Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Starkstrominspektorat ESTI
Bundesamt für Verkehr BAV

ESTI Nr. 248
Version 0415 d

Richtlinie

Erdbebensicherheit der elektrischen Energieverteilung in der Schweiz



Gültig ab: 01.10.2012
Aktualisiert: 01.04.2015

Impressum

Herausgeber :	Eidgenössisches Starkstrominspektorat ESTI, 8320 Fehraltorf Bundesamt für Verkehr, 3003 Bern
Autor :	Martin Koller (Résonance Ingénieurs-Conseils SA)
Co-Autor :	Sven Heunert (Bundesamt für Umwelt BAFU)
unter Mitwirkung von:	Axpo, BAV, ESTI, ewz, IWB und SBB
Dokumentname :	ESTI_248_0415_d (veröffentlicht als .pdf-Datei)
Download unter :	www.esti.admin.ch Dokumentation – ESTI-Publikationen www.bav.admin.ch Grundlagen – Richtlinien
Sprachfassungen :	Deutsch (Original) Französisch Italienisch

Diese Richtlinie ist am 1. Oktober 2012 in Kraft getreten und wurde per 1. Dezember 2014 revidiert unter Einbezug des 16,7 Hz-Netzes im Eisenbahnbereich.

Eidgenössisches Starkstrominspektorat	Bundesamt für Verkehr Abteilung Sicherheit
Dario Marty, Geschäftsführer	Pieter Zeilstra, Vizedirektor

Ausgaben / Änderungsgeschichte

Version	Datum	Ersteller	Änderungshinweis
V 1.0	01.10.2012	Urs Huber	
V 1.1	15.04.2013	Urs Huber	redaktionell
V 2.1	01.04.2015	Sven Heunert	Einbezug Eisenbahnbereich

Inhaltsverzeichnis

Vorwort **4**

1. Einleitung **5**

1.1 Zielsetzung 5
1.2 Geltungsbereich 5
1.3 Plangenehmigungsverfahren 6

2. Begriffe **7**

3. Erdbebeneinwirkung **9**

3.1 Erdbebenzonen 9
3.2 Baugrundklassen 9
3.3 Bauwerksklassen 10
3.4 Verhaltensbeiwert q 11

4. Bestimmungen für die Erdbebensicherheit der Anlagentechnik **11**

4.1 Erdbebensicherheit von Transformatoren 13
4.2 Erdbebensicherheit von Hochspannungsapparaten 15
4.3 Anlagen der Energieversorgung in Schrankbauweise 16
4.4 Erdbebengerechte Leiterverbindungen 17
4.5 Erdbebensicherheit von Sekundärsystemen und anderen Einbauten 21

5. Bestimmungen für die Erdbebensicherheit von Gebäuden **22**

6. Bestimmungen für die Erdbebensicherheit von Leitungen **22**

6.1 Freileitungen 22
6.2 Kabelleitungen 23

7. Empfehlungen für «wichtige» bestehende Unterwerke **23**

8. Quellen **24**

Anhang A: Erdbebenzonen gemäss SIA 261 ..... **25**

Anhang B: Verankerung von Transformatoren **26**

Anhang C: Ergänzende Ausführungen zum Losebedarf **29**

Anhang D: Rechenblatt zur Erdbebenberechnung **30**

Anhang E: Beispiele zur Sicherung von Sekundärsystemen **37**

Anhang F: Nutzungsvereinbarung **39**

Vorwort

Erfahrungen aus dem Ausland zeigen, dass bei grösseren Erdbeben praktisch immer mit lokalen und oft sogar regionalen Stromausfällen zu rechnen ist, die mehrere Stunden bis einige Tage dauern.

Die mit Abstand grössten Schäden an der Infrastruktur der elektrischen Energieverteilung werden bei Unterwerken in Freiluftbauweise beobachtet, während Unterwerke in gekapselter SF_6-Technik in der Regel unkritisch sind. Auch Freileitungen überstehen Erdbeben meistens gut. Je höher die Spannungsebene, desto verletzbarer sind die Unterwerke in Freiluftbauweise. Typische Erdbebenschäden sind gebrochene Porzellanelemente und Schäden an Transformatoren infolge fehlender oder zu schwacher Verankerungen. Porzellanelemente brechen oft als Folge ungünstiger Interaktionen, wenn Leiterverbindungen zwischen benachbarten Apparaten keine ausreichende «Lose» aufweisen. Aber auch harte Stösse infolge von Spiel in deren Verankerungen können zu Schäden führen. Oft werden auch Probleme bei Sekundärsystemen beobachtet, wie etwa abgestürzte Notstrombatterien oder umgestürzte Steuerschränke.

In der Schweiz wären im Falle eines stärkeren Erdbebens ähnliche Schäden zu erwarten. Im Jahr 2004 hat deshalb eine Expertengruppe dem Bundesrat einen Bericht zur Erdbebenvorsorge unterbreitet, in dem die elektrische Energieversorgung als einer der prioritären Sektoren mit Handlungsbedarf genannt wurde.

In den Jahren 2008 bis 2010 wurde von der Koordinationsstelle für Erdbebenvorsorge des Bundesamts für Umwelt eine Studie zur Erdbebenverletzbarkeit der elektrischen Energieverteilung in der Schweiz in Auftrag gegeben [1, 2]. Diese Studie wurde von einer Pilotgruppe mit Experten auf dem Gebiet der elektrischen Energieverteilung begleitet. Die vorliegende Richtlinie stützt sich auf die Erkenntnisse dieser Studie ab.

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 Tragwerksnormen SIA 260 bis 267, und insbesondere um die Norm SIA 261 [3]. Bei Umbauten ist die Erdbebensicherheit zu überprüfen und notwendigenfalls zu verbessern, sofern dies mit vertretbaren Investitionen möglich ist.

Im Bereich der elektrischen Energieversorgung im höheren Spannungsbereich fehlten bisher die nötigen konkreten Grundlagen, die den zuständigen Aufsichtsbehörden (ESTI bzw. BAV) erlaubt hätten, die erwähnte Regelung durchzusetzen. Die Tragwerksnormen SIA 260 bis 267 enthalten zwar gewisse Angaben zu nichttragenden Bauteilen und Installationen. Diese sind aber für eine konkrete Anwendung im Bereich der elektrischen Energieversorgung zu wenig spezifisch. Die vorliegende ESTI-Richtlinie soll diese Lücke schliessen; sie lehnt sich an die erwähnten Tragwerksnormen des SIA, an einschlägige internationale Normen der Elektrizitätsbranche sowie an die ASCE-Publikation [4] an.

1. Einleitung

1.1 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Richtlinie ist, mit möglichst geringem Aufwand das Risiko eines ausgedehnten und langfristigen Blackouts bei einem starken Erdbeben nachhaltig zu verringern sowie die direkten Schäden an den Infrastrukturelementen tief zu halten. Hierzu ist die Erdbebenverletzbarkeit der elektrischen Energieverteilung bei jeder sich bietenden Gelegenheit Schritt für Schritt zu vermindern.

Wichtiger als detaillierte Berechnungen ist die Umsetzung von effizienten, kostengünstigen konstruktiven Massnahmen, die die Robustheit des Systems massgebend erhöhen.

1.2 Geltungsbereich

Die vorliegende Richtlinie gilt für Bauten und Anlagen der Energieverteilung, in der Regel aber nicht für Kraftwerke. Elektrische Energieerzeugungsanlagen, die Gegenstand von anderen Richtlinien und Vorschriften in Bezug auf Erdbebensicherheit sind, fallen somit nicht unter die vorliegende Richtlinie. Im Eisenbahnbereich gilt die Richtlinie für die Bahnstromverteilungsanlagen gemäss Anhang 4, Buchstabe b der Eisenbahnverordnung (EBV).

Die Bestimmungen dieser Richtlinie sind überall in der Schweiz, in allen Erdbebenzonen, anzuwenden; sie gelten für Neuanlagen sowie bei der Erneuerung bestehender Anlagen. Der Ersatz eines Hochspannungsapparates, unter Beibehaltung des Fundamentes, gilt als Erneuerung einer bestehenden Anlage. Der Ersatz eines Transformators durch einen neuwertigen Transformator, unter Beibehaltung des Fundamentes, gilt ebenfalls als Erneuerung einer bestehenden Anlage.

Die Bestimmungen sind teilweise für alle Hochspannungsebenen, teilweise nur für Spannungen von 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) oder höher einzuhalten; Tabelle 1 gibt eine Übersicht über den Geltungsbereich der Bestimmungen. Da Apparate und Leiterverbindungen der Spannungsebenen unter 220 kV (50 Hz) bzw. unter 132 kV (16,7 Hz) Erdbeben in der Regel gut überstehen, auch wenn sie beim Bau nicht auf Erdbeben ausgelegt worden sind, kann für Apparate der Spannungsebenen unter 220 kV (50 Hz) bzw. unter 132 kV (16,7 Hz) auf besondere Erdbebenvorschriften verzichtet werden.

Wo die Bestimmungen dieser Richtlinie beim 50 Hz-Netz nur für Spannungen von 220 kV oder höher anzuwenden sind, gelten diese beim 16,7 Hz-Netz bereits ab einer Spannung von 132 kV. Hierzu gibt es zwei Gründe: Erstens ist das 16,7 Hz-Netz weniger redundant als das 50 Hz-Netz, und zweitens sind Hochspannungsapparate für 16,7 Hz – bei gleicher Spannung – in der Regel massereicher und grösser und damit tendenziell verletzbarer als entsprechende Apparate für 50 Hz.

Die Bestimmungen für Transformatoren gelten für alle Transformatoren der Energieverteilung. Maschinen- oder Blocktransformatoren von Erzeugungsanlagen fallen nicht unter den Geltungsbereich dieser Richtlinie, soweit sie nicht besonders wichtigen Notversorgungen dienen, welche im Erdbebenfall erhalten bleiben müssen (wie etwa die Notstromversorgung von Spitälern, Landesflughäfen etc.).

Bei Freileitungen enthält die Richtlinie nur für die wichtigsten besondere Vorschriften, da Freileitungen Erdbeben ebenfalls mehrheitlich gut überstehen.

Abweichungen von der vorliegenden Richtlinie sind zulässig, falls durch Theorie (z.B. vertiefte Berechnungsmethoden) oder Versuche nachvollziehbar dargelegt werden kann, dass ein äquivalentes Sicherheitsniveau bezüglich Erdbeben erreicht wird. Solche Abweichungen sind zu begründen und ausreichend zu dokumentieren.

Kapitel 7 enthält Empfehlungen für wichtige bestehende Anlagen. Die Berücksichtigung dieser Empfehlungen ist freiwillig.

Tabelle 1: Bauten und Anlagen im Geltungsbereich der vorliegenden Richtlinie.

Erdbebensicherheit von	**Spannungsebenen**
Transformatoren	Alle Spannungsebenen [1) 2)]
Elektrische Apparate	Spannungen von 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) oder höher [1)]
Anlagen der Energieverteilung in Schrankbauweise	Alle Spannungsebenen
Leiterverbindungen (Lose)	Spannungen von 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) oder höher
Sekundärsysteme und andere Einbauten	Alle Spannungsebenen
Gebäude der Anlagen- und Sekundärtechnik	Alle Spannungsebenen
Freileitungen	Spannungen von 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) oder höher
Kabelleitungen	Alle Spannungsebenen

[1)] Abhängigkeit von der Erdbebenzone beachten (siehe dazu Tab. 5 und Tab. 7)
[2)] Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad beachten (siehe dazu Tab. 5)

1.3 Plangenehmigungsverfahren

Im Rahmen des Plangenehmigungsverfahrens, vor Baubeginn, ist der Aufsichtsbehörde (ESTI oder BAV) vom Gesuchsteller schriftlich zu bestätigen, dass die Bestimmungen der vorliegenden Richtlinie, vorbehältlich zulässiger Abweichungen, vollständig eingehalten werden. Für neue Gebäude von Unterwerken ist zusätzlich die Nutzungsvereinbarung gemäss der Norm SIA 260 (Paragraf 2.2) einzureichen. Der Anhang F zeigt, welche Aspekte für die Erdbebensicherheit relevant sind und in der Nutzungsvereinbarung zu definieren sind.

Für Unterwerke, deren höchste Spannung 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) oder mehr beträgt, sind immer die Rechenblätter (siehe Anhang D) sowie die Verankerungsskizzen der Transformatoren einzureichen. Zudem sind in den Erdbebenzone Z2, Z3a oder Z3b die Pläne und die Nachweise für die Verankerung der Transformatoren sowie die Zertifikate vor Baubeginn nachzureichen. Weitere Unterlagen können von der Aufsichtsbehörde von Fall zu Fall für eine Kontrolle angefordert werden.

2. Begriffe

Anlagen der Energieverteilung in Schrankbauweise: Diese Anlagen umfassen Hochspannungsanlagen in schrankähnlichen Kapselungen sowie Schaltschränke mit Niederspannungsanlagen (Versorgung und Eigenbedarf). Diese energietechnisch eher willkürlich anmutende Gruppierung macht im Zusammenhang mit der Sicherung gegen die Auswirkung von Erdbeben Sinn, welche in erster Linie das Umstürzen solcher Anlagen bei Erdbeben vermeiden will.

Antwortspektrum: Antwort (z.B. Beschleunigungsantwort, «Spektralbeschleunigung» genannt, oder Verschiebungsantwort, «Spektralverschiebung» genannt) eines Einmassenschwingers auf eine dynamische Anregung in Funktion seiner Eigenperiode und Dämpfung. Die Erdbebeneinwirkung wird in modernen Baunormen in der Regel in Form geglätteter Antwortspektren definiert. Diese weisen einen sogenannten Plateaubereich auf, in welchem die Spektralbeschleunigung unabhängig von der Eigenperiode ist, typischerweise irgendwo zwischen 0,1 s und 1 s (je nach Baugrundklasse etwas unterschiedlich).

