1 m/s^2 (für 2 % Dämpfung, BWK III) eine spektrale Verschiebung von 100 mm; dieser Wert gilt im Massenschwerpunkt. Die effektive Verschiebung zuoberst, bei den Leiteranschlüssen, dürfte etwa 130 mm betragen. Diese Verschiebung ergäbe bei der in Chamoson vorhandenen, relativ straffen Leiterverbindung zwischen dem Spannungswandler und benachbarten Kabelendverschluss (Bild 6.8 zeigt eine Leiterverbindungskonfiguration mit ähnlichen Apparaten) Interaktionskräfte, die zum Bruch des Isolators zumindest eines der beteiligten Apparate führen dürfte (tatsächlich müsste mit bis zu 200 mm Relativverschiebung zwischen den Apparaten gerechnet werden).



Bild 6.8: Straffe Leiterverbindungen zwischen Kabelendverschluss und Spannungswandler in Chamoson (220 kV).

Ein induktiver Spannungswandler (Masse unten) wurde ebenfalls überschlägig berechnet. Dieser ist insbesondere wegen des tiefer liegenden Massenschwerpunktes sowohl bezüglich Trägheitskräften wie auch in bezug auf die zu erwartenden Kopfverschiebungen deutlich weniger kritisch als der untersuchte Stromwandler. Trotzdem ist der Spannungswandler infolge Interaktion mit den Nachbarapparaten ebenfalls potentiell gefährdet.

6.5 Schlussfolgerungen bezüglich Verletzlichkeit

6.5.1 Transformatoren

Bei Transformatoren ist unklar, in welchem Frequenzbereich die niedrigsten Eigenfrequenzen des Transformators als Ganzes liegen. Der IEEE-Standard 693 geht davon aus, dass sich diese bei mindestens 33 Hz befinden.

Betrachtet man die Transformatoren in Chamoson als einigermaßen repräsentativ bezüglich ihrem Verhältnis zwischen der Höhe des Schwerpunktes und der Breite der Standfläche, lassen sich in der Zone 2 ein leichtes und in den Zonen 3a und 3b ein deutliches Abheben des Transformators nicht ausschliessen. Der nachfolgende Aufprall erzeugt hohe Beschleunigungsspitzen, die zu Schäden und zum Ausfall des Transformators führen können.

In der Zone 1 scheint Abheben nur bei äusserst ungünstigen Verhältnissen – starkem Rocking bei Einzelfundament auf relativ weichem Boden – auftreten zu können. Ob Abheben in der Zone 1 normalerweise tatsächlich kein Problem darstellt, müsste allerdings mit Hilfe einiger Eigenfrequenzmessungen an typischen Transformatoren überprüft werden; die hier angeführte vorläufige Einschätzung basiert auf der Annahme, dass die tiefsten Eigenfrequenzen bei Transformatoren wie im IEEE-Std 693 angenommen im Bereich von 30 Hz oder höher liegen. Es wurde aber keine Literaturstelle gefunden, die diese Annahme beispielsweise anhand von Messungen bestätigen würde.

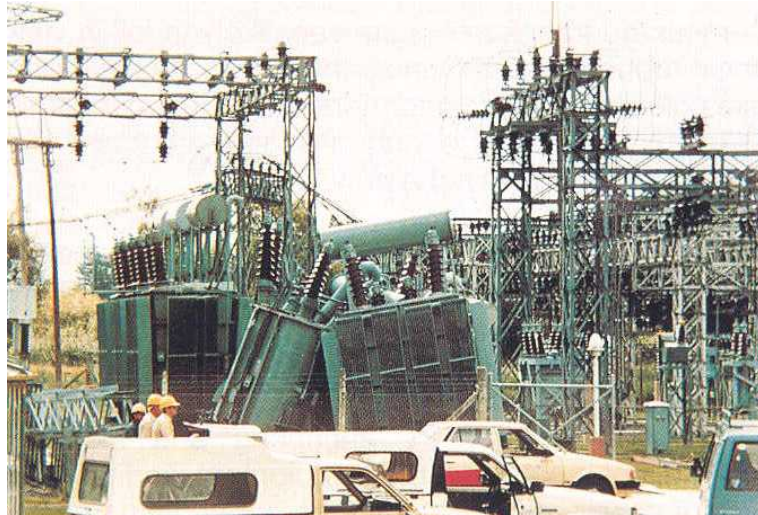


Bild 6.9: Ungenügend verankerte, abgekippte Transformatoren nach dem Erdbeben von Edgecumbe ($M = 6.3$), 1987, in Neuseeland. Foto: M.J. Pender, aus [7].



Bild 6.10: Versagen einer ungenügenden Verankerung eines 132 / 20 kV Transformators beim Erdbeben von Bam, Iran ($M_w = 6.5$), 2003. (Foto: TREC, aus [2]).

Die Problematik des Abhebens von Transformatoren hängt in erster Linie vom Verhältnis der Schwerpunktshöhe zur Breite der Standfläche ab und betrifft deshalb potentiell alle Hochspannungsebenen.

Durchführungen wurden mangels Angaben nicht untersucht, sind aber potentiell sehr verletzlich (vgl. Bild 6.11), da sie vor allem bei einem namhaften Rocking des Transformators deutlich erhöhte Verschiebungen ihrer Endpunkte erfahren, was hohe Ansprüche an das Ausmass vorhandener Lose in den Leiterverbindungen stellt. Diese Problematik nimmt mit abnehmender Spannung deutlich ab und beschränkt sich deshalb weitgehend auf die Höchstspannungsebenen.

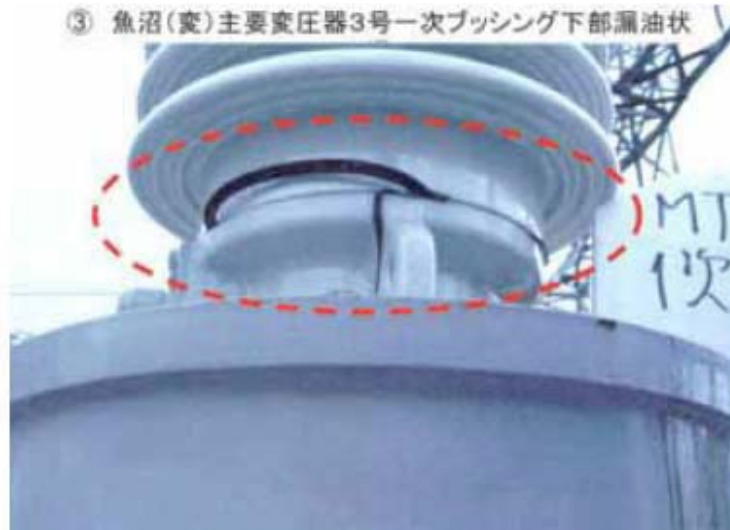


Bild 6.11: Typischer Schaden: Öl-Leck infolge eines ausgequetschten Dichtungsrings am Fuss einer Durchführung eines 154 kV-Transformators im UW Uonuma (Foto: JSCE, 2004, aus [3]); Niigata Ken Chuetsu Erdbeben ($M_w = 6.6$), Japan, 2004.

