

Risikoanalyse zur Einführung des NA:2020 zum EC 8

Prof. Dr.-Ing. Norbert Gebbeken

MJG Ingenieur-GmbH
Gottfried-Keller-Str. 12
81245 München

Forschungszentrum RISK
Universität der Bundeswehr München

Auftraggeber:

Bay. Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr
Franz-Josef-Strauß-Ring 4
80539 München

Februar 2022

Inhaltsverzeichnis

1. Veranlassung
2. Einführung
 - 2.1. Grundlagen Risikomanagement
 - 2.2. Grundlagen Erdbeben
 - 2.3. Grundlagen zur Erdbebennormung – Einwirkungen
3. Historische Erdbeben in Deutschland
4. Risikomanagement Erdbeben
 - 4.1. Risikoidentifikation
 - 4.2. Risikoanalyse
 - 4.3. Risikobewertung
 - 4.4. Risikoregelungen in technischen Normen
 - 4.5. Risikodiskussion allgemein
5. Baurechtliche Einordnung
6. Zusammenfassung
7. Literatur
8. Abkürzungsverzeichnis

1. Veranlassung

Die Veranlassung für diese Studie ist die Neueinschätzung (Verschärfung) der Einwirkungen aus Erdbeben im neuen Nationalen Anhang zur Erdbebennorm DIN EN 1998-1/NA:2020 (EC 8/NA:2020). Die nachweispflichtigen erdbebengefährdeten Gebiete werden deutlich größer (Zone 0 wird jetzt nachweispflichtig) und die Erdbebenbeschleunigungen vergrößern sich bis auf das Doppelte in Erdbebenzone 3 (Tab. 3, Abb. 5), wenngleich an einigen Orten sich auch kleinere Beschleunigungen ergeben. Das löst Besorgnis aus und wirft viele Fragen auf, die leider bis heute nicht gänzlich beantwortet sind.

Nach der Veröffentlichung der Fachaufsätze [Grünthal 2018a, Grünthal 2018b] gab es in betroffenen Kreisen unterschiedliche Reaktionen. Während einige ein großes Konjunkturprogramm für Architekten, Bauingenieure, Bauausführende und Versicherungswirtschaft auf sich zukommen sahen, fragten sich andere, ob die Verschärfungen sich mit den Erfahrungen der Vergangenheit begründen lassen und welche Zusatzkosten der Gesellschaft aufgebürdet werden. Hierzu gehören auch zusätzliche Kosten für die Versicherung gegenüber Erdbeben (Elementarversicherung: Als Elementarschäden werden Schäden bezeichnet, die durch das Einwirken von Naturgewalten entstehen. Das können beispielsweise Starkregen und Hochwasser sein, aber auch Lawinen, Erdbeben oder Vulkanausbrüche. Solche Schäden sind über eine Extremwetterschutz-Versicherung abgesichert.). Somit hat auch die Versicherungswirtschaft durchaus Interesse an der Neubewertung (Verschärfung) der Erdbebengefahr. Es besteht also möglicherweise ein wirtschaftliches oder aber selbstrechtfertigendes Interesse an einer Verschärfung der Erdbebenanforderungen bei Geophysikern, Bauwirtschaft und Versicherungswirtschaft. Der Autor, der u. a. im Bereich der Prävention tätig ist, ist hiervon nicht ausgenommen.

Der Normentwurf hat neben Mehrkosten Änderungen bei der Planung, der Bauausführung, den verwendbaren Bauprodukten und Bauweisen (z.B. Fertigteilbau) zur Folge, verbunden mit Einschränkungen bei architektonischem Entwurf und Gestaltung.

Im Rahmen der Diskussion werden die Aspekte von Sicherheit und Wirtschaftlichkeit angesprochen. Sie sind zu ergänzen mit Risiko und (gesellschaftlicher) Akzeptanz (Abb. 1). Es sind diese vier Aspekte, die untereinander abgewogen werden müssen, um Entscheidungen zu treffen und Regeln abzuleiten.



Abb. 1: Abhängigkeiten zwischen Sicherheit, Risiko, Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit

Alle vier Parameter sind nicht determiniert, nicht einmal die Sicherheit. Ein möglichst großer gesellschaftlicher Konsens ergibt sich aus der gesellschaftlichen (politischen) Debatte zur jeweiligen Festlegung bezogen auf Gefahren. Hier also auf die Gefahr „Erdbeben“. Im Zuge der Risikodiskussion der letzten Jahre hat sich jetzt auch in den technischen Wissenschaften die Resilienzforschung etabliert. Sie beschäftigt sich u.a. mit der Frage, ob ein Leistungsverlust (einer technischen Anlage) akzeptiert wird, und wenn ja, wie lange. Damit können u.a. die vier Einflussgrößen gem. Abb. 1, z. B. im Rahmen spieltheoretischer Methoden, „ausbalanciert“ werden. Diese Resilienzuntersuchungen sind inzwischen fester Bestandteil des Katastrophenmanagements. Dabei sind wichtige Punkte, die Analyse von und das Lernen aus Katastrophen in der Erholungsphase nach einer Katastrophe.

Eine Risikodiskussion hat es an sich, dass sie in der Regel diskursiv, wenn nicht gar kontrovers ist, weil die Parameter nicht determiniert sind und je nach Sichtweise und Interesse durchaus unterschiedlich beurteilt werden können [Renn 2014]. Es ist die große Herausforderung, aus der Kontroverse einen Konsens zu erarbeiten, der im besten Fall am Gemeinwohl orientiert ist. Und auch darüber lässt sich vortrefflich streiten, was Gemeinwohl bedeutet. Nach Wikipedia¹: „Ein grundlegender Dissens besteht im Hinblick auf die Frage, ob man ein „Gemeinwohl a priori“ *finden* könne (wie die richtige Lösung einer einfachen Mathematikaufgabe) oder ob das, was der Allgemeinheit nützt, als Ergebnis einer Bestimmungsleistung von Betroffenen oder deren Vertretern, die sich in Verhandlungen um einen Interessenausgleich bemühen (Gemeinwohl a posteriori), zu betrachten sei.“

Im Zuge der Bearbeitung dieser Studie wurde mir vereinzelt gesagt, dass sich die Mehrkosten aufgrund der Verschärfungen der Erdbebenanforderungen „in Grenzen“ halten, „vernachlässigbar seien“ und sich die „ganze Aufregung“ nicht lohne. Konkrete Angaben zu Mehrkosten konnte mir niemand nennen. Ich habe in meinem Umfeld recherchiert, um zu erfahren, welche Mehrkosten eine Bagatellgrenze darstellen könnten. Meine Frage war, sind 3 % Mehrkosten beim Hausbau oder beim Wohnungskauf für euch/Sie akzeptabel. Die Antworten waren unterschiedlich. Eine: Beim Autokauf würde ich auf jeden Fall versuchen 3 % herauszuhandeln, das ist für mich viel Geld. Eine weitere: Wir reden bei den Kosten einer Wohnung bzw. eines Einfamilienhauses in den betroffenen Erdbebengebieten im Süden Bayerns von 600.000 € bis über 1 Mio. €. Da sind 3 % 18.000 € bzw. 30.000 € viel Geld, fast 30 % eines Jahresgehältes oder der Gegenwert einer guten Küche oder eines guten Autos oder einer PV-Anlage. Darüber hinaus erzeugen diese Mehrkosten nachhaltige volkswirtschaftliche Folgeeffekte wie eine steigende Inflation. Wir sehen, dass die Diskussion um Mehrkosten gesellschaftlich brisant ist und stark von den individuellen Verhältnissen abhängt.

Im Zuge von Recherchen stieß ich auf die Publikation [Wenk 2008]. Ihr entnahm ich, dass in der Schweiz wegen der damaligen Verschärfung der Erdbebenanforderungen bei Neubauten mit Mehrkosten von bis zu 3 % zu rechnen ist und bei Bestandsbauten von Kosten für die Ertüchtigung von bis zu 11 % der Gebäudekosten, sofern diese aber bereits erdbebengerecht ausgeführt waren. Es wäre gut, eine vergleichbare Analyse auch für die betroffenen bayerischen Gebiete zu haben, damit bei der bestehenden Diskussion über die Verteuerung beim Bauen in Folge erhöhter Erdbebenanforderungen mit konkreten Zahlen argumentiert werden kann. Diese Studie wurde zwischenzeitlich vom bay. Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr in Auftrag gegeben. Im Folgenden gehe ich davon aus, dass, mangels vorhandener Berechnungen für Deutschland, die [Wenk 2008]-Studie eine gute erste Approximation ist, um Kosten abzuschätzen.

In [Grünthal 2021] ist zu lesen: „Den Publikationen der Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands sowie des NA:2018² folgten jedoch auch kontroverse Diskussionen bez. einer mutmaßlichen generell höheren Bewertung der Erdbebengefährdung im Vergleich zum NA:2011. Das

¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Gemeinwohl> (Aufruf 03. Juni 2021)

² NA: 2018 und NA: 2020 sind die gleichen Basisdokumente, auf die Bezug genommen wird.

Anliegen des vorliegenden Beitrags ist es daher, die tatsächlichen Zusammenhänge aufzuzeigen, um zu einer Versachlichung beizutragen, und schließlich verschiedene Wege bzw. Varianten vorzustellen, wie die Erdbebenkarten nach altem und neuem NA in Beziehung gesetzt werden können.“

Grünthal unterstellt hier den Fragestellern (Anwenderkreise = Bauingenieure) quasi Unsachlichkeit, geht aber auf die in den Diskussionen formulierten Fragen nicht hinreichend oder gar nicht ein. Denn es geht, wie Grünthal schreibt, nicht um den Vergleich der seismischen Lastannahmen allein, sondern um die Konsequenzen in Bezug auf Sicherheit, Risiko, Kosten und gesellschaftlicher Akzeptanz, also um sehr viel mehr. Es handelt sich beim NA:2018 (NA:2020) auch nicht um „mutmaßliche“ Erhöhungen der Erdbebenbeschleunigungen, sondern um faktische Erhöhungen bis zur Verdoppelung in Erdbebenzone 3. Man darf sich fragen, was Grünthal mit diesem Seitenhieb auf die Fragesteller aus dem Kreis der Bauingenieure (Anwenderkreis) bezweckt. Vermutlich gibt es ein Kommunikations- und Verständigungsproblem zwischen den Fachgebieten. Das ist nicht neu, sollte aber überwindbar sein. Wir sehen, die Diskussion ist von einer gewissen Brisanz.

Wegen der Erfahrungen des Autors in der Katastrophen- und Sicherheitsforschung und wegen der Herausforderungen interdisziplinärer und multidisziplinärer Forschung und praktischer Arbeit, hat der Autor gemeinsam mit der sozialwissenschaftlichen Fakultät der Universität der Bundeswehr München im Jahre 2011 das Forschungszentrum RISK (Risiko, Infrastruktur, Sicherheit und Konflikt) gegründet, an dem inzwischen sieben Fakultäten und 55 Kolleginnen und Kollegen beteiligt sind. Es arbeitet multidisziplinär und durchaus kontrovers, aber immer konstruktiv, zu RISK-Fragestellungen.

Grünthal schreibt in [Grünthal 2018a]: *The basic seismic load parameters for the upcoming national design regulation for DIN EN 1998-1/NA result from the reassessment of the seismic hazard supported by the German Institution for Civil Engineering (DIBt). This 2016 version of the national seismic hazard assessment for Germany is based on a comprehensive involvement of all accessible uncertainties in models and parameters and includes the provision of a rational framework for integrating ranges of epistemic uncertainties and aleatory variabilities in a comprehensive and transparent way.*

Es wird deutlich, dass die Neubewertung der seismischen Gefährdung auf wissenschaftlichen Methoden der Geophysik und zugehörigen Modellen beruht, jedoch nicht die reale Gefahr der Erdbebengefährdung für Bauwerke im Fokus hat. Diese möglicherweise zu einseitige Betrachtung hätte vermieden werden können, wenn Erdbebeningenieure begleitende wissenschaftliche und praktische Untersuchungen in gleicher Intensität hätten machen können. Dies wäre im Sinne einer Technikfolgenabschätzung geboten gewesen. Dadurch hätten sehr viele offene Fragen im Vorfeld diskutiert und beantwortet werden können.

Es gibt noch einen weiteren Aspekt, den ich beleuchten möchte. Wir, die wir insbesondere im Bereich der Gefahrenabwehr (Prävention) arbeiten, neigen dazu, unsere Arbeit immer dadurch zu untermauern, dass wir die Gefahren hervorheben und manchmal dramatisieren. Nach einer Erdbebenkonferenz habe ich immer das Gefühl, dass das nächste Beben „vor der Tür steht“. Nach einer Konferenz zum Terrorschutz habe ich immer das Gefühl, dass ein Auto bereits angerast kommt. Woran liegt das? Es liegt an der Macht der gezeigten Bilder und an unseren selbstrechtfertigenden Grafiken auf unseren Folien. Sie verzerren oft die Realität. Und dann muss ich mir die nüchternen Zahlen ins Gedächtnis rufen. Gerade direkt nach einem verheerenden Erdbeben, Hochwasser oder Terroranschlag ist es oft schwierig, die Politik und die Öffentlichkeit in eine gewisse Realität zurückzuholen.

Das Sicherheitsgefühl und das Sicherheitsbedürfnis im Zusammenhang mit Katastrophen sind höchst dynamisch. Man kann auch sagen, dass das subjektive Empfinden und das Sicherheitsbedürfnis relativ, situations- und zeitabhängig sind.

Die vorliegende Risikostudie basiert auf der Sichtweise eines Bauingenieurs, der am gesellschaftlichen (politischen) Abwägungsprozess gem. Abb. 1 hinsichtlich der Gefahren Erdbeben, Sturm, Schnee, Hochwasser und Terror bereits beteiligt war. Dabei gab es immer interessante lehrreiche Diskussionen, oft kontrovers, manchmal erstaunlich jedoch immer mit einem Ergebnis, manchmal im Konsens, manchmal als Entscheidung Verantwortlicher. Ein Baustatiker hat nicht die Kompetenz, die Arbeit von Kollegen anderer Fachgebiete zu bewerten, er muss aber im Sinne der Verantwortungsethik Fragen stellen, insbesondere in Bezug auf die Nahtstellen zwischen den Fachgebieten in Bezug auf die Naturgefahr Erdbeben. Und, eines haben Geophysiker und Bauingenieure gemein, sie arbeiten mit Modellen, die die Wirklichkeit möglichst gut abbilden, aber nie die Wirklichkeit sind. Alle Modelle haben Stärken und Schwächen. Sie müssen immer wieder verifiziert und validiert werden, möglichst an der Natur und nicht nur an Versuchsmodellen. Denn nur die Natur ist natürlich.

Wagen wir uns an einen interessanten Diskurs.

2. Einführung Risikoanalyse

Die vorliegende Risikoanalyse beschäftigt sich mit der Gefährdung durch Erdbeben vornehmlich in Bayern. Dabei geht es um die Gefährdung von Menschen durch Schäden an Gebäuden und um sächliche Kosten. So genannte spezielle kritische Infrastrukturen werden hier nicht behandelt, weil es für sie spezielle Regelungen gibt (z.B. AKW – KTA-Regeln, Stauanlagen - DIN 19700). Nach einer kurzen Darstellung des Risikomanagements und von Grundlagen zum Erdbebeningenieurwesen erfolgt die quantitative Risikoanalyse, vornehmlich bezüglich der Erdbebengefährdung in Bayern. Anschließend wird die Erdbebengefährdung in Bayern in Beziehung gesetzt zu anderen Gefährdungen und zur Zielgröße der Sicherheitsphilosophie (Versagenswahrscheinlichkeiten) für bauliche Anlagen. Danach erfolgt eine baurechtliche Einordnung. Abschließend wird die Risikostudie zusammengefasst.