Baugrundklasse: Die Bodenbewegungen bei einem Erdbeben hängen stark vom lokalen Untergrund ab. Die Norm SIA 261 berücksichtigt dies näherungsweise, wie die meisten Erdbebennormen, indem sie verschiedene Baugrundklassen unterscheidet, für die sie unterschiedliche Antwortspektren definiert.

Bauwerksklasse: Die Bauwerke werden von der Norm SIA 261 in Bezug auf Erdbeben in drei Bauwerksklassen (BWK) unterteilt. Die BWK I entspricht «gewöhnlichen» Bauwerken, die BWK II wichtigen Bauwerken, z.B. solchen mit bedeutender Infrastrukturfunktion, und die BWK III besonders wichtigen Bauwerken, z.B. solchen mit lebenswichtiger Infrastrukturfunktion, auch «Lifeline»-Bauwerke genannt.

Eigenfrequenz: Frequenz, mit der eine Struktur frei schwingt, nachdem sie z.B. über einen Stoss zu Schwingungen angeregt worden ist. Kontinuierliche Strukturen weisen theoretisch unendlich viele Eigenfrequenzen auf; oft wird unter dem Begriff «Eigenfrequenz» implizit nur die niedrigste Eigenfrequenz verstanden – genauer «Grundeigenfrequenz» genannt.

Eigenperiode: Periode, mit der eine Struktur frei schwingt, nachdem sie z.B. über einen Stoss zu Schwingungen angeregt worden ist. Inverse der Eigenfrequenz.

Eigenschwingung: Schwingung, die eine Struktur mit einer zugehörigen Eigenfrequenz oder Eigenperiode frei ausführt, nachdem sie z.B. über einen Stoss zu Schwingungen angeregt worden ist.

Grundeigenfrequenz: Niedrigste Frequenz, mit der eine Struktur frei schwingt, nachdem sie z.B. über einen Stoss zu Schwingungen angeregt worden ist (vgl. «Eigenfrequenz»).

Hochspannung: Unter «Hochspannung» werden alle Spannungsebenen von 1 kV und darüber verstanden.

Hochspannungsapparat: Elektrische Apparate für Hochspannung.

Höchstspannungsnetz bzw. Netzebene 1: Schweizer Übertragungsnetz im 50 Hz-Bereich mit einer Spannung von 380 kV oder 220 kV.

Leistungstransformatoren: siehe «Transformatoren».

Lose: Bei den Leiterverbindungen wird 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.

Maschinentransformatoren: Transformatoren, welche als Teil eines Kraftwerks ausschliesslich der Transformierung von Generatorspannung auf Netzspannung dienen, werden als Maschinentransformatoren – bei unmittelbarem Anschluss an den Generator auch als Blocktransformatoren – bezeichnet.

Nachweis: Unter «Nachweis» werden sowohl Typenprüfungen wie Einzelnachweise verstanden; diese können sich sowohl auf Berechnungen wie auf Versuche abstützen. Bezieht sich der Nachweis auf eine Typenprüfung, ist darzulegen, dass der konkrete Einzelfall tatsächlich den Randbedingungen der Typenprüfung entspricht.

Oberspannung: Bei einem Transformator, die Spannung der höheren Netzebene, von der die Spannung auf die untere Netzebene (Unterspannung) transformiert wird.

Partizipationsfaktor: Faktor, der in der Modalanalyse (Schwingungsanalyse) auftritt. Wo er im vorliegenden Bericht erwähnt wird, gibt er an, um wie viel grösser die Verschiebung an den Anschlusspunkten der Leiterverbindungen im Vergleich zur Spektralverschiebung des Ersatz-Einmassenschwingers ist. Die Spektralverschiebung ist diejenige Verschiebung, die direkt aus dem Verschiebungs-Antwortspektrum abgelesen werden kann (vgl. Antwortspektrum).

Plateaubeschleunigung: Maximale spektrale Beschleunigung in einem Antwortspektrum, das zur Erdbebenbemessung verwendet wird.

Qualifikationsstufen «AF2», «AF3» und «AF5»: Verschiedene IEC-Publikationen ([5], [6], [7]) definieren eine seismische Qualifikation von Hochspannungsapparaten. Dabei werden drei Qualifikationsstufen unterschieden: niedrig («low»), mittel («moderate») und hoch («high»), «AF2», «AF3» bzw. «AF5» genannt. Diese Stufen entsprechen maximalen Bodenbeschleunigungen (in den IEC-Publikationen «Zero Period Acceleration ZPA» genannt) von 2, 3 bzw. 5 m/s^2. Der zugehörige Frequenzgehalt der zu berücksichtigenden Erdbebeneinwirkung wird wie üblich

anhand von Antwortspektren definiert (in den IEC-Publikationen «Required Response Spektrum 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.

Transformatoren: Unter dem einfachen Begriff «Transformatoren» werden hier ausschliesslich Transformatoren verstanden, die der Energieübertragung dienen, also Leistungstransformatoren inklusive Regulierpole und Verteilungstransformatoren, aber nicht etwa Messapparate wie Spannungs- oder Stromwandler (französisch ebenfalls «transformateurs» genannt).

Unterspannung: siehe Oberspannung.

3. Erdbebeneinwirkung

3.1 Erdbebenzonen

Die massgebende Erdbebengefährdung für einen gegebenen Standort ist der aktuellen Tragwerksnorm SIA 261 [3], Kapitel 16, zu entnehmen.

Die Norm SIA 261 (2014), Kapitel 16, definiert für die Schweiz vier Erdbebenzonen: Z1, Z2, Z3a und Z3b (Anhang A). Die Erdbebenzone Z1 weist die geringste, die Erdbebenzone Z3b die höchste Erdbebengefährdung auf. Für jede Erdbebenzone wird ein Referenzwert für die maximale Bodenbeschleunigung, der sogenannte Bemessungswert der horizontalen Bodenbeschleunigung a_{gd}, definiert (vgl. Tabelle 2). Diese Referenzwerte entsprechen einer nominellen Wiederkehrperiode von 475 Jahren beziehungsweise einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von a_{gd} von 10 % in 50 Jahren.

Tabelle 2: Bemessungswerte der horizontalen Bodenbeschleunigung gemäss der Norm SIA 261 (2014); diese sind mit dem Baugrundfaktor S und dem Bedeutungsfaktor γ_f zu multiplizieren.

Erdbebenzone	Z1	Z2	Z3a	Z3b
SIA 261-Referenzwert: a_{gd}	0,6 m/s²	1,0 m/s²	1,3 m/s²	1,6 m/s²

Die Vertikalkomponente der Erdbebeneinwirkung braucht in der Regel rechnerisch nicht berücksichtigt zu werden, da diese bei Anlagen der elektrischen Energieverteilung von untergeordneter Bedeutung bleibt.

3.2 Baugrundklassen

Die Bodenbewegungen bei einem Erdbeben hängen stark von der Geologie des lokalen Untergrunds ab. Dies wird in der Norm SIA 261 damit berücksichtigt, dass der Referenzwert a_{gd} in Funktion der sogenannten Baugrundklasse mit einem Baugrundfaktor S multipliziert wird. Dieser Faktor kann für die Baugrundklassen A bis

E Werte von 1 bis 1,4 annehmen, die der Tabelle 3 entnommen werden können. Für die (seltene) Baugrundklasse F ist der Wert von S mithilfe einer seismischen Standortstudie zu bestimmen. Für die im Mittelland am weitesten verbreitete Baugrundklasse C beträgt der Baugrundfaktor S = 1,15.

Tabelle 3: Baugrundfaktor S in Funktion der Baugrundklasse gemäss der Norm SIA 261, Tabelle 24.

Baugrundklasse	A	B	C	D	E	F
Baugrundfaktor S	1,0	1,2	1,15	1,35	1,4	?

Auf einer Webseite des BAFU (http://map.bafu.admin.ch) können für zahlreiche Regionen der Schweiz sogenannte Baugrundklassen-Karten gefunden werden, auf denen die Baugrundklasse eines gegebenen Standortes einfach abgelesen werden kann.

Zusätzlich zur maximalen Bodenbeschleunigung definiert die Norm SIA 261 auch den Frequenzgehalt der Bodenbewegungen, der ebenfalls stark von der lokalen Geologie beeinflusst wird, mithilfe sogenannter Antwortspektren. Diese zeigen, dass die Erdbebenbeschleunigungen von Bauwerken und Anlagen, je nach deren dynamischer Charakteristik, insbesondere der Grundeigenfrequenz, deutlich verstärkt werden können. Für die genaue Definition der Antwortspektren wird der Leser auf die Norm SIA 261 [3], Kapitel 16.2, verwiesen.

Die erwähnten Antwortspektren können mithilfe einer ingenieurseismologischen Studie, einer sogenannten spektralen Mikrozonierung, besser auf die spezifischen geologischen Gegebenheiten eines Standortes abgestimmt werden. Wo eine solche Mikrozonierung besteht, wird empfohlen, diese zu berücksichtigen. Ergibt die Mikrozonierung ein Antwortspektrum, das ungünstiger ist, also höhere Spektralbeschleunigungen aufweist als das Antwortspektrum gemäss der Norm SIA 261, ist ein Erdbebenspezialist beizuziehen, um zu beurteilen, ob die Anforderungen der Richtlinie für eine höhere Erdbebenzone zu berücksichtigen sind.

3.3 Bauwerksklassen

Die Norm SIA 261 teilt die Bauwerke, je nach deren Bedeutung, in drei verschiedene Bauwerksklassen ein: BWK I, BWK II und BWK III. Die Referenzwerte der Tabelle 2 gelten für die BWK I. Für die BWK II beziehungsweise III sind diese Werte mit einem sogenannten Bedeutungsfaktor γ_f von 1,2 beziehungsweise 1,4 zu multiplizieren (Tabelle 4). Der Faktor 1,4 führt auf maximale Bodenbeschleunigungen, die einer Wiederkehrperiode von zirka 1000 Jahren entsprechen.

Tabelle 4: Bedeutungsfaktoren γ_f in Abhängigkeit der Bauwerksklasse.

Bauwerksklasse	I	II	III
Bedeutungsfaktor γ_f	1,0	1,2	1,4

Objekte mit «lebenswichtiger Infrastrukturfunktion» gehören zur BWK III. Da ein grossräumiger Stromausfall effiziente Rettungsarbeiten nach einem Erdbeben deutlich erschwert, sind Unterwerke, deren höchste Spannung 220 kV oder mehr beträgt, der BWK III zuzuteilen; damit sind die Referenzwerte der Tabelle 2 mit dem Bedeutungsfaktor von γ_f von 1,4 zu multiplizieren.

Unterwerke, deren höchste Spannung < 220 kV beträgt, sowie wichtige Transformatorenstationen sind zumindest der BWK II zuzuteilen. Bei den bezüglich Versorgungssicherheit besonders wichtigen Unterwerken ist jedoch eine Höhereinstufung in die BWK III sinnvoll; eine solche ist vom Netzbetreiber in Eigenverantwortung vorzunehmen.

Bei einer Multiplikation des Bemessungswertes der horizontalen Bodenbeschleunigung (Tabelle 2) mit dem maximalen Baugrundfaktor 1,4 (Tabelle 3) und dem maximalen Bedeutungsfaktor 1,4 (Tabelle 4) kann sich somit in der Erdbebenzone der höchsten Gefährdung, Z3b, eine maximale Bodenbeschleunigung von 3,1 m/s^2 ergeben.

3.4 Verhaltensbeiwert q

Es ist im Erdbebeningenieurwesen weit verbreitet, rein elastisch zu rechnen und sowohl die Überfestigkeit des Materials im Vergleich zu den rechnerischen Widerstandswerten wie auch das plastische Verhalten des Systems mithilfe eines sogenannten Verhaltensbeiwerts q pauschal zu berücksichtigen; hierzu werden die elastisch berechneten Beanspruchungen durch q dividiert.

Im Rahmen der vorliegenden Richtlinie ist für Kippnachweise von Transformatoren, Hochspannungsapparaten, Schaltschränken etc. mit q = 1,0 zu rechnen. Für Festigkeitsnachweise, z.B. von Verankerungsbolzen, dürfen aber die rechnerischen Materialwiderstände zur Berücksichtigung der Überfestigkeit um den Verhaltensbeiwert q = 1,5 erhöht werden (vgl. Rechenbeispiel im Anhang D).

Bei Gebäuden können die Verhaltensbeiwerte gemäss den Tragwerksnormen des SIA verwendet werden.

4. Bestimmungen für die Erdbebensicherheit der Anlagentechnik

Die nachfolgenden Bestimmungen, nach Erdbebenzonen abgestuft, beziehen sich, abgesehen vom hier unmittelbar folgenden Absatz und von den Kapiteln 4.3 und 4.5, auf Unterwerke in luftisolierter Technik und Transformatorenstationen. Die in den Kapiteln 4.1, 4.2 und 4.4. angegebenen Werte der Spektralbeschleunigungen und der erforderlichen Lose gelten nur für Transformatoren und Apparate, die entweder ebenerdig oder in einem Gebäude nicht höher als im Hochparterre aufgestellt sind. Bei einer Aufstellung in den Obergeschossen eines Gebäudes ist zu berücksichtigen, dass die Bewegungen infolge Erdbeben vom Gebäude verstärkt werden können. Dies kann mithilfe der Norm SIA 261, insbesondere Kapitel 16.7, berücksichtigt werden.