6.5.2 Leistungsschalter, Trenner, Strom- und Spannungswandler

Aus der Erfahrung bei Erdbeben (vgl. Kap. 3) kann geschlossen werden, dass bei den in der Schweiz zu betrachtenden Erdbebenstärken nur Apparate der Spannungsebenen 380 und 220 kV potentiell gefährdet sind.

Höchstspannungsapparate inklusive Unterbau weisen in der Regel Eigenfrequenzen auf, die im Plateaubereich der Erdbebenanregung liegen. Dies geht sowohl aus einer von Siemens zur Verfügung gestellten Berechnung eines Schwenktrenners als auch aus den generellen Angaben von ABB und Trench hervor. Die Resultate der überschlägigen Berechnungen für Apparate des Unterwerkes Chamoson untermauern diese Aussage.

Die potenziell verletzlichsten Apparate dürften die Leistungsschalter sein, da sie relativ grosse Massen in der Höhe aufweisen, gefolgt von den Kopfstromwandlern. Diese Einschätzung wird von den aus 48 Erdbeben zusammengetragenen statistischen Daten von Bastami [3] bestätigt.

Flexible Unterbauten wirken sich potentiell ungünstig aus, da sie den Verschiebungsbedarf der Leiteranschlusspunkte deutlich vergrössern und zudem die Eigenfrequenzen, die für gewisse Apparate allein unter Umständen etwas oberhalb des Plateaubereiches lägen, in den Plateaubereich verschieben.

Die Berechnungen für Chamoson lassen die Folgerung zu, dass die Trägheitskräfte bei Erdbeben in der Zone 1 selbst bei Leistungsschaltern mit flexiblen Unterbauten kaum ein Problem darstellen dürften. Dieser Befund deckt sich mit den Aussagen des IEEE Std 693-2005, der davon ausgeht, dass bis 0.1 g Standardausführungen von Apparaten ausreichen, solange diese geeignet verankert sind. Ein Problem könnte allenfalls bereits ab Zone 1 bei den Verschiebungen der Leiteranschlüsse bestehen, wenn die Leiterverbindungen nicht genügend Lose aufweisen.

Weiter haben die Berechnungen für Chamoson gezeigt, dass die Trägheitskräfte als solche bei Strom- und Spannungswandlern sowie Trennern selbst in der Zone 3b kaum Schäden bewirken dürften. Dies deckt sich mit den Aussagen von ABB und Siemens, wonach zumindest ihre heutigen Höchstspannungsapparate offenbar automatisch die Qualifikationsstufe AF3 erfüllen sollen, welche die Zone 3b gerade abdeckt. Interaktionskräfte wegen zu straffer Leiterverbindungen könnten jedoch trotzdem zu Schäden führen – die Anfälligkeit nimmt mit abnehmender Frequenz stark (weitgehend quadratisch!) zu.

Versteckte Defekte in Porzellanisolatoren, die bei einem Erdbeben zu einem Versagen führen können, lassen sich jedoch nie ausschliessen. In Romanel ist vor einigen Jahren eine nur fünf Jahre alte Durchführung sogar ohne erkennbare äussere Einwirkung explodiert. Aber solche vereinzelte Schäden infolge versteckter Defekte sollten bei vernünftiger Reservehaltung von Ersatzapparaten in wenigen Tagen behebbar sein.

Die hier angeführten Befunde betreffen Höchstspannungsapparate. Für niedrigere Spannungsebenen sind die Verletzlichkeiten wesentlich geringer.

6.5.3 Sekundärsysteme

Wie aus den Ausführungen in Kapitel 4.1 hervorgeht, ist – solange nicht das Gegenteil nachgewiesen worden ist – davon auszugehen, dass die Gebäude, in denen die Sekundärsysteme der Unterwerke (Steuerung, Schutz, Eigenbedarf und weitere Nebenanlagen) untergebracht sind, den heutigen Anforderungen an die Erdbebensicherheit nicht genügen (vgl. Bild 6.12).



Bild 6.12: Nicaragua, 1972 ($M = 6.2$): Gebäude mit Sekundärsystemen kurz vor dem Einsturz; ein ähnliches Schadenbild ist auch in der Schweiz möglich. Foto: K.V. Steinbrugge.

Doppelböden sind in der Regel nicht gesichert gegen Einsturz – reichen aber oft "zufällig" auf allen Seiten bis an Wände, die den Raum umgeben. In diesem Fall sind sie trotzdem indirekt gegen seitliches Abklappen geschützt.



Bild 6.13: Eine Mittelspannungsanlage auf Gerüst, umgeben von einem Doppelboden (links) ohne Verstrebung gegen horizontale Kräfte (rechts: Blick unter den Doppelboden); im Erdbebenfall droht ein Einsturz.

Notstrombatterien scheinen in den seltensten Fällen gegen Absturz und gegen ein Gegeneinanderschlagen gesichert zu sein. Auch Steuerschränke sind umsturzgefährdet, solange sie nicht geeignet verankert sind.



Bild 6.14: Hohe, schlanke Batterien für die ununterbrochene Stromversorgung des UW Chamoson: die ungesicherten Batterien stürzen schon bei einem relativ schwachen Beben ab, vgl. Bild 3.4.

Diese Befunde gelten unabhängig von den Spannungsebenen für alle Hochspannungsunterwerke.

6.5.4 Lagerung von Ersatzmaterial

Es ist davon auszugehen, dass Ersatzmaterial bisher nicht oder nur zufällig erdbebengerecht gelagert wird. Ohne geeignete Lagerung aber könnte dieses bei einem Erdbeben beschädigt werden und dann ausgerechnet im "Ernstfall" nicht mehr zur Verfügung stehen.

7. Leitfaden zur Überprüfung von Unterwerken

Ausgehend von den häufigsten Schäden bei Unterwerken wird empfohlen, folgende Komponenten qualitativ und, wo sinnvoll und soweit möglich, auch quantitativ zu überprüfen.

