



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV

Richtlinie

Erdbebensicherheit von Eisenbahnanlagen

Aktenzeichen: BAV-511.5-26/3/10/3
Datum: 01.12.2020
Version: V 1.1_d



Impressum

Herausgeber:	Bundesamt für Verkehr, 3003 Bern, Abteilung Sicherheit, in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Umwelt, 3003 Bern, Koordinationsstelle für Erdbebenvorsorge
Leitung:	Sven Heunert (BAFU, Gesamtleitung) Luigi d'Egidio (BAV)
Begleitgruppe:	Kazim Altintac (SBB) Karl Baumann (RhB) Daniel Blaser (SBB) Herbert Friedl (SBB) Tiziano Furegati (SBB) Martin Isler (BLS) Christian Kaufmann (SBB) Daniel Trachsel (BLS) Nick Wenger (BABS)
Sachbearbeitung:	Yves Mondet (Basler & Hofmann AG) Ehrfried Kölz (Risk&Safety AG)
Verteiler:	Veröffentlichung auf der BAV-Internetseite
Sprachfassungen:	Deutsch (Original) Französisch (Italienisch)

BAV interne Dokumentenlenkung

Q-Plan Stufe:	RL, öffentlich
QM-SI-Anbindung:	QM-Doku_Liste01.2_Fachgebiet bt_Prüfung PGV und BBw.xls
Anwendungsgebiet BAV-Prozesse:	BAV 411

Diese Richtlinie tritt am 1. Dezember 2020 in Kraft.

Bundesamt für Verkehr

Bundesamt für Verkehr

Rudolf Sperlich
Vizedirektor, Abteilung Sicherheit

Fritz Ruchti
Sektionschef Bautechnik

Ausgaben / Änderungsgeschichte

Version	Datum	Ersteller	Änderungshinweise	Status
1.0_d	24.06.2020	Luigi d'Egidio	Vernehmlassungsentwurf	
1.1_d	01.12.2020	Sven Heunert	gemäss Vernehmlassung	In Kraft

* folgende Stufen des Status sind vorgesehen: in Arbeit; in Review; in Kraft/mit Visum; abgelöst

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	4
1 Einleitung	5
1.1 Ziel und Zweck	5
1.2 Geltungsbereich	5
1.3 Aufbau	6
1.4 Abkürzungsverzeichnis	6
2 Unterlagen zur Erdbebensicherheit	7
2.1 Nutzungsvereinbarung	7
2.2 Projektbasis	8
2.3 Geotechnischer Bericht	8
2.4 Statische und dynamische Berechnungen	8
2.5 Sachverständigenprüfbericht	8
3 Erdbebenspezifische Bestimmungen	9
3.1 Sicherheitsniveau bei Neubauten	9
3.2 Massnahmenempfehlung und Beurteilung der Verhältnismässigkeit bei bestehenden Bauten	9
3.3 Festlegung der Bauwerksklasse BWK von Neubauten und bestehenden Bauten	10
3.4 Sekundäre Bauteile, Installationen und Einrichtungen SBIE	14
4 Hinweise zur Ermittlung der Verhältnismässigkeit bei bestehenden Bauten	16
4.1 Restnutzungsdauer d_r	16
4.2 Personenbelegung PB	16
4.3 Wert des Bauwerks BW	17
4.4 Bauwerkrisikofaktor BRF	17
4.5 Sachenwert SW	18
4.6 Sachenrisikofaktor SRF	18
4.7 Unterbrechungskosten UK	19
4.8 Unterbrechungsrisikofaktor URF	19
4.9 Wert des Bauwerks und der direkt betroffenen Sachen BSW	19
4.10 Sicherheitsbezogene Investitionskosten SIC_M	19
Anhang A	20
Anwendungsbeispiel Viadukt	20
Anhang B	27
Anwendungsbeispiel Hochbau mit Stellwerk	27
Verzeichnis	34

Vorwort

Eisenbahnanlagen sind vor den schädlichen Auswirkungen von Erdbeben zu schützen. Grundlage für die entsprechende Auslegung dieser Anlagen und die zugehörigen bautechnischen Nachweise bilden die in der Schweiz als anerkannte Regeln der Baukunde geltenden Normen des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA). Für Neubauten wird die Thematik Erdbeben in der Normenreihe SIA 260 ff, für die Erhaltung von bestehenden Bauten in der Normenreihe SIA 269 ff behandelt.

Die bisher im Rahmen der eisenbahnrechtlichen Plangenehmigungsverfahren (PGV) durchgeführten Prüfungen der Erdbebensicherheit von Bauprojekten der Eisenbahn haben gezeigt, dass die erwähnten Normen insbesondere bei bestehenden Bauten und der diesbezüglich zu untersuchenden Notwendigkeit und Verhältnismässigkeit von Massnahmen Fragen offen lassen.

Die vorliegende Richtlinie "Erdbebensicherheit von Eisenbahnanlagen" konkretisiert die Normen im Sinne einer einheitlichen Grundlage und Vollzugshilfe für die Infrastrukturbetreiber, für die Projektverfasser sowie für das Bundesamt für Verkehr (BAV) als Aufsichts- und Bewilligungsbehörde. Im Fokus stehen dabei die für die Sicherheit des Bahnbetriebs in bautechnischer Hinsicht relevanten Elemente. In der Richtlinie werden u. a. die in den Projektunterlagen bezüglich Erdbeben erforderlichen Angaben, die zu beachtenden spezifischen Bestimmungen, Hinweise zur Ermittlung der Verhältnismässigkeit von Massnahmen bei bestehenden Bauten und schliesslich die konkrete Umsetzung anhand von zwei Anwendungsbeispielen aufgeführt.

Die Erarbeitung der Richtlinie erfolgte durch eine aus Vertretern der betroffenen Behörden (BABS, BAFU, BAV), der Bahnen (BLS, RhB, SBB) und der durch das BAFU mandatierten Ingenieurbüros (Basler & Hofmann AG, Risk&Safety AG) zusammengesetzten Arbeitsgruppe unter der Gesamtleitung des BAFU. Den Mitgliedern der Arbeitsgruppe und allen Übrigen, die in einer anderen Funktion zum Gelingen dieser Richtlinie beigetragen haben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

1 Einleitung

Die zielgerichtete Anwendung der gesetzlichen und normativen Bestimmungen zur Erdbebensicherheit von Eisenbahnanlagen ist von grosser Bedeutung, um die erdbebengerechte Auslegung dieser Anlagen sicherzustellen. Es liegt in der Verantwortung der Infrastrukturbetreiberin (ISB) und der von dieser beauftragten Dritten, die in Gesetzen, Verordnungen, Richtlinien und Normen aufgeführten Vorgaben zur Erdbebensicherheit von Bahnanlagen zu befolgen und einzuhalten.

1.1 Ziel und Zweck

Diese Richtlinie vereinheitlicht und vereinfacht die Auslegung und Anwendung der Vorgaben zur Erdbebensicherheit von Bahnanlagen. Sie bildet die Grundlage für den Vollzug der gesetzlichen und der darin erwähnten normativen Bestimmungen bezüglich der Erdbebensicherheit der Bahninfrastruktur. Die entsprechenden Vorgaben und die normativen Anforderungen hinsichtlich der Projektdokumentation, der Schutzziele und des Schutzgrades (Bestimmung der Bauwerksklasse) sowie die Beurteilung der Verhältnismässigkeit von Erdbebensicherheitsmassnahmen werden bahnspezifisch konkretisiert und erläutert. Bei Projekten, die der Eisenbahn dienen, führt die Richtlinie zu mehr Planungssicherheit für die ISB und für die von diesen beauftragten Dritten.

1.2 Geltungsbereich

Übergeordnet gelten die in Art. 2 der Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen vom 23. November 1983 (EBV) [2] aufgeführten, bei der Planung und bei der Erstellung von Bauten und Anlagen als Voraussetzung für einen sicheren Betrieb und eine sachgerechte Instandhaltung zu berücksichtigenden Grundsätze und Grundlagen. Die normativen Anforderungen an die Erdbebensicherheit für Bauwerke der Bahninfrastruktur gewährleisten einen gewissen Schutzgrad nicht nur für die Personen, sondern auch für die Infrastrukturfunktion.

Diese Richtlinie gilt für alle Eisenbahnanlagen, unabhängig davon, ob deren Erstellung oder Änderung bewilligungspflichtig (Art. 18ff EBG [1]) oder genehmigungsfrei (Art. 1a VPVE [3]) sind. Sie gilt sowohl für Neubauten¹ als auch für die Erhaltung von bestehenden Bauten¹, behandelt jedoch nicht deren Bewirtschaftung. Hinsichtlich der baulichen Erdbebenprävention deckt sie die folgenden relevanten Elemente der Bahninfrastruktur ab:

- Kunstbauten und weitere Bauten
 - Brücken, Schutzbauwerke, Durchlässe,
 - Erdbauwerke (z. B. Dämme, Böschungen, Einschnitte oder Lärmschutzwälle)
 - Stützbauwerke
 - Perronzugänge (z. B. Personenunter- und -überführungen, Treppen oder Rampen)
 - Perrondächer, Perronhallen und Perronüberdeckungen
 - Tunnel und Galerien
- Hochbauten
 - Bahnhöfe und unterirdische Bahnhöfe inkl. Verkaufsanlagen
 - Bahntechnikgebäude (Leitzentralen, Stellwerke)
 - Serviceanlagen / Werkstätten / Bürogebäude

Der Fokus richtet sich auf jene Elemente, die im Ereignisfall ein Schadenpotenzial aufweisen. Dies setzt eine Verletzbarkeit dieser Elemente gegenüber Erdbeben sowie eine potenzielle Auswirkung auf Schutzgüter voraus. Die zu berücksichtigenden Schutzgüter (Personen, sicherer Bahnbetrieb, ...) hängen von der Bedeutung oder der Lage des Elementes im Netz ab. Für die weiteren Elemente der Bahninfrastruktur wird der Aufwand zur Gewährleistung der Erdbebensicherheit a priori als unverhältnismässig beurteilt (z. B. für Fahrbahn, Fahrleitungstragwerke und Bahnstrom-Übertragungsleitungen) oder es gelten andere Grundlagen (z. B. ESTI-Richtlinie Nr. 248 [6] oder Störfallverordnung, StFV, SR 814.012), aus denen die Anforderungen an die Erdbebensicherheit hervorgehen.

¹ Für die Bedeutung dieser Begriffe wird auf die Ziff. 1 der Norm SIA 469 [11] bzw. auf Ziff. 1 der Norm SIA 269 [10] verwiesen.

1.3 Aufbau

Die Richtlinie behandelt im Kapitel 2 die hinsichtlich der Dokumentation der Erdbebensicherheit relevanten bautechnischen Unterlagen und befasst sich mit den erdbebenspezifischen Anforderungen an deren Inhalte. Das Kapitel 3 enthält die Bestimmungen zur Gewährleistung der Erdbebensicherheit bei Neubauten und bestehenden Bauten. Es behandelt in erster Linie die Beurteilung der Verhältnismässigkeit von Erdbebensicherheitsmassnahmen und die Massnahmenempfehlung für bestehende Bauten sowie die Einteilung eines Bauwerks in eine Bauwerksklasse. Im Kapitel 4 werden die verschiedenen Parameter der Norm SIA 269/8, die bei der Ermittlung der Verhältnismässigkeit von Erdbebensicherheitsmassnahmen eine wichtige Rolle spielen, besprochen. Im Anhang schliesslich wird die Anwendung der Richtlinie beispielhaft anhand zweier typischer Elemente der Bahninfrastruktur detailliert aufgezeigt.

1.4 Abkürzungsverzeichnis

Die Kenntnis der normativen Grundlagen wird vorausgesetzt. Auf die Beschreibung der Fachausdrücke und Bezeichnungen wird somit verzichtet. Nachfolgend wird lediglich die Bedeutung von Abkürzungen aufgeführt.

AB-EBV	Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung
BAV	Bundesamt für Verkehr
BRF	Bauwerksrisikofaktor
BSW	Wert des Bauwerks und der direkt betroffenen Sachen (BW + SW)
BW	Wert des Bauwerks
BWK	Bauwerksklasse
EBV	Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen (Eisenbahnverordnung)
ESK	Erdbebenstreckenklasse
ESTI	Erdbebensicherheit der elektrischen Energieverteilung
ISB	Infrastrukturbetreiberin
MP	Massnahmenpaket
PB	Personenbelegung
PB _{max}	Maximale Personenbelegung (aufgrund Brandschutzvorschriften zulässig)
PGV	Plangenehmigungsverfahren
SBIE	Sekundäre Bauteile, Installationen und Einrichtungen
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SIC _M	Sicherheitsbezogene Investitionskosten
SRF	Sachenrisikofaktor
SW	Sachenwert
UK	Unterbrechungskosten
UP-EB	Unabhängige Prüfstellen Eisenbahnen
URF	Unterbrechungsrisikofaktor
VPVE	Verordnung über das Plangenehmigungsverfahren für Eisenbahnanlagen

2 Unterlagen zur Erdbebensicherheit

Die Erdbebensicherheit eines Tragwerkes ist als Teil des Tragsicherheitsnachweises bei der Erarbeitung der entsprechenden Projektgrundlagen sowohl für Neubauprojekte als auch für Erhaltungsprojekte von bestehenden Bauten der Eisenbahninfrastruktur zu behandeln und zu dokumentieren; dies unabhängig davon, ob das Projekt bewilligungspflichtig (Verfahren nach Eisenbahnrecht oder nach kantonalem Recht gemäss Art. 18ff EBG [1]) oder genehmigungsfrei (Art. 1a VPVE [3]) ist. Im Allgemeinen handelt es sich bei den zu erstellenden und schliesslich zu den Bauwerksakten gehörenden Unterlagen um folgende:

- Nutzungsvereinbarung
- Projektbasis
- Geotechnischer Bericht
- Statische und dynamische Berechnungen mit den wichtigsten bautechnischen Nachweisen

Im Rahmen eines eisenbahnrechtlichen Plangenehmigungsverfahrens (PGV) sind diese Unterlagen zwingend zu erstellen und fallweise zusammen mit einem allfällig gemäss den Vorgaben der RL UP-EB [5] erforderlichen Sachverständigenprüfbericht der Bewilligungsbehörde einzureichen (Art. 3 Abs. 2 VPVE [3]).