2.1 Grundlagen Risikomanagement

Die vorliegende Risikostudie orientiert sich an den Vereinbarungen des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), an der DIN ISO 31000 (Risikomanagement - Leitlinien), an der DIN ISO 31010 (Risikomanagement - Risikobeurteilung) sowie DIN SPEC 91390:2019-12 (Integriertes Risikomanagement).

Das **Risikomanagement** ist der planvolle Umgang mit Gefahren und den sich daraus ergebenden Risiken (Quantifizierung der Gefahr). Es umfasst die Phasen Identifikation (Wahrnehmung), Analyse, Quantifizierung, Bewertung, Steuerung und Controlling (Abb. 2). Diese Phasen werden wiederholt durchlaufen. Damit wird das Risikomanagement optimiert (z. B. [BBK 2019]). Die Risikoquantifizierung erfolgt mit mathematischen Modellen. Dies geschieht in zwei Schritten. Zunächst werden die Eintrittswahrscheinlichkeit (E) und das Schadensausmaß bei Eintritt des Schadens bestimmt (K - Kosten). Durch Multiplikation dieser beiden Kennzahlen entsteht eine Art Risikopotenzial (R), der Schadenerwartungswert, gemäß $R = E * K$.

Gemäß dem BBK³ ist die **Risikoanalyse** im Bevölkerungsschutz ein politisches Entscheidungs- und Planungsinstrument des Bundes und der Länder, das eine risiko- und bedarfsorientierte Vorsorge- und Abwehrplanung im Zivil- und Katastrophenschutz ermöglicht. Mit der vom BBK erarbeiteten Methode der Risikoanalyse können im deutschen System des Bevölkerungsschutzes Risiken infolge unterschiedlicher Gefahren strukturiert erfasst und miteinander verglichen werden. Durch die Bestimmung der Risiken anhand der Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeit (E) und Schadensausmaß (K), werden belastbare Entscheidungsgrundlagen für Maßnahmen des Risiko- und Krisenmanagements geschaffen.

Das Risiko- und Krisenmanagement ist ein kontinuierlicher Prozess, der sich gem. Abb. 2 zumindest aus den Schritten Identifizierung, Analyse, Bewertung und Behandlung von Risiken zusammensetzt. Die Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz liefert die Grundlage für die Entscheidung über mögliche präventive Maßnahmen des (baulichen) Bevölkerungsschutzes. Auf Grundlage eines solchen Risiko-Portfolios kann dann im Rahmen des Risikomanagements geprüft werden, ob die vorhandenen Fähigkeiten zum Schutz der Bevölkerung und ihrer Lebensgrundlagen angemessen sind und ob ggf. Handlungsbedarf für notwendig erkannte Maßnahmen besteht (Katastrophenmanagementzyklus, z. B. [BBK 2019]). Für den Bevölkerungsschutz sind die Ergebnisse der Risikoanalyse in Beziehung zu den noch nicht abschließend definierten Schutzziele zu bringen, um feststellen, ob der Bevölkerungsschutz in Deutschland für alle zu erwartenden Schadenslagen hinreichend dimensioniert und vorbereitet ist oder ob für Bund, Länder und Kommunen Handlungsbedarf besteht.

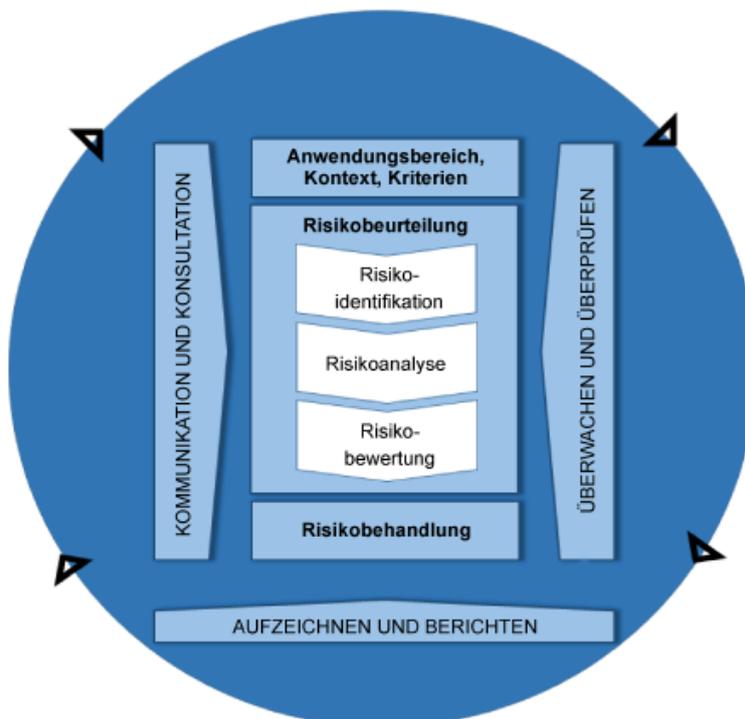


Abb. 2: Risiko-Management-Prozess gem. DIN ISO 31000 und BBK

³

https://www.bbk.bund.de/DE/AufgabenundAusstattung/Risikomanagement/RisikoanalysenBundundLaender/risikoanalysenBundundLaender_node.html

Prof. Dr.-Ing. Norbert Gebbeken

Die **Risikoidentifikation** ist im Rahmen dieser Studie erfolgt; es ist die Erdbebengefahr. Die Risikoanalyse und die Risikobewertung sollen im Rahmen dieser Studie erarbeitet werden (Abschnitt 4).

Gemäß DIN ISO 31000 besteht der Zweck der Risikoanalyse darin, die Art des Risikos (der Gefahr), dessen Eigenschaften und gegebenenfalls die Risikohöhe zu verstehen. Risikoanalysen umfassen eine ausführliche Betrachtung von Unsicherheiten, Risikoursachen, Auswirkungen, Wahrscheinlichkeiten, Ereignissen, Szenarien, Steuerungen und deren Wirksamkeit.

Die **Risikoanalyse** kann mit unterschiedlichen Graden an Detaillierung und Komplexität je nach Zweck der Analyse sowie der Verfügbarkeit und Verlässlichkeit der Informationen und der verfügbaren Ressourcen durchgeführt werden. Die Analysetechniken können je nach Umständen und vorgesehener Nutzung qualitativ, quantitativ oder eine Kombination dieser Techniken sein. Im Rahmen dieser Studie kann der Detaillierungsgrad nicht „ortsspezifisch“ sein, wie z. B. in [BBK 2019]. Es sind wegen fehlender Daten auch Annahmen zu treffen, die aber begründet werden.

Risikoanalysen sollten Faktoren berücksichtigen wie

- die Wahrscheinlichkeit von Ereignissen und Auswirkungen,
- Art und Umfang von Auswirkungen,
- Komplexität und Verbundenheit (Interdependenzen),
- zeitliche Faktoren und Volatilitäten,
- die Wirksamkeit der bestehenden Steuerungen,
- Empfindlichkeits- und Konfidenzniveaus.

Die Risikoanalyse kann durch unterschiedliche Meinungen, Voreingenommenheit, Risikowahrnehmungen und Risikobeurteilungen beeinflusst werden. Zusätzliche Einflussfaktoren sind die Qualität der verwendeten Informationen, die getroffenen Annahmen und Ausschlüsse, jegliche Beschränkungen der Verfahren und die Art von deren Ausführung. Diese Einflussfaktoren sollten berücksichtigt, dokumentiert und den Entscheidungsträgern mitgeteilt werden.

Die Risikoanalyse liefert einen Beitrag für die Risikobewertung, für Entscheidungen darüber, ob und wie Risiken (Gefahren) zu behandeln sind und welche Strategien und Methoden der Risikobehandlung für diese am besten geeignet sind. Die Ergebnisse liefern Erkenntnisse für Entscheidungen, bei denen eine Auswahl getroffen wird und die Optionen unterschiedlicher Risikoarten und -höhen beinhalten. Risikoanalysen haben keinen Anspruch auf Objektivität oder „Wahrheit“. Risikoanalysen sind das Ergebnis der gewählten (abgestimmten) Eingangsparameter und eines Abstimmungsprozesses.

Die **Risikobewertung** unterstützt Entscheidungen. Sie beinhaltet den Vergleich der Ergebnisse der Risikoanalyse mit den festgelegten Risikokriterien, um festzustellen, ob und wo zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind.

Die Risikobewertung befasst sich mit den folgenden Fragestellungen:

- in welchem Ausmaß wird ein definiertes Schutzziel im Falle des untersuchten Ereignisses erreicht,
- welches verbleibende Risiko ist akzeptabel und
- welche Maßnahmen zur Minimierung der ermittelten Schadensauswirkungen können oder müssen ergriffen werden.

In diesen Entscheidungsprozess fließen gesellschaftliche Werte und die jeweilige Risikoakzeptanz mit ein. Wobei zu berücksichtigen ist, dass eine 100% technische Sicherheit nicht möglich ist und das gewählte und definierte Schutzziel Opportunitätskosten, also einen entgangenen Nutzen einer ökonomisch nicht mehr realisierbaren Handlungsalternative in einem anderen Risikosegment verursacht.

Ein übergeordnetes Ziel der Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz ist die vergleichende Gegenüberstellung verschiedener Risiken durch unterschiedliche Gefahren in einer **Risikomatrix** als Grundlage für Planungen im Bevölkerungsschutz. In der Risikomatrix (Abb. 3) werden die unterschiedlichen Ergebnisse der vom BBK durchgeführten Risikoanalysen visualisiert. Sie entspricht dem internationalen Standard DIN ISO 31010: 2009 [DIN ISO 31010].

Die Risikomatrix enthält für die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß gem. BBK jeweils eine fünfstufige Klassifizierung, die bei den erstellten Risikoanalysen zur Anwendung kommt.

Klassifizierung der *Eintrittswahrscheinlichkeit*:

- A: sehr unwahrscheinlich = $1 \times \text{in} > 10.000$ Jahren
- B: unwahrscheinlich = $1 \times \text{in} 1.000$ bis 10.000 Jahren
- C: bedingt wahrscheinlich = $1 \times \text{in} 100$ bis 1.000 Jahren
- D: wahrscheinlich = $1 \times \text{in} 10$ bis 100 Jahren
- E: sehr wahrscheinlich = $1 \times \text{in} < 10$ Jahren

Bezüglich des *Schadensausmaßes* werden die Schutzgüter, Mensch, Umwelt, Wirtschaft, Versorgung und Immateriell unterschieden und jeweils in fünf Schadenswerte unterteilt. Für das Schutzgut Mensch wird angesetzt:

- A: ≤ 10 Tote
- B: $> 10 - 100$ Tote
- C: $> 100 - 1.000$ Tote
- D: $> 1.000 - 10.000$ Tote
- E: > 10.000 Tote.

Das BBK kommt aufgrund bisher durchgeführter Risikoanalysen zu folgender Gesamtbewertung in Bezug auf die „Schutzart Mensch“ (Abb. 3).

Risikomatrix – Schutzart Mensch					
Eintrittswahrscheinlichkeit	A: sehr unwahrscheinlich	B: unwahrscheinlich	C: bedingt wahrscheinlich	D: wahrscheinlich	E: sehr wahrscheinlich
Schadensausmaß:					
E: katastrophal			Pandemie		
D: groß	Sturmflut		Wintersturm, Dürre		
C: mäßig		Schmelzhochwasser			
B: gering					
A: unbedeutend					
Risiko	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch	

Abb. 3: Risikomatrix, Schutzart Mensch

Laut BBK gehören seismische Ereignisse zu den Ereignissen mit potentieller Bundesrelevanz. Für die Region Rhein-Erft-Kreis wurde eine Erdbeben-Risikoanalyse durch das BBK für den Fall eines Extrem-Erdbebens (definiertes Szenario: Erdbeben mit einer Momentmagnitude von $M_w = 6.5$) erarbeitet [BBK 2019]. Zur Einordnung dieses untersuchten Erdbebens: [Grünthal 2018 a]: *Although earthquakes with moment magnitudes $M_w > 6$ are not known to have occurred within Germany in the historical past, they have struck the immediate surroundings and could be expected within the country as well.*

Im Rahmen der vorliegenden Studie ist es die Aufgabe, die Gefahr eines Norm-Erdbebens (Bemessungsbeben) vor allem für Bayern einzuordnen.

2.2 Grundlagen zur Thematik Erdbeben

Da diese Risikoanalyse zur Erdbebengefahr in Bayern auch für eine Zielgruppe geschrieben wird, für die dieses Thema neu ist, sollen die wesentlichen Grundlagen möglichst allgemeinverständlich und knapp dargestellt werden.

Das Erdbeben ist ein Naturereignis, das nicht vom Klimawandel abhängig ist, anders als Niederschläge, Stürme, Hitze, etc. Die seismischen Voraussetzungen bleiben damit über lange Zeiträume grundsätzlich gleich; nennenswerte Veränderungen der tektonischen Bewegungen werden nicht festgestellt. Sie werden im Zuge der Erdbeobachtung kontinuierlich gemessen (z. B. DLR). Nach Leydecker [Leydecker 2011] treten Schadenbeben in Deutschland sehr selten auf, oft weniger als ein Ereignis je Generation. Da die Generationendauer heute etwa 30 Jahre umfasst, könnte man bzgl. eines Schadenbebens auch sagen, dass es vergleichsweise häufig auftritt, wenn es einmal pro Generation auftritt, was jedoch nicht der Fall ist (s. Abschnitt 3). Beim Bemessungsbeben gehen wir davon aus, dass es einmal in 475 Jahren eintritt. Wir sehen, dass die Einstufung in „sehr selten“ und „häufig“ von der subjektiven Darstellung des Betrachters abhängen kann.

Doch was ist ein Schadenbeben und wie werden Erdbeben klassifiziert? In den Medien lesen und hören wir immer wieder von der „Stärke“ eines Erdbebens. Doch was bedeutet diese Aussage? Zur Einordnung der Stärke eines Erdbebens werden von Seismologen im Wesentlichen zwei unterschiedliche Skalen verwendet; die

- Magnitudenskala und die
- Intensitätsskala.

Beide werden kurz erläutert, weil sie für das Verständnis für die Stärke von Erdbeben und deren Einordnung sehr wichtig sind.

- **Magnitudenskala**

Die Magnitudenskala (Richterskala) wurde von den Seismologen Charles Francis Richter und Beno Gutenberg am California Institute of Technology in Pasadena entwickelt, 1935 publiziert und anfänglich als M_L -Skala (Lokal-Magnitude) bezeichnet (Tab. 1) ([Richter 1935]). Die Richterskala basiert auf der bei einem Erdbeben freigesetzten Energie. Da die Erdbebenenergie nicht messbar ist, werden geophysikalische Modelle entwickelt, mit deren Hilfe die bei einem Erdbeben freigesetzte Erdbebenenergie näherungsweise berechnet werden kann (im einfachsten Fall z. B. das COULOMB-Modell (Reib-Modell), das auch z. B. zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Werkstoffen eingesetzt wird). Zur Bestimmung der freigesetzten Erdbebenenergie mit Hilfe der geophysikalischen Modelle müssen die tektonischen Spannungen (integriert Kräfte) bekannt sein und die Bodenbewegungen (Verschiebungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen) mit Seismometern gemessen und in Seismogrammen dargestellt werden. Direkt messbar sind nur Verschiebungen bzw. Verformungen. Geschwindigkeiten und

Beschleunigungen werden daraus durch Ableitung nach der Zeit berechnet. Es gibt jedoch auch Sensoren, die durch Signalanpassung und Kalibration, Beschleunigungen indirekt messen (Beschleunigungssensoren, Seismometer). Die Erdbebenstärke bzw. die Erdbebenenergie werden in Magnituden (Größe, Stärke) eingeteilt. Man hat sich darauf geeinigt, sie logarithmisch darzustellen, damit die sehr unterschiedlichen Größenordnungen überhaupt darstellbar sind. Eine Erhöhung der Magnitude um eine Einheit entspricht somit einer Vergrößerung der Bodenbewegung um den Faktor 10. Bezogen auf die freigesetzte Erdbebenenergie entspricht die Erhöhung der Magnitude um eine Einheit einer Erhöhung der Energie auf etwa das 32-fache. Daraus darf aber nicht gefolgert werden, dass auch die Erdbebenbeschleunigungen als Einwirkungen auf Tragwerke sich in dem Maße erhöhen. Hierzu gab es nach der Fukushima-Katastrophe 2011 in den Medien Fehlinterpretationen, weil Energien mit Belastungen gleich gesetzt wurden. Dazu später mehr.

