



Richtlinie

Erdbebensicherheit der elektrischen Energieverteilung in der Schweiz



Gültig ab: 01.10.2012
Aktualisiert: 01.12.2020

Impressum

Herausgeber: Eidgenössisches Starkstrominspektorat ESTI, 8320 Fehraltorf
Bundesamt für Verkehr, 3003 Bern

Autorengruppe: Martin Koller (Résonance Ingénieurs-Conseils SA)
Pia Hannewald (Résonance Ingénieurs-Conseils SA)
Sven Heunert (Bundesamt für Umwelt BAFU)
Ingo Schulz (AxpO AG)

unter Mitwirkung von: Axpo, BAV, ESTI, ewz, IWB und SBB

Dokumentname: ESTI_248_1220_d (veröffentlicht als pdf-Datei)

Download unter: www.esti.admin.ch Dokumentation – ESTI-Weisungen
www.bav.admin.ch Rechtliches – Richtlinien

Sprachen: 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. Eine erneute Revision ist am 1. Dezember 2020 in Kraft getreten. Diese Revision berücksichtigt die Teilrevision der Norm SIA 261 (2020) hinsichtlich der Erdbebeneinwirkung und führt neue Erkenntnisse zum Losebedarf (Kap. 4.3) ein.

Eidgenössisches Starkstrominspektorat



Daniel Otti, Geschäftsführer

Bundesamt für Verkehr
Abteilung Sicherheit



Dr. Rudolf Sperlich, 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
V 3.1	01.12.2020	Sven Heunert	Norm SIA 261 (2020), Losebedarf

Inhaltsverzeichnis

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.....	11
4.	Bestimmungen für die Erdbebensicherheit der Anlagentechnik.....	11
	4.1 Erdbebensicherheit von Transformatoren.....	12
	4.2 Erdbebensicherheit von Hochspannungsapparaten	14
	4.3 Erdbebengerechte Leiterverbindungen	15
	4.4 Anlagen der Energieversorgung in Schrankbauweise	20
	4.5 Erdbebensicherheit von Sekundärsystemen und anderen Einbauten.....	20
5.	Bestimmungen für die Erdbebensicherheit von Gebäuden	21
6.	Bestimmungen für die Erdbebensicherheit von Leitungen.....	21
	6.1 Freileitungen	21
	6.2 Kabelleitungen.....	21
7.	Empfehlungen für «wichtige» bestehende Unterwerke	22
8.	Quellen	23
Anhang A	Erdbebenzonen gemäss SIA 261	24
Anhang B	Verankerung von Transformatoren	25
Anhang C	Ergänzende Erläuterungen zum Losebedarf	28
Anhang D	Rechenblätter zur Erdbebenberechnung.....	30
Anhang E	Beispiele zur Sicherung von Sekundärsystemen	36
Anhang F	Nutzungsvereinbarung.....	38
Anhang G	Ausführungsplan mit Informationen zum Losebedarf.....	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 SF₆-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 Bauprojekte, die eine Bundesbewilligung benötigen, nach den einschlägigen Normen erdbebensicher erstellt oder unterhalten werden. Bei Neubauten gilt die Normenreihe SIA 260 ff, insbesondere die Norm SIA 261 [3]. Bei der Erhaltung von bestehenden Tragwerken gilt die Normenreihe SIA 269 ff, insbesondere die Norm SIA 269/8 [11], nach der die Erdbebensicherheit zu überprüfen und notwendigenfalls zu verbessern ist, sofern dies verhältnismässig ist.

Im Bereich der elektrischen Energieversorgung im höheren Spannungsbereich fehlten früher die nötigen konkreten Grundlagen, die den zuständigen Aufsichtsbehörden (ESTI bzw. BAV) erlaubt hätten, die erwähnte Regelung durchzusetzen. Die Tragwerksnormen 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 schliesst diese Lücke; 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.).

Da Freileitungen Erdbeben mehrheitlich gut überstehen, enthält die Richtlinie besondere Vorschriften nur für die wichtigsten Freileitungen.

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⁾
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)

1.3 Plangenehmigungsverfahren

Im Rahmen des Plangenehmigungsverfahrens, vor Baubeginn, ist der Aufsichtsbehörde (ESTI oder BAV) vom Gesuchsteller in den Gesuchsformularen zu bestätigen, dass die Bestimmungen der vorliegenden Richtlinie, vorbehältlich zulässiger Abweichungen, vollständig eingehalten werden.

Bei Bauvorhaben an Gebäuden von Unterwerken (Neubauten und Erhaltungsprojekte) ist die Nutzungsvereinbarung gemäss der Norm SIA 260 (Paragraf 2.2) einzureichen. Der Anhang F zeigt, welche Aspekte für die Erdbebensicherheit relevant 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 die Pläne und die Nachweise für die Verankerung der Transformatoren vor Montage einzureichen. Der Einsatz von zertifizierten Transformatoren (Tab. 5) oder Hochspannungsapparaten (Tab. 7) muss im Rahmen des Gesuches aufgezeigt werden und bei Inspektionen ersichtlich bzw. belegbar sein; idealerweise anhand des Typenschildes bzw. anhand des Datenblatts oder eines rechnerischen Nachweises. Der ermittelte Losebedarf ist im Rahmen des Gesuches aufzuzeigen und die Ausführungspläne sind spätestens vor Montagebeginn einzureichen (siehe Kap. 4.3 sowie Anhänge D und G). Weitere Unterlagen und Nachweise 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 den 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 in einem Bereich zwischen 0,07 s und 0,5 s, der je nach Baugrundklasse variiert.

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 gemäss der Norm SIA 261 in Bezug auf Erdbeben anhand ihrer Bedeutung 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 Bauwerken mit einer lebenswichtigen Infrastrukturfunktion.

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 von Hochspannungsapparaten: Verschiedene IEC-Publikationen ([5], [6], [7]) definieren eine seismische Qualifikation von Hochspannungsapparaten. Dabei werden drei Qualifikationsstufen unterschieden: niedrig («low»), mittel («moderate») und hoch («high»), ehemals «AF2», «AF3» bzw. «AF5» genannt. Diese Stufen entsprechen maximalen Bodenbeschleunigungen (in den IEC-Publikationen «Zero Period Acceleration ZPA» genannt) von 1, 2,5 bzw. 5 m/s². Als seismisch qualifiziert gilt ein Apparat, wenn er das der jeweiligen Qualifikationsstufe entsprechende Antwortspektrum (in den IEC Publikationen Required Response Spektrum RRS genannt) 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, Kapitel 16, definiert für die Schweiz fünf Erdbebenzonen: Z1a, Z1b, Z2, Z3a und Z3b (Anhang A). 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. Die Karte der Erdbebenzonen ist unter <https://map.geo.admin.ch> (Stichwort Erdbebenzonen) abrufbar.

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

Erdbebenzone	Z1a	Z1b	Z2	Z3a	Z3b
SIA 261-Referenzwert: a_{gd}	0,6 m/s ²	0,8 m/s ²	1,0 m/s ²	1,3 m/s ²	1,6 m/s ²

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 nimmt für die Baugrundklassen A bis E Werte von 1,00 bis 1,70 an (siehe Tabelle 3). Für die (seltene) Baugrundklasse F ist der Wert von S mithilfe einer spektralen Standortstudie zu bestimmen.

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

Baugrundklasse	A	B	C	D	E	F
Baugrundfaktor S	1,00	1,20	1,45	1,70	1,70	-

Unter <https://map.geo.admin.ch> (Stichwort Seismische Baugrundklasse) sind für gewisse Regionen der Schweiz Karten der Baugrundklassen abrufbar.

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, ist diese zu verwenden. 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 Bedeutungsbeiwert γ_f von 1,2 beziehungsweise 1,5 zu multiplizieren (Tabelle 4).

Tabelle 4 Bedeutungsbeiwerte γ_f in Abhängigkeit der Bauwerksklasse.

Bauwerksklasse	I	II	III
Bedeutungsbeiwert γ_f	1,0	1,2	1,5

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, in die BWK III einzuteilen; damit sind die Referenzwerte der Tabelle 2 mit dem Bedeutungsbeiwert γ_f von 1,5 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 1,70 (Tabelle 3) und dem maximalen Bedeutungsfaktor 1,5 (Tabelle 4) kann sich somit in der Erdbebenzone der höchsten Gefährdung, Z3b, eine maximale Bodenbeschleunigung von 4,1 m/s² ergeben.

3.4 Verhaltensbeiwert

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.

Die Abhebe- und Kippnachweise von Transformatoren, Hochspannungsapparaten, Schaltschränken etc. sind in Anlehnung an die Norm SIA 261 [3] mit $q = 1,0$ zu führen. Für Festigkeitsnachweise, z.B. von Verankerungsbolzen, darf aber zur Berücksichtigung der Überfestigkeit ein Verhaltensbeiwert von $q = 1,5$ angesetzt werden (vgl. Rechenbeispiel im Anhang D).