Die Nutzungsvereinbarung ist im Rahmen des Projektes frühzeitig in der Teilphase 31 "Vorprojekt" (Art. 3.2 der Ordnung SIA 103 [7]) basierend auf den Vorgaben der Bauherrschaft in Zusammenarbeit mit allen Beteiligten (Architektur, Bauingenieurwesen und Fachplanung) zu erstellen und von der Bauherrschaft zu genehmigen. Darin werden unter anderem die Anforderungen an die Erdbebensicherheit festgelegt und die Grundlage für die frühzeitige, effiziente und zielführende Berücksichtigung dieser Thematik im Projekt geschaffen. Aufbauend auf der Nutzungsvereinbarung erstellt die Bauingenieurin oder der Bauingenieur in der Teilphase "Vorprojekt" die Projektbasis. Nutzungsvereinbarung und Projektbasis sind während der Projektierungs-, Realisierungs- und Bewirtschaftungsphase phasengerecht nachzuführen und bilden einen wichtigen Bestandteil der Bauwerksakten (z.B. Art. 4.3.53 der Ordnung SIA 103).

Die im eisenbahnrechtlichen PGV gemäss Art. 18 EBG einzureichenden Unterlagen haben gemäss Ziff. 22.2 der RL VPVE [4] mindestens dem Stand nach abgeschlossenem Bauprojekt zu entsprechen (siehe Beschrieb in Art. 4.3.32 der Ordnung SIA 103 [7]).

Im Folgenden werden die erdbebenspezifischen Anforderungen an den Inhalt der genannten Unterlagen aufgezeigt.

2.1 Nutzungsvereinbarung

Die erdbebenspezifischen Anforderungen an die Nutzungsvereinbarung sind:

- Festlegung der Bauwerksklasse (BWK) inkl. Begründung (s. Kap. 3.3), der Erdbebenzone (Z) sowie der Baugrundverhältnisse;
- Beschreibung oder Darstellung des erdbebengerechten Tragwerkskonzepts (Konzept der horizontalen Lastabtragung);
- Festlegung der relevanten sekundären Bauteile, Installationen und Einrichtungen (SBIE) inkl. Festlegung der Zuständigkeiten im Planungs- und Bauprozess;
- Im Zusammenhang mit einer allfälligen Einteilung in die Bauwerksklasse III die Festlegung der konkreten Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit für die Gewährleistung der Funktionstüchtigkeit nach einem Erdbeben (für das Tragwerk und die relevanten SBIE).

Bei bestehenden Bauten sind weiterführende Überlegungen zur Definition der Anforderungen und zur Festlegung der relevanten Grundlagen gemäss der Normenreihe SIA 269 ff [10] (bzw. der Norm SIA 269/8) notwendig. Dementsprechend sind in der Nutzungsvereinbarung zusätzlich die wesentlichen Ergebnisse der Überprüfung der Erdbebensicherheit (Tragwerk und SBIE) nach der Norm SIA 269/8 festzuhalten, konkret sind dies:

- Erfüllungsfaktor bei Überprüfung α_{eff} (Tragwerk und SBIE);
- Mindesterfüllungsfaktor α_{min} ;
- Erfüllungsfaktor nach Intervention α_{int} (Tragwerk und SBIE) mit den geplanten Massnahmen (gemäss Ziff. 9.4 der Norm SIA 269/8 ist ein Erfüllungsfaktor von $\alpha_{\text{int}} = 1.0$ anzustreben);
- berücksichtigte Schutzgüter bei der Beurteilung der Notwendigkeit von Erdbebensicherheitsmassnahmen;
- begründeter Massnahmenentscheid (Verhältnismässigkeit);
- Beschreibung der Erdbebensicherheitsmassnahmen inkl. einfacher Darstellungen in den Bauwerksplänen (Visualisierung Massnahmenkonzept im Grund- und Aufriss).

Wenn der Erfüllungsfaktor $\alpha_{\text{eff}} < 1.0$ beträgt, muss in der Nutzungsvereinbarung zudem festgehalten sein, dass die Erdbebensicherheit durch das Bauprojekt nicht reduziert werden darf.

2.2 Projektbasis

Die erdbebenspezifischen Anforderungen an die Projektbasis sind:

- Festhalten der ingenieurtechnischen Parameter für die Erdbebenbemessung bzw. Erdbebenüberprüfung wie Bemessungsspektrum (inkl. Bedeutungsfaktor und Verhaltensbeiwert), dynamische Eigenschaften des Tragwerks (Schwingzeiten) und Materialeigenschaften der stabilisierenden Elemente;
- Festhalten des verwendeten Berechnungsverfahrens und der wesentlichen Annahmen für die Modellierung und Berechnung für die Bemessungssituation Erdbeben;
- Festhalten der materialspezifischen konstruktiven Durchbildung, um das angesetzte Tragwerksverhalten (Duktilität und Verhaltensbeiwert) sicherzustellen.

2.3 Geotechnischer Bericht

Der geotechnische Bericht hat die Standortgefährdung bezüglich Erdbeben (Baugrundklasse, Standortstudien oder spektrale seismische Mikrozonierungen), induzierte Hanginstabilitäten sowie das Bodenverflüssigungspotenzial zu behandeln und aufzuzeigen.

2.4 Statische und dynamische Berechnungen

Die statischen und dynamischen Berechnungen haben die Berechnungen und Nachweise zur Erdbebensicherheit zu beinhalten. Unabdingbar sind dabei Angaben zu Massen, Dämpfung und Steifigkeit (Tragwerk und Gründung). Je nach Komplexität, Bedeutung und Verletzbarkeit des betrachteten Tragwerks oder der SBIE können vereinfachte konservative Betrachtungen und Berechnungen (von Hand) ausreichend sein. In der Projektierungsphase liegt der Fokus auf der Entwicklung eines erdbebengerechten Konzepts für Tragwerk und SBIE.

Für bestehende Bauten ist den statischen und dynamischen Berechnungen zusätzlich der Bericht zur Überprüfung der Erdbebensicherheit gemäss der Norm SIA 269/8 [10] beizufügen, sofern Anlass zur Überprüfung der Erdbebensicherheit nach Ziff. 6.1.2 der Norm SIA 269 [10] besteht oder eine Überprüfung aus anderen Gründen durchgeführt wurde. Die Überprüfung der Erdbebensicherheit ist sowohl für das Tragwerk als auch für die relevanten SBIE vorzunehmen (siehe dazu Kapitel 3.4) und das Ergebnis hat das Massnahmenkonzept sowie die Empfehlungen an die Bauherrschaft zu enthalten. In einfachen oder unbedeutenden Fällen sowie bei bezüglich Erdbeben kaum oder nicht verletzbaren Tragwerken und SBIE kann die Überprüfung durch qualitative Überlegungen oder mittels einfacher Abschätzungsberechnungen erfolgen.

2.5 Sachverständigenprüfbericht

Ob für ein Tragwerk im Rahmen eines eisenbahnrechtlichen PGV das Einreichen eines Sachverständigenprüfberichtes erforderlich ist, ergibt sich aus den Bestimmungen der RL UP-EB [5]. Wird ein solcher Bericht verlangt, ist darin durch die Sachverständige bzw. den Sachverständigen auch die Beurteilung der Erdbebensicherheit zu behandeln, sofern Elemente der Bahninfrastruktur gemäss Kapitel 1.2 betroffen sind.

3 Erdbebenspezifische Bestimmungen

Dieses Kapitel enthält die Bestimmungen zur Erdbebensicherheit bei Neubauten und **bestehenden Bauten**.

3.1 Sicherheitsniveau bei Neubauten

Bei Neubauten sind die Bestimmungen der Tragwerksnormen des SIA [9] einzuhalten. Dadurch wird in Abhängigkeit von der Bauwerksklasse ein angemessenes Sicherheitsniveau (Tragwerk und SBIE) gewährleistet. Die Festlegung der Bauwerksklasse hat nach Kapitel 3.3 zu erfolgen. Der erdbebengerechte Umgang mit SBIE wird im Kapitel 3.4 aufgezeigt.

3.2 Massnahmenempfehlung und Beurteilung der Verhältnismässigkeit bei bestehenden Bauten

Bei bestehenden Bauten sind zusätzlich zu den Bestimmungen für Neubauten die Bestimmungen der Erhaltungsnormen des SIA [10] einzuhalten. Dadurch wird in Abhängigkeit von der Bauwerksklasse ein angemessenes Sicherheitsniveau (Tragwerk und SBIE) gewährleistet. Die Festlegung der Bauwerksklasse hat nach Kapitel 3.3 zu erfolgen. Der erdbebengerechte Umgang mit SBIE ist im Kapitel 3.4 aufgezeigt.

Die Massnahmenempfehlung hat gemäss der Norm SIA 269/8 [10] basierend auf einer Überprüfung der Erdbebensicherheit zu erfolgen. Gegebenenfalls muss nach einer ersten kraftbasierten generellen Überprüfung eine detaillierte Überprüfung mit detaillierten Untersuchungen durchgeführt werden (Ziff. 6.1 der Norm SIA 269 und Ziff. 2.1.2 der Norm SIA 269/8).

Die Massnahmenempfehlung ist abhängig vom Erfüllungsfaktor α_{eff} der Überprüfung im Ist-Zustand und vom Mindesterfüllungsfaktor α_{min} in Abhängigkeit von der Bauwerksklasse. Das in Ziff. 9.4 der Norm SIA 269/8 [10] beschriebene Vorgehen zur Bestimmung der erforderlichen Massnahmen bzw. Massnahmenpakete (MP) wird in der Abbildung 1 illustriert.

Die Beurteilung der Verhältnismässigkeit der Massnahmen bzw. der MP hat nach Ziff. 10 der Norm SIA 269/8 [10] zu erfolgen:

- bei BWK I und II: konkret nach den Ziff. 10.2.1 bis 10.2.4. Zudem ist der Anhang E zwingend zu berücksichtigen; d. h., neben dem Schutzgut Personen sind auch die Schutzgüter Bauwerk, Sachen und Betrieb in die Beurteilung der Verhältnismässigkeit einzubeziehen (siehe hierzu die Hinweise im Kapitel 4);
- bei BWK II-i und III: konkret nach den Ziff. 10.2.1 und 10.2.5. Zudem ist Ziff. 10.4. zu berücksichtigen; d. h., neben dem Schutzgut Personen ist auch das Schutzgut Infrastrukturfunktion in die Beurteilung der Verhältnismässigkeit einzubeziehen.

Zur Beurteilung der Verhältnismässigkeit von MP ist sowohl das in Ziff. 10.2.1 der Norm SIA 269/8 [10] enthaltene Kriterium der Massnahmeneffizienz ($EF_M \geq 1$ bzw. Massnahmenkosten $\leq$ maximal noch verhältnismässige sicherheitsbezogene Investitionskosten) als auch das Verhältnis der Kosten für die Erdbebensicherheitsmassnahmen zu den am Bauwerk gesamthaft getätigten Investitionen zu berücksichtigen. Letzteres kann den Ausschlag für den Entscheid geben, Erbebensicherheitsmassnahmen umzusetzen, obwohl diese aufgrund der Bestimmungen der Norm nicht verhältnismässig sind. Kapitel 4 enthält ergänzende Festlegungen zu den wichtigsten anzunehmenden Parametern für die Berechnung der Verhältnismässigkeit. Weiter zeigen die Beispiele in den Anhängen A und B, wie die Verhältnismässigkeit konkret ermittelt und beurteilt wird.

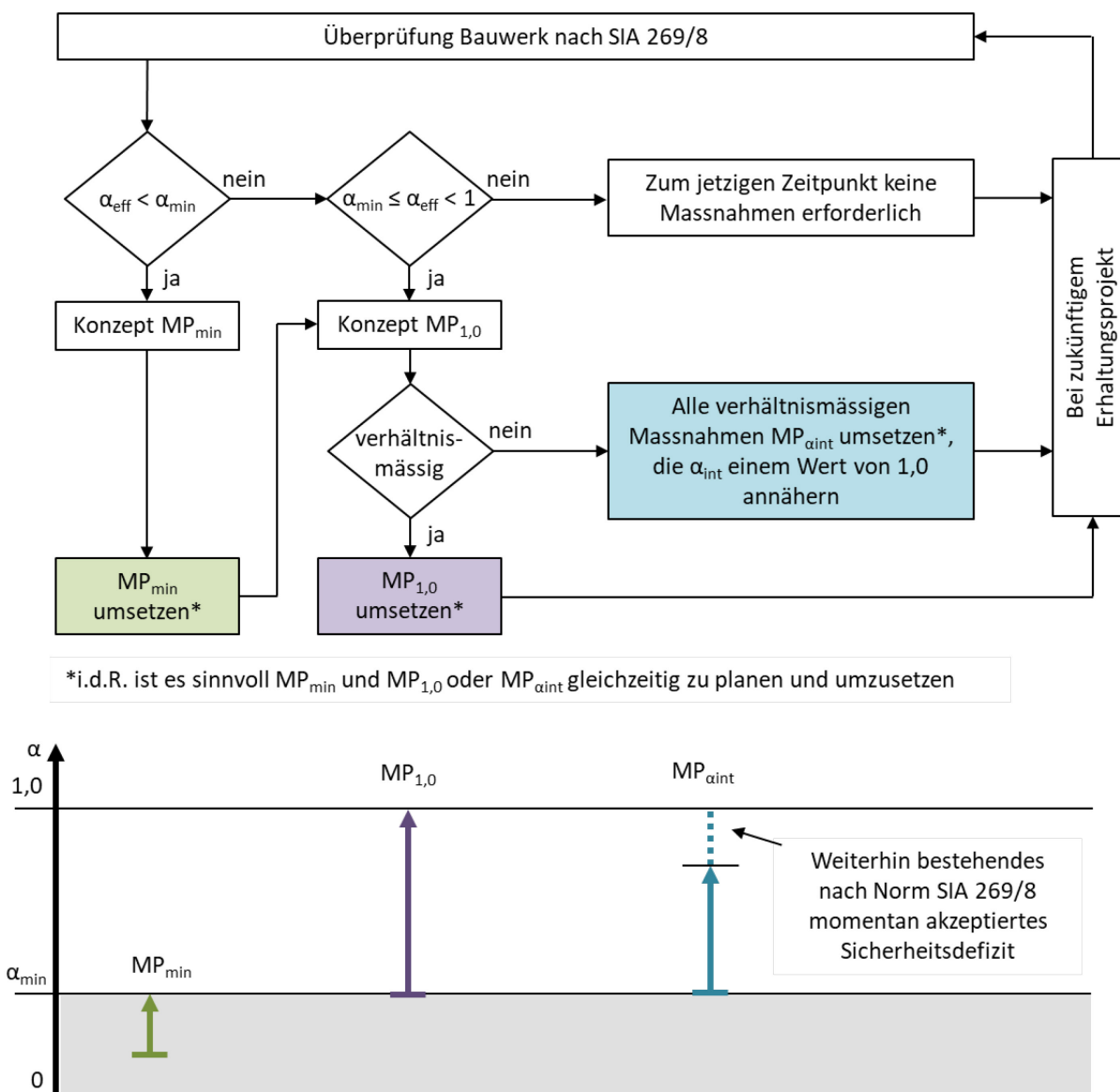


Abb. 1 Ermittlung der umzusetzenden Massnahmen bzw. Massnahmenpakete MP nach SIA 269/8 [10]

3.3 Festlegung der Bauwerksklasse BWK von Neubauten und bestehenden Bauten

Die Bauwerksklasse (BWK) eines spezifischen Bauwerks der Bahninfrastruktur ist abhängig:

- von der Bedeutung des Bauwerks selbst, vorgegeben durch die Mindestanforderung an die Bauwerksklasse (BWK_{min}) gemäss nachfolgendem Abschnitt I,
- vom Einfluss des Bauwerks auf die Verfügbarkeit von Strecken nach einem Erdbebenereignis,
- von der Bedeutung der beeinflussten Strecke(n), definiert durch die sogenannte Erdbebenstreckenkategorie (ESK), gemäss nachfolgendem Abschnitt II und
- von Abhängigkeiten zu anderen Verkehrsträgern (z. B. bedeutende Strasse) oder anderen Bauwerken (z. B. lebenswichtiges Drittbauwerk).