Tabelle 1: Richterskala bzw. Magnitudenskala und Erläuterungen

Richter-Magnituden	Einteilung der Erdbebenstärke	Erdbebenauswirkungen	Häufigkeit weltweit
< 2,0	Mikro	Mikro-Erdbeben, nicht spürbar	≈ 8000-mal pro Tag (> M 1,0)
2,0 ... < 3,0	extrem leicht	Generell nicht spürbar, jedoch gemessen	≈ 1500-mal pro Tag
3,0 ... < 4,0	sehr leicht	Oft spürbar, Schäden jedoch sehr selten	≈ 49.000-mal pro Jahr
4,0 ... < 5,0	leicht	Sichtbares Bewegen von Zimmergegenständen, Erschütterungsgeräusche; meist keine Schäden	≈ 6200-mal pro Jahr
5,0 ... < 6,0	mittelstark	Bei anfälligen Gebäuden ernste Schäden, bei robusten Gebäuden leichte oder keine Schäden	≈ 800-mal pro Jahr
6,0 ... < 7,0	stark	Zerstörung im Umkreis bis zu 70 km	≈ 120-mal pro Jahr
7,0 ... < 8,0	groß	Zerstörung über weite Gebiete	≈ 18-mal pro Jahr
8,0 ... < 9,0	sehr groß	Zerstörung in Bereichen von einigen hundert Kilometern	≈ einmal pro Jahr
9,0 ... < 10,0	extrem groß	Zerstörung in Bereichen von tausend Kilometern	≈ alle 20 Jahre
≥ 10,0	globale Katastrophe	Noch nie registriert	unbekannt

Die ursprüngliche Richterskala M_L ist nach oben auf die Magnitude 6,5 begrenzt, weil sie eine Lokalmagnitude ist. Höhere Magnituden werden mit der Momenten-Magnituden-Skala (M_w)

bestimmt. Sie wird hier nicht beschrieben. Die bei einem Erdbeben freigesetzte Energie, und damit die Magnitudenskala, ist nach oben begrenzt, weil davon ausgegangen wird, dass es kein Erdbeben gibt, das die Erde zerreißt.

Zur Einordnung schwerer Erdbeben seien hier aufgeführt: Das Loma-Prieta-Erdbeben 1989 hatte $M_S = 7,1$, das Kobe-Beben 1995 $M_W = 6,9$, das Sichuan-Beben hatte $M_W = 7,9$, das Haiti-Beben 2010 $M_W = 7,0$. Das schwerste bisher ereignete Erdbeben wurde mit $M_W = 9,5$ (Chile 1960) angegeben.

Für den Autor ist der Vergleich der frei gesetzten Erdbebenenergie mit äquivalenten Explosionsenergien in TNT-Äquivalenten interessant, der hin und wieder in der Literatur zu finden ist. Die Umrechnungen helfen z. B. bei der Bewertung der Gefährdung baulicher Anlagen durch Weltkriegsbomben, die in der Erde liegen. So kann bei Explosionen im Untergrund ein äquivalentes Erdbeben abgeschätzt und für die Berechnung angesetzt werden.

Halten wir fest. Energie ist nicht messbar. Es werden Modelle benötigt, mit deren Hilfe Energie berechnet (abgeschätzt) wird. Die Energie ist kein Maß, mit dem Bauwerke bemessen werden können.

- **Intensitätsskala**

Die Bestimmung der Intensität eines Erdbebens erfolgt durch die Befragung von Menschen im Erdbebengebiet, die die örtlichen Wahrnehmungen und Schäden beschreiben. Experten ordnen diese Beschreibungen dann in ein 12-stufiges Maß für örtliche Schäden an Bauwerken, und bei sehr starken Beben auch Landschaftsveränderungen (Spalten, Risse, Versprünge (z.B. Sankt-Andreas-Spalte)) ein. Inzwischen helfen neben der Befragung Betroffener auch Beobachtungen mit Hilfe von Satelliten. Die Intensität wird subjektiv beschrieben und hängt vom beobachteten Zerstörungsgrad ab. Findet ein Erdbeben in einem Gebiet statt, in dem erdbebengerecht gebaut wurde, dann kann die Intensitätsstufe gering sein, findet das gleiche Erdbeben in einem Gebiet statt, in dem nicht erdbebengerecht gebaut wurde, so kann die Intensitätsstufe bei gleichem Erdbeben groß sein. Die Erdbebenintensität muss also immer im Zusammenhang mit der lokalen Qualität der Bebauung gesehen werden, die sich ständig verbessert. Ein Erdbeben mit der Intensität V in San Francisco kann in Haiti die Intensität IX oder X haben.

Die Erdbebenintensitätsskala ist vergleichbar mit der 12-stufigen Windstärkeskala nach Beaufort. Die Klassifizierung erfolgt bei der Beaufortskala auch nach den Beobachtungen und Wahrnehmungen (z. B. dünne Zweige bewegen sich, Bäume schwanken, Dächer werden abgedeckt, Bäume entwurzelt, Verwüstungen). Allerdings können die Windgeschwindigkeiten zeitlich kontinuierlich sehr gut gemessen werden. Dadurch werden auch Böen sehr gut erfasst. Daraus wird der Winddruck (Bemessungslast) analytisch berechnet. Er steigt mit dem Quadrat der Geschwindigkeit (Verdoppelung der Geschwindigkeit bedeutet eine Vervierfachung des Druckes). Beim Wind und bei der Beaufort-Skala wird ganz bewusst nicht die Windenergie als Kriterium verwendet, weil sie als integrierte skalare Größe für bemessende Ingenieure gar nicht oder nur bedingt hilfreich ist.

Tabelle 2: Makroseismische Intensitätsskala EMS-98 (nach [Grünthal 1998])

EMS Intensität	Definition	Beschreibung der Wirkungen
I	nicht fühlbar	Nicht fühlbar
II	kaum bemerkbar	Nur sehr vereinzelt von ruhenden Personen wahrgenommen.
III	schwach	Von wenigen Personen in Gebäuden wahrgenommen. Ruhende Personen fühlen ein leichtes Schwingen oder Erschüttern.
IV	deutlich	Im Freien vereinzelt, in Gebäuden von vielen Personen wahrgenommen. Einige Schlafende erwachen. Geschirr und Fenster klirren, Türen klappern.
V	stark	Im Freien von wenigen, in Gebäuden von den meisten Personen wahrgenommen. Viele Schlafende erwachen. Wenige werden verängstigt. Gebäude werden insgesamt erschüttert. Hängende Gegenstände pendeln stark, kleine Gegenstände werden verschoben. Türen und Fenster schlagen auf oder zu.
VI	leichte Gebäudeschäden	Viele Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Einige Gegenstände fallen um. An vielen Häusern, vornehmlich in schlechterem Zustand, entstehen leichte Schäden wie feine Mauerrisse und das Abfallen von z. B. kleinen Verputzteilen.
VII	Gebäudeschäden	Die meisten Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Möbel werden verschoben. Gegenstände fallen in großen Mengen aus den Regalen. An vielen Häusern solider Bauart treten mäßige Schäden auf (kleine Mauerrisse, Abfall von Putz, Herabfallen von Schornsteinteilen). Vornehmlich Gebäude in schlechterem Zustand zeigen größere Mauerrisse und Einsturz von Zwischenwänden.
VIII	schwere Gebäudeschäden	Viele Personen verlieren das Gleichgewicht. An vielen Gebäuden einfacher Bausubstanz treten schwere Schäden auf; d.h. Giebelteile und Dachgesimse stürzen ein. Einige Gebäude sehr einfacher Bauart stürzen ein.
IX	zerstörend	Allgemeine Panik unter den Betroffenen. Sogar gut gebaute gewöhnliche Bauten zeigen sehr schwere Schäden und teilweisen Einsturz tragender Bauteile. Viele schwächere Bauten stürzen ein.
X	sehr zerstörend	Viele gut gebaute Häuser werden zerstört oder erleiden schwere Beschädigungen.
XI	verwüstend	Die meisten Bauwerke, selbst einige mit gutem erdbebengerechtem Konstruktionsentwurf und -ausführung, werden zerstört.
XII	vollständig verwüstend	Nahezu alle Konstruktionen werden zerstört.

Die Tabelle macht deutlich, dass, sofern vollkommen erdbebengerecht gebaut wird, es selbst bei stärkeren Beben nicht über die Intensität V hinaus gehen kann. Die Intensitätsskala ist also kein objektives Maß, sondern hängt bezüglich der Bauwerksbewertung vom örtlichen Bauzustand ab, der je nach Region sehr unterschiedlich ist und sich zeitlich ändert.

Die beiden unterschiedlichen Skalen können nicht mit physikalischen Gesetzen ineinander überführt werden. Aufgrund von Beobachtungen und Messungen können für einen bestimmten Ort und für einen bestimmten Zeitraum allerdings empirische Zusammenhänge hergestellt werden. Diese können selbst innerhalb Deutschlands unterschiedlich sein.

NEWTONSCHE Bewegungsgleichung

Erdbebeningenieure können mit beiden Skalen nicht arbeiten, da für eine Bemessung von baulichen Anlagen weder Intensitäten noch Energien dienen können. Für die Berechnung von Gebäuden benötigen Bauingenieure physikalische vektorielle Größen wie anhand der Newtonschen Bewegungsgleichung (1) deutlich wird. Sie ist die grundlegende Gleichung der Strukturmechanik:

$$m \ddot{x}_t + d \dot{x}_t + k x_t = F_t, (1),$$

wobei $m \ddot{x}_t$ die **Massenkraft** ist, die sich ergibt aus Masse mal Beschleunigung, $d \dot{x}_t$ ist **Dämpfungskraft**, die sich ergibt aus der Strukturdämpfung mal der Geschwindigkeit der Verformungen, $k x_t$ ist die **Steifigkeitskraft**, die, wie auch die anderen Größen, zeitabhängig ist und F_t ist die zeitabhängige **angreifende Kraft**. Alle Größen sind Funktionen der Zeit; im Erdbebenfall selbst die Masse, die Dämpfung und die Steifigkeit. Es stellt sich also die Frage, ob wir mit einer quasistatischen Berechnung und der Vorgabe eines festen zeitunabhängigen Beschleunigungswertes wirklichkeitsnah genug die Sicherheit nachweisen; Sicherheit – Aufwand - Wirtschaftlichkeit.

Die Parameter der Bewegungsgleichung sind Gebäudeparameter und Erdbebenparameter. Die Gebäudeparameter auf der Widerstandsseite sind die skalaren Größen: Masse, Dämpfung und Steifigkeit. Das Bauwerk reagiert auf die Erschütterungen durch das Erdbeben lokal wie global mit Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Bewegungen. Daraus ergeben sich, wie in Gl. (1) dargestellt, die Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitskräfte als zeitabhängige Größen. Das Erdbeben selbst wird in der Bewegungsgleichung als Beschleunigungs-Zeit-Diagramm im Lastvektor dargestellt.

Diskussion zu Erdbebenskala (Geophysik) und Bewegungsgleichung (Ingenieurwissenschaften)

Der Vergleich von Magnitudenskala und Intensitätsskala mit der Newtonschen Bewegungsgleichung verdeutlicht, dass es keinen Zusammenhang gibt zwischen den Erdbebenskala und den Parametern der Newtonschen Bewegungsgleichung. Letztere beinhaltet physikalisch messbare Größen. Bewegungen der Erdoberfläche können inzwischen mit Hilfe von Satelliten gemessen werden (z.B. DLR). Daraus lassen sich Geschwindigkeiten und Beschleunigungen durch Ableitung nach der Zeit berechnen. Beschleunigungen lassen sich allerdings auch indirekt messen (Beschleunigungsmesser, Seismographen). Es stellt sich somit die Frage, wie wir die Grundlagen der Seismologie mit den Grundlagen der Erdbeben-Baudynamik in Einklang bringen können. Das ist physikalisch eigentlich ganz einfach; nämlich über ein entsprechend enges Netz von Seismographen. Die Frage ist aber, über welchen Zeitraum gemessen werden muss, damit statistisch hinreichend viele Erdbeben als Beschleunigungs-Zeit-Diagramm (zumindest in drei Koordinatenrichtungen) dokumentiert werden.

Wie kommen Seismologen nun zur Angabe von Erdbebenbeschleunigungen? Oft wird von Tragwerksplanern fälschlicherweise angenommen, dass Erdbeben Gebäude nur horizontal anregen. Das ist eine falsche Interpretation einer modellhaften Vektorzerlegung in einem orthogonalen Koordinatensystem. Wenn ein Erdbeben tief in der Erde stattfindet (Hypozentrum) dann werden Wellen (z. B. Druckwellen) räumlich erzeugt, die sich in Abhängigkeit von den geologischen

Verhältnissen und vom Baugrund räumlich ausbreiten. Dabei gibt es Wellen, die schneller sind als andere und sich anders verhalten. Erreichen diese räumlichen Wellen die Erdoberfläche, dann werden ihre physikalischen Parameter von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren in horizontale und vertikale Komponenten (Vektoren in einem orthogonalen Koordinatensystem) zerlegt. In Abhängigkeit von der Tiefe eines Erdbebens und von der Entfernung zum Hypozentrum (Erdbebenherd), ergeben sich die Horizontal- bzw. Vertikalkomponenten. Daraus ergibt sich, dass die Vertikalkomponenten auch größer sein können als die Horizontalkomponenten. Allerdings reagieren Bauwerke auf die Anregungen unterschiedlich, zum Beispiel horizontal gestreckte Bauwerke oder Bauteile (z. B. Brücken) anders als vertikal gestreckte (z. B. Hochhäuser). Mit Hilfe von geophysikalischen Modellen, können aus den Bodenbewegungen und Erdbebenwellen Beschleunigungen abgeleitet werden (z. B. [Grünthal 2021]). In den Normen bzw. den nationalen Anhängen werden in der Regel einzelne Werte für Bemessungsbeschleunigungen (z.B. PGA = Peak Ground Acceleration) angegeben. Vergleichsberechnungen haben jedoch gezeigt, dass nicht allein ein PGA-Wert hinreichend zur Beurteilung der Tragfähigkeit ist, sondern der Beschleunigungs-Zeit-Verlauf eines Erdbebens und damit die Erdbebendauer und die Frequenz der Erschütterungen in Abhängigkeit von der Schwingungsfrequenz eines Tragwerkes. Das sind sehr komplexe Erdbeben-Bauwerks-Interaktionen, die allein mit einem Wert der Beschleunigung nicht simuliert werden können.

Als Ergebnis modellhafter geophysikalischer Simulationen werden Beschleunigungen prognostiziert. Tab. 3 gibt die Referenz-Spitzenwerte der Bodenbeschleunigung a_{gR} in DIN EN 1998-1/NA:2011-01 an und deren Zuordnung zu Intensitäten I der EMS-Skala (alte Norm).

