

Berücksichtigung von Erdbeben in der Störfallvorsorge

Hilfestellung für Betriebe mit chemischen Gefahrenpotenzialen



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Berücksichtigung von Erdbeben in der Störfallvorsorge

Hilfestellung für Betriebe mit chemischen Gefahrenpotenzialen

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Autoren

Clotaire Michel, Ehrfried Kölz (Risk&Safety AG)

Martin Koller (Résonance SA)

Begleitgruppe

Raphaël Gonzalez und Martin Merkofer (BAFU, Leitung),

Blaise Duvernay (BAFU), Armin Feurer (Kt AG),

Gabriel Stebler (Kt BL), Thomas Christen,

Samuel Mock (Kt BS), Christophe Dirren (Kt VS),

Manfred Hutter, Mario Vuckovic,

Björn Sebastian Timpe (Arxada AG), Elisabeth Kessler,

João Paulo Kuchenbecker (CABB AG),

Martin Rahn (CARBURA), Dominik Imboden (Lonza AG),

Mervyn Schmid (F. Hoffmann-La Roche AG),

Andreas Franz (Syngenta Agro AG)

Layout

Funke Lettershop AG

Titelbild

Brand in der Cosmo Erdölraffinerie in Ichihara, Chiba

Prefecture (Japan) nach dem Tohoku-Erdbeben von 2011.

© Mandatory Credit: KEYSTONE/AP Kyodo News

PDF-Download

www.bafu.admin.ch/uw-2506-d

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache verfügbar.

Die Originalsprache ist Deutsch.

© BAFU 2025

Inhaltsverzeichnis

Abstracts	5	Anhang A	36
		Beispiel	36
Vorwort	6	Anhang B	41
		Grundsätze	41
1 Einleitung	7	Anhang C	44
1.1 Kontext	7	Anerkannte Regeln der Technik im Ausland	44
1.2 Zielsetzung und Adressaten	8		
1.3 Aufbau der Publikation	8	Anhang D	47
		Störfälle aufgrund Erdbeben	47
2 Anwendungsbereich	9	Anhang E	49
2.1 Betroffene Betriebe	9	Typische Erdbebensicherheitsmassnahmen	49
2.2 Anlass für die Berücksichtigung von Erdbeben in stationären Betrieben	9		
2.3 Umsetzungsfristen für Erdbebensicherheitsmassnahmen	11		
2.4 Dokumentation	11		
2.5 Monitoring der Implementierung	11		
3 Erdbebenrisiko bei Störfallbetrieben	12		
3.1 Erdbebengefährdung	12		
3.2 Auswirkungen von Erdbeben auf Störfallbetriebe	14		
3.3 Grundsätze der Erdbebenprävention	15		
4 Verfahren zur Berücksichtigung von Erdbeben in der Störfallvorsorge	17		
4.1 Qualitative Erdbebenszenarien	17		
4.2 Quantitative Abschätzung der Auswirkungen	19		
4.3 Untersuchung von Massnahmen zur Verminderung der Störfallwerte	20		
4.4 Nachweis der Erdbebensicherheit	23		
5 Literaturverzeichnis	29		
6 Abkürzungen und Symbole	32		
Abkürzungen	32		
Symbole	33		
7 Glossar	34		

Abstracts

According to the national hazard and risk analysis “Disasters and Emergencies in Switzerland” (DES), earthquakes are among the most dangerous natural hazards. According to the Manual on the Major Accidents Ordinance, they are to be considered as possible causes of major accidents in establishments with chemical hazard potential. With the present publication, an approach has been developed as to how, according to the current state of knowledge, the cause of failure due to earthquakes in establishments with chemical hazard potential within the scope of the Major Accidents Ordinance can be appropriately taken into account.

Keywords:

*Earthquake,
prevention of major
accidents,
establishments with
chemical hazard
potential, summary
report, risk analysis*

Erdbeben gehören gemäss der nationalen Gefährdungs- und Risikoanalyse «Katastrophen und Notlagen Schweiz» (KNS) zu den risikoreichsten Gefährdungen. Sie sind nach dem Handbuch zur Störfallverordnung als mögliche umgebungsbedingte Ursachen für Störfälle bei Betrieben mit chemischen Gefahrenpotenzialen zu berücksichtigen. Mit der vorliegenden Publikation wurde ein Ansatz entwickelt, wie nach heutigem Stand des Wissens die Versagensursache Erdbeben bei Betrieben mit chemischen Gefahrenpotenzialen im Geltungsbereich der Störfallverordnung angemessen berücksichtigt werden kann.

Stichwörter:

*Erdbeben,
Störfallvorsorge,
Chemiebetriebe,
Kurzbericht,
Risikoermittlung*

L'analyse nationale des dangers et des risques « Catastrophes et situations d'urgence en Suisse » (CaSUS) classe les séismes parmi les dangers à l'origine des risques les plus élevés. D'après le manuel de l'ordonnance sur les accidents majeurs (OPAM), les entreprises présentant un potentiel de danger chimique doivent considérer les séismes comme des causes d'accidents majeurs dues à leur environnement. La présente publication propose une approche pour prendre en compte, de manière appropriée et conformément à l'état actuel des connaissances, la cause de défaillance « séisme » dans les entreprises soumises à l'OPAM.

Mots-clés:

*Séisme, prévention
des accidents majeurs,
entreprises chimiques,
rapport succinct,
étude de risque*

Secondo l'analisi nazionale dei pericoli e dei rischi «Catastrofi e situazioni d'emergenza in Svizzera» (CES), i terremoti rientrano tra i pericoli con i rischi più elevati. Conformemente al Manuale concernente l'ordinanza sulla protezione contro gli incidenti rilevanti (OPIR) devono essere considerati come possibili cause estrinseche di incidenti rilevanti nelle aziende con potenziale di pericolo chimico. La presente pubblicazione illustra un approccio conforme allo stato attuale delle conoscenze che consente di tenere conto in modo adeguato, nel campo di applicazione dell'OPIR, delle cause del cedimento sismico delle aziende con potenziale di pericolo chimico.

Parole chiave:

*terremoti,
prevenzione contro
gli incidenti
rilevanti, aziende
chimiche, rapporto
breve, analisi dei
rischi*

Vorwort

Schwere Erdbeben gehören gemäss der nationalen Gefährdungs- und Risikoanalyse «Katastrophen und Notlagen Schweiz» (KNS) zu den risikoreichsten Gefährdungen in der Schweiz. Sie können die Gesellschaft stark treffen. Umso wichtiger ist es, vorsorglich mittels präventiver Massnahmen alles daran zu setzen, dass die Schäden so gering wie möglich ausfallen. Gemäss dem Handbuch zur Störfallverordnung (StFV) sind Erdbeben als umgebungsbedingte Ursachen für Störfälle auch bei Betrieben mit chemischen Gefahrenpotenzialen im Geltungsbereich der Störfallverordnung zu berücksichtigen.

1996 hat das BAFU Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung publiziert. Diese Kriterien haben sich in der Praxis bewährt und fördern eine einheitliche Umsetzung bei der Beurteilung des Risikos für Bevölkerung und Umwelt ausgehend von Betrieben mit chemischen Gefahrenpotenzialen im Geltungsbereich der Störfallverordnung. Die Risiken ausgelöst durch betriebliche Ursachen (z. B. fehlerhafte Prozesse) oder umgebungsbedingte Ursachen (z. B. Hochwasser) konnten und können mit verhältnismässigen Sicherheitsmassnahmen soweit gesenkt werden, dass sie nach den strengen Vorgaben der Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung tragbar sind.

Bis heute werden Erdbeben als Versagensursache in der Störfallvorsorge aufgrund fehlender Grundlagen jedoch uneinheitlich berücksichtigt. Vertiefte Abklärungen in den vergangenen Jahren haben gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit von Störfällen ausgelöst durch schwere Erdbeben deutlich höher ist als aufgrund der anderen Versagensursachen und die Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung für den Spezialfall «Erdbeben» nicht geeignet sind. Die Anwendung dieser Kriterien für den Fall eines schweren Erdbebens würde zu überdimensionierten Anforderungen an Sicherheitsmassnahmen führen, die technisch nicht realisierbar bzw. wirtschaftlich nicht mehr tragbar wären. Zudem würden diese Anforderungen weit über die aktuelle Praxis im Ausland hinausgehen. Aus diesem Grund hat eine breit abgestützte Arbeitsgruppe unter Leitung des BAFU zusammen mit den für Erdbeben spezialisierten Ingenieurbüros Risk&Safety sowie Résonance und unter Einbezug von Vertretern der kantonalen Vollzugsstellen und der Industrie mit der vorliegenden Umwelt-Wissen Publikation einen Ansatz entwickelt, wie nach heutigem Wissen die Versagensursache Erdbeben bei Störfallbetrieben berücksichtigt werden kann. Dieser Ansatz wurde im Rahmen von Pilotstudien validiert. Da mit diesem Ansatz – auch verglichen mit dem internationalen Umfeld – Neuland begangen wird, wird das BAFU die Umsetzung mittels eines Monitorings begleiten, um bei Bedarf zusammen mit der Arbeitsgruppe notwendige Anpassungen vorzunehmen.

Ich bin überzeugt, dass diese Umwelt-Wissen-Publikation eine Lücke schliesst und die notwendige Basis für eine fundierte und angemessene Berücksichtigung der Versagensursache Erdbeben bei Betrieben mit chemischen Gefahrenpotenzialen im Geltungsbereich der Störfallverordnung leisten wird.

Paul Steffen, Stellvertretender Direktor
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

1 Einleitung

1.1 Kontext

Schwere Erdbeben gehören gemäss der nationalen Gefährdungs- und Risikoanalyse «Katastrophen und Notlagen Schweiz» (KNS) zu den risikoreichsten Gefährdungen der Schweiz. Sie können die Gesellschaft in der Schweiz stark beeinträchtigen. Verschiedene Bereiche sind betroffen: die Führung, die Information und Kommunikation, die Ordnung und Sicherheit, die Ortung und Rettung, die Versorgung, die Räumung und Entsorgung, die Wirtschaft sowie die Gebäude und Infrastrukturen. Kommt es zu einem schweren Erdbeben hilft eine gute Vorbeugung, das Ereignis effizient und möglichst schnell zu bewältigen und den Wiederaufbau und die Rückkehr zur Normalität zu erleichtern. Das ist bei einem solchen Erdbeben aber eine grosse Herausforderung. Zum einen, weil grosse Gebiete betroffen sind und zum anderen, weil die Schäden immens gross sein können [1]. Aus diesem Grund ist es wichtig, mit einer guten Vorbeugung bei Anlagen im Geltungsbereich der Störfallverordnung (StFV) frühzeitig und vorausschauend die nötigen Sicherheitsmassnahmen zu treffen, um die Schäden nach einem Erdbeben so gering wie möglich zu halten.

Gemäss Störfallverordnung (StFV) vom 1. April 1991 basiert die Störfallvorsorge bei Unternehmen mit chemischen Gefahrenpotenzialen auf dem ALARP Prinzip (As Low As Reasonably Practicable). «Der Inhaber eines Betriebs muss zum Schutz der Bevölkerung und der Umwelt alle zur Verminderung des Risikos geeigneten Massnahmen treffen, die nach dem Stand der Sicherheitstechnik verfügbar, aufgrund seiner Erfahrung ergänzt und wirtschaftlich tragbar sind.» (Art 3. Abs. 1, StFV).

Im Handbuch zur Störfallverordnung [2] wird das Erdbeben als eine der möglichen «umgebungsbedingten Ursachen für Störfälle» aufgelistet. Das Szenario Erdbeben muss bei der Störfallvorsorge also berücksichtigt werden, wird im Handbuch aber nicht spezifisch behandelt. Erwähnenswert ist die Publikation des AWEL Zürich und des OCIRT Genf [3], die aber in der Zwischenzeit überholt ist. Aufgrund fehlender Harmonisierungsgrundlagen wurden Erdbeben bisher im Rahmen des Vollzugs der StFV in uneinheitlicher Weise berücksichtigt.

Ein weiteres Problem ist die Festlegung der zu berücksichtigenden Erdbebeneinwirkungen bei Projekten für neue Anlagen wie auch bei der Überprüfung der Erdbebensicherheit bestehender Anlagen. Für Betriebe, die der Störfallverordnung unterstellt sind und eine Risikoermittlung erfordern (d. h. Betriebe mit einem Störfallwert $S \geq 0,3$), legt die Norm SIA 261 «Einwirkungen auf Tragwerke» [4] fest, dass die Bemessungseinwirkung aus Erdbeben und die konzeptionellen und konstruktiven Massnahmen im Rahmen dieser Risikoermittlung zu bestimmen sind. Dasselbe gilt für die Überprüfung der Erdbebensicherheit bestehender Bauwerke [5]. Infolge des Fehlens einer entsprechenden Anwendungshilfe wird aber oft eine Erdbebeneinwirkung für Bauwerke bei Störfallbetrieben verwendet, wie sie von der Norm SIA 261 für die Bauwerksklassen I bis III vorgesehen ist. Diese Bauwerksklassen werden auch bei Störfallbetrieben verwendet, welche einen Störfallwert grösser oder gleich 0,3 aufweisen und bei welchen gemäss den Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung für die Erdbebenbemessung eine höhere Erdbebeneinwirkung verwendet werden müsste.

In der Erdbebenprävention wird vermehrt auf die Rolle der sekundären Bauteile, Installationen und anderen Einrichtungen (SBIE) [6] für die Schadenbegrenzung und das Kontinuitätsmanagement [7] aufmerksam gemacht. Diese spielen bei Störfallbetrieben eine zentrale Rolle, einerseits, um die Freisetzung von gefährlichen Stoffen zu vermeiden (z. B. Erdbebensicherheit von Behältern und Leitungen) und andererseits, um die Funktionsfähigkeit der technischen und baulichen Massnahmen zur Schadenbegrenzung (z. B. automatische Schliessungen) zu erhalten. Sie sind somit bei der Erdbebenbemessung gleichermassen zu berücksichtigen.

Seit 2010 arbeitet das BAFU mit Unterstützung durch die Ingenieurbüros Risk&Safety AG und Résonance SA und in Zusammenarbeit mit einer Arbeitsgruppe aus Vertretern der kantonalen Vollzugsbehörden und der Industrie am Thema Berücksichtigung von Erdbeben in der Störfallvorsorge. Das vorliegende Verfahren wurde 2017 vorgeschlagen, bei 3 Pilotstudien getestet und weiter angepasst. Die Abklärungen im Zuge der Arbeiten zu dieser Publikation haben gezeigt, dass Erdbeben als Auslöser für Störfälle bei Chemieanlagen auch im Ausland sehr unterschiedlich berücksichtigt werden (siehe Anhang C). Im Ausland werden Erdbeben ausschliesslich über einen deterministischen Bemessungsansatz und nicht über quantitative Risikoanalysen berücksichtigt. Die vorliegende Publikation stellt einen deterministischen Ansatz für die Berücksichtigung von Erdbeben im Rahmen der Störfallverordnung zur Verfügung. Die Anwendung des Ansatzes setzt risikobasierte Überlegungen im Rahmen des im Kapitel 4 definierten Verfahrens voraus. Die Begründung des deterministischen Ansatzes findet sich im Anhang B.

1.2 Zielsetzung und Adressaten

Die vorliegende Publikation definiert ein Vorgehen, wie im Rahmen der StFV das Störfallrisiko infolge Erdbeben angemessen berücksichtigt werden kann. Von Erdbeben ausgelöste Störfälle werden für sich alleine, unabhängig von den anderen Versagensursachen und Störfallszenarien, betrachtet und massnahmenorientiert angegangen.

Die Publikation richtet sich an die Inhaber von Betrieben im Geltungsbereich der Störfallverordnung sowie ihre Planenden im Bereich der Störfallvorsorge und des Bauingenieurwesens. Zudem adressiert sie die kantonalen Vollzugsbehörden, welche den Vollzug der StFV sicherstellen.

1.3 Aufbau der Publikation

Kapitel 2 erläutert den Anwendungsbereich der Publikation und Kapitel 3 gibt eine Einführung in die Erdbebengefährdung und die Auswirkungen für Störfallbetriebe. Im Kapitel 4 ist das vorgeschlagene Verfahren zur Berücksichtigung von Erdbeben bei Störfallbetrieben detailliert beschrieben. Im Anhang A wird ein Anwendungsbeispiel gezeigt, so dass die Inhaber von Störfallbetrieben eine Vorstellung haben, wie das Verfahren angewendet werden soll. Die dem Verfahren zugrunde liegenden Überlegungen mit Blick auf die Beurteilungskriterien zur StFV werden im Anhang B erläutert. Anhang C listet die Vorgaben im Ausland als Vergleich auf und Anhang D zeigt eine Zusammenstellung der bekannten Störfälle aufgrund Erdbeben weltweit. Im Anhang E werden zum Abschluss typische Beispiele von Massnahmen zur Erhöhung der Erdbebensicherheit pro Anlagentyp aufgezeigt.

2 Anwendungsbereich

2.1 Betroffene Betriebe

Diese Publikation betrifft alle Typen von stationären chemischen Betrieben, die aufgrund ihres chemischen Gefahrenpotenzials der Störfallverordnung unterstellt sind. Verkehrswege und Rohrleitungen gemäss Rohrleitungsverordnung (RLV) sowie ihre Nebenanlagen werden in dieser Publikation nicht behandelt. Ebenso nicht Teil der Publikation sind Betriebe, die aufgrund ihres biologischen Gefahrenpotenzials der Störfallverordnung unterstehen.

In stationären chemischen Betrieben sollten alle (sowohl neue als auch bestehende) Tragwerke sowie die sekundären Bauteile, Installationen und Einrichtungen (SBIE) [6] berücksichtigt werden, soweit sie für Freisetzungen störfallrelevant sind. Das heisst, wenn bei einer Beschädigung der Anlage bzw. des Gebäudes erhebliche Einwirkungen ausserhalb des Betriebsareals auftreten können (Art. 2 Abs. 4 StFV). Dies beinhaltet z. B. (i) Produktionsgebäude mit Tanks, die die Mengenschwelle der StFV überschreiten, (ii) die Tanks selbst, (iii) der StFV unterstellte Anlagen und Behältnisse sowie (iv) bauliche Sicherheitsmassnahmen wie Rückhaltebecken, etc. Die Erdbebensicherheit der in Bezug auf Freisetzungen nicht relevanten Tragwerke und SBIE, die sich auf dem Betriebsareal befinden, ist gemäss den Tragwerksnormen des SIA zu behandeln. Dazu zählen z. B. Bürogebäude oder Produktionsgebäude, die keine gefährlichen Stoffe oder Stoffe in Mengen unterhalb der Mengenschwelle beinhalten und für das Störfallszenario Erdbeben nicht relevant sind.

Es wird empfohlen, dass die betroffenen Branchen zur Berücksichtigung von Erdbeben bei ihren Anlagentypen zusammen mit den kantonalen Vollzugsbehörden und dem BAFU branchenspezifische Szenarien und Massnahmen erarbeiten.

2.2 Anlass für die Berücksichtigung von Erdbeben in stationären Betrieben

Unabhängig allfälliger kantonalen Anforderungen im Baubewilligungsverfahren müssen Bauwerke und ihre SBIE grundsätzlich die Anforderungen der Tragwerksnormen des SIA inkl. der Anforderungen an die Erdbebensicherheit gemäss den Normen SIA 261 [4] und SIA 269/8 [5] erfüllen. In der Norm SIA 269 [9] Ziffer 6.1.2 werden Anlässe für eine Überprüfung u.a. der Erdbebensicherheit für bestehende Anlagen aufgelistet. Diese werden im Kapitel 2.2.2 präzisiert. Es wird empfohlen, die Abklärungen bezüglich Erdbebensicherheit spätestens während der Phase Vorprojekt eines Bauprojektes durchzuführen, um das Projekt nicht zu verzögern und die bei Bedarf notwendigen Sicherheitsmassnahmen möglichst kosteneffizient planen zu können.

2.2.1 Neue Betriebseinheiten

Beim Neubau einer störfallrelevanten Betriebseinheit sollte Erdbeben mit dem vorliegenden Verfahren (Kap. 4.1 bis 4.4) immer berücksichtigt werden (Abb. 1). Die Vollzugsbehörde wird im Baubewilligungsverfahren zur Berücksichtigung von Erdbeben inkl. Nachweis der Erdbebensicherheit involviert.

Abb. 1: Anlässe, Termine und Inhalt der Berücksichtigung von Erdbeben bei störfallrelevanten stationären Betrieben* Störfallwert S gemäss aktuell gültigem Kurzbericht oder Risikoermittlung.