Mit Hilfe des Flussdiagramms (Abbildung 2) im nachfolgenden Abschnitt III lässt sich das Bauwerk unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Elemente in eine Bauwerksklasse einteilen.

I. Mindestanforderung an die Bauwerksklasse

Die Mindestanforderung an die Bauwerksklasse BWK_{min} von Elementen der Bahninfrastruktur (vgl. Kap. 1.2) ist für "Kunstbauten und weitere Bauten" in Tabelle 1 und für "Hochbauten" in Tabelle 2 festgelegt. Dabei liegt der Fokus auf jenen Elementen, die für einen sicheren Bahnbetrieb relevant sind. Für Hochbauten gilt als Mindestanforderung an die Bauwerksklasse BWK_{min} die höchste für das Bauwerk zutreffende Bauwerksklasse bezogen auf die vier Merkmale Personenbelegung, Sachenwert, Umwelt und Infrastrukturfunktion. Die ISB darf aufgrund von spezifischen Interessen höhere Anforderungen vorgeben als diejenigen, die in den Tabellen 1 und 2 aufgeführt sind.

Grundsätzlich werden keine Elemente der Bahninfrastruktur in die Bauwerksklasse III eingeteilt, da der Bahn keine lebenswichtige Infrastrukturfunktion (sog. "Lifeline") zukommt. Für eine ISB kann es jedoch aufgrund von spezifischen Eigeninteressen sinnvoll sein, ein bestimmtes Element von sehr hoher Bedeutung für den Betrieb oder für die Ereignisbewältigung in die Bauwerksklasse III einzuteilen. Folglich sind in der Nutzungsvereinbarung entsprechende Anforderungen an das Tragwerk sowie an die relevanten SBIE festzulegen und umzusetzen. Beispiele dazu können Interventionszentren, Betriebszentralen, Bahntechnikgebäude von hoher Bedeutung oder Unterstände/Lagergebäude mit Rettungs- oder Hilfsmaterial (Löschzüge, Hilfsbrücken etc.) sein.

Mindestanforderung an die Bauwerksklasse BWK_{min} von Kunstbauten und weiteren Bauten		
Element	Merkmal	BWK_{min}
Brücke, Schutzbauwerk		$BWK\ II^{1)}$
Durchlass		$BWK\ I$
Erdbauwerk ²⁾	Damm, Böschung	$BWK\ II^{1)}$
	Einschnitt, Lärmschutzwall	$BWK\ I$
Stützbauwerk ²⁾		$BWK\ II^{1)}$
Perronzugang, Perrondach, Perronüberdeckung und Perronhalle	mittlerer Bahnhof und Grossbahnhof ³⁾	$BWK\ II$
	kleiner Bahnhof / Haltestelle ³⁾	$BWK\ I$
Bahntunnel, Galerie, Sondertunnel (Fluchtstollen usw.)		$BWK\ II^{1)}$

Tab. 1 Mindestanforderung an die Bauwerksklasse BWK_{min} von Kunstbauten und weiteren Bauten

¹⁾ $BWK\ I$, wenn von untergeordneter Bedeutung nach einem Erdbeben (siehe Beispiele in der Tabelle 25 der Norm SIA 260 [9])

²⁾ siehe auch ASTRA-Dokumentation [13] und [14]

³⁾ siehe auch Tabelle 2

Mindestanforderung an die Bauwerksklasse BWK _{min} von Hochbauten		
	BWK I	BWK II
Personen	☐ Personenbelegung PB ≤ 50 für Wohngebäude: bis 100 Zimmer für Bürogebäude: bis 2'000 m ² Nettogeschossfläche bis 200 Arbeitsplätze für Ladengebäude: bis 500 m ² Bruttoverkaufsfläche für Werkstätte: bis 200 Arbeitsplätze (1-Schicht-Betrieb) ☐ kleiner Bahnhof / Haltestelle maximale Personenbelegung PB _{max} ≤ 500 Personen (zulässig nach Brandschutzvorschriften)	☐ Personenbelegung PB > 50 für Wohngebäude: mehr als 100 Zimmer für Bürogebäude: mehr als 2'000 m ² Nettogeschossfläche mehr als 200 Arbeitsplätze für Ladengebäude: mehr als 500 m ² Bruttoverkaufsfläche für Werkstätte: mehr als 200 Arbeitsplätze (1-Schicht-Betrieb) ☐ mittlerer Bahnhof und Grossbahnhof maximale Personenbelegung PB _{max} > 500 Personen (zulässig nach Brandschutzvorschriften) (z.B. Events, Veranstaltungen, usw.)
Sachenwert	☐ Keine besonders wertvollen Güter und Einrichtungen	☐ Besonders wertvolle Güter und Einrichtungen
Umwelt	☐ Keine Umweltschäden möglich	☐ Umweltschäden möglich
	BWK I	Neu: BWK II Bestehend: BWK II-i
Infrastruktur-funktion	☐ Der Ausfall des Bauwerks hat geringen oder nur kurzfristigen Einfluss auf den Bahnbetrieb, da es von untergeordneter Bedeutung ist oder seine Funktion nach einem Erdbeben durch ein anderes Bauwerk (z. B. durch Umfahrung) übernommen werden kann.	☐ Der Ausfall des Bauwerks hat erheblichen oder mittel- bis langfristigen Einfluss auf den Bahnbetrieb.

Tab. 2 Mindestanforderung an die Bauwerksklasse BWK_{min} von Hochbauten

II. Erdbebenstreckenklasse ESK

Für die Einteilung eines Bauwerks in eine Bauwerksklasse ist die Bedeutung der betroffenen Strecke(n), auf der bzw. an der sich das Bauwerk befindet, relevant. Die Bedeutung einer Strecke kann durch deren Einteilung in eine Erdbebenstreckenklasse (ESK) festgelegt werden. Jede Strecke kann entsprechend ihrer Bedeutung für den Bahnverkehr von der ISB gemäss den Vorgaben in Tabelle 3 in eine der vier Erdbebenstreckenklassen ESK 0 bis ESK III eingeteilt werden. Über die Festlegung von Erdbebenstreckenklassen entscheidet die ISB.

Bei der Einteilung einer Strecke in eine ESK sind die Auswirkungen eines Ausfalls auf die Gesellschaft, die Wirtschaft und den Staat zu betrachten. Dabei wird den Interessen der regionalen Ebene (Kantone als Teil-/Gliederstaaten) gegenüber jenen der nationalen Ebene (Bundesstaat) mehr Gewicht eingeräumt. Die Konsequenzen eines Ausfalls des täglichen Bahnverkehrs sind in die Betrachtungen einzubeziehen (« Welche Auswirkungen für die Gemeinde oder für die Region hätte der Ausfall der Strecke, die diese Gemeinde oder diese Region bedient? »).

Erdbebenstreckenklasse Infrastrukturfunktion der Bahnstrecke	
ESK 0	Untergeordnet Streckenunterbrüche führen zu unbedeutenden Auswirkungen.
ESK I	Normal Streckenunterbrüche führen zu kleinen und lokalen Auswirkungen für die Gesellschaft, die Wirtschaft und den Staat. Möglichkeiten für Redundanzen und Kompensationen sind genügend.
ESK II	Bedeutend Die Strecke hat nach einem Erdbeben eine bedeutende, aber keine lebenswichtige Funktion. Allfällige Beeinträchtigungen führen zu massgeblichen Auswirkungen für die Gesellschaft, die Wirtschaft und den Staat. Die Redundanz ist ungenügend und eine Kompensation ist nicht einfach möglich.
ESK III	Lebenswichtig Die Strecke hat nach einem Erdbeben eine lebenswichtige Funktion in den Rettungs- und Bewältigungsphasen (grosse Bedeutung für die Zugänglichkeit ausgewählter Bauwerke oder eines Gebietes nach einem Erdbeben). Es gibt keine Redundanzen und Kompensationsmöglichkeiten. Allfällige Beeinträchtigungen führen zu gravierenden Auswirkungen für die Gesellschaft, die Wirtschaft und den Staat.

Tab. 3 Erdbebenstreckenklassen ESK nach Bedeutung der Strecke

III. Einteilung in eine Bauwerksklasse mittels Flussdiagramm

Die Abhängigkeiten und Vorgaben führen zur Bestimmung der Bauwerksklasse eines spezifischen Bauwerks der Bahninfrastruktur gemäss dem nachfolgenden Flussdiagramm (Abb. 2).

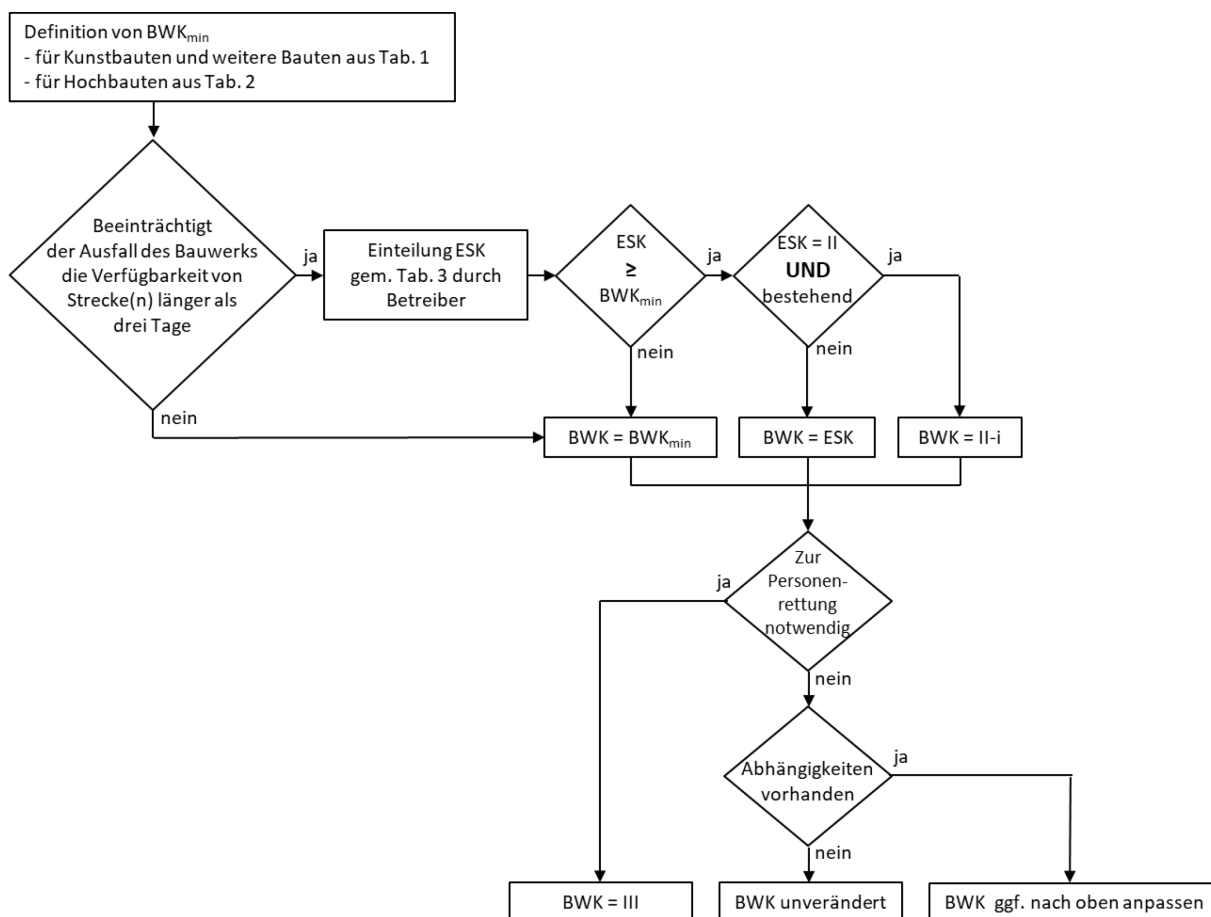


Abb. 2 Flussdiagramm zur Bestimmung der Bauwerksklasse

Bei den für die Personenrettung / -bergung notwendigen Einrichtungen kann es sich z. B. um Interventionszentren mit den darin gewöhnlich untergebrachten Lösch- und Rettungszügen handeln.

Abhängigkeiten sind mit den kantonalen Krisenstäben abzuklären und können die Höherklassifizierung eines Bauwerks zur Folge haben, wie beispielsweise im Falle:

- einer Bahnbrücke, die über eine Strasse mit einer höheren Erdbebenstreckenklasse führt (z. B. über eine Rettungsachse mit ESK III),
- einer Stützmauer, deren Versagen auch ein Drittbauwerk mit einer höheren Bauwerksklasse (z. B. Feuerwehrgebäude oder Strasse mit einer höheren ESK) gefährdet.

Die ISB darf vom Ergebnis der aus dem Flussdiagramm in Abb. 2 sich ergebenden Bauwerksklasse abweichen, sofern die in Kapitel 3.3 einleitend aufgeführten Abhängigkeiten der Bauwerksklassen angemessen berücksichtigt werden und die Einteilung zu einer abweichenden Bauwerksklasse nachvollziehbar begründet wird. Auch hier (vgl. 1. Absatz in Ziff. I unter Kapitel 3.3) darf die ISB aufgrund von spezifischen Interessen höhere Anforderungen, d. h. eine höhere als aus dem Flussdiagramm resultierende Bauwerksklasse festlegen.