7.1 Transformatoren

Der erste Schritt besteht in einer Abschätzung der Eigenfrequenz f_0 des Rockings des Transformators auf/mit der Fundationsplatte, um die Erdbebenkräfte und die maximalen spektralen Verschiebungen abschätzen zu können. Achtung: Die Überschätzung der Steifigkeit liegt bezüglich Verschiebungen auf der unsicheren Seite!

- Verankerung
 - Ist eine Verankerung vorhanden, die vertikale Zugkräfte wie auch horizontale Kräfte in die Foundation abtragen kann? Falls nein: Ist ein Absturz bzw. ein Davonrollen des Transformators möglich?
 - Sind Widerstand *und* Steifigkeit der Verankerung ausreichend? Sind ungünstige Hebelwirkungen ("prying actions") möglich, so dass trotz Verankerung ein teilweises Abheben zu befürchten ist?
 - Weist die Verankerung Spiel auf, das zu Stößen Anlass geben könnte?
 - Fundationsplatte (Stärke, Bewehrung) ausreichend, um Ankerkräfte übernehmen zu können?
- Leiterverbindungen
 - Ist ein Rocking des Transformators auf/mit der Fundationsplatte möglich (max. Verschiebung der Spitze der Durchführungen)?
 - Sind differentielle Setzungen gegenüber der Umgebung möglich (Transformatorfundation auf Pfählen, umgebende Apparate flach fundiert)?
 - Ist genügend Lose in den Leiter-Verbindungen zu benachbarten Apparaten vorhanden?
- Elemente des Transformators
 - Wie gross sind die Beanspruchungen an der Basis der Durchführungen?
 - Konstruktionsart der Durchführungen, insbesondere Sitz des Porzellan-Isolators auf der Unterlage: Ist ein Ausquetschen der Dichtung zu befürchten?
 - Ist die Tragstruktur des Ausgleichsgefässes ("conservator") ausreichend?
 - Ist die Tragstruktur der Kühlungsrohre ("radiator") ausreichend?

7.2 Leistungsschalter, Trenner, Strom- und Spannungswandler

Der erste Schritt besteht in einer Abschätzung der Grundeigenfrequenz f_0 , die sich aus dem Rocking des Apparates inklusive Stützkonstruktion und Fundament einerseits und der horizontalen Nachgiebigkeit der Stützkonstruktion andererseits ergibt. Eine nachgiebige Stützkonstruktion kann eine ungünstige Verschiebung von f_0 in den Plateaubereich des Spektrums bewirken!

- Verankerung
 - Sind Widerstand und Steifigkeit der Verankerung der Stützkonstruktion ausreichend? Sind ungünstige Hebelwirkungen ("prying actions") möglich und ist damit ein teilweises Abheben mit entsprechenden Stößen zu befürchten?
 - Weist die Verankerung Spiel auf, das zu Stößen Anlass geben könnte?
 - Ist die Fundationsplatte (Stärke, Bewehrung) ausreichend, um Ankerkräfte übernehmen zu können?

- Leiterverbindungen
 - Rocking des Apparats auf/mit der Fundationsplatte: Wie gross ist die maximale Verschiebung (Spektralverschiebung) der obersten Leiterverbindungen?
 - Sind differentielle Setzungen gegenüber der Umgebung möglich (Apparat auf Pfählen, umgebende Apparate flach fundiert)?
 - Ist genügend Lose in den Leiter-Verbindungen zu benachbarten Apparaten vorhanden?
- Elemente des Apparates
 - Wie gross sind die Beanspruchungen an der Basis der Elemente aus Porzellan oder Aluminiumguss?
 - Konstruktionsart, insbesondere Sitz des Stützisolators auf der Unterlage: Ist ein Ausquetschen der Dichtung zu befürchten?
 - Ist der Widerstand der Stützkonstruktion ausreichend?

7.3 Sekundärsysteme

- Ist das Gebäude erdbebensicher?
- Batterieracks
 - Sind die Batterien gegen Absturz gesichert?
 - Ist ein Gegeneinanderschlagen der Batteriegehäuse möglich?
- Sind die Schaltschränke gegen Umkippen gesichert?
- Sind Doppelböden in Räumen, die Schaltschränke oder Batterien beherbergen, gegen Einsturz gesichert (Tragstruktur verstrebt oder allseitig an massiven Wänden abgestützt)?
- Sind weitere Elemente zu überprüfen (z.B. Transformatorenkühlung bei unterirdischen Anlagen)?

8. Empfehlungen zur Erdbebensicherung von Unterwerken

Im folgenden werden Empfehlungen zur Erdbebensicherung von Unterwerken abgegeben. Diese sind abgestuft in Abhängigkeit :

- der Spannungsebene,
- der Erdbebenzone, inklusive Berücksichtigung der Baugrundklasse,
- davon, ob ohnehin Erneuerungen notwendig sind (z.B. Ersatz älterer Apparate) oder nicht.

Bei den aufgeführten Empfehlungen wird jeweils explizit erwähnt, für welche Spannungsebenen und welche Erdbebenzonen diese gelten. Bei Neubauten sollten diese Empfehlungen auf alle Fälle befolgt werden. Ob diese auch umgesetzt werden sollten, wenn ansonsten keine Erneuerungen anstehen, lässt sich aufgrund von Überlegungen zur Verhältnismässigkeit der Kosten im Vergleich zur Risikominderung entscheiden. Vereinfacht ausgedrückt: Alle Ertüchtigungsmassnahmen, die nur "geringe" Investitionen erfordern, sollten zügig verwirklicht werden.

Die Risikominderung kann prinzipiell als statistischer Erwartungswert der Verminderung des Gesamtschadens, bestehend aus unmittelbaren Erdbebenschäden und Folgekosten infolge eines Versorgungsunterbruches, abgeschätzt werden. Dabei

besteht jedoch die Problematik, dass die volkswirtschaftlichen Folgekosten eines Ausfalls um ein Vielfaches grösser sind als die rein betriebswirtschaftlichen Folgekosten für das Elektrizitätswerk. Aus übergeordneter Sicht ist selbstverständlich die Verhältnismässigkeit einer Erdbebenertüchtigung im Verhältnis zu den volkswirtschaftlichen Gesamtkosten zu beurteilen, unter Umständen sogar unter Berücksichtigung eines Aversionsfaktors (aus psychologischen Gründen stärkere Gewichtung als rein monetär). Es bleibt eine offene Frage, wie die verschiedenen Elektrizitätswerke dies beurteilen werden.