	Neue Betriebseinheit	Bestehende Betriebseinheit	
Anlass	Berücksichtigung von Erdbeben: Bei Planung	Generell und unabhängig vom Störfallwert ist die Berücksichtigung und Überprüfung von Erdbeben (inkl. Sanierungsplan) in folgenden Fällen durchzuführen: Es findet eine wesentliche Änderung an der Störfallanlage im Sinne von Art. 8a StFV statt. oder Relevantes Bauprojekt mit erheblicher Investition oder Eingriff ins Tragwerk oder Stabilität / Standsicherheit von SBIE betroffen.	Monitoring des BAFU über die Berücksichtigung von Erdbeben und die Umsetzung von Massnahmen (Kapitel 2.5)
Termin	Nachweis Erdbebensicherheit: Bei Baueingabe	Störfallwert $S > 0.45$ bis spätestens 2030 (Richtwert) Störfallwert $0.3 \leq S \leq 0.45$ bis spätestens 2035 (Richtwert) Störfallwert $S < 0.3$ kein zeitlicher Richtwert	
Dokumentation	Berücksichtigung von Erdbeben (Kapitel 4.1 bis 4.3) Dokumentation als separates Kapitel im Kurzbericht oder in der Risikoermittlung	Berücksichtigung von Erdbeben (Kapitel 4.1 bis 4.3) Dokumentation als separates Kapitel im Kurzbericht oder in der Risikoermittlung oder im Anhang (Kapitel 2.4)	
	Nachweis der Erdbebensicherheit (Kapitel 4.4.1)	Überprüfung der Erdbebensicherheit (Kapitel 4.4) inkl. Sanierungsplan des Inhabers in Absprache mit der Vollzugsbehörde	

2.2.2 Bestehende Betriebseinheiten

Bei bestehenden Betriebseinheiten sollten Erdbeben unabhängig vom Störfallwert als störfallauslösendes Ereignis im Kurzbericht resp. in der Risikoermittlung berücksichtigt werden (Kap. 4.1 bis 4.4), wenn sich die Verhältnisse an der Störfallanlage im Sinne von Art. 8a StFV wesentlich ändern oder bei relevanten Bauprojekten¹ (siehe Abb. 1). Für Betriebe, die eine Risikoermittlung erstellt haben, sollte Erdbeben als Richtwert bis Ende 2030 (Störfallwert $> 0,45^2$) bzw. Ende 2035 ($0,3 < \text{Störfallwert} \leq 0,45$) berücksichtigt werden (Kap. 4.1 bis 4.4). Für Betriebe mit einem Störfallwert kleiner als 0,3 gibt es keine zeitlichen Richtwerte. Diese Richtwerte beziehen sich auf die qualitative Berücksichtigung von Erdbeben, die Überprüfung der Erdbebensicherheit und falls erforderlich, die Bereitstellung eines Sanierungsplans, aber nicht bereits auf die Umsetzung der Massnahmen. Die Umsetzung der Massnahmen richtet sich nach dem mit der Vollzugsbehörde abgesprochenen Sanierungsplan. Die in Abb. 1 als Richtwerte angegebenen Termine beziehen sich auf die Störfallwerte der aktuell vorliegenden Kurzberichte und Risikoermittlungen, also ohne Berücksichtigung von Erdbeben als Auslöser eines Störfalls. Damit soll verhindert werden, dass alle Kurzberichte oder Risikoermittlungen sofort aktualisiert werden müssen. Den Richtwerten bezüglich Berücksichtigung von Erdbeben wurde bewusst ein risiko- resp. ausmassbasierter Ansatz zugrunde gelegt, um eine vernünftige Staffelung der Abklärungen seitens der Inhaber der Störfallanlagen zu ermöglichen.

Die Ertüchtigung der bestehenden Anlagen sollte anschliessend gemäss Sanierungsplan erfolgen.

¹ Relevantes Bauprojekt mit erheblicher Investition pro Produktions- oder Lagerungseinheit, bei einem Eingriff ins Tragwerk oder wenn die Standsicherheit/ Stabilität von SBIE betroffen ist.

² Die Störfallwerte 0,3 resp. 0,45 entsprechen 10 resp. 32 Todesopfern, 1 resp. 3,2 km² verunreinigten oberirdischen Gewässern oder einem Ausfall von 10 000 resp. 32 000 Personenmonaten der Wasserversorgung [8].

Bei grossen Betriebsarealen mit vielen störfallrelevanten Anlagen und verschiedenen Betriebseinheiten kann ein etappiertes Vorgehen basierend auf Risikoüberlegungen sinnvoll sein. In solchen Fällen wird empfohlen, ein Vorgehenskonzept zu erstellen und mit der Vollzugsbehörde abzusprechen.

2.3 Umsetzungsfristen für Erdbebensicherheitsmassnahmen

Für bestehende Betriebe, die festgestellt haben, dass Erdbebensicherheitsmassnahmen erforderlich sind, sollte durch Verfügung der Vollzugsbehörde oder mittels schriftlicher Vereinbarung ein Sanierungsplan mit Terminen festgelegt werden. Dabei schlägt der Inhaber der Störfallanlage einen Sanierungsplan im Lichte anderweitiger von ihm geplanten Änderungen an der Anlage vor, damit aus Kosteneffizienzgründen die Umsetzung von baulichen Massnahmen bezüglich Erdbebensicherheit möglichst mit anderweitigen baulichen Vorhaben an der betroffenen Anlage kombiniert werden kann.

2.4 Dokumentation

Die Berücksichtigung von Erdbeben ist sowohl im Kurzbericht als auch in der Risikoermittlung zu dokumentieren. Bei neuen Anlagen, oder wenn der Kurzbericht oder die Risikoermittlung zu überarbeiten sind, erfolgt die Dokumentation, indem die entsprechenden Vorgaben der vorliegenden Publikation in einem eigenständigen Kapitel behandelt werden.

Bei bestehenden Anlagen ohne Überarbeitungsbedarf von Kurzbericht oder Risikoermittlung, kann ein eigenständiger Bericht zur Berücksichtigung von Erdbeben an den bestehenden Kurzbericht respektive die Risikoermittlung angehängt werden und sollte erst bei einer Aktualisierung des Kurzberichts/der Risikoermittlung integriert werden. Dies, da mit dieser Publikation empfohlen wird, Erdbeben als Auslöser für Störfälle separat von den anderen im Kurzbericht resp. der Risikoermittlung behandelten Versagensursachen zu behandeln. Wenn festgestellt wird, dass nur infolge Erdbeben Störfallwerte $\geq 0,3$ resultieren, kann die Erdbebensicherheit der Anlage mit dem deterministischen Ansatz (Kap. 4.4) überprüft werden, ohne dass für diese Anlage eine Risikoermittlung erforderlich wird.

Die Dokumentation sollte generell so aufgebaut sein, dass sie jederzeit nachvollziehbar ist und dass sie bei neuen Erkenntnissen aktualisiert werden kann. Insbesondere Veränderungen in der Umgebung sollten einfließen können. Dazu sollten in der Dokumentation die Freisetzungs- und Ausbreitungsvorgänge vom resultierenden Schaden getrennt dargestellt werden, so dass das Dokument auch in Teilen aktualisiert werden kann.

2.5 Monitoring der Implementierung

Das BAFU wird mit einem Monitoring verfolgen, wie sich die Anforderungen dieser Umwelt-Wissen Publikation in der Praxis bewähren und ob ein Anpassungsbedarf besteht. Dabei werden nicht nur die umgesetzten Massnahmen, sondern auch die wegen ungenügender Verhältnismässigkeit bei der Umsetzung verworfenen Massnahmen soweit möglich erfasst.

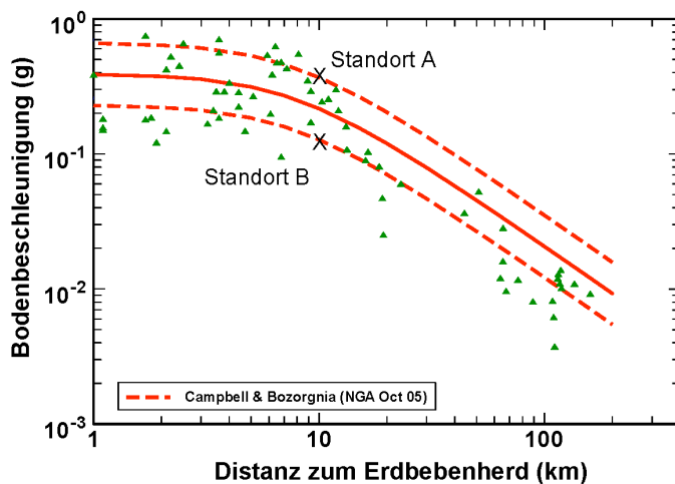
3 Erdbebenrisiko bei Störfallbetrieben

3.1 Erdbebengefährdung

Im Vergleich mit anderen europäischen Ländern besteht in der Schweiz eine mittlere Erdbebengefährdung. Es können aber überall und jederzeit in der Schweiz auch sehr starke Erdbeben auftreten. Die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Erdbebenerschütterung nimmt mit der Stärke der Erschütterung ab. Man spricht typischerweise von Erschütterungen mit einer bestimmten Jährlichkeit, oft wird z. B. von 500-jährlichen oder 1000-jährlichen Erdbeben gesprochen. Korrekt wäre es, von einer 500-jährlichen oder 1000-jährlichen Bodenerschütterung an einem betrachteten Standort zu sprechen. Der Grund hierfür ist, dass ein Erdbeben Bodenerschütterungen bewirkt, die je nach betrachtetem Standort eine stark unterschiedliche Wiederkehrperiode aufweisen. Dies wird unmittelbar klar, wenn man bedenkt, dass die Bodenerschütterungen im Wesentlichen mit zunehmender Distanz zum Erdbebenherd abnehmen. Aber auch in gleicher Distanz zum Erdbebenherd können die Bodenerschütterungen stark unterschiedlich ausfallen, wie im Folgenden näher erläutert wird.

Erdbebenerschütterungen zeichnen sich durch ausgeprägte Variabilität über relativ geringe Distanzen aus, d. h. ein bestimmtes Erdbeben kann an zwei Standorten mit vergleichbarer Distanz zum Erdbebenherd sehr unterschiedliche Erschütterungen bewirken. Neben Effekten der lokalen Geologie auf die Bodenerschütterungen ist diese Variabilität auf konstruktive und destruktive Interferenzen der Erdbebenwellen sowie in Herdnähe auf systematische Effekte im Bruchprozess zurückzuführen. Die Variabilität der Bodenerschütterung in einer bestimmten Distanz zum Erdbebenherd kann gut mit einer Log-Normal-Verteilung abgebildet werden, d. h. der Logarithmus der Bodenbeschleunigung ist normal verteilt [11]. Dabei entspricht die Standardabweichung ungefähr einem Faktor 2 [11], d. h. dass ca. ein Sechstel der Beobachtungen noch stärker als um einen Faktor 2 vom Mittelwert abweicht. Dies wird illustriert von Abbildung 2, welche die Aufzeichnungen der maximalen Bodenbeschleunigungen (PGA) für ein Erdbeben in Parkfield (Kalifornien) im Jahr 2004 in Abhängigkeit der Distanz zum Erdbebenherd zeigt.

Abb. 2: Parkfield-Erdbeben von 2004 (Magnitude $M_w = 6,0$): Vergleich der gemessenen maximalen Bodenbeschleunigungen (grüne Marker) mit Modell für Bodenerschütterungen ($V_{s30}=360$ m/s) in Funktion der Distanz zum Erdbebenherd (rot)
 Gestrichelte Linien entsprechen plus minus einer Standardabweichung $\mu \pm \sigma$ [12].



Beispielsweise ist es möglich, dass man am Standort A eine Bodenbeschleunigung misst, die einem Mittelwert zzgl. einer Standardabweichung ($\mu + \sigma$) entspricht, und an einem nur wenige hundert Meter entfernten Standort B – bei gleicher Distanz zum Erdbebenherd – eine Bodenbeschleunigung, die einem Mittelwert abzgl. einer Standardabweichung entspricht ($\mu - \sigma$). Für dieses Beispiel ergäbe sich somit ein Unterschied um einen Faktor 4 in den Bodenerschütterungen. Dies könnte bedeuten, dass beim selben Erdbebenereignis auf einem Industrieareal eine 4-fach stärkere Bodenerschütterung auftreten könnte im Vergleich zur Agglomeration in unmittelbarer Nähe oder umgekehrt.

Eine regionale Erdbebengefährdung gibt eine Abschätzung an, wie häufig Erdbebenerschütterungen verschiedener Stärke vorkommen können. Die Erdbebengefährdung gemäss dem Stand des Wissens wird für die Schweiz vom Schweizerischen Erdbebendienst (SED) an der ETH Zürich abgeschätzt und publiziert [13]. Sie ist die Basis für die Erdbebeneinwirkungen in den Baunormen (SIA 261 [4]). Die relevanten Erdbebenszenarien bezüglich Magnitude und Distanz werden durch die Deaggregation der seismischen Gefährdung bestimmt. Diese Szenarien sind für Standorte in der Schweiz und verschiedene Wiederkehrperioden publiziert [14][15].

Die regionale Erdbebengefährdung wird für einen Referenzfels ($v_s \approx 1100$ m/s) vom SED angegeben [13]. Die Gefährdung an einem bestimmten Standort wird zudem durch die lokalen geologischen Verhältnisse beeinflusst. Diese Einflüsse der lokalen Geologie auf die Bodenerschütterung können sehr stark sein (im Extremfall bis zu einem Faktor 10 im Vergleich zum Referenzfels [16]). Diese sind heute gut erforscht und werden vereinfacht in der SIA 261 mit 6 Baugrundklassen (BGK), «A» bis «F», berücksichtigt [4]. Aus der Kombination der regionalen Gefährdung, die in der Norm mit dem Bemessungswert der Beschleunigung a_{gd} abgedeckt ist, und dem Einfluss der lokalen Geologie (BGK in der Norm) ergibt sich die Erdbebeneinwirkung in Form eines elastischen Antwortspektrums.

Alternativ sollten für gewisse Standorte (z. B. BGK F) spektrale Standort- und Mikrozonierungsstudien nach der Norm SIA 261/1 [17] durchgeführt werden, um die Erdbebeneinwirkung genauer zu bestimmen. Wenn vorhanden, sind spektrale Standort- und Mikrozonierungsstudien als massgebend zu betrachten. Mikrozonierungsstudien können bei den kantonalen GIS Web-Applikationen abgerufen werden. Eine Übersicht mit Links auf die Layer «Spektrale Mikrozonierung» sind auf dem Geoportal des Bundes map.geo.admin.ch abrufbar.

Für die Bemessung von normalen Bauwerken wird eine Bodenerschütterung mit einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren (Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 Jahren, sogenannte 475 jährliche Bodenerschütterung) berücksichtigt.

Zusätzlich zu den starken Bodenbewegungen können Erdbeben in der Schweiz sekundäre Auswirkungen auslösen, v. a. gravitative Ereignisse (Böschungsversagen, Steinschläge, Bergstürze, Rutschungen, Lawinen ...) und, bei sandig-siltigen Standorten im Grundwasser, Bodenverflüssigung. Diese sind in den Bergregionen besonders relevant, wie sich bei Erdbeben in der Vergangenheit gezeigt hat (z. B. Visp 1855 oder Siders 1946 [18]). An Seen kann es durch Rutschungen im oder in den See zu Flutwellen und somit zu Überschwemmungen der Ufer kommen (z. B. Luzern im Jahr 1601 [19]). Bachläufe können durch Rutschungen gestaut werden; diese natürlichen Dämme können in der Folge wieder brechen und die Bereiche unterhalb des Dammes überschwemmen.

3.2 Auswirkungen von Erdbeben auf Störfallbetriebe

Die Freisetzung von gefährlichen Stoffen nach einem Erdbeben wird seit Ende der 70er-Jahre in der Literatur berücksichtigt [20]. Seit den 2000er-Jahren werden sie als NaTech-Katastrophen (*natural hazard triggered technological accident* / Naturgefahren-induzierter technologischer Unfall) bezeichnet. Als Störfall gilt ein ausserordentliches Ereignis in einem Betrieb, bei dem erhebliche Einwirkungen ausserhalb des Betriebsareals auftreten (Art. 2 Abs. 4 StFV). Erdbeben sind mögliche Auslöser von Störfällen [2]. Erdbebeninduzierte Störfälle sind aber nicht systematisch dokumentiert und bestehende Datenbanken (z. B. [21]) sind diesbezüglich äusserst unvollständig (siehe [22] für eine Übersicht). Ein möglicher Grund hierfür ist, dass erdbebeninduzierte Störfälle vielfach Umweltschäden, aber seltener Personenschäden verursachen. Die Umweltschäden wurden selten detailliert erhoben. Weiterhin sind störfallbedingte Todesopfer schwer von den einsturzbedingten Todesopfern zu unterscheiden. Es ist damit nicht immer möglich, einen Störfallwert herzuleiten. Erfasste Störfälle bei Betrieben aufgrund von Erdbeben sind im Anhang D aufgelistet. Folgende schwerwiegende Ereignisse sind bekannt:

- Beim Kocaeli Erdbeben (Türkei, 1999) [23] wurden 3 Tanks der «AKSA Acrylic Fiber Production Plant» beschädigt, was zur Freisetzung von 6500 t Acrylnitril in die Umwelt (toxische Wolke und Versickerung im Boden) führte. Die Bevölkerung in der Nachbarschaft zeigte Vergiftungssymptome. Zudem haben diverse Erdbebenschäden bei Tanks und Leitungen zu Bränden in der «Tupras» Erdölraffinerie in Izmit geführt. Dies führte zur Verunreinigung des Golfs von Izmit mit diversen Ölprodukten und Löschwasser.
- Beim Wenchuan-Erdbeben (China, 2008) [24] wurden mehrere chemische Betriebe (v. a. zur Düngemittelproduktion) zerstört. Mindestens zwei davon in Shifang führten zu erheblichen Einwirkungen ausserhalb des Betriebsareals. Aus diesen Betrieben wurden 1100 m³ respektive 80 t bis 150 t Ammoniak sowie Schwefelsäure freigesetzt. Dies hatte zur Evakuierung von 6000 Einwohnern und zur Verunreinigung eines Flusses geführt. Mehr als 100 Kinder, die in einem eingestürzten Klassenzimmer eingeschlossen waren, wurden durch toxisches Gas aus einer nahe gelegenen Chemiefabrik vergiftet [25].
- Beim Tohoku-Erdbeben (Japan, 2011) [26] wurden mehrere LPG- und Asphalt-Tanks der «Cosmo Oil»-Erdölraffinerie in Chiba beschädigt, was zu fünf BLEVEs (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion), Bränden und zur Freisetzung von Asphalt führte. Asphalt hat die Meeresbucht verunreinigt, es kam zu Schäden und Folgebränden in der Nachbarschaft und 1000 Einwohner wurden evakuiert. In Kesennuma City kam es zu einem Versagen einer Schlackenhalde durch Bodenverflüssigung und in der Folge zur Freisetzung von 40 000 m³ Bergbauabfällen (inkl. Arsen). Dadurch wurden Böden, ein Fluss und die Küste verunreinigt. Weitere Freisetzungen aufgrund des auf das Erdbeben folgenden Tsunamis werden hier nicht erwähnt.

Der einzige bekannte Fall in der Schweiz betrifft das Erdbeben vom 23.3.1960 mit Epizentrum bei Brig VS (Magnitude Mw 5,0), währenddessen im Lonza-Werk in Visp (Distanz 10 bis 15 km) drei der aufgehängten Säurebehälter aneinandergeprallt und geborsten sind [3]. Dieses Ereignis hatte keine Auswirkungen ausserhalb des Betriebsareals und wird deswegen im Anhang D nicht als Störfall aufgelistet.

Beobachtete Ursachen für Störfälle nach Erdbeben sind in erster Linie das Versagen von oberirdischen Tanks (ohne Druckbehälter) und Leitungen [22]. Somit zeigt sich, dass bei der Lagerung von gefährlichen Stoffen auch der Fall Erdbeben berücksichtigt werden muss. Neben der eigentlichen Erdbebensicherheit spielen Massnahmen zum Brand- und Explosionsschutz hierbei eine wichtige Rolle. Gemäss [22] führt die Freisetzung von brennbaren Stoffen bei Erdbeben in ca. 75 % der Fälle zu einem Brand. Besagte Sicherheitsmassnahmen müssen daher nach den Erschütterungen immer noch betriebsfähig sein.