Tab. 3: Referenz-Spitzenwerte der Bodenbeschleunigung a_{gR} in DIN EN 1998-1/NA:2011-01 und NA:2018 sowie Zuordnung zu Intensitäten I der EMS-Skala, 475 Jahre, Bedeutungskategorie II $\gamma_I = 1,0$, Felsuntergrund A-R

Erdbebenzone	EMS-Skala Intensitätsintervall	NA:2011 a_{gR} [m/s^2]	NA:2018 a_{gR} [m/s^2]	Wirkung
0	$6 \leq I < 6,5$	-	0,24-0,39	Leichte Gebäudeschäden (z. B. Risse im Putz vor allem bei Gebäuden in schlechtem Bauzustand)
1	$6,5 \leq I < 7$	0,4	0,40-0,59	
2	$7 \leq I < 7,5$	0,6	0,60-0,79	Gebäudeschäden, z. B. Risse und Spalten in Mauerwerk, einstürzende Kamine. Die meisten Personen in Gebäuden erschrecken und flüchten nach draußen. Möbel verrutschen und viele Gegenstände fallen aus Regalen und offenen Schränken. Viele normale Gebäude werden beschädigt, so etwa durch Mauerrisse und teilweise einstürzende Kamine.
3	$7,5 \leq I$	0,8	0,80-1,54	

Die Spalten zwei, drei und vier sollen im Vergleich interpretiert werden. Während sich bei der Schrittweite der Intensität um Eins die Erdbebenstärke etwa verzehnfacht und die Erdbebenenergie verdreißigfach, steigen die Erdbebenbeschleunigungen in Spalte 3 in gleichen Schritten um den Wert $[0,2 m/s^2]$. Die Tabelle verdeutlicht die Diskrepanz zwischen seismischer Kategorisierung und dem Erdbebeningenieurwesen, denn alle Gebäude werden nach der gleichen Sicherheitsphilosophie bemessen, unabhängig von der Erdbebenzone. Werden also Gebäude erdbebengerecht bemessen,

dann haben sie unabhängig von der Erdbebenzone die gleiche Sicherheit und damit prinzipiell die gleiche Schadenserwartung (auf unterschiedliche Schadensklassen und die mögliche Akzeptanz von Schäden soll hier nicht eingegangen werden).

Man kommt also nach erdbebengerechtem Bauen normativ nie über die Intensität 7 (VII) hinaus. Würde der Freistaat wegen der Einführung des EC8/NA: 2020 ein entsprechendes Erdbebenertüchtigungsprogramm aufsetzen, dann wären nach Ertüchtigung für Bemessungsbeben keine Erdbebenintensitäten > 6,5 mehr möglich.

Aus dieser Diskussion wird deutlich, dass wir eine Transformation brauchen, hin zu objektiven Kriterien, die möglichst messbar sind und sich an der Newtonschen Bewegungsgleichung orientieren, denn zumindest hier ist die Nahtstelle von Geophysik und Bauwesen. Der Schutz von Leib und Leben (Schutzgut Mensch) erfordert, dass wir uns daran orientieren, dass Menschen nicht durch einstürzende Bauwerke und herabstürzende Bauteile oder Gegenstände gefährdet werden.

Die Intensitätsskala war und ist ein Ansatz zur Bewertung von Erdbeben, wenn keine anderen Kenntnisse vorliegen. Sie ist allerdings im Rahmen des Erdbebeningenieurwesens veraltet und für das Erdbebeningenieurwesen nicht geeignet. Selbst im Katastrophenschutz ist allein die Beschreibung der Wirkung eines Erdbebens (Tab. 3, letzte Spalte) wichtig, nicht aber die Zuordnung zu Intensitäten oder Stärken. Hierbei helfen heute auch Satelliten, Überflüge und Daten, die von mobilen Endgeräten (z.B. Smartphones) übermittelt werden. In einem Deutsch-Indischen BMBF-Verbundvorhaben, hat der Autor mit seinem Team BauProtect u.a. untersucht, wie gut unterschiedliche Smartphones Beschleunigungen messen. Ergebnis: erstaunlich gut.

Die Normenentwicklung trägt dem nun auch Rechnung. Während der NA:2011 intensitätsbasiert war, ist der NA:2020 weitgehend Magnituden basiert. Aus Sicht eines Erdbebeningenieurs wäre zu wünschen, dass die Transformation weiter geht, hin zu bewegungsgrößenbasiert (Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Bewegungen). Das sind die einzigen Größen, mit denen Tragwerksplaner arbeiten können – Bewegungs-Zeit-Verläufe.

Das Erdbebeningenieurwesen ist ein ziemlich komplexes Gebiet, das immer noch nicht hinreichend erforscht ist. Deshalb ist es weiterhin erforderlich, neben physikalisch basierten Methoden auch statistische und empirische Methoden zu verwenden. Erstere sollten jedoch mehr und mehr Beachtung finden und die Basis zur Bestimmung der Bemessungsbeschleunigungen sein. Dabei wird es die große Herausforderung bleiben, „das“ Bemessungsbeben festzulegen.

2.3 Grundlagen zur Erdbebennormung – Einwirkungen

Nach Grünthal et al. [Grünthal 2021] führten Neuauswertungen und Fortschreibungen der vorliegenden Erdbebenmessungen sowie Verbesserungen in den Prognosemodellen zu einer geoseismischen Neubewertung der Erdbebengefährdung in Deutschland. Im Unterschied zum EC 8/NA:2011, in dem die Erdbebenzonen im Rahmen einer probabilistischen seismischen Hazard-Abschätzung (PSHA) gemäß Parametrisierung nach makroseismischen Intensitäten dargestellt werden, folgt EC 8/NA: 2020 dem international etablierten Standard der Angabe von zu erwartenden Spitzenbodenbeschleunigungen (Peak Ground Acceleration, PGA) in der Erdbebengefährdungskarte. Hierbei sind Intensität und PGA nicht in direktem Vergleich darstellbar. Vielmehr bedarf es einer Korrelationsbildung, für die von Grünthal et al. [Grünthal 2021] Vorschläge unterbreitet wurden.

Grünthal schreibt in [Grünthal 2018b]: „Die Gründe für die Notwendigkeit einer Aktualisierung sind vielfältig – neben der Nutzung physikalischer Bodenbewegungsgrößen zur Parametrisierung der Ergebnisse probabilistischer seismischer Hazard-Abschätzungen (PSHA) sind es u. a. die Seismizitätsdaten selbst. Diese konnten in den letzten ca. 2 Jahrzehnten seit Beendigung der Arbeiten zur Gefährdungskarte von 1995 grundlegend überarbeitet werden. In einzelnen Erdbebenherdzonen Deutschlands haben nach den nunmehr vorliegenden Erkenntnissen mehr als 60 % der Schadenbeben im deutschen Erdbebenkatalog überhaupt nicht stattgefunden. Solche drastischen Änderungen in der Datenbasis schlagen sich natürlich in den Erdbebengefährdungseinschätzungen nieder. Des Weiteren konnten grundlegende Harmonisierungen in der Stärkebemessung historischer und instrumenteller Seismizitätsdaten in Momentmagnituden M_w erreicht werden. Auf die heute bestehenden Möglichkeiten, Unsicherheiten in den Eingangsgrößen und in den der Berechnung zugrunde liegenden Modellen umfassend in PSHA einfließen zu lassen, wurde bereits hingewiesen. Schließlich liegt seit 2014 eine grundlegend verbesserte Generation von Prognosemodellen der Starkbodenbewegungen (Ground Motion Prediction Equations GMPE) vor, welche ebenso maßgeblich zu realistischeren Abschätzungen der Erdbebengefährdung beitragen.“

Grünthal weist neben der natürlichen tektonischen Erdbebenaktivität auch auf die Seismizität infolge induzierter seismischer Ereignisse durch Eingriffe des Menschen in den Untergrund durch Bergbau, Öl- und Gasförderung sowie Geothermie hin. Diese induzierten Beben sind in Bayern von untergeordneter Bedeutung.

Weiterhin schreibt Grünthal in [Grünthal 2018b]: „Aus Ergebnisdarstellungen wird zudem deutlich, dass Mittelwerte aus einer großen Anzahl gut begründeter Einzelergebnisse, wie im vorliegenden Projekt, ein stabileres Verhalten zeigen als die sich eher zufällig ergebenden Medianwerte. Mittelwerte entsprechen den Erwartungswerten. Mittelwerte von Wahrscheinlichkeitsaussagen werden für praktische und ingenieurtechnische Anwendungen zunehmend bevorzugt. So basieren neuere Baunormen (wie z. B. der 2015 National Building Code of Canada (NBCC 2015) oder die neue Baunorm Italiens (meletti, pers. Mitteilung 2017)) auf Mittelwerten. Folgerichtig werden Mittelwerte vom CEN SC8 im Ergebnis von SHARE (SHARE 2014) für die Europäische Baunormung empfohlen. Auch die Ermittlung von Schadenserwartungswerten von Bauwerken, Kosten-Nutzen-Abschätzungen und Risikoberechnungen, die stets als Mittelwerte ausgewiesen werden, beruhen dementsprechend auf Mittelwerten der Erdbebengefährdung.“ Diese Aussage muss relativiert werden. Denn die Sicherheitsphilosophie der Bemessungsnormen beruht nicht nur auf Mittelwerten, sondern auch auf Medianwerten und besonderen Quantilen gem. Wahrscheinlichkeitstheorie.

[Grünthal 2018b]: „Die derzeit gültige Zonierungskarte im NA zur DIN EN 1998-1 stammt, ..., noch von der intensitätsbasierten PSHA-Karte bzw. erweitert für die Karte der D-A-CH-Staaten von [Grünthal 1998]. Im Rahmen des hier beschriebenen Projekts wurde eine intensitätsbasierte Gefährdungskarte zur Plausibilitätskontrolle berechnet – sie eignet sich selbstverständlich auch für den Vergleich mit der alten Karte von vor 22 Jahren. Auch hier zeigt sich eine generell frappierend gute Übereinstimmung. Höhere Gefährdungen zeigt die alte Karte jedoch z. B. im nördlichen Oberrhein-Graben, in den Herdzonen vom Vogtland bis in den Raum Leipzig sowie zwischen Altmühl und Donau. Die Ursache für die geringere Neubewertung der Gefährdung liegt u. a. darin begründet, dass hier ein Teil der bisherigen signifikanten bzw. Schadenbeben im Rahmen der Arbeiten für den CENEC-Katalog als Fake-Beben identifiziert wurde.“

[Grünthal 2021]: „Ein direkter Vergleich der beiden NA ist jedoch grundsätzlich nur eingeschränkt möglich. Denn ein wesentliches Element des NA:2011 ist die Zuordnung von Referenz-Spitzenwerten der Bodenbeschleunigung zu berechneten makroseismischen Intensitäten der

Erdbebengefährdungskarte. Diese Zuordnung im Rahmen des NA:2011 wird im vorliegenden Beitrag sowohl anhand klassischer als auch modernerer empirischer Relationen gespiegelt, um zu verdeutlichen, dass diese Zuweisung nur sehr bedingt den Beobachtungsdaten gerecht wird. Aber gerade diese Beobachtungsdaten bilden das Rückgrat zur Berechnung der Erdbebenkarte des NA:2018. Dieser Gegensatz begründet wesentlich die Limitierung des direkten Vergleichs, stellt aber nur einen Aspekt der hier behandelten Thematik dar.“

Grünthal stellt hier den problematischen Ansatz hinsichtlich der Intensitäten dar und begründet den Paradigmenwechsel hin zu Beobachtungsdaten. Wir werden im Abschnitt Risikoanalyse sehen, dass genau die Beobachtungsdaten risikoanalytisch keine Erhöhung der Erdbebenanforderungen rechtfertigen.

In den Publikationen von Grünthal wird durchgehend nicht definiert, was Beobachtungsdaten sind. Manchmal hat der Leser den Eindruck, dass Beobachtungsdaten gemessene Daten sind. Diesbezüglich wäre eine klare Definition gut. Üblicherweise wird mit den Sinnen beobachtet und mit Messinstrumenten gemessen – Subjektivität vs. Objektivität.

Grünthal schreibt in [Grünthal 2021] unter Abschnitt 3.1: „Die makroseismische Intensität repräsentiert eine Klassifikation der Stärke von Bodenerschütterungen während eines Erdbebens auf der Grundlage beobachteter Effekte an einem Ort, ...“

Nach meinem Verständnis wird hier die Kausalität verdreht. Nach all dem, was Grünthal bisher geschrieben hat, repräsentiert die makroseismische Intensität eine Klassifikation der Schäden auf der Grundlage beobachteter Effekte. Daraus wird als Folge empirisch auf die Stärke von Bodenerschütterungen während eines Erdbebens an einem Ort geschlossen. Diese Rückschlüsse sind mit großen Unsicherheiten behaftet, wie die Zuordnungen von Intensitäten zu Magnituden zeigen.

Mit Grünthals Aussage [Grünthal 2021 3.1] „Versuche, die Stärke von Erdbeben und die hierbei beobachteten Effekte in Form von physikalischen Parametern wie die der beobachteten Spitzenbodenbeschleunigung PGA auszudrücken, reichen bis in das letzte Viertel des vorletzten Jahrhunderts zurück. **Zur Mitte der 1970er-Jahre lagen sodann genügend Beobachtungsdaten zu PGA vor**, dass sich zeigte, dass die Streuung beobachteter PGA-Werte, aufgetragen über beobachteten Intensitätswerten, bis zu zwei Größenordnungen umfasst.“, haben wir doch eigentlich die Beantwortung unserer Fragen, wenn wir „beobachtet“ durch „gemessen“ ersetzen dürfen. Es liegen nach Grünthal also genügend PGA-Werte vor, noch besser wären die Beschleunigungs-Zeit-Verläufe.

Weiterhin vergleicht Grünthal in [Grünthal 2018b] die Erdbebengefährdungskarten entlang der gemeinsamen Grenze Deutschland-Schweiz. „Die Übereinstimmung beider Karten ist entlang der Grenze verblüffend gut.“

Hier zeigt sich ein Dilemma der Modellbildung und der nationalen Vereinbarungen. Die Seismizität findet natürlich kontinuierlich Grenzen übergreifend statt. Nun springen die spektralen Beschleunigungen normativ an den Ländergrenzen mehr oder weniger (s. auch [Butenweg 2021], Abb. 5.3). Woher kommen diese rechnerischen Diskontinuitäten? Weiß das Erdbeben davon? Hat man ihm das mitgeteilt? Schon Aristoteles (384-322 v.Chr.) wusste: Natura non facit saltus – die Natur macht keine Sprünge.

[Grünthal 2021]: „In dieser Norm (DIN 4149) wird explizit darauf hingewiesen, dass diese „angenommenen Beschleunigungen ... nicht identisch mit den bei Erdbeben bereits gemessenen Bodenspitzenbeschleunigungen“ sind, „die höher liegen ...“. Physikalische oder empirisch abgesicherte Beziehungen zwischen PGA und a_0 existieren nicht. In der DIN 4149:2005-04, in die die

Resultate aus [Grünthal, Bosse 1996] einfließen, werden die vormals „angenommenen Beschleunigungen“ nach [DIN 4149] nun als „Bemessungswerte der Bodenbeschleunigung a_g “ bezeichnet. Im EC 8, in der Fassung der DIN EN 1998-1:2010-12, ist es „ a_{gR} “, die „Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung für Baugrundklasse A“.

In diesem Abschnitt verbergen sich für den Erdbebeningenieur mehrere Fragen. Die PGA („ a_{gR} “), die bereits gemessen wurden, sind höher als die niedrigeren Regelwerte für die Horizontalbeschleunigung a_0 , deren geringeren Werte in der Höhe in Deutschland aber schon nicht gemessen wurden. Und von einer Normengeneration zur anderen wird $a_0 = a_g = a_{gR}$. Das erscheint mystisch.

Zum einen wird definiert, dass Intensitäten beobachtet werden, dann schreibt Grünthal in [Grünthal 2021] von berechneten Intensitäten und stellt sie gem. Tab. 3 den Beschleunigungen gegenüber. Es wird für den Leser nicht klar, was der Unterschied zwischen berechneten und beobachteten Intensitäten ist, oder ob sie gleichzusetzen sind. Für berechnete Intensitäten müssten ja Schadensberechnungen an Bestandsbauwerken durchgeführt werden. Derartige Berechnungen sind dem Autor nicht bekannt.