Bei Gebäuden sind die Verhaltensbeiwerte gemäss den Tragwerksnormen des SIA anzuwenden.

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 4.4 und 4.5, auf Unterwerke in luftisolierter Technik und Transformatorenstationen. Die in den Kapiteln 4.1, 4.2 und 4.3. 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 SF₆-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 SF₆-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 in der Höhe relativ grosse Massen 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 unverankerten 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. Die wichtige Problematik ausreichender Lose wird in Kapitel 4.3 geregelt. Im Anhang D befinden sich Rechenblätter, mit dessen Hilfe die Verankerungskräfte bei Transformatoren und Hochspannungsapparaten sowie der Losebedarf in den Leiterseilen gemäss Tabelle 8 bestimmt werden können. Kapitel 4.4 ist den Anlagen der Energieversorgung in Schrankbauweise gewidmet und Kapitel 4.5 behandelt die Erdbebensicherheit der Sekundärsysteme.

Bemerkung: Spezielle Typen von Unterwerken (wie z.B. fahrbare 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. Der definitive Einsatz von Reservetransformatoren ist fallspezifisch im Plangenehmigungsverfahren zu erläutern.

Prinzipiell ist anzumerken, dass ein Transformator umso kippgefährdeter ist, umso schlanker er ist, das heisst, je grösser das Verhältnis zwischen Schwerpunkthöhe und Abstand vom Schwerpunkt zur nächstgelegenen Kante ist.

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.

Tabelle 5 Erdbebenbestimmungen für Transformatoren. Die angegebenen Werte der Spektralbeschleunigung ¹⁾ gelten für die Bauwerksklasse III ($\gamma_f = 1,5$) und für die ungünstigsten Baugrundklassen D und E; für andere Baugrundklassen dürfen die Werte der Tabelle 6 entnommen werden.

Zone	vom Hersteller zu verlangendes Erdbebenzertifikat, falls Leistung > 2,5 MVA ¹⁾	Transformatoren aller Spannungsebenen Verankerung bezüglich	
	für Spektralbeschleunigung ²⁾ von	Abscheren bzw. Wegrollen	Abheben
Z3b	12,2 m/s ²	rechnerischer Nachweis erforderlich	
Z3a	10,0 m/s ²		
Z2	7,7 m/s ²		
Z1b	6,1 m/s ²		
Z1a	4,6 m/s ²	für Spannungen ≥ 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz)	
		rechnerischer Nachweis erforderlich	konstruktive Abhebesicherung erforderlich
		sonst immer mindestens	
		konstruktive Abscher- bzw. Wegrollsicherung erforderlich	konstruktive Abhebesicherung empfohlen

¹⁾ Sind Transformatoren der Bauwerksklasse II zugeteilt (Normalfall im Eisenbahnbereich), ist ein Erdbebenzertifikat für eine mit dem Faktor 0,8 (1,2/1,5) multiplizierte (reduzierte) Spektralbeschleunigung zu verlangen.

²⁾ Für die Baugrundklassen A, B und C können die geringeren Werte der Tabelle 6 verwendet werden.

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 (Tabelle 6) 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 schwingungs isoliert 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 6 Effektive Spektralbeschleunigungen (3-fache maximale Bodenbeschleunigung) in Abhängigkeit der Baugrundklasse, die beim Fehlen genauerer Berechnungen bei Transformatoren und Hochspannungsapparaten für die BWK III ($\gamma_f = 1,5$) zur Berechnung der Verankerungskräfte anzusetzen sind.

Erdbebenzone	Z1a	Z1b	Z2	Z3a	Z3b
Baugrundklasse A	2,7 m/s ²	3,6 m/s ²	4,5 m/s ²	5,9 m/s ²	7,2 m/s ²
Baugrundklasse B	3,2 m/s ²	4,3 m/s ²	5,4 m/s ²	7,0 m/s ²	8,6 m/s ²
Baugrundklasse C	3,9 m/s ²	5,2 m/s ²	6,5 m/s ²	8,5 m/s ²	10,4 m/s ²
Baugrundklassen D und E	4,6 m/s ²	6,1 m/s ²	7,7 m/s ²	10,0 m/s ²	12,2 m/s ²

Werden Transformatoren mit Stromschiene (z. B. GIL-Ausführung) angeschlossen, sind besondere Abklärungen bezüglich möglicher differentieller Verschiebungen der Anschlusspunkte vorzunehmen. Sind die verbundenen Komponenten korrekt verankert, ist nur bei schwierigen geotechnischen Verhältnissen mit relevanten differentiellen Verschiebungen zu rechnen.

4.2 Erdbebensicherheit von Hochspannungsapparaten

Für alle Hochspannungsapparate mit Spannungen von 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) oder höher wird in Abhängigkeit der Erdbebenzone eine zertifizierte Erdbebenqualifikation gemäss IEC [5, 6, 7] verlangt. Die Bestimmungen für Hochspannungsapparate sind in der Tabelle 7 definiert. Die Qualifikation für «moderate» Erdbebeneinwirkung entspricht einer maximalen Bodenbeschleunigung von 2,5 m/s². Die Qualifikation für «hohe» Erdbebeneinwirkung entspricht einer maximalen Bodenbeschleunigung von 5,0 m/s².

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

Für Apparate zwischen 110 kV (50 Hz) und < 220 kV (50 Hz) wird in den Zonen Z2 und Z3a eine Qualifikation für «moderate» und in der Zone Z3b für «hohe» Erdbebeneinwirkung empfohlen, sofern diese Apparate in die Bauwerksklasse II eingeteilt sind.

Tabelle 7 Erdbebenbestimmungen für Hochspannungsapparate mit Spannungen von 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) oder höher.

	Erdbebenqualifikation nach IEC [5, 6, 7] für	Unterbauten und Verankerung bezüglich Kippen und Abscheren
Zonen Z3b und Z3a	«hohe» Erdbebeneinwirkung	rechnerischer Nachweis erforderlich
Zonen Z2, Z1b und Z1a	«moderate» Erdbebeneinwirkung	rechnerischer Nachweis erforderlich

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 (Tabelle 6) 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 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 mit Spannungen zwischen 110 kV (50 Hz) und niedriger als 220 kV (50 Hz) haben sie die Bedeutung von Empfehlungen.

Die Leiterverbindung zwischen zwei Hochspannungsapparaten muss in der Regel 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. Ergänzende Erläuterungen zum Losebedarf sind im Anhang C zu finden.

Die in der Schweiz am weitesten verbreitete Leiterkonfiguration, oft Kettenlinie genannt, ist in Bild 1a) zu sehen. Eine leichte Abwandlung dieser Konfiguration, die einzig in einem Höhenversatz zwischen den Anschlusspunkten besteht, wird in Bild 1b) dargestellt.

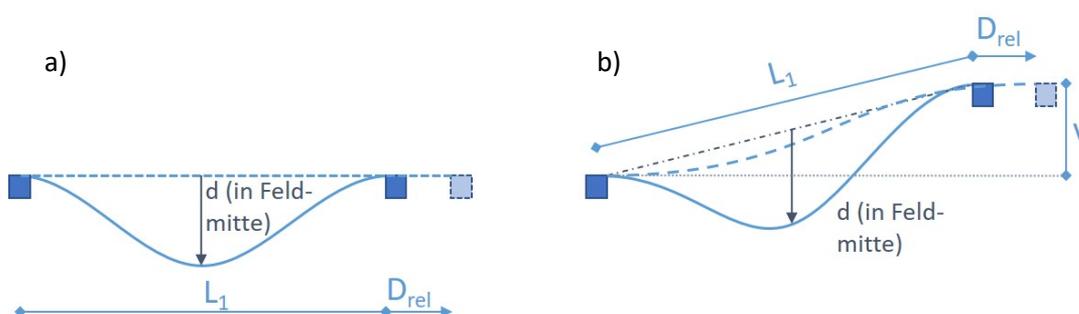


Bild 1 Leiterkonfiguration a) Kettenlinie (Konfiguration 3 gemäss [8]) und b) Kettenlinie mit Höhenversatz v der Anschlusspunkte.

Die geeignetste Art, sehr grosse Relativverschiebungen zuzulassen, ohne Probleme mit der Kurzschlussfestigkeit oder mit den elektrischen Mindestabständen zu erhalten, sind vertikale Leiter(seile)verbindungen, die den Apparat mit höherliegenden horizontalen Leitern verbinden. Ein aus der Schweiz stammendes Beispiel hierfür 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 und ohne dass sich zu grosse Kurzschlusskräfte ergeben.

Die minimal notwendige Leiterlänge L_0 zwischen zwei miteinander verbundenen Anschlusspunkten beträgt für die in Bild 1 gezeigten Leiterkonfigurationen gemäss der US-Norm IEEE Std 1527-2006 [8]:

$$L_0 = L_1 + D_{rel} + L_2 \quad (1)$$

Hierin bedeuten

L_0 die minimale notwendige Leiterlänge,

L_1 die kürzeste Distanz zwischen den Anschlusspunkten, auch «Fadenlinie» genannt,

D_{rel} die maximale Relativverschiebung der Anschlusspunkte, die während des Bemessungsbebens zu erwarten ist: dies entspricht der notwendigen Lose,

L_2 eine Zusatzlänge, abhängig von der Leiterkonfiguration; darf für die in der Schweiz üblichen Leiterkonfigurationen (Bild 1) näherungsweise gleich Null gesetzt werden.