3.3 Grundsätze der Erdbebenprävention

Die Anforderungen an die Erdbebensicherheit von Tragwerken werden in den SIA Tragwerksnormen definiert. Zentral ist dabei die Norm SIA 261 [4] «Einwirkungen auf Tragwerke». Die Normen verlangen, dass ein Bauwerk eine genügende Tragsicherheit für die in der Norm SIA 261 [4] definierten Erdbebeneinwirkungen aufweisen muss. Gemäss Norm SIA 261 [4] besteht das mit der erdbebengerechten Projektierung angestrebte Schutzziel im Personenschutz, der Schadensbegrenzung und der Gewährleistung der Funktionstüchtigkeit wichtiger Bauwerke unter der Einwirkung des Bemessungsbebens. Der zu erreichende Schutzgrad wird durch die Einteilung des Bauwerks in eine Bauwerksklasse (BWK) festgelegt. Der Schutzgrad und damit die Anforderungen nehmen dabei von der Bauwerksklasse I (BWK I) bis zur Bauwerksklasse III (BWK III) zu. Je nach Bauwerksklasse wird die Erdbebeneinwirkung durch einen Bedeutungsbeiwert (γ_f) vergrössert. Dies hat zur Folge, dass Bauwerke mit zunehmender Bauwerksklasse grösseren und selteneren Erdbebeneinwirkungen standhalten müssen. Dieser Beiwert ist auf die 475 Jahre Wiederkehrperiode (BWK I) normiert (siehe Tab. 1).

Die Sicherheit von Personen ist dabei das oberste Ziel. Demzufolge bezwecken die Normen in erster Linie, die Vermeidung von Einstürzen beim Bemessungsbeben sicherzustellen. Nur bei sehr wichtigen Bauwerken (s.g. BWK III [27]) werden auch Anforderungen an die Funktionstüchtigkeit (Gebrauchstauglichkeit) gestellt. Von Bauwerken, von welchen eine Umweltgefährdung ausgehen kann, wird ebenfalls ein höherer Schutzgrad (BWK II oder BWK III) verlangt. Die Norm SIA 261 [4] weist explizit darauf hin, dass Betriebe, die der Störfallverordnung unterstellt sind und für welche eine Risikoermittlung erforderlich ist, ausserhalb ihres Geltungsbereichs liegen und damit nicht abgedeckt sind. Diese Publikation schliesst diese Lücke.

Die normative Erdbebeneinwirkung für den Nachweis der Erdbebensicherheit (Bemessung oder Überprüfung) von Bauten wird durch verschiedene Parameter bestimmt. Zu diesen Parametern gehören:

- die dynamischen Kenngrössen des Bauwerks (Resonanzfrequenzen und modale Formen aus der dynamischen Modellierung),
- Erdbebengefährdung (Erdbebenzone und Baugrundklasse, spektrale Standort- oder Mikrozonierungsstudien),
- die Bauwerksklasse (BWK).

Tab. 1: Bedeutungsbeiwerte in der Norm SIA 261 [4] in Abhängigkeit der Bauwerksklassen

Bauwerksklasse	Bedeutung und Gefährdungspotenzial	Bedeutungsbeiwert γ_f	Wiederkehrperiode (Jahre) basierend auf SUIHAZ15
BWK I	Gewöhnliche Gebäude Schädigung der Umwelt* ausgeschlossen	1,0	475
BWK II	Grosse Menschenansammlungen Besonders wertvolle Güter und Einrichtungen Bedeutende Infrastrukturfunktion	1,2	~650
BWK III	Lebenswichtige Infrastrukturfunktion	1,5	~1000

* zur Umwelt «gehören Luft, Wasser, Land, natürliche Ressourcen, Flora, Fauna, der Mensch sowie deren Wechselbeziehungen» gemäss SIATerm <https://term.sia.ch>

Die Beurteilung der Erdbebensicherheit eines bestehenden Bauwerks erfolgt mithilfe des Erfüllungsfaktors α_{eff} des Bauwerks (Norm SIA 269/8 [5]). Sie basiert auf einer rechnerischen Überprüfung der Erdbebensicherheit eines Bauwerks und wird ergänzt durch eine konzeptionelle und konstruktive Beurteilung.

Der Erfüllungsfaktor α_{eff} beschreibt, in welchem Mass ein bestehendes Tragwerk die normativen Anforderungen bezüglich Erdbebensicherheit zu erfüllen vermag. Erreicht der Erfüllungsfaktor den Wert 1,0, so erfüllt das Bauwerk die Anforderungen vollumfänglich und hat die gleiche Sicherheit bei Erdbeben, wie sie auch für Neubauten gefordert wird. Ist $\alpha_{\text{eff}} < 1,0$, sind die Anforderungen nur teilweise erfüllt.

Bestehende Bauwerke müssen je nach Bauwerksklasse einen Mindest Erfüllungsfaktor von 0,25 oder 0,40 aufweisen (siehe Tab. 2).

Tab. 2: Mindest Erfüllungsfaktoren gemäss Norm SIA 269/8 [5] in Abhängigkeit der Bauwerksklasse

Bauwerksklasse	Bemerkungen	Mindest Erfüllungsfaktoren α_{min}
BWK I	Analog Tabelle 1	0,25
BWK II	Analog Tabelle 1	0,25
BWK II-s	Schulen und Kindergärten	0,40
BWK II-i	Bedeutende Infrastrukturfunktion	0,40
BWK III	Analog Tabelle 1	0,40

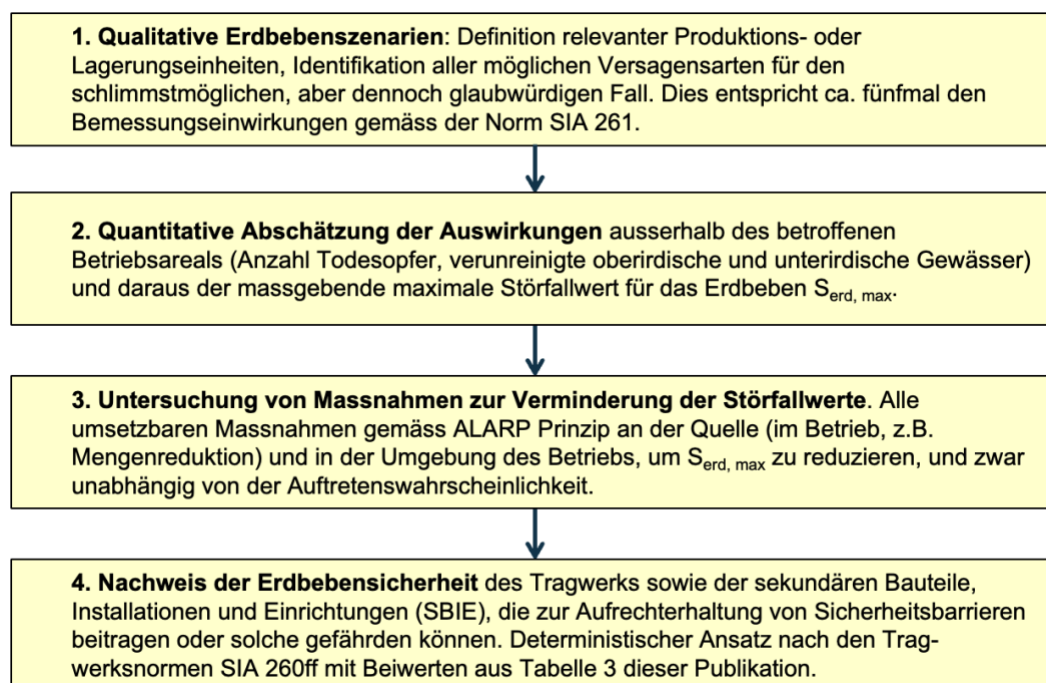
Gemäss Norm SIA 269/8 [5] kommen für Bauwerke mit Umweltgefährdung (aber ohne Pflicht zur Risikoermittlung) die BWK II, II-i oder III infrage.

Wenn der geforderte Mindest Erfüllungsfaktor erreicht ist, müssen weitere Massnahmen nur ergriffen werden, wenn diese verhältnismässig sind. Gemäss Norm SIA 269/8 [5] sind Massnahmen dann verhältnismässig, wenn die mit ihnen verbundene, in Geldeinheiten bewertete Risikoreduktion grösser ist als die Kosten der Erdbebensicherheitsmassnahmen. Bei einem ungünstigen Verhältnis von Risikoreduktion zu Kosten im Bereich der schweren Schädigung, d. h. bei Störfallwerten grösser oder gleich 0,3, sind hingegen für die Beurteilung der Verhältnismässigkeit durch die Behörde neben den Kosten auch weitere Aspekte einzubeziehen (vgl. Kap. 4.4.2).

4 Verfahren zur Berücksichtigung von Erdbeben in der Störfallvorsorge

Abb. 3: Schematische Darstellung des Verfahrens zur Berücksichtigung von Erdbeben in der Störfallvorsorge

Die Grundsätze des Verfahrens sind im Anhang B aufgezeigt.



4.1 Qualitative Erdbebenszenarien

Der erste Schritt zur Berücksichtigung von Erdbeben in der Störfallvorsorge besteht darin, eine realistische Vorstellung davon zu bekommen, «was infolge eines Erdbebens alles passieren kann». Hierzu sind mögliche Szenarien zu entwickeln, wie es infolge eines Erdbebens zu einem Störfall kommen kann (siehe auch das Beispiel im Anhang A.1).

Zuerst sind alle Anlagen aufzulisten, deren Gefahrenpotenzial einzeln oder in Kombination miteinander ausreicht, um beim Versagen einen Störfall auslösen zu können. Unter einem Störfall wird nach Art. 2 Abs. 4 StFV ein ausserordentliches Ereignis verstanden, bei dem erhebliche Auswirkungen ausserhalb des Betriebsareals

auftreten³. Daraus ergeben sich die relevanten Produktions- oder Lagerungseinheiten, die im Erdbebenszenario zu berücksichtigen sind.

Das Besondere bei Erdbeben ist, dass zahlreiche Anlagen gleichzeitig miteinander versagen können. Das gleichzeitige Versagen von mehreren Anlagen oder Anlagenteilen hat das Potenzial, dass grössere Stoffmengen freigesetzt werden können (siehe auch die quantitativen Annahmen im Kap. 4.2); zudem ist seitens des Gefahrenpotenzials zu überlegen, ob das gleichzeitige Versagen mehrerer Tanks oder Leitungen zur Reaktion der Einzelstoffe miteinander oder mit ebenfalls freigesetztem Wasser und somit zu einem Stoffgemisch führen könnte, welches gefährlicher ist als die Summe der Gefahrenpotenziale der einzelnen Stoffe.

Nach der Erfassung aller zu berücksichtigenden Produktions- oder Lagerungseinheiten, sind die zugehörigen Störfallszenarien für die potenziellen Versagensarten in Folge Erdbebeneinwirkung zu identifizieren. Das für den Credible Worst Case anzunehmende Erdbeben beansprucht die Anlagen ca. fünfmal stärker (Wiederkehrperiode in der Grössenordnung von 10 000 Jahren⁴) als die elastischen Einwirkungen gemäss der Norm SIA 261 [4] und entspricht etwa einer Intensität von IX bis X auf der Europäischen Makroseismischen Skala [28]. Obwohl es sich um geringe Eintretenswahrscheinlichkeiten handelt, sind diese nicht so gering, dass sie aus der Sicht der Störfallvorsorge vernachlässigt werden können.

Bei solchen Bodenbewegungen stürzen viele Gebäude (Mauerwerksgebäude, Stahlbetongebäude, insbesondere in Skelettbauweise ...) komplett oder teilweise ein. Die meisten freistehenden Tanks versagen, Tanks auf Stützen fallen herunter und schlagen leck, was zur kontinuierlichen Freisetzung ihres Inhalts führt. Viele Rohrleitungen versagen insbesondere bei Anschlüssen an Gebäuden und Tanks. Regallager stürzen zusammen. Schwache Böden versagen und verursachen (differentielle) Setzungen, die insbesondere bei Anlagen mit Einzel- oder Streifenfundamenten Risse verursachen. Auffangwannen, die nicht mindestens teilweise erdverlegt sind, erfahren Risse, was zum Ausfliessen des Havarieguts führt. Bei besonders ungünstigen Böden erfahren auch erdverlegte Auffangwannen Risse, was zur langsamen Versickerung des Havarieguts führt.

Diese Beschreibung ist nicht abschliessend und zeigt qualitativ mögliche Auswirkungen des zu berücksichtigenden Credible Worst Case Szenarios in der Schweiz. Je nach Erdbebenzone und geologischem Untergrund können die Auswirkungen variieren.

Neben den primär auftretenden Bodenbeschleunigungen sind auch mögliche sekundäre Erdbebeneffekte zu berücksichtigen, wie etwa Bodenverflüssigung oder Hangrutschungen (siehe Kap. 3.1). Wichtig ist vor allem, die potentiellen Versagensarten möglichst umfassend zu berücksichtigen.

³ Darunter ist die Freisetzung von toxischen oder ökotoxischen Stoffen, Zubereitungen, Sonderabfällen oder von Gefahrgütern zu verstehen inklusive Brände und Explosionen, die ausserhalb der Anlage sichtbar (z. B. Rauchentwicklung) und wahrnehmbar sind (z. B. starke Geruchsbelästigung) und die Bevölkerung oder die Umwelt beeinträchtigen.

⁴ Das für den Credible Worst Case anzunehmende Erdbeben wurde so gewählt, dass es zum einen von der Wahrscheinlichkeit her nach den Beurteilungskriterien zur StFV relevant ist und zum anderen eine möglichst einfache und pragmatische Abschätzung des Versagens der Anlagen resp. Anlagenteile ermöglicht. Das 10 000-jährige Erdbeben wird dabei nur zur Ausmasseneinschätzung verwendet. Die Bedeutungsbeiwerte für den Nachweis der Erdbebensicherheit leiten sich nach Tabelle 3 ab und beziehen sich auf geringere Wiederkehrperioden von Erdbeben.

4.2 Quantitative Abschätzung der Auswirkungen

Für die erarbeiteten Erdbebenszenarien sind die Auswirkungen ausserhalb des betroffenen Betriebsareals, d. h. die zugehörigen Störfallwerte in Anlehnung an die Module des Handbuchs zur Störfallverordnung [2][8] abzuschätzen (Schätzung der Anzahl Todesopfer, der Flächen verunreinigter oberirdische Gewässer, etc.) und daraus ist der massgebende maximale Störfallwert für das Erdbeben $S_{\text{erd, max}}$ abzuleiten. Um zu verhindern, dass mit einem ca. 10 000-jährlichen Erdbeben überkonservative Ergebnisse bei der Ausmasseinschätzung resultieren und abweichend von der Ausmasseinschätzung bei den anderen Versagensursachen wie z. B. technischem Versagen oder Materialfehlern, sollte der massgebende Störfallwert ($S_{\text{erd, max}}$) nicht mit den nachfolgend schlimmstmöglichen Bedingungen bezüglich Freisetzungsmengen, Windrichtung für die Ausbreitung einer toxischen Gaswolke oder bezüglich der Annahme der Anzahl betroffenen Personen kombiniert werden. Hier empfiehlt es sich, vernünftige Annahmen zu treffen, welche auch mit einer relevanten Häufigkeit vorkommen und zu einem realistischen zu erwartenden Szenario führen. So sind z. B. die üblicherweise vorherrschenden Windrichtungen zu hinterlegen oder im Alltag realistische Personenbelegungen zu wählen.

Damit von vernünftigen Annahmen ausgegangen werden kann, wird bezüglich Freisetzungsmengen empfohlen, folgende Expertenschätzungen anzunehmen:

- Bei einem einzigen Tank wird angenommen, dass die mittlere jährliche Füllmenge ausfliesst.
- Bei mehreren Tanks wird angenommen, dass $\frac{2}{3}$ der mittleren jährlichen Füllmenge ausfliesst, da zahlreiche Tanks noch gewisse Restmengen zurückhalten dürften.
- $\frac{1}{3}$ der Gebinde, die aus einem Regal herausfallen, schlagen leck, bzw. $\frac{2}{3}$ für ein Hochregallager.
- Wenn es um die Kapazität des Rückhaltevolumens geht, werden Löschwasser und Regen nicht mitberücksichtigt.

Diese Abweichung zur Bestimmung der Schadenausmasse auf Stufe Kurzbericht ist deshalb berechtigt, weil bei der Versagensursache Erdbeben der $S_{\text{erd, max}}$ direkt zur Bestimmung der Erdbebenbemessung (Tabelle 3) verwendet wird und in der Regel nicht noch eine genauere und weniger konservative Risikoermittlung erstellt wird.

Bei der Festlegung des massgebenden maximalen Störfallwerts ist zu berücksichtigen, dass auch ausserhalb des Betriebsareals mit schweren Schäden zu rechnen ist und diese einen Einfluss auf die störfallinduzierten Auswirkungen haben. Schon nach einem «mässig» starken Erdbeben dürften beispielsweise zahlreiche Fensterscheiben geborsten sein, so dass man innerhalb von Gebäuden nicht mehr vor einer Giftgaswolke geschützt wäre. Bei einem stärkeren Beben werden zahlreiche Gebäude einstürzen und Fluchtwege versperrt sein. Auch kann die Ausmassbegrenzung durch versagende passive und aktive Sicherheitsmassnahmen beeinträchtigt sein.

Da von Erdbeben ausgelöste Störfälle gemäss der vorliegenden Publikation für sich alleine (unabhängig von den anderen Versagensursachen und Störfallszenarien) betrachtet und massnahmenorientiert angegangen werden, müssen keine neuen Risikoermittlungen aufgrund dieser neuen Störfallwerte erstellt werden und bestehende Risikoermittlungen müssen nicht angepasst werden.

Hinweis: Bei der Abschätzung der Auswirkungen eines extrem starken Erdbebens und des von diesem ausgelösten Störfalls darf man nicht davon ausgehen, dass die Umgebung des betrachteten Betriebsareals dann ebenfalls derart starke Schäden erlitten hat, dass dort die meisten Menschen ohnehin – auch ohne Störfall – bereits tot seien. Bei der für die Schweiz typischen Bausubstanz überleben im statistischen Mittel etwa 80 bis

90 % der Personen, die sich in einem Gebäude aufhalten, das einstürzt [29]. Zahlreiche Überlebende, in der Regel verletzte Personen, sind unmittelbar nach dem Erdbeben in den Trümmern gefangen und damit einer möglichen toxischen Wolke im Wesentlichen schutzlos ausgesetzt. Zudem sind Rettungsmassnahmen in einem grossflächigen Schadensgebiet wie nach einem Erdbeben sowieso schon erschwert. Einsatzkräfte dürften gerade bei schweren Erdbeben kaum die Kapazität für die zusätzlich geforderten Ressourcen durch einen gleichzeitig ausgelösten Störfall bei einem Chemiebetrieb haben. Zudem gilt es zu beachten, dass sowohl die Selbst- wie die Fremdrettung erschwert bzw. die üblichen Annahmen hinsichtlich der Voraussetzungen für eine Intervention grösstenteils nicht mehr gegeben sein dürften. Deshalb kommen baulichen und technischen Massnahmen zur Vermeidung resp. Beherrschung von Auswirkungen bei Störfällen im Falle von Erdbeben eine besondere Bedeutung zu.

4.3 Untersuchung von Massnahmen zur Verminderung der Störfallwerte

4.3.1 Massnahmen zur Herabsetzung des Gefahrenpotenzials

Bei einem Betrieb, bei dem Störfälle infolge eines Erdbebens mit $S_{\text{erd, max}} \geq 0,3$ möglich sind, soll in einem ersten Schritt versucht werden, den massgebenden maximalen erdbebeninduzierten Störfallwert $S_{\text{erd, max}}$ zu reduzieren, und zwar unabhängig der Eintretenswahrscheinlichkeit. Dazu werden verschiedene, grundsätzlich umsetzbare Massnahmen an der Quelle (im Betrieb) und in der Umgebung des Betriebs untersucht.

Zur Ermittlung von Massnahmen an der Quelle sollte geprüft werden, ob:

- die gelagerte Menge an gefährlichen Stoffen verringert werden kann. Dies kann z. B. über eine Optimierung der Lagerhaltung oder des Produktionsprozesses erreicht werden. Alternativ kann ggf. geprüft werden, ob der gefährliche Stoff erst unmittelbar vor dem Gebrauch aus unkritischen Stoffen vor Ort produziert werden kann.
- die gefährlichen Stoffe durch andere Stoffe ohne oder mit geringerem Gefahrenpotenzial (keine oder höhere Mengenschwelle gemäss Störfallverordnung) ersetzt werden können.
- für die Lagerung oder Produktion ein anderer Standort innerhalb des Betriebsareals gewählt werden kann, an dem weniger Schutzgüter (Bevölkerung, Gewässer ...) durch einen Störfall betroffen wären.

