

Erdbebensicherheit der elektrischen Energieverteilung in der Schweiz

Netze und Einrichtungen > 1kV



2. Bericht

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt

RÉSONANCE Ingénieurs-Conseils SA
21 rue Jacques Grosselin
CH - 1227 CAROUGE (Genève)

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

Carouge, 16. September 2011

TB 285.03-1/MK/ST

Impressum

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

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

Autoren: Martin G. Koller, Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH,
Sylvette Thomassin, Dr. in Seismologie, Universität Grenoble I.

die Anhänge A und C stammen von:
Martin Hässig, Axpo (Anhang A)
Pascal Müller, ewz, und Schindler + Partner AG (Anhang C)

Begleitung BAFU: Blaise Duvernay, dipl. Bauing. ETH
Sven Heunert, dipl. Bauing. ETH

Begleitgruppe:

- Walter Bleuel, Industrielle Werke Basel (IWB)
- Adrien Guérig und Martin Hässig, Axpo AG (vormals NOK)
- Urs Huber, Eidgenössisches Starkstrominspektorat (ESTI)
- Frau Bärbel Müller und Markus von Arx, Schweizerische Bundesbahnen (SBB)
- Pascal Müller, Elektrizitätswerke Zürich (ewz)

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

Freigabe BAFU: 12. September 2012, Andreas Götz

*Titelblatt: Anregung von Transformator-Eigenschwingungen mit Hilfe plötzlichen
Loslassens eines Zugbandes.*

Zusammenfassung

Das seit 2000 vom Bund implementierte Massnahmenprogramm Erdbebenvorsorge hat unter anderem das Infrastruktursystem der elektrischen Energieverteilung als prioritären Sektor für eine Untersuchung der Erdbebenverletzlichkeit definiert. Der Grund dafür liegt in der Unentbehrlichkeit der Stromversorgung für die Funktionstüchtigkeit von vielen weiteren Infrastrukturen und hauptsächlich solchen, die zur Bewältigung eines Erdbebens unbedingt erforderlich sind. In den Jahren 2008 bis 2011 wurde deshalb im Auftrag des BAFU eine Studie zur Erdbebensicherheit der elektrischen Energieverteilung in der Schweiz durchgeführt. Die Ziele der Studie waren, die Schwachstellen der elektrischen Energieverteilung bezüglich Erdbeben zu identifizieren sowie deren Ausmass zu quantifizieren und damit den Handlungsbedarf zu ermitteln. Die Resultate sind im sogenannten "1. Zwischenbericht" (1), datiert vom 15. Januar 2009, sowie im hier vorliegenden 2. Bericht dargelegt. Die Studie wurde von Experten auf dem Gebiet der elektrischen Energieverteilung begleitet; die erwähnten Berichte wurden von diesen Experten eingehend korreferiert.

Erfahrungen aus dem Ausland zeigen, dass die mit Abstand grössten Schäden an der Infrastruktur der elektrischen Energieverteilung im Erdbebenfall bei Unterwerken in Freiluftbauweise beobachtet werden, während Freileitungen Erdbeben meist gut überstehen. Je höher die Spannungsebene, desto verletzlicher sind die Unterwerke.

Bei einem stärkeren Erdbeben ist auch in der Schweiz mit dem Ausfall unmittelbar betroffener Höchstspannungsunterwerke in Freiluftbauweise zu rechnen. Schäden werden sowohl bei den Leistungstransformatoren, insbesondere bei deren Durchführungen, wie auch bei den Höchstspannungsapparaten erwartet. Eines der Hauptprobleme sind die heute zu wenig losen Leiterverbindungen zwischen den Apparaten, so dass die einzelnen Apparate nicht unabhängig voneinander schwingen können; werden die Leiterverbindungen plötzlich straff, entstehen grosse Interaktionskräfte, die zum Bruch der Apparate, insbesondere der Porzellanisolatoren, führen können. Auch die Sekundärsysteme, wie etwa Notstrombatterien oder Steuerschränke, weisen heute bedeutende Schwachstellen auf und dürften schon bei schwächeren Erdbeben ausfallen.

Handlungsbedarf besteht deshalb in erster Linie bei der Erdbebensicherung der Leistungstransformatoren, insbesondere bezüglich deren Verankerungen, bei der Sicherstellung ausreichender Lose in den Leiterverbindungen zwischen den Höchstspannungsapparaten sowie bei der Sicherung der Sekundärsysteme (Notstrombatterien, Steuerschränke, etc.) aller Spannungsebenen. Präventive Massnahmen in diesen Bereichen erlauben, die Versorgungssicherheit im Falle eines Erdbebens signifikant zu erhöhen. Entsprechende Massnahmen, die im Rahmen von Anlage-Erneuerungen ergriffen werden, verursachen nur äusserst geringe Zusatzkosten. Es liegt deshalb im Eigeninteresse – und in der Eigenverantwortung – der Netzbetreiber, solche Massnahmen bei jeder sich bietenden Gelegenheit zu ergreifen.

Die im 1. Zwischenbericht vom 15.01.2009 und im hier vorliegenden 2. Bericht dargelegten Erkenntnisse und konkreten Vorschläge sind in den Entwurf einer neuen ESTI-Richtlinie zur "Erdbebensicherung der elektrischen Energieverteilung in der Schweiz" eingeflossen. Im Hinblick auf eine "erdbebengerechte" Umsetzung dieser künftigen Richtlinie ist es wichtig, die betroffenen Akteure für die Problematik der Erdbebensicherheit zu sensibilisieren und entsprechend auszubilden.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
1. Einleitung.....	5
1.1 Ausgangslage	5
1.2 Zielsetzung.....	6
1.3 Terminologie	6
1.4 Verdankung.....	8
2. Erdbebenverhalten von Transformatoren	9
2.1 Literaturangaben zu den Kippeigenfrequenzen	9
2.2 Messungen an Transformatoren.....	9
2.3 Folgerungen aus den Messungen an Transformatoren	12
2.4 Empfehlungen zur Abhebesicherung von Transformatoren.....	15
2.5 Pilotprojekt einer Transformatorenverankerung.....	15
3. Erdbebenverhalten von Höchstspannungsapparaten.....	16
4. Lose in den Leiterverbindungen	21
4.1 Eigenfrequenzmessungen an Höchstspannungsapparaten.....	21
4.2 Verschiebungsbedarf.....	22
4.3 Grundlagen für die Überprüfung bestehender Verbindungen	26
4.4 Pilotstudie zur Beurteilung der Lose im UW Breite	29
4.5 Pilotstudie zur Beurteilung der Lose im UW Benken	35
4.6 Schlussfolgerungen bezüglich Lose	37
5. Sekundärsysteme und andere Einbauten	38
5.1 Verletzbarkeit.....	38
5.2 Empfohlene Massnahmen	39
5.3 Pilotstudie UW Herdern	42
6. Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf	42
7. Quellen.....	43

Anhang A: Trafo-Verankerung (Axpo AG)

Anhang B: Leiterseile UW Benken (ewz)

Anhang C: ewz-Pilotstudie Sekundärsysteme

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Seit 2000 implementiert der Bund ein Massnahmenprogramm "Erdbebenvorsorge" (www.bafu.admin.ch/erdbeben), das unter anderem auch die wichtigen Infrastruktursysteme betrifft. Im Jahr 2004 hat eine Expertengruppe im Erläuterungsbericht zum Programm festgehalten, dass die elektrische Energieverteilung einer der prioritären Sektoren zur Untersuchung der Erdbebenverletzlichkeit ist und Handlungsbedarf besteht. Der Grund dafür liegt in der Unentbehrlichkeit der Stromversorgung für die Funktionstüchtigkeit von vielen weiteren Infrastrukturen und hauptsächlich solchen, die zur Bewältigung eines Erdbebens unbedingt erforderlich sind. Die weiteren Sektoren, die als prioritär definiert wurden, sind die allgemeine Schadensabwehr, die Kommunikation, die Gesundheitsversorgung, der Strassenverkehr und die Abwasserentsorgung.

In den Jahren 2008 bis 2011 wurde im Auftrag des BAFU eine Studie ausgeführt, die vorerst in einem sogenannten "1. Zwischenbericht" (1) resultierte, datiert vom 15. Januar 2009. Die Ziele dieser Studie waren, die Schwachstellen der elektrischen Energieverteilung bezüglich Erdbeben zu identifizieren, den Handlungsbedarf festzulegen, anwendbare Normen und Standards für die Schweiz zusammenzustellen, Beurteilungsverfahren für bestehende Anlagen zu entwickeln sowie typische konstruktive Sicherungsmassnahmen vorzuschlagen. Die Studie wurde von einer Pilotgruppe mit Experten auf dem Gebiet der elektrischen Energieverteilung begleitet; der erwähnte Zwischenbericht wurde von diesen Experten eingehend korreferiert.

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

Die Erfahrung zeigt, dass Anlagen in gekapselter SF6-Technik wenig anfällig sind auf Erdbeben, sofern die einzelnen Anlagenteile ausreichend verankert sind.

Mit der Veröffentlichung des 1. Zwischenberichtes (1) konnten noch nicht alle offenen Fragen bezüglich des Erdbebenverhaltens der elektrischen Energieverteilung beantwortet werden. Die vorherrschenden Probleme wurden zwar qualitativ erkannt, deren quantitatives Ausmass blieb aber in vielen Fällen noch unklar.

Eine der wichtigsten Schlussfolgerungen war, dass die fehlende Verankerung grosser Transformatoren gegenüber Abheben eines der wichtigsten potenziellen Probleme in der Schweiz ist. Allerdings: wie gross die Gefahr des Abhebens tatsächlich ist, hängt von den tiefsten Eigenfrequenzen der Kippschwingungen der Transformatoren ab, und zu diesem Punkt liegen in der Literatur widersprüchliche Angaben vor. Einerseits geht der amerikanische Standard IEEE Std 693-2005 (2) implizit davon aus, dass diese Frequenzen über 33 Hz liegen, was bedeuten würde, dass in der Schweiz bis und mit Erdbebenzone Z2 (fortan auch nur "Zone" Z2 genannt) keine Abhebesicherungen notwendig wären. Andererseits berichten einige wenige wissenschaftliche Veröffentlichungen von gemessenen Eigenfrequenzen im Bereich

von 3 bis 4 Hz; treffen diese Angaben zu, so wären auch in der Zone Z2, und unter Umständen sogar in der Zone Z1, Abhebesicherungen notwendig.

Im Bereich der elektrischen Energieversorgung ist das Eidgenössische Starkstrominspektorat (ESTI) für die Aufsicht verantwortlich, beziehungsweise das Bundesamt für Verkehr (BAV), was die Bahnen anbetrifft. Bisher aber fehlen die nötigen Grundlagen zur Verletzlichkeit der Elemente der Energieversorgungsinfrastruktur sowie klare Normen-Vorschriften bezüglich Erdbebensicherheit, so dass die genannten Aufsichtsbehörden diese Verantwortung bisher kaum konkret wahrnehmen konnten.

Allerdings: In Anbetracht ihrer bedeutenden Infrastrukturfunktion wären die wichtigsten Unterwerke gemäss der aktuellen Tragwerksnorm SIA 261, Tabelle 26, schon heute in die Bauwerksklasse III einzuteilen, und die übrigen in die Bauwerksklasse II. Diese Einteilung scheint aber bisher oft nicht vorgenommen worden zu sein.

1.2 Zielsetzung

Mit der Fortführung der Studie sollten anhand von diversen Pilotstudien die qualitativen Aussagen des 1. Zwischenberichtes (1) bestätigt werden sowie quantitative und auch kostenrelevante Aussagen gemacht werden. Konkret ging es darum,

- abzuklären, in welchen Erdbebenzonen in der Schweiz Abhebesicherungen bei Transformatoren notwendig sind; hierzu waren die tiefsten Eigenfrequenzen typischer Transformatoren zu messen.
- konkretere Erkenntnisse zum Ausmass der Probleme in der Schweiz zu gewinnen, insbesondere was die Verankerungen von Höchstspannungsapparaten und das Ausmass vorhandener Lose in den Leiterverbindungen anbetrifft.
- erste Erfahrungen zur Erdbebensicherung von Sekundärsystemen zu gewinnen.
- die Machbarkeit wie auch die Kosten möglicher Ertüchtigungsmassnahmen anhand konkreter Vorschläge grob abzuschätzen.

Die Ergebnisse der gesamten Studie sollen als Basis dienen, um

- die Elektrobranche allgemein für die Erdbebenproblematik zu sensibilisieren und mit praxistauglichen Lösungsansätzen zu unterstützen,
- eine ESTI-Richtlinie zu entwickeln, die als Vollzugshilfe für das ESTI im Rahmen der Bewilligung von Projekten dienen wird.

Die in den zwei Berichten (in (1), und im hier vorliegenden Bericht) zusammengefasste Studie dokumentiert die Grundlagen der erwähnten ESTI-Richtlinie. Diese Berichte erlauben deshalb den mit dem Bau und Unterhalt von Hochspannungsanlagen betrauten Ingenieuren, die Grundlagen der verschiedenen Bestimmungen der ESTI-Richtlinie nachzuvollziehen.

1.3 Terminologie

Im vorliegenden Bericht werden einige Fachausdrücke verwendet, die dem einen oder anderen Leser, je nach dessen fachlicher Herkunft, fremd sein könnten. Die wichtigsten Begriffe werden deshalb im Folgenden kurz erläutert.

Antwortspektrum: Antwort (z.B. Beschleunigungsantwort, auch "Spektralbeschleunigung" genannt, oder Verschiebungsantwort, auch "Spektralverschiebung" ge-

nannt) 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. Die im Mittelland mit Abstand am weitesten verbreitete Baugrundklasse ist die Klasse C.

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.

Dämpfung: Ein Mass dafür, wie schnell eine freie Schwingung mit der Zeit abklingt. Oft wird die Dämpfung als Prozentsatz der sogenannten "kritischen" Dämpfung angegeben, wobei unter diesem Begriff die minimale Dämpfung verstanden wird, bei der ein aus seiner Ruhelage gezwungenes und danach sich selbst überlassenes System direkt in die Ruhelage zurückkehrt, ohne vorerst Schwingungen auszuführen.

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 gemeint – genauer "Grund-eigenfrequenz" 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.

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

Höchste Spannungsebenen: Unter "höchste Spannungsebenen" oder "Höchstspannung" werden im vorliegenden Bericht die Spannungsebenen 380 kV und 220 kV verstanden. Höhere Spannungen kommen in der Schweiz nicht vor.

Kippeigenfrequenz: Eigenfrequenz, die einer Kippschwingung entspricht.

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.

Partizipationsfaktor: Faktor, der in der Modalanalyse (Schwingungsanalyse) auftritt. Wo er im vorliegenden Bericht erwähnt wird, gibt er an, um wieviel 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).

Qualifikationsstufen "AF2", "AF3" und "AF5": Verschiedene IEC-Publikationen definieren eine seismische Qualifikation von Hochspannungsapparaten (vgl. (1)). 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/s². 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 Leistungstransformatoren, inklusive Regulierpole, verstanden, aber nicht etwa Messgeräte wie Spannungs- oder Stromwandler (französisch ebenfalls "transformateurs" genannt).

1.4 Verdankung

Die meisten Untersuchungen, die im Rahmen der hier vorgestellten Pilotstudie durchgeführt wurden, wären nicht möglich gewesen ohne die aktive, engagierte Mitarbeit mehrerer Vertreter der Elektrizitätswirtschaft, die hier in aller Form verdankt sei. Seitens der Axpo AG, vormals NOK AG, handelte es sich um die Herren (in der Reihenfolge des Umfangs ihrer Mitwirkung bei den Messungen im UW Breite)

- M. Hässig, Leiter Abteilung Transformatoren und Wandler,
- A. Guérig, Leiter Ressort Planung/Projekte,
- H. Koch, Leiter Unterwerke Nord,
- H. Hefti, Mitarbeiter des UW Breite.

Seitens des ewz handelte es sich um die Herren

- P. Müller,
- R. Lochmann (Schindler & Partner)
- K. Arnold,
- HP. Wittwer.

Die Kosten für die Vermessung der Leiterverbindungen in Benken wurden vom ewz übernommen. Dieser Beitrag sei hier ebenfalls verdankt.

Ein weiterer Dank geht an die im Impressum erwähnte Begleitgruppe für deren engagierte Mitwirkung.

2. Erdbebenverhalten von Transformatoren

Wie bereits einleitend erwähnt, ist in der Schweiz die fehlende Verankerung grosser Transformatoren gegenüber Abheben eines der wichtigsten potenziellen Probleme bei Erdbeben. Die Gefahr des Abhebens aber hängt von den Eigenfrequenzen der fundamentalen Kippschwingungen ab, und zu diesem Punkt liegen in der Literatur zumindest implizit widersprüchliche Angaben vor. Deshalb wurden diese Eigenfrequenzen an fünf typischen Transformatoren gemessen.

2.1 Literaturangaben zu den Kippeigenfrequenzen

Gemäss amerikanischem Standard IEEE Std 693-2005 (2) können die Beanspruchungen bei Transformatoren, abgesehen von Durchführungen und Überspannungsableitern, gemäss den Anhängen A.1.3.1 und D.3 quasistatisch berechnet werden, wobei sich die Kräfte aus der maximalen Bodenbeschleunigung multipliziert mit der Masse ergeben. Dies bedeutet implizit, dass die tiefsten Kippeigenfrequenzen über 33 Hz liegen müssten, da sonst eine Amplifikation gegenüber der maximalen Bodenbeschleunigung berücksichtigt werden müsste. Andererseits hat eine frühere Version dieses Standards, der IEEE Std 693-1997, einen Verstärkungsfaktor von 2 gegenüber der Bodenbeschleunigung für den Punkt der Befestigung der Durchführungen auf dem Transformatordach vorgegeben.

Ibáñez et al. (1973) (3) berichten über Eigenfrequenzen, die an 500 kV-Transformatoren in Kalifornien gemessen wurden. Die tiefsten Werte lagen bei 2.70 und 3.35 Hz, mit Dämpfungswerten von 10 % resp. 2 % der kritischen Dämpfung. Bellorini et al. (1998) (4) haben in Italien an einem 230/135 kV-Transformator eine Eigenfrequenz von 3.5 Hz und eine Dämpfung von 2 % gemessen. Villaverde et al. (2001) (5) berichten über Messungen in Kalifornien an einem Pauwels 500 kV- und einem Westinghouse 500 kV-Transformator, beide einphasig. Gefunden wurden als tiefste Eigenfrequenzen 3.4 resp. 2.4 Hz, mit Dämpfungswerten von 1.5 bis 3.6 %.

Alle gemessenen Grundeigenfrequenzen liegen im Plateaubereich der Erdbebenanregung, was implizit im Widerspruch zu (2) steht. Unter der vorsichtigen Annahme einer Dämpfung von 2 % folgt daraus, dass die Beschleunigungen in 2/3 der Höhe des Transformators etwa 3 mal grösser werden als die maximale Bodenbeschleunigung. Auf dem Dach des Transformators ergäbe sich daraus eine bis zu 4.5-mal grössere Beschleunigung. Dies würde zumindest theoretisch bedeuten, dass in der Schweiz selbst in der Zone Z1 Abhebesicherungen notwendig wären.

Da das Anbringen von Abhebesicherungen an allen wichtigen Transformatoren der Schweiz einen bedeutenden finanziellen Aufwand erfordern würde, wurde beschlossen, eigene Frequenzmessungen an Transformatoren vorzunehmen. Dabei sollte insbesondere überprüft werden, ob die niedrigen Werte, die in der Literatur zu finden sind, nicht etwa nur auf lokale Schwingungen, beispielsweise von Durchführungen, zurückzuführen sind, sondern wirklich Kippschwingungen des Transformatorblocks als solchem entsprechen.

2.2 Messungen an Transformatoren

Messungen der Eigenschwingungen wurden an fünf verschiedenen Transformatoren vorgenommen; für Details wird der Leser auf den entsprechenden Messbericht (6) verwiesen. Diese Transformatoren decken praktisch das ganze Spektrum

vom grössten Höchstspannungstransformator bis zum Verteiltransformator auf Quartierebene ab. Das Hauptgewicht lag allerdings bei den höheren Spannungsebenen. Es handelte sich um folgende Transformatoren (vgl. Bild 2.1):



Bild 2.1 : Untersuchte Transformatoren:

- (a) BBC-MFO 31, 380/220 kV, einphasig, UW Breite,
- (b) Sécheron 32, 380/220 kV einphasig, UW Breite,
- (c) SMIT 220/110/16 kV dreiphasig UW Wittenwil,
- (d) Siemens 150/22 kV, dreiphasig, UW Zurich-Herders,
- (e) Rauscher&Stöcklin 11 kV/400 V, dreiphasig, Zurich-Seebach.

- BBC-MFO "31", 380/220 kV (200 MVA), einphasig, Reservepol des UW Breite (Axpö),
- Sécheron "32", 380/220 kV (1000 MVA), einphasig, Haupttransformator des UW Breite (Axpö),

- SMIT 220/110/16 kV, (160/160/53.3 MVA), dreiphasig, Haupttransformator des UW Wittenwil (Axpo),
- Siemens 150/22 kV (50 MVA), dreiphasig, Haupttransformator im UW Zürich-Herden (ewz),
- Verteiltransformator Rauscher&Stöcklin 11 kV/400 V (1 MVA), dreiphasig, Transformatorstation Himmerbrücke in Zürich-Seebach (ewz).

Bei den Transformatoren der Axpo wurden auch die Eigenschwingungen gemessen, bei denen in erster Linie die Durchführungen (und in einem Fall das Expansionsgefäss) schwingen.

Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über die gemessenen Eigenfrequenzen. Es bestätigt sich, dass die Grundeigenfrequenzen entweder im Bereich oder in unmittelbarer Nähe der Frequenzen liegen, die dem Plateau der Beschleunigungs-Antwortspektren entsprechen. In anderen Worten: Die Eigenfrequenzen aller gemessenen Transformatoren liegen im Bereich der stärksten Erdbebenanregung.

Tabelle 2.1 : Gemessene Eigenfrequenzen der verschiedenen Transformatoren.

Transformator	Frequenz (Hz)	
	longitudinal	transversal
BBC-MFO 31, 380/220 kV, Reservepol Breite		
Transformator-Kippschwingung	4.25	5.0
Durchführung	7.0	6.0
Expansionsgefäss	5.5	7.1
Sécheron 32, 380/220 kV, Hauptpol Breite		
Transformator-Kippschwingung	3.65	4.9
Durchführung	6 – 7 ?	7.4
SMIT 220/110/16 kV, Wittenwil		
Transformator-Kippschwingung	3.25	4.95
Durchführung	6.3	?
Siemens 150/22 kV, Zürich-Herden		
Transformator-Kippschwingung	4.3	5.5
Rauscher&Stöcklin 11 kV/400 V, Zürich-Seebach		
Transformator-Kippschwingung	4.4	3.9

Tabelle 2.2 enthält die gemessenen Dämpfungswerte. Mit "longitudinal" wird normalerweise die Richtung des Stromflusses bezeichnet. Beim Verteiltransformator ist diese Richtung nicht eindeutig; "longitudinal" entspricht deshalb dort der Richtung der grösseren Länge des Transformators.

Tabelle 2.2 : An drei Transformatoren gemessene Dämpfungswerte, in % der kritischen Dämpfung.

Transformator	Dämpfung (% kritisch)	
	longitudinal	transversal
BBC-MFO 31, 380/220 kV, Reservepol	1.7 %	1.2 %
Sécheron 32, 380/220 kV, Hauptpol	0.9 %	0.75 %
SMIT 220/110/16 kV	1.1 %	?

Dass es sich bei den Eigenschwingungen mit den tiefsten Frequenzen tatsächlich um Schwingungen des eigentlichen Transformatorblocks (und nicht nur um Schwingungen einer Durchführung, eines Expansionsgefäßes oder irgendeines Details) handelt, geht aus Bild 2.2 hervor.

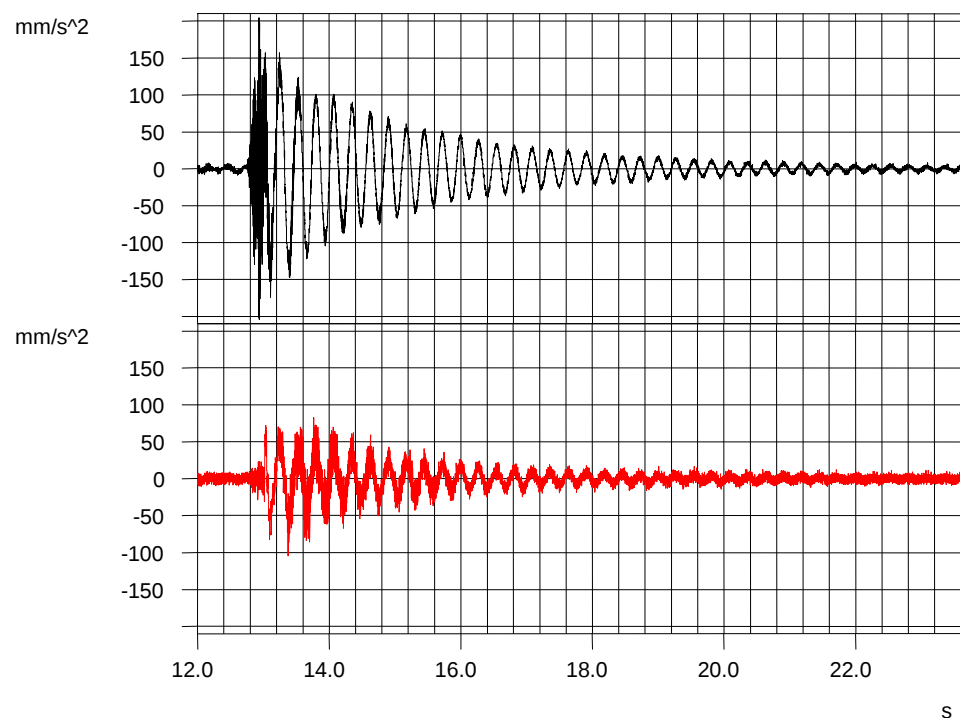


Bild 2.2 Horizontale Beschleunigungen beim Ausschwingen ("Snapback"-Versuch) auf dem Transformatordach (oben, schwarz) und in etwa einem Drittel der Höhe (unten, rot); es ist der gesamte Transformatorblock an der Schwingung beteiligt.

2.3 Folgerungen aus den Messungen an Transformatoren

Tabelle 2.3, dem 1. Zwischenbericht (1) entnommen, gibt eine Übersicht über die maximalen nominellen Bodenbeschleunigungen, mit denen in den verschiedenen Erdbebenzonen in der Schweiz gemäss der Norm SIA 261 zu rechnen ist.

Tabelle 2.3: Maximale Bodenbeschleunigungen in m/s^2 gemäss der Norm SIA 261, gerundet auf 0.1 m/s^2 , für die Bauwerksklasse III und die Baugrunderklassen C und E.

Erdbebenzone	Z1	Z2	Z3a	Z3b
SIA 261-Referenzwert: a_{gd}	0.6	1.0	1.3	1.6
BWK III: $a_{gd} \times \gamma_f (=1.4)$	0.8	1.4	1.8	2.2
Baugrund C: $a_{gd} \times \gamma_f \times S(C) (=1.15)$	1.0	1.6	2.1	2.6
Baugrund E: $a_{gd} \times \gamma_f \times S(E) (=1.4)$	1.2	2.0	2.6	3.1

Bild 2.3 ruft die Einteilung der Schweiz in Erdbebenzonen in Erinnerung. Die Zonen Z3a und Z3b betreffen nur den Kanton Wallis, einen kleinen Teil der Kantone Bern und Waadt sowie den Raum Basel.