3.4 Sekundäre Bauteile, Installationen und Einrichtungen SBIE

Ein Bauwerk besteht im Allgemein aus einem Tragwerk und nicht strukturellen Elementen, also sekundären Bauteilen, Installationen und Einrichtungen:

- Sekundäre Bauteile: i. A. architektonische Elemente, wie z. B. Treppen und Trennwände, abgehängte Decken, Brüstungen;
- Installationen: wie z. B. Bahntechnik, Gebäudetechnik, Aufzüge;
- Ortsfeste Einrichtungen: sonstige Gebäudeinhalte, wie z. B. IT-Anlagen/Elemente, Schränke und Regale.

Der erdbebengerechte Umgang mit SBIE sowohl bei Neubauten als auch bei bestehenden Bauten ist in Abbildung 3 zusammengefasst. Ausführliche Informationen dazu sind in der BAFU-Publikation zur Erdbebensicherheit von SBIE [12] zu finden.

Für Bahnstromverteilungsanlagen hat die ISB im Rahmen von eisenbahnrechtlichen PGV zu bestätigen, dass die entsprechenden Bestimmungen zur Erdbebensicherheit gemäss der ESTI-Richtlinie Nr. 248 [6] eingehalten sind (Ziff. 46.3.3 RL-VPVE [4]). Der Umgang mit den SBIE bei Energieerzeugungsanlagen (Kraft- und Frequenzumformerwerke) ist in Ziff. 4.5 der ESTI-Richtlinie Nr. 248 spezifiziert.

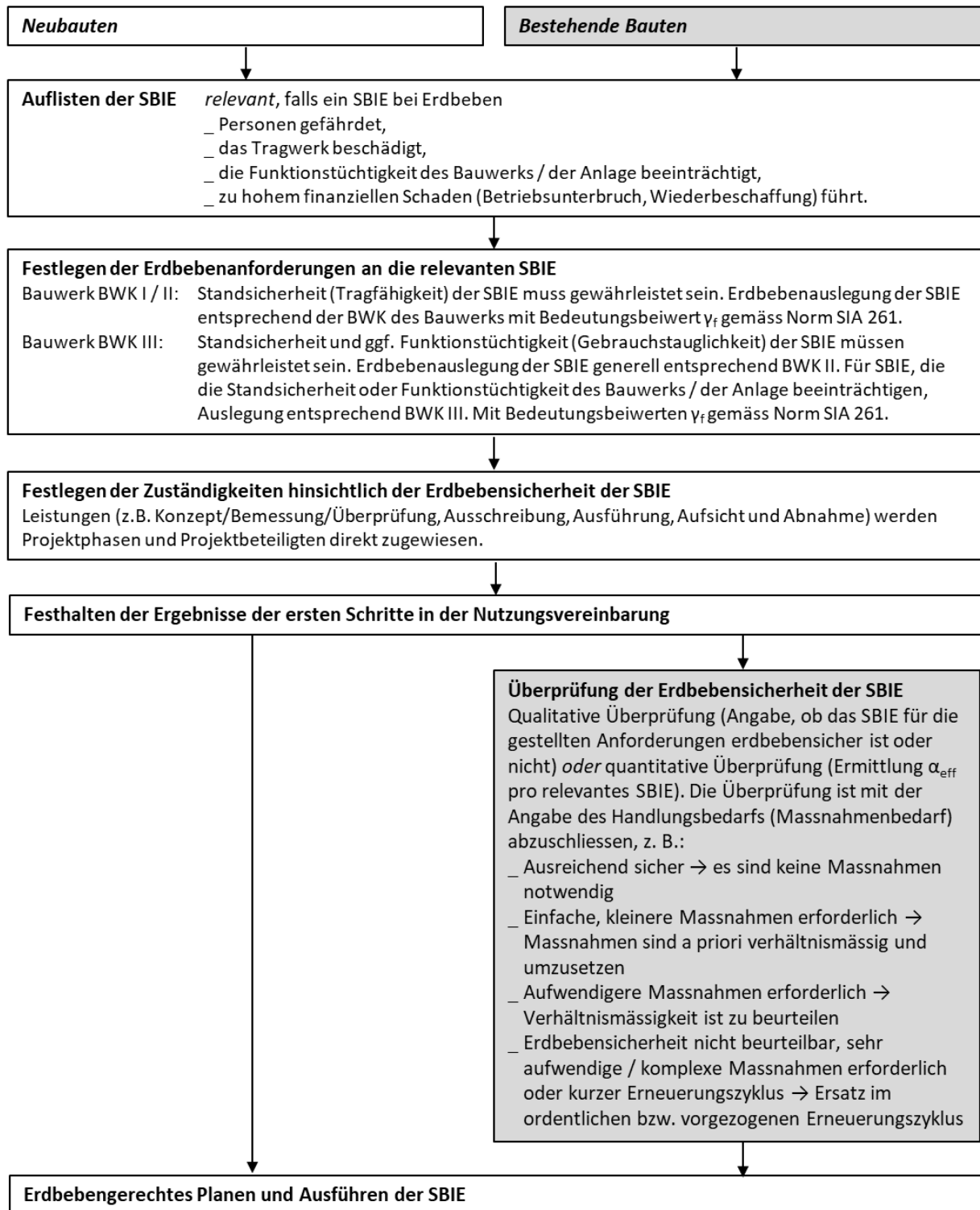


Abb. 3 Erdbebengerechter Umgang mit den SBIE

4 Hinweise zur Ermittlung der Verhältnismässigkeit bei bestehenden Bauten

Verschiedene Parameter der Norm SIA 269/8 [10] spielen eine wichtige Rolle bei der Ermittlung der Verhältnismässigkeit. Bei einigen dieser Parameter ist der durch die Norm bewusst eingeräumte Spielraum zu klären. Bei anderen Parametern ist die Interpretation zu präzisieren. Nachfolgend werden diese Parameter behandelt und die für Eisenbahnanlagen zu verwendenden Werte festgelegt.

4.1 Restnutzungsdauer d_r

Gemäss der Norm SIA 269/8 [10] ist in der Regel von einer Restnutzungsdauer d_r von mindestens 30 Jahren auszugehen. Für Eisenbahnanlagen werden folgende Richtwerte festgelegt:

Elemente der Bahninfrastruktur	Richtwert Restnutzungsdauer
Hochbauten	50 Jahre
Kunstabauten	80 Jahre
Weitere Bauten ¹⁾	50 oder 80 Jahre

Tab. 4 Richtwerte für die Restnutzungsdauer d_r

¹⁾ Je nachdem, ob sie in ihrer Charakteristik eher einer Hochbaute oder einer Kunstbaute entsprechen.

Für Bauwerke, die aufgrund des regelmässig stattfindenden Unterhaltes praktisch unbefristet in Betrieb stehen, ist die Annahme noch höherer Restnutzungsdauern durchaus gerechtfertigt. Kürzere als die vorstehend angegebenen Restnutzungsdauern sind zu begründen. Eine belastbare Begründung ist insbesondere dann anzugeben, wenn eine Restnutzungsdauer von 30 Jahren unterschritten wird.

4.2 Personenbelegung PB

Die Grundlagen zur Ermittlung der Personenbelegung PB bei Hochbauten sind der Ziff. 10.3 der Norm SIA 269/8 [10] zu entnehmen. Angaben zur Ermittlung bzw. Abschätzung der Personenbelegung bei ausgewählten Elementen der Bahninfrastruktur sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Für Elemente der Strecke (z.B. Brücke, Stützmauer, Galerie etc.) enthält Tabelle 6 zusätzlich Richtwerte für die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person vom Versagen eines Elementes betroffen ist.

Nutzung / Kategorie	Ermittlung bzw. Abschätzung der Personenbelegung
Mischnutzung	– Ermittlung der Personenbelegung jeweils für die verschiedenen Nutzungen, wie z. B. Büros, Technikräume, Aufenthalt- und Schlafräume, Kantine usw. – Aufsummierung der ermittelten Personenbelegungen
Elemente der Strecke ¹⁾	– Ermittlung der Anzahl Personenzüge, die täglich auf der Strecke bzw. auf den durch das Bauwerksversagen betroffenen Streckengleisen fahren (N_z)²⁾ – Ermittlung der mittleren Belegung der Personenzüge (B) – Ermittlung der Anzahl gefährdeter Personen ($N_P = N_z \times B$) – Ermittlung der Wahrscheinlichkeit P, dass eine Person vom Versagen des Elements betroffen wird (Richtwerte für die Wahrscheinlichkeit P sind in Tab. 6 aufgeführt) – Ermittlung der Personenbelegung ($PB = P \times N_P$)
Perronbereiche	– Ermittlung der Anzahl der täglichen Ein-, Aus- und Umsteiger²⁾ – Annahme einer mittleren Aufenthaltsdauer von 10 Min. für Einsteigende resp. 3 Min. für Aussteigende (die Werte sind auf die tatsächliche Perron- und Bahnhofssituation anzupassen, je nach Perronausgestaltung ist eine Gefährdung im Zug auch denkbar; ein Endbahnhof unterscheidet sich von einem Durchgangsbahnhof) – Ermittlung der Personenbelegung durch Multiplikation der Zahl von Ein-, Aus- und Umsteigern mit den obigen mittleren Aufenthaltsdauern und Division durch 1440 (24 h x 60 min/h)
Personenunter- und -überführung	– Ermittlung der Gesamtanzahl der Personen, die die Unter-/Überführung täglich benutzen²⁾ – Ermittlung der mittleren Passierzeit einer einzelnen Person unter Berücksichtigung der Länge der Unterführung, der möglichen Staubildung und der möglichen Aufenthaltsdauer – Ermittlung der Personenbelegung durch Multiplikation der Gesamtanzahl der Personen mit der mittleren Passierzeit und Division durch 1440 (24 h x 60 min/h)

Tab. 5 Angaben zur Ermittlung bzw. Abschätzung der Personenbelegung PB

¹⁾ z. B. Brücken, Stützmauern und Galerien ²⁾ bekannter Prognosehorizont berücksichtigen

Zuggeschwindigkeit	Bauwerkslänge ¹⁾				
	20 m	50 m	100 m	200 m	500 m
20 km/h	1E-4	2 E-4	3 E-4	5E-4	10E-4
50 km/h	2E-4	2E-4	3E-4	3E-4	6E-4
100 km/h	3E-4	3E-4	3E-4	4E-4	5E-4
150 km/h	4E-4	5E-4	5E-4	5E-4	6E-4
200 km/h	6E-4	6E-4	6E-4	6E-4	7E-4

Tab. 6 Richtwerte für die Wahrscheinlichkeit (P), dass eine Person durch Versagen eines Elementes der Strecke gefährdet ist

¹⁾ Bauwerkslänge: entspricht z. B. der Brückenlänge, der Stützmauerlänge, der Galerielänge.

In Tabelle 6 sind in Abhängigkeit von der Zuggeschwindigkeit und der Bauwerkslänge Richtwerte für die Wahrscheinlichkeit (P) zusammengestellt, dass eine Person durch das Versagen eines Elementes der Strecke gefährdet ist. Dabei hat die Zuggeschwindigkeit zwei gegenläufige Effekte: Eine geringere Zuggeschwindigkeit erhöht die Aufenthaltswahrscheinlichkeit im gefährdeten Bereich (z. B. Brücke, die einstürzt). Mit höherer Zuggeschwindigkeit erhöht sich wegen des dadurch längeren Bremsweges die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug, der sich vor dem gefährdeten Bereich befindet, nicht mehr rechtzeitig zum Stillstand kommt. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit im gefährdeten Bereich erhöht sich auch mit der Länge des vom Versagen betroffenen Elementes einer Strecke.

4.3 Wert des Bauwerks BW

Der Wert des Bauwerks (BW) umfasst den Wert des Tragwerks sowie (insbesondere bei Hochbauten) die Werte der architektonischen Elemente (z. B. Deckenbekleidungen, Wände, Ausfachungen, Fassadensysteme, Brüstungen und Geländer, Treppen, Türen, Fenster, Dacheindeckung) und der gebäudetechnischen Elemente (z. B. Beleuchtung, Aufzüge, Rohrleitungen, Elemente der Klimatechnik) nach der BAFU-Empfehlung zur Erdbebensicherheit von SBIE [12]. Diese Elemente haben die Eigenschaft, dass sie durch die Beschädigung des Tragwerks direkt beeinträchtigt oder durch eine erhebliche Beschädigung des Tragwerks wertlos werden.

Beim Wert des Bauwerks (BW) ist der Ersatzwert anzusetzen. Als Ersatzwert wird jener Wert definiert, der bezahlt werden müsste, um das gleiche Bauwerk mit den gleichen Merkmalen (z. B. bezüglich der Baustoffe) neu erstellen zu können. Gegebenenfalls kann sich eine Schätzung des Ersatzwertes an den Kosten orientieren, die durch den Ersatz eines zerstörten Bauwerkes durch ein gleichwertiges Bauwerk entstehen würden, das z. B. die gleiche Funktion erfüllt, in seiner Ausgestaltung jedoch vom bestehenden Bauwerk abweicht.

4.4 Bauwerkkrisikofaktor BRF

Zur Bestimmung des Bauwerkkrisikofaktors BRF für Hochbauten mit einem gewöhnlichen Anteil an architektonischen und gebäudetechnischen Elementen ist die obere Kurve (durchgezogene Linie) der Figur 16 der Norm SIA 269/8 [10] zu verwenden. Für alle anderen Bauwerke ist in der Regel die untere Kurve (gestrichelte Linie) zu verwenden. Tabelle 7 gibt Hinweise zur Wahl des Bauwerkkrisikofaktors.

Bauwerkkrisikofaktor	Charakterisierung	Beispiele
Obere Kurve (durchgezogene Linie)	Hoher Anteil an architektonischen und gebäudetechnischen Elementen wie Trennwänden, Treppen, herabhängenden Decken, Doppelböden, Leitungen etc.	Stellwerk, Bahnhöfe, Verwaltungsgebäude, etc.
Untere Kurve (gestrichelte Linie)	Praktisch nur die Tragstruktur	Brücken, Stützmauern, einfache Tunnel etc.