4.3.2 Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen

Grundsätzlich gehören zu den Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen alle Massnahmen, die nach [30]:

- eine «Freisetzung» (Stoffe/ Energien)
 - zurückhalten oder
 - unschädlich machen,
- das Ereignis bekämpfen,
- die Interventionskräfte alarmieren.

Diese Massnahmen werden in den folgenden Kapiteln kategorisiert. Die Reihenfolge der Kategorien entspricht einer abnehmenden Zuverlässigkeit der Massnahmen. Die meisten Massnahmen sind nicht spezifisch hinsichtlich eines Erdbebenereignisses. Diese Massnahmen erlauben es i.d.R. nicht, das Ausmass (den Störfallwert $S_{\text{erd, max}}$) zuverlässig zu reduzieren, weil sie durch ein starkes Erdbeben selbst zerstört werden können. Sie können sich aber positiv auf die Reduktion der Wahrscheinlichkeit und somit auf die Risikoreduktion auswirken. Allfällige Ausnahmen diesbezüglich, d. h. Massnahmen, von denen man ausgeht, dass sie bei dem im Kapitel 4.1 beschriebenen Credible Worst Case Szenario funktionstüchtig bleiben, müssen in der Szenariobeschreibung entsprechend begründet werden.

4.3.2.1 Bauliche Massnahmen

Gefährliche Stoffe können durch bauliche Massnahmen eingeschlossen, voneinander getrennt oder zurückgehalten werden, womit eine Freisetzung von Stoffen infolge eines Erdbebens verhindert oder begrenzt wird.

Diese passiven Massnahmen müssen gemäss Kapitel 4.4 bemessen werden und aufgrund dieser Bemessung kann $S_{\text{erd, max}}$ reduziert und damit das Erdbebenszenario im Kapitel 4.1 entsprechend angepasst werden.

Folgende baulichen Massnahmen könnten umgesetzt bzw. berücksichtigt werden [30]:

- Rückhaltesysteme (z. B. Auffangwannen, abflusslose Becken). Damit wird v. a. das Ausfliessen von wassergefährdenden Flüssigkeiten verhindert, aber auch die Verdunstungsfläche von toxischen Flüssigkeiten gering gehalten. Die Bemessung und die Dichtheit hinsichtlich Erdbeben müssen gemäss Kapitel 4.4 geprüft werden.
- Doppelwandige Gebinde/Leitungen, um die Wahrscheinlichkeit eines Leckschlagens durch den Anprall von Trümmern zu minimieren.
- Erdverlegte Tanks, um die Tankhülle vor Trümmerwurf zu schützen und die Erdbebeneinwirkungen zu reduzieren.
- (Gas-)dichtes Containment mit Erdbeben-Bemessung gemäss Kapitel 4.4
- (Explosions-)druckfeste Bauweisen, die i.d.R. ebenfalls Erdbeben-Einwirkungen widerstehen.
- Rückhaltevorrichtung an der Quelle zur Eindämmung des Trümmerwurfs oder Schutzvorrichtungen (Abschirmung) gegen Trümmerwurf bei empfindlichen Anlagen.
- Brandabschnittsbildende Massnahmen wie Brandmauern mit Erdbebenbemessung gemäss Kapitel 4.4. Weitere Massnahmen zur Brandabschnittbildung, deren Gebrauchstauglichkeit nach einem Erdbeben zuverlässig nachgewiesen werden kann.
- Einhaltung der Mindestabstände zwischen Bauwerken zur Verhinderung der Ausbreitung von Bränden.

Zudem kann geprüft werden, ob mit Massnahmen in der unmittelbaren Umgebung des Betriebs die Ausbreitung von freigesetzten Stoffen oder die Reichweite von Trümmerwurf verringert werden können. Z. B. durch die Zurückhaltung des Gefahrguts (toxische Wolke, toxische Flüssigkeit) in Mauern oder (grünen) Schutzwällen, insbesondere in Kombination mit einer Lärmschutzkonstruktion.

4.3.2.2 Technische Massnahmen

Die Lagerbedingungen können die Auswirkungen eines Störfalls verringern:

- Kaltlagerung toxischer Flüssigkeiten oder Gase, um die Verdunstungsrate bei einer Freisetzung zu reduzieren.

Andere technische Massnahmen dienen primär dem Entdecken eines Ereignisses und der Alarmierung sowie dem Auslösen von möglichst automatischen Sicherheitssystemen bzw. -massnahmen. Sie gelten als aktive Massnahmen, die bei einem Erdbeben versagen können, die aber einen Beitrag zur Begrenzung der Auswirkungen leisten könnten. Das Entdecken eines Ereignisses erfolgt z. B. mit den folgenden Systemen (Aufzählung nicht abschliessend):

- Rauchmelder, Wärmesensoren (Teil einer Brandmeldeanlage)
- Gassensoren, Flüssigkeitssensoren, Überfüllsicherungen
- Druckmessungen in Drucktanks oder Leitungen
- Federbelastete Sicherheitsventile, die bei Energieausfall (Stromausfall, Ausfall Steuerdruckluft, Signalausfall, etc.) in einen sicheren Betriebszustand übergehen («fail safe-Verhalten»).
- Beschleunigungs- oder Geschwindigkeitssensoren (on site Early Warning [31])

Solche Systeme können automatisch, zusätzlich zur Alarmierung der Ereignisdienste, folgende Sicherheitssysteme auslösen, die situativ einen Mehrwert darstellen können (sogenannte Reflexe, Aufzählung nicht abschliessend):

- Akustische oder optische Alarmer (z. B. Lautsprecheranlage, Blitzlichter, Drehleuchten)
- Notabschaltungen oder Noteinschaltungen (z. B. von Strom oder Pumpen)
- Notregelungen für das Entgiften / Neutralisieren / Quenchen
- Niederschlagen von Gas oder Rauch (z. B. Sprühwasservorhang)
- Notkühlung
- automatisches Schliessen von z. B. Rückhaltebarrieren, Absperrvorrichtungen im Abwassersystem, Schnellschlussventilen (*Hinweis: Wenn dadurch Leitungsabschnitte isoliert und so Flüssigkeiten oder Gase eingeschlossen werden, muss eine Überdruckentlastung der betroffenen Abschnitte gewährleistet werden. Nach einem Erdbeben kann es länger dauern, bis die Armaturen wieder geöffnet werden. Ohne Überdruckentlastung können isolierte Leitungsabschnitte bersten.*)
- Sturm-/Notlüftung
- Löschanlage (z. B. Sprinkler, CO₂ Anlage)

Bei Erdbeben besteht die Möglichkeit, lokale (*on site*), regionale oder hybride Frühwarnungssysteme (*Earthquake Early Warning EEW*) gezielt zu verwenden [31]. Die Vorwarnzeiten für die Schweiz hängen von der Dichte der seismischen Stationen im Epizentralgebiet und von der Distanz zum Epizentrum ab [32]. Bei grossen Schadensbeben könnten sinnvolle Vorwarnzeiten relativ weit weg vom Epizentrum 10s überschreiten. Diese mögliche kurze Vorwarnzeit kann für automatische Steuerungen wie Schieberschliessungen bei Gasleitungen etc. oder zur Warnung der Bevölkerung angewendet werden [33] [34]. Die Zone um das Epizentrum, wo keine Vorwarnzeit für ein regionales EEW besteht (siehe [33] für die Schweiz), obwohl dort die Bodenbewegungen am stärksten sind (abgesehen von Standorteffekten), relativiert die Relevanz dieses Systems für die Störfallvorsorge.

Andere seismologische Produkte für die Schweiz wie beispielweise operationelle Erdbebenprognosen könnten in Zukunft im Bereich Störfallvermeidung mögliche Anwendungen haben [35].

4.3.2.3 Organisatorische Massnahmen

Das Risikomanagement inkl. Kontinuitätsmanagement des Betriebs sollte das Erdbebenrisiko berücksichtigen. Es gilt:

- Der Betrieb hat eine Notfallorganisation, inkl. Ersteinsatz von Mitarbeitenden in der Schadensbegrenzung und Information/Alarmierung der Nachbarschaft und ggf. der ARA. Der Umfang der Notfallorganisation ist der Grösse des Betriebes anzupassen. Es sollten regelmässige Schulungen und Übungen mit Bezug zu störfallrelevanten Ereignissen (inkl. den störfallrelevanten Erdbebenszenarien) durchgeführt werden.
- Der Betrieb stellt die Verfügbarkeit, das Funktionieren und die Zugänglichkeit von betriebs- bzw. störfall-spezifischen Einsatzmitteln auch im Falle eines Erdbebens bestmöglich sicher (siehe [7]).

4.4 Nachweis der Erdbebensicherheit

4.4.1 Bemessung der baulichen Massnahmen

Der Nachweis der Erdbebensicherheit ist durch eine im Erdbebeningenieurwesen spezialisierte Bauingenieurin oder einen Bauingenieur zu erbringen. Beim Nachweis der Erdbebensicherheit wird erwartet, dass ein Dokument mit genügend Informationen für eine Plausibilitätskontrolle erstellt und eingereicht wird. Das Tragwerk sowie die sekundären Bauteile, Installationen und Einrichtungen (SBIE), die zur Aufrechterhaltung von Sicherheitsbarrieren beitragen oder solche gefährden können, müssen deterministisch nach den Tragwerksnormen SIA 260ff auf Erdbeben bemessen werden. Die Auslegung sicherheitsrelevanter SBIE ist auf die entsprechende BAFU-Publikation [6] abzustützen. Ergänzend kann die VCI-Publikation «Der Lastfall Erdbeben im Anlagebau» [37] berücksichtigt werden. Im Anhang E werden typische Massnahmen zur Erhöhung der Erdbebensicherheit für verschiedene Anlagentypen aufgelistet.

Die in der Norm SIA 261 [4] definierte Erdbebeneinwirkung ist mit einem sogenannten Bedeutungsbeiwert gemäss Tabelle 3 zu multiplizieren, der vom maximalen Störfallwert abhängt, der sich ergäbe, falls die entsprechende Sicherheitsbarriere versagen würde. Unterschiedliche Bedeutungsbeiwerte entsprechen im Wesentlichen unterschiedlichen Wiederkehrperioden der einwirkenden Bodenbeschleunigung infolge eines Erdbebens.

Der Nachweis der Erdbebensicherheit umfasst die Aufrechterhaltung der Sicherheitsbarriere. Für Behälter oder Reservoirs heisst das beispielsweise, dass die Dichtigkeit gewährleistet wird und für sicherheitsrelevante Einrichtungen wie beispielsweise Sprinkleranlagen die Funktionstüchtigkeit erhalten bleiben muss.

Was neu und unabhängig projektiert und ausgeführt wird, ist entsprechend den Regeln für neue Bauten zu bemessen. Bei neuen Produktions- oder Lagerungseinheiten (z. B. neuer Tank im Freien) ist der Erdbebensicherheitsnachweis für die volle Erdbebeneinwirkung zu erbringen. Eine eigenständige neue Sicherheitsmassnahme (z. B. Rückhaltebecken) ist ebenfalls als Neubau zu projektieren.

Bei bestehenden Produktions- oder Lagerungseinheiten (z. B. Ersatz eines Tanks oder eines Reaktionsgefässes im bestehenden Bauwerk) ist für die bestehende Anlage nachzuweisen, dass die Erdbebensicherheit für die mit dem sogenannten Mindesterfüllungsfaktor multiplizierte Erdbebeneinwirkung gewährleistet wird. Generell soll dabei versucht werden, den darüberhinausgehenden Zielerfüllungsfaktor zu erreichen. Ist dies technisch nicht möglich bzw. mit unverhältnismässig hohen Kosten verbunden, sind die entsprechenden Abklärungen und Überlegungen zu dokumentieren (siehe Kap. 4.4.2). Die Ziel- resp. Mindesterfüllungsfaktoren sind der Tabelle 3 zu entnehmen.

Unter der Voraussetzung, dass das Gefahrenpotenzial beim Ersatz eines bestehenden Tanks oder Reaktionsgefässes durch einen neuen Tank oder ein neues Reaktionsgefäss nicht erhöht wird und nicht zugleich die ganze Produktions- oder Lagerungseinheit ersetzt wird oder schon dem Neubauniveau entspricht, kann der Ersatz wie eine bestehende Anlage dimensioniert werden.

Im Gegensatz zur Norm SIA 269/8 [5] wird für bestehende Produktions- oder Lagerungseinheiten mit dem Potenzial zu schweren Schädigungen ($S_{\text{erd, max}} \geq 0,3$) ein Zielerfüllungsfaktor von 0,5 angestrebt – der Faktor 1,0 würde dem Neubauniveau entsprechen. Es wird davon ausgegangen, dass ihr Risiko damit genügend reduziert wird. Weitere verhältnismässige Massnahmen zwischen 0,5 und 1,0, analog zur Norm SIA 269/8 [5], werden nicht gefordert, können aber freiwillig umgesetzt werden (siehe Kap. 4.4.2).

Tab. 3: Bedeutungsbeiwerte, Mindest- und Zielerfüllungsfaktoren für den Nachweis der Erdbebensicherheit für die relevanten Anlagen (siehe Kap. 4.1)

Gemäss Norm SIA 261 [4] (Tabelle 25) sind Anlagen, die mit der potenziellen Freisetzung von Gefahrstoffen in unmittelbarem Zusammenhang stehen, mindestens der BWK II zuzuordnen.

Maximaler Störfallwert	Bauwerksklasse nach SIA 261	Bedeutungsbeiwert γ_f (neue und bestehende Anlagen)	Zielerfüllungsfaktor α_z (bestehende Anlage)***	Mindesterfüllungsfaktor α_{min} (bestehende Anlage)
Todesopfer oder Schädigungen von oberirdischen oder unterirdischen Gewässern ausserhalb des Betriebsreals gemäss Beurteilungskriterien zur StFV [8] ausgeschlossen	BWK II	1,2		0,25
$S_{erd, max} < 0,3$	BWK III*	1,5*		0,40
$0,3 \leq S_{erd, max} < 0,45$	—**	2,2	0,5	0,27
$0,45 \leq S_{erd, max} < 0,6$	—**	3,0	0,5	0,20
$S_{erd, max} \geq 0,6$	—**	4,0	0,5	0,15

* Bei Zuordnung in BWK III wird im Gegensatz zu den Anforderungen der Norm SIA 261 im Rahmen der Anwendung dieser Publikation kein weiterer Nachweis der Gebrauchstauglichkeit verlangt.

** nicht im Geltungsbereich der Norm SIA 261 [4]. Die Mindestbefüllungs-faktoren multipliziert mit dem Bedeutungsbeiwert entsprechen dem Wert der BWK III ($2,2 \times 0,27 = 3,0 \times 0,20 = 4,0 \times 0,15 = 1,5 \times 0,4 = 0,60$) und sind als ein absolutes Minimum zu verstehen.

*** Für bestehende Anlagen sind Massnahmen zur Erreichung des Zielerfüllungsfaktors erforderlich, falls verhältnismässig im Sinn der Norm SIA 269/8 [5] ($S_{erd, max} < 0,3$) resp. des Kapitels 4.4.2 ($S_{erd, max} \geq 0,3$).

Im Rahmen der Anhörung zum Entwurf der vorliegenden Publikation wurden Bedenken geäussert, ob die Praxis mit Erdbebeneinwirkungen bei Bedeutungsbeiwerten von 4,0 umgehen kann und ob diese für neue Störfallanlagen verhältnismässig sind. Diese Publikation verfolgt keineswegs das Ziel, Investitionen in Neubauten zu verhindern, weil die Kosten für die zusätzlichen Anforderungen im Zusammenhang mit der Erdbebenprävention zu hoch sind. Falls Neubauten mit Schadenpotenzialen von Störfallwerten über 0,45 und den in Tabelle 3 angegebenen Bedeutungsbeiwerten von 4,0 resp. 3,0 nachweislich nicht mit verhältnismässigen Investitionen getätigt werden können, sollten mit der Vollzugsbehörde vernünftige Lösungen gefunden werden. So könnte die neue Anlage z. B. mit einem Bedeutungsbeiwert zwischen 4,0 (resp. 3,0) und 2,2 realisiert werden. Um einen tieferen Bedeutungsbeiwert verwenden zu können, ist aber konzeptionell zuerst aufzuzeigen, dass die Anlage z. B. vom Standort oder der räumlichen Anordnung her nicht derart erstellt werden kann, dass hohe Störfallwerte vermieden werden können. Die Anwendung von tieferen Bedeutungsbeiwerten als 4,0 resp. 3,0 ist immer noch eine deutliche Verbesserung zur aktuellen Praxis. Das BAFU wird diesen Punkt im Rahmen des Monitorings besonders beachten.

Beispiel 1: Ein neuer Chlorgastank mit grösserem Gefahrenpotenzial als bisher soll in einem Gebäude (neu oder bestehend) installiert werden. Sollte der Tank leckschlagen, ist unter Berücksichtigung der hauptsächlich vorherrschenden Windrichtung und Personenbelegung mit einem maximalen Störfallwert von 0,4 zu rechnen. Dann sind sowohl der Tank, die Tragstruktur des Gebäudes sowie auch diejenigen SBIE, deren Versagen die Dichtheit des Tanks gefährden können, gemäss Tabelle 3 mit einem Bedeutungsbeiwert von 2,2 zu bemessen, bzw. nachzuweisen.

Handelt es sich um den Ersatz eines bestehenden Chlorgastanks mit gleichem Volumen (ohne Erhöhung des Gefahrenpotenzials) in einem bestehenden Gebäude, so ist die Erdbebensicherheit zumindest für die mit dem Mindestbefüllungs-faktor von 0,27 multiplizierte Einwirkung für das bestehende Gebäude, den neuen Chlorgastank und die anderen SBIE nachzuweisen, und falls verhältnismässig (siehe Kap. 4.4.2) für den Zielerfüllungsfaktor von 0,5.

Beispiel 2: Ein im Freien stehender Tank mit gekühltem, flüssigem Ammoniak ist von einem Rückhaltebecken umgeben. Falls der Tank leck schlägt, ergibt sich dank der Wirkung des Rückhaltebeckens beim in dieser Publikation zugrunde gelegten Dimensionierungserdbeben mit einer Wiederkehrperiode in der Grössenordnung von 10 000 Jahren ein maximaler Störfallwert von 0,25 (max. 7 Todesopfer ausserhalb des Betriebsareals). Dann reicht es aus, einen neuen Tank mit einem Bedeutungsbeiwert von 1,5 zu bemessen, bzw. die Erdbebensicherheit eines bestehenden Tanks für das 0,4-fache dieser Einwirkung nachzuweisen. Würden aber beim Dimensionierungserdbeben sowohl der Tank wie auch das Rückhaltebecken versagen, ergäbe sich, so sei hier angenommen, ein maximaler Störfallwert von 0,7. Dann ist das Rückhaltebecken gemäss Tabelle 3 für einen Bedeutungsbeiwert von 4,0 zu bemessen, bzw. ein bestehendes Rückhaltebecken für einen Bedeutungsbeiwert von 4,0, multipliziert mit dem Mindesterfüllungsfaktor von 0,15 resp. falls verhältnismässig gemäss Kap. 4.4.2 mit dem Zielerfüllungsfaktor von 0,5 (siehe ausführlichere Darstellung dieses Beispiels in Anhang A).

Anstelle der deterministischen Bemessung der baulichen Massnahmen kann vom Inhaber der Störfallanlage freiwillig auch eine quantitative Risikoanalyse (QRA) erstellt werden. Mit der QRA ist anhand der Beurteilungskriterien im Anhang B (Abb. 5) nachzuweisen, dass der geplante Zustand akzeptabel ist. Die Prüfung einer QRA obliegt den Vollzugsbehörden.

4.4.2 Berücksichtigung der Verhältnismässigkeit (bestehende Anlagen)

4.4.2.1 Allgemeines

Bei der Ermittlung von Sicherheitsmassnahmen für bestehende Anlagen, entweder zur Reduktion der Auswirkungen (gemäss Kap. 4.3) oder zur Gewährleistung der Erdbebensicherheit (Kap. 4.4.1), ist die Verhältnismässigkeit gemäss Art. 5 Bundesverfassung zu berücksichtigen.