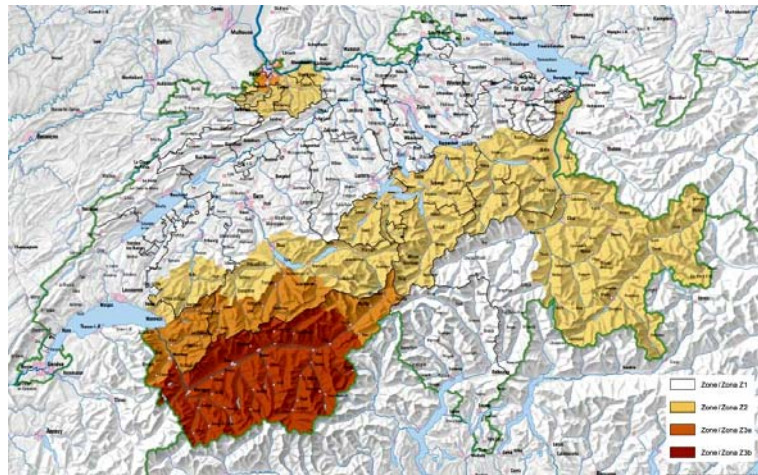


Bild 2.3: Erdbebenzonen der Schweiz gemäss der Norm SIA 261 aus dem Jahr 2003 (Quelle: SIA 261).

Setzt man die Dämpfung vorsichtig zu 2 % an, wie vom IEEE Std 693-2005 (2, Kapitel 6.9) als Maximalwert vorgegeben, so ergibt sich eine Plateauüberhöhung um den Faktor 3, d.h. die maximale effektiv wirksame Beschleunigung, "Spektralbeschleunigung" genannt, beträgt das Dreifache der maximalen Bodenbeschleunigung.

Die resultierende horizontale Trägheitskraft bei einem Erdbeben greift etwas oberhalb des Schwerpunktes des Transformators an. Es ist deshalb sinnvoll, von einem sogenannten Schlankheitsgrad des Transformators zu sprechen; dieser sei hier definiert als das Verhältnis aus der Höhe des Schwerpunktes zur halben Aufstandsweite. Ist das Verhältnis aus Erdbeschleunigung zur horizontalen Spektralbeschleunigung etwa gleich gross oder grösser als der Schlankheitsgrad, so ergibt sich ein vorübergehendes Abheben.

In der Zone Z1, für die Baugrunderklassen (BGK) C und E, ergeben sich maximale Spektralbeschleunigungen von 3.0 respektive 3.6 m/s^2 . Bei grösseren Transformatoren liegt der Schlankheitsgrad typischerweise bei 3.3 bis 3.6 . Damit ergibt sich für

die BGK C in der Zone Z1 gerade etwa der Beginn des Abhebens: $3.3 \text{ bis } 3.6 > 9.81/3.0 (= \sim 3.3)$. Je mehr der Schlankheitsgrad das Verhältnis aus Erdbeschleunigung zu Spektralbeschleunigung übertrifft, desto ausgeprägter das Abheben. Für die BGK E lautet die Ungleichung: $3.3 \text{ bis } 3.6 > 9.81/3.6 (= 2.7)$. Hier ist also schon mit einem etwas deutlicheren Abheben zu rechnen. Dessen Höhe bleibt aber immer noch äusserst gering.

Nach dem vorübergehenden Abheben fällt der Transformator wieder auf die Unterlage zurück, was durch den Aufprall hohe Beschleunigungsspitzen bewirkt, die insbesondere den Bruch der Porzellanisolatoren der Durchführungen bewirken können. Das Abheben führt aber vor allem auch zu grösseren Verschiebungen der oberen Enden der Durchführungen, die über Leiter mit benachbarten Hochspannungsapparaten verbunden sind. Oft aber reicht die vorhandene Lose in diesen Leiterverbindungen schon ohne Abheben kaum aus (vgl. Bild 2.4), und bei einem Abheben des Transformators erst recht nicht. Damit können hohe Interaktionskräfte entstehen, die zum vollständigen Bruch der Durchführung oder – primär bei amerikanischer oder japanischer Bauart – zum typischen Ausquetschen des Dichtungsringes an der Basis der Durchführung führen (vgl. Bild 6.11 im 1. Zwischenbericht).



Bild 2.4: Leiterverbindung ohne ausreichende Lose zwischen einer Durchführung des Hauptpols und einer Durchführung des Regulierpols beim Transformator Sécheron 32 (380/220 kV) im UW Breite.

Die Auswirkung einer fehlenden Abhebesicherung lässt sich anschaulich auch in folgender Weise verstehen: Ist die Erdbebenbeschleunigung hinreichend stark, so möchte der Transformator abheben. Man stelle sich in Bild 2.4 vor, der Hauptpol (Durchführung des Hauptpols rechts im Bild) wolle nach rechts abheben. Da anzunehmen ist, dass der Regulierpol (Durchführung des Regulierpols links im Bild) nicht in Phase mit dem Hauptpol schwingt, bedeutet dies, dass der Hauptpol über die straffe Leiterverbindung mit dem Regulierpol am Abheben gehindert wird. Niemandem käme in den Sinn, ein Abheben des Transformators über ein Zurückhalten an der Spitze einer Durchführung zu bewerkstelligen, aber genau das ist, was geschieht. Die unmittelbare Folge ist – mit hoher Wahrscheinlichkeit – ein Versagen der Durchführung.

Ein Abheben ist bei üblichen Transformatoren theoretisch möglich, sobald die effektive Bodenbeschleunigung den Wert von 1 m/s^2 übersteigt. Dies ist für die Baugrundklassen D oder E bereits in der Zone Z1 der Fall. Andererseits hat ein nur leichtes Abheben um wenige Millimeter sicher noch nicht dieselben Konsequenzen wie ein stärkeres Abheben. Dies wird auch von der Statistik bestätigt, die besagt, dass die Schadensgrenze bei unverankerten Transformatoren bei einer effektiven Bodenbeschleunigung von etwa 1.5 m/s^2 liegt (vgl. Tabelle 2 im 1. Zwischenbericht). Dieser Wert wird in der Schweiz ab Zone Z2 für alle wichtigen Baugrundklassen (B, C, D und E) überschritten.

2.4 Empfehlungen zur Abhebesicherung von Transformatoren

Empfohlen wird ein nach Erdbebenzonen abgestuftes Vorgehen zur Abhebesicherung von Transformatoren. Die Umsetzung dieser Empfehlungen liegt in der Eigenverantwortung der Netzbetreiber und letztlich, in Anbetracht der hohen Wiederbeschaffungskosten und langen Lieferfristen für Transformatoren, in ihrem Eigeninteresse.

- In der Zone Z1 wird für Neuanlagen das Anbringen einer einfachen konstruktiven Abhebesicherung empfohlen, solange eine solche mit verhältnismässig geringem Aufwand verwirklicht werden kann (vgl. Kapitel 2.5). Bei bestehenden Transformatoren kann auf nachträgliche Verankerungen verzichtet werden, sofern die Rollen, auf denen die meisten Transformatoren stehen, 30 % des Transformatorengewichts als Horizontalkraft ohne einzuknicken auf die Foundation übertragen können. Dies bedeutet, dass mehrere Rollen – und nicht nur eine – blockiert werden sollten, da sich sonst die gesamte Erdbebenkraft auf eine einzige Rolle konzentriert.
- In der Zone Z2 ist für neue Transformatoren vom Hersteller ein Zertifikat für "AF2-Tauglichkeit" gemäss IEC-Normen oder ein gleichwertiges Zertifikat zu verlangen. Darüber hinaus sind alle Transformatoren mit einem Schlankheitsgrad > 2 ausreichend zu verankern und mit einer wirksamen Abhebesicherung zu versehen. Für die wichtigsten bestehenden Transformatoren wird empfohlen, diese mit einer angemessenen Umsetzungsfrist nachträglich zu verankern, sofern deren Restlebensdauer 20 Jahre übersteigt. Es liegt in der Eigenverantwortung der Betreiber der Unterwerke, die für die Versorgungssicherheit wichtigsten Transformatoren zu identifizieren.
- In den Zonen Z3a und Z3b ist für neue Transformatoren vom Hersteller ein Zertifikat für "AF3-Tauglichkeit" gemäss IEC-Normen oder ein gleichwertiges Zertifikat zu verlangen. Darüber hinaus sind alle Transformatoren ausreichend zu verankern und gegen Abheben zu sichern. Für die wichtigsten bestehenden Transformatoren wird dringend empfohlen, diese mit einer angemessenen Umsetzungsfrist nachträglich zu verankern, sofern deren Restlebensdauer 20 Jahre übersteigt. Es liegt in der Eigenverantwortung der Betreiber der Unterwerke, die für die Versorgungssicherheit wichtigsten Transformatoren zu identifizieren.

2.5 Pilotprojekt einer Transformatorenverankerung

Bei der Axpo AG wurde ein Pilotprojekt zur erdbebengerechten Verankerung inklusive Abhebesicherung eines neuen Transformators gestartet, mit der Zielsetzung, die Umsetzung in der Praxis auszuloten und die Kosten abzuschätzen. Ein ausführlicher Bericht hierzu ist im Anhang A zu finden. Es handelt sich um einen Transformator für die Spannungsstufen 220/110 kV (160 MVA) mit einer Masse, im Betriebszustand, im

Bereich von 200 t. Ein Beispiel für einen Transformator dieser Grösse ist der Transformator in Wittenwil in Bild 2.1c.

Die Zusatzkosten für eine erdbebengerechte Verankerung eines solchen Transformators in den Zonen Z1 und Z2 wurden auf einen Gesamtbetrag von CHF 75'000.- bis 100'000.- geschätzt. In den Zonen 3a und 3b dürften diese Kosten nur unwesentlich höher ausfallen. Die untere Grenze trifft eher für Neuinstallationen zu, während die obere Grenze eher für Nachrüstungen gilt. Zum Vergleich: Ein neuer Transformator dieser Grösse, installiert vor Ort, kostet etwa 4 Mio Schweizer Franken.

3. Erdbebenverhalten von Höchstspannungsapparaten

Aus den weltweiten Erfahrungen bei Erdbeben kann geschlossen werden, dass bei den in der Schweiz zu betrachtenden Erdbebenstärken praktisch nur Apparate der Spannungsebenen 380 und 220 kV gefährdet sind. Die potenziell verletzlichsten Apparate sind die Leistungsschalter, gefolgt von den Kopfstromwandlern, da diese Apparate relativ grosse Massen in der Höhe aufweisen (vgl. hierzu die in (1) enthaltenen Ausführungen) – auch wenn diese Massen bei modernen Apparaten im Vergleich zu früheren Bauweisen geringer geworden sind.

Die häufigste Schadensart ist Porzellanbruch. Nach einem Erdbeben ist aber oft unklar, ob die aufgetretenen Trägheitskräfte als solche oder aber Interaktionskräfte infolge plötzlich straff gewordener Leiterverbindungen zwischen benachbarten Apparaten zum Bruch geführt haben. Im vorliegenden Kapitel werden nur die unmittelbaren Auswirkungen der Trägheitskräfte auf die Höchstspannungsapparate diskutiert; die Interaktion zwischen benachbarten Apparaten – das Problem ungenügender "Lose" in den Leiterverbindungen – wird in Kapitel 4 behandelt.

Die Trägheitskräfte als solche können prinzipiell zu folgenden Versagensarten führen:

- Biegebruch im Stützisolator,
- Versagen der Unterkonstruktion,
- Versagen der Verankerung der Unterkonstruktion im Fundament,
- Versagen des Fundamentes infolge Überschreitens der zulässigen Bodenspannungen.

Im Sinne einer generischen Studie wurden zwei Leistungsschalter des UW Breite und ein Leistungsschalter des UW Chamoson sowie ein Kopfstromwandler und eine Messgruppe des UW Breite für hypothetische Standorte in allen Erdbebenzonen auf ihr Erdbebenverhalten hin untersucht.

Höchstspannungsapparate inklusive Unterkonstruktion weisen fast immer Eigenfrequenzen auf, die im Plateaubereich der Erdbebenanregung liegen (vgl. Messbericht (6)). Sämtliche Berechnungen erfolgten daher unter der Annahme, dass die Plateaubeschleunigung auf den Apparat einwirkt. Dabei wurde die Baugrundklasse B oder C zugrunde gelegt. Für die Baugrundklassen D und E ergäben sich um 10 bis 15 % ungünstigere Resultate. Bei allen Berechnungen wurde ein Bedeutungsfaktor von 1.4, gültig für die Bauwerksklasse III, berücksichtigt.

Die in den Archiven der Unterwerke gefundenen Angaben zu den Apparaten liessen kaum zuverlässige Berechnungen der Porzellanspannungen vorhandener Apparate zu. Gemäss (1) haben aber überschlägige Berechnungen für Chamoson gezeigt, dass die Trägheitskräfte bei Erdbeben in der Zone Z1 selbst bei Leistungsschaltern mit flexiblen Unterkonstruktionen kaum ein Problem darstellen dürften. Dieser Befund deckt sich mit den Aussagen des IEEE Std 693-2005 (2), der davon ausgeht, dass bis 0.1 g Standardausführungen von Apparaten ausreichen, solange diese geeignet verankert sind. In den Zonen Z2 und Z3 aber sind Leistungsschalter, die nicht auf Erdbeben ausgelegt worden sind, potenziell gefährdet.

Weiter haben die überschlägigen Berechnungen für Chamoson gezeigt, dass die Trägheitskräfte als solche bei Strom- und Spannungswandlern sowie Trennern selbst in der Zone Z3b kaum Schäden bewirken dürften. Dies deckt sich mit den Aussagen von ABB und Siemens, wonach zumindest ihre heutigen Höchstspannungsapparate offenbar automatisch die IEC-Qualifikationsstufe AF3 (vgl. (1)) erfüllen sollen. Diese Qualifikationsstufe deckt die Zone Z3b knapp ab.

Bild 3.1 zeigt die im Rahmen der generischen Studie untersuchten Leistungsschalter mit deren Unterkonstruktionen. Diese Konfigurationen können als typische Vertreter der in der Schweiz vorkommenden Bauweisen angesehen werden. Ausgewählt wurden allerdings gezielt Leistungsschalter, die die ungünstigste Konfiguration aufweisen, d.h. die tendenziell schlankste Unterkonstruktion und/oder tendenziell kleinsten Einzelfundamente aufweisen. Beim Leistungsschalter von Chamoson ist zu bemerken, dass die Unterkonstruktion wegen Überschwemmungsgefahr etwas höher als üblich ausgebildet ist, was tendenziell zusätzlich ungünstig ist, da die Verankerungen und Fundamente höhere Kippmomente übernehmen müssen.



Bild 3.1: Untersuchte Leistungsschalter:
 (a) ABB ELF SP6-2 (380 kV), UW Breite,
 (b) Alstom HGF 115/2 (380 kV), UW Chamoson,
 (c) Sprecher HGF 214/2 (220 kV), UW Breite.

Bei allen durchgeführten generischen Berechnungen haben sich sowohl die Unterkonstruktionen wie auch deren Verankerungen in den Fundamenten als ausreichend erwiesen. Probleme ergeben sich hingegen, wenn die Leistungsschalter auf relativ kleinen Einzelfundamenten stehen.

Die Tabelle 3.1 zeigt die Erfüllungsfaktoren für den Erdbebenwiderstand der Fundamente der untersuchten Leistungsschalter. Der Erfüllungsfaktor gibt an, welchen Bruchteil des Erdbebens, das gemäss der Norm SIA 261 für die Bemessung neuer Apparate beigezogen werden müsste, überstanden wird. Ein Erfüllungsfaktor von 0.5 zum Beispiel bedeutet, dass die Sicherheit gerade ausreicht für ein Erdbeben, das halb so stark ist wie das Bemessungsbeben.

Tabelle 3.1: Erfüllungsfaktoren der Fundamente der untersuchten Leistungsschalter für zulässige statische Bodenspannungen σ_{zul} von 0.25 und 0.5 MPa, für die Bauwerksklasse III.

Leistungsschalter	Fundament- abmessung	σ_{zul} im Boden	Zone Z1	Zone Z2	Zone Z3a	Zone Z3b
	(l * b * h) (m)	(MPa)	Erfüllungsfaktor (-)			
ABB ELF SP6-2	1.7 * 1.7 * 1.0	0.25	3.5	2.1	1.6	1.3
		0.5	3.7	2.2	1.7	1.4
Alstom HGF 115/2c	0.8 * 0.8 * 1.0	0.25	0.6	0.4	0.3	0.2
		0.5	0.7	0.4	0.3	0.3
Sprecher HGF 214/2	0.9 * 0.9 * 1.0	0.25	1.8	1.1	0.8	0.7
		0.5	1.9	1.1	0.9	0.7

Die erwähnten generischen Berechnungen wurden für zwei typische statisch zulässige Bodenspannungen durchgeführt: 0.25 MPa und 0.5 MPa. Diese Spannungen wurden aber für die Erdbebennachweise um den Faktor 1.5 erhöht, da ein Erdbeben eine kurzzeitige Beanspruchung darstellt und darüber hinaus angenommen wurde, dass es sich um keine empfindlichen Böden handelt, deren Scherfestigkeit während des Erdbebens, etwa infolge eines Anstiegs des Porenwasserdrucks, abnehmen würde.

Ein Vergleich der Resultate der Tabelle 3.1 zeigt, dass diese kaum von der Bodenqualität abhängen; viel entscheidender ist die Geometrie, d.h. die Grösse des Fundamentes, da die Kippsicherheit im Vordergrund steht. Es kann gefolgert werden, dass in der Regel erst in den Zonen Z3a und Z3b Probleme bestehen. Eine Ausnahme bildet der Alstom-Leistungsschalter aus Chamoson (Bild 3.1b), der eine besonders hohe Unterkonstruktion mit einem Fundament kombiniert, dessen Abmessungen ausgesprochen gering sind. Für diesen Spezialfall ergäbe sich sogar schon in der Zone Z1 eine ungenügende Erdbebensicherheit.

Das Beispiel des ABB-Leistungsschalters, der auf einer etwas "aufgeweiteten" Unterkonstruktion steht, die automatisch ein entsprechend grösseres Fundament benötigt, zeigt eindrücklich, dass nur diejenigen Apparate gefährdet sind, die auf ausgesprochen kleinen Einzelfundamenten stehen.

Zu hohe Bodenspannungen als solche würden an und für sich noch kein Versagen des betroffenen Höchstspannungsapparates bewirken. Es ergeben sich aber plastische Deformationen im Boden, die zu einem Abfall der Eigenfrequenzen und damit zu einer Zunahme des Verschiebungsbedarfs der Leiteranschlusspunkte führen. Einfacher formuliert: die plastischen Deformationen im Boden erhöhen die Verschiebungen der Leiteranschlusspunkte. Dies erhöht den Losebedarf in den Leiterverbindungen zu den Nachbarapparaten, beziehungsweise erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass eine dieser Leiterverbindungen straff wird und damit plötzlich grosse Interaktionskräfte entstehen, die zum Bruch eines Porzellanisolators führen können. Oder anschaulicher ausgedrückt: Der betroffene Apparat wird gewissermassen von den Leiterseilen am Kippen gehindert, was hohe innere Beanspruchungen im Porzellan-Stützisolator bewirkt und zum Bruch führen kann.

Schon eine geringe Erhöhung der Fundamentabmessungen erlaubt, das Problem der Kippsicherheit zu lösen. Bei neuen Fundamenten empfiehlt es sich, einfach die Fundamentfläche etwas zu vergrössern. Eine zweite Möglichkeit, vor allem zur Erhaltung bestehender Fundamente, besteht darin, das Fundament höher zu gestalten, etwa durch Aufbetonieren, so dass die Kippsicherheit verbessert wird und damit die Spannungskonzentration in der Nähe der Kante, über die das Fundament sonst abkippen möchte, verringert wird. Dies ergibt im Erdbebenfall geringere maximale Bodenspannungen trotz höherem Fundamentgewicht.

Im Weiteren wurde die etwas exotisch wirkende Verankerung einer Messgruppe und eines Kopfstromwandlers untersucht, die auf einer Art Wagen stehen, der sich seinerseits auf einer metallischen Unterkonstruktion befindet (Bilder 3.2 und 3.3): Zwei einander diagonal gegenüberliegende Räder des Wagens sind mit Hilfe eines Bügels mit den Schienen verbunden. Diese Schienen sind ihrerseits am darunterliegenden Stahlrahmen über je zwei Klemmen pro Auflager befestigt; diese Klemmen sind in Bildmitte rechts in Bild 3.3 zu sehen. Die Stützen des Stahlrahmens ruhen auf einem gemeinsamen, im Wesentlichen flächigen Fundament.



Bild 3.2: Untersuchte Apparate: (a) Messgruppe Ritz KSKEF 450, UW Breite, (b) Kopfstromwandler Haefely IOSK 420, UW Breite.



Bild 3.3: Nahansichten der Verankerung der Messgruppe in Bild 3.2a; kritisch sind die Klemmen in Bildmitte des rechten Bildes, welche die Schiene halten.

Sowohl die Halterung der Räder über die erwähnten Bügel wie auch das Fundament würden selbst in der Zone Z3b ausreichen. Kritisch hingegen sind die Klemmen, die sich aufbiegen würden, sobald eine grössere vertikale Zugkraft zu übertragen ist. Der Erfüllungsfaktor beträgt in der Zone Z1, Baugrundklasse C, nur 0.5; in der Zone Z3b ergäbe sich sogar ein Erfüllungsfaktor von nur gerade 0.2. Dieses Resultat unterstreicht eindrücklich, dass selbst in der Zone Z1 unzureichende Verankerungen der Höchstspannungsapparate vorkommen können.

Wie schon einleitend erwähnt, sind SF₆-Anlagen kaum erdbebenanfällig, sofern sie ausreichend verankert sind und das Gebäude, das sie beherbergt, erdbebenresistent ist. Bild 3.4 zeigt ein Beispiel einer Verankerung einer solchen Anlage.



Bild 3.4: SF₆-Anlage im UW Herdern (ewz): Verankerung in der Geschossdecke.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in erster Linie Apparate auf kleinen Einzelfundamenten in Bezug auf die auftretenden Trägheitskräfte gefährdet sind. Die üblichen Verankerungen in den Fundamenten scheinen in der Regel selbst in der Zone Z3b auszureichen; unzureichende Einzelfälle, wie etwa in Bild 3.3 zu sehen, las-

sen sich aber selbst in der Zone Z1 nicht ausschliessen. Es wird deshalb empfohlen, zumindest neue Verankerungen und Fundamente von einem Ingenieur überprüfen zu lassen, in der Zone Z1 wenigstens in konstruktiver Hinsicht, und ab Zone Z2 mit Hilfe von Berechnungen.

4. Lose in den Leiterverbindungen

Die Leiterverbindung zwischen zwei Hochspannungsapparaten sollte so viel Lose aufweisen, dass die Apparate bei einem Erdbeben unabhängig voneinander schwingen können, ohne dass die Leiterverbindung straff wird. Ansonsten können grosse Interaktionskräfte entstehen, die typischerweise zum Bruch der Porzellanisolatoren und damit zur Zerstörung der Apparate führen können.

Wieviel Lose in Leiterverbindungen vorhanden sein muss, hängt neben der Leiterkonfiguration in erster Linie von den Verschiebungen ab, die sich bei einem Erdbeben an den Anschlusspunkten der Leiterseile ergeben. Diese Verschiebung – "Verschiebungsbedarf" genannt – ist stark von der Eigenperiode oder Eigenfrequenz der betrachteten Apparate abhängig. Die Eigenfrequenzen von Höchstspannungsapparaten mit üblicher Unterkonstruktion bewegen sich in der Regel im Bereich von 2 bis 4 Hz, können in Einzelfällen aber auch tiefer liegen.

4.1 Eigenfrequenzmessungen an Höchstspannungsapparaten

In den Unterwerken (UW) Breite und Benken wurden die Grundeigenfrequenzen, kurz "Eigenfrequenzen", zahlreicher Höchstspannungsapparate gemessen. Die Resultate sind in einem Messbericht (6) zusammengestellt.

Da Apparate der Spannungsebene 380 kV etwas grösser sind als solche der Spannungsebene 220 kV, ist zu erwarten, dass die Eigenfrequenzen der 380 kV-Apparate tendenziell etwas niedriger sind als die Eigenfrequenzen der 220 kV-Apparate. Die Eigenfrequenzen hängen aber auch von der Steifigkeit der Unterkonstruktionen ab, auf denen die Apparate stehen. Die Unterbauten im UW Breite können als typisch für die Schweiz betrachtet werden, während im UW Benken wegen Überschwemmungsgefahr besonders hohe und damit potentiell nachgiebigere Unterbauten vorhanden sind. Die im UW Benken gemessenen Eigenfrequenzen dürften deshalb tendenziell unteren Grenzwerten entsprechen.

Die konkreten Messungen haben gezeigt, dass die erwähnten tendenziellen Unterschiede kaum signifikant sind im Vergleich zur Variabilität der Eigenfrequenzen von einem Apparat zum anderen. Die Eigenfrequenzen der Höchstspannungsapparate mit Porzellanisolatoren liegen etwa in den folgenden Bereichen, auch wenn in Einzelfällen leicht niedrigere Werte vorkommen können:

- Leistungsschalter, Strom- und Spannungswandler sowie kombinierte Messgruppen: etwa 2 Hz,
- Stützisolatoren und Pantographentrenner: etwa 3 Hz,
- Überspannungsableiter und Drehtrenner: etwa 4 Hz.

Bemerkenswert ist, dass Apparate mit Kunststoffisolatoren niedrigere Eigenfrequenzen aufweisen als vergleichbare Apparate mit Porzellanisolatoren (vgl. Messbericht (6)). Die niedrigste Eigenfrequenz, nämlich 1.2 Hz, wurde im UW Breite für einen

380 kV-Messgruppe des Typs RITZ KSKEF 450 mit Kunststoffisolatoren gemessen. Die geringere Masse der Kunststoffisolatoren wird durch die geringere Steifigkeit gegenüber den Porzellanisolatoren offenbar mehr als kompensiert. Dies bedeutet, dass der Losebedarf in Leiterverbindungen zwischen Apparaten mit Kunststoffisolatoren etwas grösser ist als bei Leiterverbindungen zwischen Apparaten mit Porzellanisolatoren. Die Wahrscheinlichkeit, dass Kunststoffisolatoren brechen, wenn die Leiterverbindung plötzlich straff wird, ist aber deutlich kleiner als bei Porzellanisolatoren. Bei Porzellanisolatoren können unter Umständen schon bei äusserst geringen äusseren Einwirkungen Explosionen auftreten, was bei Kunststoffisolatoren ausgeschlossen werden kann.