Erfahrungen im Ausland zeigen, dass Anlagen in gekapselter SF_6-Technik bezüglich Erdbeben, wie sie in der Schweiz zu erwarten sind, weitgehend unkritisch sind,

sofern diese ausreichend verankert sind. Es wird empfohlen, beim Erstellen neuer und Ersetzen bestehender Anlagen in gekapselter SF_6-Technik für 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) und höher vom Hersteller entsprechende Erdbebenzertifikate zu verlangen und bei allen Spannungsebenen auf ausreichende Verankerungen aller Anlagenteile zu achten. Darüber hinaus ist besonders in den Erdbebenzonen Z3a und Z3b zu beachten, dass bei Rohr- oder Kabeleinführungen in Gebäude genügend Spiel vorhanden ist, sodass mögliche differenzielle Setzungen von wenigen Zentimetern nicht zu einem Abscheren der Rohre oder Kabel führen können.

Bezüglich Bauwerksklassen-Einteilung der Unterwerke wird auf Kapitel 3.3 verwiesen.

Die potenziell verletzbarsten Elemente sind Transformatoren sowie, bei der Höchstspannungsebene (Netzebene 1) bzw. bei 132 kV (16,7 Hz), Leistungsschalter älterer Bauart und Kopfstromwandler, da diese relativ grosse Massen in der Höhe aufweisen, was sich bei Erdbeben ungünstig auswirkt.

Grundsätzlich lassen sich drei verschiedene Ursachen für Schäden an Transformatoren und Hochspannungsapparaten feststellen. Diese sind mit abnehmender Wichtigkeit:

1. Interaktionskräfte aufgrund von Relativverschiebungen von Apparaten, die über Leiter miteinander verbunden sind, die nicht genügend Lose aufweisen, um die Relativverschiebungen aufnehmen zu können, ohne straff zu werden; solche Interaktionen wären höchstwahrscheinlich, träte heute in der Schweiz ein starkes Erdbeben auf, der wichtigste Verursacher von Schäden an Hochspannungsapparaten.
2. 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.
3. Trägheitskräfte infolge der seismischen Bodenbeschleunigungen.

Alle diese Ursachen führen typischerweise zu Brüchen in spröden Teilen, z.B. aus Porzellan oder Aluminiumguss, während sich Kunststoffisolatoren in der Regel besser verhalten.

Die Bestimmungen der Kapitel 4.1 und 4.2 sollen Schäden aufgrund der Ursachen n° 2 und 3 an Transformatoren und Hochspannungsapparaten verhindern. Kapitel 4.3 ist den Anlagen der Energieversorgung in Schrankbauweise gewidmet. Die wichtige Problematik ausreichender Lose wird in Kapitel 4.4 geregelt. Im Anhang D befindet sich ein Rechenblatt, mit dessen Hilfe die Verankerungskräfte bei Transformatoren und Hochspannungsapparaten sowie der Losebedarf in den Leiterseilen gemäss Tabelle 8 bestimmt werden können. Kapitel 4.5 ist den Sekundärsystemen gewidmet.

Bemerkung: Spezielle Typen von Unterwerken (wie z.B. fahrbahre Unterwerke im Eisenbahnbereich) sind aufgrund ihrer spezifischen dynamischen Eigenschaften im Einzelfall zu überprüfen.

4.1 Erdbebensicherheit von Transformatoren

Die Bestimmungen für die Erdbebensicherheit von Transformatoren sind der Tabelle 5 zu entnehmen. Sie gelten für alle Transformatoren,

- deren Oberspannung bei 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) oder höher liegt,
- oder deren Oberspannung niedriger als 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) ist, deren Schlankheitsgrad aber einen von der Erdbebenzone abhängigen Wert übersteigt.

Tabelle 5: Erdbebenbestimmungen für neue Transformatoren. Die angegebenen Werte der Spektralbeschleunigung[1)] gelten für die Bauwerksklasse III (γ_f = 1,4) und für die ungünstigste Baugrundklasse E; für andere Baugrundklassen dürfen die Werte, ausgehend von Tabelle 6a, berechnet bzw. der Tabelle 6b entnommen werden.

	Transformatoren, für welche die Bestimmungen gelten	vom Hersteller zu verlangendes Erdbebenzertifikat, falls Leistung > 2,5 MVA	Verankerung bezüglich Abheben und Abscheren
Zone Z3a/Z3b	alle Spannungen	für Spektral-beschleunigung[2)] von 9,4 m/s² (Z3b) bzw. 7,6 m/s² (Z3a)	rechnerischer Nachweis erforderlich
Zone Z2	alle mit Spannungen ≥ 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) ODER alle mit Schlankheitsgrad > 2	für Spektral-beschleunigung[2)] von 5,9 m/s²	rechnerischer Nachweis erforderlich
Zone Z1	alle mit Spannungen ≥ 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) ODER alle mit Schlankheitsgrad > 3	–	rechnerischer Nachweis bzgl. Abscheren bzw. Wegrollen erforderlich; zusätzlich konstruktive Abhebesicherung empfohlen

[1)] Die zugehörigen maximalen Bodenbeschleunigungen sind um einen Faktor 3 geringer.

[2)] Sind Transformatoren der Bauwerksklasse II zugeteilt (Normalfall im Eisenbahnbereich), ist das Erdbebenzertifikat für eine um den Faktor 1,17 (1,4/1,2) reduzierte Spektralbeschleunigung zu verlangen.

Unter dem Schlankheitsgrad s wird das Verhältnis von Schwerpunktshöhe h_c zu minimaler horizontaler Distanz a_c zwischen dem Schwerpunkt und der nächstgelegenen «Kante» verstanden, über die ein Umkippen stattfinden könnte (vgl. Bild 1). Zur Information: Bei Transformatoren des Höchstspannungsnetzes (Netzebene 1) liegen typische Schlankheitsgrade im Bereich von 3,3 bis 3,6, bei

Verteiltransformatoren mit einer Leistung < 2,5 MVA hingegen eher zwischen 2,0 und 2,5.

Die für die verlangten Erdbebenzertifikate erforderlichen Nachweise können mithilfe von Berechnungen oder Versuchen erbracht werden. Verweise auf explizite Nachweise für Transformatoren ähnlicher Bauart sind zulässig, falls nachvollziehbar dargelegt werden kann, dass der zu zertifizierende Transformator sich mindestens so gut verhalten dürfte wie derjenige, für den der explizite Nachweis erbracht worden ist.

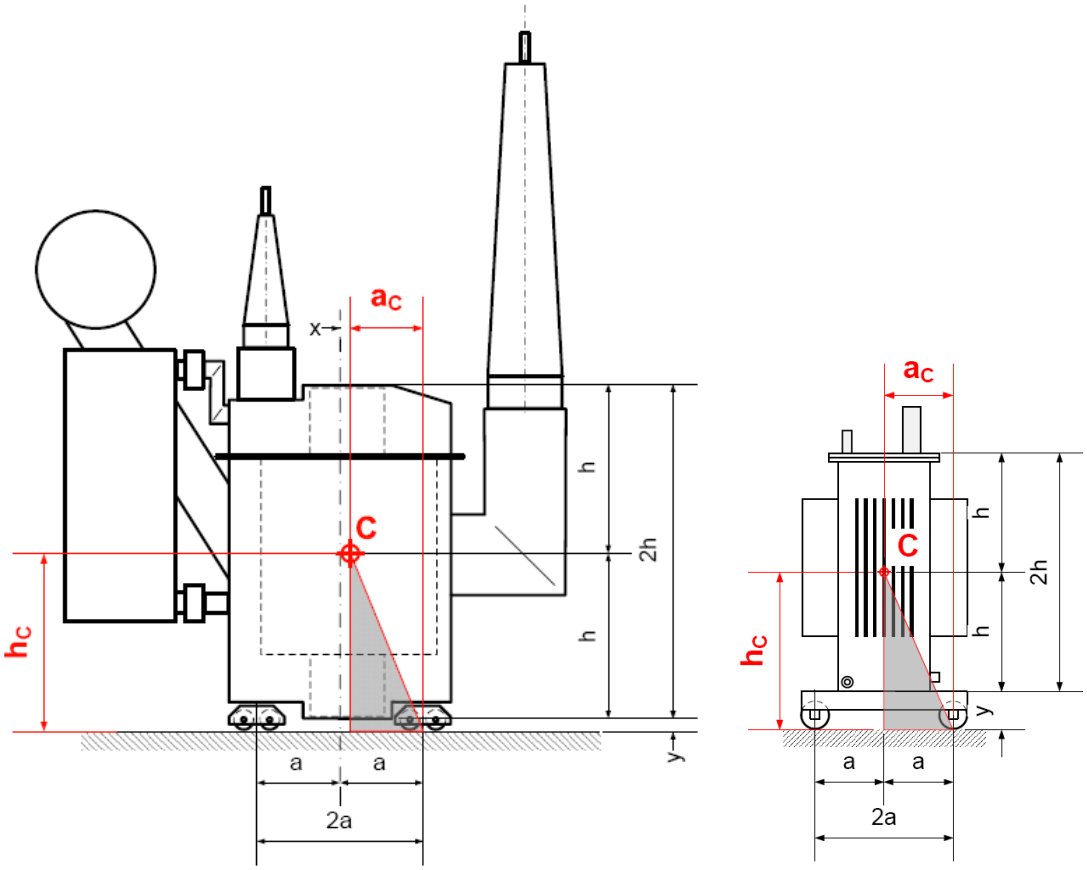


Bild 1: *Schlankheitsgrad s eines Transformators: $s = h_c/a_c$*
h_c ist die Schwerpunktshöhe und a_c die minimale horizontale Distanz zwischen dem Schwerpunkt C und einer «Kante», über die ein Umkippen stattfinden könnte.

Transformatoren weisen in der Regel Eigenfrequenzen auf, die sich im sogenannten Plateaubereich des Antwortspektrums befinden [2]. Für die Bemessung der Verankerungen ist deshalb – werden keine genaueren Abklärungen vorgenommen – von einer effektiven Spektralbeschleunigung (Tabellen 6a und 6b) auszugehen, die dreimal so hoch ist wie die maximale Bodenbeschleunigung. Dies berücksichtigt die Beschleunigungsverstärkung im Plateaubereich (Faktor 2,5) sowie eine Dämpfung von 2 % (Faktor 1,2) der kritischen Dämpfung. Zur Berechnung der Verankerungskräfte ist die resultierende Erdbebenkraft – effektive Spektralbeschleunigung mal Masse des Transformators – etwas oberhalb der Höhe des Schwerpunktes anzusetzen, da der Transformator bei einem Erdbeben

teilweise eine Kippbewegung ausführt. Dies bedeutet, dass die Trägheitskräfte – bei gleichmässiger Massenverteilung – mit der Höhe zunehmen. Empfohlen wird, die resultierende Erdbebenkraft näherungsweise in einer Höhe von 1,2 h_c anzusetzen.

Transformatoren, die eine Abhebesicherung brauchen, aber wegen Körperschallproblemen schwingungsisoliert aufgestellt werden müssen, sind derart zu verankern, dass Zugkräfte ohne Körperschallbrücke auf die Unterlage übertragen werden können. Im Anhang B sind Beispiele für Transformatoren-Verankerungen aufgeführt.

Tabelle 6a: Referenzwerte der Spektralbeschleunigungen (3 a_{gd}), die beim Fehlen genauerer Berechnungen bei Transformatoren und Hochspannungsapparaten zur Berechnung der Verankerungskräfte anzusetzen sind. Die aufgeführten Werte sind noch mit dem Baugrundfaktor S und dem Bedeutungsfaktor γ_f zu multiplizieren.

Erdbebenzone	Z1	Z2	Z3a	Z3b
Referenzwert Spektralbeschleunigung	1,8 m/s²	3,0 m/s²	3,9 m/s²	4,8 m/s²

Tabelle 6b: Effektive Spektralbeschleunigungen für die häufigsten Baugrundklassen, die beim Fehlen genauerer Berechnungen bei Transformatoren und Hochspannungsapparaten für die BWK III (γ_f = 1,4) zur Berechnung der Verankerungskräfte anzusetzen sind.

Erdbebenzone	Z1	Z2	Z3a	Z3b
Baugrundklasse C	2,9 m/s²	4,8 m/s²	6,3 m/s²	7,7 m/s²
Baugrundklasse D	3,4 m/s²	5,7 m/s²	7,4 m/s²	9,1 m/s²
Baugrundklasse E	3,5 m/s²	5,9 m/s²	7,6 m/s²	9,4 m/s²

Bei Direktanschlüssen – ohne Lose – an Transformatoren ab GIS-Anlagen sind in den Erdbebenzonen Z2, Z3a und Z3b besondere Abklärungen vorzunehmen.

4.2 Erdbebensicherheit von Hochspannungsapparaten

Die Bestimmungen für die Erdbebensicherheit von Hochspannungsapparaten sind der Tabelle 7 zu entnehmen. Sie gelten für alle Hochspannungsapparate mit Spannungen von 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) oder höher; für Apparate zwischen 110 kV (50 Hz) und 220 kV (50 Hz) haben sie die Bedeutung von Empfehlungen.

Werden die Hochspannungsapparate, wie meistens der Fall, 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 als solche notwendig (z.B. «AF5» statt «AF3»).

Werden bei einer Apparate-Erneuerung bestehende Fundamente weiterverwendet, sind diese notwendigenfalls baulich anzupassen.

Tabelle 7: Erdbebenbestimmungen für neue Hochspannungsapparate.