Massnahmen zur Erreichung des Mindesterfüllungsfaktors multipliziert mit den Bedeutungsbeiwerten (Tabelle 3) müssen gemäss der vorliegenden Publikation analog zur Norm SIA 269/8 [5] umgesetzt werden. Es sollte allerdings darüber hinaus nach Möglichkeit der Zielerfüllungsfaktor erreicht werden⁵. Zumindest sollte der Zielerfüllungsfaktor soweit angenähert werden, wie dies mit verhältnismässigen Kosten möglich ist.

Die über den Mindesterfüllungsfaktor hinausgehenden verhältnismässigen Massnahmen werden im Rahmen der Interessenabwägung thematisiert und im Sanierungsplan dokumentiert. Die nachfolgenden Kriterien stellen Grundsätze und Richtwerte für die Interessenabwägung bei Störfallwerten $S_{\text{erd, max}} \geq 0,3$ durch die Vollzugsbehörde dar. Die praktische Umsetzung dieser Interessensabwägung wird im Rahmen des Monitorings durch das BAFU besonders beobachtet. Generell besteht bei dieser Interessensabwägung durch die Behörde ein erheblicher Ermessensspielraum. Folgende Kriterien sind bei der Interessenabwägung zu berücksichtigen:

- die Höhe des Störfallwertes $S_{\text{erd, max}}$,
- Vorhandene Massnahmen und deren Umsetzbarkeit,
- die Restnutzungsdauer und Wertschöpfung der Anlage,
- das öffentliche Interesse am Betrieb, inkl. Erhaltung der Arbeitsplätze,
- die vereinfachte Berücksichtigung der finanziellen Verhältnismässigkeit gemäss nachfolgendem Ansatz (Kap. 4.4.2.2).

⁵ Unabhängig von den hier aufgeführten Regeln sind die Anforderungen der Norm SIA 269/8 [5] in Bezug auf die Verhältnismässigkeit zum Schutz der Personen im Gebäude (insbesondere bei Störfallwerten $< 0,3$) im Sinne der Anwendung der anerkannten Regeln der Technik einzuhalten. Das Einhalten dieser Regeln ist damit eine Grundvoraussetzung, um den Anforderungen in Bezug auf die Werkeigentümerhaftung gerecht zu werden.

4.4.2.2 Vereinfachte Berücksichtigung der finanziellen Verhältnismässigkeit in der Störfallvorsorge

Wie in der Norm SIA 269/8 [5] für lebenswichtige und bedeutende Infrastrukturfunktionen beschrieben, ist der Nutzen von Erdbebensicherheitsmassnahmen bei Störfalbetrieben nicht einfach zu erfassen. Der folgende Ansatz orientiert sich an den Festlegungen der Norm SIA 269/8 [5] und dient als Richtwert für die Beurteilung der Verhältnismässigkeit der Erdbebensicherheitsmassnahmen. Die jährlichen Sicherheitskosten SC_M , d. h. die Annuitäten der Investitionskosten für die Massnahmen zur Erdbebensicherheit, werden als nicht verhältnismässig betrachtet, falls sie deutlich höher sind als die Zahlungsbereitschaft für den Schutz vor Störfällen ΔZSt_M :

$$SC_M \gg \Delta ZSt_M$$

Die Berechnung der Annuitäten SC_M wird nach Norm SIA 269/8 [5] inkl. Diskontierung unter Berücksichtigung der Restnutzungsdauer d_r durchgeführt:

$$SC_M = DF \times SIC_M$$

DF Diskontierungsfaktor, pro Jahr [5] gemäss Ziffer 10.7.2 der Norm SIA 269/8 [5]

SIC_M Sicherheitsbezogene Investitionskosten, in Franken. Sie umfassen alle Kosten, die der eigentlichen Erdbebensicherheitsmassnahme angelastet werden müssen und die nicht auf andere Anforderungen (ohnehin nötige Instandsetzungen und Veränderungen) abgewälzt werden können [5]

Der Diskontierungsfaktor DF (pro Jahr) errechnet sich aus der vereinbarten Restnutzungsdauer d_r , und dem Diskontzinssatz i_d [5]:

$$DF = \frac{i_d(1 + i_d)^{d_r}}{(1 + i_d)^{d_r} - 1}$$

i_d Diskontzinssatz. Der Diskontzinssatz i_d ist gemäss Norm SIA 269/8 [5] mit 2 % pro Jahr anzusetzen

d_r Restnutzungsdauer (Anzahl Jahre), entspricht der Dauer der Wirksamkeit der Massnahme

Die Zahlungsbereitschaft für den Schutz vor Störfällen ΔZSt_M wird wie folgt ermittelt:

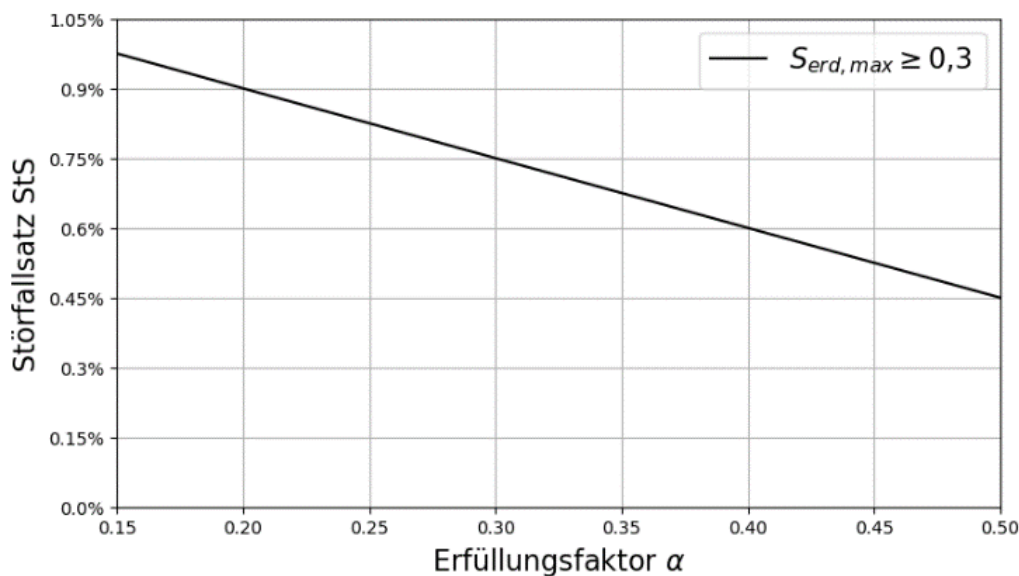
$$\Delta ZSt_M = \Delta StS \times BSW$$

ΔStS Differenz der massgebenden Störfallsätze pro Jahr gemäss Abbildung 4; dabei errechnet sich diese Differenz, indem der Störfallsatz, der sich mit dem Erfüllungsfaktor vor Massnahme bestimmen lässt, vom Störfallsatz, der zum Erfüllungsfaktor nach Massnahme gehört, abgezogen wird

BSW Wert der betrachteten Produktions- oder Lagerungseinheit (Bauwerk sowie die direkt betroffenen Sachen), in Franken gemäss [5] (Wiederbeschaffungswert). Der Betrieb kann die Systemgrenze für seine Abwägungen ausweiten (z. B. die Bedeutung der Anlage für den gesamten Betrieb berücksichtigen)

Abb. 4: Störfallsätze StS für bestehende Anlagen mit $S_{erd, max} \geq 0,3$ in Abhängigkeit des Erfüllungsfaktors α

ΔStS wurde als 3-Mal die Zahlungsbereitschaft für die Infrastrukturfunktion IS [5] festgelegt: Plausibilisiert anhand von Vergleichen mit dem Störfallrisiko und mit den Kosten von durchgeführten und nicht durchgeführten Sanierungen bei Störfallbetrieben.



In der Tabelle 4 werden die maximal verhältnismässigen Kosten für 4 Beispiele aufgezeigt. Alle Produktions- und Lagerungseinheiten haben einen Wert von CHF 10 Mio. Die Restnutzungsdauer beträgt 50 Jahre für die zwei ersten und 10 Jahre für die zwei anderen Beispiele. Die Diskontierungsfaktoren werden wie vorgängig erwähnt ermittelt. Sie hängen bei festgelegtem Diskontzinssatz einzig von der Restnutzungsdauer (Dauer der Wirksamkeit der Massnahme) ab. Die Störfallwerte aufgrund Erdbeben $S_{erd, max}$ betragen jeweils 0,4 oder 0,7. Die Bedeutungsbeiwerte, Mindesterfüllungsfaktoren und Zielerfüllungsfaktoren in Abhängigkeit von $S_{erd, max}$ stammen aus der Tabelle 3. Der Störfallsatz wird in der Abbildung 4 in Abhängigkeit des Erfüllungsfaktors vor und nach den Sicherheitsmassnahmen abgelesen. Um die maximal verhältnismässige Investition zu ermitteln wird der maximale ΔStS aus der Abbildung betrachtet. Die maximale Zahlungsbereitschaft ΔZSt_M (CHF/Jahr) entspricht der Multiplikation von ΔStS mit dem Bauwerkswert. Die maximal verhältnismässigen Investitionskosten für die Erdbebensicherheitsmassnahmen über die betrachtete Restnutzungsdauer ergeben sich aus der Division der Zahlungsbereitschaft durch den Diskontierungsfaktor und betragen für die Beispiele der Tabelle 4 CHF 310 000 bis CHF 1,6 Mio., je nach Situation.

Die Ermittlung der Werte wird zum besseren Verständnis anhand des Beispiels in der ersten Zeile detailliert erklärt.

$BSW = CHF\ 10\ Mio.$	Annahme für das Beispiel
$d_r = 50\ Jahre$	Annahme für das Beispiel
$DF = \frac{i_d(1+i_d)^{d_r}}{(1+i_d)^{d_r}-1} = \frac{0,02 \times (1+0,02)^{50}}{(1+0,02)^{50}-1} = 0,032$	
$S_{erd, max} = 0,4$	Annahme für das Beispiel
$\gamma_f = 2,2$	aus Tabelle 3
$\alpha_{min} = 0,27$	aus Tabelle 3
$\alpha_z = 0,5$	aus Tabelle 3

ΔStS liest sich aus der Abbildung 4 zwischen α_{eff} und dem Erfüllungsfaktor nach Massnahmen. Der max. Wert von ΔStS , unabhängig von α_{eff} und von der Massnahme liest sich zwischen α_{min} und α_z . Für $\alpha_{min} = 0,27$: $StS = 0,80$, für $\alpha_z = 0,5$: $StS = 0,45$ also: $Max. \Delta StS = 0,80 - 0,45 = 0,35 \%$.

Max. Zahlungsbereitschaft $\Delta ZSt_M = \Delta StS \times BSW = 0,0035 \times 10\,000\,000 = 35\,000$ (CHF/ Jahr)

Investition nicht verhältnismässig falls $SIC_M = \frac{SC_M}{DF} > \frac{\Delta ZSt_M}{DF} = \frac{35'000}{0,032} = 1\,100\,000$ (CHF)

Diese 1,1 Mio. CHF sind somit der höchste verhältnismässige Investitionsbetrag, der theoretisch ausgegeben werden müsste. Höhere Massnahmenkosten sind auf alle Fälle nicht verhältnismässig.

Falls das Beispiel in der ersten Zeile einen Erfüllungsfaktor im Ist-Zustand von 0,1 aufweisen würde, müsste unabhängig der Kosten zuerst eine erste Massnahme implementiert werden, um die Anlage auf den Mindesterfüllungsfaktor von 0,27 zu bringen. Eine weitere Massnahme, die den Erfüllungsfaktor von 0,27 auf 0,5 (oder mehr) anhebt, müsste nur dann implementiert werden, falls diese weniger als CHF 1,1 Mio kostet.

Tab. 4: Beispiele für die Berechnung der maximalen verhältnismässigen Investitionskosten

D. h. zwischen Mindesterfüllungsfaktor und Zielerfüllungsfaktor.

BSW (Mio. CHF)	Rest- nutzungs- dauer d_r	Diskontie- rungs- faktor DF	$S_{erd, max}$	Bedeutungs- beiwert γ_f	Mindest- erfüllungs- faktor α_{min}	Ziel- erfüllungs- faktor α_z	Max. ΔStS (%) (Abb. 4)	Max. Zahlungsbereitschaft ΔZSt_M (CHF/ Jahr)	Max. verhältnis- mässige Investition (Mio. CHF)
10	50	0,032	0,4	2,2	0,27	0,5	0,35	35 000	1,1
10	50	0,032	0,7	4,0	0,15	0,5	0,53	53 000	1,6
10	10	0,11	0,4	2,2	0,27	0,5	0,35	35 000	0,3
10	10	0,11	0,7	4,0	0,15	0,5	0,53	53 000	0,5

Die mit diesem Ansatz ermittelte Zahlungsbereitschaft zur Umsetzung von Erdbebensicherheitsmassnahmen zwischen dem Mindesterfüllungsfaktor und dem Zielerfüllungsfaktor ist ein Orientierungswert. Falls der Betrieb die Investition für die Erdbebensicherheitsmassnahmen zur Erreichung des Zielerfüllungsfaktors nicht leisten kann, so hat er aufzuzeigen, welche Konsequenzen der Betrieb zu tragen hätte, wenn die Behörde eine Betriebseinschränkung (z. B. Reduktion der Lagermengen, Stilllegung der Anlage, etc.) verfügen würde. Die Vollzugsbehörde kann dann ihre Interessenabwägung im Lichte der Kosten und der Konsequenzen bezüglich der weiteren relevanten Faktoren durchführen.

Weiter entspricht die Etappierung im Sanierungsplan einem zusätzlichen Hebel zur verhältnismässigen Aufteilung der Kosten der Massnahmen zur Erdbebensicherheit. Im Sanierungsplan soll gezeigt werden, wie und wann der von der Vollzugsbehörde im Rahmen der Interessenabwägung als verhältnismässig festgelegte Erfüllungsfaktor für die relevanten Produktions- oder Lagerungseinheiten erreicht werden kann.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2024: Nationale Vorsorgeplanung Erdbeben, Bern.
- [2] Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2018: Handbuch zur Störfallverordnung (StFV). Allgemeiner Teil. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1807.
- [3] Basler & Hoffmann AG: Erdbebenrisiken und Störfallvorsorge, Behelf zur Einschätzung der Erdbebengefährdung von Bauwerken und Installationen im Geltungsbereich der Störfallverordnung, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft Kanton Zürich (AWEL) und Office cantonal de l'emploi et des affaires extérieures du canton de Genève (OCIRT), Oktober 2001.
- [4] SIA 261, Einwirkungen auf Tragwerke, 2020.
- [5] SIA 269/8, Erhaltung von Tragwerken – Erdbeben, 2017.
- [6] Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2023: Erdbebensicherheit sekundärer Bauteile und weiterer Installationen und Einrichtungen. Empfehlungen und Hinweise für die Praxis. 1. Aktualisierte Auflage 2023; Erstausgabe 2016. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1643: 101 S.
- [7] Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2019: Erdbeben im Notfall- und Kontinuitätsmanagement. Hilfestellung für Infrastrukturbetreiber zur Überprüfung ihrer Vorsorge- und Notfallplanungen. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1903: 30 S.
- [8] Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2018: Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung (StFV). Ein Modul des Handbuchs zur Störfallverordnung (StFV). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1807; 49 S.
- [9] SIA 269, Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken, 2011.
- [10] Wenk T., Grundsätze der Norm SIA 269/8, in *Einführungskurs Norm SIA 269/8*, Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik, Zürich, 2019.
- [11] Baker, J, Bradley B. A. Stafford, P. (2021): Seismic hazard and risk analysis, Cambridge University Press, 581 S.
- [12] Campbell, K.W.; Bozorgnia, Y.: Campbell-Bozorgnia NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters, PEER 2007/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, May 2007.
- [13] Schweizerischer Erdbebendienst (SED) 2016: Seismic Hazard Model 2015 for Switzerland (SUIhaz2015), DOI: 10.12686/a2, Version 30.8.2016, 163 S.
- [14] Bergamo P., Panzera F., Danciu L., Fäh D., 2021. Basis for the determination of waveforms for the sites of dams in Switzerland – Subproject 1: Disaggregation of seismic hazard for return periods of 1000, 5000, 10000 years. Technical Report SED 2021/11, Swiss Seismological Service, ETH Zurich. DOI: 10.3929/ethz-b0005175455
- [15] Bergamo P., Panzera F., Danciu L., Fäh D., 2022. Disaggregation of the seismic hazard at return periods of 475 and 975 years. SED report within the project «Database of design-compatible waveforms», commissioned by the Federal Office of Environment (SFOE – BAFU), DOI: 10.3929/ethz-b-000579210
- [16] Michel, C., Edwards, B., Poggi, V., Burjánek, J., Roten, D., Cauzzi, C., & Fäh, D. (2014). Assessment of site effects in alpine regions through systematic site characterization of seismic stations. Bulletin of the Seismological Society of America, 104(6), 2809–2826.

-
- [17] SIA 261/1, Einwirkungen auf Tragwerke – Ergänzende Festlegungen, 2020.
- [18] Fritsche, S., Fäh, D., & Schwarz-Zanetti, G. (2012). Historical intensity VIII earthquakes along the Rhone valley (Valais, Switzerland): primary and secondary effects. *Swiss Journal of Geosciences*, 105(1), 1–18.
- [19] Nigg, V., Bacigaluppi, P., Vetsch, D. F., Vogel, H., Kremer, K., & Anselmetti, F. S. (2021). Shallow-water tsunami deposits: Evidence from sediment cores and numerical wave propagation of the 1601 CE Lake Lucerne event. *Geochemistry, geophysics, geosystems*, 22(12), e2021GC009753.
- [20] Cruz, A. M., & Suarez-Paba, M. C. (2019). Advances in Natech research: An overview. *Progress in Disaster Science*, 1, 100013.
- [21] eNatech (2023) eNatech: Natural hazard-triggered technological accidents database, European Commission Joint Research Centre, <http://enatech.jrc.ec.europa.eu>
- [22] Krausmann, E., Renni, E., Campedel, M., & Cozzani, V. (2011). Industrial accidents triggered by earthquakes, floods and lightning: lessons learned from a database analysis. *Natural Hazards*, 59, 285–300.
- [23] Girgin, S. (2011). The natech events during the 17 August 1999 Kocaeli earthquake: aftermath and lessons learned. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(4), 1129–1140.
- [24] Krausmann, E., Cruz, A. M., & Affeltranger, B. (2010). The impact of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake on industrial facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23(2), 242–248.
- [25] The Times. (2008). After the quake, 1 m Chinese flee new threat of flooding. www.timesonline.co.uk/tol/news/world/asia/china/article3953911.ece Accessed on the Internet Archive, Version 14.10.2008.
- [26] Krausmann, E., & Cruz, A. M. (2013). Impact of the 11 March 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry. *Natural hazards*, 67, 811–828.
- [27] Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2023: Erdbebensicherheit bei lebenswichtiger Funktion Bauwerke der Bauwerksklasse (BWK) III gemäss der Norm SIA 261. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2310: 40 S.
- [28] Grünthal, G. (1998). European macroseismic scale 1998 (EMS-98), Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 15, Luxembourg.
- [29] Spence R., So E. and Scawthorn C. (2011), Human Casualties in Earthquakes, Advances in Natural and Technological Hazards Research, Vol. 29. Springer.
- [30] Umwelt und Energie Kanton Luzern (uwe) (2023), Massnahmenplanung bei der Störfallvorsorge, Umsetzung von Art. 3 Störfallverordnung in Ihrem Betrieb bzw. auf Ihrer Anlage, Merkblatt, Januar 2023.
- [31] Résonance Ingénieurs-Conseils SA (2014), Potentiel de systèmes de monitoring et d'alerte précoce en cas de séisme pour les infrastructures en Suisse, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- [32] Böse, M., Papadopoulos, A.N., Danciu, L., Clinton, J. and S. Wiemer (2022). Loss-Based Performance Assessment and Seismic Network Optimization for Earthquake Early Warning. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 112 (3), 1662–1677, DOI: 10.1785/0120210298
- [33] Massin, F., Clinton, J., & Böse, M. (2021). Status of earthquake early warning in Switzerland. *Frontiers in Earth Science*, 9, 707654.
- [34] Papadopoulos, A.N., Böse, M., Danciu, L., Clinton, J., and S. Wiemer (2023). A framework to quantify the effectiveness of earthquake early warning in mitigating seismic risk. *Earthquake Spectra*, 39(2), 938–961, DOI: 10.1177/87552930231153424