4.2 Verschiebungsbedarf

Tabelle 4.1 gibt eine Übersicht über den Verschiebungsbedarf auf der Höhe eines äquivalenten Einmassenschwingers, die sogenannte "spektrale Verschiebung". Der tatsächliche Verschiebungsbedarf an den Anschlusspunkten der Leiterseile ist um den sogenannten Partizipationsfaktor grösser. Dieser Faktor ist von der Massen- und Steifigkeitsverteilung über die Höhe abhängig und dürfte sich in der Regel bei Höchstspannungsapparaten im Bereich von 1.2 (kopflastige Apparate) bis 1.5 (Apparate mit gleichmässiger Verteilung der Masse über die Höhe) bewegen. In Sonderfällen stark unregelmässiger Massenverteilung können sich auch wesentlich grössere Werte ergeben. Bei Höchstspannungstransformatoren, bei denen sich der Massenschwerpunkt nur in etwa einem Drittel oder gar Viertel der Höhe des Leiteranschlusses an der Spitze einer Durchführung befindet, liegt der Partizipationsfaktor in der Grössenordnung von 3 bis 4.

Tabelle 4.1: Spektrale Verschiebung in (mm) (ohne Partizipationsfaktor) gemäss SIA 261, in Abhängigkeit der Eigenfrequenz f_0 eines äquivalenten Einmassenschwingers und der Erdbebenzone, für die Baugrundklassen A, B und E, einen Bedeutungsfaktor $\gamma_f = 1.4$ und eine Dämpfung von 2 % der kritischen Dämpfung.

f_0 BGK	4 Hz			3 Hz			2 Hz		
	A	B	E	A	B	E	A	B	E
Zone Z1	4.0	4.8	5.6	8.0	9.6	11.2	12.7	19.1	22.3
Zone Z2	6.6	7.9	9.3	13.3	16.0	18.6	21.2	31.8	37.1
Zone Z3a	8.6	10.3	12.0	17.3	20.7	24.2	27.5	41.3	48.2
Zone Z3b	10.6	12.7	14.8	21.2	25.5	29.7	33.9	50.8	59.3

Die Tabelle 4.1 enthält die spektralen Verschiebungen für die Baugrundklassen A, B und E. Die Werte für die Baugrundklassen C und D sind für die angegebenen Frequenzen um wenige Prozente geringer als für die Baugrundklassen B respektive E. Aus der Tabelle 4.1 geht deutlich hervor, dass die Eigenfrequenz, die ohne Messungen vor Ort leider nur ungenau bekannt ist, mit Abstand der wichtigste Einflussparameter ist.

Das Ausmass an notwendiger Lose kann mit Hilfe der US-Norm IEEE Std 693-2005 (2), Kapitel 5.9, bestimmt werden. Die minimal notwendige Leiterlänge L_o zwischen zwei miteinander verbundenen Apparaten beträgt:

$$L_o = L_1 + 1.5 \Delta + L_2, \quad (1)$$

Hierin bedeuten

L_o die minimale notwendige Leiterlänge,

L_1 die kürzeste Distanz zwischen den Anschlusspunkten,

L_2 eine Zusatzlänge, abhängig von der Leiterkonfiguration (siehe unten),

Δ die maximale Relativverschiebung der Anschlusspunkte während des Erdbebens.

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

Gemäss US-Norm IEEE Std 1527-2006 (7), Kapitel 4.4, kann L_o mit einer weniger konservativen Formel bestimmt werden:

$$L_o = L_1 + 1.25 \Delta + L_2, \quad (2)$$

Die maximale Relativverschiebung Δ ist gemäss IEEE Std 693-2005 als Summe der Einzelverschiebungen der Anschlusspunkte der benachbarten Apparate beziehungsweise gemäss IEEE Std 1527-2006 mit Hilfe der sogenannten SRSS-Regel ("Square Root of the Sum of Squares") aus den Einzelverschiebungen zu bestimmen. Zu beachten ist, dass die bei seismischen Berechnungen in der Regel vernachlässigte Boden-Bauwerks-Interaktion zu einer Unterschätzung der Verschiebungen führt, also auf der unsicheren Seite liegt. Es ist deshalb durchaus sinnvoll, bei der Berechnung der minimalen Leiterlänge L_o vorsichtig vorzugehen. Für die Schweiz wird deshalb empfohlen, mit 1.5Δ zu rechnen, dafür aber zur Bestimmung von Δ die weniger konservative SRSS-Regel zu verwenden.

Tabelle 4.2 gibt eine Übersicht über die relativen Verschiebungen " 1.5Δ ", die zwischen zwei benachbarten Apparaten möglich sein müssen, ohne dass die Leiterverbindung straff wird. Die angegebenen Werte gelten für einen angenommenen Partizipationsfaktor von 1.6, der nach (7) 95 % der auftretenden Fälle abdeckt. Die Tabelle enthält die Werte für die Baugrundklassen (BGK) A, B und E. Für die BGK C können für praktische Zwecke die Werte der BGK B, und für die BGK D die Werte der BGK E verwendet werden. Die Tabelle 4.3 enthält gerundete Werte, die verwendet werden können, sofern keine genaueren Berechnungen oder Messungen durchgeführt werden.

Tabelle 4.2: Erforderliche Lose "1.5 Δ " in (mm), die im Leiterseil zwischen zwei Höchstspannungsapparaten (ohne Leistungstransformatoren) vorhanden sein muss, in Abhängigkeit der Grundeigenfrequenzen f_{01} und f_{02} der miteinander verbundenen Apparate, der Erdbebenzone und der Baugrundklasse, unter Annahme eines Partizipationsfaktors von 1.6, einer Dämpfung von 2 %, für die Bauwerksklasse III.

Apparate- frequenzen	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	43	72	94	115
	B	65	108	140	172
	E	75	126	163	201
2 Hz – 3 Hz	A	36	60	78	96
	B	51	85	111	137
	E	60	99	129	159
2 Hz – 4 Hz	A	32	53	69	85
	B	47	79	103	126
	E	55	92	119	147
3 Hz – 3 Hz	A	27	45	58	72
	B	33	54	70	87
	E	38	63	82	101
3 Hz – 4 Hz	A	21	36	46	57
	B	26	43	55	68
	E	30	50	65	80

Die tatsächliche Lose (zusätzliche Seillänge), die notwendig ist, um eine gewünschte Relativverschiebung zu gewährleisten, ohne dass die Leiterverbindung straff wird, hängt stark von der Konfiguration der Leiterverbindung ab. Bild 4.1 zeigt die wichtigsten Fälle. Die Konfiguration 1 eignet sich in der Regel am besten, wenn grosse Relativverschiebungen ermöglicht werden müssen. Die Kraft im Leiterseil nimmt hier nur langsam zu und hängt in erster Linie von der Biegesteifigkeit des Leiterseils ab.

Die Konfiguration 3 ist die einfachste und gleichzeitig am weitesten verbreitete. Für eine gegebene Relativverschiebung, die ermöglicht werden muss, erfordert sie allerdings den grössten Durchhang. Für grössere Relativverschiebungen kann deshalb diese Konfiguration zu Problemen mit den minimal einzuhaltenden Isolationsabständen führen. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Kraft im Leiterseil, sobald die anfänglich vorhandene Lose "aufgebraucht" ist, schlagartig anwächst. Aus der Sicht der Erdbebensicherheit sind deshalb Konfigurationen mit starkem vertikalem Versatz, wie etwa in Bild 3.2a zu sehen, vorteilhaft.

Tabelle 4.3: Gerundete Werte für die erforderliche Lose "1.5 Δ " in (mm), die im Leiterseil zwischen zwei Höchstspannungsapparaten (ohne Leistungstransformatoren) vorhanden sein muss, für identische Parameter wie in Tabelle 4.2 (BWK III, Partizipationsfaktor 1.6, Dämpfung 2 %).

Apparate- frequenzen	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

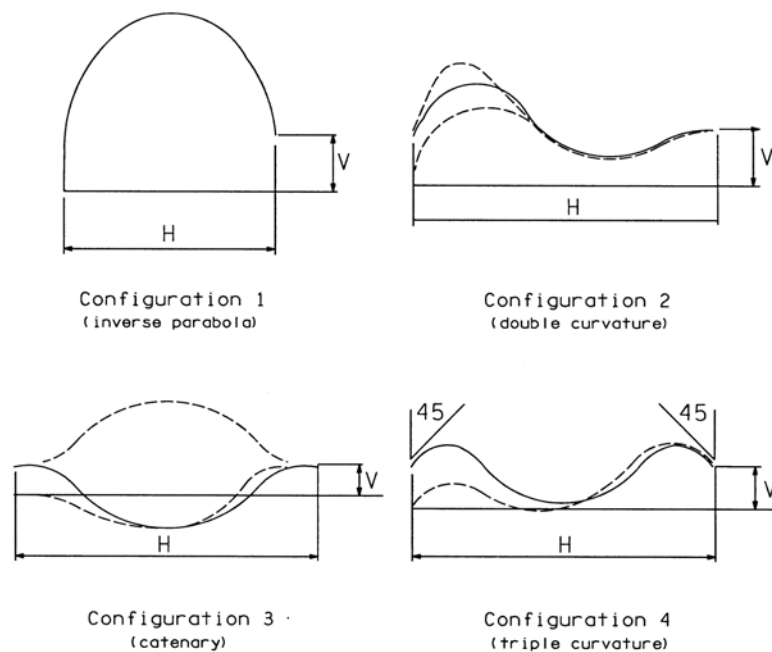


Bild 4.1: Konfigurationen von Leiterverbindungen (aus der amerikanischen Norm Std 1527-2006 (7)).

4.3 Grundlagen für die Überprüfung bestehender Verbindungen

Bild 4.2 zeigt für die Leiterkonfiguration 3 die Herleitung einer einfachen Abschätzung der möglichen Relativverschiebung Δ in Funktion des Durchhangs d und der Distanz q zwischen den Leiteranschlusspunkten. Da Grössenordnungsabschätzungen ausreichen, wird dabei vereinfachend angenommen, die Leiterverbindung bestehe aus vier gleichen Kreisbogen. Diese Herleitung verwendet darüber hinaus jeweils nur den ersten relevanten Term einer Taylorentwicklung der trigonometrischen Funktionen und ist deshalb nur gültig, solange der Durchhang höchstens etwa 10 bis 20 % der Distanz zwischen den Leiteranschlusspunkten beträgt. Diese Bedingung dürfte jedoch in der Schweiz meistens erfüllt sein.

Aus Bild 4.2 geht hervor, dass die mögliche Relativverschiebung mit dem Quadrat des Durchhangs zunimmt. Da andererseits der Verschiebungsbedarf weitgehend mit dem Quadrat der Eigenperiode der betrachteten Höchstspannungsapparate zunimmt, muss der Durchhang im Wesentlichen linear mit der Periode zunehmen. Massgebend ist jeweils in erster Linie die Periode des langsamer schwingenden Apparates.

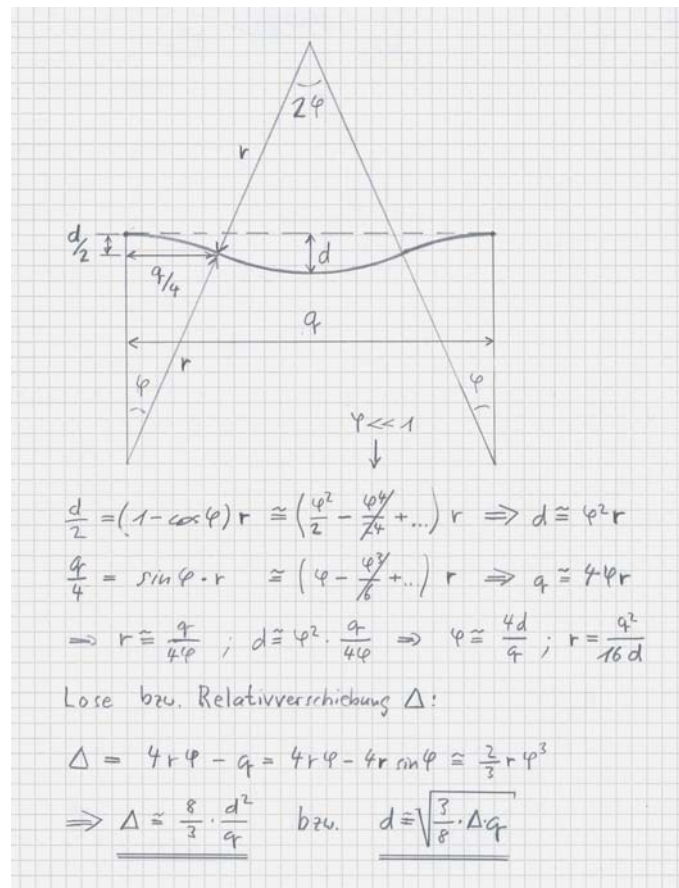


Bild 4.2: Herleitung einer einfachen Abschätzformel für die Beziehung zwischen Durchhang d und möglicher Relativverschiebung Δ für die Leiterkonfiguration 3.

Tabelle 4.4 gibt den notwendigen Durchhang für die Leiterkonfiguration 3 in Funktion der Relativverschiebung und der Distanz zwischen den Leiteranschlusspunkten

benachbarter Apparate. Diese Tabelle stellt einzig eine geometrische Beziehung dar und ist somit unabhängig von den übrigen Parametern wie Erdbebenzone, Baugrundklasse oder Apparate-Eigenfrequenz oder -periode gültig.

Tabelle 4.4: Notwendiger Durchhang d in (mm), um bei gegebener Distanz q zwischen den Leiteranschlusspunkten eine gewünschte Relativverschiebung Δ ohne Straffung der Leiterverbindung sicherstellen zu können. Diese Tabelle stellt eine rein geometrische Beziehung dar und gilt somit für alle Erdbebenzonen, Baugrundklassen und Apparate-Eigenfrequenzen.

Rel.verschieb. Δ (mm)	30	60	120	200
Distanz $q = 1.5$ m	130	185	260	335
Distanz $q = 3.0$ m	185	260	365	475
Distanz $q = 4.5$ m	225	320	450	580
Distanz $q = 6.0$ m	260	365	520	670

Bild 4.3 zeigt eine weitere Leiterkonfiguration, fortan Leiterkonfiguration 5 genannt, bei der sich die Anschlusspunkte auf unterschiedlicher Höhe befinden, der Höhenunterschied aber in der Regel wesentlich kleiner ist als die horizontale Distanz zwischen den Anschlusspunkten. Der Leiter geht horizontal von den Anschlusspunkten ab und verbindet diese näherungsweise in zwei Kreisbogen.

Bild 4.3 zeigt die Herleitung einer einfachen Abschätzung der möglichen Relativverschiebung Δ in Funktion des Höhenunterschiedes h und der Distanz q zwischen den Leiteranschlusspunkten. Diese Herleitung verwendet nur die ersten Terme der Taylorentwicklungen der trigonometrischen Funktionen und der Wurzelfunktion und ist deshalb nur gültig, solange der Höhenunterschied höchstens $1/3$ (allenfalls $1/2$) der Distanz zwischen den Leiteranschlusspunkten beträgt.

Achtung: die in Bild 4.3 berechnete Relativverschiebung Δ ist nur ein oberer Grenzwert, der erreicht würde, wenn der Leiter keine Biegesteifigkeit aufwiese und somit bei den Anschlusspunkten unendlich grosse Krümmungen (Knicke) zugelassen werden könnten. In Wirklichkeit sind also, abhängig von der Biegesteifigkeit des Leiters, noch grössere Höhenunterschiede als in der Tabelle aufgeführt notwendig. Solange keine näheren Abklärungen stattgefunden haben, wird vorgeschlagen, von einem notwendigen Zuschlag von 50 % auszugehen. Die Leiterkonfiguration 5 sollte deshalb in der Regel durch eine solche ähnlich der Konfiguration 4 (vgl. Bild 4.1) ersetzt werden. Dies würde aber bedeuten, dass die Leiteranschlüsse nicht mehr horizontal ausgeführt werden könnten. Als Alternative mit einfacheren horizontalen Leiterabgängen wäre auch eine Konfiguration 5 denkbar, die zusätzliche Lose analog zur Konfiguration 3 aufwiese.

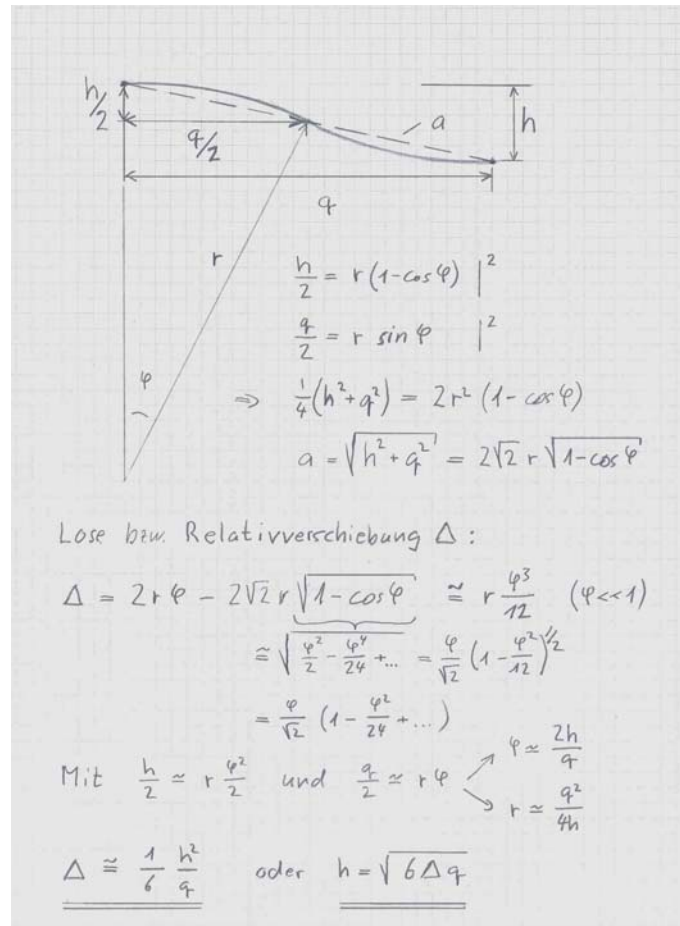


Bild 4.3: Leiterkonfiguration 5: Herleitung einer einfachen Abschätzformel für die Beziehung zwischen Höhenunterschied h (zwischen den Leiteranschlusspunkten) und möglicher Relativverschiebung Δ .

Die Leiterkonfiguration 5 ergibt optisch schnell einmal den Eindruck ausreichender Lose, was aber täuschend ist. Wie aus einem Vergleich der Näherungsformeln in den Bildern 4.2 und 4.3 hervorgeht, muss der Höhenunterschied der Anschlusspunkte (solange dieser klein bleibt im Vergleich zur Distanz zwischen diesen) in der Konfiguration 5 über 16 mal den Durchhang der Konfiguration 3 betragen, um eine ähnliche Relativverschiebung zulassen zu können (bzw. 24 mal, wenn, wie empfohlen, der 1.5-fache Höhenunterschied angestrebt wird).

Tabelle 4.5 gibt den notwendigen Höhenunterschied für die Leiterkonfiguration 5 in Funktion der Relativverschiebung und der Distanz zwischen den Leiteranschlusspunkten benachbarter Apparate. Auch diese Tabelle stellt einzig eine geometrische Beziehung dar und ist somit unabhängig von den übrigen Parametern wie Erdbebenzone, Baugrundklasse oder Apparate-Eigenfrequenz gültig. Zu beachten ist, dass die mögliche Relativverschiebung Δ , zumindest in der Näherung der angegebenen Formeln, vom Quadrat des Höhenunterschiedes h abhängt. Ist h auch nur um einen Faktor 1.4 zu klein, so ist das maximal mögliche Δ bereits um einen Faktor 2 zu klein!

Tabelle 4.5: Unterer Grenzwert des Höhenunterschieds in (mm), um bei gegebener Distanz q zwischen den Leiteranschlusspunkten eine gewünschte Relativverschiebung Δ ohne Straffung der Leiterverbindung sicherstellen zu können (" – " bedeutet, dass der Wert ausserhalb des Gültigkeitsbereichs der Näherungsformeln von Bild 4.3 liegt). Diese Tabelle stellt eine rein geometrische Beziehung dar und gilt somit für alle Erdbebenzonen, Baugrundklassen und Apparate-Eigenfrequenzen.

Rel.verschieb. Δ (mm)	30	60	120	200
Distanz $q = 1.5$ m	520	735	–	–
Distanz $q = 3.0$ m	735	1040	1470	–
Distanz $q = 4.5$ m	900	1270	1800	–
Distanz $q = 6.0$ m	1040	1470	2080	2680

Durchhänge, die aus der Sicht der Erdbebensicherheit bestimmt worden sind, müssen bezüglich der im Kurzschlussfall auftretenden dynamischen Kräfte überprüft werden. Ergeben sich bezüglich Kurzschluss Probleme, ist eine geeignetere Leiterkonfiguration zu wählen.

4.4 Pilotstudie zur Beurteilung der Lose im UW Breite

Die in Kapitel 4.3 dargelegten Beziehungen wurden zur Beurteilung der am kritischsten erscheinenden Leiterverbindungen im UW Breite verwendet. Dabei wurde angenommen, es handle sich in der Breite um die am weitesten verbreitete Baugrundklasse C.

Links unten in Bild 4.4 sind Leiterverbindungen zwischen einer Messgruppe und einem Schwenktrenner für 220 kV zu sehen. Bild 4.5 zeigt eine Nahaufnahme aus der Gegenrichtung.



Bild 4.4: Links unten: Relativ straffe Leiterverbindungen zwischen Messgruppen und Schwenktrenner (220 kV) im UW Breite.



Bild 4.5: Nahaufnahme der in Bild 4.4 sichtbaren Leiterverbindungen zwischen Messgruppen und Schwenktrenner (220 kV) im UW Breite (Aufnahme aus der Gegenrichtung).

Das Leiterseil zwischen Messgruppe und Schwenktrenner ist an den zwei Anschlusspunkten, die sich auf unterschiedlicher Höhe befinden, horizontal angeschlossen; es handelt sich somit um die Leiterkonfiguration 5. Gemäss der Definition in Bild 4.3 messen der horizontale Abstand (q) 1.64 m und der Höhenunterschied (h) 220 mm. Der obere Grenzwert der zulässigen Relativverschiebung (Δ) beträgt somit nur knapp 5 mm. Bei geschätzten Eigenfrequenzen von 2 Hz für die Messgruppe und 4 Hz für den Schwenktrenner beträgt der Verschiebungsbedarf gemäss Tabelle 4.2 aber 47 mm, also fast das Zehnfache.

Um den Bedarf an Relativverschiebung von 47 mm abdecken zu können, müsste der Höhenunterschied gemäss der Endformel in Bild 4.3 einen Wert von 680 mm aufweisen, bzw. unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit des Leiters etwa das 1.5-fache, also etwa 1 m. Eine für einen Umbau wesentlich einfachere Lösung wäre, ohne Veränderung des Höhenunterschiedes zusätzliche Lose in die Verbindung einzubauen. Hierzu wäre das vorhandene Leiterseil um zirka 45 mm zu verlängern, was einen Durchhang von knapp 180 mm ergäbe.

In Bild 4.6 handelt es sich um eine 220 kV-Leiterverbindung der Konfiguration 3 zwischen einem Pantographentrenner und einem Stützisolator. Bei einem Abstand der Leiteranschlusspunkte von 3.57 m beträgt der Durchhang 220 mm. Dies bedeutet gemäss Bild 4.2, dass eine maximale Relativverschiebung von bis zu 36 mm möglich ist, bevor grosse Kräfte im Leiterseil entstehen. Geht man von Eigenfrequenzen von 3 Hz für den Trenner und den Stützisolator aus, so beträgt der Bedarf an Relativverschiebung ($1.5 \times \Delta$, gemäss Tabelle 4.2) 33 mm; die vorhandene Lose reicht also am Standort der Breite gerade aus. Aber ab der Zone Z2 wäre die vorhandene Lose nicht mehr ausreichend.



Bild 4.6: Leiterverbindung zwischen Pantographentrenner und Stützisolator im Feld Trafo 31 (220 kV) des UW Breite.

Bild 4.7 zeigt eine 220 kV-Leiterverbindung der Konfiguration 3 zwischen einem Stützisolator und einem Schwenktrenner. Der Abstand der Leiteranschlusspunkte beträgt 4,95 m, der Durchhang zirka 340 mm. Dies bedeutet, dass eine maximale Relativverschiebung von bis zu 62 mm zulässig ist.



Bild 4.7: Leiterverbindung zwischen Stützisolator und Schwenktrenner im Feld Trafo 31 (220 kV) des UW Breite.

Geht man von Eigenfrequenzen von 3 Hz für den Stützisolator und von 4 Hz für den Trenner aus, so beträgt der Bedarf an Relativverschiebung ($1.5 \times \Delta$ gemäß Tabelle 4.2) selbst für die Zone Z2 und die Baugrundklasse E nicht mehr als 50 mm. Die vorhandene Lose würde also selbst in der Zone Z2 für alle Baugrundklassen ausreichen,

sofern die angenommenen Eigenfrequenzen richtig oder höher als die angenommenen Werte sind. In den Zonen Z3a und Z3b jedoch wäre die vorhandene Lose für die Baugrundklassen D und E respektive B bis E nicht mehr ausreichend.

In Bild 4.8 sind Leiterverbindungen zwischen einem Stromwandler, einem Spannungswandler und einem Schwenktrenner zu sehen (Feld Trafo 32, 380 kV). Obwohl die Anschlusspunkte auf leicht unterschiedlichen Höhenknoten liegen, kann näherungsweise von der Leiterkonfiguration 3 ausgegangen werden. Aus betrieblichen Gründen konnte der Durchhang hier und für die folgenden Beispiele nicht mehr vor Ort ausgemessen werden.



Bild 4.8: Leiterverbindungen zwischen Stromwandler, Spannungswandler und Schwenktrenner im Feld Trafo 32 (380 kV) des UW Breite.

Zwischen Strom- und Spannungswandler in Bild 4.8 dürfte der Durchhang kaum über 50 mm betragen, und gemäss Plan liegen die Anschlusspunkte etwa 2.2 m auseinander. Mit geschätzten Eigenfrequenzen von 2 Hz für den Strom- und 3 Hz für den Spannungswandler beträgt der Relativverschiebungsbedarf 51 mm. Gemäss der letzten Formel in Bild 4.2 müsste der Durchhang demzufolge 205 mm betragen. Dies ist mit Sicherheit deutlich mehr als der vorhandene Durchhang.

Zwischen dem Spannungswandler und dem Trenner dürfte der vorhandene Durchhang in der Grössenordnung von 100 mm liegen, bei einem horizontalen Abstand der Anschlusspunkte von etwa 3.3 m. Mit geschätzten Eigenfrequenzen von 3 Hz für den Spannungswandler und 4 Hz für den Trenner beträgt der Relativverschiebungsbedarf 26 mm. Gemäss der letzten Formel in Bild 4.2 müsste der Durchhang demzufolge etwa 180 mm betragen. Dies ist höchst wahrscheinlich mehr als vorhanden.