8.1 Massnahmen bei Transformatoren

Es ist abzuklären, inwiefern es möglich ist, von Herstellern von Transformatoren Erdbebentauglichkeitszertifikate zu erhalten. Bei neuen Transformatoren wäre für die Zonen 3a und 3b ein Zertifikat für "AF3-Tauglichkeit" und für die Zonen 2 und 1 ein solches für "AF2-Tauglichkeit" zu verlangen (vgl. Kapitel 5.3). Dies allein aber reicht zur Erdbebensicherung der Transformatoren bei weitem noch nicht aus.

Die primären Schwachpunkte bei Transformatoren liegen einerseits bei einem möglichen Abheben mit anschliessendem hartem Aufprall und andererseits bei den – infolge von Kippschwingungen des Transformators – potentiell grossen Verschiebungen der Endpunkte der Durchführungen, gekoppelt mit Leiterverbindungen, die nicht genügend Lose aufweisen.

Die Gefahr des Abhebens hängt in erster Linie von der "Schlankheit" des Transformators ab, d.h. vom Verhältnis der Schwerpunktshöhe zur Spurbreite des Aufstands. Dieses Verhältnis ist bei Transformatoren für Spannungen > 50 kV weitgehend unabhängig von der Spannungsebene, weshalb die folgenden Empfehlungen bezüglich Verankerung a priori für alle diese Transformatoren gelten; Transformatoren für geringere Spannungen hingegen sind in der Regel weniger schlank und brauchen deshalb nicht auf Zugkräfte verankert zu werden.

Die Problematik zu straffer Leiterverbindungen betrifft in der Regel nur die höchsten Spannungsebenen (380 und 220 kV).

In den Zonen 3a und 3b sollten alle Transformatoren > 50 kV mit Hilfe steifer Verankerungen gegen Abheben gesichert werden. Die normalerweise vorhandenen Bremsschuhe, welche die Räder einzig gegen Wegrollen sichern, reichen nicht aus. Die ASCE empfiehlt deshalb in [1] mit Nachdruck, Transformatoren direkt an Stahlplatten zu schweissen (vgl. Bild 8.1), die ihrerseits im Beton des Fundaments verankert sind. Solche geschweissten Verankerungen scheinen in Japan und in seismischen Gebieten der USA heutzutage eine Selbstverständlichkeit darzustellen. Auf die Nachteile von Verankerungen mit Bolzen oder von solchen mit zu grosser Nachgiebigkeit wird in Kapitel 6.2 des vorliegenden Berichts hingewiesen.

Bei der nachträglichen Verankerung von Transformatoren ist mit dem Hersteller Rücksprache zu nehmen, um sicherzustellen, dass die Verankerungspunkte transformatorseitig in der Lage sind, die Verankerungskräfte aufzunehmen. Als mögliche Verankerungspunkte kommen in der Regel am ehesten Transportösen in Frage.

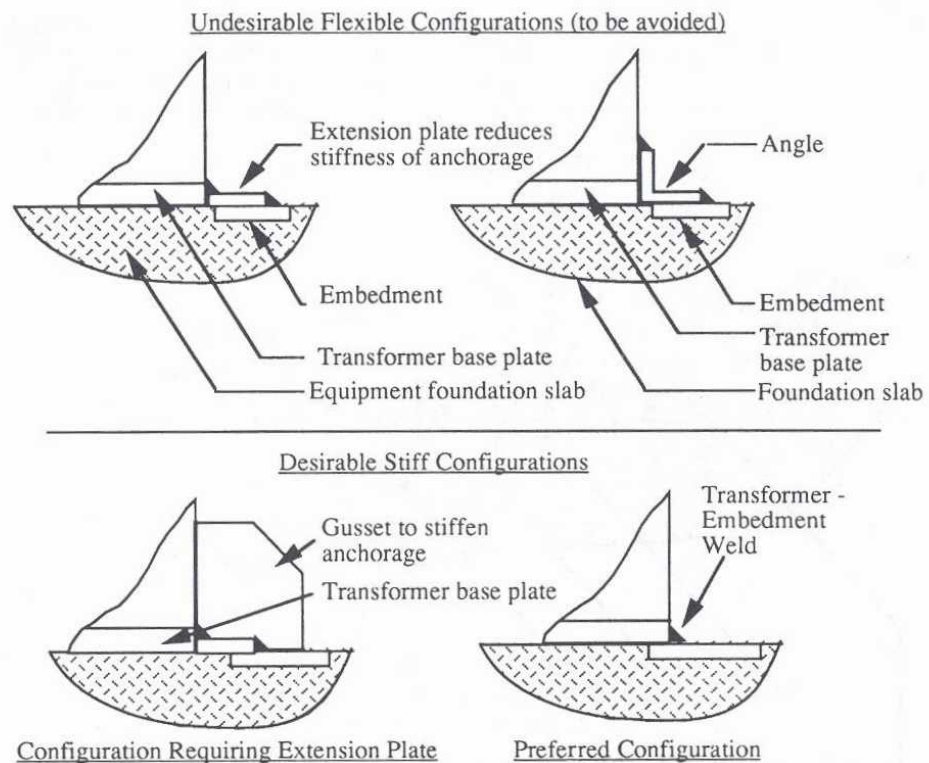


Bild 8.1: Transformatorverankerung: ungünstige, da zu nachgiebige Ausführungen (oben) und empfohlene, steife Ausführungen (unten); die Verankerung der Stahlplatte im Fundament ist nicht gezeichnet (aus [1]).

Inwiefern die Empfehlungen zur Ausführung einer Abhebesicherung auch für die Zone 2 und unter Umständen sogar für die Zone 1 gelten, muss noch genauer abgeklärt werden. Ein wichtiger Parameter in Bezug auf die Gefahr eines Abhebens ist die tiefste Eigenfrequenz von Kippschwingungen des Transformators. Da dieser Parameter nur ungenügend bekannt ist (vgl. Kapitel 6.5.1), wird empfohlen, diese Frequenzen für einige typische Transformatoren und gängige Fundationskonfigurationen zu messen.