-
- [35] Böse, M., Danciu, L., Papadopoulos, A., et al. (2024). Towards a dynamic earthquake risk framework for Switzerland. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 24, 583–607, DOI: 10.5194/nhess-24-583-2024
- [36] Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS (2018): Leitfaden Schutz kritischer Infrastrukturen, Bundesamt für Bevölkerungsschutz, Bern.
- [37] Verband der chemischen Industrie (VCI) (2023): Erläuterung zum Leitfaden «Der Lastfall Erdbeben im Anlagebau», Verband der Chemischen Industrie e.V. VCI, Frankfurt. www.vci.de > Services > Leitfäden
- [38] Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS (2013): Glossar der Risikobegriffe.
- [39] SIA 267, Geotechnik, 2013.
- [40] Österreichisches Normungsinstitut ONR (2014): ONR 49000: Risikomanagement für Organisationen und Systeme – Begriffe und Grundlagen.
- [41] Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2016: Erdbeben: Karten der Baugrundklassen. Erstellung und Verwendung. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1603: 48 S.
- [42] Résonance SA und Risk&Safety AG, Erdbebensicherheit bei Betrieben mit Störfallwert > 0,3, Technischer Bericht, Bundesamt für Umwelt, 4.3.2011.
- [43] Résonance SA und Risk&Safety AG, Berücksichtigung von Erdbeben bei Risikostudien zur StfV, Technischer Bericht, Bundesamt für Umwelt, 24.4.2017.
- [44] Résonance SA und Risk&Safety AG, Berücksichtigung von Erdbeben im Rahmen der Störfallverordnung; Pilotstudien – Synthesebericht, Technischer Bericht, Bundesamt für Umwelt, 18.11.2022.
- [45] Koller, M. G., & Kölz, E. (2013). Critical Industrial Facilities: Simply Applying Current Importance Factors γ_I is Not Enough!. In *Seismic Design of Industrial Facilities: Proceedings of the International Conference on Seismic Design of Industrial Facilities (SeDIF-Conference)*, pp. 37–52, RWTH Aachen Wiesbaden: Springer, DOI: 10.1007/978-3-658-02810-7_4
- [46] International Seismological Centre (2023), ISC-GEM Earthquake Catalogue, V10.0, DOI: 10.31905/d808b825

6 Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

ALARP

As Low As Reasonably Practicable

StFV

Störfallverordnung

BGK

Baugrundklasse gemäss SIA 261 [4]

W-A-Diagramm

Wahrscheinlichkeit-Ausmass-Diagramm

BLEVE

Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion

BWK

Bauwerksklasse gemäss SIA 261 [4]

EEW

Erdbeben-Frühwarnung (Earthquake Early Warning)

KNS

Katastrophen und Notlagen Schweiz

NaTech (Katastrophe)

Naturgefahren induzierter technologischer Unfall
(*natural hazard triggered technological accident*)

PGA

Maximale Bodenbeschleunigung (*Peak Ground Acceleration*)

SBIE

Sekundäre Bauteile und weitere Installationen und Einrichtungen

SED

Schweizerischer Erdbebendienst

SIA

Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein

Symbole

 BSW

Wert des Bauwerks und der direkt betroffenen Sachen, in Franken gemäss [5]

 DF

Diskontierungsfaktor gemäss [5]

 d_r

Restnutzungsdauer gemäss [5]

 i_d

Diskontzinssatz gemäss [5]

 IS

Infrastruktursatz gemäss [5]

 SC_M

jährlichen Sicherheitskosten gemäss [5]

 SIC_M

Sicherheitsbezogene Investitionskosten gemäss [5]

 S

Störfallwert

 $S_{erd, max}$

maximaler Störfallwert für das Erdbeben

 StS

Störfallsatz

 ZI_M

Zahlungsbereitschaft für die Sicherstellung der Infrastrukturfunktion gemäss [5]

 ZSt_M

Zahlungsbereitschaft für den Schutz vor Störfällen

 α_{eff}

Erfüllungsfaktor gemäss [5]

 α_{min}

Mindesterfüllungsfaktor gemäss [5]

 Δ

Differenz

 γ_f

Bedeutungsbeiwert

7 Glossar

ALARP	As Low As Reasonably Practicable gemäss folgendem Prinzip des Risikomanagements: «Der Inhaber eines Betriebs [...] muss [zum Schutz der Bevölkerung und der Umwelt] alle zur Verminderung des Risikos geeigneten Massnahmen treffen, die nach dem Stand der Sicherheitstechnik verfügbar, aufgrund seiner Erfahrung ergänzt und wirtschaftlich tragbar sind.» (Art 3. Abs. 1, StFV).
Anlage	Anlagen im Sinne dieser Publikation sind Bauwerke und SBIE (z. B. Tank, Reaktionsgefäss) in einer Produktions- oder Lagerungseinheit.
Aversionsfaktor	Die Risikoaversion ist ein Element in der Bewertung von Risiken, mit dem das Schadensausmass von Grosseignissen überproportional stark gewichtet wird, um damit die besonderen Auswirkungen solcher Ereignisse abzubilden. Der Grad der Risikoaversion lässt sich über den Risikoaversionfaktor (auch kurz Aversionsfaktor) abbilden und so systematisch in die Risikobewertung aufnehmen [38].
Baugrundklasse	Der Einfluss der Baugrundverhältnisse auf die Bodenbewegung durch Erdbeben ist in der Norm SIA 261 [4] durch Einordnung des Bauwerkstandorts in eine Baugrundklasse berücksichtigt.
Bauwerksklasse	Der Schutzgrad wird durch die Einteilung des Bauwerks in eine Bauwerksklasse (BWK) festgelegt [4].
Bedeutungsbeiwert	Beiwert zur Gewichtung der Bauwerksklasse [17] bei der Berücksichtigung der Einwirkungen.
Bemessungsbeben	Fiktives Erdbeben, das die Einwirkungen erzeugt, die für die Bemessung gemäss Norm zu berücksichtigen sind.
Betrieb	Ein Betrieb umfasst alle Anlagen, die in einem engen räumlichen und betrieblichen Zusammenhang stehen [2].
Betriebseinheit	Teile eines Grossbetriebs, für den der Kurzbericht nach Absprache mit der zuständigen Behörde in eine Grunddatendokumentation sowie in Berichte für die einzelnen Betriebseinheiten unterteilt wird [2].
Bodenbeschleunigung	Erdbewegung, die ein Erdbeben erzeugt und die mit der Beschleunigung des Bodens (doppelte Ableitung der Verschiebung) gemessen wird. Die Beschleunigung ist proportional zur Kraft.
Bodenverflüssigung	Scherfestigkeits- und Steifigkeitsverlust von locker gelagertem, wassergesättigtem Boden infolge statischer oder dynamischer Einwirkung [39].
Credible Worst Case Szenario	Schlimmst möglicher dennoch glaubwürdiger Fall. Ein Szenario ist glaubwürdig, wenn es in der menschlichen Erfahrung, im Erfahrungsbereich von Führungskräften oder von Risikoexperten schon vorgekommen ist und ein erneutes Eintreten nicht ausgeschlossen werden kann. Zudem gibt es Szenarien, die gemäss Expertenwissen für möglich gehalten werden und begründet sind, auch wenn sie noch nie eingetroffen sind [40].
Diskontierung	Oder Abzinsung. Bestimmung des Werts einer Zahlung zu einem späteren Zeitpunkt durch die Berücksichtigung eines Zinssatzes.
Erdbebenzone	Die Schweiz ist gemäss Norm SIA 261 [4] in fünf Erdbebenzonen eingeteilt. Jeder Erdbebenzone ist ein Bemessungswert der horizontalen Bodenbeschleunigung a_{gd} zugeordnet.
Erfüllungsfaktor	Der Erfüllungsfaktor ist der Quotient aus der Erdbebeneinwirkung, die zum nominellen Versagen eines Bauteils führt, und dem Überprüfungswert der Erdbebeneinwirkung [5].
Makroseismische Skala und Bezug zu Intensität	Die Intensität beschreibt die Stärke der Bodenbewegungen aus einem Erdbeben auf einer ordinalen Skala. Sie ist damit ortsabhängig. In der Schweiz wird die Europäische Makroseismische Skala 1998 (EMS-98 [28]) mit römischen Zahlen zwischen I und XII angewendet. Die Ermittlung der Intensität basiert auf dem Ausmass der Zerstörung (Bauwerke, Landschaft) und der subjektiven Wahrnehmung des Beobachters. Zudem werden mathematische Beziehungen zwischen Intensität und Bodenbeschleunigung ermittelt, so dass eine «instrumentelle Intensität» basierend auf den Messungen an Erdbebenstationen definiert wird. Die Intensität liefert von der Öffentlichkeit verständlichere Zahlen zwischen I (Beben nicht verspürt) und XII (totale Zerstörung) als die Bodenbeschleunigung (siehe auch www.seismo.ethz.ch).
Mindeste Erfüllungsfaktor	Liegt der Erfüllungsfaktor unter dem Mindeste Erfüllungsfaktor, sind Massnahmen zu treffen, um zumindest den Mindeste Erfüllungsfaktor zu erreichen [5], und zwar unabhängig von den Kosten.
Produktions- oder Lagerungseinheit / Untersuchungseinheit	Ein Teil des Betriebs resp. einer Betriebseinheit, der räumlich und/oder prozesstechnisch abgeschlossen ist und der in Anbetracht der gelagerten Mengen an Stoffen und Zubereitungen für das Erdbebenszenario relevant ist und separat betrachtet werden kann. Gemäss [2] auch als Untersuchungseinheit bezeichnet. Zum Beispiel werden alle Tanks in einem Tankbassin, ein Gebäude mit Produktionsanlagen, ein einziger Tank in einem Rückhaltebecken im Freien als relevante Einheit betrachtet, sofern die Mengenschwellen nach StFV überschritten werden oder von der Einheit unter Berücksichtigung der Versagensursache Erdbeben ein relevantes Störfallszenario ausgehen kann.

Quantitative Risikoanalyse	Die quantitative Risikoanalyse (QRA) bestimmt die Höhe der Risiken als jährlichen Erwartungswert des Ausmasses (in den entsprechenden Einheiten). Dabei werden für alle möglichen Ereignisabläufe und jedes betrachtete Schutzgut (Todesopfer, Umwelt etc.) die Gefährdungskurven des SED mit Fragilitätskurven der betrachteten Bauwerke und SBIE kombiniert und mit den entsprechenden Verlustraten und den Werten der Schutzgüter multipliziert.
SBIE	Sekundäre Bauteile und weitere Installationen und Einrichtungen, die im Falle des Versagens Personen gefährden, das Tragwerk beschädigen, eine bedeutende Infrastrukturfunktion beeinträchtigen, besonders wertvolle Einrichtungen beschädigen oder die Umwelt gefährden können [4]. Siehe auch [6].
Standort- und Mikrozonierungsstudien	Untersuchungen mit dem Ziel der Quantifizierung der lokalen Standorteffekte sowie der Bereitstellung von standortspezifischen Antwortspektren. Dabei wird zwischen punktuellen Standortstudien (für einen einzelnen Standort) und spektralen seismischen Mikrozonierungsstudien (für ein grösseres Gebiet) unterschieden [41] (siehe auch [17]).
Störfallsatz	Faktor zur Berechnung der auf den Zeitraum eines Jahres bezogenen Zahlungsbereitschaft gemäss Gleichung im Kapitel 4.4.2.2 (basiert auf [5])
Störfallwert $S_{\text{erd, max}}$	Massgebender maximaler Störfallwert für das Erdbeben pro betrachtete Produktions- und Lagerungseinheit. Er basiert auf dem Credible Worst Case-Szenario, das den erwarteten Auswirkungen eines Erdbebens mit Wiederkehrperiode von ca. 10 000 Jahren entspricht. Dabei sind für die Auswirkungen (z. B. Windrichtung, Personenbelegung) vernünftige Annahmen zu treffen (siehe Kap. 4.2), um nicht einen zu konservativen Störfallwert zu erhalten.
Zahlungsbereitschaft	Mass für die Bereitschaft der Gesellschaft, in Massnahmen zur Vermeidung eines bestimmten durch Erdbeben induzierten Störfalls zu investieren, auf die Zeitdauer eines Jahres umgerechnet (basiert auf [5]).
Zielerfüllungsfaktor	Erfüllungsfaktor für bestehende Bauwerke, ab dem angenommen wird, dass zusätzliche Massnahmen nicht verhältnismässig sind. Für bestehende Anlagen sind Massnahmen zur Erreichung des Zielerfüllungsfaktors erforderlich, falls verhältnismässig im Sinn der Norm SIA 269/8 [5] ($S_{\text{erd, max}} < 0,3$) resp. des Kapitels 4.4.2 ($S_{\text{erd, max}} \geq 0,3$). Die in dieser Publikation für den Zielerfüllungsfaktor festgelegten Werte wurden gestützt auf Expertenschätzungen der Arbeitsgruppe festgelegt.

Anhang A

Beispiel

Das nachfolgende Beispiel ist fiktiv, aber von einem konkreten Fall inspiriert.

Betrachtet wird ein Industrieareal, auf dem grössere Mengen Ammoniak für die Produktion benötigt werden. Das Ammoniak wird in einem vertikalen, zylindrischen, drucklos betriebenen Kaltlagertank gelagert. Dabei handelt es sich um einen Doppelmanteltank mit einer Lagerkapazität von 1000 t, einem Durchmesser von 16 m und einer Höhe von 14 m. Er ruht auf einer 0,5 m dicken Stahlbetonplatte, welche auf 20 rund 2 m hohen Stützen gelagert ist, die von Bohrpfählen mit circa 15 m Länge getragen werden.

A.1 Qualitative Erdbebenszenarien

Das Verfahren zur Berücksichtigung von Erdbeben sieht als ersten Schritt vor, Erdbebenszenarien qualitativ zu analysieren. Das Ziel besteht darin, die potenziellen Versagensarten zu bestimmen, die bei einem Erdbeben auftreten können. Dabei wird ein Erdbeben angenommen, das 5-Mal stärker ist als das Bemessungsbeben gemäss der Norm SIA 261 [4]. Dies entspricht einer Wiederkehrperiode in der Grössenordnung von 10 000 Jahren.

Es ist a priori schwierig aufgrund rein qualitativer Betrachtungen zu erkennen, welches Versagensszenario auftritt: das Umkippen des Tanks aufgrund Bodenverflüssigung (lockerer sandiger Baugrund) oder das Aufreissen der Tankwände oder des Tankbodens aufgrund der zyklischen Belastung. Dies ist aber im vorliegenden Beispiel insofern nicht von Belang, als bei beiden Versagensszenarien ein schnelles vollständiges Auslaufen des flüssigen Ammoniaks aus dem Tank nicht ausgeschlossen werden kann.

D. h., der Tank dürfte beim Credible Worst Case Szenario ein Totalversagen erleiden. Somit ist für die quantitative Abschätzung nach A.2 die Freisetzung des gesamten Tankinhaltes zu berücksichtigen.

A.2 Quantitative Abschätzung der Auswirkungen

Der Störfallexperte konnte ermitteln, dass sich eine 10 cm tiefe Ammoniak-Lache von einem Radius von circa 70 m ergeben würde. Dabei wurde angenommen, dass die werkseigene Feuerwehr nicht mehr einsatzfähig oder aber bereits anderweitig beschäftigt ist, so dass keine aktive Schadensbegrenzung, etwa durch Abpumpen des Ammoniaks, möglich ist.

Das Ammoniak in der Lache verdampft relativ rasch, so dass sich eine toxische Wolke bildet, die ausserhalb des Betriebsareals je nach Windverhältnissen mehr oder weniger Todesopfer fordern würde. Mit Hilfe eines geeigneten Programmes zur Berechnung der Ausbreitung von Schadstoffen lassen sich diese Auswirkungen berechnen. Bei realistischen, häufig vorkommenden Wetterbedingungen könnten über 100 Todesopfer die Folge sein, was einem Störfallwert von grösser als 0,6 entspricht.

A.3 Massnahmen zur Verminderung der Auswirkungen

Gemäss dem Verfahren zur Berücksichtigung von Erdbeben in der Störfallvorsorge sind alle Sicherheitsmassnahmen zu untersuchen, die erlauben, die massgebenden maximalen Störfallwerte zu verringern, und zwar unabhängig von den Eintretenswahrscheinlichkeiten der zugehörigen Störfallszenarien.

Die naheliegendste Massnahme wäre die starke Reduktion der maximalen Füllmenge des Ammoniak tanks. Diese Massnahme würde den massgebenden maximalen Störfallwert deutlich verringern. Nach sorgfältiger Analyse der Lagerhaltung und Supply Chain wurde gezeigt, dass die Füllmenge nicht massgebend reduziert werden kann.

Da der maximale Störfallwert $S_{\text{erd, max}} > 0,6$ beträgt, müsste die Erdbebensicherheit des bestehenden Tanks für einen Bedeutungsbeiwert von $\gamma_f = 4,0$, multipliziert mit dem Zielerfüllungsfaktor von 0,5, also für einen Faktor von 2,0 nachgewiesen werden können.

Da aber schon ab $\gamma_f = 1,2$ mit Bodenverflüssigung zu rechnen ist, müsste die Pfahlfundation massiv verstärkt werden, denn die Pfähle sind im Wesentlichen unbewehrt. Dieses Unterfangen wäre mit sehr hohen Kosten verbunden. Alternativ wäre es theoretisch möglich, mit Hilfe eines sogenannten Jettings eine Bodenverbesserung zu erzielen, so dass im Umfeld des Tanks keine Bodenverflüssigung mehr auftreten würde. Die Umsetzung dieses Vorhabens wäre aber mit nicht zu unterschätzenden Risiken verbunden; tatsächlich lassen sich keine Referenzen für ein Jetting unterhalb einer bestehenden Anlage in einem industriellen Umfeld mit zahlreichen unterirdisch vorhandenen Leitungen finden. Zusätzlich zur Verstärkung der Pfahlfundation oder der Bodenverbesserung müsste auch die Erdbebensicherheit des eigentlichen Tanks für einen um den Zielerfüllungsfaktor reduzierten Bedeutungsbeiwert von 2,0 nachgewiesen werden. Es ist eher unwahrscheinlich, dass dies gelingen würde, und demnach müsste wohl auch der Tank selbst verstärkt werden.

Eine weitere mögliche Massnahme wäre, eine ausreichend erdbebenresistente Ringmauer um den Ammoniak tank zu bauen. Notwendig und von den Platzverhältnissen her möglich wäre eine Ringmauer mit einer Höhe von mindestens 2,5 m und einem Radius von knapp 14 m, was eine Fläche des damit geschaffenen Rückhaltebeckens von 600 m² und ein Rückhaltevolumen von 1500 m³ ergäbe. Dies reicht, um den gesamten Tankinhalt von 1000 Tonnen Ammoniak aufzunehmen. Aufgrund dieser Massnahme würde die maximal mögliche Konzentration der Ammoniakwolke in der Luft deutlich verringert. Die auf 600 m² beschränkte Ausdampffläche innerhalb des Rückhaltebeckens führt zu einer wesentlich langsameren Verdampfung. Dies erklärt sich daraus, dass der Zufluss an Wärmeenergie, die für die Verdampfung notwendig ist, durch die geringere Fläche der Ammoniak-Lache stark verlangsamt wird. Damit fallen die maximalen Störfallwerte deutlich geringer aus. Ausserhalb des Betriebsareals sind keine Todesopfer mehr zu erwarten – immer unter der Voraussetzung, dass das Rückhaltebecken im Wesentlichen dicht bleibt. Die Ringmauer verhindert das Versagen des Tanks nicht, verringert aber das Ausmass der möglichen Schädigungen an Bevölkerung und Umwelt infolge dieses Versagens.

Eine alternative, weit radikalere Massnahme wäre der Neubau des Tanks als unterirdischen Bunker, der auch stärksten Erdbeben standhielte. Diese Massnahme wäre aber insofern kaum realisierbar, als in unmittelbarer Nähe des bestehenden Ammoniak tanks nicht genügend Platz vorhanden ist, um einen solchen Bunker zu bauen, das Ammoniak aber in der Nähe des bestehenden Tanks gebraucht wird. Würde deshalb der Bunker weiter weg gebaut, müsste auch eine entsprechend längere Leitung vorgesehen werden, die ihrerseits wieder ein nicht vernachlässigbares Risiko darstellen würde – und zwar nicht nur bezüglich Erdbeben (je länger eine Leitung, desto grösser auch die Wahrscheinlichkeit, dass sie irrtümlicherweise, etwa von einer Baumaschine, beschädigt wird). Um den Bunker am Ort des bestehenden Tanks bauen zu können, müsste letzterer zuerst rückgebaut werden, so dass bis zu einer Dauer in der Grössenordnung eines Jahres kein Ammoniak tank zur Verfügung stünde. Dies hätte massive Produktionseinbussen und damit unter Umständen dauerhafte Einbussen an Marktanteilen zur Folge. Rein technisch gesehen wäre auch das für den Bau des Bunkers notwendige lokale Absenken des hohen Grundwasserspiegels eine Herausforderung. Und schliesslich müsste der Bunker mit Hilfe von Bodenankern für den Fall der Bodenverflüssigung gegen plötzliches Aufschwimmen gesichert werden.