Bild 4.9 zeigt 380 kV-Leiterverbindungen zwischen einem Stromwandler, einem Spannungswandler und einem Schwenktrenner. Hier wird nur die Verbindung zwischen Strom- und Spannungswandler genauer betrachtet. Es handelt sich um die Leiterkonfiguration 5 mit – gemäss Plan – einem horizontalen Abstand von zirka 2.2 m und einem Höhenunterschied von etwa 0.5 m. Mit geschätzten Eigenfrequenzen von 2 Hz für den Strom- und 3 Hz für den Spannungswandler beträgt der Rela-

tivverschiebungsbedarf 51 mm. Gemäss der letzten Formel in Bild 4.3 müsste der Höhenunterschied theoretisch 820 mm betragen, praktisch aber etwa das 1.5-fache, also zirka 1.2 m. Dies ist weit mehr als der vorhandene Höhenunterschied. Andererseits kann aus diesem Resultat geschlossen werden, dass der vorhandene Höhenunterschied zwischen Spannungswandler und Schwenktrenner – etwa 0.9 m – wegen der höheren Eigenfrequenzen ausreichen dürfte.



Bild 4.9: Leiterverbindungen zwischen Stromwandler, Spannungswandler und Schwenktrenner im Feld Lägern-Nord (380 kV) des UW Breite.

In Bild 4.10 interessiert die 380 kV-Leiterverbindung zwischen Messgruppe und Stützisolator, die näherungsweise der Konfiguration 3 zugeteilt werden kann.



Bild 4.10: Leiterverbindungen zwischen einer Messgruppe Ritz KSKEF 450 und einem Stützisolator im Kupplungsfeld (380 kV) des UW Breite.

Der horizontale Abstand zwischen Messgruppe und Stützisolator beträgt – gemäss Plan – etwa 4.6 m, und der Durchhang dürfte in der Grössenordnung von 0.5 m liegen. Die Eigenfrequenz der Messgruppe (Ritz KSFEK 450) mit Plastikisolator wurde vor Ort gemessen (6) und beträgt in Leiterrichtung nur gerade 1.2 Hz. Daraus ergibt sich ein Relativverschiebungsbedarf von 66 mm, der einen Durchhang von 340 mm erfordert. Der vorhandene Durchhang dürfte hier also ausreichen, obwohl der Relativverschiebungsbedarf wegen der niedrigen Eigenfrequenz der Messgruppe relativ hoch ist.

In Bild 4.11 ist die Leiterverbindung zwischen Haupt- und Regulierpol des Transformators 31 (380/220 kV) zu sehen.



Bild 4.11: Leiterverbindung zwischen Haupt- und Regulierpol des Transformators 31 des UW Breite.

Die Leiterseile in Bild 4.11 sind senkrecht zur jeweiligen Achse der zueinander schiefstehenden Durchführung angeschlossen, so dass die Formeln der Bilder 4.2 und 4.3 nicht mehr gültig sind. Da die Anfangsrichtungen der Leiterseile bei den Anschlusspunkten damit deutlich unterschiedlich sind, spielt die Biegesteifigkeit der Seile eine noch ausgeprägtere Rolle als bei der Leiterkonfiguration 5. Rein qualitativ betrachtet dürfte das vorhandene Leiterseil etwa die minimale Länge aufweisen, die benötigt wird, um unnötige Biegemomente auf die Anschlusspunkte zu vermeiden. Das Leiterseil sollte deshalb etwa um den Betrag des Relativverschiebungsbedarfs verlängert werden. Der sich daraus ergebende Durchhang wird am einfachsten anhand eines Modelles abgeschätzt.

Die niedrigste Eigenfrequenz des Transformators 31 wurde zu 4.25 Hz gemessen. Geht man für beide Pole von einem vorsichtigen Wert von 4 Hz aus (um die zusätzlichen Durchführungsschwingungen grob mitzuberücksichtigen), und berücksichtigt man einen Partizipationsfaktor von 4, so ergibt sich ein Relativverschiebungsbedarf (inklusive dem Faktor 1.5 analog zur Tabelle 4.2) von 38 mm. Eine Verlängerung des Leiterseils um diesen Betrag dürfte nach grober Schätzung einen Durchhang von zirka 200 mm erzeugen.

Bild 4.12 zeigt die Leiterverbindung, mit zwischengeschaltetem Überspannungsableiter, zwischen Haupt- und Regulierpol des Transformators 32 (380/220 kV). Die Leiterverbindung der Konfiguration 3 ist praktisch straff und müsste auch hier um den Relativverschiebungsbedarf verlängert werden. Die gemessene tiefste Eigenfrequenz des Transformators beträgt in Leiterrichtung 3.65 Hz. Legt man der Berechnung 3.5 Hz (mit Partizipationsfaktor 4) und für den Überspannungsableiter 4.0 Hz (mit Partizipationsfaktor 1.3) zugrunde, so ergibt sich auf beiden Seiten des Überspannungsableiters ein Relativverschiebungsbedarf von je 35 mm. Bei einem horizontalen Abstand der Anschlusspunkte von 0.9 m bedeutet dies, dass ein Durchhang von etwa 100 mm notwendig wäre. Es wäre zu überprüfen, ob ein solcher Durchhang möglich ist, ohne dass damit unerwünschte Biegemomente im Leiterseil entstehen, die an den Anschlusspunkten von den Durchführungsspitzen aufgenommen werden müssten.



Bild 4.12: Leiterverbindung zwischen Haupt- und Regulierpol des Transformators 32 des UW Breite.

4.5 Pilotstudie zur Beurteilung der Lose im UW Benken

Im UW Benken wurden die Leiterverbindungen dreier Felder von einem Geometer ausgemessen (vgl. Anhang B). Es handelte sich um das Trafo-Feld D32 und das Kupplungsfeld D34 auf der 380 kV-Seite sowie um das Kupplungsfeld F22 auf der 220 kV-Seite. Aufgenommen wurden die Längen der Leiterseile sowie die geraden Distanzen zwischen den Leiteranschlusspunkten jeweils benachbarter Apparate. Dies erlaubte eine unmittelbare Bestimmung der tatsächlich vorhandenen Lose.

Da die Längen der Leiterseile und die Distanzen zwischen den Apparaten nur auf den Zentimeter genau bestimmt worden waren, und die Lose der (kleinen) Differenz zwischen diesen gemessenen Größen entspricht, ergaben sich für die Lose nur relativ grobe Werte. Wie sich herausstellte, war diese geringe Genauigkeit jedoch ausreichend für die Beurteilung des Ausmasses der Problematik der ungenügenden Lose.

Das UW Benken liegt in der Zone Z2, und für den Boden wurde die Baugrundklasse D angenommen. Die Beurteilung der vorhandenen Lose erfolgte aber generisch für alle Erdbebenzonen in der Schweiz, jeweils für die Baugrundklasse D. Da das UW Benken wegen Überschwemmungsgefahr leicht höhere Unterkonstruktionen aufweist als üblich und es sich um einen relativ "weichen" Baugrund handelt, dürfte der Losebedarf in den Leiterverbindungen – wegen tendenziell geringerer Eigenfrequenzen – hier leicht höher sein als anderswo. Die Resultate dürften deshalb, übertragen auf andere Unterwerke in der Schweiz, tendenziell eher pessimistisch sein.

Wie bereits unter Punkt 4.1 erwähnt, wurden die Eigenfrequenzen an zahlreichen Höchstspannungsapparaten gemessen. Dies erlaubte eine feinere Bestimmung des Losebedarfs, als dies allein mit Frequenzschätzungen möglich gewesen wäre. Der Losebedarf wurde deshalb auf zwei verschiedene Arten ermittelt: Einerseits verfeinert, d.h. anhand gemessener Eigenfrequenzen und apparateweise geschätzter Partizipationsfaktoren, und andererseits vereinfachend anhand der Tabelle 4.3.

Die Tabellen 4.6 und 4.7 geben eine Übersicht über die Resultate für das Trafo-Feld D32, einmal für die Berechnungen des Losebedarfs mit Hilfe der verfeinerten Methode, und einmal mit Hilfe der vereinfachten Methode, d.h. anhand geschätzter Eigenfrequenzen gemäss Kapitel 4.1 sowie der Tabelle 4.3. Der vereinfacht berechnete Losebedarf ist um einen Faktor 1 bis 2 grösser als der verfeinert bestimmte. Die Hauptursache für diese Unterschiede liegt bei der Schätzung der Eigenfrequenzen der Apparate und viel weniger bei den Vereinfachungen bzw. Rundungen, die der Tabelle 4.3 zugrunde liegen. Tatsächlich haben die Eigenfrequenzen der Apparate einen sehr starken Einfluss auf den Losebedarf.

Tabelle 4.6: Übersicht über die vorhandene und die gemäss verfeinerter Bestimmung notwendige Lose zwischen den Apparaten des Trafo-Feldes D32 in Benken (Z2, BGK D). Die Loosewerte gelten jeweils für die entsprechenden Verbindungen zwischen den links aussen aufgeführten Apparaten.

Apparat	f_0 (Hz) gemessen	Vorhand. Lose (mm)	Lose- bedarf (mm) in Benken	ausreichend für Zone			
				Z1	Z2	Z3a	Z3b
Schwenk- trenner	4.1	~ 130	61	ja	ja	ja	ja
Spannungs- wandler	2.4			ja	nein	nein	nein
Stromwandler	3.3	~ 50	95	nein	nein	nein	nein
Leistungs- schalter	1.8			nein	nein	nein	nein
Pantographen- trenner	2.8	~ 30	100	nein	nein	nein	nein
Stützisolator	3.4			nein	nein	nein	nein

Tabelle 4.7: Übersicht über die vorhandene und die gemäss Tabelle 4.3 notwendige Lose zwischen den Apparaten des Trafo-Feldes D32 in Benken (Z2, BGK D). Die Loosewerte gelten jeweils für die entsprechenden Verbindungen zwischen den links aussen aufgeführten Apparaten.

Apparat	f_0 (Hz) geschätzt	Vorhand. Lose (mm)	Lose- bedarf (mm) in Benken	ausreichend für Zone			
				Z1	Z2	Z3a	Z3b
Schwenk- trenner	4	~ 130	95	ja	ja	ja	nein
Spannungs- wandler	2	~ 50	125	nein	nein	nein	nein
Stromwandler	2	~ 50	125	nein	nein	nein	nein
Leistungs- schalter	2	~ 30	100	nein	nein	nein	nein
Pantographen- trenner	3	~ 20	65	nein	nein	nein	nein
Stützisolator	3						

Trotz der erwähnten Unterschiede in der Berechnung der notwendigen Lose fällt die Beurteilung, ob die vorhandene Lose ausreicht, sehr ähnlich aus (in den Zonen Z1 und Z3b etwas ungünstiger gemäss vereinfachter Methode). Für den konkreten Fall von Benken ergibt sich sogar dasselbe Resultat: Im Trafo-Feld D32 verfügt nur die Leiterverbindung zwischen dem Schwenktrenner und dem Spannungswandler über ausreichende Lose; alle anderen Verbindungen sind zu straff.

Beim Kupplungsfeld D34 weist einzig die Leiterverbindung zwischen dem Pantographentrenner und dem Spannungswandler ausreichende Lose auf; gemäss verfeinerter Berechnung des Losebedarfs wäre dies selbst in der Zone Z3b der Fall. Die übrigen Leiterverbindungen sind für die Zone Z2 zu straff.

Beim Kupplungsfeld F22 ist die Situation ähnlich. Einzig die Leiterverbindung zwischen dem Pantographentrenner und dem Leistungsschalter weist für den Standort Benken ausreichende Lose auf, und dies nur gemäss verfeinerter Berechnung des Losebedarfs. Die übrigen Leiterverbindungen sind für die Zone Z2 zu straff.

4.6 Schlussfolgerungen bezüglich Lose

Die Untersuchungen des Losebedarfs für die Unterwerke Breite und Benken zeigen, dass das Problem ungenügender Lose für die Spannungsebenen 380 kV und 220 kV schon in der Zone Z1 von Bedeutung ist. Tiefere Spannungsebenen sind gemäss internationaler Erfahrung bezüglich fehlender Lose kaum problematisch. In sehr grober Schätzung kann davon ausgegangen werden, dass in der Zone Z1 etwa die Hälfte der vorhandenen Leiterverbindungen zu straff sind. In der Zone Z2 dürfte dies für etwa drei Viertel der Leiterverbindungen zutreffen. In den Zonen Z3a und Z3b schliesslich sind praktisch nur diejenigen Leiterverbindungen unproblematisch, die einen grossen vertikalen Versatz zwischen den Leiteranschlusspunkten aufweisen.

Ein Beispiel hierfür ist etwas links der Bildmitte auf Bild 4.4 zu sehen: es handelt sich um die Leiterseile, die rechts von den Messgruppen wegführen.

In Anbetracht dieses ungünstigen Befundes wäre es rein technisch gesehen angezeigt, die Leiterverbindungen nachträglich mit ausreichender Lose zu versehen. Bei bestehenden Anlagen könnten Eigenfrequenzmessungen helfen, den Losebedarf genauer zu bestimmen und so die Anzahl zu erneuernder Leiterseile zu vermindern.

Das ewz hat eine grobe Kostenschätzung für eine hypothetische Ertüchtigung des UW Benken bezüglich Lose durchgeführt. Pro Leitungs- oder Transformatorfeld wurden die Kosten für eine Demontage der vorhandenen Leiterseile und eine Neubeseilung auf zirka CHF 80'000.– geschätzt. Pro Kupplungsfeld würden etwa CHF 40'000.– anfallen. Diese Kosten sind derart hoch, dass auch ohne detaillierte Kosten-Nutzen-Rechnung gefolgert werden darf, dass es sich höchstens rechtfertigen liesse, die aus der Sicht der regionalen Versorgungssicherheit landesweit wichtigsten Leitungs- oder Transformatorfelder zu ertüchtigen, und unter diesen auch nur diejenigen, für die in "nächster" Zukunft, also etwa in den nächsten 20 Jahren, keine Apparate-Erneuerungen anstehen. Es liegt in der Eigenverantwortung der Netzbetreiber, solche besonders wichtigen Leitungs- oder Transformatorfelder zu identifizieren und abzuklären, ob diese allenfalls noch vor einer generellen Apparateerneuerung bezüglich ausreichender Lose ertüchtigt werden sollten.

Wollte man die wichtigsten Unterwerke konsequent bezüglich Lose ertüchtigen, ergäben sich neben den hohen monetären Kosten auch Probleme mit der Ausserbetriebnahme der zu ertüchtigenden Leitungsfelder. Die notwendigen Arbeiten könnten deshalb nur über einen längeren Zeitraum verteilt, zusammen mit ohnehin anfallenden Wartungs- oder Reparaturarbeiten, ausgeführt werden.

In Anbetracht dieser Probleme und insbesondere der hohen Kosten kann die Lose-Problematik im Wesentlichen nur im Rahmen von Apparate-Erneuerungen gelöst werden, da dann die entsprechenden Felder ohnehin ausser Betrieb zu nehmen sind und die Mehrkosten irrelevant bleiben.

5. Sekundärsysteme und andere Einbauten

5.1 Verletzbarkeit

Aufgrund der bisherigen Baupraxis in der Schweiz und aufgrund der Tatsache, dass die Erdbebensicherheit bei den Einrichtungen der elektrischen Energieversorgung in der Schweiz bisher, von wenigen Ausnahmen abgesehen, kein Thema war, ist davon auszugehen, dass die meisten bestehenden Gebäude, in denen die Sekundärsysteme der Unterwerke (Steuerung, Schutz, Eigenbedarf und weitere Nebenanlagen) oder auch Anlagen der Energieverteilung in Schrankbauweise untergebracht sind, den heutigen Anforderungen an die Erdbebensicherheit nicht genügen. Dies gilt sowohl für die Gebäude selbst wie auch für die erwähnten Einbauten.

Folgende Sekundärsysteme, die typischerweise in Unterwerken vorhanden und im Erdbebenfall verletzlich sind, können durch ihren Ausfall den Betrieb eines Unterwerkes und damit die Stromversorgung empfindlich beeinträchtigen:

- Doppelböden sind in der Regel nicht verstrebt und damit einsturzgefährdet, falls sie nicht auf allen Seiten bis an massive Wände, die den Raum umgeben, reichen.
- Notstrombatterien sind in den seltensten Fällen gegen Absturz und gegen ein Gegeneinanderschlagen gesichert.
- Steuerschränke (sowie analog auch Anlagen der Energieverteilung in Schrankbauweise) sind umsturzgefährdet, solange sie nicht geeignet verankert sind.
- Trennwände, abgehangte Decken, Bildschirme, etc. können abstürzen.

Diese Befunde gelten unabhängig von den Spannungsebenen für alle Hochspannungsunterwerke.

5.2 Empfohlene Massnahmen

Neubauten mit wichtigen Sekundärsystemen sollten nach den einschlägigen SIA-Normen, insbesondere der Norm SIA 261, auf Erdbeben bemessen werden. Dies gilt sowohl für das Gebäude wie auch für die Einbauten. Nicht tragende Bauteile sind gemäss Kapitel 16.7 der Norm SIA 261 zu bemessen. Wertvolle Dienste kann hier auch die für 2011 geplante BAFU-Publikation zur Erdbebensicherung nicht-tragender Bauteile (8) leisten.

Bestehende Steuerungsgebäude sollten einer Erdbebenüberprüfung unterzogen werden. Dies bedeutet bei einfachen Gebäuden, sofern Ingenieurpläne vorhanden sind, einen Aufwand von etwa einer Arbeitswoche, bei komplexeren Gebäuden auch deutlich mehr. Stehen keine Pläne zur Verfügung, ist mit zusätzlichem Aufwand für Planaufnahmen und Sondierungen zu rechnen.

Bei der Überprüfung bestehender Gebäude kann das Merkblatt SIA 2018 (9) des SIA sinngemäss angewendet werden. Zu beachten ist hierbei einzig, dass bei Steuerungsgebäuden weniger das Personenrisiko als vielmehr das gesellschaftliche Risiko eines Ausfalls der Stromversorgung im Vordergrund steht.



Bild 5.1: Befestigung eines neuen, rundherum bis an massive Wände reichenden Doppelbodens mit Dübeln an den Wänden und am Boden (ewz). Reicht der Doppelboden mindestens auf einer Seite nicht bis zu einer massiven Wand, wären dessen Abstützungen nicht nur zu verschrauben, sondern zusätzlich mit Diagonalstäben zu verstreben.

Wie eine Pilotstudie des ewz gezeigt hat (vgl. Kapitel 5.3 und Anhang C), sind Erdbebensicherungsmaßnahmen von Sekundärsystemen mit äusserst geringem Aufwand möglich, haben aber im Erdbebenfall grosse Wirkung bezüglich der Schadenreduktion und eines allfälligen Betriebsausfalles.

Doppelböden, die nicht auf allen Seiten lückenlos bis an massive (!) Wände reichen, sind zur Aufnahme von Horizontalkräften zu verstreben. Reichen die Doppelböden auf allen Seiten bis an massive Wände, sind theoretisch keine besonderen Massnahmen erforderlich. Trotzdem ist empfehlenswert, nach Möglichkeit einige Verdübelungen vorzunehmen (Bild 5.1).

Notstrombatterien sind gegen Umkippen oder Abstürzen zu sichern (Bild 5.2). Zusätzlich ist mit Hilfe dünner Elastomereinlagen sicherzustellen, dass die relativ zerbrechlichen Gehäuse nicht hart gegeneinanderschlagen können (Bild 5.3).

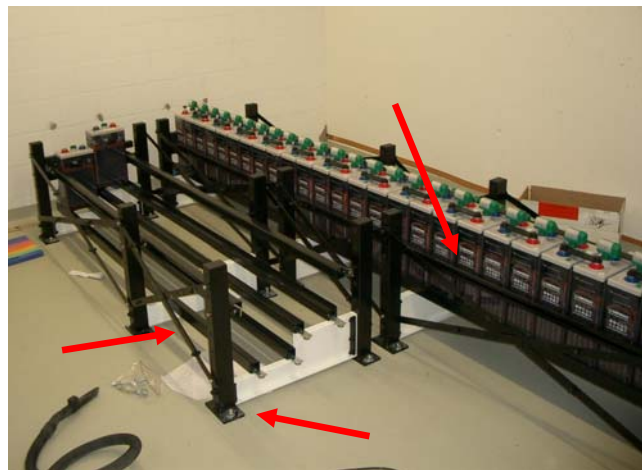


Bild 5.2: Kipp- und Absturzsicherung von Notstrombatterien im UW Münchwil (Axpco AG): Füsse der Gestelle diagonal verstrebt und am Boden festgeschraubt; horizontale Profile verhindern ein Abkippen der Batterien.



Bild 5.3: UW Münchwil (Axpco AG): Gewellte Plastikeinlagen zwischen benachbarten Batterien verhindern das Gegeneinanderschlagen.

Auch Steuerschränke sind so zu verankern, dass diese nicht umkippen können. Steuerschränke, die längs einer massiven Wand stehen, lassen sich mit Hilfe einfacher Winkel und Dübel direkt an dieser befestigen (Bild 5.4). Bei Schränken im Rauminnen ist entweder eine Verankerung auf dem Boden möglich, oder aber mit Hilfe hochliegender Schienen, die von Wand zu Wand reichen und an den Wänden verankert sind (Bild 5.5). Sehr kopflastige Elemente, wie z.B. MS-Schaltanlagen, sind besonders kippgefährdet und sollten entsprechend sorgfältig verankert werden.



Bild 5.4: Verankerung von Steuerschränken, die längs einer massiven Wand stehen, mit Hilfe einfacher Winkel und Dübel (Axpog AG).



Bild 5.5: Verankerung von Steuerschränken, die im Rauminnen stehen, mit Hilfe obenliegender Schienen, die an massiven Wänden befestigt werden (Axpog AG).

Bei unterirdischen Unterwerken sind beispielsweise auch die Kühlung der Transformatoren sowie die Löschanlage bezüglich ihrer Erdbebensicherheit zu überprüfen und notwendigenfalls zu ertüchtigen.

Die empfohlenen Massnahmen sind auch dann sinnvoll, wenn das Gebäude selbst die vollen Normenanforderungen an die Erdbebensicherheit nicht erfüllt. Erstens

verhalten sich Gebäude oft besser als rechnerisch zu erwarten wäre, und zweitens können auch Erdbeben auftreten, die schwächer sind als das Bemessungsbeben gemäss der Norm SIA 261, und die damit das Gebäude nicht zum Einsturz bringen, die aber beispielsweise bereits zum Absturz ungesicherter Batterien führen könnten.

Die oben erwähnten Massnahmen sollten aufgrund ihrer grossen Effizienz und geringen Kosten im Verhältnis zu den betrieblich nötigen Unterhalts- und Erneuerungskosten als Standards in der Branche umgesetzt werden.

5.3 Pilotstudie UW Herdern

Das Unterwerk Herdern, Zürich (Zone Z1), wurde im Jahre 1971 in Betrieb genommen. Es versorgt rund 40 Transformatorenstationen, Hochspannungsbezüger- und Gleichrichterstationen in "Zürich West" sowie in Teilen von Aussersihl mit elektrischer Energie.

Im Rahmen eines umfassenden Umbaus des Unterwerkes hat das ewz unter anderem eine Pilotstudie zur Erdbebensicherung der Sekundärsysteme durchgeführt. Alle Einrichtungen und nicht-tragenden Bauteile wurden gesichert. Ein entsprechender Bericht hierzu ist im Anhang C zu finden.

Die Kosten der Erdbebensicherungsmassnahmen für die Sekundärsysteme haben zirka 1 % der gesamten Umbaukosten betragen. Geschätzte weitere 2 % waren für die Erdbebensicherung der gesamten Primärtechnik notwendig.

Da bei der Erdbebensicherung der Sekundärsysteme meist konstruktive Gesichtspunkte im Vordergrund stehen, ist zu erwarten, dass die entsprechenden Kosten in den Zonen Z2 und Z3 nur unwesentlich höher ausfallen würden. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Kosten für die Erdbebensicherung der Sekundärsysteme, falls diese im Rahmen eines Umbaus ausgeführt werden können, in die Grössenordnung von ein bis zwei Prozenten der Umbaukosten zu liegen kommen.

6. Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf

Internationale Erfahrungen zeigen, dass im Erdbebenfall die mit Abstand grössten Schäden an der Infrastruktur der elektrischen Energieverteilung bei Höchstspannungsunterwerken in Freiluftbauweise beobachten werden. Je höher die Spannungsebene, desto verletzlicher sind die Unterwerke.

Aufgrund der in der Schweiz herrschenden mittleren Seismizität ist auch bei uns mit Erdbeben zu rechnen, die den Ausfall unmittelbar betroffener Höchstspannungsunterwerke bewirken können. Schäden werden sowohl bei den Leistungstransformatoren, insbesondere bei deren Durchführungen, wie auch bei den Höchstspannungsapparaten erwartet. Eines der Hauptprobleme sind die heute zu straffen Leiterverbindungen zwischen den Apparaten, so dass die einzelnen Apparate nicht unabhängig voneinander schwingen können; dies lässt grosse Interaktionskräfte entstehen, die zum Bruch der Apparate führen können. Auch die Sekundärsysteme, wie etwa Notstrombatterien oder Steuerschränke, weisen heute bedeutende Schwachstellen auf und dürften ausfallen.

Somit besteht Handlungsbedarf, um das Erdbebenrisiko bei der Stromversorgung zu minimieren und auch betriebliche Interessen zu wahren. Der Handlungsbedarf besteht in erster Linie bei der Erdbebensicherung der Leistungstransformatoren, insbesondere bezüglich deren Verankerungen, bei der Sicherstellung ausreichender Lose in den Leiterverbindungen zwischen den Höchstspannungsapparaten sowie bei der Sicherung der Sekundärsysteme (Notstrombatterien, Steuerschränke, etc.) aller Spannungsebenen. Präventive Massnahmen in diesen Bereichen erlauben, die Versorgungssicherheit im Falle eines Erdbebens signifikant zu erhöhen. Entsprechende Massnahmen, die im Rahmen von Anlage-Erneuerungen ergriffen werden, verursachen nur äusserst geringe Zusatzkosten. Es liegt in der Eigenverantwortung und letztlich auch im Eigeninteresse der Netzbetreiber, solche Massnahmen zu verwirklichen.

Die im 1. Zwischenbericht vom 15.01.2009 und im hier vorliegenden 2. Bericht dargelegten Erkenntnisse sind in den Entwurf einer neuen ESTI-Richtlinie zur "Erdbebensicherung der elektrischen Energieverteilung in der Schweiz" eingeflossen. Im Hinblick auf eine "erdbebengerechte" Umsetzung dieser künftigen Richtlinie ist es wichtig, die betroffenen Akteure für die Problematik der Erdbebensicherheit zu sensibilisieren und entsprechend auszubilden.

7. Quellen

- (1) Koller M. (2009), "Erdbebensicherheit der elektrischen Energieversorgung in der Schweiz", 1. Zwischenbericht, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Carouge.
- (2) 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.
- (3) Ibáñez P., R. Vasudevan und E.J.Vineberg (1973), "A Comparison of Experimental Methods for Seismic Testing of Equipment", Nuclear Engineering and Design, Vol. 25, 150-162.
- (4) Bellorini S., M. Salvetti, F. Bettinali und G. Zafferani (1998), "Seismic Qualification of Transformer High Voltage Bushings", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, n° 4, 1208-1213, October 1998.
- (5) Villaverde R., G.C. Pardoen und S. Carnalla (2001), "Ground Motion Amplification at Flange Level of Bushings Mounted on Electric Substation Transformers", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 30, 621-632.
- (6) Résonance Ingénieurs-Conseils SA (2010), "Equipements de sous-stations électriques : mesures in situ des fréquences propres". RT-285.02-2, 03.11.2010, Carouge.
- (7) 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.
- (8) BAFU-Publikation zur Erdbebenbemessung nicht-tragender Bauteile, Publikation geplant für 2011.
- (9) SIA 2018 (2004), Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben, Merkblatt des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins, Zürich. Dieses Merkblatt wird in naher Zukunft durch die Norm SIA 269/8 ersetzt.