Nach Akkermann [Akkermann 2021] hat sich gegenüber der ersten deutschen Erdbebennorm von 1957 die Maximaleinwirkung infolge Erdbeben um fast 300 % erhöht, obgleich sich für die Erdbebenintensitäten keine neuen Erkenntnisse ergeben haben. Damit werden fast alle Bestandsgebäude in deutschen Erdbebengebieten normativ-rechnerisch in den Stand der Unsicherheit versetzt, weil sie rechnerisch keine ausreichende Standsicherheit haben.

Das im EC 8/NA:2020, NDP zu 2.1.(1)P definierte Schutzziel für die Bedeutungskategorien I–III basiert auf der Verpflichtung zur Abwehr der Gefahr für Leib und Leben (Schutzgut Mensch). Die Möglichkeit eines wirtschaftlichen Totalschadens wird durch die normativen Vorgaben nicht ausgeschlossen. Lediglich für die Bedeutungskategorie IV wird die Funktionstüchtigkeit auch nach einem Bemessungsbeben angestrebt.

Der Abschnitt 2.3 verdeutlicht die Komplexität der Thematik. Es wird auch deutlich, dass unterschiedliche Begrifflichkeiten zu unterschiedlichen Interpretationen führen können. Dass Grünthal den Anwenderkreisen in [Grünthal 2021] quasi „Unsachlichkeit“ unterstellt, zeigt eigentlich, dass die Fachgebiete Übersetzer engagieren müssten, damit das babylonische Sprachengewirr zwischen den Fachgebieten überwunden wird. Kritik von Experten (Kollegen) sollte nicht als unsachlich bezeichnet werden.

3. Historische Erdbeben – Erdbebengefährdung in Bayern

Um die Erdbebengefährdung an einem Ort oder in einer Region einschätzen zu können, ist es auch erforderlich, Daten über historische Erdbeben auszuwerten. Leydecker schreibt in [Leydecker 2011] unter 2.3 „...; denn nur wer die Vergangenheit gut kennt, kann hinreichend verlässliche Aussagen für die Zukunft treffen.“

Beim Hochwasser sprechen wir von einem statistischen Jahrhunderthochwasser als Bemessungshochwasser, also einem 100-jährlichen Ereignis. Beim Erdbeben sprechen wir im Regelfall weltweit von einem 475-jährlichen Erdbeben als Bemessungserdbeben (Wiederkehrperiode 475 Jahre, Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,0$, Felsuntergrund A-R). Das basiert auf der Festlegung einer 10-prozentigen Überschreitenswahrscheinlichkeit in 50 Jahren (50 Jahre als prognostizierte Lebensdauer baulicher Anlagen). Der Beobachtungszeitraum sollte möglichst größer sein als diese

475 Jahre. Doch wie groß sollte der Beobachtungszeitraum tatsächlich sein, um statistisch hinreichende Daten zu bekommen? Hierauf gibt es keine eindeutige Antwort.

Seismometer gibt es etwa seit 1875. Seit etwa 1900, also seit etwa 120 Jahren, hat man in Deutschland mit dem Aufbau eines Netzes von Seismometer-Stationen begonnen (Abb. 4).

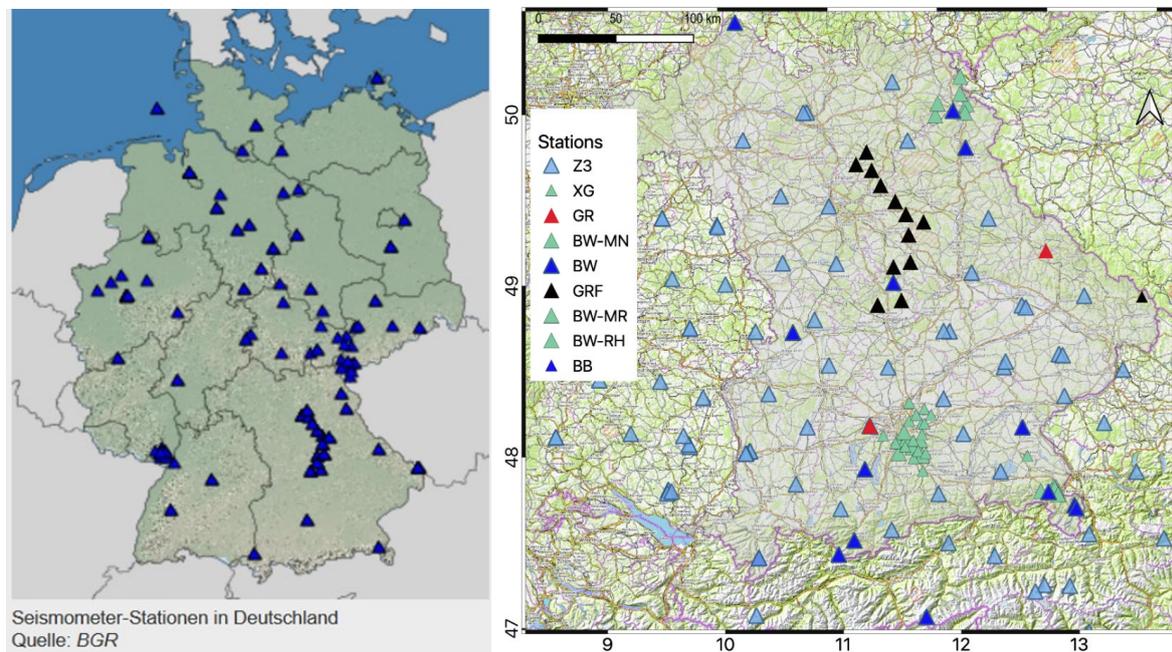


Abb. 4: links: In Deutschland gibt es gem. Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) mehr als 200 seismische Messstationen, die von Hochschulinstituten, Landeserdbebendiensten und der BGR betrieben werden. Die hohe Stationsdichte in der niederrheinischen Bucht, dem Rheintal-Graben und im Vogtland spiegelt die Lage der erdbebengefährdeten Gebiete in Deutschland wider. Mit engräumigen Stationsnetzen können die dort auftretenden Erdbeben sehr genau lokalisiert und ihre Ursachen untersucht werden. Rechts: Erdbebendienst Bayern: Verteilung des Seismometernetzes mit den Subnetzen in den Regionen Bad Reichenhall, Marktredwitz und München. Zur Verdeutlichung sind alle bekannten verspürten Erdbeben als rote Kreise in die Karte mit eingezeichnet. Die Stationen des Erdbebendienstes Bayern sind als blaue bzw. orange Dreiecke markiert, rote Dreiecke repräsentieren die durch die LMU München mit betreuten Stationen des Deutschen Regionalnetzes (GRSN). Bei Bedarf kann noch zusätzlich auf die Daten der Stationen des Gräfenberg-Arrays und GERESS (beide schwarz) zurückgegriffen werden. <https://www.erdbeben-in-bayern.de/erdbebendienst/stationen/> Den Karten ist zu entnehmen, dass in den südlichen bayerischen Erdbebengebieten quasi keine Messstationen existieren.

Die ersten Seismometer waren noch so grob, dass sie erst bei größeren Erschütterungen messen konnten. Erst nach dem verheerenden Loma-Prieta-Erdbeben in Kalifornien im Jahr 1989 wurden Sensoren deutlich verbessert, Messstationen verdichtet und weltweit die Erdbebennormen den neuen Erkenntnissen angepasst. Systematische Messungen mit hinreichend empfindlichen Seismometern wurden nach Leydecker (Leydecker 2011) erst ab etwa 1960 durchgeführt, also seit etwa 60 Jahren. Das ist im Vergleich mit 475 Jahren ein eindeutig zu kurzer Zeitraum, um die seit 1960 gemessenen Erdbeben statistisch als hinreichend anzusehen. Deswegen ist es auch weiterhin erforderlich, historische Quellen auszuwerten und die Richterskala zu bemühen.

Es gibt Datenbanken, die vergangene Erdbeben und ihre Folgen auflisten. Die dem Autor verfügbaren drei Datenbanken werden im Folgenden auf Schadenbeben hin durchsucht und tabelliert (Tab. 4).

Der **Erdbebendienst Bayern**, ein Dienst der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) und des bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) listet Erdbeben in Bayern auf, die seit 1390 aufgetreten sind, also seit 631 Jahren. Die Liste enthält Erdbeben oberhalb der Fühlbarkeitsgrenze (Intensität mind. 2 bzw. Lokalmagnitude > 2.0). Das sind ca. 230 Erdbeben. Im Folgenden werden grundsätzlich nur die Erdbeben aufgeführt, die gemäß den Erdbebenskalen Schäden an Gebäuden und baulichen Infrastrukturen erzeugen können (Intensität > 6, M > 5 (Richter)). Dabei werden auch Erdbeben aufgelistet, die in der Nähe der bayerischen Staatsgrenzen stattfanden (untere Zeilen der Tabelle 4).

Tab. 4: Erdbebenkatalog, Erdbeben in Bayern und unmittelbar anliegenden Regionen seit 1390, <https://www.erdbeben-in-bayern.de/erdbebendienst/erdbebenkatalog/lokalbeben/> Aufruf 11. März 2021

Datum	Tiefe	Lokal-magnitude	Intensität (MSK)	Ort	Sachschäden	Verletzte / Tote
1471-5	-	k.A.	7,0	Nördlingen		
1542-11-08		k.A.	6,0	Leutkirch		
1591		k.A.	6,0	Neuburg D.		
1720-12-20		k.A.	7,5	Lindau		
1769-08-04		k.A.	7,0	Donauwörth		
1796-03-03		k.A.	6,0	Dillingen		
1847-04-07		k.A.	7,0	Eisfeld, Thü. Wald		
1879-12-13		k.A.	6,0	Dinkelsbühl		
1904-11-10		k.A.	6,0	Donauwörth		
1915-06-02		5,0	6,5	Altmühltal		
1915-10-10		4,9	7,0	Altmühltal		
An Bayern angrenzende Erdbeben						
1346-11-24		k.A.	VIII	Gera		
1366-05-24		k.A.	VIII	Gera		
1872-03-06		k.A.	VIII	Posterstein, Thüringen	unbekannt	Tote (Anzahl unbekannt)
1911-11-16	10	6,1	VIII	Albstadt-Ebingen	6250 Gebäude, 750.000 DM	
1943-05-28	9	5,6	VIII	Albstadt		
1978-09-03	6	5,7	VIII	Tailfingen, Schw. Alb	275 Mio. DM, gutes Mauerwerk und Stahlbeton kaum Schäden (I=6)	

In der Datenbank des bayerischen Erdbebendienstes werden keine Sachschäden, Verletzte oder Tote für die Erdbeben in Bayern verzeichnet.

In der **Wikipedia-Datenbank** (https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Erdbeben_in_Deutschland, Aufruf 27.03.2021) werden hauptsächlich schwerere Erdbeben verzeichnet. Die letzten sechs Zeilen der Tabelle 4 führen stärkere Erdbeben der Wikipedia-Datenbank auf, die in unmittelbarer Nachbarschaft zu Bayern stattfanden. In Bayern selbst gab es gemäß der Wikipedia-Datenbank keine

Schadenbeben in der Vergangenheit. Auch hier werden keine Verletzten und Toten verzeichnet, wohl aber Sachschäden.

Eine weitere Datenbasis ist der **Erdbebenkatalog für Deutschland von Leydecker** (Leydecker 2011).

Eine weitere Datenbasis ist der **Erdbebenkatalog für Deutschland von Leydecker** (Leydecker 2011). Dieser sehr umfangreiche Erdbebenkatalog umfasst den Zeitraum von 800 bis 2008, also 1.208 Jahre bzw. 1.221 bis heute. Er enthält, bis auf wenige Ausnahmen, keine Angaben zu den Auswirkungen der aufgeführten Erdbeben. Leydecker schreibt, dass im Vogtland bisher maximal die Intensität VII (An vielen Häusern solider Bauart treten mäßige Schäden auf, kleine Mauerrisse, Abfall von Putz, Herabfallen von Schornsteinteilen. Gebäude in schlechterem Zustand zeigen größere Mauerrisse und Einsturz von Zwischenwänden.) beobachtet wurde. Nach Leydecker ereignete sich das schwerste zerstörerische Erdbeben nördlich der Alpen am 18.10.1356 südlich von Basel. Es hatte die Intensität IX. Dabei wurden viele Häuser, Kirchen und Schlösser zerstört und in Basel starben mehr als 300 Menschen (die Zahl schwankt sehr je nach Quelle).

Der **Ahorner-Katalog** wird von Schwarz in [Schwarz et al. 2006, 2010a, 2010b, 2010c, 2015, 2021] vorgestellt. Dieser Erdbebenkatalog umfasst den Zeitraum von 880 bis 2013, also 1133 Jahre bzw. 1141 Jahre bis heute. Schwarz schreibt in [Schwarz 2021]: „Wie maximal die beobachteten Schadensgrade zeigen, sind in deutschen Erdbebengebieten an allgemeinen Hochbauten keine Einstürze (entspricht Schadensgrad „Damage Grade D5“) zu verzeichnen.“

Mit diesen vier Datenquellen können wir einen Zeitraum von 1.221 Jahren auswerten.

Die Tabellen der unterschiedlichen Datenbanken zeigen auch, dass die Intensitätsstärken und die Magnitudenstärken nicht in einen unmittelbaren Zusammenhang gebracht werden können. Der Intensität 5,0 sind Lokalmagnituden von 2,0 bis 4,5 zugeordnet.

Dass die historischen Beben in Bayern keine Intensitäten größer als VII bezeugen, bestätigt lediglich die geringen Gebäudeschäden, ist aber kein Hinweis auf die wirkliche Stärke der Erdbeben. Es gibt auch kaum Angaben zu Magnituden. Die wenigen Angaben gehen nicht über eine Magnitude 6 hinaus (Quellen gem. Tab. 4).

Die Tabellen der unterschiedlichen Datenbanken zeigen auch, dass die Intensitätsstärken und die Magnitudenstärken nicht in einen unmittelbaren Zusammenhang gebracht werden können. Der Intensität 5,0 sind Lokalmagnituden von 2,0 bis 4,5 zugeordnet. Auch hierdurch werden die Schwächen der Intensitätsskalen deutlich.

Grünthal schreibt in [Grünthal 2018a]: *Although earthquakes with moment magnitudes $M_w > 6$ are not known to have occurred within Germany in the historical past, they have struck the immediate surroundings and could be expected within the country as well.*

Diese Aussage macht wieder deutlich, dass man festlegen sollte, was ein statistisch relevanter Zeitraum bezüglich Erdbeben sein sollte. Es geht auch um die Frage, wie selten ein Ereignis sein sollte, das als Grundlage für die Sicherheit von Bauwerken zum Schutz der Bevölkerung dienen sollte. Für zu akzeptierende Extremereignisse müssen vielleicht die Katastrophenmanagementpläne angepasst werden. Das wurde im Rahmen einer Risikoanalyse für ein Erdbebenereignis im Rhein-Erft-Kreis diskutiert ([BBK 2019]).

Grünthal nimmt auch Bezug auf die Gefährdung besonders zu schützender Infrastrukturen. Doch die schützen wir auch heute schon besonders, z.B. durch die Bedeutungskategorien (Tabelle 5) oder durch besondere Anforderungen an Kraftwerke, Industrieanlagen und Stauanlagen, für die es ein

besonderes unabhängiges Risikomanagement gibt, das z.B. Interdependenzen und Resilienzstudien berücksichtigt.