Tab. 7 Hinweise zur Wahl des Bauwerkkrisikofaktors BRF bezogen auf Figur 16 der Norm SIA 269/8 [10]

4.5 Sachenwert SW

Mit der Norm SIA 269/8 [10] wird für das Schutzgut Sachen jenes Schadenrisiko abgedeckt, das auf ungünstiges Tragwerksverhalten zurückzuführen ist. Dabei geht es in erster Linie um den Einsturz des Tragwerks, grosse Verformungen oder grosse Beschleunigungen, wodurch Sachen beschädigt werden können. Sachen werden somit beispielsweise beschädigt, weil Teile des Tragwerks oder SBIE auf sie stürzen, durch das Umkippen infolge grosser Verformungen oder Verschiebungen, aber auch durch erhebliche Staubentwicklung, wenn die Sachen darauf empfindlich sind. Tabelle 8 gibt Hinweise auf die i. d. R. für die Ermittlung des Sachenwerts (SW) zu berücksichtigenden wertvollen Sachen.

Elemente der Bahninfrastruktur	Zu berücksichtigende wertvolle Sachen
Hochbauten	Büroeinrichtung, Stellwerktechnik, Informatikinfrastruktur, Rollmaterial, Maschinen, Werkzeuge, bahntechnische Anlagen und sonstige Betriebseinrichtungen
Kunstabauten	Bahntechnische Anlagen, Rollmaterial usw.
Weitere Bauten ¹⁾	Siehe Hochbauten und Kunstabauten

Tab. 8 Potenziell wertvolle Sachen bei Elementen der Bahninfrastruktur

¹⁾ Je nachdem, ob sie in ihrer Charakteristik eher den Hochbauten oder den Kunstabauten entsprechen

Der Sachenwert ist als Ersatzwert anzusetzen und zu berücksichtigen, wenn der Wert in derselben Größenordnung wie der Wert des Bauwerks liegt, Ausnahme dazu siehe Kapitel 4.9.

4.6 Sachenrisikofaktor SRF

Tabelle 9 gibt Anhaltspunkte für die Wahl des Sachenrisikofaktors SRF. Es wird empfohlen, auf die Wahl von dazwischenliegenden Werten zu verzichten.

Sachenrisikofaktor	Hinweise
0,05	_ Die Sachen werden erst beim vollständigen Einsturz des Tragwerks oder sekundärer Bauteile beschädigt. _ Die Sachen befinden sich vorwiegend in Bereichen, die vermutlich nicht von einem Einsturz betroffen sind (z. B. Sachen im UG).
0,2	_ Die Sachen werden bereits beschädigt, wenn sich beim Tragwerk erhebliche Verformungen einstellen. _ Die Sachen befinden sich überwiegend in Bereichen, die von einem Einsturz des Tragwerks oder sekundärer Bauteile betroffen sein können. _ Die Sachen werden beschädigt bei lokal begrenztem Versagen (z. B. Auflagerversagen oder Entgleisung eines Zugs). _ Die Sachen werden beschädigt durch Staubentwicklung.

Tab. 9 Hinweise zur Wahl des Sachenrisikofaktors SRF

4.7 Unterbrechungskosten UK

Unterbrechungskosten (UK) sind zu berücksichtigen, wenn diese mehr als 20 % des Werts des Bauwerks betragen.

Wenn der Ausfall eines Bauwerks infolge Beschädigung den Unterbruch des Bahnbetriebs zur Folge hat, dann sind als Unterbrechungskosten (UK) jene Kosten anzusetzen, die zur Aufrechterhaltung des Betriebs nötig sind (Ersatzverkehr, Notbrücke etc.). Wenn mit dem Ausfall eines Bauwerks Ertragseinbussen einhergehen, dann ist der sogenannte bedrohte Ertrag bei den Unterbrechungskosten zu berücksichtigen. Der bedrohte Ertrag entspricht dem Umsatz abzüglich der variablen Kosten, die aufgrund des Ausfalls kurz- bis mittelfristig wegfallen. Da die variablen Kosten in der Regel eher von untergeordneter Bedeutung sind, kann als grobe Näherung für die Höhe der Unterbrechungskosten der Umsatz, der infolge des Betriebsunterbruchs wegfällt, herangezogen werden.

Bei der Bestimmung der Höhe der Unterbrechungskosten kann wie folgt vorgegangen werden:

- Abschätzung der Zeit (z. B. in Anzahl Monaten), bis die Funktion wieder weitgehend (> 90 %) hergestellt ist,
- Bestimmung der Unterbrechungskosten bei einem Totalschaden (Einsturz resp. Beschädigung, die zum Abbruch führt) des betrachteten Bauwerks pro Zeiteinheit (z. B. Franken/Monat),
- Bestimmung der Unterbrechungskosten als Produkt aus der Unterbrechungszeit und den Kosten pro Zeiteinheit.

4.8 Unterbrechungsrisikofaktor URF

Der in Ziffer E 4.6 der Norm SIA 269/8 [10] angegebene Unterbrechungsrisikofaktor (URF) beträgt 0,5. Dieser Faktor ist unverändert zu verwenden, wenn die Unterbrechungskosten wie vorstehend beschrieben errechnet werden. Eine Anpassung des Unterbrechungsrisikofaktors in Abhängigkeit von der Zeitdauer des Ausfalls (wie in Ziff. E 4.6 der Norm SIA 269/8 erwähnt) ist nur dann erforderlich, wenn die Unterbrechungskosten normiert auf ein Jahr errechnet werden.

4.9 Wert des Bauwerks und der direkt betroffenen Sachen BSW

Bei Bauwerken mit lebenswichtiger oder bedeutender Infrastrukturfunktion (BWK III oder BWK II-i) ist gemäss den Ziffern 10.2.5 und 10.4 der Norm SIA 269/8 [10] neben der Reduktion des Personenrisikos auch die Zahlungsbereitschaft für den Schutz der Infrastrukturfunktion zu berücksichtigen. Der dabei zu verwendende Wert des Bauwerks und der direkt betroffenen Sachen BSW setzt sich immer aus den beiden Werten BW und SW zusammen. Das heisst, der Wert der direkt betroffenen Sachen SW ist in diesem Fall auch dann zu berücksichtigen, wenn er nicht in derselben Grössenordnung wie der Wert des Bauwerks liegt.

4.10 Sicherheitsbezogene Investitionskosten SIC_M

Die sicherheitsbezogenen Investitionskosten (SIC_M) umfassen mindestens die Baumeisterkosten der Massnahmen sowie die Planungskosten. Je nachdem, ob die Erdbebensicherheitsmassnahmen im Rahmen eines bis auf die Tragstruktur gehenden Erhaltungsprojektes ausgeführt oder losgelöst von einem anderen Projekt umgesetzt werden, können zusätzliche Kosten für den Rückbau, die Wiederherstellung und deren Planung (z. B. von Oberflächen oder bahntechnischen Elementen) entstehen. Wenn diese zusätzlichen Kosten nicht gesondert ermittelt werden, kann für die gesamten sicherheitsbezogenen Investitionskosten ein Betrag abgeschätzt werden, der den 1- bis 3-fachen Kosten für die Baumeisterarbeiten entspricht.

Anhang A

Anwendungsbeispiel Viadukt

A.1 Zusammenfassung

Das Viadukt wird in die Bauwerksklasse BWK II mit einem Mindesterfüllungsfaktor $\alpha_{\min}$ von 0,25 eingeteilt. Nach erfolgter Überprüfung der Erdbebensicherheit weist das Viadukt einen Erfüllungsfaktor von $\alpha_{\text{eff}} = 0,15$ auf. Der Mindesterfüllungsfaktor wird also nicht eingehalten.

Gemäss der Norm SIA 269/8 sind somit zumindest Massnahmen zum Erreichen von $\alpha_{\min}$ erforderlich. Dazu wird das Massnahmenpaket $\text{MP}_{\min}$, das die Erhöhung des Baugrundwiderstands enthält, erarbeitet. Die Kosten von $\text{MP}_{\min}$ werden auf CHF 250 000.– geschätzt.

Weitere Massnahmenpakete, die zu Erfüllungsfaktoren von 1,0 ($\text{MP}_{1,0}$), und 0,7 ($\text{MP}_{0,7}$) führen, werden auf ihre Verhältnismässigkeit hin überprüft. Rechnerisch ist das $\text{MP}_{0,7}$ verhältnismässig und das $\text{MP}_{1,0}$ äusserst knapp nicht. Das $\text{MP}_{1,0}$, welches die Verstärkung der Pfeilerköpfe, der Foundation sowie der Wider- und Auflager beinhaltet, wird infolge des hohen Sicherheitsgewinns und der Massnahmeneffizienz EF_M sehr nahe bei 1,0 jedoch trotzdem umgesetzt. Die Kosten für das $\text{MP}_{1,0}$ werden auf CHF 260 000.– geschätzt.

Das anzustrebende Ziel von $\alpha_{\text{int}} \geq 1,0$ (Ziff. 9.4.1 der Norm SIA 269/8) wird somit erreicht. Dies bedeutet, dass nach der Umsetzung der Massnahmenpakete $\text{MP}_{\min}$ und $\text{MP}_{1,0}$ kein Sicherheitsdefizit mehr besteht.

A.2 Bauwerk, Nutzung, Personenbelegung und Werte

Aspekt	Beschreibung	Erläuterung
Tragwerk	Langes Viadukt mit kurzer Brücke in Mischbauweise. Die kurze Brücke bei der Flussquerung liegt auf den Viadukt Pfeilern auf.	
Abmessungen L x B	330 m x 12,5 m / 70 m x 12,5 m	
Tragwerkskonzept	Mehrfeldträger / einfacher Balken	Viadukt aus Bruchstein und Schichtmauerwerk. Brücke mit Fahrbahnplatte aus Beton und Stahlfachwerk.
Aussteifung	Längsrichtung: Feste bzw. bewegliche Widerlager. Querrichtung: Kragarm durch im Boden fundierte Pfeiler.	
Nutzung	Zugverkehr Personen und Güter	
Verkehr	86 Züge pro Tag	- 2 Personenzüge je Fahrtrichtung und Stunde (76 = 4 x 19 h) mit einer mittleren Belegung von 100 Personen. - 5 Güterzüge pro Tag und Fahrtrichtung im Wochenmittel Geschwindigkeit im entsprechenden Abschnitt: 150 km/h.
Personenbelegung (Mittelwert der potenziell gefährdeten Personen über die Nutzungsdauer)	PB = 4	Täglich passieren ca. 7600 Personen (76 Züge mit 100 Personen pro Zug im Mittel) die Brücke. Wahrscheinlichkeit, dass eine Person vom Versagen des Viaduktes betroffen ist: $P = 5E-4$ (Tab. 6). $PB = 7600 \times 5E-4 = 3,8$ Personen.
Bauwerkwert	BW = 40 Mio. CHF	Ersatzwert von 8000 ¹⁾ CHF/m ² (8000 x 400 m x 12,5 m). Geringer Anteil an SBIE.
Sachenwerte	SW = 1,3 Mio. CHF	Täglich passieren 86 Zugkompositionen mit einem Wert von 30 Mio. CHF die Brücke. Wahrscheinlichkeit ermittelt analog zur Personenbelegung. Sachenwerte = $5E-4 \times 86 \times 30$ Mio. = 1,3 Mio. CHF.
Unterbrechungskosten	UK = 6 Mio. CHF	Die Unterbrechungskosten werden mit 100 000 CHF/d für 2 Monate abgeschätzt. Gemäss Ziffer E.4.1 Norm SIA 269/8 müssen die UK jedoch nicht berücksichtigt werden, da sie kleiner als 20% des Bauwerkwertes sind.
Restnutzungsdauer	$d_r = 100$ Jahre	Gemäss Kapitel 4.1 dieser Richtlinie ist die minimal anzusetzende Restnutzungsdauer 80 Jahre. Die ISB hat die Restnutzungsdauer mit 100 Jahren vorgegeben.

Tab. A.1 Relevante Informationen zum Tragwerk und seiner Nutzung

¹⁾ Diese Ersatzkosten werden von der Betreiberin spezifiziert und können stark variieren. Es gibt auch ISB, die für den Ersatzwert z. B. 11 000 CHF/m² annehmen

A.3 Bauwerksklasse

Die Bauwerksklasse des Viadukts wird nach dem Vorgehen in Kapitel 3.3 dieser Richtlinie bestimmt. Die Mindestanforderung an die Bauwerksklasse BWK_{min} für Brücken ist laut Tabelle 1 BWK II. Die Strecke, auf der sich die Brücke befindet, hat eine normale Bedeutung und wird somit in die Erdbebenstreckenklasse ESK I eingeteilt. Das Bauwerk wird daher in die Bauwerksklasse BWK II eingeteilt (siehe Abb. A.1).