Anhang A: Trafo-Verankerung (Axpo AG)

Aktennotiz

Thema **Erdbebensicherheit der elektrischen Energieverteilung in der Schweiz**
Von Martin Hässig | EUU-T
Datum 4. November 2009, 23. Dezember 2010 (Rev. 01)
Ref.-Nr. EU 2860_01
An Dr. Martin Koller, Résonance Ingénieurs-Conseils SA
Zur Kenntnis an Christian Lindner | Adrien Guérig | Georg Hauenstein

Verankerung von Transformatoren in den Erdbeben-Gefährdungszonen 1 und 2 (Mittelland und Voralpen ohne Raum Basel)

1. Einleitung

Die bisher angestellten Untersuchungen (teilweise unter Mitwirkung der Axpo AG) zur Erdbebensicherheit der elektrischen Energieverteilung in der Schweiz lassen erwarten, dass Transformatoren als wichtige und kostspielige Komponente eines Unterwerks zum Schutz vor nachhaltiger Beschädigung durch Erdbeben, wie sie in den Gefährdungszonen 1 und 2 erwartet werden, verankert werden sollten oder müssen. Ohne dass die Fragen nach der Notwendigkeit, der Dringlichkeit oder Art und Umfang der Massnahmen bereits entschieden sind, werden folgend einige Elemente einer möglichen Verankerung im Sinne einer Idee, dem vorläufigen Wissensstand des Autors entsprechend, skizziert.

Für die Zone 3 sind Verankerungen vermutlich in jedem Fall erforderlich. Wie weit die folgenden Vorschläge für Verankerungen auch in dieser Zone ausreichen bzw. erweitert werden müssen, ist nicht abgeklärt worden.

Vorderhand gehen unsere Überlegung zu Verankerungen von der Absicht aus, die Transformatoren auf den Fahrrollen zu belassen, damit bei einer entsprechenden Dringlichkeit der Transformator einfach und schnell vom Standort entfernt und allenfalls durch eine Reserveeinheit ersetzt werden kann (Abbildung 1). Dabei ist weniger die Häufigkeit einer solchen Situation entscheidend, sondern mehr der angestrebte geringe Zeitbedarf für den Austausch.

Bei der Errichtung einer Verankerung, insbesondere wenn sie als Nachrüstung ausgeführt wird, müssen zahlreiche Einschränkungen hingenommen werden:

- a) Schweissungen an den Schienen dürfen keine vorgenommen werden, da sonst eine Versprödung des Schienenstahls beginnt und die Schienenanlage den hohen Belastungen nicht mehr Stand hält.
- b) Schweissungen am Transformatorkessel sind grundsätzlich zu vermeiden. Die erforderlichen Nahtstärken können nur an Rippen und Pratzen angebracht werden, von denen keine nennenswerte Wärmeübertragung an die ölbenetzten Kesselwände erfolgen kann.

- c) Die zum Anheben vorgesehenen Stütz- und Anschlagpunkte dürfen nicht geschwächt oder in der Funktion beeinträchtigt werden.
- d) Die Krafteinleitung muss verteilt erfolgen, damit die Wahrscheinlichkeit plastischer Verformungen am Kessel, insbesondere im Bereich von bestehenden, öldichten Schweissungen, gering ausfällt.



Abbildung 1 Doppelrollen mit Blockierung (am Schienenkopf festgeschraubt) 160-MVA-Transformator 220/110 kV, je nach Typ 180'000 bis 240'000 kg)

Die Konstruktion der Verankerung selbst sollte folgenden Richtlinien folgen:

- a) Übertragen und Einleiten der Rückhaltekräfte in das Fundament.
- b) Leichte Konstruktion (bevorzugter Lastfall: Zugbelastung).
- c) Zahlreiche, verteilte Anker (Verringerung der Punktlasten an Transformorkessel und Fundament).
- d) Feste Teile der Verankerung dürfen das Tauschen von Transformatoren (Ein- und Ausfahren) nicht behindern.
- e) Die Konstruktion muss wartungsfrei, korrosionsbeständig, flexibel und einfach für verschiedene Anordnungen konfektionierbar sein. Dazu soll möglichst auf wenige verschiedene Teile, vorwiegend auf Handelsprodukte oder auf einfache standardisierte Konstruktionsteile zurück gegriffen werden.

2. Fundamente für Transformatoren der Netzebene 1 und 2

In den Unterwerken der Axpo AG verfügen die Transformatorfundamente über eine direkt unter dem Standplatz des Transformators angeordnete Ölwanne, welche meist auch als Rückhaltevolumen für ausgelaufene Flüssigkeit und Meteorwasser dimensioniert ist. Für Brandschutzzwecke werden Kiesschichten oder spezielle Abdeckroste verwendet. (Abbildung 2) Die Betonkonstruktionen der Fundamente besteht aus der Wanne (Abbildung 3), in welche vier Tragwände eingesetzt sind auf deren Kronen die Schienen eingelassen sind (Abbildung 4, Abbildung 5). Je nach Situation sind über Terrain Branschutzmauern errichtet.



Abbildung 2 Standplatz für einen 160-MVA-Transformator 220/110 kV, NE 2

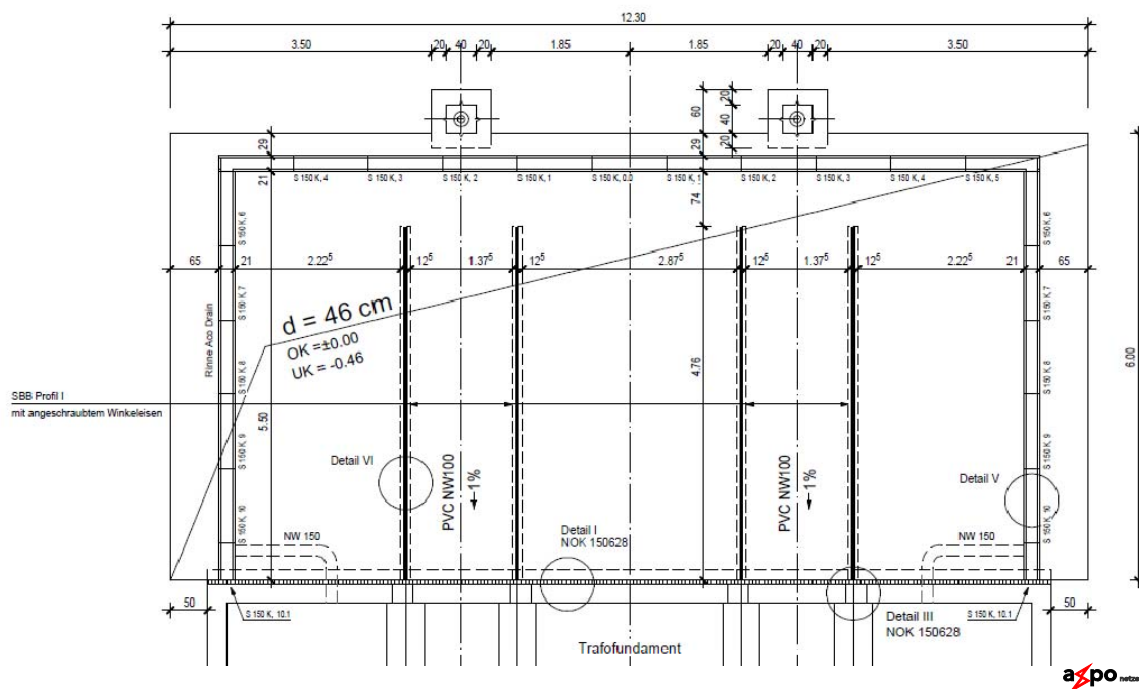


Abbildung 3 Draufsicht Schienenanlage

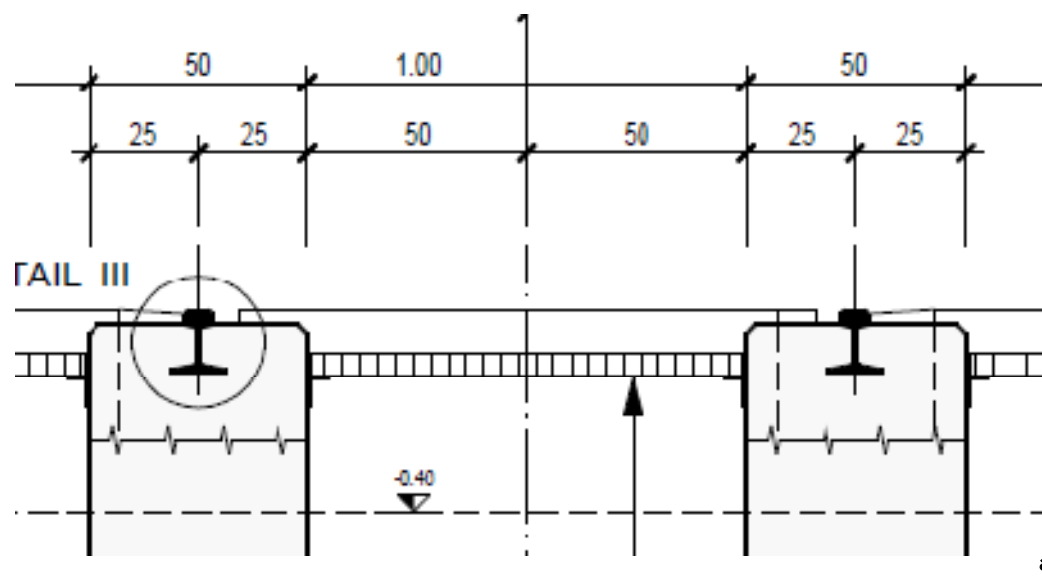
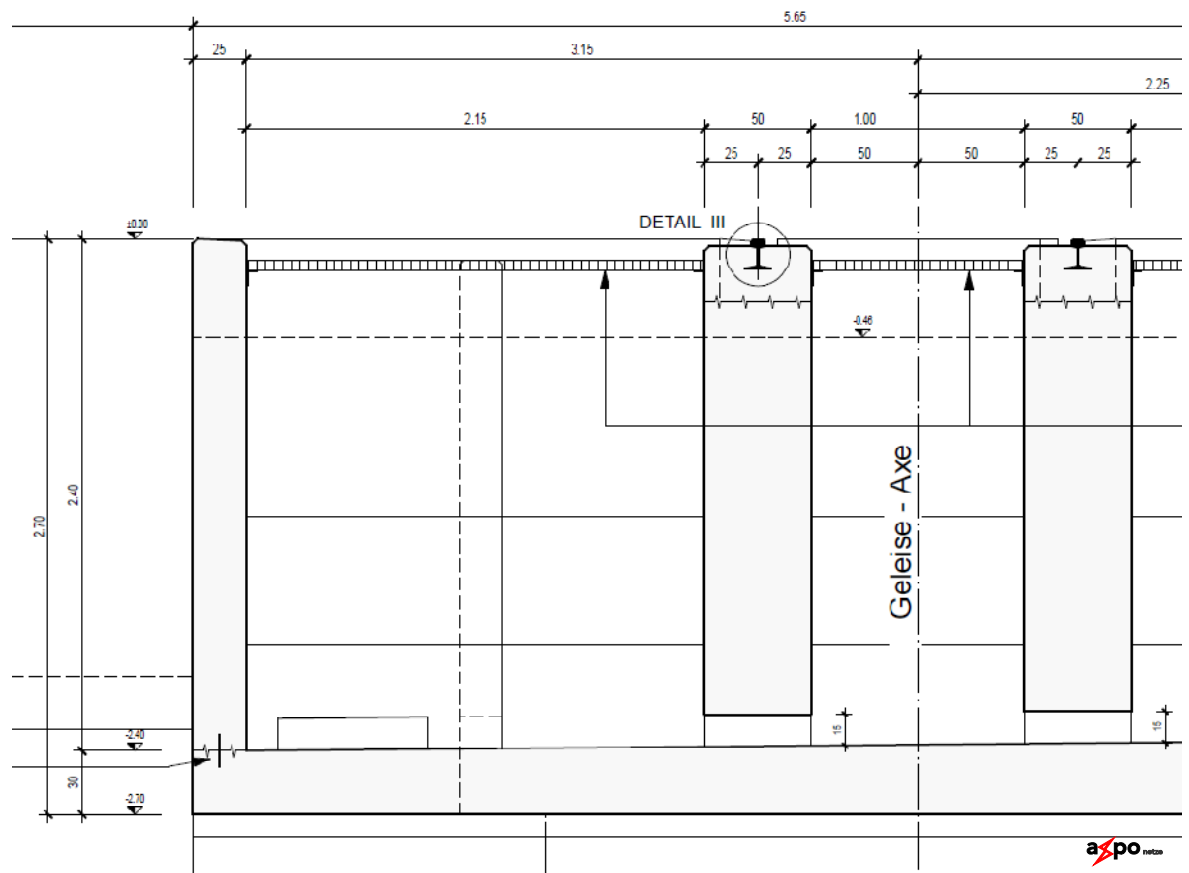


Abbildung 4 Querschnitt mit den Tragwänden der Schienenanlage



Abbildung 5 Schienen auf der Mauerkrone



Abbildung 6 Ölauffangwanne mit vorbereiteter Anschlussarmierung für die Schienentragwände



Abbildung 7 Armierung und äussere Schalung der Tragmauern

3. Vorschläge für Verankerungen

Zweck der Verankerung ist es, den im Falle eines Erdbebens einwirkenden Kräften soweit entgegenzuwirken, dass der Transformator nicht verschoben wird (horizontale Komponente der Kräfte). Weiter muss vermieden werden, dass der Transformator durch die zu Kippbewegungen führenden horizontalen Kräfte, wie die direkt wirkenden vertikalen Kräfte, einseitig abgehoben werden kann und dann "hart" zurückfällt. Daher stehen vertikale, auf Zug belastete, Anker im Vordergrund. Dennoch müssen auch horizontal wirkende Verankerungen vorgesehen werden. Sind die Auftretenden Kräfte für die horizontale Verankerung zu gross (Rollenbremsen sowie Widerstand gegen das Abknicken der Rollen quer zur Fahrrichtung), oder stehen zu wenig Punkte zur Krafteinleitung der Verankerungen in den Kessel bzw. das Fundament zur Verfügung, muss ein "Absturz" des Transformators verhindert werden, wenn die Rollen wegnicken.

Als weitere Massnahme können quer zu den Tragmauern Verstärkungsmauern oder Träger eingebaut werden, dabei wird an zwei quer durch die ganze Wanne verlaufende Mauern oder Träger im Bereich der Fahrrollen gedacht, welche, als Mauern ausgeführt, ebenfalls je etwa 50 cm stark und demzufolge mit einem Mittenabstand von 150 cm verlaufen. Diese Massnahme ist voraussichtlich für die Gefährdungszonen 2, insbesondere aber Zone 3 geeignet. Dadurch ergeben sich Vereinfachungen in Bezug auf die Anordnung der Anker. Zudem kommen auch auf Druck / Knickung belastete Anker in Betracht sowie feste Auflager an Stelle von Rollen, weil das Entfernen der Rollen mit Hilfe von hydraulischen Hebezyklindern einfacher und sicherer bewerkstelligt werden kann (s. Abbildung 12). Eine weitere Ausführungsvariante mit einem Stahlquerträger ist in der Abbildung 10 und Abbildung 11 angegeben.

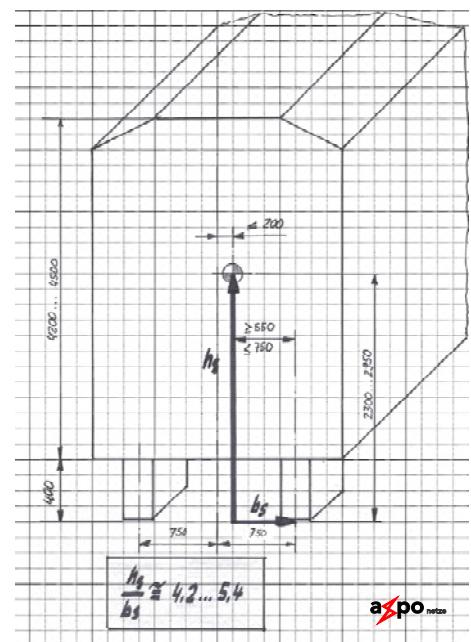
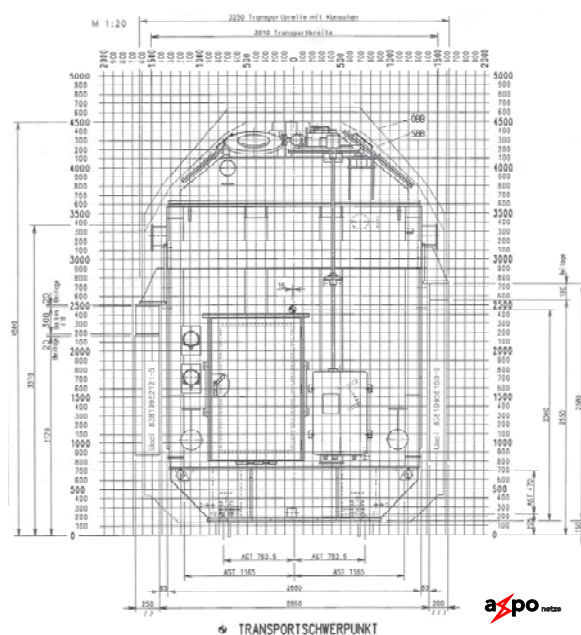


Abbildung 8 Bahn-Transportprofil, Schwerpunkt und Standfläche

Die geometrische Grösse und die Lage des Schwerpunkts ist bei den Transformatoren der Axpo AG in der NE 1 und NE 2 nur wenig verschieden, da hauptsächlich die Transport-Profilmasse

(SBB-Profil) für die Grösse bestimmend sind. (Abbildung 8). Dadurch sollte es möglich sein, nach einer einheitlichen Dimensionierung vorzugehen, welche lediglich das Gewicht (Gewichtsklassen) als Parameter kennt.

4. Abschätzung der Kosten

Die Kosten schwanken je nach Umfang der erforderlichen Massnahmen zwischen CHF 75'000.00 und CHF 110'000.00 pro Transformator (125 ... 160 MVA, Masse 180'000 ... 240 '000 kg)

a) Erstengineering (einmalig)		
Konzept, Normteilkonstruktion, Dimensionierung	CHF	30'000.00
b) Verankerung	CHF	<u>77'200.00</u>
bestehend aus:		
- Engineering / Abwicklung pro Transformator	CHF	5'000.00
- 16 Verankerungsplatten à ca. 100 kg, CHF 1'500.00 / Stück	CHF	25'000.00
- 96 Klebanker	CHF	10'000.00
- 16 Vertikalanker M 30, je ca. 1.2 m	CHF	3'200.00
- 8 Horizontalanker M 30, je ca. 4 m	CHF	4'000.00
- Anpassung Brandschutz oder Aus- und Einbringen der Füllung	CHF	4'000.00
- Montage inkl. Anpassung am Transformator	CHF	10'000.00
- Zuschlag bei V4A-Stahl	CHF	16'000.00
c) Absturzsicherung (Pos. 5 in Abbildung 9)		
4 Stück pro Transformator	CHF	12'000.00
d) Zusätzlich zwei Quermauern (evtl. für Zone 2 und 3)	CHF	17'000.00
ca. je 9 m Länge, 2.4 m Höhe, 0.5 m Dicke		
Total 21 m ³ Volumen		

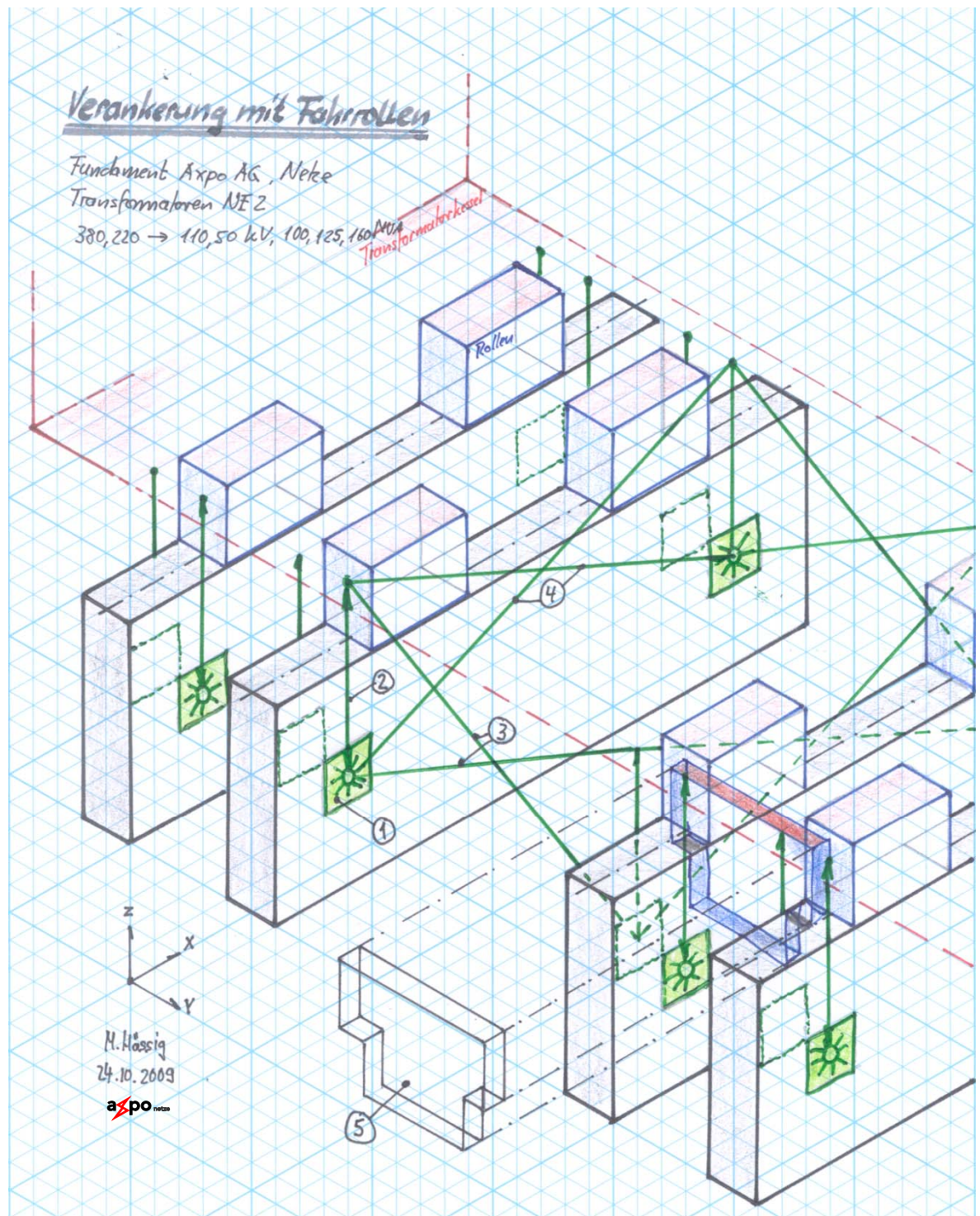


Abbildung 9 Idee und Elemente einer Verankerung, 1: Ankerplatte, 2 Vertikalanker, 3 Queranker (schräg über Kreuz), 4 Längsanker (schräg über Kreuz), 5 Absturzsicherung (4 Stk.)