Aus all diesen zumindest theoretisch denkbaren Massnahmen wird schliesslich der Bau einer Ringmauer ausgewählt. Die Kosten für diese Massnahme werden vom Betrieb in Anbetracht der massiven Verringerung des Störfallrisikos rein qualitativ als verhältnismässig beurteilt. Dabei wird auch berücksichtigt, dass die Ringmauer, im Gegensatz zu einer Erdbebenverstärkung des Tanks und dessen Pfahlfundation, das Risiko auch bei nicht-seismischen Szenarien deutlich verringern kann, etwa bei einem Terrorangriff, oder bei einer krassen Fehlmanipulation, die zum Auslaufen des Ammoniaks führen könnte.

A.4 Deterministischer Nachweis der Erdbebensicherheit

A.4.1 Bestimmung der Bedeutungsbeiwerte für die Erdbebennachweise

Der maximale Störfallwert, der nach dem Versagen einer Sicherheitsbarriere auftreten kann, erlaubt den Bedeutungsbeiwert zu bestimmen, der für die Erdbebenbemessung dieser Sicherheitsbarriere anzusetzen ist. Für diesen Bedeutungsbeiwert ist dann die entsprechende Sicherheitsbarriere mit Hilfe der SIA-Tragwerksnormen in deterministischer Weise gegen Erdbeben zu bemessen.

Im hier entwickelten Beispiel wird mit dem Bau der Ringmauer eine zweite Sicherheitsbarriere geschaffen, die höheren Erdbebeneinwirkungen standhalten soll als der Tank, der die erste Sicherheitsbarriere darstellt. Damit lassen sich alle möglichen Erdbeben in drei verschiedene Ausmassklassen unterteilen:

- Erdbeben, denen der Tank so weit widersteht, dass kein Leck entsteht (der Tank darf ansonsten starke Verformungen erfahren),
- Erdbeben, die zum Versagen des Tanks führen, denen die Ringmauer aber standhält,
- Erdbeben, die so stark sind, dass nicht nur der Tank, sondern auch die Ringmauer versagt, und sich das gesamte Ammoniak «frei» ausbreiten kann.

Selbstverständlich gäbe es auch Szenarien, die zwischen den genannten liegen, mit einem teilweisen Versagen einer Sicherheitsbarriere. Ein Beispiel wäre etwa ein lokal beschränkter Schaden in der Ringmauer, der zu einem nur langsamen Aussickern des Ammoniaks aus dem Rückhaltebecken führen würde, so dass die Ausdampf- fläche zwar grösser würde als die Fläche innerhalb der Ringmauer, aber trotzdem geringer bliebe als wenn gar keine Ringmauer vorhanden wäre. Für die Bestimmung der Bedeutungsbeiwerte ist es aber ausreichend, nur die obigen Grenzfälle zu betrachten. Der Grund hierzu ist, dass nur der maximal mögliche Störfallwert massgebend ist, der beim vollständigen Versagen der entsprechenden Sicherheitsbarriere eintreten kann.

Wenn der Tank infolge eines Erdbebens zerstört wird, die Ringmauer aber intakt bleibt, ergeben sich, wie bereits erwähnt, keine Todesopfer mehr ausserhalb des Betriebsareals. Dies bedeutet, dass der Tank einer Erdbebeneinwirkung standhalten muss, die einem Bedeutungsbeiwert von $\gamma_f = 1,2$, gekoppelt mit einem Mindesterfüllungsfaktor von 0,25, also letztlich eine Erdbebeneinwirkung, die 30 % der Einwirkung für die BWK I nach Norm SIA 261 [4] entspricht. Bei diesem Einwirkungslevel ist bei Weitem noch keine Bodenverflüssigung zu erwarten. Und es fiele auch leicht, die entsprechende Erdbebensicherheit des Tanks nachzuweisen.

Sollte das Erdbeben so stark ausfallen, dass auch die Ringmauer zumindest teilweise zerstört wird, könnte sich wiederum ein maximaler Störfallwert von grösser 0,6 einstellen. In Anbetracht dieses maximal möglichen Störfallwertes ist deshalb die Ringmauer mit einem Bedeutungsbeiwert von $\gamma_f = 4,0$ gegen Erdbeben auszulegen. Die Abminderung der Anforderungen mit dem Erfüllungsfaktor von 0,5 kann hier nicht beansprucht werden, da es sich bei der Ringmauer um eine neue, von der Tankkonstruktion völlig unabhängige Baukonstruktion handelt.

Zusammenfassend: Die Ringmauer als zweite und letzte Sicherheitsbarriere lässt sich selbstverständlich auch nicht so stark ausführen, dass sie beliebig starken Erdbeben standhält. Sie ist deshalb mit einem Bedeutungsbeiwert zu bemessen, der aus dem maximalen Störfallwert abzuleiten ist, der sich beim Versagen dieser letzten Sicherheitsbarriere ergeben könnte. Der Tank hingegen ist nur für einen Bedeutungsbeiwert zu bemessen bzw. zu überprüfen, der dem maximalen Störfallwert entspricht, der sich bei intakter Ringmauer einstellen kann. Es handelt sich hier um eine Art «kaskadenartiger» Erdbebenbemessung bzw. -überprüfung der Anlage.

A.4.2 Bemessung der baulichen Massnahmen

In einem ersten Schritt wurde unter Beizug eines Experten in geotechnischem Erdbebeningenieurwesen untersucht, wie sich eine Ringmauer verwirklichen lässt, die trotz weiträumiger Bodenverflüssigung einem starken Erdbeben standzuhalten vermag. Dabei war erschwerend zu beachten, dass die Ringmauer in einem setzungsempfindlichen Umfeld zu erstellen ist, unter engen Platzverhältnissen inmitten bestehender industrieller Installationen mit nicht vernachlässigbarem Gefahrenpotenzial. Gewählt wurde eine Ausführung der Ringmauer in Stahlbeton. Ein Erdwall hätte wegen seines grösseren Eigengewichts zu starken Setzungen im näheren Umfeld geführt. Als Foundation wurden individuelle Pfähle vorgesehen, die mittels «Deep Soil Mixing» erstellt werden und bis zu einer tiefer liegenden Kiesschicht reichen.

Als Abmessungen der Ringmauer wurden ein Innendurchmesser von 29 m und eine Höhe von 3,9 m über Terrain festgelegt. Die genannten Dimensionen stellen bei vollständigem Auslaufen des Ammoniaktanks ein Freibord von mindestens 1,0 m sicher, so dass ein Überschwappen des Ammoniaks über die Ringmauer verhindert wird.

Als Bemessungsgrundlagen wurden drei Lastfälle definiert:

- Lastfall 1 (Situation während des Hauptbebens): Bemessung der Ringmauer ohne hydrostatischen Druck (Ammoniak noch im Tank) auf Gebrauchstauglichkeit (beschränkte Rissöffnungen) für einen Bedeutungswert von $\gamma_f = 4,0$.
- Lastfall 2 (Situation kurz nach dem Hauptbeben): Bemessung der Ringmauer auf Gebrauchstauglichkeit (Beschränkung der Rissbreite) unter Annahme eines vollständigen Ausfliessens des Ammoniaks aus dem Stahltank, für einen Flüssigkeitsdruck, der, um dynamische Effekte näherungsweise abzudecken, überall oder auf Teilen des Kreisumfangs dem doppelten hydrostatischen Druck entspricht. Hier ist insbesondere auch der Temperaturschock an der Innenseite der Ringmauer zu berücksichtigen, da das auslaufende Ammoniak eine Temperatur von -33°C aufweist.
- Lastfall 3 (Situation bei einem Nachbeben): Nachweis, dass die Ringmauer nach dem vollständigen Auslaufen des Stahl tanks auch bei einem starken Nachbeben (vorsichtige Annahme: $\gamma_f = 2,2$) keine breiten Risse erfährt, die zu einem Auslaufen des Ammoniaks führen würden.

Als massgebendes Gefährdungsbild für die Bemessung der Ringmauer stellte sich die Temperaturdifferenz zwischen der mit -33°C kaltem Ammoniak in Berührung stehenden Innenseite und der Aussenseite heraus, für die eine Betontemperatur von $+35^\circ\text{C}$ angenommen wurde. Bei einer Wandstärke der Ringmauer von 0,60 m würde die Stahlbewehrung schon allein infolge dieser Temperaturdifferenz weit ins Fließen geraten, so dass die Gefahr bestünde, dass sich zu breite Risse ergäben. Es wurde deshalb vorgesehen, auf der Innenseite eine geeignete Temperaturdämmung anzubringen, welche die Temperaturbeanspruchung der Mauer stark reduziert.

Mit Hilfe semi-quantitativer Abschätzungen anhand des Energieerhaltungssatzes wurde nachgewiesen, dass ein Kippen des Tanks oder auch nur ein Überschwappen signifikanter Mengen von Ammoniak über die Ringmauer hinaus ausgeschlossen werden kann.

Anhang B

Grundsätze

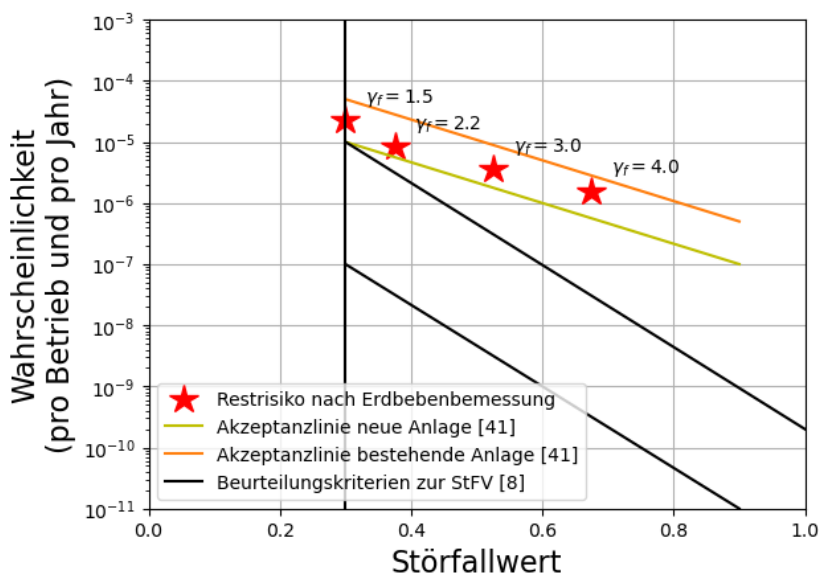
Die nachfolgend aufgeführten Grundsätze zur Berücksichtigung von Erdbeben in der Störfallvorsorge wurden über einen längeren Zeitraum entwickelt, an Pilotbeispielen getestet und in verschiedenen technischen Berichten dokumentiert [42][43][44] und hier zusammengefasst.

B.1 Separate Beurteilung des Erdbebenrisikos

Aufgrund der Tatsache, dass das Risiko aus Erdbeben häufig erheblich grösser ist als alle anderen in einem Kurzbericht oder einer Risikoermittlung berücksichtigten Risiken, ist das Erdbebenrisiko unabhängig von den anderen Risiken zu beurteilen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass die anderen Risiken angesichts des dominierenden Erdbebenrisikos nicht mit genügender Aufmerksamkeit behandelt werden.

B.2 Verzicht auf Aversionsfaktor für Erdbebenrisiko

Abb. 5: Verbleibendes Erdbebenrisiko nach einer Erdbebenbemessung mit den vorgeschlagenen Bedeutungsbeiwerten (rote Sterne) im Vergleich zu den Beurteilungskriterien der StFV [8] (schwarze Linien) und vorgeschlagenen Kriterien für Erdbeben (farbige Linien) [43]



Eine Erdbebenbemessung nach der Norm SIA 261 [4] würde grundsätzlich genügen, um zu verhindern, dass eine industrielle Anlage bei Eintreten des Bemessungsbebens signifikante Schäden erleidet. Erst bei Erdbeben, die erheblich stärker sind, als jene, welche die Normen abdecken, ist mit stärkeren Schäden zu rechnen. Folglich ist es höchst wahrscheinlich, dass nach so einem starken Beben nicht nur auf dem Industrieareal, sondern auch in der Umgebung bedeutende und weit verbreitete Schäden zu beobachten sein werden. In diesem Fall würden tatsächlich zahlreiche Bauten, auch solche, die korrekt nach den seismischen Vorgaben der SIA-Normen bemessen wurden, starke Schäden erleiden, bis hin zum teilweisen oder gar vollständigen Einsturz. Folglich ist

ein derartiges Szenario nicht vergleichbar mit einem isoliert auftretenden industriellen Störfall gleichen Ausmasses, der von einem anderen Ereignis ausgelöst wird, etwa infolge einer Fehlmanipulation oder eines Brandes.

Ein derart übermässig starkes Erdbeben würde von der Bevölkerung als «Höhere Gewalt» oder «weiträumige Katastrophe» empfunden. Demzufolge fiele die Aversion der Gesellschaft gegenüber den Konsequenzen aus der Beschädigung einer Industrieanlage wesentlich geringer aus, als wenn die gleichen Konsequenzen isoliert auftreten würden. Dies rechtfertigt den im W-A-Diagramm enthaltenen Aversionsfaktor für die Beurteilung des Erdbebenrisikos fallen zu lassen. Beibehalten werden soll jedoch der «Verankerungspunkt» der Grenze zur schweren Schädigung und zum nicht akzeptablen Risiko bei einer jährlichen Wahrscheinlichkeit von 10^{-5} für den Störfallwert $S = 0,3$ (siehe grüne Linie in der Abb. 5).

Abbildung 5 zeigt anhand des W-A-Diagrammes die jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeiten (rote Sterne), die sich für die vorgeschlagenen Bedeutungsbeiwerte in einem generischen Störfallszenario (Versagenswahrscheinlichkeit aufgrund vom Erdbeben aus einer realistischen Fragilitätskurve und bedingte Wahrscheinlichkeit des Szenarios von $\frac{1}{3}$, z. B. aufgrund Windrichtung) ergeben [45]. Würde der Aversionsfaktor beibehalten, liessen sich die Kriterien der Risikoakzeptanz schlichtweg nicht erfüllen.

Für bestehende Anlagen wird das akzeptable Niveau bei einer 5-Mal höheren Wahrscheinlichkeit festgelegt. Diese entspricht ungefähr halb so grossen Bedeutungsbeiwerten, d. h. einem Erfüllungsfaktor von 0,5 (orange Linie in der Abb. 5).

B.3 Reduktion des Schadenausmasses als Voraussetzung

Die bisherigen Ausführungen lassen folgenden Schluss zu: Es ist unerlässlich, bei einer Industrieanlage, die Störfälle mit $S_{\text{erd, max}} \geq 0,3$ auslösen kann, in einem ersten Schritt das Ausmass des denkbaren erdbebeninduzierten Störfalls zu reduzieren. Dies hat unabhängig von der Auftretenswahrscheinlichkeit dieses Störfalls zu erfolgen, indem etwa die Menge der gefährlichen Stoffe verringert wird.

Das Ausmass eines möglichen Störfalls sollte zudem gemäss ALARP-Prinzip verringert werden. Der Inhaber des Betriebs sollte vor jeglicher Erdbebenbemessung oder -verstärkung vorerst nachweisen, dass er alle praktikablen Möglichkeiten zur Risikoreduktion umgesetzt hat. Erst nach striktem Befolgen des ALARP-Prinzips kann der Inhaber des Betriebs für die Erdbebensicherheit vom Fallenlassen des Aversionsfaktors aus den Beurteilungskriterien zur Störfallvorsorge profitieren. Dies entspricht auch dem der Störfallverordnung zugrunde liegenden Vorsorgeprinzip (Art. 3 StFV).

B.4 Unterscheidung zwischen neuen und bestehenden Industrieanlagen

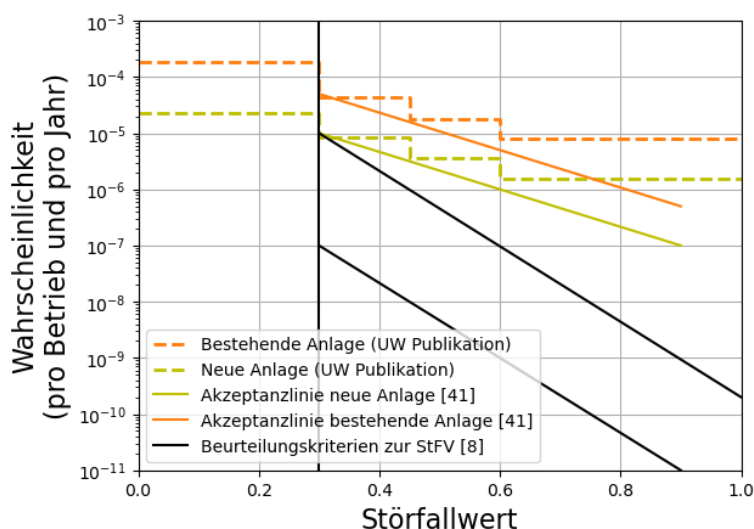
Es wird zwischen neuen und bestehenden Anlagen unterschieden. Bei einer neuen Betriebseinheit gelten immer alle Anlagen als «neu». Bei einer bestehenden Betriebseinheit können folgende zwei Situationen unterschieden werden:

- Was neu und unabhängig projektiert und ausgeführt wird, ist entsprechend den Regeln für neue Bauten zu bemessen. Bei neuen Produktions- oder Lagerungseinheiten (z. B. neuer Tank im Freien) ist der Erdbebensicherheitsnachweis für die volle Erdbebeneinwirkung zu erbringen. Eine eigenständige neue Sicherheitsmassnahme (z. B. Rückhaltebecken) ist ebenfalls als Neubau zu projektieren.
- Bei bestehenden Produktions- oder Lagerungseinheiten (z. B. Ersatz eines Tanks oder Reaktionsgefäss im bestehenden Bauwerk) ist für die bestehende Anlage nachzuweisen, dass die Erdbebensicherheit für die mit dem sogenannten Mindesterfüllungsfaktor multiplizierte Erdbebeneinwirkung gewährleistet wird. Generell soll

dabei versucht werden, den darüberhinausgehenden Zielerfüllungsfaktor zu erreichen. Ist dies technisch nicht möglich bzw. mit unverhältnismässig hohen Kosten verbunden, sind die entsprechenden Abklärungen und Überlegungen zu dokumentieren (siehe Kap. 4.4.2). Die Ziel- resp. Mindesterfüllungsfaktoren sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Unter der Voraussetzung, dass das Gefahrenpotenzial beim Ersatz eines bestehenden Tanks oder Reaktionsgefässes durch einen neuen Tank oder ein neues Reaktionsgefäss nicht erhöht wird und nicht zugleich die ganze Produktions- oder Lagerungseinheit ersetzt wird oder schon dem Neubauniveau entspricht, kann der Ersatz wie eine bestehende Anlage dimensioniert werden.

B.5 Begründung des deterministischen Ansatzes und akzeptiertes Risiko

Abb. 6: Vergleich zwischen dem verbleibenden Risiko nach Bemessung gemäss Tabelle 3 mit dem deterministischen Ansatz (gestrichelte farbige Linien), den vorgeschlagenen Kriterien nach [43] (durchgehende farbige Linien) und den Kriterien der StFV [8] (schwarze Linien)



Da die Erstellung von quantitativen Risikoanalysen sehr grosses Fachwissen verlangt und mit einem beträchtlichen Aufwand verbunden ist, wird aus pragmatischen Gründen auf die zwingende Erstellung quantitativer Risikoanalysen verzichtet und ein einfacher deterministischer Ansatz angewendet. Die Werte beim deterministischen Ansatz leiten sich aber über die Akzeptanzlinien und die Probabilistik ab. Dieser Ansatz ist mit dem Vorgehen im Ausland vergleichbar (siehe Anhang C) und analog dazu soll auf die Umsetzung risikoreduzierender Massnahmen fokussiert werden.