Dabei gilt für D_{rel}

$$D_{rel} = 1,25 \sqrt{x_{max,1}^2 + x_{max,2}^2} \quad (2)$$

wobei $x_{max,1}$ und $x_{max,2}$ die maximalen horizontalen Auslenkungen der miteinander verbundenen Apparate darstellen. Diese lassen sich mit den üblichen Werkzeugen des Erdbebeningenieurwesens berechnen (vgl. Anhang C) oder mit Hilfe der Tabelle 8 abschätzen.

4.3.1 Bestimmungen für 50 Hz-Apparate (220 kV und 380 kV)

Werden keine Erdbebenberechnungen angestellt, sind für D_{rel} näherungsweise die Werte der Tabelle 8 einzuhalten. Diese Werte gelten für die Bauwerksklasse III ($\gamma_f = 1,5$) und liegen in den meisten Fällen auf der sicheren Seite liegen.

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 nicht unterschritten werden. Für niedrigere Spannungsebenen ist die Tabelle gegenstandslos; die Einhaltung einer minimalen Lose ist dort aus der Sicht der Erdbebensicherheit nicht notwendig.

Tabelle 8 Erforderliche Lose « D_{rel} » 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 transformatoreseitig eine nominelle Eigenfrequenz von 2 Hz anzusetzen.

Grundeigenfrequenzen f_{01} und f_{02}	Baugrundklasse	Zone Z1a D_{rel} [mm]	Zone Z1b D_{rel} [mm]	Zone Z2 D_{rel} [mm]	Zone Z3a D_{rel} [mm]	Zone Z3b D_{rel} [mm]
2 Hz – 2 Hz	A	30	35	40	55	65
	B, E	40	55	70	90	110
	C	55	75	95	120	150
	D	80	110	135	180	220
2 Hz – 3 Hz	A	30	30	35	45	55
	B, E	35	45	60	75	95
	C	45	60	75	100	120
	D	65	85	105	140	170
3 Hz – 3 Hz	A	30	30	30	35	45
	B, E	30	35	45	60	75
	C	30	40	55	70	85
	D	35	50	60	80	100

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,
- Dreh-, Scher- oder Pantografentrenner, Stützisolatoren und Überspannungsableiter: 3 Hz.

Bei Apparaten mit ausgesprochen hohen Unterbauten (wie etwa, wegen Überschwemmungsgefahr), 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 angenommenen.

Die Tabelle 8 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 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 Einhaltung der Kurzschlussfestigkeit ist nach Kapitel 4.3.3 «Einschränkungen zur Gewährleistung der Kurzschlussfestigkeit» zu prüfen. Ergeben sich Probleme, die erforderliche Lose zu verwirklichen, ist die Leiterkonfiguration zu ändern. Alternativ können Eigenfrequenzmessungen vorgenommen und der Partizipationsfaktor genauer abgeschätzt werden, um eine verfeinerte Bestimmung des Losebedarfs zu ermöglichen.

4.3.2 Bestimmungen für 16,7 Hz-Apparate (132 kV)

Unterwerke für 16,7 Hz-Apparate mit einer oberen Spannung von 132 kV sind in der Regel der Bauwerksklasse II zugeordnet. Deshalb können für die notwendige Relativverschiebung bzw. Lose D_{rel} die mit 0,80 multiplizierten Werte der Tabelle 8 verwendet werden. Diese Abminderung ergibt sich aus dem Verhältnis der zugehörigen Bedeutungsfaktoren für die Bauwerksklassen II und III (1,2 / 1,5).

4.3.3 Einschränkungen zur Gewährleistung der Kurzschlussfestigkeit

Bei der Montage eines Leiterseils ist darauf zu achten, dass die notwendige Lose möglichst genau eingebaut wird. Fällt die Lose zu gering aus, ergibt sich eine ungenügende Erdbebensicherheit, wird aber zu viel Lose eingebaut, kann die Kurzschlussfestigkeit darunter leiden. Es wird deshalb empfohlen, die notwendige Seillänge schon vor der Montage am Boden abzumessen und zu markieren, um anschliessend die richtige Seillänge einzubauen.

Die maximal zulässige Lose D_{rel} , bei der kein Konflikt mit der Kurzschlussfestigkeit auftritt, ist für die Leiterkonfiguration Kettenlinie (Bild 1) in Bild 3 definiert. Nach der Norm IEC 60865-1 [9] sollen bei Kurzschluss keine Probleme mit den Fall-Seilzugkräften auftreten, wenn zwischen den beiden Anschlusspunkten ein relativer Höhenversatz von mindestens 25 % besteht (bezogen auf die Horizontaldistanz zwischen den Anschlusspunkten). Aus diesem Grund ist diese Konfiguration in Bild 3 auch bei grosser Lose und grosser Distanz zwischen den Anschlusspunkten als zulässig definiert.

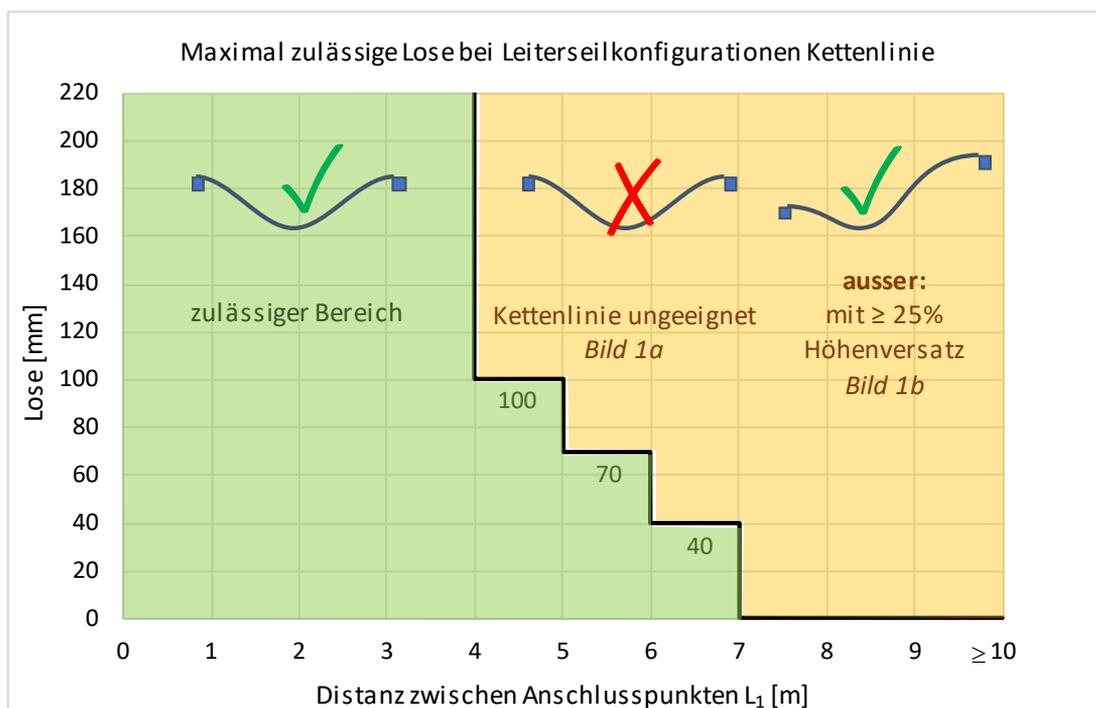


Bild 3 Maximal zulässige Lose bei der Leiterkonfiguration Kettenlinie in Abhängigkeit der Distanz zwischen den Anschlusspunkten.

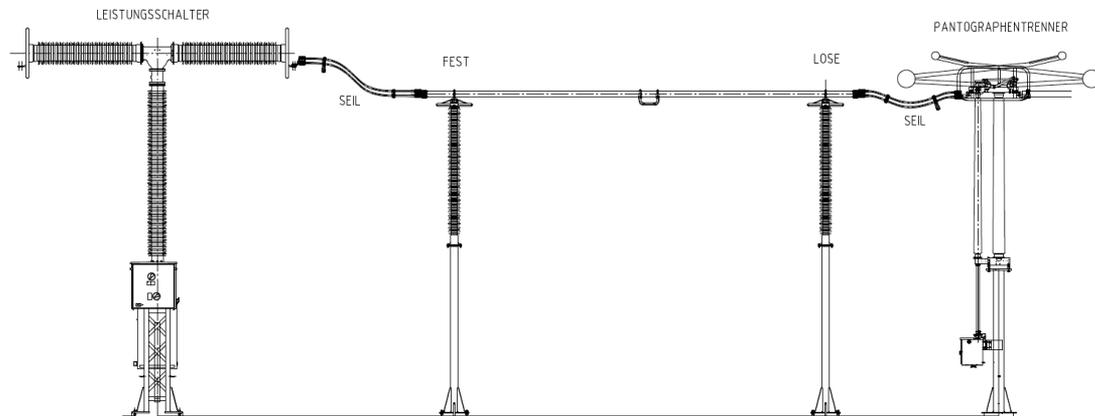


Bild 5 Leiterverbindung mit Rohr und Stützisolatoren sowie kurzen Anschlussseilen zur Überbrückung grösserer Distanzen.