Auf der Höchstspannungsebene sind die potentiellen Folgen eines Transformatorschadens am grössten und Ersatztransformatoren am schwierigsten zu beschaffen, weshalb den höchsten Spannungsebenen (380 und 220 kV) die oberste Priorität zukommt. Zu beachten ist aber, dass die Wahrscheinlichkeit, dass mehrere Unterwerke von einem Erdbeben gleichzeitig betroffen werden, im niederen Spannungsbereichen sehr hoch ist, so dass mehrere Unterwerke aufs Mal ausfallen könnten. Das nachträgliche Anbringen von Abhebesicherungen drängt sich deshalb auch hier auf, ganz besonders in den Zonen 3a und 3b.

Bei den Höchstspannungstransformatoren sollte in allen Erdbebenzonen überprüft werden, ob die Leiterverbindungen zwischen den Durchführungen und benachbarten Apparaten genügend Lose aufweisen (vgl. Kapitel 8.2). Notwendigenfalls wären die Leiterverbindungen leicht zu modifizieren.

8.2 Massnahmen bei Höchstspannungsapparaten

Das vorliegende Kapitel gilt nur für Höchstspannung. Apparate in Unterwerken niedrigerer Spannungsebenen überstehen Erdbeben mit hoher Wahrscheinlichkeit ohne wesentliche Schäden; eine Ausnahme könnten allenfalls kopflastige 150 kV-Leistungsschalter älterer Bauart darstellen.

Aus der Analyse der Verletzlichkeit der Höchstspannungsapparate (vgl. Kapitel 6.2, 6.3 und 6.4) kann geschlossen werden, dass in der Schweiz – ausser bei den Leistungsschaltern – bei bestehenden Höchstspannungsapparaten nur wenige Schäden unmittelbar infolge der beim Erdbeben auftretenden Trägheitskräfte zu erwarten sind. Beim Auftreten eines Bemessungsbebens dürften aber ab Zone 2 zahlreiche Leistungsschalter beschädigt werden. Die wahrscheinlichste Versagensart ist der Bruch am Fusspunkt des Stützisolators.

Bei neuen Höchstspannungsapparaten wird empfohlen, vom Hersteller für die Zonen 3a und 3b ein Zertifikat für "AF3-Tauglichkeit" und für die Zonen 2 und 1 ein solches für "AF2-Tauglichkeit" zu verlangen (vgl. Kapitel 5.3). Aber Achtung: Diese Zertifikate gelten in der Regel nur bei steifer Aufstellung. Werden die Apparate auf flexiblen Unterbauten montiert, ist deren Einfluss unter Rücksprache mit dem Lieferanten abzuklären; unter Umständen wird in diesen Fällen eine um eine Stufe höhere Erdbebenqualifikation der Apparate notwendig (AF5 statt AF3, AF3 statt AF2 in der Zone 2). Zusätzlich sind die Unterbauten ausreichend zu bemessen und die Verankerungen nicht nur genügend widerstandsfähig, sondern auch möglichst steif und ohne Spiel auszuführen.

Eine zertifizierte Erdbebentauglichkeit allein garantiert noch kein befriedigendes Erdbebenverhalten. Es ist auch sicherzustellen, dass die Leiterverbindungen zwischen den Apparaten genügend Löss aufweisen. Selbstverständlich ist gleichzeitig darauf zu achten, dass die elektrisch erforderlichen Mindestabstände zwischen den einzelnen Phasen oder gegenüber Erde eingehalten werden, und dass bei Kurzschluss auftretende Kräfte nicht zu Schäden an den Apparaten führen können.

Die US-Norm IEEE Std 693-2005 [U1], Kapitel 5.9, empfiehlt die in Bild 8.2 wiedergegebenen Leiterkonfigurationen. Es ist normalerweise von Vorteil, einen vertikalen Versatz zwischen benachbarten Anschlusspunkten vorzusehen, da dies eine flexible Verbindung erlaubt, ohne minimale elektrische Abstände in Frage zu stellen.

Das Ausmass an notwendiger Löss bei der Erneuerung bestehender oder beim Bau neuer Anlagen kann ebenfalls mit Hilfe der US-Norm IEEE Std 693-2005 [U1], Kapitel 5.9, bestimmt werden. Die minimal notwendige Leiterlänge L_0 zwischen zwei miteinander verbundenen Apparaten beträgt:

$$L_0 = L_1 + 1.5 u_{\max} + L_2. \quad (2)$$

Hierin bedeuten

- L_0 die minimale notwendige Leiterlänge,
- L_1 die kürzeste Distanz zwischen den Anschlusspunkten,
- L_2 eine Zusatzlänge, abhängig von der Leiterkonfiguration (siehe unten),
- $u_{\max}$ die maximale Relativverschiebung der Anschlusspunkte während des Erdbebens.

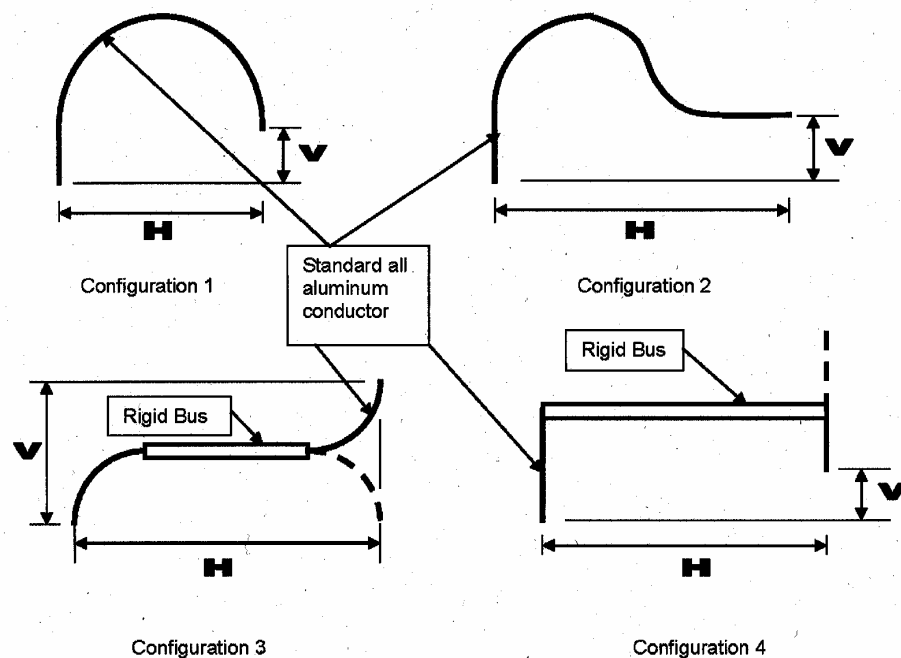


Bild 8.2: Empfohlene Leiterkonfigurationen, um elektrischen wie auch seismischen Auflagen gerecht zu werden (aus [U1]).