	Hochspannungsapparate, für welche die Bestimmungen gelten	vom Hersteller zu verlangendes Erdbebenzertifikat nach IEC [5, 6, 7]	Verankerung bezüglich Kippen und Abscheren
Zone 3a/3b	alle mit Spannungen ≥ 220 kV (50 Hz) bzw. ≥ 132 kV (16,7 Hz); für Spannungen > 110 kV (50 Hz) empfohlen	inklusive flexible Unterbauten «AF3»-tauglich	rechnerischer Nachweis erforderlich
Zone 2	alle mit Spannungen ≥ 220 kV (50 Hz) bzw. ≥ 132 kV (16,7 Hz); für Spannungen > 110 kV (50 Hz) empfohlen	inklusive flexible Unterbauten «AF2»-tauglich	rechnerischer Nachweis erforderlich
Zone 1	alle mit Spannungen ≥ 220 kV (50 Hz) bzw. ≥ 132 kV (16,7 Hz);	–	konstruktiv

Hochspannungsapparate für Spannungen von 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) oder höher weisen – inklusive Unterbau – mehrheitlich Eigenfrequenzen auf, die im Plateaubereich der Erdbebenanregung liegen. Für die Bemessung der Verankerungen ist deshalb – werden keine genaueren Abklärungen vorgenommen – von einer effektiven Spektralbeschleunigung (Tabellen 6a und 6b) auszugehen, die dreimal so hoch ist wie die maximale Bodenbeschleunigung. Dies berücksichtigt die Beschleunigungsverstärkung im Plateaubereich (Faktor 2,5) sowie eine Dämpfung von 2 % (Faktor 1,2) der kritischen Dämpfung. Zur Berechnung der Verankerungskräfte ist die resultierende Horizontalkraft – effektive Spektralbeschleunigung mal Masse des Apparates – näherungsweise auf der 1,2-fachen Schwerpunktshöhe anzusetzen, sofern keine genaueren Untersuchungen angestellt werden.

Bei der Reservehaltung von Hochspannungsapparaten, beispielsweise in Werkhöfen, ist darauf zu achten, dass diese im Falle eines Erdbebens nicht beschädigt werden, weder durch Umkippen noch durch aus Gestellen abstürzende Gegenstände.

4.3 Anlagen der Energieversorgung in Schrankbauweise

Für Hochspannungsanlagen und für Einrichtungen der Energieverteilungen mit Spannungen ≤ 1000 V, welche in Schränken untergebracht sind, gelten sinngemäss die im Kapitel 4.5 dieser Richtlinie enthaltenen Bestimmungen, mit der Zielsetzung, ein Kippen der Schränke durch die Einwirkung eines Erdbebens zu verhindern. Im

Eisenbahnbereich ist bei mechanischen Sicherungsmassnahmen der Vermeidung von Potentialverschleppungen Rechnung zu tragen.

Die Unterstellung von Anlagen dieser Art unter diese Richtlinie entstammt Erfahrungen, welche die herausragende Bedeutung der elektrischen Energieversorgung für Bergung und Rettung nach einem Erdbeben belegen. Aufgrund ihrer Anzahl und engen geographischen Verteilung liegen bei einem Erdbeben immer Versorgungsanlagen mittlerer und niedriger Spannungen (Netzebenen 3 bis 5 (50 Hz), bzw. unterhalb 132 kV (16,7 Hz)) im Schadensgebiet. Vom Funktionserhalt solcher Anlagen im Schadensgebiet hängt aber die Versorgung nach einer Erdbebenkatastrophe entscheidend ab.

4.4 Erdbebengerechte Leiterverbindungen

Die Bestimmungen für erbebengerechte Leiterverbindungen gelten für alle Hochspannungsapparate mit Spannungen von 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) oder höher; für Apparate zwischen 110 kV (50 Hz) und 220 kV (50 Hz) haben sie die Bedeutung von Empfehlungen.

Die Leiterverbindung zwischen zwei Hochspannungsapparaten muss so viel Lose aufweisen, dass die Apparate bei einem Erdbeben unabhängig voneinander schwingen können, ohne dass die Leiterverbindung dabei straff wird. Ansonsten können grosse Interaktionskräfte entstehen, die typischerweise zum Bruch der Porzellanisolatoren führen. Gleichzeitig ist 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 geeignetste Art, sehr grosse Relativverschiebungen zuzulassen, ohne elektrische Mindestabstände zu unterschreiten, sind vertikale Leiterseile, die den Apparat mit höherliegenden horizontalen Leitern verbinden. Ein Beispiel hierfür, aus der Schweiz stammend, ist in Bild 2 zu sehen.



Bild 2: 380 kV-Leistungsschalter, die über im Wesentlichen vertikale Leiterseile mit den Nachbar-Apparaten verbunden sind: Diese Konfiguration lässt grosse Erdbebenverschiebungen zu, ohne dass die Leiterseile straff werden.

Weitere geeignete Leiterkonfigurationen, wie sie die US-Norm IEEE Std 1527-2006 [8] empfiehlt, gehen aus Bild 3 hervor. Ein deutlicher vertikaler Versatz zwischen den zu verbindenden Anschlusspunkten ist in der Regel vorteilhaft, um den a priori gegensätzlichen Forderungen bezüglich möglicher Relativverschiebung einerseits und Einhalten elektrischer Mindestabstände andererseits gerecht zu werden.

Die minimal notwendige Leiterlänge L_o zwischen zwei miteinander verbundenen Anschlusspunkten beträgt gemäss der US-Norm IEEE Std 693-2005 [9], Kapitel 5.9:

$$L_o = L_1 + 1{,}5\,\Delta + L_2. \qquad (1)$$

Hierin bedeuten

L_o die minimale notwendige Leiterlänge,

L_1 die kürzeste Distanz zwischen den Anschlusspunkten,

Δ die maximale Relativverschiebung der Anschlusspunkte, die während des Bemessungsbebens zu erwarten ist,

L_2 eine Zusatzlänge, abhängig von der Leiterkonfiguration (siehe Text).

Die Zusatzlänge L_2 hängt von der Leiterkonfiguration und von der – normalerweise nicht vernachlässigbaren – Biegesteifigkeit des Leiters ab; sie soll sicherstellen, dass die Anschlusspunkte keine unnötigen Biegemomente aufnehmen müssen. Die Länge L_2 lässt sich mithilfe von Versuchen oder Berechnungen bestimmen. Die theoretische Bestimmung von L_2 kann umgangen werden, indem bei der Montage eines Leiterseils direkt darauf geachtet wird, dass die Distanz zwischen den zwei miteinander zu verbindenden Anschlusspunkten um 1,5 Δ erhöht werden könnte, bevor das Leiterseil straff wird und ohne dass grössere Biegemomente (Zwängungsmomente) in den Leiteranschlusspunkten entstehen.

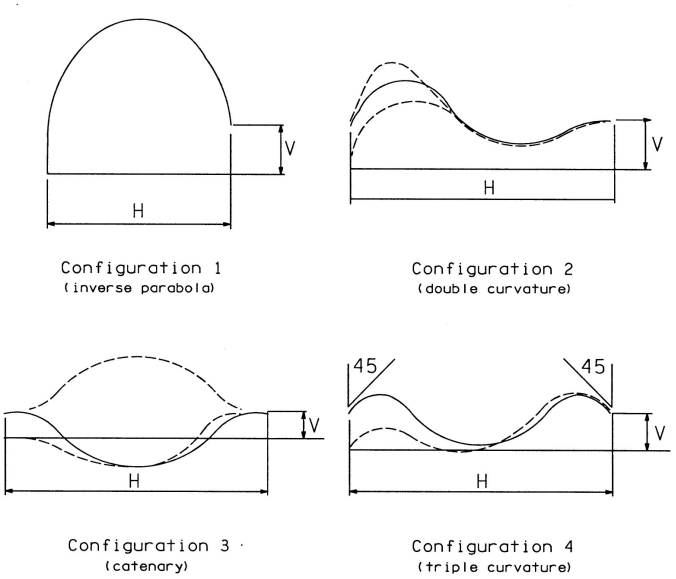


Bild 3: Von der amerikanischen Norm IEEE Std 1527-2006 [8] empfohlene Konfigurationen von Leiterverbindungen.

50 Hz-Apparate

Werden keine Erdbebenberechnungen angestellt, können für «1,5 Δ» näherungsweise die Werte der Tabelle 8 verwendet werden, die in den meisten Fällen auf der sicheren Seite liegen und für die Bauwerksklasse III gelten.

Werden die Werte der Tabelle 8 im Sinne einer Empfehlung auch für Unterwerke verwendet, deren höchste Spannung höher als 110 kV, aber niedriger als 220 kV ist, können diese mit dem Faktor 0,75 multipliziert werden. Dies gilt, sofern diese Unterwerke der BWK II angehören; werden sie der BWK III zugeteilt, wird ein Faktor von 0,9 empfohlen. Ein minimaler Wert von 30 mm Lose zwischen zwei benachbarten Apparaten sollte jedoch in keinem Fall unterschritten werden. Für niedrigere Spannungsebenen ist die Tabelle gegenstandslos; die Einhaltung einer minimalen Lose ist dort nicht notwendig.

Tabelle 8: Erforderliche Lose «1,5 Δ» in [mm], die im Leiterseil zwischen zwei Hochspannungsapparaten (ohne Transformatoren) vorhanden sein muss, in Abhängigkeit der Grundeigenfrequenzen f_{01} und f_{02} der miteinander verbundenen Apparate, der Erdbebenzone und der Baugrundklasse, gültig für die Bauwerksklasse III. Wird die Tabelle auch für Transformatoren verwendet, ist transformatorenseitig eine Eigenfrequenz von 2 Hz anzusetzen.

Grundeigenfrequenzen f_{01} und f_{02}	Baugrundklasse	Zone Z1 1,5 Δ [mm]	Zone Z2 1,5 Δ [mm]	Zone Z3a 1,5 Δ [mm]	Zone Z3b 1,5 Δ [mm]
2 Hz – 2 Hz	A B, C D, E	45 65 75	75 110 125	95 140 165	115 170 200
2 Hz – 3 Hz	A B, C D, E	35 50 60	60 85 100	80 110 130	95 135 160
2 Hz – 4 Hz	A B, C D, E	35 50 55	55 80 95	70 105 120	85 125 145
3 Hz – 3 Hz	A B, C D, E	30 35 40	45 55 65	60 70 85	75 90 100
3 Hz – 4 Hz	A B, C D, E	30 30 30	35 45 50	45 55 65	60 70 80

Sind die Grundeigenfrequenzen *inklusive* Unterbau nicht bekannt, kann zusammen mit der Tabelle 8 näherungsweise von folgenden Annahmen ausgegangen werden:

– Leistungsschalter, Strom- und Spannungswandler sowie kombinierte Messgruppen: 2 Hz,

– Stützisolatoren und Pantografentrenner (Scherentrenner): 3 Hz,
– Überspannungsableiter und Drehtrenner: 4 Hz.

Bei Apparaten mit ausgesprochen hohen Unterbauten (wie etwa, wegen Überschwemmungsgefahr, in Benken oder Chamoson vorhanden), sind die Werte der Tabelle 8 um 20 % zu erhöhen. Auf diese Erhöhung kann verzichtet werden, wenn mithilfe von Eigenfrequenzmessungen nachgewiesen werden kann, dass die Grundeigenfrequenzen nicht tiefer ausfallen als die oben aufgeführten.

Die Tabelle 8 kann auch dazu verwendet werden, die notwendigen Lose in Leiterverbindungen mit Durchführungen von Transformatoren zu bestimmen. In diesem Fall ist aber durchführungsseitig eine Frequenz von 2 Hz einzusetzen, obwohl die wahre Grundeigenfrequenz bei 3 Hz oder höher liegen dürfte. Die Zugrundelegung von 2 Hz statt 3 Hz oder mehr deckt den deutlich höheren Partizipationsfaktor ab, der bei Durchführungen von Transformatoren auftritt.

Die Tabelle 8 ist so ausgelegt, dass sie in allen branchenüblichen Fällen angewendet werden kann und die Werte fast immer auf der sicheren Seite liegen. Ergeben sich Probleme, die erforderliche Lose zu verwirklichen, kann es sich lohnen, Eigenfrequenzmessungen vorzunehmen und den Partizipationsfaktor genauer abzuschätzen, um eine verfeinerte Bestimmung des Losebedarfs zu ermöglichen. Ein solch verfeinertes Vorgehen kann sich insbesondere für die Erdbebenzonen Z3a und Z3b als sinnvoll erweisen.

16,7 Hz-Apparate

Werden keine Erdbebenberechnungen angestellt, können für «1,5 Δ» näherungsweise die Werte der Tabelle 9 verwendet werden, die in den meisten Fällen auf der sicheren Seite liegen und für die Bauwerksklasse II gelten. Die Tabelle 9 gilt für die Spannungsebene 132 kV; für niedrigere Spannungsebenen ist die Tabelle gegenstandslos; die Einhaltung einer minimalen Lose ist dort nicht notwendig.

Sind die Grundeigenfrequenzen *inklusive* Unterbau nicht bekannt, kann zusammen mit der Tabelle 9 näherungsweise von folgenden Annahmen ausgegangen werden:

- Leistungsschalter, Strom- und Spannungswandler sowie kombinierte Messgruppen: 2,5 Hz,
- Stützisolatoren und Pantografentrenner (Scherentrenner): 3 Hz,
- Überspannungsableiter und Drehtrenner: 4 Hz.

Bei Apparaten mit ausgesprochen hohen Unterbauten (wie etwa, wegen Überschwemmungsgefahr, in Benken oder Chamoson vorhanden), sind die Werte der Tabelle 9 um 20 % zu erhöhen. Auf diese Erhöhung kann verzichtet werden, wenn mithilfe von Eigenfrequenzmessungen nachgewiesen werden kann, dass die Grundeigenfrequenzen nicht tiefer ausfallen als die oben aufgeführten.