4.4 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.

4.5 Erdbebensicherheit von Sekundärsystemen und anderen Einbauten

Für alle Erdbebenzonen und Spannungsebenen sind Sekundärsysteme wie Steuerschränke, Notstromgruppen, Notstrombatterien oder Eigenbedarfsanlagen 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, u. a. im Rahmen der Nutzungsvereinbarung (siehe 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 einfache konstruktive Massnahmen. Beispiele solcher Massnahmen finden sich in der BAFU-Publikation «Erdbebensicherheit sekundärer Bauteile und weiterer Installationen und Einrichtungen» [10]. Beispiele zur Sicherung von Sekundärsystemen (Notstrombatterien, Steuerschränke) sind im Anhang E aufgeführt.

5. Bestimmungen für die Erdbebensicherheit von Gebäuden

Gebäude sind, unabhängig von den Spannungsebenen, nach den Anforderungen an die Erdbebensicherheit der gültigen Tragwerksnormen des SIA für Neubauten (SIA 260 ff.) zu erstellen oder für bestehende Bauwerke (SIA 269 ff.) zu erhalten. Für Gebäude ist eine Nutzungsvereinbarung zu erstellen (siehe Anhang F). Neben dem Tragwerk sind auch die sekundären Bauteile, Einrichtungen und Installationen erdbebengerecht auszuführen (vgl. Kapitel 4.5).

Bei der Erneuerung eines namhaften Teils einer Hochspannungsanlage in einem bestehenden Gebäude, das aufgrund einer Überprüfung eine ungenügende Erdbebensicherheit aufweist, sind Erdbebensicherheitsmassnahmen umzusetzen, sofern diese mit verhältnismässigem Aufwand möglich sind und die Besitzumsverhältnisse dies zulassen. Zur Beurteilung der «Verhältnismässigkeit» ist die Norm SIA 269/8 [11] 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 niedriger als 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

Die Verbesserung der Erdbebensicherheit bestehender Anlagen wird empfohlen,

- falls eine solche mit geringem Aufwand möglich ist (trifft normalerweise bei der Sicherung von Sekundärsystemen zu),
- 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.

Es liegt in der Eigenverantwortung der Netzbetreiber, bestehende aussergewöhnlich wichtige Anlagenteile zu identifizieren und zu überprüfen, ob die Verbesserung der Erdbebensicherheit «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. Zur Beurteilung der Verhältnismässigkeit kann die Norm SIA 269/8 [11] berücksichtigt werden.

Es wird empfohlen, bei bestehenden aussergewöhnlich wichtigen Anlagenteilen mit langer Restlebensdauer abzuklären,

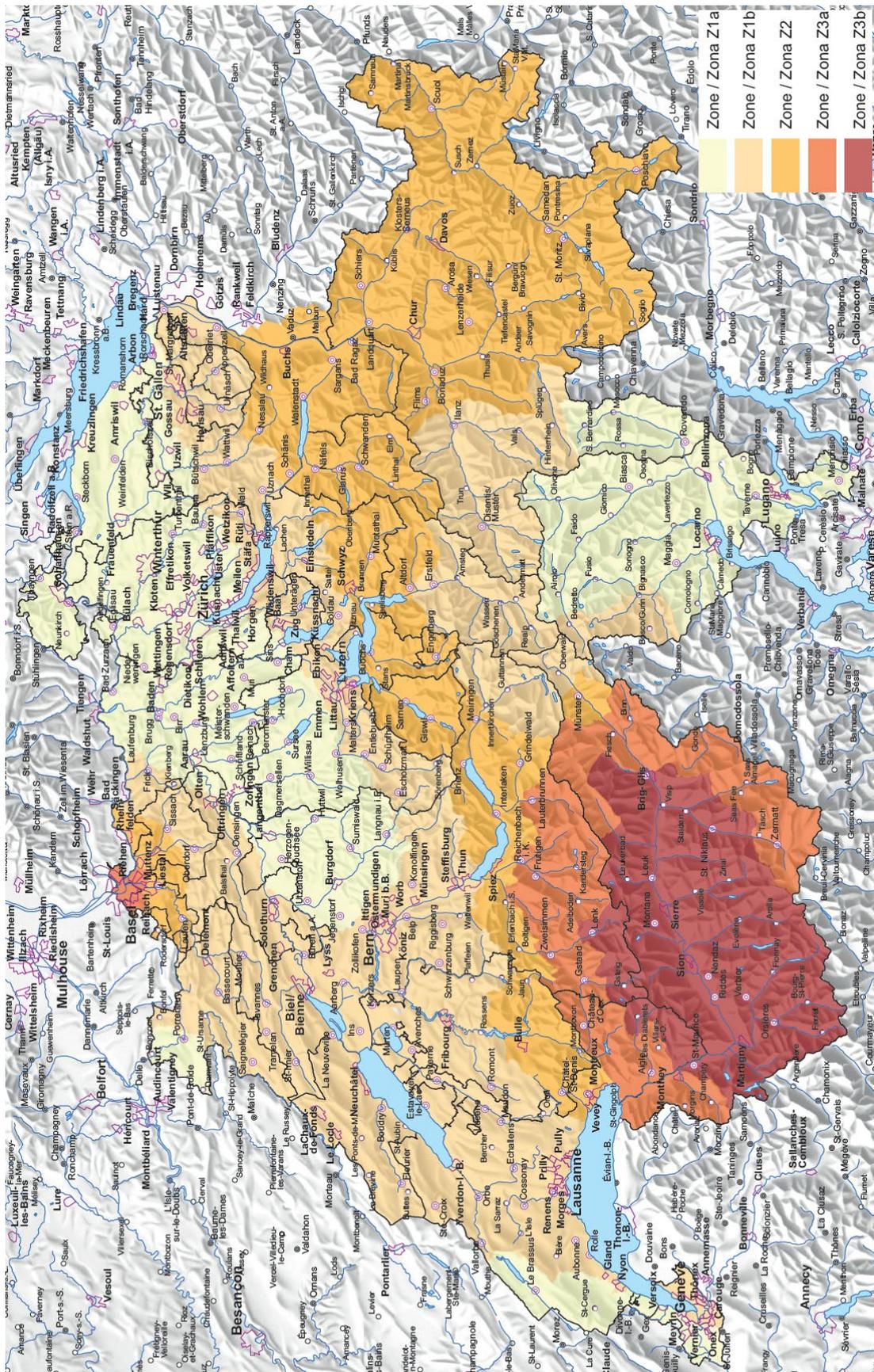
- ob die Transformatoren mit verhältnismässigem Aufwand nachträglich gegen Abheben verankert werden könnten,
- ob die Fundamente und Verankerungen der Hochspannungsapparate mit einer Spannung von 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz) oder höher ausreichen und, falls dies nicht zutrifft, ob eine Ertüchtigung 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 und Kurzschlussfestigkeit zu verletzen – mit verhältnismässigem Aufwand möglich wäre.

Wo eine vollständige oder auch nur teilweise Verbesserung der Erdbebensicherheit 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 (2020): 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] IEC 60865-1 (2011): «Short-circuit currents – Calculation of effects – art 1: Definitions and calculation methods», IEC, Genf.
- [10] BAFU (2015): «Erdbebensicherheit sekundärer Bauteile und weiterer Installationen und Einrichtungen», BAFU-Publikation, Bern. www.bafu.admin.ch/erdbeben.
- [11] SIA 269/8 (2017): Erhaltung von Tragwerken – Erdbeben, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- [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 (siehe <https://map.geo.admin.ch>).

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 einbetonierten 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 Z1b – Verankerung auf ein verstärktes bestehendes Fundament (mit Erlaubnis von energie thun).



Bild B.6 Trafo 110 kV / 40 MVA – Erdbebenzone Z1a – Verankerung mit zwei Hemmschuhen pro Rolle. Es ist auf das Ausknicken in Querrichtung und die Stabilität der Schiene zu achten; NUR in der Erdbebenzone Z1a anwendbar (mit Erlaubnis von ekz).