Die Zusatzlänge L_2 hängt von der Leiterkonfiguration und von der – in der Regel nicht vernachlässigbaren – Biegesteifigkeit des Leiters ab; sie soll sicherstellen, dass die Anschlusspunkte keine unnötigen Biegemomente aufnehmen müssen. Die Länge L_2 lässt sich mit Hilfe von Versuchen oder Berechnungen bestimmen.

Die maximale Relativverschiebung $u_{\max}$ kann als Summe der Einzelverschiebungen der Anschlusspunkte der Apparate (von [U1] vorgezogene konservative Variante) oder mit Hilfe anerkannter Überlagerungsformeln (siehe unten) aus den Einzelverschiebungen bestimmt werden. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass die bei seismischen Berechnungen in der Regel vernachlässigte Boden-Bauwerks-Interaktion zu einer Unterschätzung der Verschiebungen führt, also auf der unsicheren Seite liegt. Es ist deshalb durchaus sinnvoll, bei der Erneuerung bestehender oder beim Bau neuer Anlagen $u_{\max}$ vorsichtig als Summe der rechnerischen Einzelverschiebungen zu ermitteln.

Die Beurteilung bestehender Leiterverbindungen hingegen kann mit der weniger konservativen Formel gemäss US-Norm IEEE Std 1527-2006 [U2], Kapitel 4.4, erfolgen:

$$L_0 = L_1 + 1.25 u_{\max} + L_2. \quad (3)$$

Hierbei empfiehlt die erwähnte Norm, für $u_{\max}$ die Wurzel aus der Summe der Quadrate der Einzelverschiebungen anzusetzen, also die sogenannte SRSS-Regel ("Square Root of the Sum of Squares") zu verwenden. Von der noch etwas weniger konservativen CQC-Formel ("Complete Quadratic Combination") hingegen wird abgeraten, da deren Resultate empfindlich von der genauen Kenntnis der Eigenfrequenzen und Dämpfungen der einzelnen Apparate abhängen und diese Parameter in der Regel nur ungenau bekannt sind.

Wieweit Interaktionskräfte zwischen verschiedenen Apparaten infolge ungenügender Lose in den Leiterverbindungen sowie mangelhafte Verankerungen bei bestehenden Höchstspannungsapparaten ein Problem darstellen, wurde bisher noch nicht quantitativ erfasst. Das Beispiel von Bild 6.8 lässt aber vermuten, dass zumindest ab Zone 2 vielerorts Probleme bestehen dürften.

Es wäre wirtschaftlich unrealistisch zu fordern, bestehende, erdbebenuntaugliche Leistungsschalter früher als aus Alterungsgründen auszuwechseln. Es wird aber empfohlen, für einige wenige Unterwerke eine Pilotuntersuchung in die Wege zu leiten, bei denen insbesondere die vorhandene Lose in den Leiterverbindungen und die Qualität der Verankerungen überprüft werden, um quantitativ besser abschätzen zu können, wie bedeutend die Probleme in der Schweiz tatsächlich sind.

Im weiteren sollten Überlegungen bezüglich einer sinnvollen Reservehaltung von Ersatzapparaten, insbesondere von Leistungsschaltern, angestellt werden.

8.3 Massnahmen bei Sekundärsystemen

Die hier vorgeschlagenen Massnahmen gelten für Unterwerke aller Spannungsebenen und für alle Erdbebenzonen.

Neubauten, die wichtige Sekundärsysteme enthalten werden, sollten nach den einschlägigen SIA-Normen, insbesondere der Norm SIA 261, für die Anforderungen an die Bauwerksklasse III auf Erdbeben bemessen werden.

Bei bestehenden Gebäuden ist a priori davon auszugehen, dass diese die Anforderungen der heutigen SIA-Normen nicht erfüllen. Es wird empfohlen, eine eigentliche Inventarisierungskampagne aller Gebäude, die wichtige Sekundärsysteme enthalten, in die Wege zu leiten. In einem ersten Schritt können diese Gebäude gemäss dem BAFU-Verfahren, Stufe 2, auf ihre Erdbebensicherheit hin untersucht werden. Dies bedeutet bei einfachen Gebäuden, sofern Ingenieurpläne vorhanden sind, einen Aufwand von bis zu 4 Tagen, bei komplexeren Gebäuden einige Tage mehr. Stehen keine Pläne zur Verfügung, ist mit zusätzlichem Aufwand für Planaufnahmen und Sondierungen zu rechnen.

Doppelböden, die nicht auf allen Seiten lückenlos bis an massive (!) Wände reichen, sind zur Aufnahme von Horizontalkräften zu verstreben. Dies sollte auch bei bestehenden Doppelböden mit vertretbarem Aufwand möglich sein.

Notstrombatterien sind unbedingt gegen Umkippen oder Abstürzen zu sichern. Zusätzlich ist mit Hilfe dünner Elastomereinlagen sicherzustellen, dass die relativ zerbrechlichen Gehäuse nicht hart gegeneinanderschlagen können. Auch Steuerungsschränke sind so zu verankern, dass sie nicht umkippen können, was in der Regel über einfache Befestigungen, vorzugsweise an der Decke, möglich ist. Diese Massnahmen sind auch bei bestehenden Einrichtungen mit einfachsten Mitteln möglich.

Weiter ist abzuklären, ob noch andere Sekundärsysteme gegen Erdbeben zu sichern sind. Bei unterirdischen Unterwerken wären beispielsweise auch die Kühlung der Transformatoren sowie die Löschanlage zu überprüfen und notwendigenfalls für Erdbeben zu ertüchtigen.

Die erwähnten Massnahmen sind auch dann sinnvoll, wenn das Gebäude selbst die vollen Normenanforderungen an die Erdbebensicherheit nicht erfüllt. Erstens verhalten sich Gebäude oft besser als rechnerisch zu erwarten wäre, und zweitens können auch Erdbeben auftreten, die schwächer sind als das Bemessungsbeben gemäss der Norm SIA 261, und die damit das Gebäude nicht zum Einsturz bringen, die aber beispielsweise bereits zum Absturz ungesicherter Batterien führen könnten.