Die Tabelle 9 kann auch dazu verwendet werden, die notwendige Lose in Leiterverbindungen mit Durchführungen von Transformatoren zu bestimmen. In diesem Fall ist aber durchführungsseitig eine Frequenz von 2,5 Hz einzusetzen, obwohl die wahre Grundeigenfrequenz bei 3 bis 4 Hz oder höher liegen dürfte. Die Zugrundelegung von 2,5 Hz statt 3 Hz oder mehr deckt den deutlich höheren Partizipationsfaktor ab, der bei Durchführungen von Transformatoren auftritt.

Tabelle 9: Erforderliche Lose «1,5 Δ» in [mm], die im Leiterseil zwischen zwei Hochspannungsapparaten (ohne Transformatoren) vorhanden sein muss, in Abhängigkeit der Grundeigenfrequenzen f_{01} und f_{02} der miteinander verbundenen Apparate, der Erdbebenzone und der Baugrundklasse, gültig für die Bauwerksklasse II. Wird die Tabelle auch für Transformatoren verwendet, ist transformatorenseitig eine Eigenfrequenz von 2,5 Hz anzusetzen.

Grundeigenfrequenzen f_{01} und f_{02}	Baugrundklasse	Zone Z1 1,5 Δ [mm]	Zone Z2 1,5 Δ [mm]	Zone Z3a 1,5 Δ [mm]	Zone Z3b 1,5 Δ [mm]
2,5 Hz – 2,5 Hz	A B, C D, E	30 40 45	50 60 70	65 80 90	80 95 110
2,5 Hz – 3 Hz	A B, C D, E	30 35 40	45 55 60	55 70 80	70 85 95
2,5 Hz – 4 Hz	A B, C D, E	30 30 35	40 45 55	50 60 70	60 75 85
3 Hz – 3 Hz	A B, C D, E	30 30 30	35 45 50	45 55 65	55 65 80
3 Hz – 4 Hz	A B, C D, E	30 30 30	30 35 40	40 45 55	45 55 65

Die Tabelle 9 ist so ausgelegt, dass sie in allen branchenüblichen Fällen angewendet werden kann und die Werte fast immer auf der sicheren Seite liegen. Ergeben sich Probleme, die erforderliche Lose zu verwirklichen, kann es sich lohnen, Eigenfrequenzmessungen vorzunehmen und den Partizipationsfaktor genauer abzuschätzen, um eine verfeinerte Bestimmung des Losebedarfs zu ermöglichen. Ein solch verfeinertes Vorgehen dürfte sich allerdings nur für die Erdbebenzonen Z3a und Z3b als sinnvoll erweisen.

4.5 Erdbebensicherheit von Sekundärsystemen und anderen Einbauten

Für alle Erdbebenzonen und Spannungsebenen sind Sekundärsysteme wie Steuerschränke, Notstrombatterien oder -aggregate etc. und Einbauten wie Doppelböden, Trennwände etc. gegen Erdbeben zu sichern; insbesondere ist deren Standsicherheit nachzuweisen. Die relevanten sekundären Bauteile, Einrichtungen und Installationen sowie die Massnahmen und Zuständigkeiten sind projektspezifisch zu definieren, z.B. im Rahmen der Nutzungsvereinbarung (siehe u.a. auch Anhang F).

Abhängig vom Erdungskonzept, sind im Eisenbahnbereich fallweise die Verankerungen (u.a. für Gestelle und Apparate) gegenüber leitfähigen Gebäudeteilen (z.B. Armierungseisen) isoliert zu montieren.

Für die Bemessung oder den Nachweis solcher Elemente bildet die Norm SIA 261 [3], Kapitel 16.7, die Grundlage. Oft genügen aber auch nur einfache konstruktive Massnahmen. Beispiele solcher Massnahmen finden sich in der BAFU-Publikation «Erdbebensicherheit sekundärer Bauteile und weiterer Installationen und Einrichtungen» [11].

Beispiele zur Sicherung von Sekundärsystemen (Notstrombatterien, Steuerschränke) sind im Anhang E aufgeführt.

5. Bestimmungen für die Erdbebensicherheit von Gebäuden

Neue Gebäude sind, unabhängig von den Spannungsebenen, nach den gültigen Tragwerksnormen des SIA (SIA 260 bis 267) zu bemessen. Für neue Gebäude ist eine Nutzungsvereinbarung zu erstellen. Neben dem Tragwerk sind auch die sekundären Bauteile, Einrichtungen und Installationen erdbebengerecht auszuführen (vgl. Kapitel 4.5).

Bei der Erneuerung eines namhaften Teils der Hochspannungsanlagen in einem bestehenden Gebäude mit ungenügender Erdbebensicherheit ist das Gebäude bezüglich Erdbeben zu ertüchtigen, sofern dies mit verhältnismässigem Aufwand möglich ist und die Besitztumsverhältnisse dies zulassen. Zur Beurteilung, was als «verhältnismässig» gelten kann, ist die Norm SIA 269/8 [10] beizuziehen. Dabei ist zu beachten, dass hier weniger die Personensicherheit als vielmehr die Versorgungssicherheit im Vordergrund steht. Eine mögliche Versorgungsunterbrechung ist nicht nur bezüglich des entgangenen Ertrags infolge nicht gelieferter Energie, sondern vor allem in Bezug auf die gesellschaftlichen Auswirkungen, insbesondere die möglicherweise grossräumige Erschwerung von Rettungsarbeiten, zu beurteilen.

6. Bestimmungen für die Erdbebensicherheit von Leitungen

6.1 Freileitungen

Die Bestimmungen für die Erdbebensicherheit von Freileitungen gelten für Spannungen von 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) und höher. Für Freileitungen mit Spannungen zwischen 110 kV (50 Hz)und 220 kV (50 Hz) haben sie die Bedeutung von Empfehlungen.

Freileitungen überstehen in den meisten Fällen auch stärkere Erdbeben ohne signifikante Schäden. Probleme, die zum Totalausfall einer Leitung führen können, entstehen jedoch dann, wenn die Fundamente der Leitungsmasten grössere permanente Verschiebungen mitmachen müssen. Solche können sich bei Hangrutschungen oder Bodenverflüssigung ergeben, die vom Erdbeben ausgelöst werden.

Beim Bau von Freileitungen des Höchstspannungsnetzes (Netzebene 1) sowie aufgrund seiner relativ geringen Redundanz des 132 kV-Netzes (16,7 Hz) ist zumindest qualitativ zu beurteilen, ob das Auslösen von Hangrutschungen oder das Auftreten von Bodenverflüssigung an den Standorten der Freileitungsmasten ohne

nähere Untersuchungen ausgeschlossen werden kann. Bezüglich Hangrutschungen geben die Gefahrenkarten, soweit diese für das betroffene Gebiet existieren, erste Hinweise. Im Zweifelsfall ist eine quantitative Untersuchung in Anlehnung an die Norm SIA 267 [12] durchzuführen.

6.2 Kabelleitungen

Kabelleitungen sind bei Erdbeben in der Regel unkritisch.

Bei Einführungsbauwerken (Einführung in Brücken oder Gebäude) ist auf mögliche differenzielle Verschiebungen zu achten, die einige wenige Zentimeter erreichen können. Beim Durchqueren potenzieller Hangrutschungen ist Vorsicht geboten; solche Hänge sollten soweit möglich in der Falllinie durchquert werden.

Kabelleitungen dürfen nicht über Brücken geführt werden, die nicht ausreichend erdbebensicher sind.

7. Empfehlungen für «wichtige» bestehende Unterwerke

Eine Erdbebenertüchtigung bestehender Anlagen wird empfohlen,

- falls eine solche mit geringem Aufwand möglich ist (trifft normalerweise bei der Sicherung von Sekundärsystemen zu), in allen Erdbebenzonen;
- wenn es sich aus der Sicht der regionalen Versorgungssicherheit um «aussergewöhnlich wichtige» Anlagenteile handelt, für die in den nächsten 20 Jahren oder länger keine Erneuerungen zu erwarten sind; diese Empfehlung beschränkt sich auf die Erdbebenzonen Z2, Z3a und Z3b.

Es liegt in der Eigenverantwortung der Netzbetreiber, bestehende aussergewöhnlich wichtige Anlagenteile zu identifizieren und zu überprüfen, ob eine Erdbebenertüchtigung «verhältnismässig» wäre. Eine potenzielle Versorgungsunterbrechung ist nicht nur bezüglich des entgangenen Ertrags infolge nicht gelieferter Energie, sondern vor allem in Bezug auf die gesellschaftlichen Auswirkungen, insbesondere die möglicherweise grossräumige, drastische Erschwerung von Rettungsarbeiten, zu beurteilen.

Es wird empfohlen, bei bestehenden aussergewöhnlich wichtigen Anlagenteilen mit langer Restlebensdauer in den Erdbebenzonen Z2, Z3a und Z3b abzuklären,

- ob die Transformatoren mit verhältnismässigem Aufwand nachträglich gegen Abheben verankert werden könnten,
- ob die Fundamente und Verankerungen der Hochspannungsapparate mit einer Spannung von 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) oder höher ausreichen und, falls dies nicht zutrifft, ob eine Ertüchtigung mit verhältnismässigem Aufwand möglich wäre,
- ob die vorhandene Lose in den Leiterseilen zwischen Apparaten einer Spannung von 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) oder höher ausreicht und, falls dies nicht zutrifft, ob eine Neubeseilung ohne Änderung der generellen Leiterkonfiguration – und ohne Bestimmungen bezüglich Mindestabständen zu verletzen – mit verhältnismässigem Aufwand möglich wäre.

Wo eine vollständige oder auch nur teilweise Ertüchtigung als verhältnismässig einzustufen ist, wird empfohlen, diese auszuführen.

8. Quellen

[1] Koller M.G. (2009), «Erdbebensicherheit der elektrischen Energieversorgung in der Schweiz», 1. Zwischenbericht, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Résonance, Carouge.

[2] Koller M.G. (2011), «Erdbebensicherheit der elektrischen Energieversorgung in der Schweiz», 2. Bericht, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Résonance, Carouge.

[3] SIA 261 (2014): Einwirkungen auf Tragwerke, Schweizer Norm SN 505 261, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.

[4] ASCE (1999): «Guide to Improved Earthquake Performance of Electric Power Systems», ASCE Manual and Reports on Engineering Practice n° 96, Herausgeber Schiff, A. J., Reston, Virginia.

[5] (SN)EN 62271-207:2007 [IEC 62271-207:2007]: Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen – Teil 207: Erdbebenqualifikation für gasisolierte Schaltgerätekombinationen mit Bemessungsspannungen über 52 kV.

[6] IEC TS 61463 (2000): Technical Specification, Bushings – Seismic qualification, IEC.

[7] IEC TR 62271-300 (2006): Technical Report, High-voltage switchgear and controlgear – Part 300: Seismic qualification of alternating current circuit-breakers, IEC.

[8] IEEE Std. 1527-2006 (2006): IEEE Recommended Practice for the Design of Flexible Buswork Located in Seismically Active Areas, IEEE Power Engineering Society, New York.

[9] IEEE Std 693-2005 (2005): IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations, recognized as an American National Standard, IEEE Power Engineering Society, New York.

[10] SIA 269/8 (2015): Erhaltung von Tragwerken – Erdbeben, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich. Bis zum Inkrafttreten der Norm 269/8 gilt das Merkblatt SIA 2018 (2004), Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben.

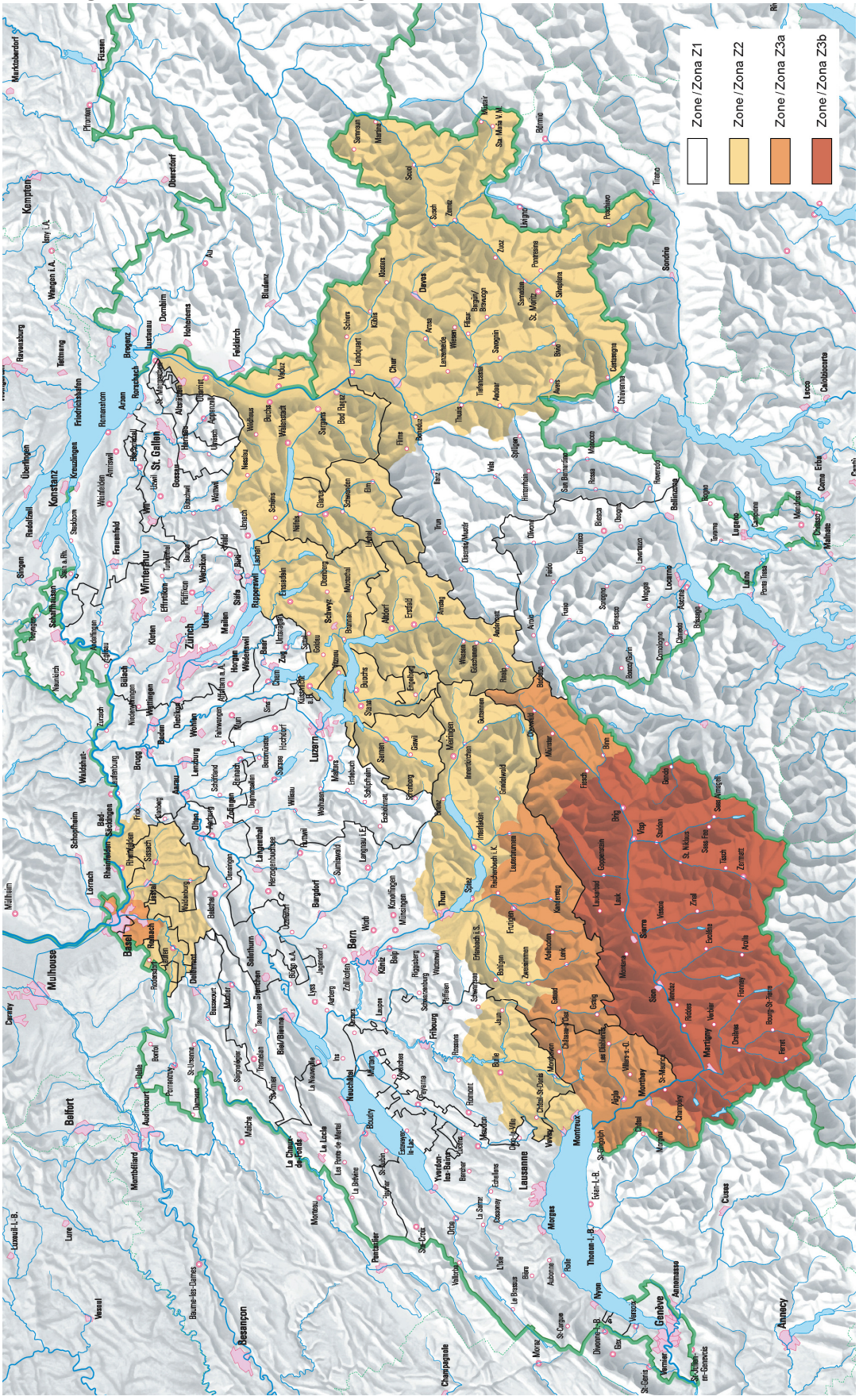
[11] BAFU (2015): «Erdbebensicherheit sekundärer Bauteile und weiterer Installationen und Einrichtungen», BAFU-Publikation, Bern. www.bafu.admin.ch/erdbeben.