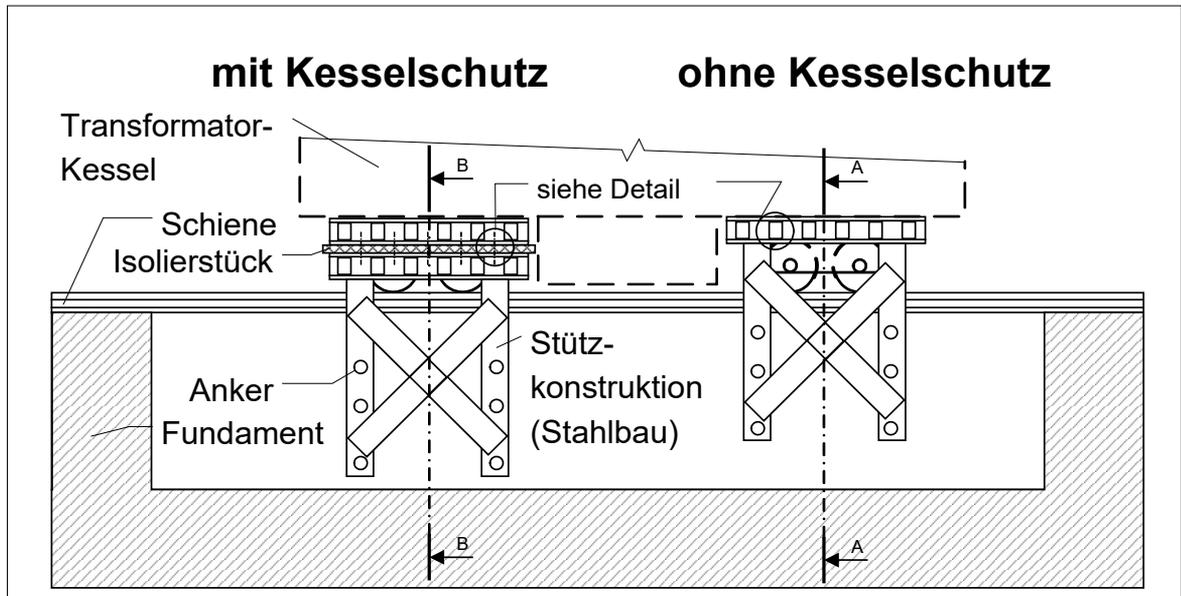


Bild B.7 Schematische Darstellung einer Verankerung für Transformatoren auf Schienen.

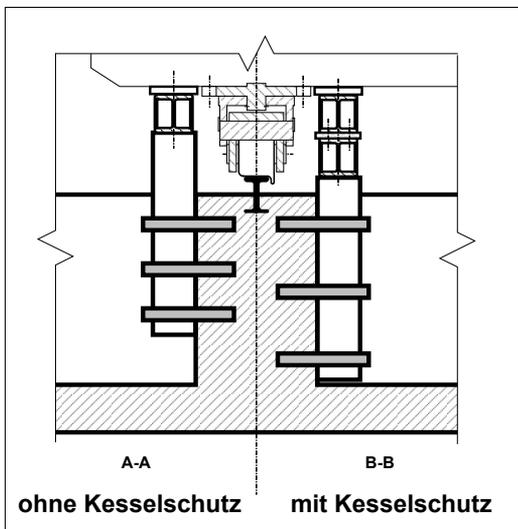


Bild B.8 Detail zu Bild B.7

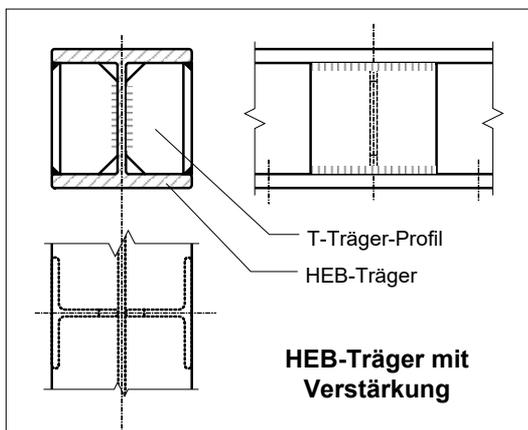


Bild B.9 Trägerverstärkung

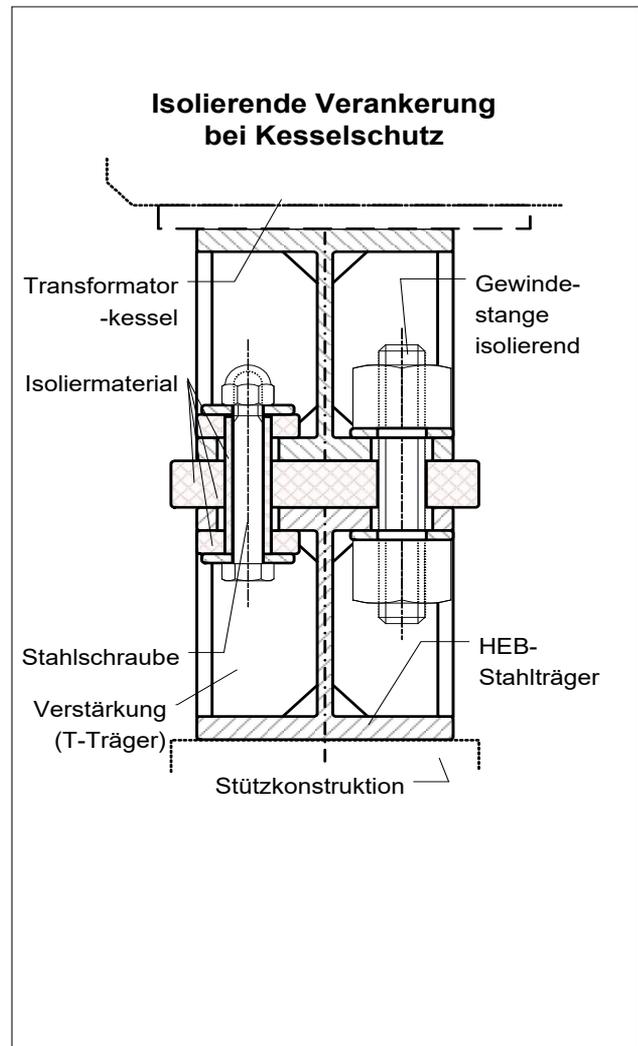


Bild B.10 Möglichkeiten für eine isolierende Verankerung

Anhang C: Ergänzende Erläuterungen zum Losebedarf

Wozu dient die Lose?

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.

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 Leiteranschlusspunkten der miteinander verbundenen Apparate ergibt. Diese Relativverschiebung hängt ihrerseits von den Verschiebungen der Apparate ab, die bei einem Erdbeben auftreten. 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 im Erdbebenfall den Verschiebungsbedarf der Leiteranschlusspunkte – und damit den Losebedarf – deutlich vergrössern.

Berechnung des Losebedarfs

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 die Werte für D_{rel} mit Hilfe der Gleichung (2) dieser Richtlinie einfach berechnen.

Werden keine Erdbebenberechnungen angestellt, können für D_{rel} in Gleichung (2) näherungsweise die Werte der Tabelle 8 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 Grundschiwingung des Apparates abhängen [13, 14]. Die Verschiebungen lassen sich daher direkt aus dem Partizipationsfaktor und der frequenzabhängigen Spektralverschiebung bestimmen. Die Werte der Tabelle 8 gelten für einen angenommenen Partizipationsfaktor von 1,6, der gemäss [8, 14] 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. Zur Kompensation wird deshalb bei Transformatoren gefordert, dass von einer nominellen Eigenfrequenz von 2 Hz ausgegangen wird, auch wenn die tatsächliche Eigenfrequenz deutlich höher, typischerweise bei 3 bis 4 Hz, liegt.

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

Potenzieller Konflikt mit der Kurzschlussfestigkeit

Je mehr Lose ein Leiterseil zur Sicherstellung der Erdbebensicherheit aufweist, desto grösser werden die Kräfte, die sich im Fall eines Kurzschlusses ergeben, was zu Schäden an den Apparaten führen kann. Die Anforderungen an die Erdbebensicherheit einerseits und die Kurzschlussfestigkeit andererseits laufen deshalb Gefahr, miteinander in Konflikt zu geraten. Und natürlich wird es auch umso schwieriger, die notwendigen elektrischen Mindestabstände einzuhalten, je mehr Lose ein Leiterseil aufweisen muss.

Bei Kurzschluss treten bei den in Bild 1 gezeigten Konfigurationen die grössten Kräfte auf, wenn das Leiterseil, welches infolge grosser Kurzschluss-Ströme ausschlägt, nach dem Kurzschluss in seine Ausgangslage zurückfällt. Je grösser der Durchhang und damit die vorhandene Lose ist, desto grösser werden diese Fall-Seilzugkräfte. Berechnungen haben ergeben, dass diese Fall-Seilzugkräfte schon bei relativ bescheidener Lose zu gross werden könnten. Ist die erforderliche Lose in Bezug auf die Kurzschlussfestigkeit zu gross, ist deshalb eine andere Leiterkonfiguration, etwa eine solche mit starkem Höhenversatz, vorzusehen.