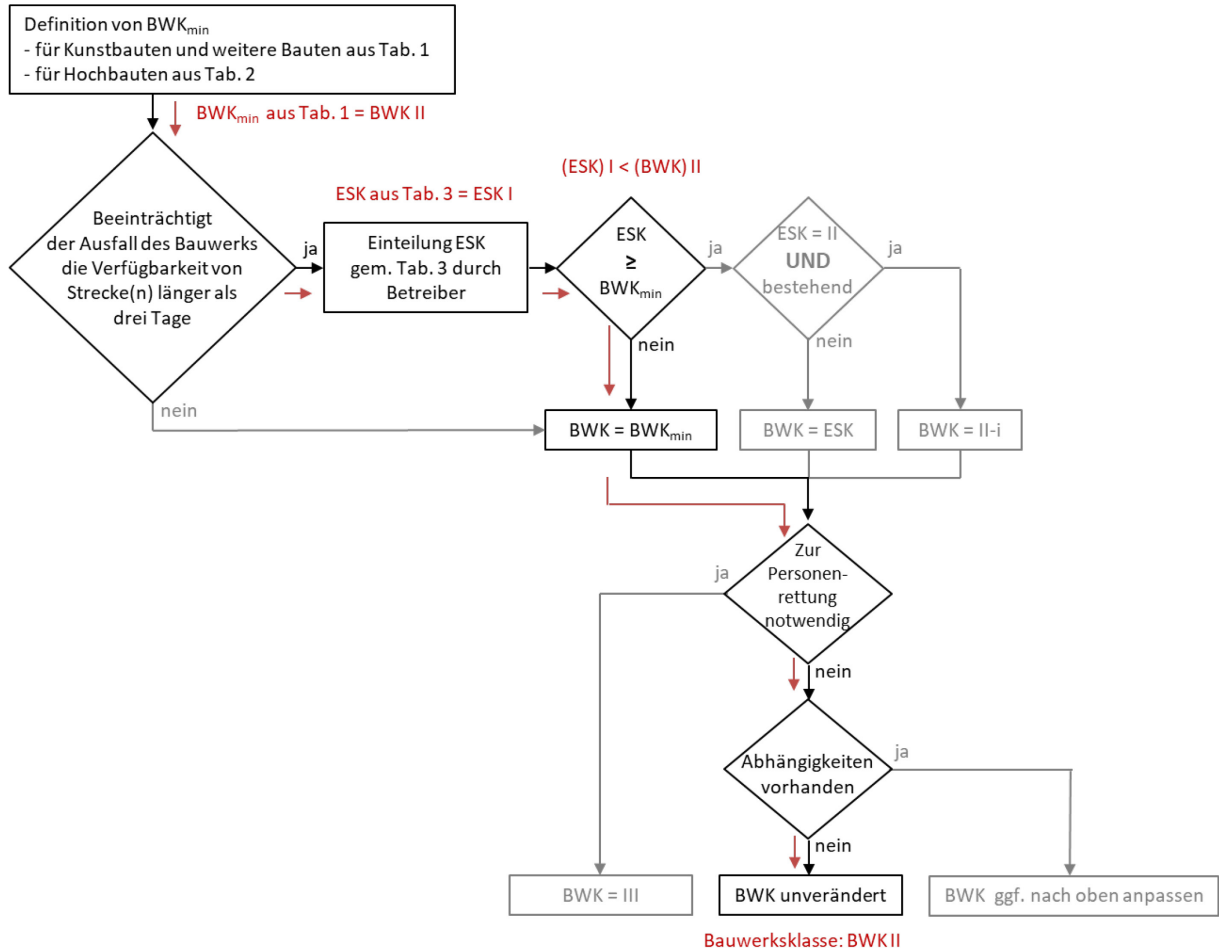


Abb. A.1 Flussdiagramm zur Bestimmung der Bauwerksklasse

A.4 Beurteilung der Erdbebensicherheit

Die Beurteilung der Erdbebensicherheit ergibt für das Viadukt einen Erfüllungsfaktor von $\alpha_{\text{eff}} = 0,15$. Dieser Faktor beruht auf den folgenden identifizierten Schwachstellen.

Schwachstelle	Erfüllungsfaktor α_{eff}	Beurteilung der Erdbebensicherheit
1) Fundation Viadukt, Krafteinleitung Baugrund bei den flussnahen Pfeilern C und D	0,15	Massnahmen erforderlich, da α_{eff} kleiner als $\alpha_{\text{min}} = 0,25$
2) Tragwerk Viadukt, Widerstand Querrichtung Pfeilerkopf A und B	0,25	Massnahmen erforderlich, soweit verhältnismässig
3) Fundation Viadukt, Krafteinleitung Baugrund bei Pfeiler A, B und E	0,7	Massnahmen erforderlich, soweit verhältnismässig
4) Brückenlager bei Pfeiler C und D, Querrichtung	0,4	Massnahmen erforderlich, soweit verhältnismässig
Massgebender Erfüllungsfaktor	0,15	

Tab. A.2 Zusammenfassung der Erfüllungsfaktoren α_{eff}

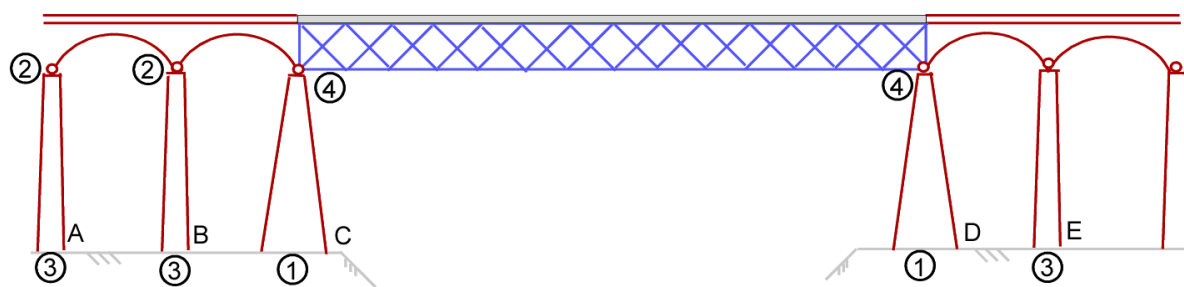


Abb. A.2 Visualisierung von Schwachstellen

Das Viadukt weist insgesamt knapp 30 Bögen auf. In diesem Beispiel wird angenommen, dass die in Abbildung A.2 dargestellten Schwachstellen nur im gezeigten Abschnitt (Pfeiler A - E) im Bereich des Flusses gelten und die anderen Bögen die Schwachstellen 2 bis 4 nicht aufweisen.

A.5 Massnahmenempfehlung

A.5.1 Massnahmen zur Behebung der Schwachstellen

Massnahme	Beschreibung	Gesamtkosten	Erfüllungsfaktor lokal
a)	Erhöhung Baugrundwiderstand bei den flussnahen Pfeilern C und D (Schwachstelle 1)	CHF 250 000.–	lokal $\alpha_{\text{eff}} = 0,15 \rightarrow \alpha_{\text{int}} = 1,0$
b)	Verstärkung Pfeilerkopf, Pfeiler A und B (Schwachstelle 2)	CHF 120 000.–	lokal $\alpha_{\text{eff}} = 0,25 \rightarrow \alpha_{\text{int}} = 1,0$
c)	Verstärkung Fundation Pfeiler A, B und E (Schwachstelle 3)	CHF 60 000.–	lokal $\alpha_{\text{eff}} = 0,7 \rightarrow \alpha_{\text{int}} = 1,0$
d)	Verstärkung der Brückenaufleger bei Pfeiler C und D (Schwachstelle 4)	CHF 80 000.–	lokal $\alpha_{\text{eff}} = 0,4 \rightarrow \alpha_{\text{int}} = 1,0$

Tab. A.3 Massnahmen zur Behebung der Schwachstellen

Um die Erdbebensicherheit des Bauwerks zu verbessern, werden die Einzelmassnahmen zu Massnahmenpaketen gebündelt. In der Tabelle A.4 sind die Massnahmenpakete sowie deren Kosten zusammengefasst.

1. MP_{min} (zum Erreichen von α_{min})
2. $MP_{1,0}$ (zum Erreichen der normgemässen Sicherheit von Neubauten, d.h. $\alpha_{int} = 1,0$)
3. $MP_{0,7}$ (für Teilmassnahme $\alpha_{int} = 0,7$)

Die Abbildung A.3 illustriert die Veränderung der Erdbebensicherheit pro Massnahmenpaket.

Erläuterungen:

Massnahmenpakete sind so zu bilden, dass zunächst die für das Erreichen von α_{min} erforderlichen Massnahmen in einem Massnahmenpaket MP_{min} zusammengefasst sind. Danach werden die zur Erreichung eines Erfüllungsfaktors von $\alpha_{int} = 1,0$ erforderlichen zusätzlichen Massnahmen in einem Massnahmenpaket $MP_{1,0}$ gebündelt. Das $MP_{1,0}$ ist auf seine Verhältnismässigkeit hin zu prüfen. Ist diese nicht gegeben, müssen solange Massnahmenpakete für stufenweise absteigende Erfüllungsfaktoren (z. B. $MP_{0,5}$, $MP_{0,4}$ usw.) evaluiert werden, bis die Verhältnismässigkeit erreicht ist. Das Vorgehen ist in der Abbildung 1 der Richtlinie illustriert.

Paket	Massnahmen	Paketkosten ¹⁾	Erfüllungsfaktor global
MP_{min} ²⁾	a)	CHF 250 000.–	$\alpha_{eff} = 0,15 \rightarrow \alpha_{int,MPmin} = 0,25$
$MP_{1,0}$	b) + c) + d)	CHF 260 000.–	$\alpha_{int,MPmin} = 0,25 \rightarrow \alpha_{int,MP1,0} = 1,0$
$MP_{0,7}$	b) + d)	CHF 200 000.–	$\alpha_{int,MPmin} = 0,25 \rightarrow \alpha_{int,MP0,5} = 0,7$

Tab. A.4 Mögliche Massnahmenpakete zur globalen Erhöhung des Erfüllungsfaktors

¹⁾ Die Kosten entsprechen den sicherheitsbezogenen Investitionskosten SIC_M nach Ziffer 10.7.4 der Norm SIA 269/8.

²⁾ MP_{min} ist erforderlich und unabhängig von den Kosten auszuführen. Es wird an dieser Stelle angenommen, dass keine günstigere Massnahme existiert, um den Mindesterfüllungsfaktor zu erreichen.

Da die Massnahme a) zur Behebung der Schwachstelle 1 den Mindesterfüllungsfaktor sicherstellt, wird dieses Massnahmenpaket als MP_{min} bezeichnet. Die Massnahme a) führt zu einer lokalen Erhöhung des Erfüllungsfaktors auf 1,0, wobei der globale Erfüllungsfaktor aufgrund von Schwachstelle 2) bei 0,25 bleibt.

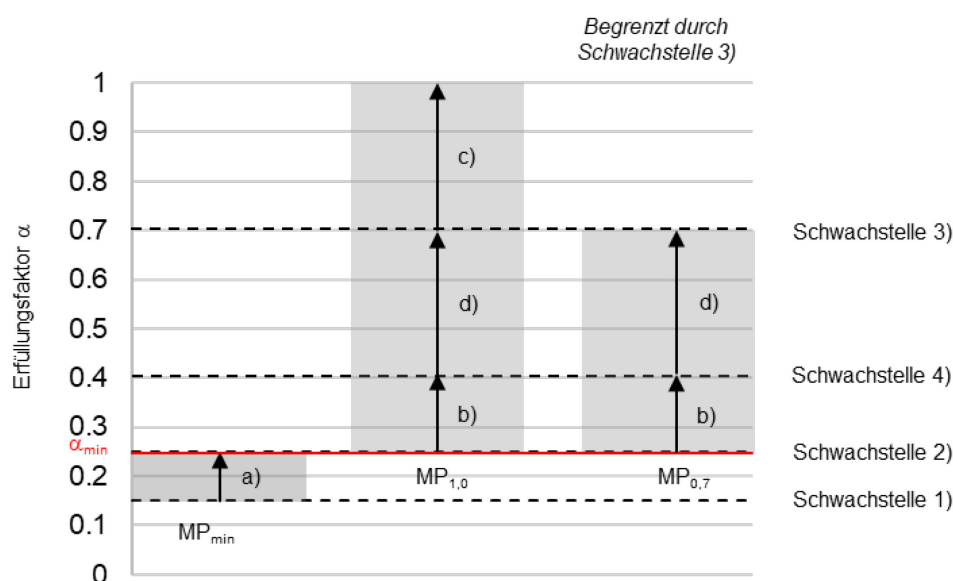


Abb. A.3 Visualisierung von Schwachstellen, Massnahmen und Massnahmenpaketen

A.5.2 Beurteilung der Verhältnismässigkeit

Die Grundlagen zur Beurteilung der Verhältnismässigkeit der Massnahmenpakete sind in der Tabelle A.5 aufgeführt. Die Tabelle enthält ausserdem Verweise auf die zugehörigen Kapitel der Norm SIA 269/8 oder Verweise auf Abschnitte dieses Beispiels oder auf den Inhalt dieser Richtlinie.

Bezeichnung	Formel und Wert	Referenz
Restnutzungsdauer	$d_r = 100 \text{ Jahre}$	Tab. A.1
Diskontierungsfaktor	$DF = \frac{i_d \cdot (1 + i_d)^{d_r}}{(1 + i_d)^{d_r} - 1} = \frac{0,02 \cdot (1 + 0,02)^{100}}{(1 + 0,02)^{100} - 1} \cong 2,3\%$ mit $i_d = 2\%$	Ziff. 10.7.2, SIA 269/8
Personenbelegung	$PB = 4$	Tab. A.1
Grenzkosten	$GK = 10 \cdot 10^6 \text{ CHF}$	Ziff. 10.3.9, SIA 269/8
Bauwerkwert	$BW = 40 \cdot 10^6 \text{ CHF}$	Tab. A.1
Sachenwert ¹⁾	$SW = 1,3 \cdot 10^6 \text{ CHF}$	Tab. A.1
Sachenrisikofaktor	$SRF = 0,2$	Ziff. E 3.4, SIA 269/8
Unterbrechungskosten ²⁾	$UK = 6 \cdot 10^6 \text{ CHF}$	Tab. A.1
Unterbrechungsrisikofaktor	$URF = 0,5 \cdot 1 J = 0,5$	Ziff. E 4.6, SIA 269/8

Tab. A.5 Parameter zur Berechnung der Verhältnismässigkeit

¹⁾ gemäss Ziffer E.3.1 der Norm SIA 269/8 vernachlässigt, da nicht in derselben Grössenordnung wie der Wert des Bauwerks

²⁾ gemäss Ziffer E.4.1 der Norm SIA 269/8 vernachlässigt, da sie weniger als 20% des Bauwerkwerts betragen

Die Berechnung der Verhältnismässigkeit bzw. der Massnahmeneffizienz ist für die möglichen Massnahmenpakete nachstehend zusammengefasst.