Zur Bedeutungskategorie II (gewöhnliche Bauten) mit einem Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,0$ gehört die Wiederkehrperiode von 475 Jahren. Zur Bedeutungskategorie IV (kritische Infrastruktur) mit einem Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,4$ gehört die Wiederkehrperiode von 1300 Jahren. Rechnerisch wird das dadurch berücksichtigt, dass die normative Erdbebenbeschleunigung mit dem Bedeutungsbeiwert multipliziert wird; für viele kritische Infrastrukturen also mit 1,4.

Den Bedeutungsbeiwert legt immer der Eigentümer fest, nie der Tragwerksplaner. Da die Sicherheit hier Kosten generiert, muss der Eigentümer entscheiden. Es ist ihm freigestellt, höhere Bedeutungsbeiwerte als 1,4 zu wählen oder auch niedrigere. Bei AKWs kann die Wiederkehrperiode 100.000 Jahre betragen; dem entspricht ein Bedeutungsbeiwert von $\gamma_I = 5,9$.

Tab. 5: Bedeutungskategorie, Bedeutungsbeiwert, Wiederkehrperiode und Zuordnung der Bauwerke

Bedeutungs-kategorie	Bauwerke	Bedeutungs-beiwert γ_I	Wiederkehr-periode
I	Bauwerke von geringer Bedeutung für die öffentliche Sicherheit, z.B. landwirtschaftliche Bauten	0,8	225
II	Gewöhnliche Bauten, die nicht zu den anderen Kategorien gehören, z.B. Wohngebäude	1,0	475
III	Bauwerke, deren Widerstandsfähigkeit gegen Erdbeben im Hinblick auf die mit einem Einsturz verbundenen Folgen wichtig ist, z.B. große Wohnanlagen, Verwaltungsgebäude, Schulen, Versammlungshallen, kulturelle Einrichtungen, Kaufhäuser	1,2	820
IV	Bauwerke, deren Unversehrtheit im Erdbebenfall von Bedeutung für den Schutz der Allgemeinheit ist, z.B. Krankenhäuser, wichtige Einrichtungen des Katastrophenschutzes und der Sicherheitskräfte, Feuerwehrhäuser (Anlagen der kritischen Infrastruktur)	1,4	1300
AKW	AKW	5,9	100.000

Auf der Suche nach Gründen für eine „Nicht-Gefährdung“ in Bayern

Wenn also in den dokumentierten Erdbebenkatalogen für Bayern seit 631 Jahren (bzw. 1.221 Jahren) keine nennenswerten Bauwerksschäden dokumentiert wurden und gemäß Grünthal in der Historie keine Magnituden größer 6 dokumentiert sind, so muss über die Verhältnismäßigkeit einer faktischen Ausweitung der Erdbebenzonen und der bedeutsamen Anhebung der Einwirkungen aus Erdbeben in Bayern diskutiert werden.

Es stellt sich nun die Frage, warum im Beobachtungszeitraum von 631 Jahren in Bayern quasi keine Gebäudeschäden zu verzeichnen sind. Sind die Einwirkungen infolge Erdbeben bereits heute nach der DIN 4149 zu hoch oder wird in Bayern widerstandsfähiger gebaut als anderswo in Deutschland?

Zur möglichen Beantwortung des zweiten Fragenteils betrachten wir die unterschiedlichen Einwirkungen aus Erdbeben, Wind und Schnee in den unterschiedlichen Regionen Deutschlands. Das Bild 5 zeigt im Vergleich die Einwirkungen infolge Erdbeben „alt“ und „neu“. Dieser Vergleich gibt eine Tendenz wieder, ist standortbezogen jedoch in Bezug auf die Neueinschätzung etwas

komplizierter. Man erkennt, dass die bisherige Erdbebenzone 0, in der übliche Hochbauten nicht nachweispflichtig waren, nun nachweispflichtig wird (Abb. 5 rechts). In den Zonen 1 bis 3 werden die Beschleunigungen nun anderthalbfach bis doppelt so groß wie bisher (Abb. 5, Tab. 3). Es gibt auch Regionen, in denen die Beschleunigungen etwas geringer werden (s. z. B. [Grünthal 2021]).

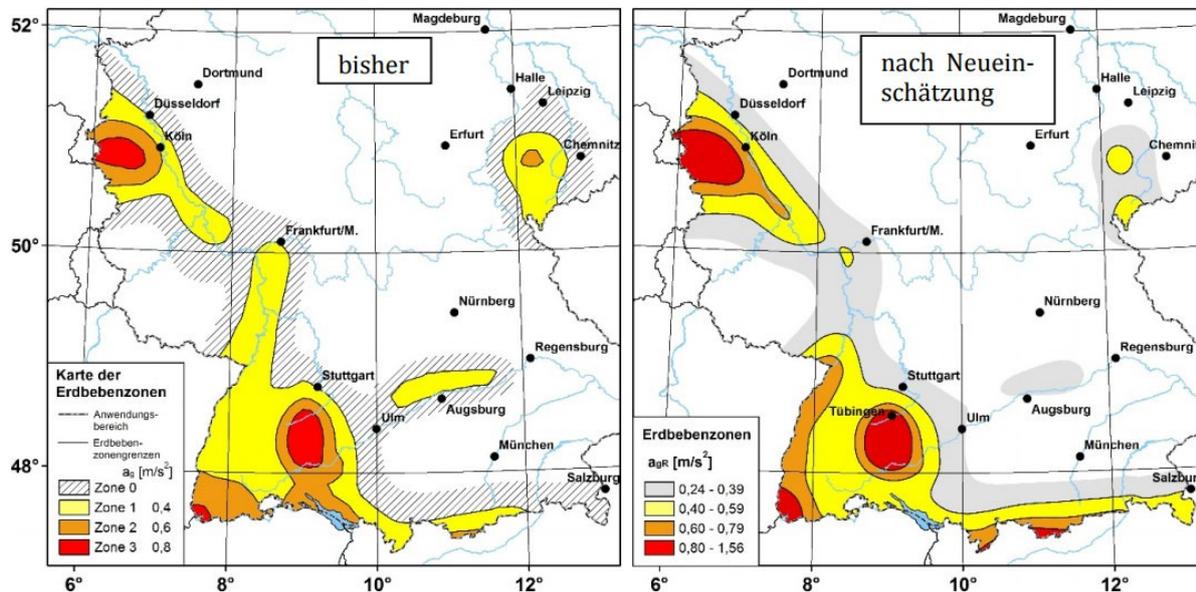


Abb. 5: Vergleich der Erdbebenzonenkarte (links) mit der durch Division mit dem Divisor 2,5 erstellten a_g -Karte (rechts) im Farbcode der bisherigen Norm, aus [Butenweg et al. 2021, Abb.: 4-1]

Die Erdbebenbeschleunigungen in der Abb. 5 sind die Horizontalbeschleunigungen. Auch der **Wind** erzeugt Horizontallasten. Abb. 6 zeigt die Windlastzonen in Deutschland. Es wird deutlich, dass die höchsten Windlasten (WZ4) an der Küste auftreten, dort wo keine Erdbeben zu erwarten sind. Dort wo die Erdbebenzonen sind, gibt es nur mäßigen Wind. Die Erdbebenbemessung kann in Deutschland somit nicht von der Windlastbemessung signifikant profitieren.

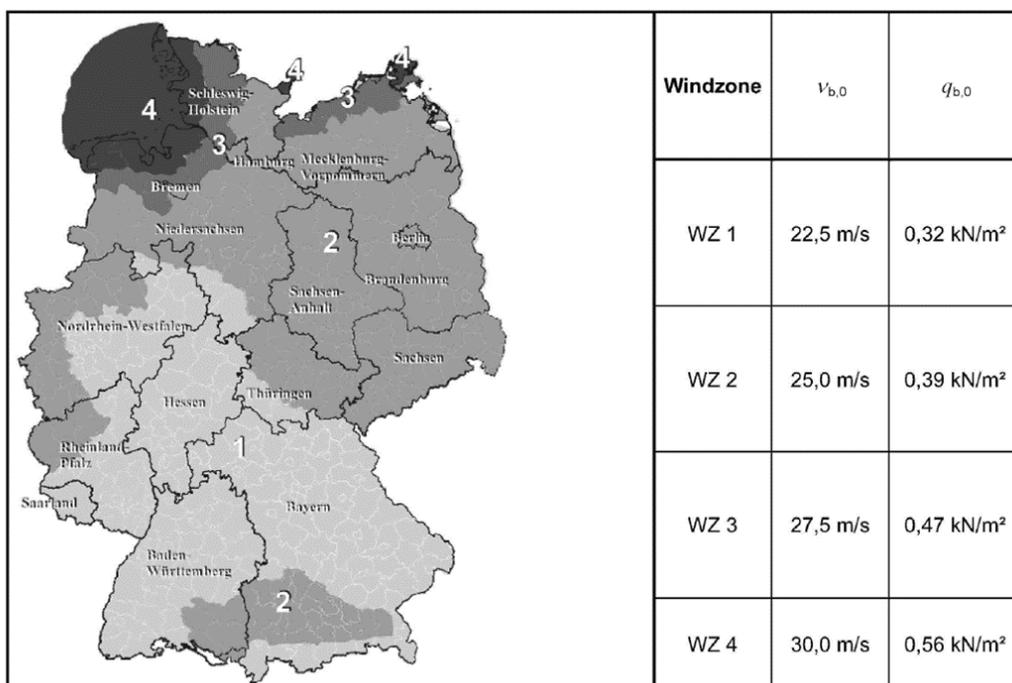


Abb. 6: Windlastzonen nach DIN EN 1991-1-4/NA - Windlasten

Ein Vergleich der Erdbebenkarten mit der **Schneezonenkarte** (Abb.: 7) zeigt, dass die höchste Schneelastzone 3 sich in Bayern dort befindet, wo sich die Erdbebenzonen 1-3 erstrecken. Aufgrund der hohen Schneelasten müssen die Mauern, Wände und Dachstühle entsprechend widerstandsfähig ausgebildet werden. Insofern kann die Erdbebenbemessung von der Schneelastbemessung profitieren.

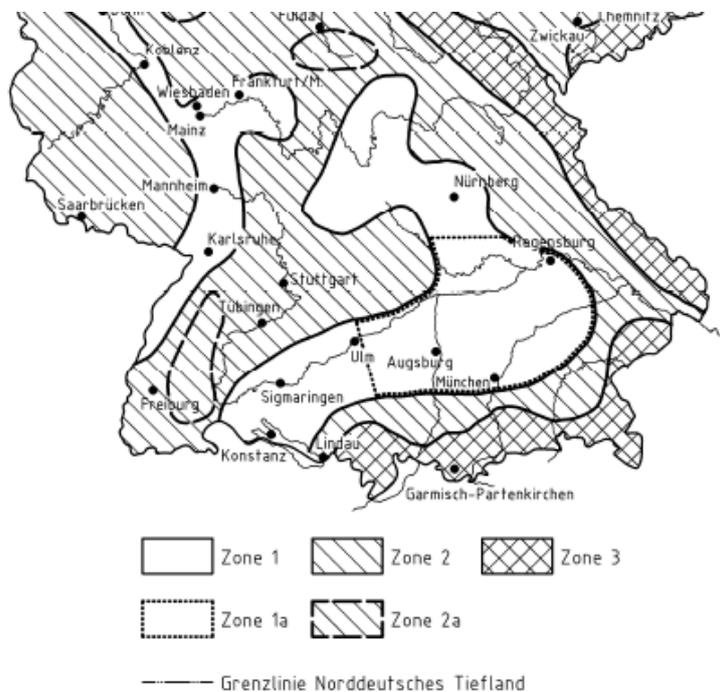


Bild NA.1 — Schneelastzonenkarte

Abb. 7: Schneelastzonen in Deutschland nach DIN EN 1991-1-3/NA:2010-12

Es bleibt jedoch die Frage nach der Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Erdbeben in Bayern bei maximaler Schneelast ereignet. Denn die Erdbebenauslegung profitiert nur dann von der Schneelastauslegung, wenn kein oder nur wenig Schnee liegt. Extreme Schneelagen haben wir in Bayern statistisch etwa alle 15 bis 20 Jahre (1979, 1999, 2006, 2019) für nur wenige Wochen.

4. Risikomanagement Erdbeben

4.1 Risikoidentifikation

Die Risikoanalyse soll für die Naturgefahr Erdbeben erfolgen. Grundlage hierfür ist der EC 8/NA: 2020.

4.2 Risikoanalyse

Überlegungen zur Erdbebengefahr und zum Risiko infolge Erdbeben in Bayern

Die historischen Quellen weisen über einen Zeitraum von 1221 Jahren in Bayern keine Toten infolge Erdbeben auf und keine Sachschäden. Was bedeutet das? Ist der Beobachtungszeitraum von 1221 Jahren zu kurz, um das statistische 475-Jahr-Erdbeben zu erleben? Sind die Erdbebenlasten für Bayern jetzt schon zu hoch? Wird in Bayern widerstandsfähiger gebaut als in anderen Ländern? Fragen, die auf die Schnelle nicht zu beantworten sind.

Prof. Dr.-Ing. Norbert Gebbeken

Ein wichtiges Maß im Rahmen einer Risikoanalyse ist die Todeswahrscheinlichkeit.

Todeswahrscheinlichkeit

Unsere erste Pflicht (z.B. gem. MBO, LBO) ist die Abwendung der Gefahr für Leib und Leben. Zur Einschätzung der Gefahr Erdbeben kann man Todeswahrscheinlichkeiten miteinander vergleichen (Tab 5). Die Werte wurden unterschiedlichen Quellen entnommen, im wesentlichen aber Proske [Proske 2004]. Ergänzt wird die Tabelle durch eigene Auswertungen.

Tab. 6: Todeswahrscheinlichkeiten (Mortality p.a.) für unterschiedliche Gefahren

Gefahr	Mortality p.a.
Motorrad fahren	$2,0 * 10^{-2}$
Bergsteigen, Klettern	$2,0 * 10^{-3}$
Arbeiten im Haushalt	$1,1 * 10^{-4}$
Bauarbeiter	$1,7 * 10^{-4}$
Verkehrsunfälle	$3,3 * 10^{-5}$
Brände	$2,8 * 10^{-5}$
Bahn fahren	$2,0 * 10^{-6}$
Fahrrad fahren	$5,0 * 10^{-6}$
Gebäudeversagen	$1,0 * 10^{-7}$
Blitzschlag	$4,0 * 10^{-7}$
Flugzeugabsturz	$7,0 * 10^{-7}$
Erdbeben Deutschland	$4,4 * 10^{-9}$
Brückeneinsturz im Betrieb GER	$5,0 * 10^{-9}$
Brückeneinsturz nach DIN1076	Keine Toten
Erdbeben Bayern	Keine Toten bekannt

Wenn man unterschiedliche Quellen miteinander vergleicht, dann stellt man fest, dass die angegebenen Todeswahrscheinlichkeiten variieren, je nach Autor oder Land. Das liegt daran, dass sowohl die Zählgrößen als auch die Bezugsgrößen anders gezählt werden. Die Todeswahrscheinlichkeit kann nach der Formel

$$E = M \text{ p. a.} = \frac{\text{Anzahl der Opfer}}{\text{Anzahl exponierte Personen} * \text{Zeitraum}}$$

berechnet werden. E ist die Entretenswahrscheinlichkeit und M p.a. ist Mortality (Sterblichkeit) per anno. Während die Anzahl der Opfer in der Regel auf amtlichen Statistiken beruht, ist nicht eindeutig geregelt, wer eine exponierte Person ist und welcher Zeitraum zu wählen ist. Zunächst ist die Gefahr zu definieren und die Frage zu beantworten, für wen das Ereignis eine Gefahr darstellt (Exposition). Am Beispiel des Motorradfahrens wird das deutlich. Sind exponierte Personen nur alle Motorradfahrer*innen? Nein. Sie nehmen am Straßenverkehr teil und gefährden sich und andere Menschen. Es geht also nicht nur um getötete Motorradfahrer*innen, sondern um die Toten, die bei Motorradunfällen ums Leben kamen. Beziehen wir die Toten nun auf alle Bundesbürger, oder auf eine reduzierte Anzahl. Nehmen wir als Zeitraum nur die Motorradsaison März bis September oder zählen wir alle zwölf Monate. Wir sehen, bei jeder Berechnung muss genau angegeben sein, wie sie zustande kam. Als nächstes Beispiel dienen Verkehrsunfälle. Im Jahre 2020 hatten wir in Deutschland 2719 Verkehrstote zu beklagen. Das ergibt bei 83 Mio. Einwohnern eine Todeswahrscheinlichkeit von $3,3 * 10^{-5}$. Nun könnte man einwenden, dass man die in Deutschland anwesenden Touristen mitzählen und die Deutschen, die sich gerade im Ausland befinden und im Krankenhaus liegen

Prof. Dr.-Ing. Norbert Gebbeken

abziehen muss. So kommen wir auf etwa 30 Mio. Menschen pro Jahr zusätzlich. Damit ergibt sich nun eine Todeswahrscheinlichkeit als Verkehrsteilnehmer von $2,4 * 10^{-5}$. Wir sehen an diesem Beispiel, dass sich die Größenordnung der Todeswahrscheinlichkeit trotz unterschiedlicher Bezugsgrößen nicht ändert. Das ist hier die wesentliche Aussage.