Die akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeit bleibt damit für Störfallwerte grösser als 0,6 konstant (siehe Abb. 6, gestrichelte Linien), wodurch vom Prinzip der Störfallverordnung mit der strengerer Beurteilung höherer Schadenausmasse abgewichen wird. Dies wird im Falle der Versagensursache Erdbeben aber als vernünftig angesehen, da die technische und wirtschaftliche Realisierung von Massnahmen mit Bedeutungsbeiwerten über 4,0 fraglich wäre. Auch im Vergleich mit dem Ausland wären höhere Anforderungen nicht mehr vertretbar.

Anhang C

Anerkannte Regeln der Technik im Ausland

Tab. 5: Heutige Praxis der Berücksichtigung und Beurteilung von Erdbeben bei Störfall-Betrieben

Land	Berücksichtigung von Erdbeben im rechtlichen Rahmen der Störfallbetrachtungen	Bemessung für Erdbeben bei Störfall-Betrieben								
EU	Seveso-Betriebe haben gemäss Seveso III Richtlinie (2012) in einem Sicherheitsbericht die von der Anlage ausgehenden Risiken sowie die zu deren Reduktion und Beherrschung getroffenen Massnahmen aufzuzeigen. Dabei werden Erdbeben als Beispiel für die zu berücksichtigenden «externen Gefahren» genannt. Risiko-Akzeptanzwerte, bezüglich derer die aufgezeigten Risiken zu beurteilen sind, werden nicht einheitlich festgelegt, bzw. fehlen.	Der Eurocode 8 EN 1998-1:2004 vereinheitlicht die verschiedenen Konzepte zur Beschreibung seismischer Einwirkungen sowie die Regeln zur Berechnung, Bemessung und Konstruktion von Hochbauten. Er wurde von den verschiedenen Mitgliedstaaten unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten (z. B. seismologische oder geologische Besonderheiten) in länderspezifische Normen überführt, so dass unterschiedliche Bemessungs- und Beurteilungsgrundlagen resultieren. Ergänzend zur EN 1998-1:2004 verfügen die einzelnen Mitgliedstaaten im Allgemeinen über zusätzliche Landnutzungs-, Planungs- und Baunormen. In Abhängigkeit von der Gebäude-/Anlagekategorie werden folgende Bedeutungsbeiwerte empfohlen: <table><tr><td>Bedeutungskategorie I:</td><td>0,8</td></tr><tr><td>Bedeutungskategorie II:</td><td>1,0</td></tr><tr><td>Bedeutungskategorie III:</td><td>1,2</td></tr><tr><td>Bedeutungskategorie IV:</td><td>1,4</td></tr></table> Seveso-Betriebe werden durch den Eurocode nicht explizit abgedeckt. Für die zweite Generation der Eurocodes (in der Schweiz ab ca. 2027 verfügbar) sollten die Bedeutungskategorien in EN 1998-1 abgeschafft und direkt mit den Schadensfolgeklassen (CC) der EN 1990 gearbeitet werden. In EN 1990 und EN 1998-1 werden neue Schadensfolgeklassen definiert und in EN 1998-1 neue Bedeutungsbeiwerte festgelegt. Es gibt Diskussionen, «sehr gefährliche Anlagen» der höchsten Schadensfolgeklasse CC4 (nicht mit EN 1998 abgedeckt) zuzuordnen.	Bedeutungskategorie I:	0,8	Bedeutungskategorie II:	1,0	Bedeutungskategorie III:	1,2	Bedeutungskategorie IV:	1,4
Bedeutungskategorie I:	0,8									
Bedeutungskategorie II:	1,0									
Bedeutungskategorie III:	1,2									
Bedeutungskategorie IV:	1,4									

Land	Berücksichtigung von Erdbeben im rechtlichen Rahmen der Störfallbetrachtungen	Bemessung für Erdbeben bei Störfall-Betrieben
D	Die nationale Umsetzung der Seveso III Richtlinie (2012) erfolgt mit der Zwölften Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (12. BImSchV, 2020), welche die Betreiber von Störfall-Betrieben verpflichtet, Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen zu treffen. Dabei sind auch umgebungsbedingte Gefahrenquellen wie Erdbeben zu berücksichtigen. Die Definition von Risikoakzeptanz oder -toleranzwerten ist Gegenstand aktueller politischer Diskussionen. Sie werden von einzelnen Betrieben teilweise betriebsspezifisch definiert und dienen dem Vergleich von Alternativen, nicht aber der eigentlichen Beurteilung der Risiken.	Der Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) hat den ursprünglich aus dem Jahr 2009 stammenden Leitfaden «Der Lastfall Erdbeben im Anlagenbau» letztmals im Jahr 2023 in überarbeiteter Form herausgegeben. Dieser Leitfaden gilt in Kombination mit den Normen DIN EN 1998-1:2010 und DIN EN 1998-1/NA:2023-11 für den erdbebengerechten Entwurf, die Bemessung und die Konstruktion von Anlagen (Neuanlagen) der Chemischen Industrie oder verwandter Industrien. Der Leitfaden enthält darüber hinaus Vorgehensweisen für die Beurteilung und Vorschläge zur Verbesserung der Erdbebensicherheit von bestehenden Anlagen. Die Regelungen des Leitfadens sind auch in Gebieten sehr geringer Seismizität nach DIN EN 1998-1 Absatz 3.2.1 (5) anzuwenden. Der Leitfaden ist streng genommen nur eine Empfehlung. Da aber keine anderen konkreten Vorgaben existieren, wird er in der Regel sowohl von den Behörden wie auch von der Industrie als Stand der Technik anerkannt. Der Leitfaden enthält ein Schema zur Festlegung von Bedeutungsbeiwerten (bzgl. Personen- und Umweltschutz sowie kritischen Infrastrukturen) in Abhängigkeit vom Schadenspotenzial und den möglichen räumlichen Auswirkungen. Gemäss diesem beträgt der maximale Bedeutungsbeiwert 1,6. Er ist anzuwenden im Falle eines Schadenspotenzials mit «leichtflüchtigen, sehr giftigen Stoffen» und «grossräumigen Auswirkungen ausserhalb eines Werkes/ Industrieparks». Für bestehende Anlagen gibt es keine generell geltenden Erleichterungen. Es ist aber zu beachten, dass das Immissionsschutzrecht nicht generell die Anpassung von bestehenden Anlagen an den aktuellen Stand der Technik verlangt. Die Verhältnismässigkeit zwischen Aufwand und Nutzen möglicher Entschuldigungsmaßnahmen wird deshalb im Einzelfall, d. h. für jede Einzelanlage und für jede einzelne Anforderung, beurteilt.
F	Die Seveso-III-Richtlinie (2012) wurde nicht mit landesspezifischen Risiko- bzw. Akzeptanzwerten ergänzt. In den sogenannten «Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles» (PPRN, 1995), (basierend auf dem Umweltschutzgesetz Loi 95–101 vom 2.2.1995) wird explizit auf die Gefährdung durch Erdbeben hingewiesen. Wie oder in welcher Form diese zu berücksichtigen sind, ist jedoch nicht festgelegt.	Der Eurocode 8 NF EN 1998-1:2005 wird durch eine Erdbebenzonenkarte: «Zonage sismique de la France» (arrêté du 22.10.2010) ergänzt. Vom Conseil Supérieur de la Prévention des Risques Technologiques CSPRT wurde für Störfallbetriebe der Bedeutungsbeiwert 2,2 (1,85 für bestehende Anlagen) festgelegt (arrêté du 4.10.2010, modifié le 15.2.2018). Dieser Faktor soll in Frankreich – ohne Übersee – etwa einer Wiederkehrperiode von 5000 Jahren (resp. 3000 Jahren) entsprechen. Erfüllt eine Anlage diese Anforderungen, braucht das Erdbebenrisiko, das von dieser Anlage ausgeht, in der Risikoanalyse nicht mehr berücksichtigt zu werden.
NL	Ergänzend zur Seveso-III-Richtlinie (2012), die in den Niederlanden durch die BRZO (1999) konkretisiert wird, wurden durch das Decree on External Safety of Establishments (BEVI, 2009) Grenz- bzw. Akzeptanzwerte für das individuelle und das kollektive Risiko definiert: individuelles Risiko 10^{-5} [1/a] für bestehende Gebäude bzw. 10^{-6} [1/a] für geplante Gebäude (besonders schutzwürdige Objekte). Die Beurteilungskriterien für das kollektive Risiko sind ähnlich wie in der Schweiz. In den Niederlanden stützt man sich aber nur auf die Akzeptabilitätslinie. Einen Übergangsbereich gibt es dort nicht. Für Risiken unter der Akzeptabilitätslinie gilt das ALARP-Prinzip.	Erdbeben wird gemäss Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen PGS 6: 2023 (Anhang N) nicht in der quantitativen Risikoermittlung berücksichtigt, sondern separat und qualitativ.

Land	Berücksichtigung von Erdbeben im rechtlichen Rahmen der Störfallbetrachtungen	Bemessung für Erdbeben bei Störfall-Betrieben
GB	Erdbeben sind als «externe Gefahren» zu berücksichtigen. Als Grundlage wurden Erdbebengefährdungskarten für Wiederkehrperioden von 2500 und 475 Jahren erstellt (PD 6698:2008, Background paper to the UK National Annexes to BS EN 1998-1, BS EN 1998-2, BS EN 1998-4, BS EN 1998-5 and BS EN 1998-6). In Grossbritannien existieren Akzeptanzkriterien für das Individualrisiko. Unter der Voraussetzung, dass alle möglichen Sicherheitsmassnahmen (ALARP-Prinzip) umgesetzt wurden, wird ein Risiko im Bereich von 10^{-4} bis 10^{-6} [Ereignissen/a] als vertretbar angesehen.	Grossbritannien ergänzt die EN 1998 mit einem «UK National Annex to Eurocode 8» zur Britischen Norm BS EN 1998-1:2004. Darin werden insbesondere die spezifischen Parameter aufgelistet, bzw. die Abweichungen zur EN 1998 aufgezeigt. Für Anlagen ohne spezifische Analyse der Erdbebengefährdung ist von einer Wiederkehrperiode T_{NCR} von 2500 Jahren auszugehen. Wird diese Wiederkehrperiode angenommen, wird für sogenannte CC3 Bauten gemäss EN 1990 die Anwendung eines Bedeutungsbeiwerts von 1,0 empfohlen. (CC3 = Consequence Class 3: High consequences for loss of human life, or economic, social or environmental consequences very great; deckt gemäss EN 1998 die BWK II und III ab).
NZ	Die Gefährdung durch Erdbeben wird insbesondere im «Resource Management Act 1991» und im Building Act (2004) thematisiert. Dieser verweist hinsichtlich Erdbebensicherheit auf die Norm AS/NZS 1170.0:2002. Es handelt sich hier nicht um eine spezifisch störfallbezogene Festlegung.	In der AS/NZS 1170.0:2002 werden die Bedeutungs-niveaus (<i>importance level</i> 1 bis 5, wobei 5 für KKW reserviert ist, obwohl es in NZ keine gibt) definiert. Sie sind durch das Risiko für Menschenleben, die Umwelt, die wirtschaftlichen Kosten und andere Risikofaktoren im Zusammenhang mit der Nutzung bestimmt. Bedeutungs-niveau 4 wird für «Gebäude in Verbindung mit gefährlichen Anlagen» angewendet. Gemäss AS/NZS 1170.5:2004 ist für dieses Niveau ein Wiederkehrperiodenfaktor (<i>return period factor</i>) von 1,8 vorgesehen (Wiederkehrperiode 2500 Jahren).
CA	Die Störfall-Risiken sind im Rahmen von provinzspezifischen Landnutzungsplanungen zu untersuchen bzw. aufzuzeigen. Die Beurteilung erfolgt aufgrund der ebenfalls im Rahmen der Landnutzungsplanung definierten Risikoakzeptanz- oder Risikotoleranzwerte. Diese sind für die verschiedenen Risikofaktoren im Einzelnen festzulegen.	Die Anforderungen an die Erdbebensicherheit von Gebäuden ist im «National Building Code of Canada» (NBC, 2020) festgehalten. Die Betriebe mit gefährlichen Stoffen werden je nach Auslegung (z. B. mit Rückhaltevorrichtungen) in der normalen oder in der hohen Bedeutungskategorie (siehe A-Table 4.1.2.1) eingeteilt. Für die Bemessung von Bauwerken der normalen Bedeutungskategorie wird eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von 2 % in 50 Jahren (Wiederkehrperiode von 2500 Jahren) zugrunde gelegt. Die entsprechenden Bedeutungsbeiwerte sind folgende: Normale Bedeutungskategorie: 1,0 Hohe Bedeutungskategorie: 1,3 Im SUIHAZ15 würden diese Bedeutungsbeiwerte mit dieser Wiederkehrperiode einem Wert von 2,5 und 3,25 entsprechen.

Anhang D

Störfälle aufgrund Erdbeben

Tab. 6: Bekannte Störfälle bei stationären Betrieben gemäss Definition Art. 2 StFV aufgrund Erdbeben weltweit (exkl. Tsunami)
Magnitude und Herd stammen aus [46].

Datum	Erdbeben Magnitude	Standort Distanz	Betrieb	Stoff	Ereignis	Auswirkungen ausserhalb Areal
11.3.2011	Tōhoku Mw=9,1	Ichihara, Japan d=380 km	Cosmo Oil Refinery	LPG, Asphalt	BLEVE, Brand, Freisetzung Asphalt	Schäden und Brände Nachbarschaft, Verunreinigung See (Asphalt)
11.3.2011	Tōhoku Mw=9,1	Kesennuma, Japan d=100 km	Oya Mine	Bergbauabfälle (inkl. Arsen)	Freisetzung 40 000 m ³ Bergbauabfälle (Bodenverflüssigung)	Verunreinigung Böden, Fluss und Meeresküste
22.2.2011	Christchurch Mw=6,1	Christchurch, Neuseeland d=3 km	Bromley wastewater treatment plant	Abwasser	Abfluss $\frac{2}{3}$ der Abwassermenge ohne Klärung in Oberflächengewässer aufgrund Schäden an ARA und Abwasserleitungen	Verunreinigung Flüsse und Flussmündung
12.5.2008	Sichuan Mw=7,9	Shifang, China d=70 km	Shi Hua Industrial Fertilizer Factory, Shifang Zhenjiang Chemical	Ammoniak, Schwefelsäure	Freisetzung 1100 m ³ Ammoniak resp. 80 bis 150 t Ammoniak, Brand, Explosion	Verunreinigung Fluss, Boden, Evakuierung 6000 Einwohner, Todesfälle in einer Schule
26.12.2003	Bam Mw=6,6	Bam, Iran d=25 km	Roghan-e- Jonoub chemical plant	Öl	Freisetzung Öl	Verunreinigung Umwelt
17.8.1999	Kocaeli Mw=7,6	İzmit, Türkei d=20 km	TUPRAS Refinery	Rohöl, Ölprodukte	Brand, Freisetzung Öl	Verunreinigung See
17.8.1999	Kocaeli Mw=7,6	Yalova, Türkei d=50 km	AKSA Acrylic Chemical Industry Co.	Acrylnitril	Freisetzung toxische Wolke und flüssige Stoffe im Boden	Vergiftungssymptome Nachbarschaft
15.1.1993	Okushiri Mw=7,6	Kushiro Port, Japan d=10 km	Showa Shell	Asphalt	Freisetzung mind. 200 t Asphalt (Rutschung)	Verunreinigung See
17.10.1989	Loma Prieta Mw=6,9	Watsonville, CA, USA d=20 km	Packing plant	Ammoniak	Freisetzung 2 bis 9 t Ammoniak aus der Kälteanlage	Toxische Gaswolke (ohne Auswirkung), benötigte mehrere Tage und viel Wasser zu reinigen
17.10.1989	Loma Prieta Mw=6,9	CA, USA		Natriumsilicate	Freisetzung 680 t Natriumsilicate aus einem Tank	Verunreinigung, 40 % bis zu ARA gelangt, ein Teil wurde nicht gereinigt (San Francisco Bay)
1.10.1987	Whittier Narrows Mw=5,9	Santa Fe Springs, Los Angeles, CA, USA d=10 km		Chlor	Freisetzung 670 kg Chlor	Evakuierung Bevölkerung in gewissen Quartieren von Whittier

Datum	Erdbeben Magnitude	Standort Distanz	Betrieb	Stoff	Ereignis	Auswirkungen ausserhalb Areals
12.6.1978	Miyagi Mw=7,6	Shiogama Port, Japan d=90 km	Tohoku Oil, Inc, Sendai Refinery	Rohöl	Freisetzung 68 000 m ³ Rohöl, davon 900 m ³ ausserhalb Areals	Verunreinigung Wasserstrasse und Hafen (Öl)
16.6.1964	Niigata Mw=7,6	Niigata, Japan d=60 km	Showa Oil, Inc. refinery	Öl	Brand 12 Tanks	Brandgase (2 Wochen)
10.3.1933	Long Beach Mw=6,4	Huntington Beach, CA, USA d=25 km		Öl	Freisetzung Öl	Verunreinigung, Schäden an Gebäude
1.9.1923	Kantō Mw=8,0	Yokosuka, Japan d=30 km	Naval Base	Heizöl	Freisetzung 70 000 t Heizöl	Verunreinigung Hafen und Brand

Anhang E

Typische Erdbebensicherheitsmassnahmen

Tab. 7: Typische Erdbebensicherheitsmassnahmen pro Anlagentyp

Siehe auch [37] und die verschiedenen «Guide technique – ICPE» der Association Française de Génie Parasismique AFPS für die spezifischen Fragestellungen

Anlagentyp	Typische Schwachstellen	Häufigste Massnahmen
Auf dem Boden freistehender vertikaler Tank	Umkippen, Leckschlagen infolge Beulen der Tankwände oder Versagens des Bodenbleches wegen low cycle fatigue bei einseitigem Abheben des Tankbodens infolge fehlender oder zu schwacher Verankerung	Verankern des Tanks im Fundament, selten zusätzliche Aussteifung der Tankwände, siehe auch in [6] Kapitel 2.17
Aufgeständerter vertikaler Tank	Umkippen/Absturz des Tanks infolge Versagens der Aufständering, fehlender/mangelhafter Verankerung oder infolge Durchstanzens einer Stütze der Aufständering durch die Tankwand	Horizontale Aussteifung der Aufständering, Verankerung und/oder Verstärkung des Anschlusses der Stützen an der Tankwand, siehe auch in [6] Kapitel 2.17
Auf Sattel aufliegender horizontaler Tank	Umstürzen der Sattel infolge Versagens derer Fundationen	Verstärkung/Aussteifung der Sattel und derer Fundationen, siehe auch [6] Kapitel 2.17
Rohrleitungen (Gelenke, Abbiegungen, Durchbrüche und Stossverbindungen)	Abscherung der Leitungen infolge aufgezwungener Relativverschiebungen bei zu steifer Leitungsführung oder infolge mangelnder Befestigungen	Ausreichend flexible Leitungsführung, Einbau von Kompensatoren und geeigneten Verankerungen, siehe auch [6] Kapitel 2.18
Generell: Tanks mit gefährlichen flüssigen Stoffen	Versagen und damit Leckschlagen des Tanks	Rückhaltebecken für den Inhalt aller Tanks im Becken als sekundäre Sicherheitsbarriere, falls Verstärkung/Neubau der Tanks zu aufwändig ist
Gefahrenstoffe in Regallagern	Einsturz von Regallagern infolge fehlender horizontaler Aussteifung, Absturz von Gebinden aus dem Regallager	Verstärkung/Aussteifung der Tragstruktur der Regallager, Absturzsicherungen bei Gebinden, siehe auch [6] Kapitel 2.23 und 2.24
Generell: Produktionsgebäude mit fehlender, unvollständiger oder zu schwacher Aussteifung pro durch Dilatationsfugen voneinander getrennte Tragwerkseinheiten	Teileinsturz oder Einsturz ganzer Gebäudeteile infolge ungenügenden horizontalen Widerstands des Tragwerks	Verstärkung/Vervollständigung der horizontalen Aussteifung, eventuell kraftschlüssiges Überbrücken von Dilatationsfugen als Teilmassnahme
Vorfabrizierte Produktionsgebäude	Einsturz ganzer Gebäudeteile oder Absturz einzelner Tragelemente, z. B. Dachelemente, infolge zu schwacher Verbindungen zwischen den vorfabrizierten Tragelementen	Verstärkung der Verbindungen zwischen den vorfabrizierten Tragelementen
Hohe sekundäre Mauerwerkswände (Raumtrennungs- oder Fassadenwände)	Umkippen von Trennwänden, Absturz von Fassadenwänden, und damit Gefährdung der Integrität diverser Installationen wie etwa Tanks oder Rohrleitungen	Sichern der Wände gegen ein Auskippen aus ihrer Ebene, siehe auch in [6] Kapitel 2.4