Die Berechnung der Fall-Seilzugkräfte nach einem Kurzschluss erfolgt üblicherweise nach der Norm IEC 60865-1 [9]. Dieses Berechnungsverfahren basiert aber auf (zu) einfachen Modellüberlegungen, welche die Biegesteifigkeit vernachlässigen, was vor allem für kurze Leiterseile unrealistische Resultate ergibt: Je kürzer das Leiterseil, desto stärker werden die Fall-Seilzugkräfte rechnerisch überschätzt. Dazu kommt, dass diese Kräfte auch empfindlich von den Steifigkeiten der Leiteranschlusspunkte abhängen, die in der Regel nicht ausreichend genau bekannt sind. Schliesslich variieren auch die maximalen Kräfte, die von den Anschlusspunkten der Apparate ohne Schäden überstanden werden können, von Apparat zu Apparat. Die maximale Lose, die noch keine zu grossen Fall-Seilzugkräfte bewirkt, ist deshalb nur sehr ungenau bekannt. Die in der vorliegenden Richtlinie enthaltenen Vorgaben hierzu gehen deshalb auf Experteneinschätzungen zurück, die sich auf zahlreiche Berechnungen gemäss der Norm IEC 60865-1 [9] abstützen. Dabei wurde bei den Anschlusspunkten von einer maximal tolerierbaren Seilkraft von 6 kN ausgegangen, aber zusätzlich berücksichtigt, dass für die Fall-Seilzugkräfte für Seillängen unter 8 bis 10 m zu hohe Werte berechnet werden.

Anhang D: Rechenblätter zur Erdbebenberechnung

Rechenblatt «Erdbebeneinwirkung»

Datum:

Seite 1

Unterwerk:

Spannungsebenen: /

Gesuchsteller:

Projekt / Gesuch:

Erdbebeneinwirkung

Bau- grundklasse ⁽¹⁾	Erdbeben- zone	Effektive Spektralbeschleunigung S_e [m/s ²] für BWK III ⁽²⁾				
		Z1a	Z1b	Z2	Z3a	Z3b
BGK A		2,7	3,6	4,5	5,8	7,2
BGK B		3,2	4,3	5,4	7,0	8,6
BGK C		3,9	5,2	6,5	8,5	10,4
BGK D und E		4,6	6,1	7,7	10,0	12,2
BGK F		spektrale Standortstudie erforderlich				

⁽¹⁾ Die Baugrundklasse kann mit Hilfe der Tabelle 24 der Norm SIA 261 oder, falls vorhanden, anhand einer Baugrundklassen-Karte bestimmt werden (<https://map.geo.admin.ch> → Seismische Baugrundklasse);

⁽²⁾ 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. Für die BWK II sind die tabellierten Werte mit dem Faktor 0,8 zu multiplizieren

Bauwerksklasse (BWK II / BWK III)

Effektive Spektralbeschleunigung ⁽³⁾ $S_e =$ [m/s²]

⁽³⁾ 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

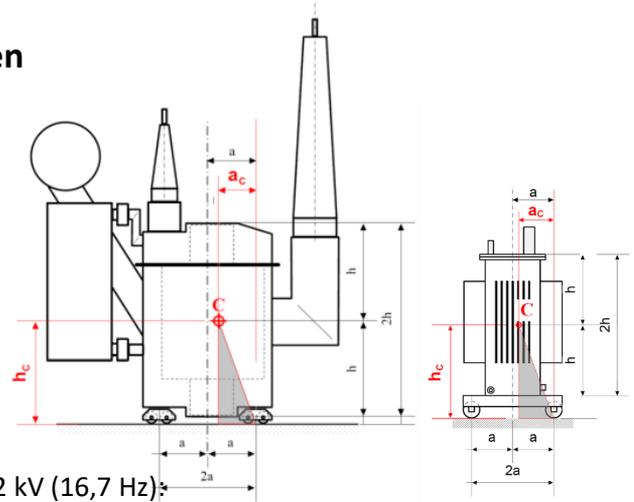
Trafo-Bezeichnung:

Gesamtmasse in Betrieb m_{tot} : [t]

Schwerpunktshöhe h_c : [m]

minimale Horizontaldistanz a_c : [m]

Rad- (Auflager-)abstand $2a$: [m]



Nachweise, falls

- Z1a: Spannung < 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz):
konstruktive Sicherung
- Z1a: Spannung ≥ 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz):
konstruktive Abhebesicherung,
rechnerischer Nachweis Wegroll- / Abschersicherung
- Z1b – Z3b: rechnerischer Nachweis

Horizontale Erdbebeneinwirkung: $H = m_{tot} [t] S_e [m/s^2] = \dots\dots\dots$ [kN]

Kippmoment aus Erdbebeneinwirkung⁽⁴⁾: $M = 1,2 h_c [m] H [kN] = \dots\dots\dots$ [kN m]

⁽⁴⁾ 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.

Bemessungswerte: Abscherkraft⁽⁵⁾: $V_{E,d} = H [kN] / 1,5 = \dots\dots\dots$ [kN]
mit $q = 1,5$ gemäss Kap. 3.4

Zugkraft⁽⁶⁾: $Z_{E,d} = \frac{1}{1,5} \left(\frac{M [kNm] - 10 m_{tot} [t] a_c [m]}{2a [m]} \right) = \dots\dots\dots$ [kN]

⁽⁵⁾ Immer (alle Spannungsebenen und alle Erdbebenzonen) zumindest konstruktiv zu sichern.
⁽⁶⁾ Vertikale Zugkraft infolge Kippmoment auf jeder Seite zu verankern. Berücksichtigt die destabilisierende Erdbebeneinwirkung und die stabilisierende Eigenlast (Annahme: $g = 10 [m/s^2]$).

Verankerungskräfte bei Hochspannungsapparaten

Apparate-Bezeichnung:

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

Schwerpunktshöhe: h_c : [m] (bzgl. Apparat Fusspunkt)

Horizontale Erdbebeneinwirkung: $H = m_{tot} [t] S_e [m/s^2]^{(7)} = \dots\dots\dots$ [kN]

Kippmoment aus Erdbebeneinwirkung: $M = 1,2 h_c [m] H [kN]^{(4,7)} = \dots\dots\dots$ [kN m]

⁽⁷⁾ Es handelt sich um elastische Grössen; bei den Festigkeitsnachweisen dürfen diese Grössen durch den Verhaltensbeiwert $q = 1,5$ dividiert werden (vgl. Kapitel 3.4).

Bemerkungen:
.....

Losebedarf in Leiterseilen

Miteinander verbundene Apparate	Geschätzte Eigenfrequenzen f_{0i} ⁽⁸⁾	Distanz zwischen Anschlusspunkten
Apparat 1:	$f_{01} = \dots\dots\dots$ [Hz]	$L_1 = \dots\dots\dots$ [m]
Apparat 2:	$f_{02} = \dots\dots\dots$ [Hz]	

⁽⁸⁾ Ohne genauere Untersuchungen sind bei Verwendung der Tabelle 8 folgende Annahmen zulässig:
 – Leistungsschalter, Strom- und Spannungswandler sowie kombinierte Messgruppen: 2 Hz
 – Dreh-, Scher- oder Pantografentrenner, Stützisolatoren und Überspannungsableiter: 3 Hz

Erforderliche Lose nach Tab. 8 ⁽⁹⁾ $D_{rel} = \dots\dots\dots$ [mm]

⁽⁹⁾ Eingangsparameter für Tabelle: f_{01} , f_{02} , Baugrundklasse und Erdbebenzone

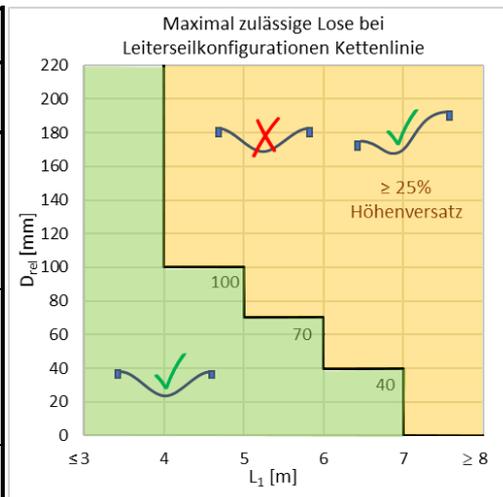
Achtung: Zulässigkeit der erforderlichen Lose bei gegebener Leiterkonfiguration, bezüglich Einhaltung elektrischer Mindestabstände und Kurzschlussfestigkeit (Bild 3), ist zu überprüfen!

Falls problematisch: Leiterkonfiguration ändern (siehe z.B. Bilder 4 und 5 der Richtlinie), oder aber den Losebedarf mit Hilfe von Berechnungen oder Messungen der Apparate-Grundeigenfrequenzen verfeinert bestimmen (ergibt oft etwas geringeren Losebedarf).