Betrachten wir als nächstes das Bauwerksversagen (Hochbau) in Deutschland. Hierzu findet man kaum Zahlen. Wenn es zu Einstürzen mit Todesfolge kam, dann meistens beim Bau, Umbau, Rückbau oder durch Gasexplosionen, wobei auch Suizide zu verzeichnen sind. Der Einsturz der Eissporthalle in Bad Reichenhall mit 15 Toten im Jahre 2006 war das schwerste Unglück der vergangenen Jahre. Proske gibt die Todeswahrscheinlichkeit durch Bauwerksversagen mit $1,0 * 10^{-7}$ an. Brückeneinstürze in Deutschland sind extrem selten. Wenn sie stattfanden, dann fast immer nur beim Bau durch Versagen von Hilfskonstruktionen. Das sind dann keine Brückeneinstürze, sondern gehören zur Kategorie „Bauarbeiter“. In den vergangenen 76 Jahren kamen bei zwei Brückeneinstürzen (1945 Ludendorff-Brücke (28), 1972 Südbrücke Koblenz (6)) 34 Menschen ums Leben. Damit kommen wir in etwa auf eine Todeswahrscheinlichkeit infolge Brückeneinsturz von $5 * 10^{-9}$. Der Einsturz der Ludendorff-Brücke hatte noch „Nachkriegseffekte“ und man könnte darüber diskutieren, ob man sie berücksichtigen sollte oder nicht. Das würde die Größenordnung nicht ändern. Seit dem, also seit 49 Jahren, hat es in Deutschland keine Brückeneinstürze unter Verkehr gegeben. Sie sind auch wegen der strengen Anwendung der DIN 1076 nicht zu erwarten. Insofern wäre zu überlegen, den Zeitraum für Brückeneinstürze in Deutschland auf einen Zeitraum nach 1972 zu legen. Im Gegensatz zu vielen Pressemitteilungen muss gesagt werden, dass es in Deutschland keine „maroden“ Brücken in Bezug auf die Standsicherheit gibt. Trotzdem hält sich in der Bevölkerung die Sorge, dass unsere Brücken marode sind und einzustürzen drohen. Die Rolle der Medien in Bezug auf die Meinungsbildung ist enorm. Die DIN 1076 hat sich aber noch kein Journalist angesehen.

Wertet man die Datenbanken zu Erdbeben in Deutschland aus, so werden in den vergangenen 631 Jahren etwa 55 Tote gezählt. Schätzt man über diesen Zeitraum eine mittlere Bevölkerungszahl von 60 Mio. Menschen, dann ergibt sich eine Todeswahrscheinlichkeit durch Erdbeben in Deutschland von $1,4 * 10^{-9}$. Es lebt jedoch nur ein Teil der deutschen Bevölkerung in Erdbebengebieten. Hierüber müsste eine entsprechende Erhebung gemacht werden, die jedoch entsprechenden Aufwand erfordert, der hier nicht zur Verfügung steht. Geschätzt mögen es etwa 20 Mio. Menschen sein. Dann ändert sich die Todeswahrscheinlichkeit zu $4,4 * 10^{-9}$. Man erkennt, dass sich die Größenordnung nicht ändert.

Was sagen uns jetzt diese Zahlen im Hinblick auf Gefahren und Sicherheiten. Zunächst ermöglichen sie es uns, Gefahren im Hinblick auf die Sterbewahrscheinlichkeit miteinander zu vergleichen. Eine Einordnung wird möglich, wenn wir uns Gedanken darüber machen, was gesellschaftlich akzeptierte Todeswahrscheinlichkeiten sind. Nach Proske (2004), der sich auf verschiedene Quellen beruft, ist die **akzeptable Grenze $1 * 10^{-6}$** . Vergleichen wir nun die Todeswahrscheinlichkeit durch Bauwerksversagen infolge Erdbeben in Deutschland mit anderen akzeptierten Todeswahrscheinlichkeiten und mit der akzeptablen Grenze nach Proske, so könnte man darüber nachdenken, ob wir nicht schon jetzt bezüglich unserer Gebäude viel zu sicher bauen. Denn beim Erdbeben sind wir um drei Größenordnungen auf der sicheren Seite von der akzeptablen Grenze entfernt.

Zur Einstufung der Gefahr Erdbeben soll ein Vergleich mit der Todeswahrscheinlichkeit durch Hochwasser erfolgen. Seit 1613 (408 Jahre) wurden ca. 2938 Tote infolge Hochwasser in Deutschland gezählt; das sind 7,2 Tote pro Jahr (Erdbeben 0,09 Tote pro Jahr (55/631)). Das Verhältnis beträgt 80 zu 1.

In anderen Ländern, z.B. in der Schweiz, wird der Verlust des Lebens quantifiziert; d.h. in Euro angegeben. So kann der Verlust des Lebens in eine Risikobetrachtung mit eingehen. In Deutschland machen wir das aus ethischen Gründen oft nicht, obwohl jeder eine Haftpflichtversicherung hat, in der z.B. steht: Personenschäden, je Versicherungsfall 3 Mio. €.

Die Ermittlung der Sachkosten ist in der Regel frei von ethischen Bedenken.

Sachkosten (sächlicher Verlust)

Nun sind die Todeswahrscheinlichkeiten „nur“ eine Orientierungsgröße. Eine weitere Orientierung ergibt sich durch die Sachkosten bzw. durch die Quantifizierung der Gefahr. Hierfür sind der Bestand und der Neubau zu bewerten. Einerseits ist noch unklar, wie der Bestand im Hinblick auf den neuen EC8/NA:2020 zu behandeln sein wird (s. Abschnitt 5 und [Akkermann 2021]), andererseits ist der Wert der Bestandsimmobilien kaum zu erfassen.

Bestandsimmobilien

Sehr grob geschätzt wurden in Deutschland seit 1945 etwa 5.000 Milliarden € in den Bau investiert. Davon liegt etwa 20 % in Regionen, die in Erdbebenzonen liegen. Es lässt sich somit der Wert des betroffenen Immobilienbestandes zu 1.000 Milliarden € schätzen. Sollte davon 10 % ertüchtigt werden müssen, mit einem Kostenaufwand nach [Wenk 2008] von 10 %, dann sind 10 Milliarden € zu investieren. Diese Kosten verteilen sich über zehn bis 20 Jahre, in Abhängigkeit vom Erfüllungsfaktor der Bauwerke. Damit müssen wir mit Kosten von 0,5 bis 1,0 Milliarde € p.a. rechnen. Aufgrund der anstehenden energetischen Sanierungen, Umnutzungen und Aufstockungen von Bestandsimmobilien in Verbindung mit dem Erhalt der grauen Energie, sind die Kosten eher höher als hier angenommen.

Neubau

Der Neubau lässt sich etwas besser abschätzen. Der Umsatz der Bauwirtschaft betrug im Jahr 2020 138 Milliarden €⁴. Davon entfallen 81% auf den Hochbau und 19% auf den Ingenieurbau. Der Brückenbau hat etwa einen Anteil von 4%. Stauanlagen und ähnliche Ingenieurbauten lassen sich nur schwer beziffern, weil es dazu keine umfassenden Daten gibt. Zu betrachtende Bauwerke machen also etwa 85% aus. Einem Erdbeben exponierte Bauwerke sind wiederum nur sehr grob zu schätzen. Die vom Erdbeben betroffenen Länder Bay, BW, HE, Rpf, NRW, Th und Sa haben etwa 60 % des Immobilienbestandes in Deutschland. Nach der neuen Erdbebenkarte liegt hiervon etwa 1/3 in Erdbebenzonen; also etwa 20 % der exponierten Bauwerke. Demnach werden in deutschen Erdbebengebieten jährlich Bauwerke im Wert von $0,85 \times 0,2 \times 138 \text{ Mrd. €} = 23 \text{ Milliarden €}$ errichtet, Tendenz steigend.

Nach [Wenk 2008] ist bei Neubauten in der Schweiz wegen der Anpassung der neuen Erdbebenlasten etwa mit 2 % bis 3 % Mehrkosten zu rechnen (ohne Kosten für Architekten- und Ingenieurleistungen). Dieser Ansatz wurde für die Schweiz verifiziert und wird hier auch für die Situation in Deutschland übernommen, weil es hier (noch) keine vergleichbaren Untersuchungen gibt. Durch die neue Erdbebennorm wird die Eintretenswahrscheinlichkeit „1“ festgelegt; ein Bauwerk ist so auszulegen, als ob das Bemessungsbeben während der Nutzungsdauer eintritt. Damit werden durch die neue Norm volkswirtschaftliche Kosten generiert von jährlich

$$1 * 0,02 * 23 = 0,46 \text{ Milliarden € p. a. bei 2\% bzw.}$$

$$1 * 0,03 * 23 = 0,69 \text{ Milliarden € p. a. bei 3\%}$$

⁴ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154592/umfrage/umsatz-im-bauhauptgewerbe-seit-2000/>
(Aufruf 03. Juni 2021)

Davon entfällt etwa 20% auf Bayern; das sind etwa 0,092 Milliarden € p.a. oder 92 Mio. € p.a. Darüber freuen sich Bauwirtschaft, Architekten, Bauingenieure, Gutachter und Versicherungswirtschaft. Nur selten wird ein derartiges Konjunkturprogramm aufgelegt. Selbst wenn nur 10 % der Bauwerke betroffen wären, statt der angenommenen 20 %, dann ergeben sich für Deutschland immer noch 230 Mio. € pro Jahr. Über zehn Jahre werden 4,6 Milliarden € zusätzliche Kosten generiert, über 475 Jahre 218,5 Milliarden €, Preisindex heute.

Die Gebäudeschäden infolge Erdbeben sind in den zugänglichen Datenbanken schlecht dokumentiert. 1978 war auf der Schwäbischen Alb ein Schaden von 275 Mio. € zu verzeichnen und 1992 durch das Roermond-Beben (Niederlande) ein Schaden von 150 Mio. €, davon ein Teil in Deutschland. Das sind 425 Mio. € in 43 Jahren, also 9,9 Mio. € p.a. Man könnte den Bezugszeitraum auch zu 475 Jahren oder 631 Jahren wählen. Dann kämen wir auf eine Größenordnung von etwa 0,8 Mio. €, also eine Größenordnung kleiner.

Zum Vergleich dieser tatsächlich eingetretenen Schäden; die Sanierung des Deutschen Museums in München kostet ca. 745 Mio. €, die Sanierung des Konzert- und Veranstaltungszentrums Gasteig ca. 450 Mio. € und der Neubau des Konzerthauses München etwa 700 Mio. €. Sind nun die Schäden infolge Erdbeben von 425 Mio. € über 43 Jahre groß oder klein, gesellschaftlich akzeptabel oder nicht. Ein direkter Vergleich erfolgt in Tab. 7.

Wie sieht es nun mit dem Risiko aus. Die DIN EN 1991-1-7:2006 (EC 1) (Einwirkungen auf Bauwerke, Teil 7 außergewöhnliche Einwirkungen (nicht Erdbeben)) regelt unter 1.5.13: Risiko (R): Maß für das Zusammenwirken (üblicherweise als Produkt) von Auftretenswahrscheinlichkeit (E=Eintretenswahrscheinlichkeit) einer definierten Gefährdung und der Größe der Schadensfolge (K=Kosten):

$$R = E * K$$

Die statistische Eintretenswahrscheinlichkeit des allgemeinen Bemessungsbebens beträgt 1-mal in 475 Jahren. Damit ergibt sich in Deutschland für den Neubau ein jährliches „Normrisiko“ von

$$R_{Norm} = \frac{1}{475} * 23 \text{ Milliarden} = 0,048 \text{ Milliarden} = 48 \text{ Mio. € p. a.}$$

Zum Vergleich wurde das Risiko aufgrund der historischen Sachschäden der vergangenen 43 Jahre zu 9,9 Mio. € p.a. berechnet.

Tab. 7: Zusammenstellung der Kosten bzw. Risikokosten durch Erdbeben in Deutschland und Bayern auf Basis der Annahmen und Berechnungen in Abschnitt 4.

Neubau	Kosten/Risiko €	Anmerkungen
Erdbeben exponierte Bauwerke DEU	23 Milliarden p.a.	Neubau
Normrisiko	48,0 Mio. p.a.	475-jähriges Erdbeben
Neue Kosten durch EC8/NA:2020 DEU	460,0 Mio. p.a.	2% Mehrkosten
Neue Kosten durch EC8/NA:2020 Bay	92,0 Mio. p.a.	2% Mehrkosten
Bisherige Schäden seit 1911 DEU	4,3 Mio. p.a.	Im Zeitraum von 100 Jahren
Bisherige Schäden in Bay	0.0 Mio. p.a.	Im Zeitraum von 631 Jahren
Weitere Vergleichsgrößen		
Gesamtschaden Erdbeben seit 1978	425 Mio.	In Deutschland
Sanierung Deutsches Museum	745 Mio.	
Sanierung Gasteig München	450 Mio.	
Neubau Konzerthaus München	700 Mio.	

Die Kosten durch die neuen erhöhten Erdbebenanforderungen betragen für Neubauten in Deutschland 460 Mio. € p.a. Die tatsächlichen Mehrkosten durch die erhöhten Erdbebenanforderungen übersteigen das Normrisiko um das fast 10-fache (460/48) und die historischen Schadenserwartungen um das etwas 100-fache (460/4.3). Darin wird eine signifikante Diskrepanz deutlich, über die gesellschaftlich diskutiert werden muss.

Zur Einstufung der Gefahr Erdbeben erfolgt hier noch ein Vergleich mit **Hochwasserschäden**. Allein für das Jahr 2013 werden die Hochwasserschäden in Europa auf 12 Milliarden geschätzt. Der größte Teil entfiel auf Deutschland; also mehr als 6 Milliarden. Und allein für das Jahr 2016 werden die Hochwasserschäden in Deutschland auf 2,6 Milliarden geschätzt. Die Sturzfluten des Jahres 2021 erzeugten Schäden von ca. 35 Milliarden Euro und forderten mindestens 188 Tote. Das sind etwa 4,8 Milliarden p.a. über den Zeitraum von 9 Jahren. Die sächlichen Schäden infolge Hochwasser übersteigen die Schäden infolge Erdbeben um das etwa 11.000-fache. Das führt aber nicht dazu, dass das Bemessungshochwasser in Deutschland angehoben wird.

Seit 1613 (408 Jahre) wurden inklusive der Sturzfluten 2021 ca. 2938 Tote infolge Hochwasser in Deutschland gezählt; das sind 7,2 Tote p.a. oder etwa 83-mal so viele wie durch Erdbeben.