9. Weiteres Vorgehen

Die hier vorgelegte Studie hat noch nicht alle offenen Fragen bezüglich des Erdbebenverhaltens der elektrischen Energieverteilung auf Hochspannungsebene beantworten können. Die vorherrschenden Probleme sind zwar qualitativ erkannt, deren quantitatives Ausmass ist aber in vielen Fällen noch unklar. Bei der Problematik zu geringer Lose in den Leiterverbindungen zum Beispiel bleibt unklar, welches Ausmass dieses Problem in der Schweiz hat. Es wird deshalb empfohlen, anhand weniger Pilotstudien

- konkretere Erkenntnisse zum Ausmass der Probleme zu gewinnen,
- die Machbarkeit wie auch die Kosten möglicher Ertüchtigungsmassnahmen anhand konkreter Vorschläge abzuschätzen.

Zu beachten ist, dass die empfohlenen Pilotstudien nur bei aktiver Mitarbeit seitens der betroffenen Elektrizitätswerke und allenfalls Lieferanten von Apparaten und Transformatoren möglich sind. Die Mitarbeiter, die die Studie begleiten, müssen von ihrer Hierarchie ein entsprechendes Stundenbudget zur Verfügung gestellt bekommen. Es ist ansonsten praktisch unmöglich, vom oft überlasteten Personal zu verlangen, die notwendige Begleitung zu gewährleisten.

9.1 Pilotstudien Unterwerke

9.1.1 Transformatoren

Die Transformatoren sind gewissermassen das Herz von Unterwerken und verdienen deshalb besondere Aufmerksamkeit. Wie heikel das Problem ihres Abhebens ist, hängt entscheidend von den tiefsten Eigenfrequenzen möglicher Kippschwingungen ab (Kippschwingung auf starrem Fundament oder Kippschwingung inklusive Fundament im Sinne einer Boden-Bauwerks-Interaktion).

Bezüglich Transformatoren wird folgendes weitere Vorgehen empfohlen:

- Messung der Kippeigenfrequenzen von drei bis fünf repräsentativen Transformatoren (nur bei Ausserbetriebnahme oder bei Reservetransformatoren möglich),
- Ausarbeitung eines Vorprojektes zur Verankerung eines bestehenden Transformators gegenüber Kippen, mit konkreten konstruktiven Vorschlägen und Kostenschätzung (sinnvollerweise für einen Transformator in der Zone 3a oder 3b).

Das Ziel ist, konkrete Empfehlungen für die Verankerung neuer und vorhandener Transformatoren auszuarbeiten (welche Transformatoren wie verankern?).

9.1.2 Erdbebensicherung bei Höchstspannungsapparaten

Als weiteres Vorgehen wird empfohlen, im Sinne von Pilotstudien je ein Unterwerk in der Zone 1 und in der Zone 3a oder 3b auf folgende Punkte hin zu untersuchen:

- Überprüfung der Verankerungen repräsentativer Beispiele der verschiedenen Apparate,
- Abschätzung der notwendigen Lose in den Leiterverbindungen zwischen den einzelnen Apparaten.

Bei der Pilotstudie für die Zone 1 geht es darum abzuklären, ob die vorhandenen Verankerungen und Leiterverbindungen allenfalls ohne besondere Massnahmen ausreichen beziehungsweise ob eine Beschränkung auf wenige Massnahmen möglich ist.

In der Zone 3a oder 3b sind wahrscheinlich zahlreiche Ertüchtigungsmassnahmen bei Verankerungen und Leiterverbindungen notwendig. Für einen repräsentativen Teil des zu untersuchenden Unterwerkes ist das Ausmass dieser Ertüchtigungsmassnahmen zu erfassen. Anschliessend sind konkrete Lösungen zu erarbeiten und deren Kosten abzuschätzen.

Die Frage der Reservehaltung insbesondere der verletzlichsten Apparate ist ebenfalls zu diskutieren.

Das übergeordnete Ziel besteht darin, konkrete Empfehlungen dafür auszuarbeiten, was bei bestehenden Unterwerken ohne gleichzeitige Erneuerungen vernünftigerweise ertüchtigt werden sollte und was bei Erneuerungen zu beachten ist.

Im weiteren wäre abzuklären, inwieweit konkrete Vorschläge für die notwendige Lose in Form generischer Tabellen, im Sinne einer konkreten Bemessungshilfe, erarbeitet werden können.

9.1.3 Erdbebensicherung der Sekundärsysteme

Als weiteres Vorgehen wird empfohlen, die grössten Mängel im Steuerungsbereich konkret zu beheben, insbesondere

- die Notstrombatterien gegen Um- und Abstürzen zu sichern und das Gegeneinanderschlagen der Gehäuse durch Elastomereinlagen zu verhindern,
- Steuerschränke gegen Umkippen zu sichern,
- Doppelböden, wo notwendig, gegen Einsturz zu verstreben.

Das Ziel ist, konkrete Erfahrungen mit diesen Sicherungsarbeiten, die für alle Erdbebenzonen und Spannungsstufen notwendig sind, zu gewinnen.

Im weiteren sind die Gebäude, welche wichtige Sekundärsysteme beherbergen, für die Unterwerke der Pilotstudien gemäss dem BWG-Verfahren, Stufe 2, grob auf die Erdbebensicherheit hin zu überprüfen.

9.2 Pilotstudie für eine Übertragungsleitung

Es wird empfohlen, eine Pilotstudie für eine Übertragungsleitung durchzuführen, vorzugsweise in der Zone 3b. Hierbei ist die Leitung mit einem ortskundigen Geotechniker virtuell abzuschreiten und dabei zu überprüfen, ob es Masten gibt, deren Fundation bei Erdbeben gefährdet sein könnten. Mögliche Gefährdungen sind

- Hanginstabilitäten: Erdbeben lösen Rutschungen in erster Linie in Hängen aus, die schon ohne Erdbeben potentielle Rutschhänge sind.

- Bodenverflüssigung: In der Schweiz nur an wenigen Orten wahrscheinlich, da die Dauer der zu erwartenden Erschütterungen infolge eher bescheidener Magnituden tendenziell zu gering ist, um eine vollständige Bodenverflüssigung zu bewirken.

Das Ziel ist, eine verbesserte Abschätzung der Verletzlichkeit der Übertragungsleitungen in der Schweiz zu erhalten. Da zu erwarten ist, dass nur wenige ernsthafte Schwachstellen bestehen, ein einziger mitgerissener Mast aber eine ganze Leitung ausser Betrieb setzen kann, ist es durchaus denkbar, dass sich die wenigen möglichen Schwachstellen mit verhältnismässigem Aufwand beheben liessen.