Tab. 8 ESTI-Richtlinie: erforderliche Lose D_{rel} für die BWK III ⁽¹⁰⁾

Bild 3 ESTI Richtlinie: Maximal zulässige Lose

$f_{01} - f_{02}$	Baugrund- klasse	D_{rel} [mm] in Erdbebenzone				
		Z1a	Z1b	Z2	Z3a	Z3b
2 Hz – 2 Hz	A	30	35	40	55	65
	B, E	40	55	70	90	110
	C	55	75	95	120	150
	D	80	110	135	180	220
2 Hz – 3 Hz	A	30	30	35	45	55
	B, E	35	45	60	75	95
	C	45	60	75	100	120
	D	65	85	105	140	170
3 Hz – 3 Hz	A	30	30	30	35	45
	B, E	30	35	45	60	75
	C	30	40	55	70	85
	D	35	50	60	80	100



⁽¹⁰⁾ – Für die BWK II die Tabellenwerte mit 0,8 multiplizieren, ohne jedoch 30 mm zu unterschreiten.
 – Bei aussergewöhnlich hohen Unterkonstruktionen Tabellenwerte um 20 % erhöhen.

Rechenblätter zur Erdbebenberechnung - ausgefülltes Beispiel

Seite 1

Rechenblatt «Erdbebeneinwirkung» Datum: 14.5.2020 Seite 1

Unterwerk: Benhlen Spannungsebenen: 380 / 220 kV

Gesuchsteller: ewz Projekt / Gesuch: xyz

Erdbebeneinwirkung

Baugrundklasse ⁽¹⁾	Erdbebenzone	Effektive Spektralbeschleunigung S_e [m/s ²] für BWK III ⁽²⁾				
		Z1a	Z1b	Z2	Z3a	Z3b
BGK A		2,7	3,6	4,5	5,8	7,2
BGK B		3,2	4,3	5,4	7,0	8,6
BGK C		3,9	5,2	6,5	8,5	10,4
<u>BGK D und E</u>		4,6	6,1	<u>7,7</u>	10,0	12,2
BGK F		spektrale Standortstudie erforderlich				

(1) Die Baugrundklasse kann mit Hilfe der Tabelle 24 der Norm SIA 261 oder, falls vorhanden, anhand einer Baugrundklassen-Karte bestimmt werden (<https://map.geo.admin.ch> → Seismische Baugrundklasse);

(2) 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. Für die BWK II sind die tabellierten Werte mit dem Faktor 0,8 zu multiplizieren

Bauwerksklasse (BWK II / BWK III) BWK III

Effektive Spektralbeschleunigung⁽³⁾ $S_e =$ 7,7 [m/s²]

(3) 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 Unterkonstruktion wegen Überschwemmungsgefahr

Stempel:

Rechenblätter zur Erdbebenberechnung - ausgefülltes Beispiel

Seite 2

Rechenblatt «Verankerungskräfte» Datum: 14.5.2020 Seite 2

Verankerungskräfte bei Transformatoren

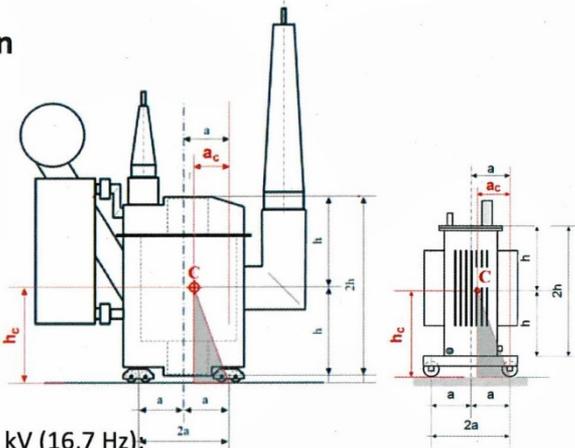
Trafo-Bezeichnung: XY 1000 HVA

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

Schwerpunktshöhe h_c : 2,4 [m]

minimale Horizontaldistanz a_c : 0,72 [m]

Rad- (Auflager-)abstand $2a$: 1,60 [m]



Nachweise, falls

Z1a: Spannung < 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz): konstruktive Sicherung

Z1a: Spannung \geq 220 kV (50 Hz) bzw. 132 kV (16,7 Hz): konstruktive Abhebesicherung, rechnerischer Nachweis Wegroll- / Abschersicherung

Z1b – Z3b: rechnerischer Nachweis

Horizontale Erdbebeneinwirkung: $H = m_{tot} [t] S_e [m/s^2] = 1'232$ [kN]

Kippmoment aus Erdbebeneinwirkung⁽⁴⁾: $M = 1,2 h_c [m] H [kN] = 3'548$ [kN m]

⁽⁴⁾ 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.

Bemessungswerte: Abscherkraft⁽⁵⁾: $V_{E,d} = H [kN] / 1,5 = 821$ [kN]
mit $q = 1,5$ gemäss Kap. 3.4

Zugkraft⁽⁶⁾: $Z_{E,d} = \frac{1}{1,5} \left(\frac{M [kNm] - 10 m_{tot} [t] a_c [m]}{2a [m]} \right) = 998$ [kN]

⁽⁵⁾ Immer (alle Spannungsebenen und alle Erdbebenzonen) zumindest konstruktiv zu sichern.

⁽⁶⁾ Vertikale Zugkraft infolge Kippmoment auf jeder Seite zu verankern. Berücksichtigt die destabilisierende Erdbebeneinwirkung und die stabilisierende Eigenlast (Annahme: $g = 10 [m/s^2]$).

Verankerungskräfte bei Hochspannungsapparaten

Apparate-Bezeichnung: Stromwandler yz 220kV

Gesamtmasse in Betrieb: m_{tot} : 1,3 [t]

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

Horizontale Erdbebeneinwirkung: $H = m_{tot} [t] S_e [m/s^2]^{(7)} = 10,01$ [kN]

Kippmoment aus Erdbebeneinwirkung: $M = 1,2 h_c [m] H [kN]^{(4,7)} = 42,9$ [kN m]

⁽⁷⁾ Es handelt sich um elastische Grössen; bei den Festigkeitsnachweisen dürfen diese Grössen durch den Verhaltensbeiwert $q = 1,5$ dividiert werden (vgl. Kapitel 3.4).

Bemerkungen:

Rechenblätter zur Erdbebenberechnung - ausgefülltes Beispiel

Rechenblatt «Losebedarf»

Datum: 14.5.2020 Seite 3

Losebedarf in Leiterseilen

Miteinander verbundene Apparate

Geschätzte
Eigenfrequenzen $f_{0i}^{(8)}$

Distanz zwischen
Anschlusspunkten

Apparat 1: Stützisolator

$f_{01} = 3$ [Hz]

$L_1 = 3,5$ [m]

Apparat 2: Leistungsschalter

$f_{02} = 2$ [Hz]

- ⁽⁸⁾ Ohne genauere Untersuchungen sind bei Verwendung der Tabelle 8 folgende Annahmen zulässig:
- Leistungsschalter, Strom- und Spannungswandler sowie kombinierte Messgruppen 2 Hz
 - Dreh-, Scher- oder Pantografentrenner, Stützisolatoren und Überspannungsableiter 3 Hz

Erforderliche Lose nach Tab. 8 ⁽⁹⁾

$D_{rel} = 1,2 \cdot 105 = 126$ [mm]

⁽⁹⁾ Eingangsparameter für Tabelle: f_{01} , f_{02} , Baugrundklasse und Erdbebenzone

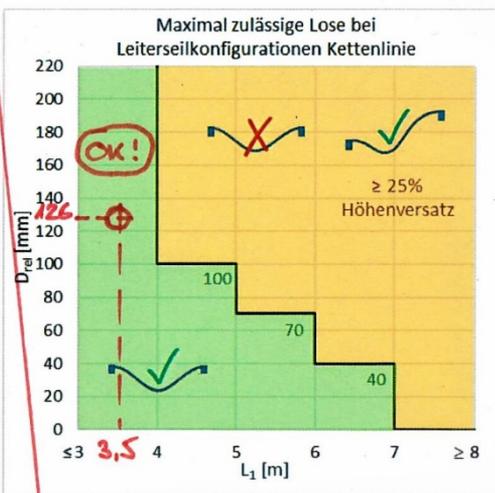
Achtung: Zulässigkeit der erforderlichen Lose bei gegebener Leiterkonfiguration, bezüglich Einhaltung elektrischer Mindestabstände und Kurzschlussfestigkeit (Bild 3), ist zu überprüfen!

Falls problematisch: Leiterkonfiguration ändern (siehe z.B. Bilder 4 und 5 der Richtlinie), oder aber den Losebedarf mit Hilfe von Berechnungen oder Messungen der Apparate-Grundeigenfrequenzen verfeinert bestimmen (ergibt oft etwas geringeren Losebedarf).