[12] SIA 267 (2013): Geotechnik, Schweizer Norm SN 505 267, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.

[13] Dastous J.-B. und Pierre J.-R. (2007), «Design Methodology for Flexible Buswork Between Substation Equipment Subjected to Earthquakes», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, n° 3, pp 1490–1497.

[14] Dastous J.-B., Filiatrault A. und Pierre J.-R. (2004), «Estimation of Displacement at Interconnection Points of Substation Equipment Subjected to Earthquakes», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, n° 2, pp 618–628.

Anhang A: Erdbebenzonen gemäss SIA 261



Mit Genehmigung des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins, Zürich.

Anhang B: Verankerung von Transformatoren



Bild B.1: Trafo 220 kV / 70 MVA – Erdbebenzone Z3b – Verankerungen (8 lösbare) direkt auf Fundament (mit Erlaubnis von axpo).



Bild B.2: Trafo 236 kV / 60 MVA – Erdbebenzone Z3b - Verschweissung mit Verstärkungsrahmen auf einbetonierte Verankerungsplatten (mit Erlaubnis von ewz).



Bild B.3: Trafo 110 kV / 60 MVA – Erdbebenzone Z2 – Verankerungen (4 lösbare) mit Fahrrollen (mit Erlaubnis von axpo).



Bild B.4: Trafo 110 kV / 125 MVA – Erdbebenzone Z2 – Verankerungen (4 lösbare) mit Fahrrollen (mit Erlaubnis von axpo).



Bild B.5: Trafo 50 kV / 25 MVA– Erdbebenzone Z2 – Verankerung auf ein verstärktes bestehendes Fundament (mit Erlaubnis von energie thun).

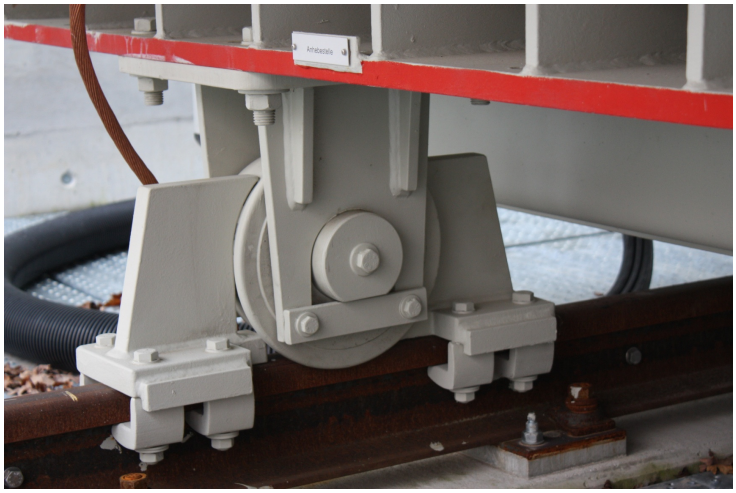


Bild B.6: Trafo 110 kV / 40 MVA – Erdbebenzone Z1 – Verankerung mit zwei Hemmschuhen pro Rolle. Es ist auf das Ausknicken in Querrichtung und die Stabilität der Schiene zu achten; NUR in der Erdbebenzone Z1 anwendbar (mit Erlaubnis von ekz).

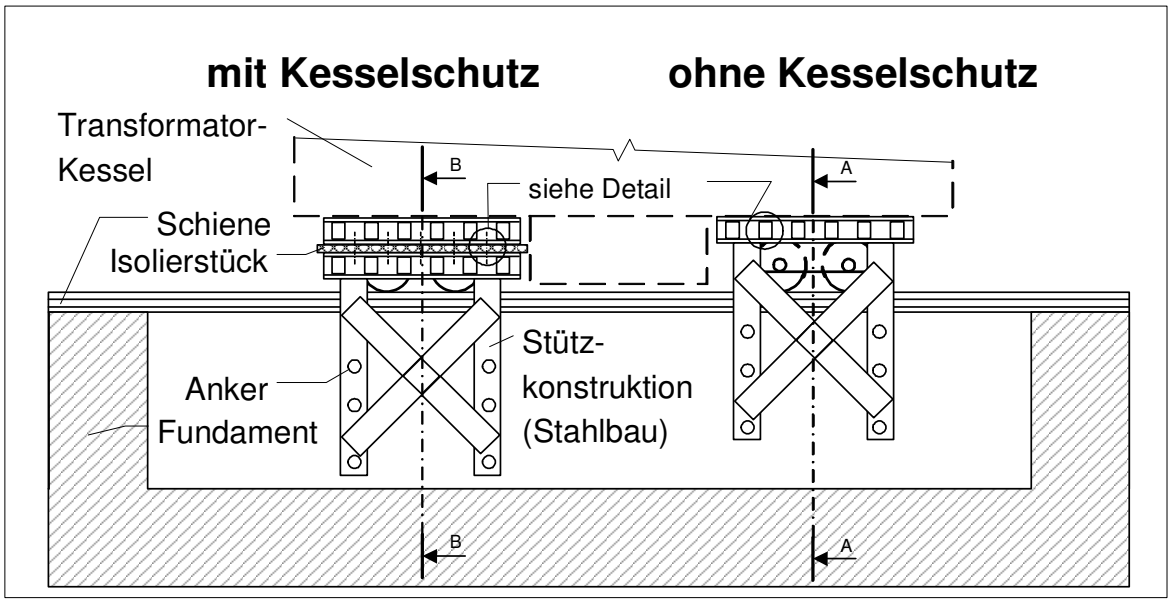


Bild B.7: Schematische Darstellung einer Verankerung für Transformatoren auf Schienen.

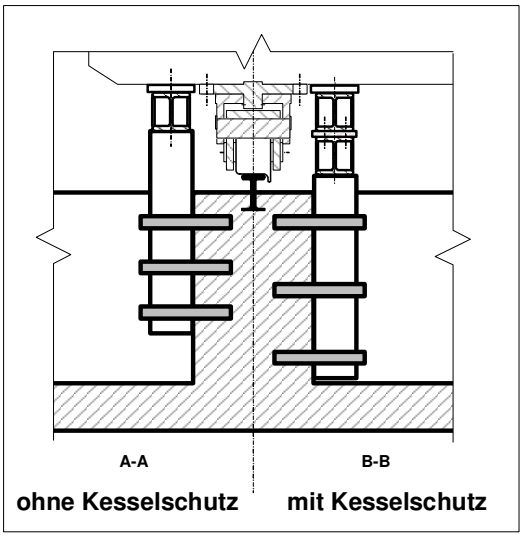


Bild B.8: Detail zu Bild B.7

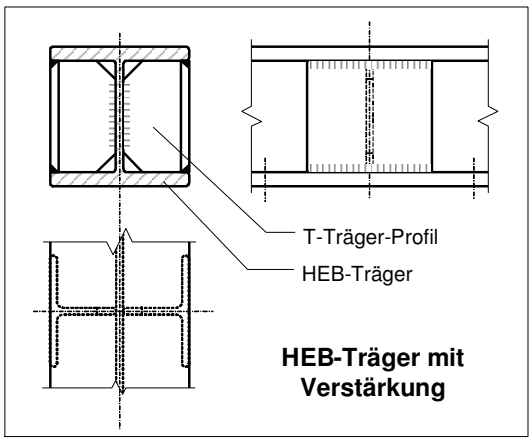


Bild B.9: Trägerverstärkung

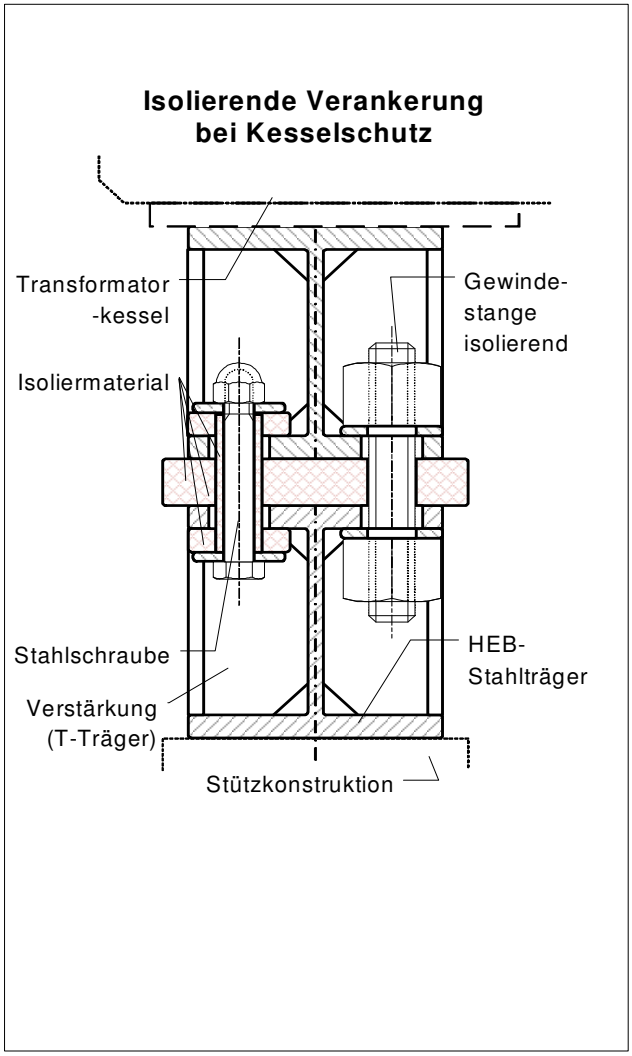


Bild B.10: Möglichkeiten für eine isolierende Verankerung

Anhang C: Ergänzende Ausführungen zum Losebedarf

Wie viel Lose in einem gegebenen Leiterseil vorhanden sein muss, hängt neben dessen Konfiguration von der Relativverschiebung ab, die sich bei einem Erdbeben zwischen den Anschlusspunkten der miteinander verbundenen Apparate ergibt. Diese Relativverschiebung hängt ihrerseits unmittelbar von den Verschiebungen der Anschlusspunkte ab. Diese Verschiebung – «Verschiebungsbedarf» genannt – ist stark von der Grundeigenfrequenz des betrachteten Apparates abhängig, die in der Regel, mit üblicher Stützkonstruktion, im Bereich von etwa 2 bis 4 Hz liegt. Massgebend ist die Grundeigenfrequenz für Schwingungen in Richtung der Leiterverbindungen. Flexible Unterbauten wirken sich insofern ungünstig aus, als sie die Grundeigenfrequenz verringern und damit den Verschiebungsbedarf der Leiteranschlusspunkte im Erdbebenfall deutlich vergrössern.

Die gemäss US-Norm IEEE Std 693-2005 [9] erforderliche Lose beträgt nach Gleichung (1) $1{,}5\,\Delta$, wobei Δ – äusserst konservativ – als Summe der Einzelverschiebungen zu berechnen wäre. Die vorliegende Richtlinie lässt aber zu, dass Δ mit Hilfe der klassischen SRSS-Regel («Square Root of the Sum of Squares») als Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate der Einzelverschiebungen berechnet wird. Diese weniger konservative Regelung stützt sich auf eine Publikation von Dastous und Pierre [13], deren Resultate auch in die US-Norm IEEE Std 1527-2006 [8] eingeflossen sind.

Die Einzelverschiebungen der Anschlusspunkte lassen sich im Erdbebenfall in Funktion der Apparate-Grundeigenfrequenz, der Erdbebenzone und der Baugrundklasse mit den üblichen Werkzeugen des Erdbebeningenieurwesens ermitteln, wobei eine äquivalente Dämpfung von 2 % der kritischen Dämpfung anzunehmen ist. Aus diesen Verschiebungswerten lassen sich dann die Werte für Δ mit Hilfe der SRSS-Regel einfach berechnen.