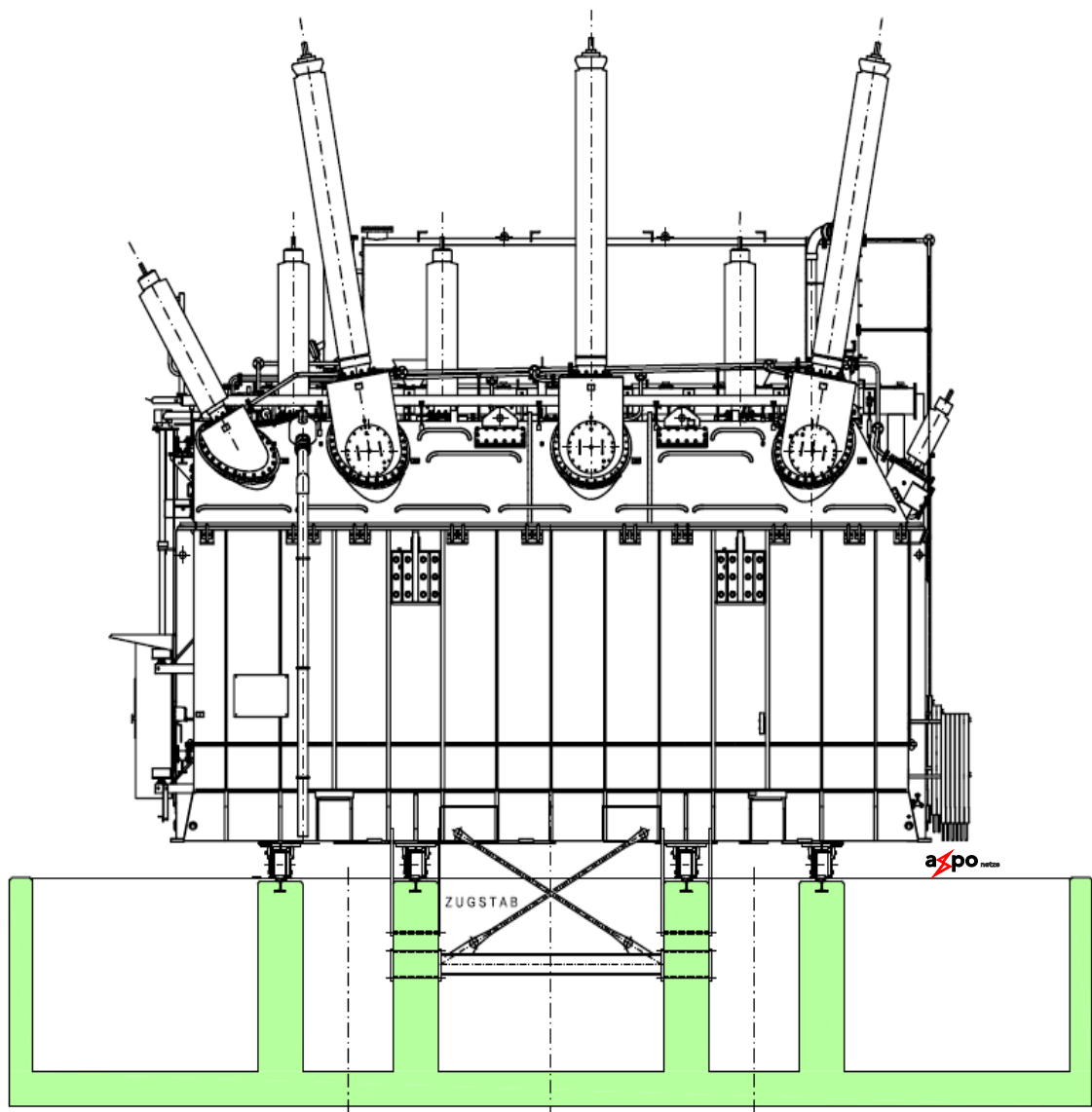


Abbildung 10 Verankerung mit nachgerüstetem Stahlträger (Längsschnitt)

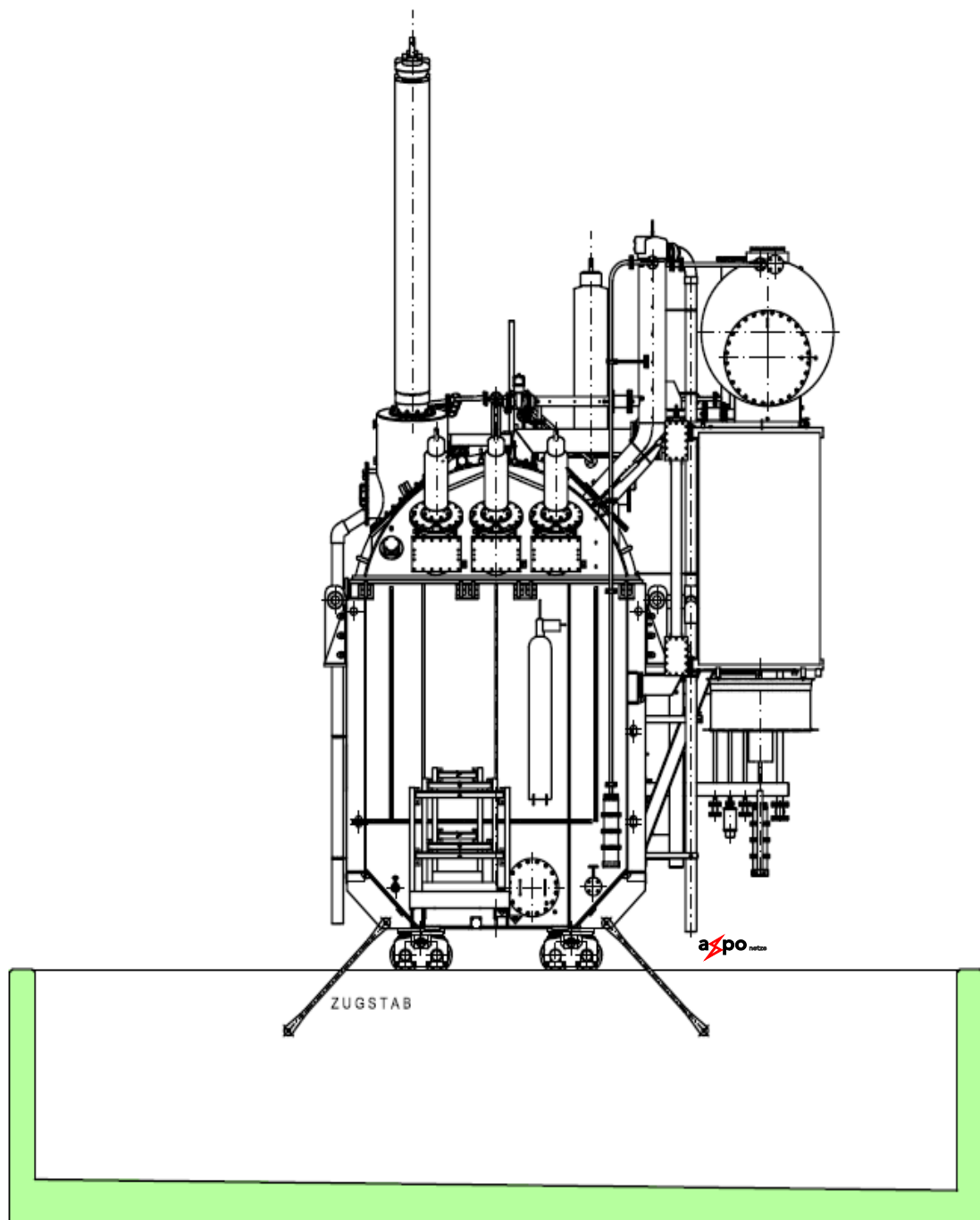


Abbildung 11 Verankerung mit nachgerüstetem Stahlträger (Querschnitt)

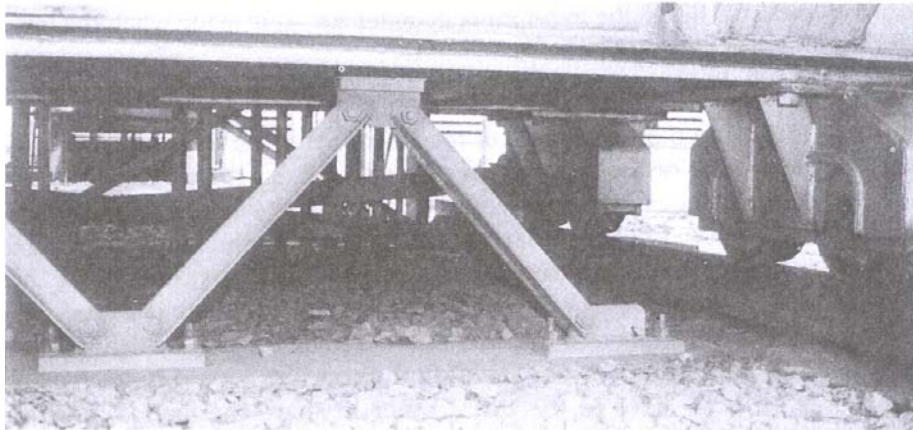


Abbildung 12 Verankerung mit Zug- und Druckkraftübertragung auf das Fundament¹

¹ Schiff, A. J.: Guide to improved earthquake performance of electric power systems, ASCE Publ. No. 96, 1999, Fig. 5.49 und 5.50

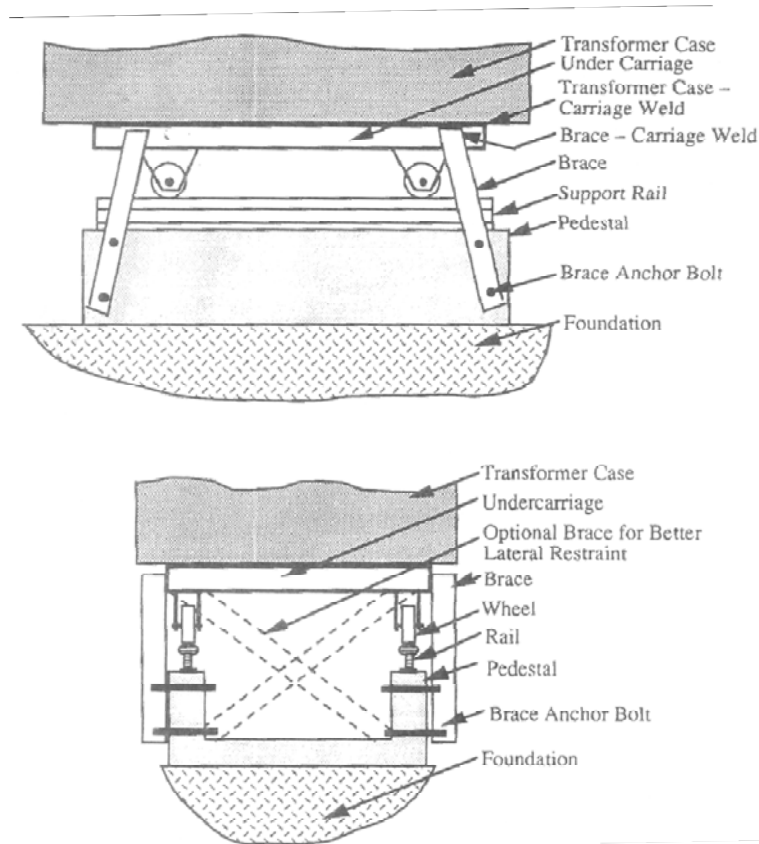


Abbildung 13 Schematische Darstellung von Verankerungen für Transformatoren auf Schienen²

5. Einordnung der Vorschläge

Die Vorschläge stehen wenigstens teilweise mit jenen in der bereits zitierten Literaturquelle [Schiff] im Einklang. Diese sind als Empfehlung für die Erdbebenzonen im Raum Kalifornien (San-Andreas-Störung) und den zentralen Gebieten Nordamerikas erarbeitet worden.

6. Weitere Massnahmen zur Verbesserung der Erdbebensicherheit

Alle Rollen blockieren, die Blockierungen selbst sollen gegen Abfallen als Folge einer Erschütterung gesichert werden (Abbildung 1).

Die Gestaltung der Verbindungen zu den OS-, US und TS-Durchführungen muss in jedem Einzelfall auf genügend Lose hin überprüft werden (Abbildung 14).

Bei einer Nachrüstung im Hinblick auf Erdbebensicherheit sind die Tragkonstruktionen für das Expansionsgefäß und für die Kühler- oder Radiatoren zu überprüfen. Voraussichtlich sind Diagonalstreben nachzurüsten (Abbildung 15).

² Schiff, Fig. 5.48



Abbildung 14 Beispiel für "gespannte" Anschlussseile

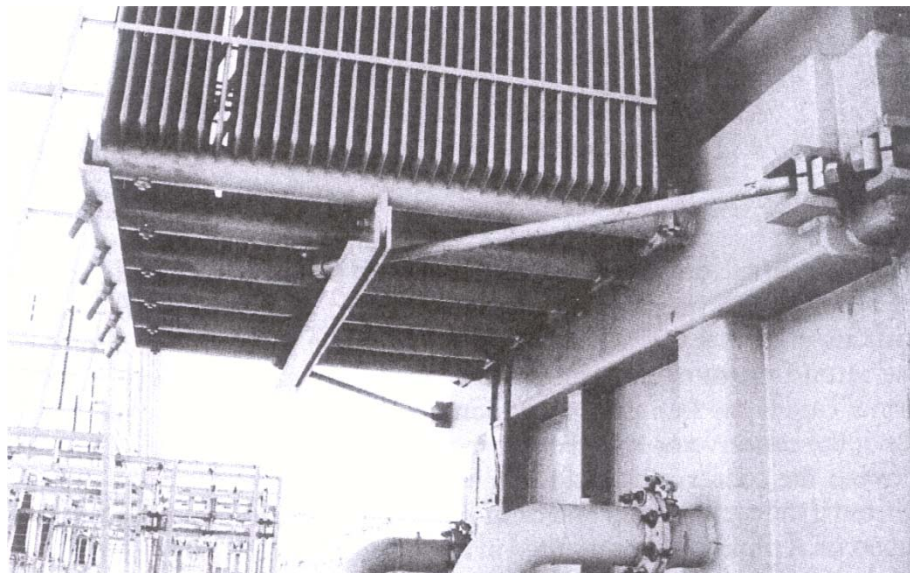


Abbildung 15 Beispiel für die Versteifung einer Radiatorenaufhängung³

³ Schiff, Fig. 5.73

7. Auswirkungen einer Erdbebenverankerung auf bestehende Konzepte

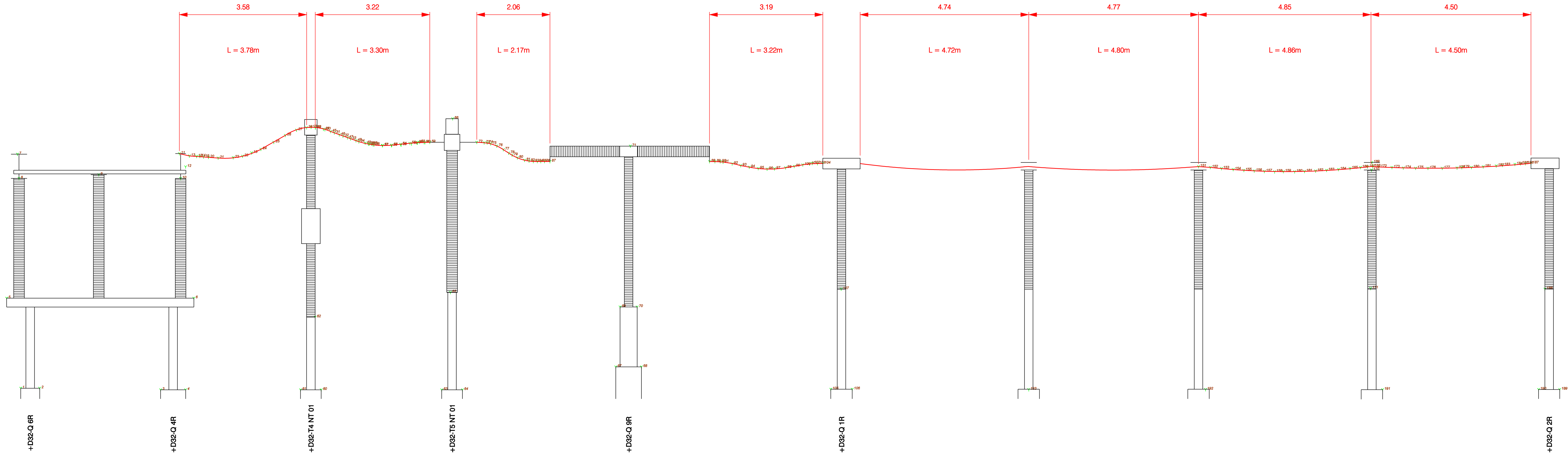
Der Kesselschutz (isolierte Aufstellung des Transformators mit einer oder wenigen definierten Erdungsverbindungen des Kessels, welche zu Schutzzwecken über einen Stromwandler geführt sind) wird durch die elektrisch leitende Verbindung zwischen Kessel und Erde wirkungslos. Dieses Schutzkonzept ist bei Axpo AG nicht gebräuchlich, wird aber in der Schweiz angewendet.

Wird durch einen Störfall (kein Erdbeben) ein Austausch eines Transformators erforderlich, muss für die Demontage der Verankerungen Zeit "im kritischen Pfad" zur Demontage der Verankerungen eingesetzt werden. Bei konsequenter Anwendung von Massnahmen zur Erdbebensicherheit ist auch am Reservetransformator eine Verankerung zu demontieren.

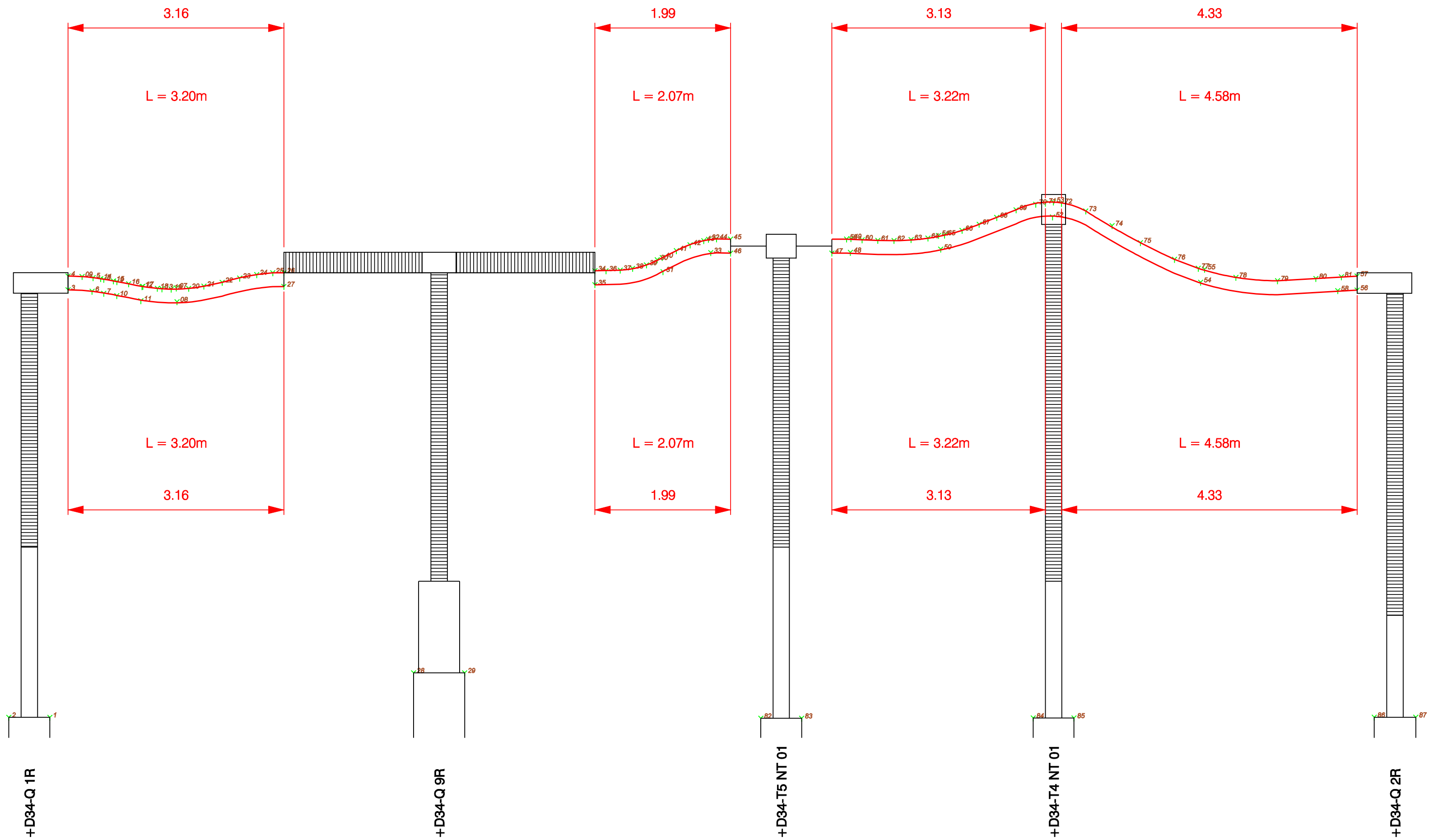
Freundliche Grüsse
Axpo AG

Martin Hässig
Leiter Ressort Transformatoren und Wandler

Anhang B: Leiterseile UW Benken (ewz)



EWZ, UW Benken, Detailaufnahmen
Strang 2, Ansicht 1:50

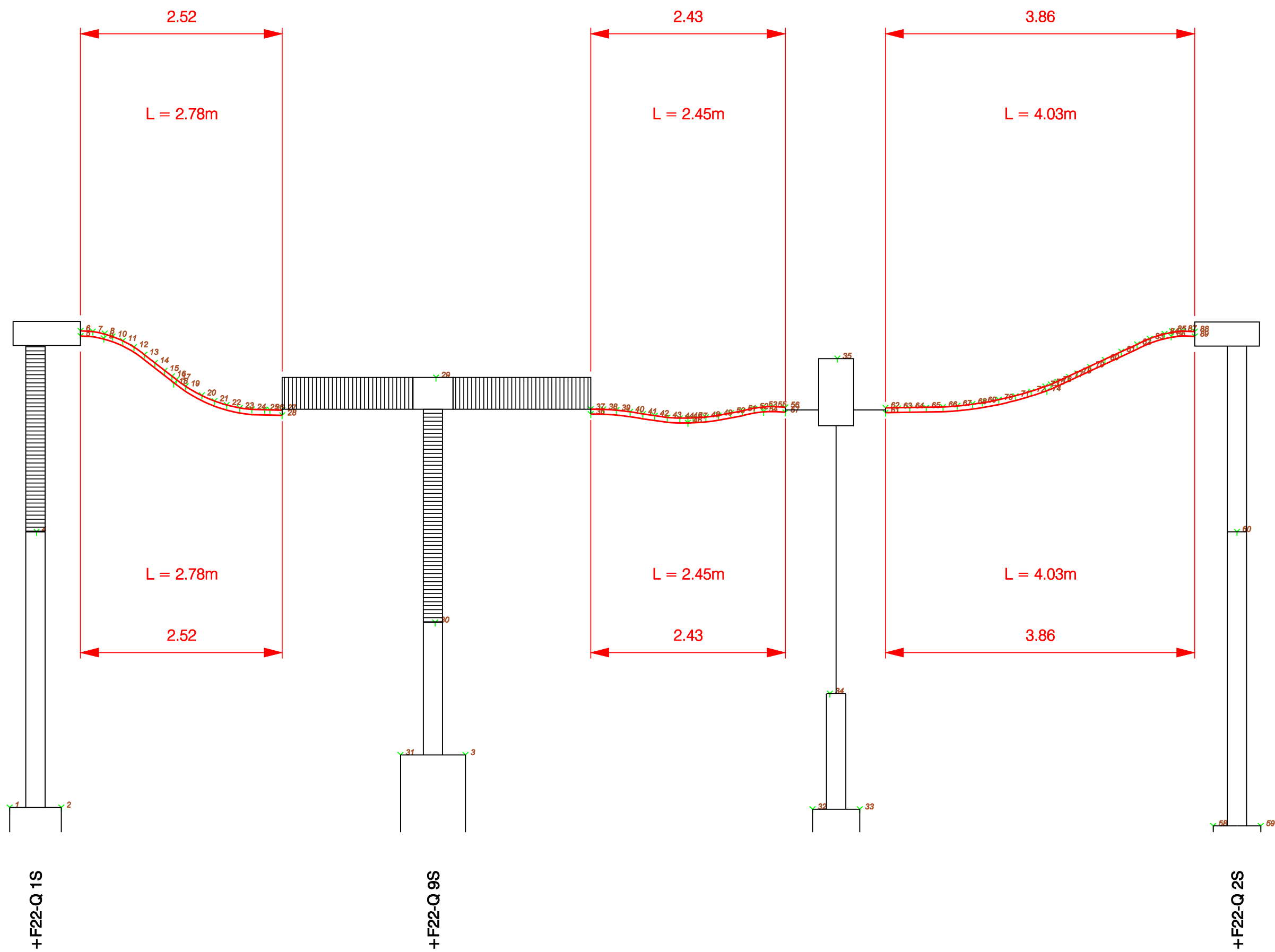


EWZ, UW Benken, Detailaufnahmen
Strang 1, Ansicht 1:50

Wälli AG Ingenieure
CH-9320 Arbon
Brühlstrasse 2a
T. 071 447 89 40
F. 071 447 89 45
arbor@waelli.ch
www.waelli.ch



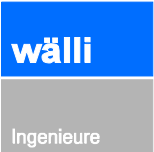
Projekt Nr. 3000-0100-21 - 1				
Format: 45 x 63cm				
Entwurf	Gezeichnet	Kontrolliert	Änderung	Datum
BB	MS	BB		18.10.2010



EWZ, UW Benken, Detailaufnahmen
Strang 3, Ansicht 1:50

Wälli AG Ingenieure

CH-9320 Arbon
Brühlstrasse 2a
T. 071 447 89 40
F. 071 447 89 45
arbon@waelli.ch
www.waelli.ch



Projekt Nr. 3000-0100-21 - 3

Format: 45 x 42cm

Entwurf	Gezeichnet	Kontrolliert	Änderung	Datum
BB	MS	BB		18.10.2010

Anhang C: ewz-Pilotstudie Sekundärsysteme

Elektrizitätswerk der Stadt Zürich Erneuerung Unterwerk Herdern



Schlussbericht zur Überprüfung der Erdbebensicherheit von Sekundärsystemen und Einbauten

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	<i>Seite</i>
1. Einleitung	3
2. Ausgangslage	5
3. Modellbildung	5
4. Erläuterungen zur Tabelle	6
5. Geplante und ausgeführte Massnahmen	7
6. Zusammenfassung	13
Beilage	14

BEILAGE:

Tabelle **Horizontalverankerung Inneneinrichtung unter Erdbebenlasten**
mit approximativen Kosten

1. Einleitung

Kurzbeschreibung

Das Unterwerk Herdern, an der Pfingstweidstrasse 85 im Industriequartier gelegen, wurde im Jahre 1971 in Betrieb gesetzt und versorgt seither rund 40 Transformatorstationen, Hochspannungsbezüger- und Gleichrichterstationen in "Zürich West" sowie in Teilen von Aussersihl mit elektrischer Energie.

Vor Umbau

Das Unterwerk verfügte über eine 150-kV-Freiluftschaltanlage auf dem Gebäudedach mit Einfachsammeleisen, zwei Leitungsfelder und drei Transformatorfelder. Die drei 30-MVA-Transformatoren 150/11-kV waren in Freiluftzellen am Gebäude eingebaut. Die offene und luftisolierte 11-kV-Schaltanlage bestand aus 4 Sektoren mit total 40 Feldern und befand sich im Erdgeschoss. Weiter waren dort der Steuerraum mit der Lokalsteuerung und den Schutzgeräten, die Rundsteuerung, eine Ortstransformatorstation sowie Nebenräume wie Magazine und Lüftung untergebracht. Der Grundriss im Untergeschoss war reduziert und beherbergte den 11-kV-Kabelkeller sowie den Batterieraum.

Massnahmen

Der Stadtrat hatte im Jahre 1972 eine stufenweise Erhöhung der Mittelspannung von 11 auf 22 kV beschlossen, womit die Leistungskapazität der Kabelleitungen quasi verdoppelt werden kann. Mittlerweile sind über 85% der Transformatorstationen und über 80% der Mittelspannungskabel auf 22 kV ausgelegt. Einige der mit 11 kV betriebenen Ringe hatten durch die Lastzunahme im Versorgungsgebiet (Zürich West) die Leistungsgrenze erreicht und konnten nicht mehr weiter ausgebaut werden. Die Spannung musste daher von 11 auf 22kV umgestellt werden. Hierzu wurden im UW Herdern die entsprechenden Anlagen wie Transformatoren, Mittelspannung-Schaltanlage durch eine 22-kV-Ausrüstung ersetzt. Der Einbau einer neuen 22-kV-Schaltanlage war im ehemaligen Magazin des bestehenden Unterwerks vorgesehen. Diese konnte somit ohne wesentliche Betriebseinschränkungen und Provisorien während der Umbauzeit erstellt werden. Der vorgesehene Raum musste jedoch für die Führung der Mittelspannungskabel unterkellert werden. Der beschränkte Platz liess nur eine kompakte SF6-isolierte Schaltanlage zu, die aus einer Doppelsammelschiene, aufgeteilt in 4 Sektoren mit total 54 Feldern, besteht.

Die 150kV-Leitung Höggerberg – Sihlfeld wurde im Unterwerk Herdern eingeschlaucht. Dies ist für eine allfällig notwendige Auftrennung des 150-kV-Netzes in zwei Teilnetze Voraussetzung, damit der Kurzschlussstrom reduziert werden kann. Die gestiegenen Last- und Kurzschlussströme machten den Ersatz der Hochspannungsapparate der 150-kV-Freiluftschaltanlage notwendig. Die bestehende Anlage auf dem Dach des Gebäudes konnte aus Platzgründen nicht mehr erweitert werden und musste deshalb durch eine kompakte SF6-Schaltanlage mit 8 Feldern ersetzt werden. Es war geplant, sie im frei werdenden 11-kV-Schaltanlagenraum zu montieren. Die neue gasisolierte 150-kV-Schaltanlage besteht aus einer Doppelsammelschiene mit 4 Leitungsfeldern, 3 Transformatorfeldern und 1 Kupplungsfeld.

Die eingesetzten drei Transformatoren hatten eine Übersetzung von 150 kV auf 11 kV bei einer Nennleistung von je 30 MVA. Die vorgesehene Spannungsumstellung erforderte zunächst zwei neue Transformatoren mit einer Nennleistung von 50 MVA und einer Sekundärspannung von 22 kV.