Tab. 8 ESTI-Richtlinie: erforderliche Lose D_{rel} für die BWK III ⁽¹⁰⁾

Bild 3 ESTI Richtlinie: Maximal zulässige Lose

$f_{01} - f_{02}$	Baugrundklasse	D_{rel} [mm] in Erdbebenzone				
		Z1a	Z1b	Z2	Z3a	Z3b
2 Hz – 2 Hz	A	30	35	40	55	65
	B, E	40	55	70	90	110
	C	55	75	95	120	150
	D	80	110	135	180	220
2 Hz – 3 Hz	A	30	30	35	45	55
	B, E	35	45	60	75	95
	C	45	60	75	100	120
	D	65	85	105	140	170
3 Hz – 3 Hz	A	30	30	30	35	45
	B, E	30	35	45	60	75
	C	30	40	55	70	85
	D	35	50	60	80	100



⁽¹⁰⁾ – Für die BWK II die Tabellenwerte mit 0,8 multiplizieren, ohne jedoch 30 mm zu unterschreiten.
– Bei aussergewöhnlich hohen Unterkonstruktionen Tabellenwerte um 20 % erhöhen.

Anhang E: Beispiele zur Sicherung von Sekundärssystemen

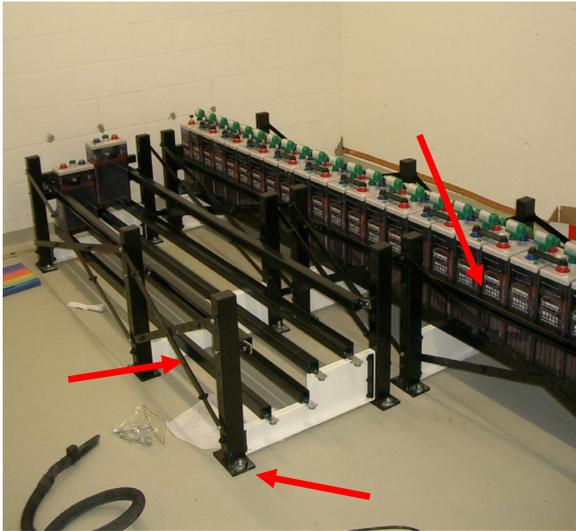


Bild E.1/E.2 Kipp- und Absturzsicherung von Notstrombatterien: links, UW Münchwilen (Axpö): Füsse der Gestelle diagonal verstrebt und am Boden festgeschraubt / rechts, UW Bassecourt (Swissgrid): Kippsicherung vom Gestell gegen Seitenwand / beide, horizontale Profile verhindern ein Abkippen der Batterien



Bild E.3 UW Münchwilen (Axpö): Gewellte Platikeinlagen zwischen benachbarten Batterien verhindern das Gegeneinanderschlagen.



Bild E.4/E.5 Sicherung von Steuerschränken mit Stahlwinkeln an Wand (Axpö)



Bild E.6 Sicherung von Steuerschränken mit Aufhängung (Krisenorganisation Kanton BS)



Bild E.7/E.8 Sicherung von Steuerschränken in Raummitte bis an die Wand (Axpö)

Anhang F: Nutzungsvereinbarung

Einleitung

Eine erdbebengerechte Projektierung setzt klare Anforderungen des Bauherrn 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 einen Teil des Projektpflichtenheftes und hält die Nutzungsanforderungen des Bauherrn an das Bauwerk fest (siehe SIA 260). Sie ist aufgrund eines Dialogs zwischen Bauherrschaft und Projektverfassenden zu erstellen. Es liegt in der Verantwortung des Bauherrn in der Phase 2 «Vorstudien» die Thematik Erdbebensicherheit 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 Fachplaner 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 generellen Aspekte wichtig: Stand (Projektphase, Status, Version, Änderungsverzeichnis, Freigabe, Verteiler, ...), Verweise auf Grundlagen (ESTI-Richtlinie), Beschrieb des Bauvorhabens, 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 (inkl. Begründung gemäss ESTI-Richtlinie), Erdbebenzone, Baugrund (Baugrundklasse, geologische Untersuchungen oder seismische Mikrozonierung)
- Erdbebengerechter Entwurf sowie konzeptionelle und konstruktive Massnahmen (inkl. einfacher Darstellung des Trakwerkskonzeptes der Aussteifung im Grund- und Aufriss)
- 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, Festlegung der konkreten Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit für die Gewährleistung der Funktionstüchtigkeit nach einem Erdbeben (für das Gebäude und die relevanten Elemente des Gesamtsystems)

Bei Erhaltungsprojekten 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 (u. a. Erfüllungsfaktoren, begründeter Massnahmenentscheid, Beschreibung der Erdbebensicherheitsmassnahmen).

Weiterführende Aspekte sind in der Projektbasis oder in Berichten festzuhalten.

Anhang G: Ausführungsplan mit Informationen zum Losebedarf

Der für jede Leiterverbindung ermittelte Losebedarf (siehe Anhang D) unter Einhaltung der Bestimmungen gemäss Kapitel 4.3 ist im Rahmen des Gesuches aufzuzeigen und die Ausführungspläne sind spätestens vor Montagbeginn einzureichen.

Für eine nachvollziehbare Übersicht eignen sich Feldschnittpläne, die in einer Tabelle die relevanten Angaben zum Losebedarf beinhalten. Hierzu ist eine eindeutige Bezeichnung der einzelnen Leiterverbindungen zielführend mit einer Zuteilung in der Tabelle. Bild G.1 und Tabelle G.2 zeigen anhand eines Beispiels eine entsprechende Darstellung auf.

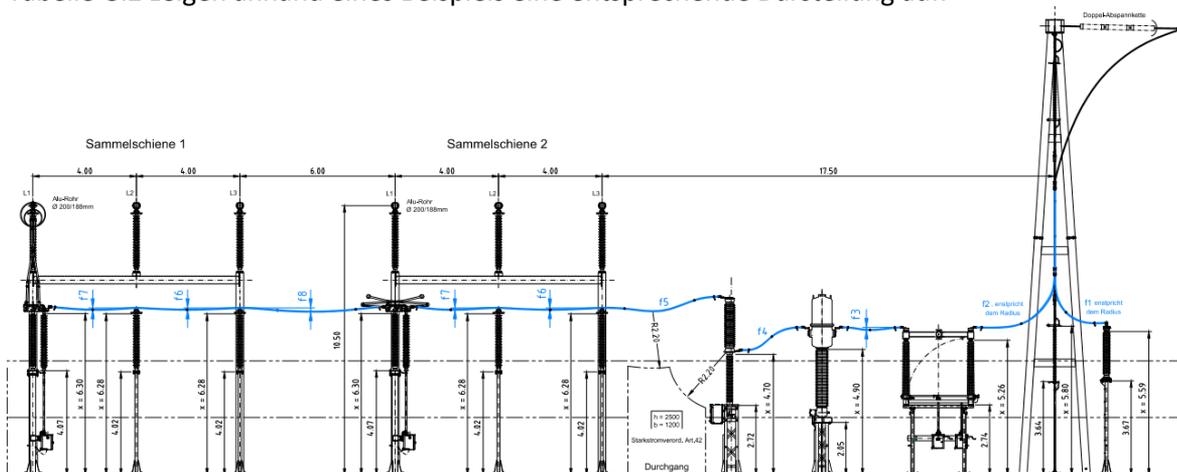


Bild G.1 Ausführungsplan (Ausschnitt) eines Feldschnittes einer 220 kV-Freiluftschaltanlage mit Bezeichnung der Leiterverbindungen in blau.

Die Tabelle fasst die Parameter für die Erdbebeneinwirkung (Erdbebenzone, Baugrundklasse und Bauwerksklasse) sowie die Frequenzen der benachbarten Apparate jeder Leiterverbindung zusammen. Die tatsächliche Leiterlänge L_0 ergibt sich aus der Fadenlinie L_1 und der Lose D_{rel} . Diese Werte müssen die Einschränkung zur Gewährleistung der Kurzschlussfestigkeit einhalten oder den nötigen Höhenversatz aufweisen. Der aufgeführte Durchhang ist bei der Montage einzuhalten und kann gemäss Formel (3) der Richtlinie abgeschätzt werden.

Tabelle G.2 Tabelle im Ausführungsplan mit relevanten Angaben zum Losebedarf.

Losebedarf nach ESTI Richtlinie Nr. 248								
Erdbebenzone: 3a			Baugrundklasse: C			Bauwerksklasse: III		
Verbindung	Frequenz		Lose	Anschlusspunkte				
	$f_{0,r}$ [Hz]	$f_{0,l}$ [Hz]		Fadenlinie	Leiterlänge	Durchhang	Höhenversatz	
			D_{rel} [mm]	L_1 [mm]	L_0 [mm]	d [mm]	v [mm]	[%]
f1	-	-	n.r.	-	-	-	gross	> 25
f2	-	3	n.r.	-	-	-	gross	> 25
f3	3	2	100	2350	2450	350	-	-
f4	2	2	120	2400	2520	380	890	37%
f5	2	3	100	4450	4550	480	440	10%
f6	3	3	70	4000	4070	380	-	-
f7	3	3	70	3340	3410	350	-	-
f8	3	3	70	5575	5645	450	-	-

Bemerkung: Der Höhenversatz in Prozent kann näherungsweise und auf der sicheren Seite anhand der Fadenlinie L_1 berechnet werden (mathematisch korrekt wäre den Höhenversatz durch den horizontalen Abstand zwischen den Anschlusspunkten zu dividieren).