Werden keine Erdbebenberechnungen angestellt, können für «$1{,}5\,\Delta$» in Gleichung (1) näherungsweise die Werte der Tabelle 8 bzw. 9 verwendet werden, die in den meisten Fällen auf der sicheren Seite liegen und für die Bauwerksklasse III gelten. Diese Werte basieren auf der Tatsache, dass die Verschiebungen der Anschlusspunkte praktisch nur von der Grundschwingung des Apparates abhängen [14]. Die Verschiebungen lassen sich daher direkt aus dem Partizipationsfaktor und der frequenzabhängigen Spektralverschiebung bestimmen. Die Werte der Tabelle 8 und 9 gelten für einen angenommenen Partizipationsfaktor von 1,6, der gemäss [8] etwa 95 % der vorkommenden Fälle abdecken dürfte. Dies gilt nicht für Durchführungen von Transformatoren, bei denen sich bei der Berechnung der Endpunktverschiebungen Partizipationsfaktoren von 3 bis 4 ergeben können.

Die Werte der Tabelle 8 und 9 basieren auf einer Dämpfung von 2 %. Gleichzeitig wird von den Apparateverschiebungen ausgegangen, die sich ohne Leiterverbindungen ergäben, was auf der sicheren Seite liegt.

Anhang D: Rechenblatt zur Erdbebenberechnung

Rechenhilfe Verankerungskräfte und Losebedarf Datum: Seite 1

Unterwerk: ..... Spannungsebenen: ..... / .....

Gesuchsteller: ..... Projekt / Gesuch: .....

Erdbebeneinwirkung

Erdbebenzone	Z1	Z2	Z3a	Z3b
Bodenbeschleunigung a_{gd} [m/s^2]	0.6	1.0	1.3	1.6

Baugrundklasse(1)	A	B	C	D	E	F
Baugrundfaktor S	1.0	1.2	1.15	1.35	1.4	–(2)

(1) Die Baugrundklasse kann mit Hilfe der Tabelle 24 der Norm SIA 261 oder aber anhand einer Baugrundklassen-Karte bestimmt werden, sofern eine solche existiert (siehe unter: http://map.bafu.admin.ch).

(2) Die Baugrundklasse F erfordert eine von einem Spezialisten auszuführende seismische Standortstudie.

Bauwerksklasse (BWK)(3)	II	III
Bedeutungsfaktor γ_f	1.2	1.4

(3) Liegt die höchste Spannung des UW bei 220 kV oder höher, ist das UW zwingend der BWK III zuzuordnen. Ansonsten steht es dem Betreiber frei, die BWK II oder III zu wählen.

=> effektive Bodenbeschleunigung: $a_{gd} \, S \, \gamma_f$ = ... [m/s^2]

=> effektive Spektralbeschleunigung(4): $S_e = 3 \, a_{gd} \, S \, \gamma_f$ = ... [m/s^2]

(4) Zu verwenden für Transformatoren und Hochspannungsapparate, sofern keine genaueren Untersuchungen zu deren Grundeigenfrequenz vorliegen; die Resultate liegen immer auf der sicheren Seite. Ansonsten S_e mit Hilfe der Norm SIA 261, Paragraph 16.2, bestimmen.

Generelle Bemerkungen: .....

.....

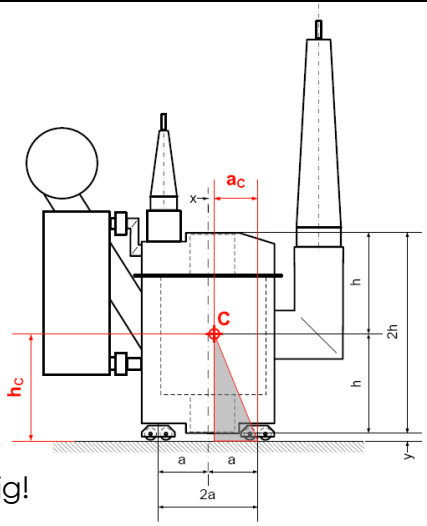
.....

.....

.....

Stempel:

Verankerungskräfte bei Transformatoren



Trafo-Bezeichnung: ……..…

Gesamtmasse in Betrieb m_{tot}: ……..…. [t]

Schwerpunktshöhe h_c: …….... [m]

minimale Horizontaldistanz a_c: ……..... [m]

=> Schlankheitsgrad s = h_c/a_c = …… [–]

falls 10 [m/s²] /S_e[5] < h_c/a_c: Abhebesicherung notwendig!

=> Abhebesicherung notwendig: ja / nein

Totale horizontale Erdbebeneinwirkung: H = m_{tot} [t] S_e [m/s²] [6] = ……..... [kN]

Kippmoment aus Erdbebeneinwirkung: M = 1.2 h_c [m] H [kN] [6, 7] = ……..…... [kNm]

Zugkraft infolge M [8]: Z = (M [kNm]/2a_c [m])–(½ m_{tot} [t] 10 [kN/t]) = …….. [kN]

[5] Wert berechnet auf Seite 1.

[6] Es handelt sich um elastische Grössen; bei den Festigkeitsnachweisen dürfen, wenn diese Grössen verwendet werden, die Material-Widerstandswerte um den Faktor q = 1.5 erhöht werden (vgl. Kapitel 3.4).

[7] Der Faktor 1.2 berücksichtigt näherungsweise, dass der Transformator teilweise eine Kippbewegung ausführt, so dass der Angriffspunkt der gesamten Erdbebenkraft höher als der Schwerpunkt zu liegen kommt.

[8] Vertikale Zugkraft infolge Kippmoment auf jeder Seite zu verankern. Berücksichtigt die destabilisierende Erdbebeneinwirkung und die stabilisierende Eigenlast (m_{tot} in Tonnen angeben, Annahme: g = 10 [m/s²]).

Verankerungskräfte bei Hochspannungsapparaten

Apparate-Bezeichnung: ……

Gesamtmasse in Betrieb m_{tot}: …….. [t]

Schwerpunktshöhe h_c: …… [m] (bzgl. Apparatefusspunkt)

Totale horizontale Erdbebeneinwirkung: H = m_{tot} [t] S_e [m/s²] [6] = ……..…….... [kN]

Kippmoment aus Erdbebeneinwirkung: M = 1.2 h_c [m] H [kN] [6, 7] = ……..…. [kNm]

[6] Es handelt sich um elastische Grössen; bei den Festigkeitsnachweisen dürfen, wenn diese Grössen verwendet werden, die Material-Widerstandswerte um den Faktor q = 1.5 erhöht werden (vgl. Kapitel 3.4).

[7] Der Faktor 1.2 berücksichtigt näherungsweise, dass der Hochspannungsapparat teilweise eine Kippbewegung ausführt, so dass der Angriffspunkt der gesamten Erdbebenkraft höher als der Schwerpunkt zu liegen kommt.

Bemerkungen: ……

……..……..

……..……..

Losebedarf in Leiterseilen (gültig für 50 Hz-Apparate)

Miteinander verbundene Apparate:

Apparat 1: ..... Apparat 2: .....

Geschätzte Eigenfrequenzen f_{0i} [9]: Apparat 1: f_{01} = ... [Hz]

Apparat 2: f_{02} = ... [Hz]

[9] Ohne genauere Untersuchungen sind bei Verwendung der Tabelle 8 der ESTI-Richtlinie folgende Annahmen für die Eigenfrequenzen zulässig:
- Leistungsschalter, Strom- und Spannungswandler sowie kombinierte Messgruppen: 2 Hz
- Stützisolatoren und Pantographentrenner: 3 Hz
- Überspannungsableiter und Drehtrenner: 4 Hz

Eingang in Tabelle 8 mit den Eingangsparametern f_{01}, f_{02}, Baugrundklasse und Erdbebenzone:
Erforderliche Lose [10] = 1.5 Δ = ... [mm]

[10] Bedeutung der erforderlichen Lose (1.5 Δ): Es ist sicherzustellen, dass sich die Leiteranschlusspunkte um diesen Betrag voneinander entfernen können, bevor das Leiterseil straff wird.

Achtung: Zulässigkeit der erforderlichen Lose bei gegebener Leiterkonfiguration, z.B. bezüglich Einhaltung elektrischer Mindestabstände, ist zu überprüfen!

Falls problematisch: Leiterkonfiguration ändern, oder aber den Losebedarf mit Hilfe von Berechnungen oder Messungen der Apparate-Grundeigenfrequenzen verfeinert bestimmen (ergibt oft etwas geringeren Losebedarf).

Tabelle 8 der ESTI-Richtlinie: notwendiger Losebedarf "1.5 Δ" für die BWK III [11].

Apparate-Grundeigenfre-frequenzen f_{01} und f_{02}	Baugrund-klasse	Zone Z1 1.5 Δ [mm]	Zone Z2 1.5 Δ [mm]	Zone Z3a 1.5 Δ [mm]	Zone Z3b 1.5 Δ [mm]
2 Hz – 2 Hz	A B, C D, E	45 65 75	75 110 125	95 140 165	115 170 200
2 Hz – 3 Hz	A B, C D, E	35 50 60	60 85 100	80 110 130	95 135 160
2 Hz – 4 Hz	A B, C D, E	35 50 55	55 80 95	70 105 120	85 125 145
3 Hz – 3 Hz	A B, C D, E	30 35 40	45 55 65	60 70 85	75 90 100
3 Hz – 4 Hz	A B, C D, E	30 30 30	35 45 50	45 55 65	60 70 80

[11] – Für die BWK II die Tabellenwerte mit 0.85 multiplizieren, ohne jedoch 30 mm zu unterschreiten
– Bei aussergewöhnlich hohen Unterkonstruktionen Tabellenwerte um 20 % erhöhen

Losebedarf in Leiterseilen (gültig für 16,7 Hz-Apparate)

Miteinander verbundene Apparate:

Apparat 1: ..... Apparat 2: .....

Geschätzte Eigenfrequenzen f_{0i} [12]: Apparat 1: f_{01} = ... [Hz]

Apparat 2: f_{02} = ... [Hz]

[12] Ohne genauere Untersuchungen sind bei Verwendung der Tabelle 9 der ESTI-Richtlinie folgende Annahmen für die Eigenfrequenzen zulässig:
- Leistungsschalter, Strom- und Spannungswandler sowie kombinierte Messgruppen: 2,5 Hz
- Stützisolatoren und Pantographentrenner: 3 Hz
- Überspannungsableiter und Drehtrenner: 4 Hz

Eingang in Tabelle 9 mit den Eingangsparametern f_{01}, f_{02}, Baugrundklasse und Erdbebenzone:
Erforderliche Lose [10] = 1.5 Δ = ... [mm]

[10] Bedeutung der erforderlichen Lose (1.5 Δ): Es ist sicherzustellen, dass sich die Leiteranschlusspunkte um diesen Betrag voneinander entfernen können, bevor das Leiterseil straff wird.

Achtung: Zulässigkeit der erforderlichen Lose bei gegebener Leiterkonfiguration, z.B. bezüglich Einhaltung elektrischer Mindestabstände, ist zu überprüfen!

Falls problematisch: Leiterkonfiguration ändern, oder aber den Losebedarf mit Hilfe von Berechnungen oder Messungen der Apparate-Grundeigenfrequenzen verfeinert bestimmen (ergibt oft etwas geringeren Losebedarf).

Tabelle 9 der ESTI-Richtlinie: notwendiger Losebedarf "1.5 Δ" für die BWK II [11].

Apparate-Grundeigen-frequenzen f_{01} und f_{02}	Baugrund-klasse	Zone Z1 1.5 Δ [mm]	Zone Z2 1.5 Δ [mm]	Zone Z3a 1.5 Δ [mm]	Zone Z3b 1.5 Δ [mm]
2,5 Hz – 2,5 Hz	A B, C D, E	30 40 45	50 60 70	65 80 90	80 95 110
2,5 Hz – 3 Hz	A B, C D, E	30 35 40	45 55 60	55 70 80	70 85 95
2,5 Hz – 4 Hz	A B, C D, E	30 30 35	40 45 55	50 60 70	60 75 85
3 Hz – 3 Hz	A B, C D, E	30 30 30	35 45 50	45 55 65	55 65 80
3 Hz – 4 Hz	A B, C D, E	30 30 30	30 35 40	40 45 55	45 55 65

[11] – Bei aussergewöhnlich hohen Unterkonstruktionen Tabellenwerte um 20 % erhöhen

Rechenblatt zur Erdbebenberechnung – ausgefülltes Beispiel (Seite 1)

Rechenhilfe Verankerungskräfte und Losebedarf Datum: 4.3.2012 Seite 1

Unterwerk: Benken (SG) Spannungsebenen: 380 / 220 kV

Gesuchsteller: ewz Projekt / Gesuch: xyz

Erdbebeneinwirkung

Erdbebenzone	Z1	Z2	Z3a	Z3b
Bodenbeschleunigung a_{gd} [m/s²]	0.6	1.0	1.3	1.6

Baugrundklasse[1]	A	B	C	D	E	F
Baugrundfaktor S	1.0	1.2	1.15	1.35	1.4	–[2]

(1) Die Baugrundklasse kann mit Hilfe der Tabelle 24 der Norm SIA 261 oder aber anhand einer Baugrundklassen-Karte bestimmt werden, sofern eine solche existiert (siehe unter: http://map.bafu.admin.ch).

(2) Die Baugrundklasse F erfordert eine von einem Spezialisten auszuführende seismische Standortstudie.

Bauwerksklasse (BWK)[3]	II	III
Bedeutungsfaktor γ_f	1.2	1.4

(3) Liegt die höchste Spannung des UW bei 220 kV oder höher, ist das UW zwingend der BWK III zuzuordnen. Ansonsten steht es dem Betreiber frei, die BWK II oder III zu wählen.

=> effektive Bodenbeschleunigung: $a_{gd} S \gamma_f$ = 1,89 [m/s²]

=> effektive Spektralbeschleunigung[4]: $S_e = 3\, a_{gd} S \gamma_f$ = 5,67 [m/s²]

(4) Zu verwenden für Transformatoren und Hochspannungsapparate, sofern keine genaueren Untersuchungen zu deren Grundeigenfrequenz vorliegen; die Resultate liegen immer auf der sicheren Seite. Ansonsten S_e mit Hilfe der Norm SIA 261, Paragraph 16.2, bestimmen.