9.3 Administrative Vorschläge

In Zusammenarbeit mit dem ESTI sind konkrete Vorschläge auszuarbeiten, was bei Erneuerungen vernünftigerweise zur Erdbebensicherung im Sinne der "Good Practice" verlangt werden kann oder soll.

10. Quellen

10.1 Normen und Richtlinien bezüglich Erdbebensicherheit

Die aufgeführten Normen und Richtlinien enthalten entweder Bestimmungen zur Erdbebensicherheit oder sind ausschliesslich diesem Thema gewidmet.

10.1.1 Schweizer Normen

- [S1] SIA 261 (2003): Einwirkungen auf Tragwerke, Schweizer Norm SN 505 261, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- [S2] SIA 2018 (2004): Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben, Merkblatt, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.

10.1.2 Europäische Normen

- [E1] (SN)EN 60255-21-1:1995 [IEC 60255-21-1:1988]: Elektrische Relais. Teil 21: Schwing-, Schock-, Dauerschock- und Erdbebenprüfungen an Messrelais und Schutzeinrichtungen. Hauptabschnitt 1: Schwingprüfungen (sinusförmig).
- [E2] (SN)EN 60255-21-2:1995 [IEC 60255-21-2:1988]: Elektrische Relais. Teil 21: Schwing-, Schock-, Dauerschock- und Erdbebenprüfungen an Messrelais und Schutzeinrichtungen. Hauptabschnitt 2: Schock- und Dauerschockprüfungen.
- [E3] (SN)EN 60255-21-3:1995 [IEC 60255-21-3:1993]: Elektrische Relais. Teil 21: Schwing-, Schock-, Dauerschock- und Erdbebenprüfungen an Messrelais und Schutzeinrichtungen. Hauptabschnitt 3: Erdbebenprüfungen.
- [E4] (SN)EN 61166:1993 [IEC 61166:1993]: Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter - Leitfaden für die Erdbeben-Qualifikation von Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschaltern. *Anmerkung: Die zugrunde liegende IEC-Norm wurde 2006 zurückgezogen; eine neue Norm, IEC 62271-300, ist in Bearbeitung.*
- [E5] (SN)EN 61587-2:2001 [IEC 61587-2:2000]: Mechanische Bauweisen für elektronische Einrichtungen - Prüfungen für IEC 60917 und IEC 60297. Teil 2: Seismische Prüfungen für Schränke und Gestelle.

- [E6] (SN)EN 62271-2:2003 [IEC 62271-2:2003], ersetzt durch EN 62271-207:2007: Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen. Teil 2: Erdbebenqualifikation für Bemessungsspannungen von 72,5 kV und darüber.
- [E7] (SN)EN 62271-207:2007 [IEC 62271-207:2007]: Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen - Teil 207: Erdbebenqualifikation für gasisolierte Schaltgerätekombinationen mit Bemessungsspannungen über 52 kV.
- [E8] Euocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, CEN, Brüssel.

10.1.3 IEC-Normen und weitere IEC-Publikationen

Hier werden nur diejenigen zusätzlichen IEC-Publikationen aufgeführt, die nicht als CENELEC-Normen übernommen und nicht schon als solche unter Punkt 10.1.2 zitiert worden sind.

- [I1] IEC 60721-2-6, ed. 1.0 (1990): Classification of environmental conditions. Part 2: Environmental conditions appearing in nature. Earthquake vibration and shock, IEC.
- [I2] IEC TS 61463 (2000): Technical Specification, Bushings – Seismic qualification, IEC.
- [I3] IEC TR 62271-300 (2006): Technical Report, High-voltage switchgear and controlgear – Part 300: Seismic qualification of alternating current circuit-breakers, IEC.
- [I4] IEC 68-3-3 (1991): International Standard, Environmental testing, Part 3: Guidance, Seismic test methods for equipments, IEC.
- [I5] IEC 62271-207 (2007): International Standard, Seismic qualification for gas-insulated switchgear assemblies for rated voltages above 52 kV, IEC.

10.1.4 US-Standards und Richtlinien (IEEE, ASCE)

- [U1] IEEE Std 693-2005: IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations, recognized as an American National Standard, IEEE Power Engineering Society, New York.
- [U2] IEEE Std 1527-2006: IEEE Recommended Practice for the Design of Flexible Buswork Located in Seismically Active Areas, IEEE Power Engineering Society, New York.
- [U3] ASCE (2008), Substation Structure Design Guide.

10.2 Weitere Literaturquellen

- [1] ASCE (1999), "Guide to Improved Earthquake Performance of Electric Power Systems", ed. A.J. Schiff, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice n° 96, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- [2] Bastami, M. (2007), "Seismic Reliability of Power Supply System Based on Probabilistic Approach", PhD thesis, Kobe University, Japan. Nicht publiziert, da vertrauliche Daten enthaltend; konnte aber eingesehen werden.
- [3] Bastami, M. (2008), "Seismic Assessment of Medium and High Voltage Power Substation Equipments", Proceedings 14th WCEE, Beijing, China.
- [4] Khalvati A.H. & M. Hosseini (2008), "Seismic Performance of Electrical Substations' Equipments in Iran's Recent Earthquakes", Proceedings 14th WCEE, Beijing, China.

- [5] Studer Engineering (2001), "Verhalten von Gas-, Wasser-, Elektrizität- und Fernwärme-Infrastruktur bei Erdbeben der letzten zehn Jahre", Vertraulicher Bericht für die IWB, Basel.
- [6] Labbé, P., J.P. Touret & P. Sollogoub (2000), "Effets du séisme sur les équipements. Le retour d'expérience", AFPS, Cahier Technique n° 18, Paris.
- [7] Tiedemann, H. (1992), "Earthquakes and Volcanic Eruptions", SwissRe, Zürich.

10.3 Bilder-Nachweise

Die Quellen der Bilder sind in den meisten Fällen in den Legenden aufgeführt, mit folgenden Ausnahmen:

- Die Bilder 3.1, 3.2, 3.3 und 6.12 stammen vom "National Information Service for Earthquake Engineering" (NISEE), University of Berkeley, Kalifornien, USA.
- Die Bilder 6.1 bis 6.6 wurden von Herrn A. Guérig, NOK, zur Verfügung gestellt, was herzlich verdankt sei.

Da Bastamis Dissertation [2] nicht öffentlich zugänglich ist, wurden die Bilder 3.4, 3.5 und 6.10 aus [2] von M. Bastami persönlich zur Verfügung gestellt, was hier gebührend verdankt sei. Bilder ohne Quellenangabe stammen vom Autor oder vom Auftraggeber.