Bezeichnung	Formel	MP _{1,0}	MP _{0,7}	Referenz
Erfüllungsfaktor vor Intervention	α_{eff}	0,25	0,25	Tab. A.4
Erfüllungsfaktor nach Intervention	α_{int}	1,0	0,7	Tab. A.4
Differenz Personenrisikofaktor	$\Delta PRF_M(\Delta\alpha)$	$9 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	Fig. 7, SIA 269/8
Reduktion Personenrisiken [CHF/J]	$\Delta RP_M = \Delta PRF_M \cdot PB \cdot GK$	340	307	Ziff. 10.3.1, SIA 269/8
Differenz Bauwerksrisikofaktor	$\Delta BRF_M(\Delta\alpha)$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	Fig. 16, SIA 269/8
Reduktion Risiko Bauwerk [CHF/J]	$\Delta RB_M = \Delta BRF_M \cdot BW$	5 475	4 991	Ziff. E.2.2, SIA 269/8
Reduktion Risiko Sachen ¹⁾ [CHF/J]	$\Delta RS_M = SRF \cdot \Delta BRF_M \cdot SW$	0	0	Ziff. E.3.2, SIA 269/8
Reduktion Risiko Betriebsunterbrechung ¹⁾ [CHF/J]	$\Delta RU_M = URF \cdot \Delta BRF_M \cdot UK$	0	0	Ziff. E.4.5, SIA 269/8
Risikoreduktion [CHF]	$\Delta R_M = \Delta RP_M + \Delta RB_M + \Delta RS_M + \Delta RU_M$	5 815	5 297	Ziff. E.1.2, SIA 269/8
Sicherheitsbezogene Investitionskosten [CHF]	SIC_M	260 000	200 000	Tab. A.4
Sicherheitskosten [CHF/J]	$SC_M = DF \cdot SIC_M$	6 033	4 641	Ziff. 10.7.1, SIA 269/8
Massnahmeneffizienz	$EF_M = \frac{\Delta R_M}{SC_M}$	0,96	1,14	Ziff. 10.2.2, SIA 269/8
Max. verhältnismässige sicherheitsbezogene Investitionskosten [CHF]	$SIC_{EF=1} = \frac{\Delta R_M}{DF}$	$\cong 251\,000$ $< 260\,000$ für MP _{1,0}	$\cong 228\,000$ $> 200\,000$ für MP _{0,5}	

Tab. A.6 Berechnung der Massnahmeneffizienz der Massnahmenpakete MP

¹⁾ Die Darstellung von ΔRS_M und ΔRU_M dient nur der Information

Massnahmenpaket	Beurteilung	Erläuterung
MP _{min}	erforderlich	Die Massnahme muss in jedem Fall ausgeführt werden.
MP _{1,0}	verhältnismässig	Das Massnahmenpaket ist rechnerisch knapp nicht verhältnismässig. Infolge des hohen Sicherheitsgewinns und der Massnahmeneffizienz EF _M nahe bei 1,0 werden die Massnahmen jedoch trotzdem umgesetzt.
MP _{0,7}	verhältnismässig	Das MP _{1,0} erreicht eine höhere Sicherheit und wird umgesetzt.

Tab. A.7 Beurteilung der Verhältnismässigkeit

Beim betrachteten Viadukt ist das Massnahmenpaket MP_{1,0}, das den Zustand von $\alpha_{int} \geq 1,0$ gewährleistet, rechnerisch knapp nicht verhältnismässig. Das Massnahmenpaket MP_{1,0} wird jedoch trotzdem umgesetzt, da der Sicherheitsgewinn hoch ist und die Massnahmeneffizienz EF_M sehr nahe bei 1,0 liegt. Mit diesen Massnahmen wird der anzustrebende Erfüllungsfaktor von $\alpha_{int} \geq 1,0$ (Ziff. 9.4.1 der Norm SIA 269/8) erreicht.

Erläuterungen:

Neben der Identifikation der Schwachstellen und der Definition von Massnahmen zu deren Behebung kommt es darauf an, wieviel Geld zur Verfügung steht, um einen vorgegebenen Erfüllungsfaktor α_{int} zu erreichen. In diesem Beispiel ist es verhältnismässig, gemäss den Angaben in der Tabelle A.6 näherungsweise 0,25 Mio. CHF zu investieren, um den Zustand von $\alpha_{int} = 1,0$ zu erreichen. Dabei ist es unerheblich, wie die Massnahmenpakete schlussendlich zusammengestellt werden. Kann das Ziel von $\alpha_{int} > 1,0$ mit den maximalen verhältnismässigen Investitionskosten nicht erreicht werden, sind die Massnahmenpakete um die Massnahmen mit entsprechend geringerem Nutzen zu reduzieren.

Bei einem grösseren Bauprojekt, beispielsweise einer umfassenden Instandsetzung eines Bauwerks, ist die Verhältnismässigkeit auch an den Zielen und Kosten des entsprechenden Projektes zu messen.

Anhang B

Anwendungsbeispiel Hochbau mit Stellwerk

B.1 Zusammenfassung

Das Stellwerk wird in die Bauwerksklasse BWK II-i mit einem Mindesterfüllungsfaktor $\alpha_{\min}$ von 0,4 eingeteilt. Nach erfolgter Überprüfung der Erdbebensicherheit weist das Stellwerk einen Erfüllungsfaktor von $\alpha_{\text{eff}} = 0,25$ auf. Der Mindesterfüllungsfaktor wird also nicht eingehalten.

Gemäss der Norm SIA 269/8 sind somit zumindest Massnahmen zum Erreichen von $\alpha_{\min}$ erforderlich. Dazu wird das Massnahmenpaket $\text{MP}_{\min}$, das den Ersatz von Innenwänden durch geeignete Leichtbauwände vorsieht, erarbeitet. Die Kosten von $\text{MP}_{\min}$ werden auf CHF 100 000.– geschätzt.

Weitere Massnahmenpakete, die zu Erfüllungsfaktoren von 1,0 ($\text{MP}_{1,0}$), und 0,75 ($\text{MP}_{0,75}$) führen, werden auf ihre Verhältnismässigkeit hin überprüft. Einzig das $\text{MP}_{0,75}$, welches die Verbesserung der Krafteinleitung beim Fundament, die Verstärkung bestehender Aussteifungselemente und die Errichtung neuer Wände beinhaltet, stellt sich dabei als verhältnismässig heraus, weshalb folglich die darin enthaltenen Massnahmen umzusetzen sind. Die Kosten für das $\text{MP}_{0,75}$ werden auf CHF 600 000.– geschätzt.

Das grundsätzlich anzustrebende Ziel von $\alpha_{\text{int}} \geq 1,0$ (Ziff. 9.4.1 der Norm SIA 269/8) wird somit nicht erreicht. Dies bedeutet, dass nach der Umsetzung der Massnahmenpakete $\text{MP}_{\min}$ und $\text{MP}_{0,75}$ weiterhin ein laut der Norm SIA 269/8 akzeptiertes Sicherheitsdefizit besteht.

B.2 Bauwerk, Nutzung, Personenbelegung und Werte

Aspekt	Beschreibung	Erläuterung
Gebäude	2 Untergeschosse, 1 Erdgeschoss und 5 Obergeschosse. Höhe ca. 23,5 m über Terrain (ohne Dachaufbauten).	
Abmessungen L x B x H	34 m x 12,5 m x 23,5 m	
Tragwerkskonzept	Untergeschosse vorwiegend in Stahlbeton. Vertikaler Lastabtrag durch vorfabrizierte Stahlbetonstützen und Stahlbetonwände.	
Aussteifung	Die aussteifenden Elemente ab Erdgeschoss bestehen hauptsächlich aus Mauerwerk und Stahlbeton. Die Kerne sind hauptsächlich in Stahlbeton ausgeführt und asymmetrisch im Grundriss angeordnet. Diverse aussteifende Elemente sind im Aufriss unstetig.	
Nutzung	Stellwerk mit zusätzlichen Büro- und Aufenthaltsräumen (für den Betrieb durch Rangierpersonal und Lokführer) sowie einer Werkstatt und einer Kantine für zusätzliche 50 Personen im Obergeschoss.	
Personenbelegung (Mittelwert der potenziell gefährdeten Personen über die Nutzungsdauer)	PB = 13	siehe Tab. B.2
Bauwerkwert	BW = 6 Mio. CHF	hoher Anteil ¹⁾ an SBIE
Sachenwerte	SW = 20 Mio. CHF	
Unterbrechungskosten ¹⁾	UK = 300 Mio. CHF	gemäss Ziffer E.4.1 der Norm SIA 269/8, zu berücksichtigen, da grösser als 20 % des Bauwerkwertes
Restnutzungsdauer	d _r = 50 Jahre	gemäss Kapitel 4.1 dieser Richtlinie

Tab. B.1 Relevante Informationen zum Tragwerk und seiner Nutzung

¹⁾ Nur unter Verwendung von Anhang E der Norm SIA 269/8 relevant

Belegung	Anzahl	Stunden/Tag	Tage/Woche	Woche/Jahr	Belegung
Techniker	15	8	5	52	$PB_1 = 3,5 \cong \frac{15 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 52}{8736}$
Lokführer / Rangierer	25	8	5	52	$PB_2 = 6 \cong \frac{25 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 52}{8736}$
Kantine	50 ¹⁾	2	5	52	$PB_3 = 3 \cong \frac{50 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 52}{8736}$
					$PB = \sum PB_i = 12,5$

Tab. B.2 Berechnung der Personenbelegung PB

¹⁾ Falls sich Techniker und Lokführer in der Kantine aufhalten, sind sie nicht zu berücksichtigen, weil sie bereits in der jeweiligen Belegung von 8 Stunden eingerechnet sind. 50 Personen kommen zusätzlich extern hinzu.

B.3 Bauwerksklasse

Die Bauwerksklasse des Stellwerks wird nach dem Vorgehen in Kapitel 3.3 dieser Richtlinie bestimmt. Die Mindestanforderung an die Bauwerksklasse BWK_{min} wird anhand der Angaben in der Tabelle 2 ermittelt. Aufgrund seiner Nutzung und Bedeutung wird das Stellwerk in die Bauwerksklasse $BWK\ II-i$ eingeteilt. Es gehört zudem zur Infrastruktur einer Strecke der Erdbebenstreckenklasse $ESK\ II$ und es hat grossen Einfluss auf die Verfügbarkeit dieser Strecke. Das Bauwerk wird daher definitiv in die Bauwerksklasse $BWK\ II-i$ eingeteilt (siehe Abb. B.1).

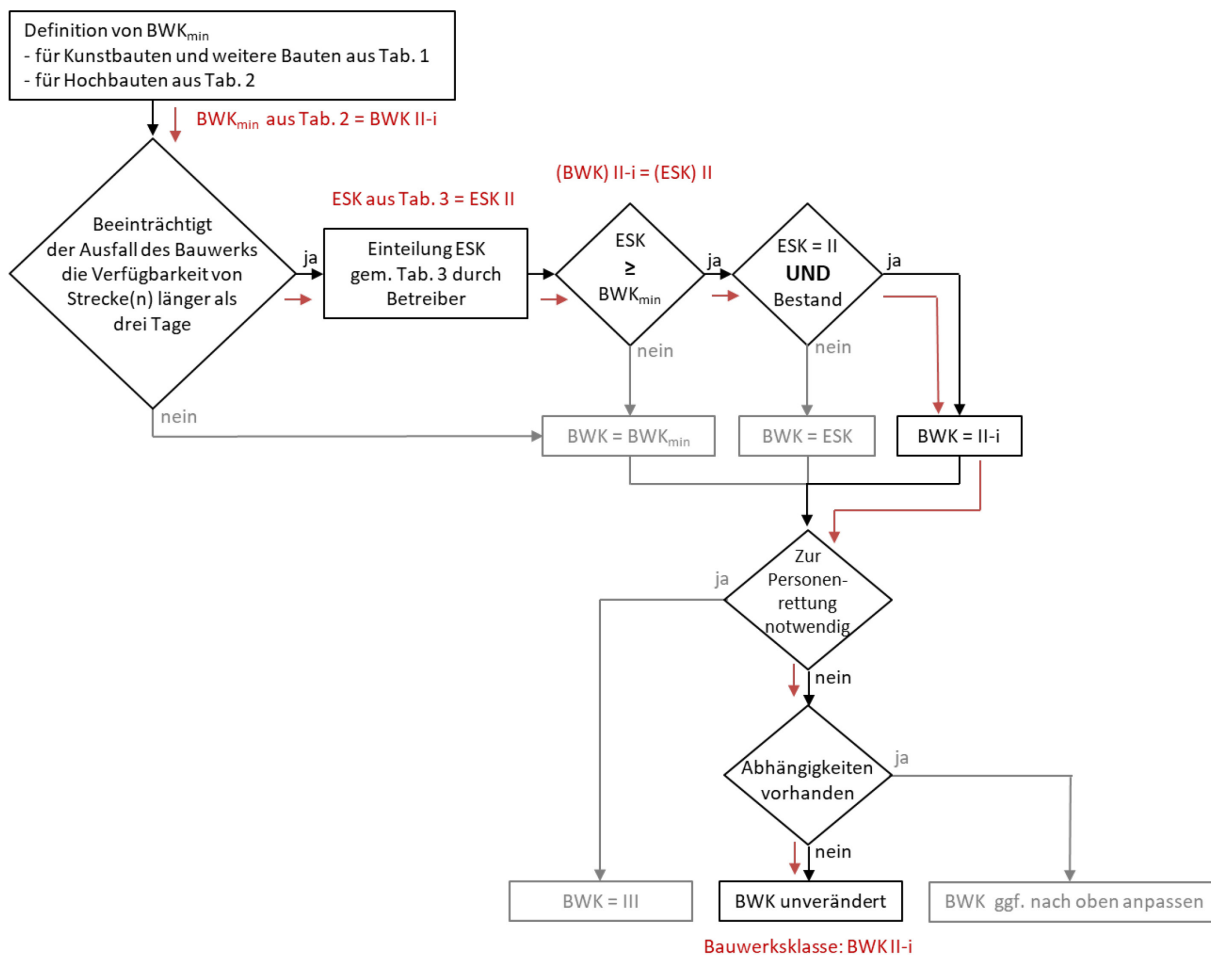


Abb. B.1 Flussdiagramm zur Bestimmung der Bauwerksklasse

B.4 Beurteilung der Erdbebensicherheit

Die Beurteilung der Erdbebensicherheit ergibt für das Stellwerk einen Erfüllungsfaktor $\alpha_{\text{eff}} = 0,25$. Dieser Faktor beruht auf den folgenden identifizierten Schwachstellen.

Schwachstelle	Erfüllungsfaktor α_{eff}	Beurteilung der Erdbebensicherheit
1) Tragwerk, Krafteinleitung Längsrichtung bei Fundament sowie Widerstand EG und OG	0,45	Massnahmen erforderlich, soweit verhältnismässig
2) Tragwerk, Querrichtung Krafteinleitung OG	0,75	Massnahmen erforderlich, soweit verhältnismässig
3) Tragwerk, Querrichtung Kern im UG und EG	0,5	Massnahmen erforderlich, soweit verhältnismässig
4) SBIE, diverse Innenwände Out-of-plane	0,25	Massnahmen erforderlich, da α_{eff} kleiner als $\alpha_{\text{min}} = 0,4$
Massgebender Erfüllungsfaktor Tragwerk	0,45	
Massgebender Erfüllungsfaktor SBIE	0,25	

Tab. B.3 Zusammenfassung der Erfüllungsfaktoren α_{eff}

B.5 Massnahmenempfehlung

B.5.1 Massnahmen zur Behebung der Schwachstellen

Massnahme	Beschreibung	Gesamtkosten	Erfüllungsfaktor lokal
a)	Verbesserung Krafteinleitung Bodenplatte und Verstärkung von bestehenden Wandscheiben in Längsrichtung oder Ersatz durch neue Wände (Schwachstelle 1)	CHF 400 000.–	lokal $\alpha_{\text{eff}} = 0,45 \rightarrow \alpha_{\text{int}} = 1,0$
b)	Verstärkung der Krafteinleitung der Wände in Querrichtung in den Obergeschossen (Schwachstelle 2)	CHF 300 000. –	lokal $\alpha_{\text{eff}} = 0,75 \rightarrow \alpha_{\text{int}} = 1,0$
c)	Querkraftverstärkung Kern im UG und EG, Querrichtung (Schwachstelle 3)	CHF 200 000. –	lokal $\alpha_{\text{eff}} = 0,5 \rightarrow \alpha_{\text{int}} = 1,0$
d)	SBIE Innenwände Out-of-plane: Ersatz der Wände durch geeignete Leichtbauwände (Schwachstelle 4)	CHF 100 000. –	lokal $\alpha_{\text{eff}} = 0,25 \rightarrow \alpha_{\text{int}} = 1,0$

Tab. B.4 Massnahmen zur Behebung der Schwachstellen

Um die Erdbebensicherheit des Bauwerks zu verbessern, werden die Einzelmassnahmen zu Massnahmenpaketen gebündelt. In der Tabelle B.5 sind die Massnahmenpakete sowie deren Kosten zusammengefasst.