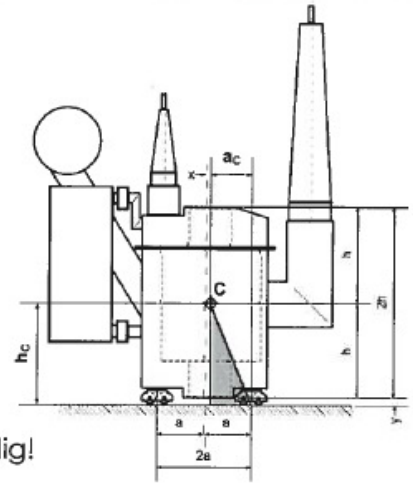
Generelle Bemerkungen: Hohe Unterbaustrukturen wegen Überschwemmungsgefahr

Stempel:

Rechenblatt zur Erdbebenberechnung – ausgefülltes Beispiel (Seite 2)

Rechenhilfe Verankerungskräfte und Losebedarf Datum: 4.3.2012 Seite 2

Verankerungskräfte bei Transformatoren



Trafo-Bezeichnung: XY 1000 MVA

Gesamtmasse in Betrieb m_{tot}: 160 [t]

Schwerpunktshöhe h_c: 2.4 (geschätzt) [m]

minimale Horizontaldistanz a_c: 0.72 [m]

=> Schlankheitsgrad $s = h_c/a_c$ = ~3.3 [–]

falls 10 [m/s²] /S_e[5] < h_c/a_c: Abhebesicherung notwendig!

=> Abhebesicherung notwendig: (ja) / nein

Totale horizontale Erdbebeneinwirkung: $H = m_{tot}$ [t] S_e [m/s²] [6] = ~910 [kN]

Kippmoment aus Erdbebeneinwirkung: $M = 1.2\ h_c$ [m] H [kN] [6, 7] = 2'600 [kNm]

Zugkraft infolge M [8]: Z = (M [kNm]/2a_c [m])–(½ m_{tot} [t] 10 [kN/t]) = ~1'000 [kN]

(5) Wert berechnet auf Seite 1.
(6) Es handelt sich um elastische Grössen; bei den Festigkeitsnachweisen dürfen, wenn diese Grössen verwendet werden, die Material-Widerstandswerte um den Faktor q = 1.5 erhöht werden (vgl. Kapitel 3.4).
(7) Der Faktor 1.2 berücksichtigt näherungsweise, dass der Transformator teilweise eine Kippbewegung ausführt, so dass der Angriffspunkt der gesamten Erdbebenkraft höher als der Schwerpunkt zu liegen kommt.
(8) Vertikale Zugkraft infolge Kippmoment auf jeder Seite zu verankern. Berücksichtigt die destabilisierende Erdbebeneinwirkung und die stabilisierende Eigenlast (m_{tot} in Tonnen angeben, Annahme: g = 10 [m/s²]).

Verankerungskräfte bei Hochspannungsapparaten

Apparate-Bezeichnung: Stromwandler XY (220 kV)

Gesamtmasse in Betrieb m_{tot}: 1,0 [t]

Schwerpunktshöhe h_c: 3,57 [m] (bzgl. Apparatefusspunkt)

Totale horizontale Erdbebeneinwirkung: $H = m_{tot}$ [t] S_e [m/s²] [6] = 5,67 [kN]

Kippmoment aus Erdbebeneinwirkung: $M = 1.2\ h_c$ [m] H [kN] [6, 7] = 24,3 [kNm]

(6) Es handelt sich um elastische Grössen; bei den Festigkeitsnachweisen dürfen, wenn diese Grössen verwendet werden, die Material-Widerstandswerte um den Faktor q = 1.5 erhöht werden (vgl. Kapitel 3.4).
(7) Der Faktor 1.2 berücksichtigt näherungsweise, dass der Hochspannungsapparat teilweise eine Kippbewegung ausführt, so dass der Angriffspunkt der gesamten Erdbebenkraft höher als der Schwerpunkt zu liegen kommt.

Bemerkungen: .....

.....

.....

Rechenblatt zur Erdbebenberechnung – ausgefülltes Beispiel (Seite 3)

Rechenhilfe Verankerungskräfte und Losebedarf Datum: 4.3.2012 Seite 3

Losebedarf in Leiterseilen (gültig für 50 Hz-Apparate)

Miteinander verbundene Apparate:

Apparat 1: Stützisolator Apparat 2: Leistungsschalter

Geschätzte Eigenfrequenzen f_{0i} [9]: Apparat 1: f_{01} = 3 [Hz]

Apparat 2: f_{02} = 2 [Hz]

[9] Ohne genauere Untersuchungen sind bei Verwendung der Tabelle 8 der ESTI-Richtlinie folgende Annahmen für die Eigenfrequenzen zulässig:
- Leistungsschalter, Strom- und Spannungswandler sowie kombinierte Messgruppen: 2 Hz
- Stützisolatoren und Pantographentrenner: 3 Hz
- Überspannungsableiter und Drehtrenner: 4 Hz

Eingang in Tabelle 8 mit den Eingangsparametern f_{01}, f_{02}, Baugrundklasse und Erdbebenzone:

Erforderliche Lose [10] = 1.5 Δ = 1,2 · 100 = 120 [mm]

[13] Bedeutung der erforderlichen Lose (1.5 Δ): Es ist sicherzustellen, dass sich die Leiteranschlusspunkte um diesen Betrag voneinander entfernen können, bevor das Leiterseil straff wird.

Achtung: Zulässigkeit der erforderlichen Lose bei gegebener Leiterkonfiguration, z.B. bezüglich Einhaltung elektrischer Mindestabstände, ist zu überprüfen!

Falls problematisch: Leiterkonfiguration ändern, oder aber den Losebedarf mit Hilfe von Berechnungen oder Messungen der Apparate-Grundeigenfrequenzen verfeinert bestimmen (ergibt oft etwas geringeren Losebedarf).

Tabelle 8 der ESTI-Richtlinie: notwendiger Losebedarf "1.5 Δ" für die BWK III [11].

Apparate-Grundeigenfre-frequenzen f_{01} und f_{02}	Baugrund-klasse	Zone Z1 1.5 Δ [mm]	Zone Z2 1.5 Δ [mm]	Zone Z3a 1.5 Δ [mm]	Zone Z3b 1.5 Δ [mm]
2 Hz – 2 Hz	A	45	75	95	115
	B, C	65	110	140	170
	D, E	75	125	165	200
2 Hz – 3 Hz	A	35	60	80	95
	B, C	50	85	110	135
	D, E	60	100	130	160
2 Hz – 4 Hz	A	35	55	70	85
	B, C	50	80	105	125
	D, E	55	95	120	145
3 Hz – 3 Hz	A	30	45	60	75
	B, C	35	55	70	90
	D, E	40	65	85	100
3 Hz – 4 Hz	A	30	35	45	60
	B, C	30	45	55	70
	D, E	30	50	65	80

[11] – Für die BWK II die Tabellenwerte mit 0.85 multiplizieren, ohne jedoch 30 mm zu unterschreiten
– Bei aussergewöhnlich hohen Unterkonstruktionen Tabellenwerte um 20 % erhöhen

Anhang E: Beispiele zur Sicherung von Sekundärsystemen

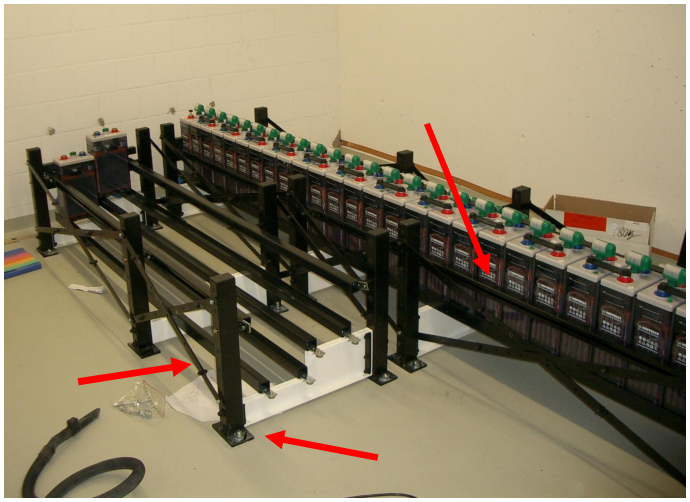


Bild E.1 *Kipp- und Absturzsicherung von Notstrombatterien im UW Münchwilen (Axpo AG): Füsse der Gestelle diagonal verstrebt und am Boden festgeschraubt; horizontale Profile verhindern ein Abkippen der Batterien.*



Bild E.2 *UW Münchwilen (Axpo AG): Gewellte Plastikeinlagen zwischen benachbarten Batterien verhindern das Gegeneinanderschlagen.*

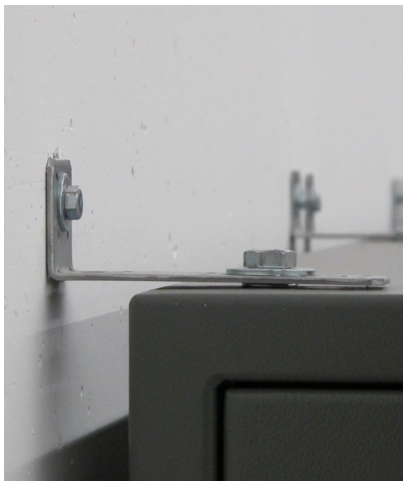



Bild E.3/E.4: Sicherung von Steuerschränken mit Stahlwinkeln an Wand(axpo AG)



Bild E.5: Sicherung von Steuerschränken mit Aufhängung (Krisenorganisation Kanton Basel-Stadt)




Bilder E.6/E.7: Sicherung von Steuerschränken in Raummitte bis an die Wand (axpo AG)

Anhang F: Nutzungsvereinbarung

Einleitung

Eine erdbebengerechte Projektierung setzt klare Anforderungen des Bauherren voraus sowie eine frühzeitige Zusammenarbeit der relevanten Planer. Gemäss Ordnung SIA 112 (2014) werden mit der Projektdefinition und dem Projektpflichtenheft die rechtzeitige und grösstmögliche Klärung der Ziele, die der Bauherr verfolgt sowie die Definition der Anforderungen an das Bauwerk sichergestellt.

Die Nutzungsvereinbarung bildet ein Teil des Projketpflichtenheftes und hält die Nutzungsanforderungen des Bauherren an das Bauwerk fest (siehe SIA 260). Sie ist aufgrund eines Dialogs zwischen Bauherrschaft und Projektverfassenden zu erstellen. Es liegt in der Verantwortung des Bauherren in der Phase 2 „Vorstudien" die Thematik Erdbebenschutz im Projektpflichtenheft zu integrieren und sowohl die Anforderungen an die Tragstruktur als auch an die sekundären Bauteile, Einrichtungen und Installationen festzuhalten. Die entsprechenden Fachplanerleistungen sind projektspezifisch auszuschreiben. Aufbauend auf dem Projektpflichtenheft ist die Nutzungsvereinbarung gemäss SIA 103 (2014) in der Phase 31 „Vorprojekt" durch den Gesamtleiter, bzw. den Fachplanern zu erstellen und vom Auftraggeber zu genehmigen. Weiter ist die Nutzungsvereinbarung dem Projektstand entsprechend nachzuführen und wenn nötig beim Abschluss jeder Teilphase erneut zu genehmigen.

Relevante Aspekte

Für einen zweckmässigen und phasengerechten Einsatz der Nutzungsvereinbarung im Projekt sind folgende generelle Aspekte wichtig: Stand (Projektphase, Status, Version, Änderungsverzeichnis, Freigabe, Verteiler,…), Verweise auf Grundlagen (ESTI-Richtlinie), Beschrieb des Bauvorhaben, Unterschriften (Bauherr, Gesamtleiter, Bauingenieur, weitere Planer,…).

Bei Anlagen der elektrischen Energieverteilung sind für die Einhaltung der Bestimmungen dieser Richtlinie folgende Aspekte relevant und in der Nutzungsvereinbarung zu definieren (aufgrund der Gefährdung und der Bedeutung projektspezifisch zu ergänzen):

- Bauwerksklasse (Begründung gemäss ESTI-Richtlinie), Erdbebenzone, Baugrund (Baugrundklasse, geologische Untersuchungen oder seismische Mikrozonierung)
- Erdbebengerechter Entwurf sowie konzeptionelle und konstruktive Massnahmen (inkl. einfacher Grundriss und Aufriss mit den stabilisierenden Elementen)
- Sekundäre Bauteile, Installationen und Einrichtungen: Definition der relevanten Bauteile inkl. Begründung sowie Festlegung der Zuständigkeiten in Bezug auf Bemessung, Ausschreibung, Kontrolle und Abnahme (z.B. anhand einer Massnahmen- und Zuständigkeitstabelle)
- Bei Bauwerksklasse III, konkrete Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit für die Gewährleistung der Funktionstüchtigkeit nach einem Erdbeben (für das Gebäude und die relevanten Elemente des Gesamtsystems)

Bei Erweiterungen, Umbauten oder Instandsetzungen von bestehenden Anlagen sind weiterführende Überlegungen nötig zur Definition der Anforderungen und zur Festlegung der relevanten Grundlagen gemäss Normenreihe SIA 269 ff (bzw. SIA 269/8) für die Erhaltung von Tragwerken.

Weiterführende Aspekte sind in der Projektbasis oder in Berichten festzuhalten.