Die Sekundäreinrichtungen wurden aus Altersgründen ersetzt.

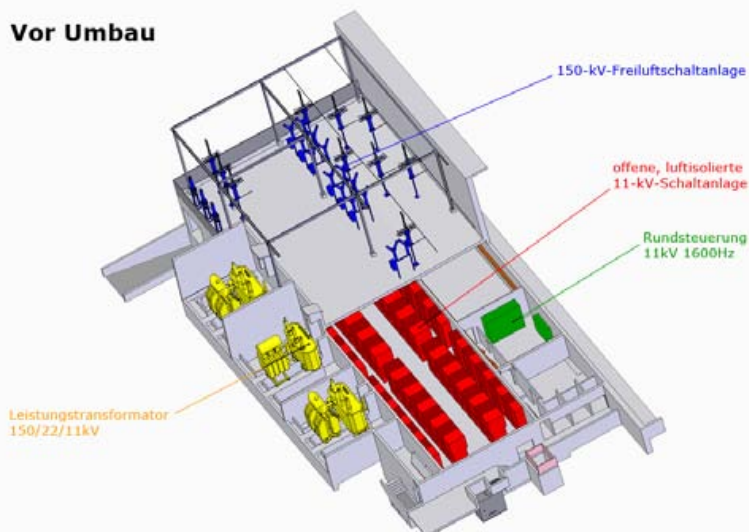
Die vorgesehenen Arbeiten setzen folgende bauliche Anpassungen voraus:

- Bereitstellung der Räumlichkeiten für die Hoch- und Mittelspannung-Schaltanlagen
- Erstellung von Hoch- und Mittelspannungs-Rohrblöcken
- Erstellung neuer Räume für Hilfsbetriebe
- Brandschutzmassnahmen

Im Detail lassen sich diese Arbeiten wie folgt umschreiben:

- Abteufung Mittelspannungskabelkeller
- Micropfähle / Bankette erstellen ca. 210 Stück
- Verstärkung Boden 150kV-Schaltanlage mittels Stahlträger
- Längsträger/Stützen im Kabelkeller (Lastabtragung)
- Kabelumlegungen infolge Pfahlarbeiten (Micropfähle)
- Einschlaufung von vier 150kV-Leitungen (zwei Leitungen im Pressvortrieb)
- Demontage Freiluftanlage auf dem Unterwerksdach (Apparate und Stahlkonstruktion)
- Nebenräume aufmauern
- Fluchttreppenhaus
- Wärmeisolation
- Neue Lüftungs- / Heizungsanlage mit Einbezug der Transformatoren - Abwärme+T02 / +T03
- Beleuchtung und Brandmeldeanlagen
- Umgebungsarbeiten (neue Umzäunung mit Arealtor)

Vor Umbau



Nach Umbau

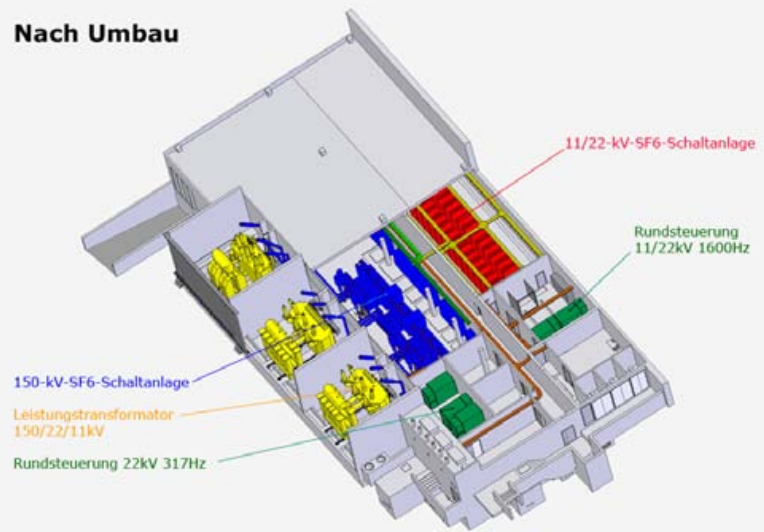


Bild 1+2: Schematische Darstellung des Unterwerkes (vor und nach Umbau)

2. AUSGANGSLAGE

Im Erneuerungsprojekt Unterwerk Herdern wurden unter anderem die Sekundärsysteme und Einbauten auf ihr Erdbebenverhalten untersucht, um bei Bedarf nachgerüstet zu werden. Im Sinne des vorliegenden Berichtes wurden folgende Elemente untersucht:

- Elemente der Sekundärtechnik (Steuerungs-, Überwachungs- und Schutzelemente)
- Mittelspannung-Zellen (Primärtechnik, aber erdbebentechnisch wie Steuerschränke)*
- weitere nicht tragende Elemente wie Schränke, Doppelböden, Trennwände,...

Weitere Elemente der Primärtechnik wie die Transformatoren > 1MVA wurden auch untersucht, sind aber nicht Bestandteil dieses Berichtes (Eigenbedarfstransformatoren <1 MVA siehe Kap.5.5).

Einbauten, die im Falle des Versagens Personen gefährden oder den Betrieb wichtiger Anlagen beeinträchtigen, müssen sowohl für das nicht tragende Bauteil als auch für dessen Verbindungen und Befestigungen oder Verankerungen auf die Erdbebeneinwirkung bemessen sein. Dazu werden die Horizontalkräfte aus der Erdbebeneinwirkung gemäss SIA Norm 261 (2003) bestimmt. Da es sich um einen aussergewöhnlichen Lastfall handelt, sind keine Sicherheits- und Lastzuschläge zu addieren.

* gehören zu den „Anlagen der Energietechnik in Schrankbauweise“

3. MODELLBILDUNG

Tragwerke für Neubauten sind nach den neuen SIA Normen 260 ff. (2003) zu berechnen. Bei regelmässigen Tragsystemen (siehe Kriterien gemäss Norm SIA 261, Ziffern 16.5.1.3 und .4) deren Grundswingzeit unter 2 s liegt, darf das Ersatzkraftverfahren angewendet werden, um die Trag-sicherheit im Erdbebenlastfall nachzuweisen. Mit diesem Berechnungsansatz werden die horizontalen Ersatzkräfte nicht linear auf die Gebäudehöhe verteilt, sondern in der Gewichtung des Abstandes zum Einbindungshorizont (dreieckförmige Verteilung der Ersatzkräfte bei gleichen Stockwerksmassen).

Bei komplexeren Gebäuden mit höheren Schwingzeiten oder bei stark exzentrischen, verwinkelten Gebäuden muss das Antwortspektrenverfahren angewendet werden. Dabei werden auch die nicht mehr vernachlässigbaren höheren Eigenschwingformen berücksichtigt.

Für **nichttragende Bauteile** wie Wände und Schränke, Regale, abgehangte Decken und Hohlböden wird, ähnlich dem Ersatzkraftverfahren bei Gebäuden, eine horizontale Ersatzkraft aufgebracht, die der Erdbebeneinwirkung entspricht und gemäss Formel (48) der Norm SIA 261 berechnet wird. Ähnlich der Lastverteilung bei Gebäuden spielen die Höhenlagen der Einbauten im Gebäude eine Rolle. Für die Bestimmung der angreifenden Horizontalkraft ist neben dieser Höhenlage auch die **Eigenschwingzeit des Bauteils** von Bedeutung.

Während die Lage im Gebäude noch einfach bestimmbar ist, kann die Grundswingzeit von Anlageteilen, Schränken, Leitungen, Hohlböden und dgl. nur schwer ermittelt werden. Etwas einfacher ist das z.B. bei nichttragenden Wänden mit eindeutiger Lagerung. Deshalb müssen die maximal möglichen Lasten eingegrenzt werden. Mit dieser Grössenordnung kann der Aufwand für eine Befestigung oder auch für die Konstruktion selbst abgeschätzt werden.

Ein oberer Grenzwert liegt dann vor, wenn die Eigenfrequenzen der Einbauten denen des Gebäudes gleichen und sich eine Resonanz einstellt. Bei steiferen, aber auch weicheeren Bauteilen ist dies nicht der Fall und die anzunehmende Ersatzkraft fällt geringer aus.

Unter der Annahme, dass die Grundschiwingzeit des nicht tragenden Bauteiles der des Gebäudes entspricht ($T_a=T_1$) und das Bauteil sich zu Oberst im Gebäude befindet ($z_a=h$), vereinfacht sich die Formel (48) der Norm SIA 261 wie folgt:

$$F_a = 4 \frac{a_{gd}}{g} \frac{S}{q_a} \gamma_f G_a \text{ mit}$$

a_{gd} :	Bemessungswert der Bodenbeschleunigung
γ_f	Bedeutungsfaktor
S	Parameter zur Bestimmung des elastischen Antwortspektrums
G_a	Eigenlast des nicht tragenden Bauteils
g	Erdbeschleunigung
q_a	Verhaltensbeiwert für nicht tragende Bauteile

Bemerkung: Gemäss Eurocode 8 werden nicht tragende Gebäudeelemente auf eine Horizontalkraft bemessen, die anhand der Formel 4.25 (Kapitel 4.3.5) berechnet wird und nur bezüglich Höhen- und Resonanzfaktor sich von der SIA-Formel unterscheidet. Die Formel aus EC8 ergibt für den oberen Grenzwert (Resonanz) eine rund 35% höhere Horizontalkraft. Bei der nächsten Teilrevision der Norm SIA 261 soll die Gleichung (48) durch die Formel des EC8 ersetzt werden.

4. ERLÄUTERUNGEN ZUR TABELLE

Im Kopfteil der Tabelle „Horizontalverankerung Inneneinrichtung unter Erdbebenlasten“ sind die Parameter bezüglich Bauwerk und Standort festgehalten. Der S_d -Wert (in diesem Fall der Maximalwert des Bemessungsspektrums) definiert den Anteil der Vertikallasten des Gebäudes (quasi-ständige Lasten), der als horizontale Ersatzkraft infolge Erdbebeneinwirkung berücksichtigt werden muss. Dabei eingeflossen sind die Bodenbeschleunigung a_{gd} (Erdbebenezone Z1), der Parameter der Baugrundklasse S (Baugrundklasse E) und der Bedeutungsfaktor γ_f (Bauwerksklasse BWK III). Mit dem Verhaltensbeiwert q wird ausserdem das Verformungs- und Energiedissipationsvermögen des Tragwerkes berücksichtigt in der linear elastischen Berechnung. Je duktiler sich ein Tragwerk verhält, desto grösser ist die Reduktion des elastischen Antwortspektrums.

Die Grundschiwingzeit des Gebäudes wurde mit der Näherungsformel in Abhängigkeit der Bauwerkshöhe abgeschätzt (Formel 38, Norm SIA 261). Der Vergleich der Gebäudeschiwingzeit mit der geschätzten Schwiwingzeit des Einbauteils gibt Auskunft über die Resonanzanfälligkeit.

Im vorliegenden, einstöckigen und ab EG eingespannten Gebäude liegen die Horizontalkräfte auf die Einbauten infolge Erdbebeneinwirkung unter **20% der Eigenlast**. Bei allen Ungenauigkeiten, die aus den unbekannten Eigenfrequenzen herrühren, scheint diese obere Grenze für **alle Anlageteile im Unterwerk Herdern** vernünftig.

Selbst mit der ungünstigen Verlegung des Referenzpunktes (somit des Einspannhorizontes) auf den Kellerboden werden maximal diese 20% erreicht. Mit der geplanten Aufstockung werden bei den im Keller oder Erdgeschoss angeordneten Einbauten die Horizontallasten rein rechnerisch kleiner, da die Grundschiwingzeit des Gebäudes sich erhöht.

In der Tabelle sind alle relevanten Anlageteile zur Übersicht aufgelistet.

In Raum- und Einzelblättern (nicht Bestandteil des Berichtes, sondern Grundlage für die Tabelle) wurde detailliert auf die Punkte Einrichtung des Anlageteils z.B. Steuerschränke (interne Befestigung der Tablare, Blechstärken, etc.), auf die Verankerung und die Stabilität der Anlageteile selbst sowie auch auf die Foundation (Verankerung im Beton oder auf Rahmen) eingegangen. Diese Erkenntnisse sind in der Tabelle aufgelistet.

5. GEPLANTE UND AUSGEFÜHRTE MASSNAHMEN

Alle Massnahmen für die Sekundärsysteme sowie für die Mittelspannung-Schaltanlage und die Einbauten sind in der Tabelle „Horizontalverankerung Inneneinrichtung unter Erdbebenlasten“ aufgeführt und in diesem Kapitel zusammenfassend beschrieben. Die Kühlersysteme der Primärtransformatoren wurden mit der Primärtechnik untersucht und hier nicht aufgeführt.

5.1 Trennwände

Neben dem Personenrisiko können nicht tragende Trennwände auch betriebsrelevante Elemente beschädigen, somit wurden unter der Berücksichtigung des neuen Brandschutzkonzeptes die hohen Mauerwerkstrennwände in regelmässigen Abständen durch Stahlträger stabilisiert (Bild 3).



Bild 3: Stahlträger zur Sicherung der MW-Trennwände



Bild 4: Bodenrahmen zur Verankerung von Elementen

5.2 Doppelböden

Sehr viele betriebsrelevante Elemente wie Steuerschränke stehen auf Doppelböden, somit nicht direkt auf der Betondecke. Einerseits muss der Doppelboden selber gegen horizontales Ausknicken gesichert sein unter der Last der darauf befestigten Elemente. Andererseits muss bei der Verankerung von Elementen dieser Abstand in der Berechnung berücksichtigt werden. Für die schweren Einbauten wurden vom Doppelboden unabhängige Bodenrahmen eingesetzt, die getrennt und separat verankert sind (Bild 4). Im UW Herdern reichen die Doppelböden allseitig an massive Wände, dennoch wurden einige Verdübelungen vorgenommen (Bild 5+6). Weitere Verstrebungen sind in diesem Falle nicht nötig.



Bild 5: Verdübelung in den Betonboden



Bild 6: Verdübelung in die massive Wand

5.3 Steuerschränke (Schränke allgemein)

Aufgestellte Steuerschränke sind betreffend Befestigung (Kippen und Verrutschen) untersucht worden. Wichtig dabei ist die Lage des Massenschwerpunktes im Schrank. Einzelne Komponenten (Einbauten, Schubladen, Racks etc.) dürfen nicht verrutschen. Wenn unter den Schränken ein Hohlboden besteht, ist auch dieser in die Berechnung der Verankerung mit einzubeziehen.

Bei etwa zentrisch eingerichteten Steuerschränken entstehen eigentliche Kipp-Probleme etwa ab einer Schrankhöhe von 2.00m und einer Schranktiefe von 0.60m oder weniger. Wenn diese an einer Wand stehen, ist das Kippen nur über die vordere Schrankkante möglich.

Grundsätzlich sind alle Steuerschränke (gilt für Schränke allgemein), die vor einer Betonwand oder an einer tragfähigen (ausgesteiften) Mauerwerkswand stehen (Bild 7, Fall b), an dieser zu befestigen (einfachste, wirtschaftlichste und wirkungsvollste Massnahme). Somit sind nur noch Horizontalkräfte von ca. 10% am Boden zu verschrauben, was mit dünn-schaftigen Schrauben möglich ist (in der Regel bereits so ausgeführt).

Bei den freistehenden Steuerschränken (Bild 7, Fall a) wurden die Abstände der Bodenrahmenbefestigungen kontrolliert (kritisch je weiter diese von der Schrankflucht entfernt stehen und damit den Hebel der Kipp-Punkte verkleinern und den Zug auf die Bodenrahmenbefestigung erhöhen).

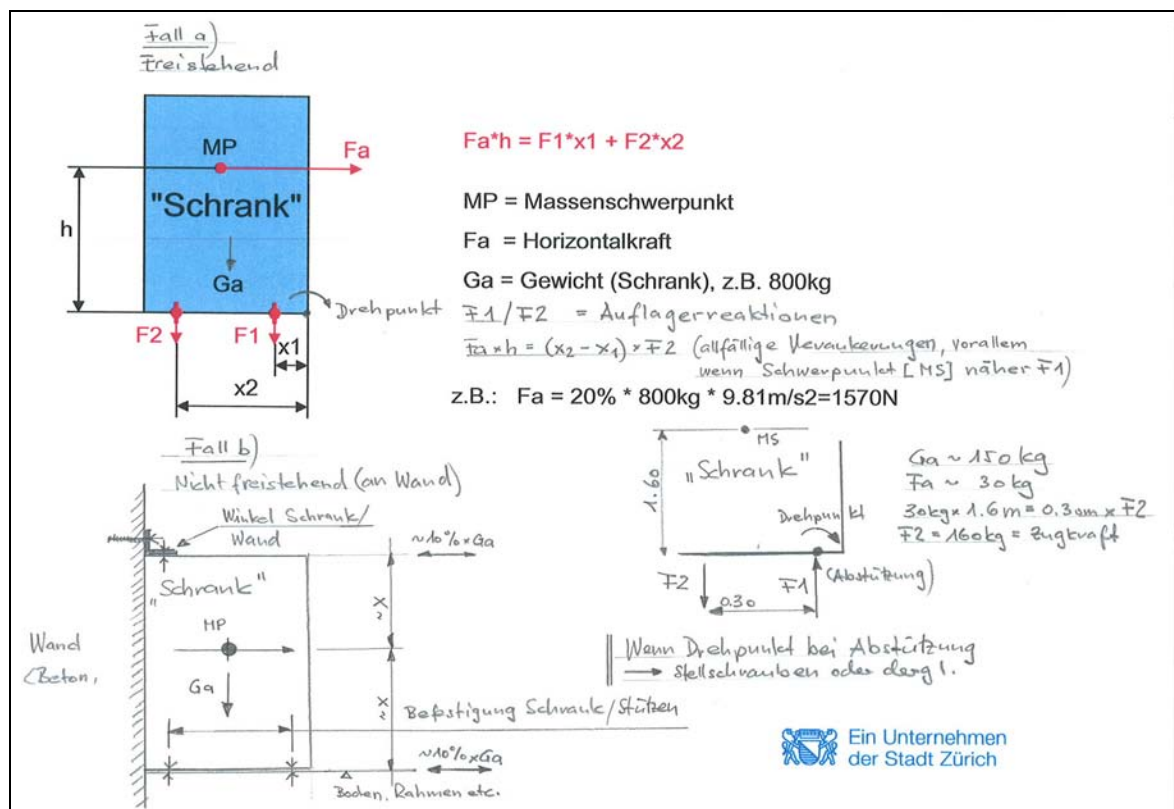


Bild 7: Berechnung der Verankerungskräfte für Schränke

Relativ dünn-schaftige Schrauben, welche auf Zug belastet die Schränke auf dem Betonboden (entweder direkt oder über eine Bodenrahmen-Konstruktion) fixieren, beeinflussen die Kippsicherheit sehr positiv (Bilder 8+9+10). Sie müssen im Weiteren eine ausreichende "innere" Festigkeit aufweisen, d.h. so gebaut sein, dass eventuelle Zugkräfte von den Fuss-schrauben der Schrankbefestigung auch über die Schrankwände bis zu den Regalen geleitet werden können. Mit dem Verbinden einzelner schlanker Schrankelemente untereinander (Bild 11) wird ein grösseres kompaktes Element zusammengestellt, das weniger kippgefährdet ist.

In jedem Fall ist es sinnvoll, alle Steuerschränke gegen horizontales Verschieben zu sichern. Die Verankerungskräfte hängen direkt proportional von den inneren Gewichten der Schränke ab. Es ist somit immer von einer Vollbelegung der Schränke auszugehen.



Bild 8: Verschaubung des Schrankes auf den Bodenrahmen



Bild 9: Befestigung Bodenrahmen (150 kV-Steuerschrank)

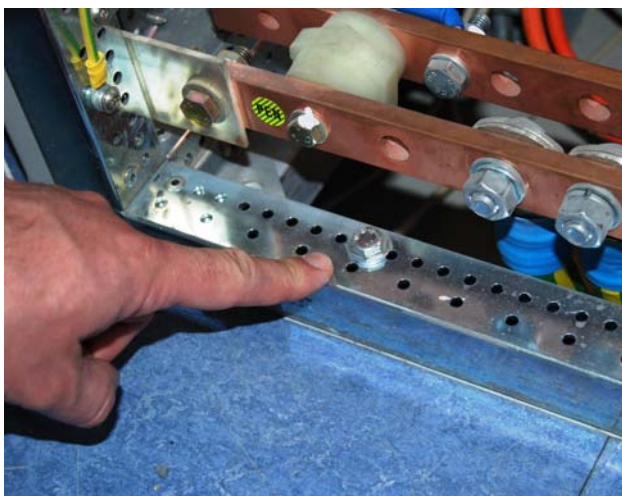


Bild 10: Verschaubung des Schrankes auf den Bodenrahmen

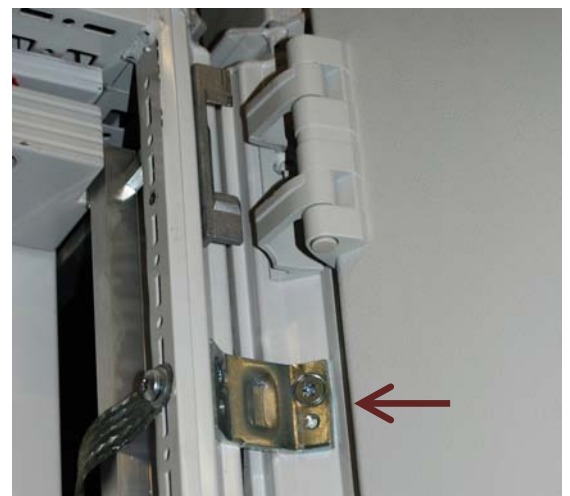


Bild 11: Schrankverbindungen

5.4 Mittelspannung (MS)-Schaltanlagen (Siemens NXPlus)

Schwere und grosse Anlageteile (Mittelspannung- / Hochspannung-Schaltanlagen) wurden auf ihre Stabilität und ihr Verformungsverhalten hin geprüft. Zudem wurden die Fundamente (Decken, Bodenplatten als Abstellbasis, Rahmen) auf diese umgelagerten Lasten hin kontrolliert.

Aufgrund ihrer Wichtigkeit sind gemäss Bericht, Zellen unabhängig von der Spannungsebene des Unterwerkes gegen Erdbeben zu sichern. Die etwas kopflastigen Zellen werden am effizientesten an der Schrankoberseite horizontal fixiert (Höhe ca. 2.65m). In Querrichtung erfolgt dies mit dünnen Zug- resp. Druckstangen etwa alle 2.00m. Die Fixierung an den beiden Betonwänden ist auf Zug resp. Druck auszulegen (Zuggurt von Wand zu Wand durchgehend).

Zusätzlich werden die Zellenelemente an der Oberseite mit einem Winkel rundum umfasst und gehalten. Der Vorteil dieser Lösung besteht darin, dass bei der Bodenverankerung keine Zugkräfte mehr entstehen. Die Horizontalkräfte können von den beiden bestehenden Befestigungsschrauben pro Zelle problemlos aufgenommen werden! Ähnlich muss dies auch in der Längsrichtung erfolgen, wobei das Verbinden der einzelnen Elemente (Beispiel Bild 11) sich sehr positiv auf die Kippsicherheit auswirkt. Die letzten 2-3 Schränke werden aber trotzdem gegen seitliches Wegkippen alle ca. 2.00m zu der querverlaufenden Betonwand abgestützt.

Abstützen gegen die zweite querverlaufende Mauerwerkswand ist nicht möglich (bestehend ohne Aussteifung), deshalb ist entweder der Längsrahmen auf Zug mit dem stirnseitigen zu verbinden oder mittels zwei diagonalen Zugstreben zu verankern. Die geplanten Massnahmen sind in den Bildern 12 und 13 ersichtlich.