1. MP_{min} (zum Erreichen von α_{min})
2. $MP_{1,0}$ (zum Erreichen der normgerechten Sicherheit von Neubauten, d.h. $\alpha_{\text{int}} = 1,0$)
3. $MP_{0,75}$ (für Teilmassnahme $\alpha_{\text{int}} = 0,75$)

Die Abbildung B.2 illustriert die Veränderung der Erdbebensicherheit pro Massnahmenpaket.

Erläuterungen:

Massnahmenpakete sind so zu bilden, dass zunächst die für das Erreichen von $\alpha_{\min}$ erforderlichen Massnahmen in einem Massnahmenpaket $MP_{\min}$ zusammengefasst sind. Danach werden die zum Erreichen eines Erfüllungsfaktors von $\alpha_{\text{int}} = 1,0$ erforderlichen zusätzlichen Massnahmen in einem Massnahmenpaket $MP_{1,0}$ gebündelt. Das $MP_{1,0}$ ist auf seine Verhältnismässigkeit hin zu prüfen. Ist diese nicht gegeben, müssen solange Massnahmenpakete für stufenweise absteigende Erfüllungsfaktoren (z. B. $MP_{0,7}$, $MP_{0,5}$ usw.) evaluiert werden, bis die Verhältnismässigkeit erreicht ist. Das Vorgehen ist in der Abbildung 1 illustriert.

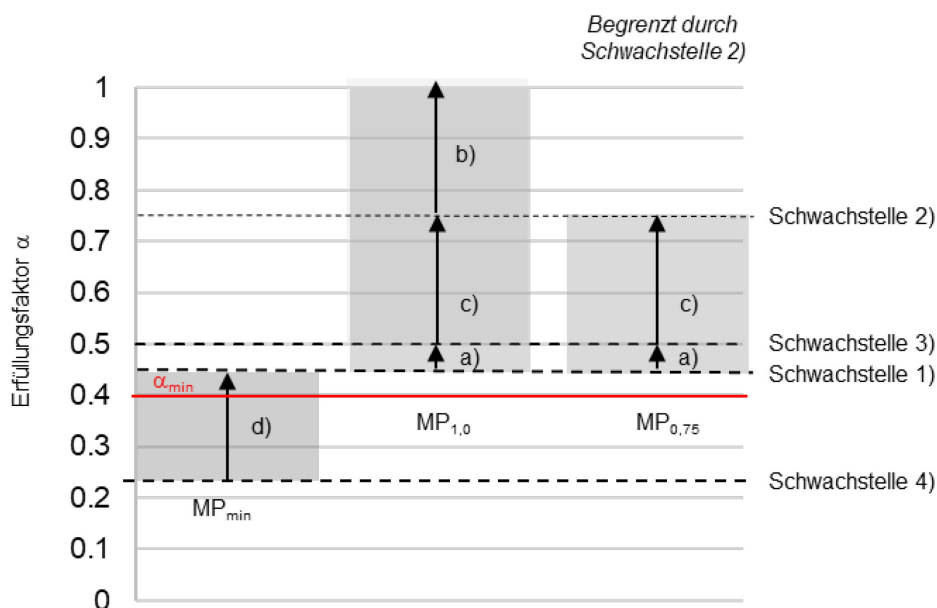
Paket	Massnahmen	Paketkosten ¹⁾	Erfüllungsfaktor global
$MP_{\min}^{2)}$	d)	CHF 100 000.–	$\alpha_{\text{eff}} = 0,25 \rightarrow \alpha_{\text{int}, MP_{\min}} = 0,45$
$MP_{1,0}$	a) + b) + c)	CHF 900 000. –	$\alpha_{\text{int}, MP_{\min}} = 0,45 \rightarrow \alpha_{\text{int}, MP_{1,0}} = 1,0$
$MP_{0,75}$	a) + c)	CHF 600 000. –	$\alpha_{\text{int}, MP_{\min}} = 0,45 \rightarrow \alpha_{\text{int}, MP_{0,75}} = 0,75$

Tab. B.5 Mögliche Massnahmenpakete zur globalen Erhöhung des Erfüllungsfaktors

¹⁾ Die Kosten entsprechen den sicherheitsbezogenen Investitionskosten SIC_M nach Ziffer 10.7.4 der Norm SIA 269/8.

²⁾ $MP_{\min}$ ist erforderlich und unabhängig von den Kosten auszuführen. Es wird an dieser Stelle angenommen, dass keine günstigere Massnahme existiert, um den Mindesterfüllungsfaktor zu erreichen.

Da die Massnahme d) zur Behebung der Schwachstelle 4 den Mindesterfüllungsfaktor sicherstellt, wird dieses Massnahmenpaket als $MP_{\min}$ bezeichnet. Die Massnahme d) führt zu einer lokalen Erhöhung des Erfüllungsfaktors auf 1,0, wobei der globale Erfüllungsfaktor aufgrund von Schwachstelle 1) bei 0,45 bleibt.

**Abb. B.2 Visualisierung von Schwachstellen, Massnahmen und Massnahmenpaketen**

B.5.2 Beurteilung der Verhältnismässigkeit

Die Grundlagen zur Beurteilung der Verhältnismässigkeit der Massnahmenpakete sind in der Tabelle B.6 aufgeführt. Die Tabelle enthält ausserdem Verweise auf die zugehörigen Kapitel der Norm SIA 269/8 oder Verweise auf Abschnitte dieses Beispiels oder auf den Inhalt dieser Richtlinie.

Bezeichnung	Formel und Wert	Referenz
Restnutzungsdauer	$d_r = 50 \text{ Jahre}$	Tab. B.1
Diskontierungsfaktor	$DF = \frac{i_d \cdot (1 + i_d)^{d_r}}{(1 + i_d)^{d_r} - 1} = \frac{0,02 \cdot (1 + 0,02)^{50}}{(1 + 0,02)^{50} - 1} \cong 3,2\%$ mit $i_d = 2\%$	Ziff. 10.7.2, SIA 269/8
Personenbelegung	$PB = 13$	Tab. B.1
Grenzkosten	$GK = 10 \cdot 10^6 \text{ CHF}$	Ziff. 10.3.9, SIA 269/8
Bauwerkswert	$BW = 6 \cdot 10^6 \text{ CHF}$	Tab. B.1
Sachenwert	$SW = 20 \cdot 10^6 \text{ CHF}$	Tab. B.1

Tab. B.6 Parameter zur Berechnung der Verhältnismässigkeit

Die Berechnung der Verhältnismässigkeit bzw. der Massnahmeneffizienz ist für die möglichen Massnahmenpakete nachstehend zusammengefasst.

Bezeichnung	Formel	MP _{1,0}	MP _{0,75}	Referenz
Erfüllungsfaktor vor Intervention	α_{eff}	0,45	0,45	Tab. B.5
Erfüllungsfaktor nach Intervention	α_{int}	1,0	0,75	Tab. B.5
Differenz Personenrisikofaktor	$\Delta PRF_M(\Delta\alpha)$	$3 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	Fig. 7, SIA 269/8
Reduktion Personenrisiken [CHF/J]	$\Delta RP_M = \Delta PRF_M \cdot PB \cdot GK$	372	290	Ziff. 10.3.1, SIA 269/8
Differenz Infrastruktursätze	$\Delta IS(\Delta\alpha)$	0,09 %	0,09 %	Fig. 8, SIA 269/8
Zahlungsbereitschaft Infrastrukturfunktion [CHF/J]	$\Delta ZI_M = \Delta IS \cdot \frac{(BW + SW)}{BSW}$	22 533	22 533	Ziff. 10.4.6, SIA 269/8
Risikoreduktion [CHF]	$\Delta R_M = \Delta RP_M + \Delta ZI_M$	22 905	22 823	Ziff. 10.2.5, SIA 269/8
Sicherheitsbezogene Investitionskosten [CHF]	SIC_M	900 000	600 000	Tab. B.5
Sicherheitskosten [CHF/J]	$SC_M = DF \cdot SIC_M$	28 641	19 094	Ziff. 10.7.1, SIA 269/8
Massnahmeneffizienz	$EF_M = \frac{\Delta RP_M + \Delta ZI_M}{SC_M}$	0,80	1,20	Ziff. 10.2.5, SIA 269/8
Max. verhältnismässige sicherheitsbezogene Investitionskosten [CHF]	$SIC_{EF=1} = \frac{\Delta R_M}{DF}$	$\cong 720\,000$ $< 900\,000$ für MP _{1,0}	$\cong 717\,000 >$ $600\,000$ für MP _{0,75}	

Tab. B.7 Berechnung der Massnahmeneffizienz der Massnahmenpakete MP

Massnahmenpaket	Beurteilung	Erläuterung
MP _{min}	erforderlich	Die Massnahme muss in jedem Fall ausgeführt werden.
MP _{1,0}	nicht verhältnismässig	Das Massnahmenpaket ist nicht verhältnismässig, da die Massnahme b) im Vergleich zum Nutzen hohe Kosten verursacht
MP _{0,75}	verhältnismässig	Der globale Erfüllungsfaktor von 0,75 lässt sich ohne Massnahme b) nicht weiter erhöhen.

Tab. B.8 Beurteilung der Verhältnismässigkeit

Beim betrachteten Stellwerk ist das Massnahmenpaket MP_{1,0}, das den Zustand von $\alpha_{int} \geq 1,0$ gewährleistet, nicht verhältnismässig und aktuell nicht umzusetzen. Das Massnahmenpaket MP_{0,75} ist verhältnismässig und mit ihm wird ein globaler Erfüllungsfaktor von $\alpha_{int} = 0,75$ erreicht. Mit dieser «Teilmassnahme» wird der grundsätzlich anzustrebende Erfüllungsfaktor von $\alpha_{int} \geq 1,0$ (Ziff. 9.4.1 der Norm SIA 269/8) jedoch nicht erreicht.

Erläuterungen:

Neben der Identifikation der Schwachstellen und der Definition von Massnahmen zu deren Behebung kommt es darauf an, wieviel Geld zur Verfügung steht, um einen vorgegebenen Erfüllungsfaktor α_{int} zu erreichen. In diesem Beispiel ist es verhältnismässig, gemäss den Angaben in der Tabelle B.9 näherungsweise 0,72 Mio. CHF zu investieren, um den Zustand von $\alpha_{int} = 1,0$ zu erreichen. Dabei ist es unerheblich, wie die Massnahmenpakete schlussendlich zusammengestellt werden. Kann das Ziel von $\alpha_{int} > 1,0$ mit den maximalen verhältnismässigen Investitionskosten nicht erreicht werden, sind die Massnahmenpakete um die Massnahmen mit entsprechend geringem Nutzen zu reduzieren.

Bei einem grösseren Bauprojekt, beispielsweise einer umfassenden Instandsetzung eines Bauwerks, ist die Verhältnismässigkeit auch an den Zielen und Kosten des entsprechenden Projektes zu messen.

Verzeichnis

In der Richtlinie wird auf die nachstehenden Gesetze, Verordnungen, Richtlinien, Normen und Publikationen verwiesen, die im Sinne der Verweisungen ganz oder teilweise mitgelten. Es gilt die jeweilige letzte Ausgabe (einschliesslich aller Änderungen).

- [1] Eisenbahngesetz vom 20. Dezember 1957 (EBG), SR 742.101
- [2] Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen vom 23. November 1983 (Eisenbahnverordnung, EBV), SR 742.141.1
- [3] Verordnung über das Plangenehmigungsverfahren für Eisenbahnanlagen vom 2. Februar 2000 (VPVE), SR 742.142.1
- [4] BAV-Richtlinie zu Artikel 3 der VPVE (RL VPVE), Anforderungen an Planvorlagen, Bundesamt für Verkehr (BAV), Infrastruktur und Sicherheit.
- [5] BAV-Richtlinie Unabhängige Prüfstellen Eisenbahnen (RL UP-EB), Einsatz von unabhängigen Prüfstellen für Konformitäts- und Sicherheitsbewertungen in Bewilligungsverfahren für Eisenbahnen, Bundesamt für Verkehr (BAV), Infrastruktur und Sicherheit.
- [6] ESTI-Richtlinie Nr. 248, Erdbebensicherheit der elektrischen Energieverteilung in der Schweiz, Eidgenössisches Starkstrominspektorat (ESTI), Bundesamt für Verkehr (BAV).
- [7] Ordnung SIA 103, Leistungen und Honorare der Bauingenieurinnen und Bauingenieure
- [8] Verständigungsnorm SIA 112, Modell Bauplanung
- [9] Normen SIA 260 bis 267, Tragwerksnormen (Neubauten)
- [10] Normen SIA 269 ff. (insb. SIA 269/8), Erhaltung von Tragwerken (Bestande Bauten)
- [11] Norm SIA 469, Erhaltung von Bauwerken
- [12] Erdbebensicherheit sekundärer Bauteile und weiterer Installationen und Einrichtungen. Empfehlungen und Hinweise für die Praxis, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Umwelt-Wissen Nr. 1643, 2016.
- [13] ASTRA-Dokumentation 82017, Erdbebensicherheit von Erd- und Stützbauwerken – Bemessung und Überprüfung“, Bundesamt für Strassen (ASTRA), 2019.
- [14] ASTRA-Dokumentation 82018, Erdbebensicherheit von Erd- und Stützbauwerken – Fallbeispiele, Bundesamt für Strassen (ASTRA), 2019.