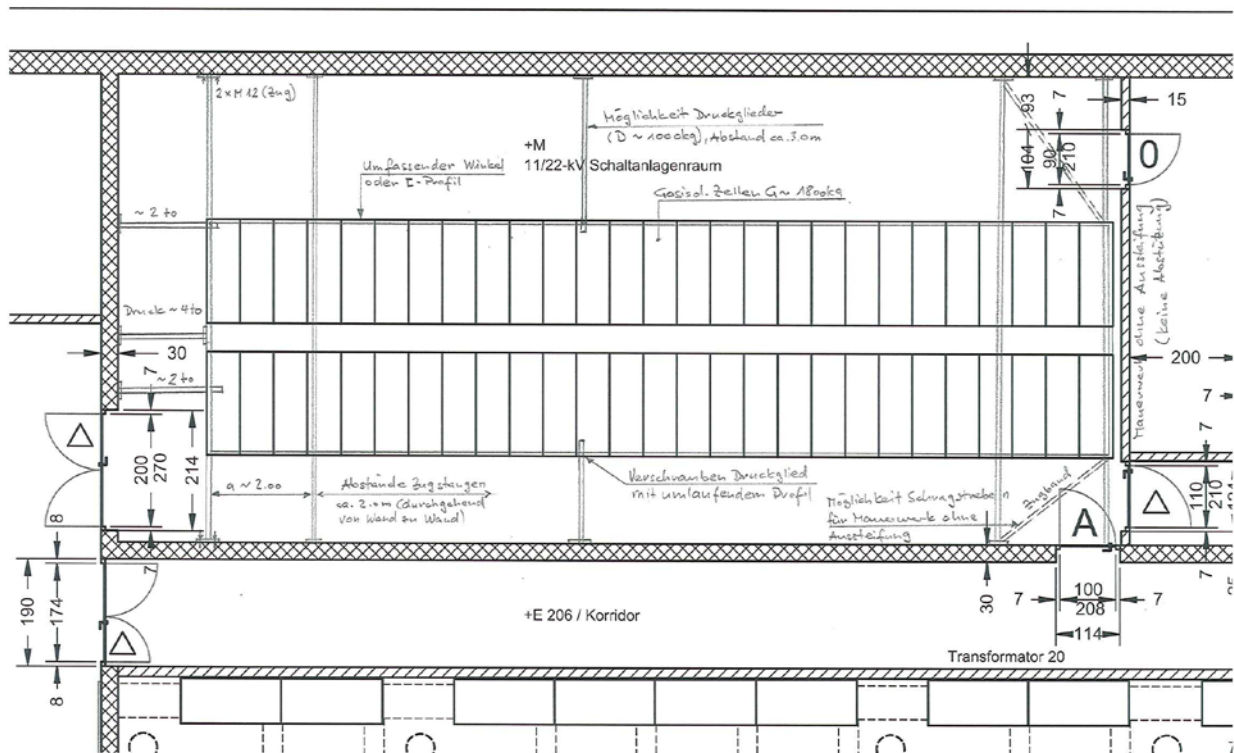


Bild 12: Massnahmen Gasisolierte MS – Schaltanlage 22kV (NXPlus) - Grundriss

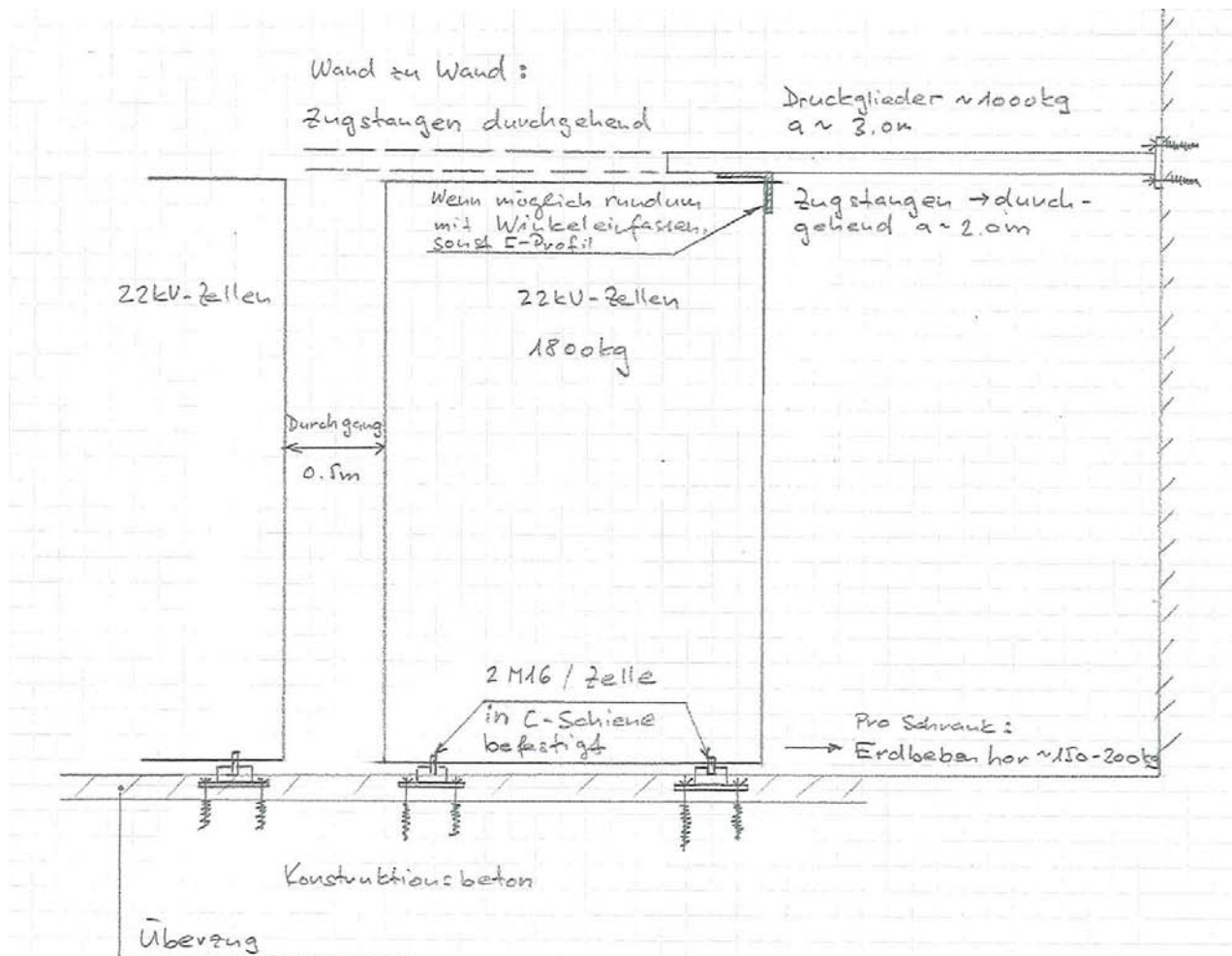


Bild 13: Massnahmen Gasisolierte MS – Schaltanlage 22kV (NXPlus) - Prinzipschnitt

5.5 Eigenbedarfstransformatoren 1 MVA

Obwohl dieser Transformator eine Schlankheit von ca. $2.3 < 3$ aufweist und somit nur gering kippgefährdet ist, plant das ewz diesen Transformator gegen Abheben zu verankern, da es sich dabei um die Speisung des Eigenbedarfs handelt.

Der Transformator ist mit Rollen auf Schienen in eine Ölauffangwanne gestellt. Innerhalb der Wanne muss die Schiene gegen Verrutschen verankert werden (auf Betonriegel verschrauben oder Verkeilen in der Wanne).

Die Rollen werden blockiert (Verschraubungen am Schienenkopf oder Blockierung der Rollen mit Stopper). Die Horizontalkraft ist je nach Gewicht rund 5 - 8 kN gross. Zur Sicherung der Wanne sind vorne und hinten Winkel gegen Verschiebungen auf beide Betonriegel zu verschrauben, je 2 x M16 Dübel pro Betonriegel. Die geplanten Massnahmen sind in den Bildern 14 und 15 ersichtlich.

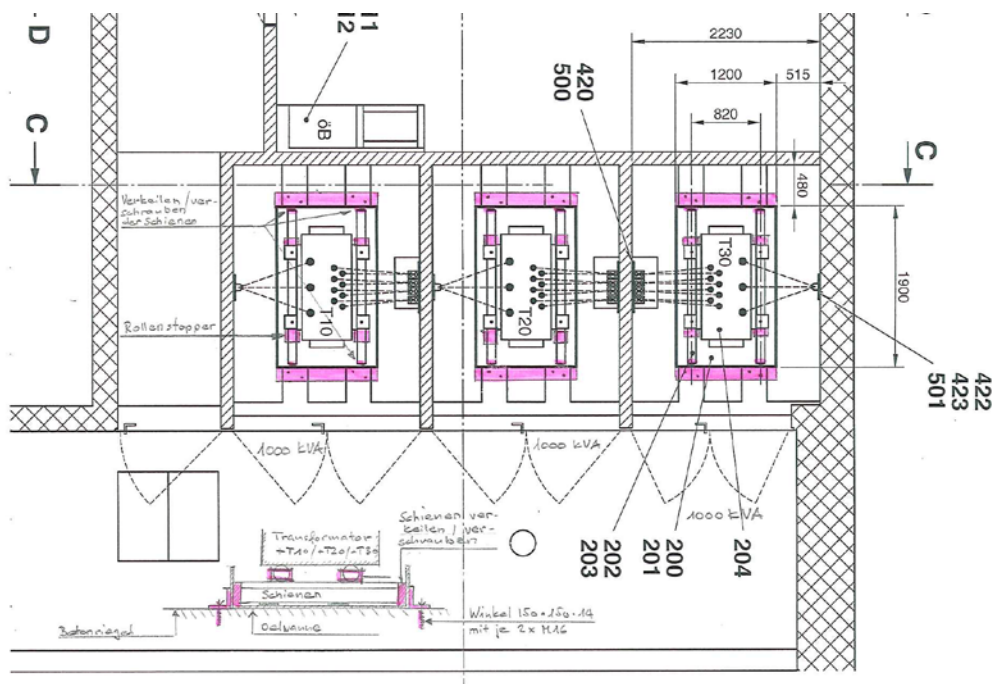


Bild 14: Massnahmen Eigenbedarfstransformator - Grundriss

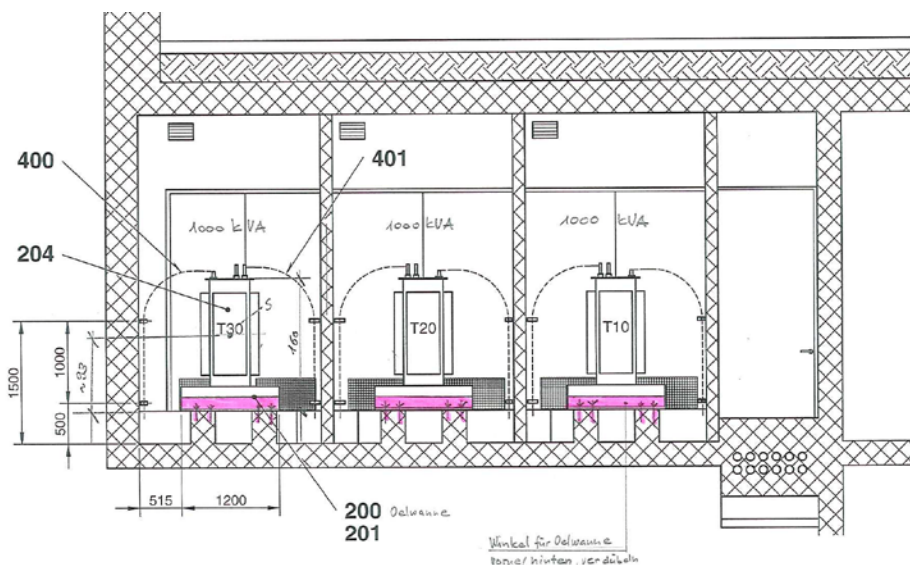


Bild 15: Massnahmen Eigenbedarfstransformator - Schnitt

5.6 Notstrombatterien

Es ist geplant, die Notstrombatterien gegen Umkippen und Abstürzen zu sichern, unter anderem mit Spanngurten. Zusätzlich wird mit Hilfe dünner Elastomereinlagen sichergestellt, dass die relativ zerbrechlichen Gehäuse nicht hart gegeneinanderschlagen können. Die Rahmen werden mit Winkeln auf den Boden befestigt. Diese Massnahmen sind in den Bildern 5.2 und 5.3 im Schlussbericht unter Kapitel 5.2 dargestellt.

5.7 Weitere Elemente

Generell ist auch wichtig, dass jegliche Art von Kabelbefestigungen neben den Vertikalkräften auch noch 20% Zusatzlasten in alle Richtungen aufnehmen können. Dies scheint selten kritisch zu sein. Wichtig können auch Sicherungen bei den steckbaren (hängenden) Verbindungen sein.

Je nach Wichtigkeit für den Betrieb sind auch gewöhnliche Computer und hauptsächlich deren Bildschirme gegen Umkippen und Herabfallen zu sichern. Eine sehr einfache Massnahme besteht darin, die Bildschirme mit Hilfe von Klettverschlüssen auf die Tische zu befestigen.

5.8 Kosten der Massnahmen

Die Kosten für die Erdbebensicherung der Elemente der Sekundärtechnik sowie der Mittelspannung-Schaltanlagen und der weiteren Einbauten betragen im Falle des UW Herdern knapp 1% der gesamten Umbaukosten. Diese Umbaukosten beinhalten natürlich nicht die Anschaffungskosten für die neuen Geräte (Transformatoren, SF6-Schaltanlage). Somit sind die Kosten sehr gering im Verhältnis auch zu den üblichen Unterhalts- und Erneuerungskosten.

Die weiteren Massnahmen für die Primärtechnik sind auch in Planung und teilweise schon umgesetzt. Bei gewissen Elementen (z.B. SF6-Anlage) sind die Massnahmen noch nicht klar definiert. Bei anderen wiederum stellt sich die Frage, abgesehen davon welche Vorschriften die zukünftige ESTI-Richtlinie beinhalten wird, ob die Massnahmen verhältnismässig sind. Es zeigt sich aber im jetzigen Zeitpunkt, dass mit weiteren 2% der gesamten Umbaukosten zu rechnen ist, um die Anlagen der Primärtechnik im UW Herdern gegen Erdbeben zu sichern.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Das Unterwerk Herdern wurde als Pilotprojekt zur Studie „Erdbebensicherheit der elektrischen Energieverteilung in der Schweiz“ herangezogen, um den Aspekt der Erdbebensicherheit von Sekundärsystemen und Einbauten in der Praxis zu untersuchen und Aussagen über die Kosten zu machen. Die Primärtechnik wurde im Rahmen des Erneuerungsprojektes des UW Herdern auch behandelt, aber ist nicht Bestandteil dieses Berichtes. Des Weiteren wurden die Mittelspannungszellen den Steuerschränken gleichgestellt, da sie aus Sicht der Erdbebensicherheit das selbe Verhalten aufweisen. Zusätzlich wurden auch die weiteren Einbauten wie Trennwände oder Doppelböden untersucht.

Gemäss dem Kapitel der Norm SIA 261 für nicht tragende Bauteile (Ziffern 16.7) wurden die im Erdbebenfall angreifenden Horizontalkräfte für die Einbauten bestimmt. Um die Kräfte mit geringem Aufwand abzuschätzen, wurden die theoretisch maximalen Kräfte angenommen. Dieses Vorgehen ist sinnvoll, da weniger der Widerstand des einzelnen Befestigungssystems massgebend ist, sondern vielmehr ob das Element überhaupt fixiert oder stabilisiert ist. Vorhandene Befestigungssysteme wurden überprüft und allenfalls verstärkt. Für nicht stabilisierte Elemente wurden Sicherungsmassnahmen geplant, bemessen und teilweise auch schon umgesetzt.

In der beiliegenden Tabelle zur „Horizontalverankerung der Inneneinrichtung unter Erdbebenlasten“ sind die verschiedenen Anlageteile aufgeführt mit ihren Eigengewichten und deren Anteil, der im Massenschwerpunkt als horizontal angreifend angenommen werden muss. Die maximale Horizontalkraft infolge Erdbeben liegt beim UW Herdern immer unter 20% der Eigenlast der Elemente. Die massgebenden Gebäudeparameter und übrigen Werte zur Berechnung der horizontalen Ersatzlast sind in der Kopfzeile der Tabelle dargestellt.

In der Tabelle sind auch die geplanten Massnahmen gegen Kippen oder Verrutschen von Anlageteilen aufgeführt. Jegliche Art von Schränken oder Regalen, somit auch die betriebsrelevanten Steuerschränke oder Schaltanlagen wurden auf den Boden befestigt. Bei Doppelböden ist es hauptsächlich bei schweren Elementen wichtig, diese mit Hilfe von eigenständigen Grundrahmen auf den Untergrund zu befestigen. Dabei wurde auch deren Stabilitätsverhalten überprüft.

Neben den Elementen der Sekundärtechnik wurden auch alle weiteren Einbauten überprüft, die im Falle des Versagens Personen gefährden, das Tragwerk beschädigen oder den Betrieb beeinträchtigen können. Somit wurden neben den Trennwänden, dem Doppelboden oder der herabgehängten Decke auch einfache Elemente wie Computer untersucht.

Im Bereich der Erdbebensicherheit von nicht tragenden Elementen sind grundsätzlich sehr effiziente Massnahmen vorhanden, deren Umsetzung nur geringe Kosten verursachen. Somit sollen diese Massnahmen künftig umgesetzt werden.

Abgesehen von der Personensicherheit liegt es im Ermessen des Betreibers zu entscheiden, welche Elemente von Bedeutung für seinen Betrieb sind und im Falle eines Versagens zu einem längeren Betriebsunterbruch führen können oder auch die Wiederinbetriebnahme erschweren oder verzögern können.

Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz)
Schindler + Partner AG, Ingenieure

Für den Bericht:

P. Müller (ewz)
A. Recher / R. Lochmann (Schindler + Partner)

Beilage

Tabelle **Horizontalverankerung Inneneinrichtung unter Erdbebenlasten**
mit approximativen Kosten

Horizontalverankerung Inneneinrichtung unter Erdbebenlasten											
Gebäude-Merkmale:			$S_d=2.5 y_{fd} a_{gd} S / g q$			Horizontalkomponente für $T_B<T<T_c$ nach SIA 261 Art 16.2.4					
Standort:	Zone 1	$a_{gd} = 0.6$									
Bauwerksklasse	BWK III	$y_f = 1.4$	$S_d= 0.15$				Für $T_1= 0.167\text{ s}$	Grundschwingzeit Gebäude $0.05\text{ h}^{0.75}$			
Baugrund:	Typ E	$S= 1.4$									
Verhaltensbeiwert	Beton massiv	$q = 2.0$									
$h= 5.00\text{ (m)}$ Gesamthöhe Bauwerk (EG Boden = Referenzhöhe 0.00m)											
Verhältnis Horizontalkraft / Eigengewicht der Innenausbauten							$F_A =$ Horizontalkraft im Massenschwerpunkt				
$q_a = 2.0$ für Einbauten wie Schränke etc. (geschätzt)							$G_A =$ Eigenlast				
Nichttragende Bauteile (48) SIA 261 17.7.2							$T_A =$ Grundschwingzeit der Innenausbauten				
Nr:		Bezeichnung Anlage:	Raum Nr. Lage in Gebäude	Massenschwerpunkt z_d (m)	Gewicht G_A	Spitze F_A / G_A $T_a = T_1 \text{ max.}$	$T_a = 2 T_1$ $T_a = 0$	$T_a = 0.5 T_1$	Befestigungsart auf Untergrund	Lieferantenangabe	Massnahmen:
1	Doppelboden	EG: Steuerraum	0.30			0.127	0.064	0.102	Geklebt	keine	Reichen allseitig an Wände (Allgem.: An freien Rändern, Horizontallasten via Streben ableiten)
2	Steuerschränke: KA 21-23	EG: Steuerraum	1.60	< 500 kg		0.158	0.079	0.127	Bodenrahmen überprüft i.O. 2 x M8/M10	keine	Schrankvorderseite 2 - 3 x (Schrankhöhe) miteinander verbinden. Schränke längs verbinden und quer dazu, mittels Zugband oder Druckstab an Wand abstützen (ca. bei jedem 3. Schrank). Schrank auf Bodenrahmen mit 2 x M8 -/4 x M4 - Schrauben befestigen.
3	Steuerschränke: KA 05-20	EG: Steuerraum	1.60	< 500 kg		0.158	0.079	0.127	Bodenrahmen überprüft i.O. 2 x M8/M10	Zertifikat	Schrankvorderseite 2 - 3 x (Schrankhöhe) miteinander verbinden. Schränke längs verbinden und quer dazu, mittels Zugband oder Druckstab an Wand abstützen (ca. bei jedem 3. Schrank). Schrank auf Bodenrahmen mit 2 x M8 -/4 x M4 - Schrauben befestigen.
4	NS Verteilschrank	UG: Eigenbed.raum	1.10	150 kg		0.146	0.073	0.117	Bodenrahmen überprüft i.O. 2 x M8/M10 /Schrank	nicht erfüllt	Schrank auf Bodenrahmen übers Kreuz mit je 2 x M8 - Schrauben befestigt. Kippen: Zusätzlich mit 2 x M6 - Schrauben sichern.
4a	Verteilschränke	UG: Fernwirkraum	1.60	< 500 kg		0.158	0.079	0.127	Bodenrahmen überprüft i.O. 2 x M10/Schrank	keine	Schrank auf Bodenrahmen mit je 2 x M8 - Schrauben befestigt. Kippen: Zusätzliche Wandhalterung (z.B. Winkel) oderzusätzlich mit 2 x M6 - Schrauben sichern (auf Bodenrahmen).
5	Batterien	UG: Batterieraum	0.42			0.130	0.065	0.104	Bodenrahmen überprüft i.O. 2 x M8/M10	erfüllt	Kippen/ Rutschen: Batterien mit Spanngurten und Zwischenlagen sichern. Rahmen auf Boden befestigen mit Winkeln.
6	Duresca-schienen	UG: MS-Kabelkeller	0.00			0.120	0.060	0.096	Bodenrahmen überprüft i.O. 2 x M8/M10	erfüllt	Steckersicherung zur Anlage (NXPlus) im EG überprüfen.
7	NX Plus Zellen	EG: MS-Raum	1.80	1800 kg		0.163	0.082	0.130	Auf Bodenschiene verschraubt	nicht erfüllt	Kopflastig, mit 2 x M16 - Schrauben auf einbetonierte Bodenschiene verschraubt i.O. Schrankoberseite Querrichtung, durchgehend mit Zugband zw./an Wände befestigen, alle 2.0m (oder Druckgurt Schrank/Wand). Längsrichtung mit Randwinkel (quer) und 3 x Wandabstützung für die letzten 2 - 3 Schränke (zur best. KS-Wand mit Diagonalstreben)
8	RST-Schränke	EG: RST-Räume 1600/317 Hz	1.80	2300 kg		0.163	0.082	0.130	Verschraubt	erfüllt	Schränke sind auf Boden verschraubt i.O.
8a	RST- Umformer	EG: RST-Raum 1600 Hz	1.50	300 kg		0.156	0.078	0.125	Verschraubt an Wand und auf Boden gestellt	keine	Keine Befestigung Schrank/ Rahmen. Schrank mit Winkel an Wand befestigen.
8b	RST- Umformer	EG: RST-Raum 317 Hz	1.80	300 kg		0.163	0.082	0.130	Schrank vorne mit 2 x M8 auf Boden befestigt	keine	Schränke oben (vorne/hinten) miteinander verbunden. Oben hinten mit je zwei Winkel an Wand befestigen.
9	Schrank 0B Trafostat. Pfingstweid	EG: Trafostat.	1.50	300 kg		0.156	0.078	0.125	Bodenrahmen überprüft i.O. 2 x M10	nicht erfüllt	Schränke mit je 2 x M8 (Front) auf Rahmen geschraubt. Zusätzlich (Rücken) auf Zug an Wand befestigen.

Kosten in Status
CHF Massnahmen

2000 Massnahmen umgesetzt

Massnahmen zum Teil umgesetzt

5000

Massnahmen zum Teil umgesetzt

13000 Massnahmen zum Teil umgesetzt

2000 Massnahmen zum Teil umgesetzt

1500 Massnahmen werden umgesetzt

10000 Massnahmen werden umgesetzt

53000 Massnahmen werden umgesetzt

Massnahmen umgesetzt

Keine Massnahmen (Demontage 2014)

500 Massnahmen werden umgesetzt

500 Massnahmen werden umgesetzt

9a	MS Verteilung	EG: Trafostat.	1.50	800 kg	0.156	0.078	0.125	Bodenrahmen überprüft i.O., zusätzlich an Wand befestigt	nicht erfüllt	Schränke mit je 4 x M8 auf Rahmen verschraubt i.O.	Massnahmen umgesetzt		
10	NS Verteilung	EG: Trafostat.	1.50	300 kg	0.156	0.078	0.125	Bodenrahmen verschraubt	nicht erfüllt	Schränke mit je 4 x M8 auf Rahmen verschraubt i.O.		Massnahmen umgesetzt	
11	Transformator 30 MVA Annahme Schwerpunkte wie +T02/+T03	Trafo + T01	2.55	60 to	0.181	0.091	0.145	Räder	nicht erfüllt	Kippen quer zu Schienen > Nein. Trafo für Querkräfte mit Koppelung (siehe Bild "Kessel_Erdbeben_Stütze" im Schlussbericht ewz, UW Herdern) gleichmässig auf beide Schienen halten. Trafo längs zur Schiene gegen Wegrollen sichern. Horizontale "37.5 %-Lasten" mittels Aussteifungen (Kessel_Erdbeben_Stütze) auf Schienen verschrauben. Stützkonstruktionen durch Werk! Grösse der Horizontalkraft definieren! Schlankheit ca. 3.3 > 3.0.	445000	Massnahmen sollen gemäss "Erdbensicherung der elektrischen Energieverteilung in der Schweiz", ESTI umgesetzt werden	
11a	Kühler	Trafo + T01	2.15	9.7 to	0.171	0.086	0.137	Räder	nicht erfüllt	Analog Trafo. Stützkonstruktion durch Werk! Grösse der Horizontalkraft definieren! Schlankheit ca. 2.8 < 3.0.		Schlankheit < 3.0 Massnahmen sollen umgesetzt werden	
12	Transformator 50 MVA	Trafo + T02	2.55	78.7 to	0.181	0.091	0.145	Räder	nicht erfüllt	Analog + T01. Stützkonstruktion durch Werk! Grösse der Horizontalkraft definieren! Schlankheit ca. 3.3 > 3.0.		Massnahmen analog +T01	
12a	Kühler	Trafo + T02	2.15	13.1 to	0.171	0.086	0.137	Räder	nicht erfüllt	Analog Trafo. Stützkonstruktion durch Werk! Grösse der Horizontalkraft definieren! Schlankheit ca. 2.8 < 3.0.		Schlankheit < 3.0 Massnahmen sollen umgesetzt werden	
13	Transformator 50 MVA	Trafo + T03	2.55	68.3 to	0.181	0.091	0.145	Räder	nicht erfüllt	Analog + T01. Stützkonstruktion durch Werk! Grösse der Horizontalkraft definieren! Schlankheit ca. 3.3 > 3.0.		Massnahmen analog +T01	
13a	Kühler	Trafo + T03	2.15	11.6 to	0.171	0.086	0.137	Räder	nicht erfüllt	Analog Trafo. Stützkonstruktion durch Werk! Grösse der Horizontalkraft definieren! Schlankheit ca. 2.8 < 3.0.		Schlankheit < 3.0 Massnahmen sollen umgesetzt werden	
14a	GOS- Schränke	EG: HS-Raum	1.60	500 kg	0.158	0.079	0.127	Bodenrahmen verschraubt mit je 2 x M14	keine	Schränke sind vorn/hinten miteinander verbunden. Befestigung mit je 2 x M8 auf Bodenrahmen. Zusätzliche Wandbefestigung mit 2 - 3 Winkel/Schrankreihe.	1000	Massnahmen werden umgesetzt	
14	150kV-Schaltanlage (8DN9-Anlage)	EG: HS-Raum	1.50	3 to	0.156	0.078	0.125	Stahlplatte aufgeschraubt	Anlage bis 0.2g i.O.	Stützenfüsse SF ₆ - Anlage auf Stahlplatte geschweisst		Keine Massnahmen (ausreichende Befestigung bei Montage)	
15	GIS- Durchführung zu Aussen-Trafos	HS-Raum / Trafoszellen	2.00		0.168	0.084	0.134	Rohrschellen, Stützen	nicht erfüllt	Nachrechnung durch Werk.	60000	Entscheid der Massnahmen pendent	
16	Eigenbedarf - Trafos T10 bis T30 1 MVA	EG: EB-Zellen	0.93	3.2 to	0.142	0.071	0.114	Trafos auf Räder in Öl-Wanne (keine Befestigung der Wanne)	nicht erfüllt	Traforollen mit Stopper auf Schienen verschrauben (je 500 kg/2 Räder). Schienen in Wanne verkeilen oder verschrauben. Wanne vorne/hinten mittels Winkel (über beide Schienenriegel) verdübeln (je 2 x M16). Schlankheit ca. 2.3 < 3.0. Arretierung Trafo und Befestigung der Wanne an den	6000	Massnahmen werden umgesetzt	
17	Lüftung	UG/EG	0.80		0.139	0.070	0.111	Monoblock auf den Boden gestellt		Monoblock: Zusatzrahmen (analog Zivilschutz) auf Boden verschrauben. Kanäle: Seitliche Verstrebungen anbringen. Ventilatoren an Decke: Seitliche Verstrebungen mont.	25000	Massnahmen werden umgesetzt	
18	Heizung	UG/EG	1.13	2250 kg	0.147	0.073	0.118	Heizungsspeicher auf den Boden gestellt		Speicher: Befestigungskonstruktion auf Boden und oder an Wände. Rohre: Seitlich sichern mit Streben.	30000	Massnahmen werden umgesetzt	
19	Trennwände	UG/EG	Raumhöhe	300 kg/m²				Stahlträger	keine	Stabilisierung mit doppel-T-Stahlträgern je nach Längen-/Höhenverhältnis der Wand, befestigt am Boden und an der Decke	6000	Massnahmen umgesetzt	
20	Engineering										20000		
										Totale Umbaukosten	680500	Summe Total	
										25000000	505000	Summe Primärsysteme	
											175500	Summe Sekundärsysteme	
											[%]	entspricht in [%]	
										816600	Total inkl. 20% Unsicherheiten	3.3	der gesamten Umbaukosten
										606000	Primärsysteme inkl. 20% Unsicherheiten	2.4	
										210600	Sekundärsysteme inkl. 20% Unsicherheiten	0.8	