Ähnlich sieht es bei **Sturmschäden** aus. Seit 2007 beziffern sich die Sturmschäden auf ca. 19,5 Milliarden €. Das sind etwa 0,9 Milliarden p.a. Man sieht, dass die Erdbebenschäden in Deutschland um etwa zwei Größenordnungen kleiner sind.

Nach [Schwarz et al. 2006] hat sich der volkswirtschaftliche Einfluss durch Gebäudeschäden bei Erdbebenereignissen der vergangenen Jahrhunderte in Deutschland als gegenüber Personenschäden viel relevanter dargestellt. Das wird durch die Ermittlungen im Rahmen dieser Studie bestätigt. Obgleich in den Vorbemerkungen zum EC 8/NA:2020 die materielle Schadensbegrenzung exkludiert wird, stellt gerade diese nach Meinung von Schwarz und Grünthal das – im Vergleich zu anderen, auch für Personenschutz relevanten Gefährdungen – höchste Risiko im Erdbebenfall dar. Diese Aussage wird durch die Untersuchungen dieses Abschnitts bestätigt.

Im Vergleich mit anderen Risiken wie Hochwasser oder Sturm, sind allerdings auch die Sachschäden infolge Erdbeben marginal; sie sind um zwei bis drei Größenordnungen kleiner. Werden alle Sachschäden infolge Erdbeben über ca. 600 Jahre aufsummiert, dann erreicht man nicht einmal die Kosten zur Sanierung des deutschen Museums in München.

Da Tote nicht mit Sachschäden unmittelbar verglichen werden können, sollte man auch nicht sagen, was nun relevanter ist. Die Todeswahrscheinlichkeit infolge Erdbeben ist im Vergleich mit anderen Naturgefahren sehr gering. Vergleicht man die Sachschäden infolge Erdbeben mit Sachschäden infolge anderer Gefahren, so lässt sich folgern, dass auch die Sachschäden infolge Erdbeben im Vergleich mit anderen Gefahren, wie z.B. Hochwasser, gering sind. Als Folge hoher Sach- und Personenschäden durch Hochwasser hat man nicht das Jahrhunderthochwasser neu definiert, weder in den Ländern noch im Bund. Analoges gilt für Sturmereignisse.

Ist nun die Gefahr Erdbeben im gesellschaftlichen Kontext hinsichtlich einer Gefährdung anders zu betrachten als die Gefahren durch Hochwasser oder Sturm? In Bezug auf die Gefahr Erdbeben „übererfüllen“ wir schon jetzt alle Ziele um Größenordnungen. Umso dringender ist es, die Gefahren im gesamtgesellschaftlichen Kontext zu diskutieren und zu bewerten.

4.3 Risikobewertung

In Bayern gibt es weder Tote noch Sachschäden infolge Erdbeben zu verzeichnen. Wären die Sachschäden historischer Erdbeben nennenswert gewesen, so würde man sie sicher in Dokumenten

finden. Es stellt sich nun die Frage, wie man mit derartigen Diskrepanzen umgeht, wie sie durch Tab. 7 sichtbar werden. Das können nicht Ingenieure entscheiden. Das ist eine gesellschaftliche, d.h. politische Aufgabe.

In Bezug auf die „Schutzart Mensch“ soll nun die Gefahr Erdbeben in die Risikomatrix eingeordnet werden (Abb. 8).

Dazu beziehen wir uns, wie oben bereits dargestellt, auf die Klassifizierungen gem. BBK.

Klassifizierung der *Eintrittswahrscheinlichkeit*:

- A: sehr unwahrscheinlich = $1 \times$ in > 10.000 Jahren
- B: unwahrscheinlich = $1 \times$ in 1.000 bis 10.000 Jahren
- C: bedingt wahrscheinlich = $1 \times$ in 100 bis 1.000 Jahren
- D: wahrscheinlich = $1 \times$ in 10 bis 100 Jahren
- E: sehr wahrscheinlich = $1 \times$ in < 10 Jahren

Bezüglich des *Schadensmaßes* wird das Schutzgut Mensch betrachtet:

- A: ≤ 10 Tote
 - B: $> 10 - 100$ Tote
 - C: $> 100 - 1.000$ Tote
 - D: $> 1.000 - 10.000$ Tote
 - E: > 10.000 Tote.
- Gemäß Norm tritt das Bemessungserdbeben $1 \times$ in 475 Jahren auf. Daraus folgt Eintrittswahrscheinlichkeitsklasse C.
 - Tatsächlich ist das Bemessungserdbeben in Deutschland in 1221 Jahren noch nicht aufgetreten. Daraus folgt die Eintrittswahrscheinlichkeitsklasse B.
 - Es ergaben sich in Deutschland in 631 Jahren etwa 55 Tote. Daraus folgt Schadensausmaßklasse B.
 - Bei den Einzelereignissen ergaben sich weniger als 10 Tote. Daraus folgt Schadensausmaßklasse A.
 - Es ergaben sich in Bayern in 631 Jahren keine Toten. Daraus folgt Schadensausmaßklasse A.

Damit kann eine Einordnung in die Risikomatrix erfolgen. Für Deutschland ergibt sich in Bezug auf Erdbeben ein mittleres Risiko, für Bayern ein niedriges Risiko. In beiden Fällen wird davon ausgegangen, dass das Bemessungsbeben statistisch einmal in 475 Jahren auftritt. Bezug auf die „Schutzart Mensch“ (Abb. 3).

Risikomatrix – Schutzart Mensch					
Eintrittswahrscheinlichkeit \ Schadensausmaß:	A: sehr unwahrscheinlich	B: unwahrscheinlich	C: bedingt wahrscheinlich	D: wahrscheinlich	E: sehr wahrscheinlich
E: katastrophal			Pandemie		
D: groß	Sturmflut		Wintersturm, Dürre		
C: mäßig		Schmelzhochwasser			
B: gering			Erdbeben, Norm DEU +		
A: unbedeutend			Erdbeben Norm Bay, DEU -		
Risiko	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch	

Abb. 8: Risikomatrix, Schutzart Mensch

Für die Schutzart „Bauwerke“ könnte in Bezug auf die Risikokosten (Sachkosten) eine analoge Risikomatrix erstellt werden. Dafür müssten Daten erhoben werden, die im Rahmen dieser Studie aus Zeitgründen nicht erhoben werden können.

Unabhängig von einem eindeutig definierten Grenzkrisiko und damit der Festlegung eines akzeptablen Risikos, zeigt Abb. 8, dass die Naturgefahr Erdbeben gemäß Norm in Deutschland im Bereich des niedrigen bis mittleren Risikos anzusehen ist. Für Bayern ergibt sich ein niedriges Risiko. Die Einordnung in die grünen Bereiche bedeutet nicht zwangsläufig, dass nichts getan werden muss; es hilft zunächst vor allem bei der Priorisierung von Handlungsbedarfen und Risiken aus unterschiedlichen Gefahren.

Im Unterabschnitt 4.4 wird dargelegt, dass gem. Anhang B der DIN 1055-100:2001-03, in der Tabelle B.1 in Verbindung mit Tabelle B.2 ein Bauwerk mit 50 Jahren Nutzungsdauer eine **Zielgröße der Versagenswahrscheinlichkeit von $P_f \approx 10^{-5}$** haben soll.

EC 1/NA:2010-12 (außergewöhnliche Einwirkungen) regelt unter NDP zu 3.2(1), Anmerkung 3: Risikoniveau: „Werden Nachweise auf der Grundlage von Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen geführt, ist der repräsentative Wert der außergewöhnlichen Einwirkung mit einer **Überschreitungswahrscheinlichkeit von $P \leq 10^{-4}/a$** festzulegen“.

In der schweizerischen Norm SIA 269/8 (Bestandsbeurteilung von Gebäuden – Erdbeben) wird unterschieden in Kollektiv- und Individualrisiko. Für das Individualrisiko wird eine **Todeswahrscheinlichkeit von 10^{-5} p. a.** als akzeptabel erachtet.

Die Versagenswahrscheinlichkeit von Bauwerken infolge Erdbeben mit Todesfolge beträgt $M_{p.a.} \approx 4,4 * 10^{-9}$.

Daraus folgt, dass die beobachtete Gefährdung durch Erdbeben im Hinblick auf das Bemessungsbeben um drei bis fünf Größenordnungen kleiner ist als eine der „Zielgrößen“.

4.4 Risikomanagement in technischen Normen

Neben der grundsätzlichen Risikodiskussion, gibt es in verschiedenen technischen Normen und Richtlinien Hinweise zum Umgang mit außergewöhnlichen Ereignissen und zu entsprechenden Sicherheitsbetrachtungen. Diese werden hier kurz vorgestellt.

Die **DIN 1055-100:2001-03** (Einwirkungen auf Tragwerke – Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln) (3.1.4.2) definiert Sicherheit wie folgt:

„Fähigkeit des Tragwerks zur Sicherstellung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit, die eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung verhindern.“

Dieses ist lediglich eine qualitative Forderung. Im Anhang B der DIN 1055-100:2001-03 wird in der Tabelle B.1 in Verbindung mit Tabelle B.2 für ein Bauwerk mit 50 Jahren Nutzungsdauer eine **Zielgröße der Versagenswahrscheinlichkeit von $P_f \approx 10^{-5}$** angegeben.

Ob ein Bauwerk tatsächlich sicher ist oder nicht, ergibt sich durch den Vergleich von Wahrscheinlichkeiten. Der Tab. 6 ist zu entnehmen, dass die Todeswahrscheinlichkeit infolge Gebäudeversagen mit $4,0 * 10^{-7}$ angegeben ist. Durch den Vergleich mit der Zielgröße der Versagenswahrscheinlichkeit folgt, dass Gebäude in Deutschland sicher sind.

Der Gebäudeeinsturz infolge Erdbeben in Deutschland mit Todesfolge beträgt $4,4 * 10^{-9}$. Selbst wenn es auch Gebäudeeinstürze infolge Erdbeben ohne Todesfolge gegeben hat, dann ändert sich die Größenordnung nicht.

Man kann durchaus folgern, dass eine hinreichende Gebäudesicherheit gegenüber Erdbeben gegeben ist.

Die **Nachfolgenorm der DIN 1005-100 ist die DIN EN 1990:2010-12** (Eurocode 0 – Grundlagen der Tragwerksplanung). Sie regelt u.a.:

- 1.5.2.17 – Zuverlässigkeit: Fähigkeit eines Tragwerks oder Bauteils die festgelegten Anforderungen innerhalb der geplanten Nutzungszeit zu erfüllen. Die Zuverlässigkeit wird i. d. R. mit probabilistischen Größen ausgedrückt.
- 1.5.2.18 - Differenzierung der Zuverlässigkeit: Maßnahmen zur volkswirtschaftlichen Optimierung der im Bauwesen eingesetzten Mittel unter Berücksichtigung der Schadensfolgen und Baukosten.
- 2 Anforderungen, 2.1 Grundlegende Anforderungen:
 - (1)P Ein Tragwerk ist so zu planen und auszuführen, dass es während der Errichtung und in der vorgesehenen Nutzungszeit mit angemessener Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit den möglichen Einwirkungen und Einflüssen standhält.
- 2.2 Behandlung der Zuverlässigkeit
 - (3) Bei der Wahl differenzierter Zuverlässigkeitsniveaus für ein bestimmtes Tragwerk sind z. B. folgende Gesichtspunkte zu beachten:
 - Mögliche Ursachen und Formen des Versagens;
 - Mögliche Versagensfolgen in Hinblick auf Leben und Unversehrtheit von Personen und auf wirtschaftliche Verluste;
 - Öffentliche Einstellung zu dem Versagen;
 - Kosten und Aufwendungen, um das Versagensrisiko zu vermindern.

- B.3 Differenzierung der Zuverlässigkeit, B3.1 Schadensfolgeklassen
 - (1) Zum Zwecke der Differenzierung der Zuverlässigkeit können Schadensfolgeklassen (CC) eingeführt werden, bei denen die Auswirkungen des Versagens oder der Funktionsbeeinträchtigung eines Tragwerks gemäß Tabelle B.1 betrachtet werden. (z.B. CC 3: Hohe Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen).

In Tabelle B.2 wird für die höchste Zuverlässigkeitsklasse RC3 ein Zuverlässigkeitsindex von $\beta = 4,3$ festgelegt. Das entspricht wieder einer **Zielgröße für die Versagenswahrscheinlichkeit von $P_f \approx 10^{-5}$** (Tabelle C.1).

Gemäß **Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010** gilt u.a.:

1.1 Grundlegende Anforderungen

- (1) Ein Tragwerk ist so zu planen und auszuführen, dass es während der Errichtung und in der vorgesehenen Nutzungszeit mit angemessener Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit
 - den möglichen Einwirkungen und Einflüssen standhält und
 - die geforderten Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks oder eines Bauteils erfüllt.

Der **Eurocode 1** (EC 1, Einwirkungen, DIN EN 1991-1-7) regelt unter 3.2: Außergewöhnliche Bemessungssituationen – Strategien bei identifizierten außergewöhnlichen Einwirkungen.

- (1) Die Größen der außergewöhnlichen Einwirkungen hängen von Folgendem ab:
 - a. Maßnahmen zur Vermeidung oder Minderung der Auswirkungen außergewöhnlicher Einwirkungen;
 - b. Auftretenswahrscheinlichkeit der identifizierten außergewöhnlichen Einwirkungen;
 - c. Mögliche Schadensfolgen identifizierter außergewöhnlicher Einwirkungen;
 - d. Öffentliche Einschätzung;
 - e. Größe des akzeptablen Risikos.

Anmerkung 2: In der Praxis können die Auftretenswahrscheinlichkeit und die Schadensfolge außergewöhnlicher Einwirkungen mit einem bestimmten Risikoniveau verknüpft werden. Wird dieses Niveau nicht akzeptiert, sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich. Ein Nullrisiko kann jedoch kaum erreicht werden; meistens muss ein bestimmtes Risikoniveau akzeptiert werden. Solch ein Risikoniveau wird durch bestimmte Faktoren bestimmt, z.B. der möglichen Anzahl von Unfallopfern, wirtschaftliche Folgen, Kosten von Sicherheitsmaßnahmen usw.

EC 1 regelt unter B.5 – Risikoakzeptanz und Schutzmaßnahmen u.a.:

- (1) Nach Festlegung des Risikoniveaus sollte entschieden werden, ob Schutzmaßnahmen (baulicher oder nicht baulicher Art) spezifiziert werden sollten.
- (2) Bei der Risikoakzeptanz wird meistens das ALATP-Prinzip (as low as reasonably practical / so niedrig wie vernünftigerweise durchführbar) angewendet.
- (3)
- (4) Die Niveaus für die Risikoakzeptanz sollten spezifiziert werden. Sie werden normalerweise mit den folgenden zwei Akzeptanzkriterien formuliert:

- a. Das **akzeptierbare Risikoniveau für das Individuum**: Risiken für das Individuum werden gewöhnlich als Rate von Unfällen mit Todesfolge ausgedrückt. Sie können als jährliche Todeswahrscheinlichkeit oder als wahrscheinliche Zeitspanne für einen Todesfall ausgedrückt werden, wenn einer bestimmten Tätigkeit nachgegangen wird.
- b. Das **akzeptierbare Risikoniveau für die Gesellschaft**: die gesellschaftliche Akzeptanz von Risiken für das menschliche Leben, die sich mit der Zeit ändern kann, wird oft als F-N-Schaubild dargestellt, das die maximale Wahrscheinlichkeit F für einen Unfall mit mehr als N Personenverlusten angibt.

EC 1/NA:2010-12 (DIN EN 1991-1-7/NA:2019-09) regelt unter NDP zu 3.2(1), Anmerkung 3: Risikoniveau: „Werden Nachweise auf der Grundlage von Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen geführt, ist der **repräsentative Wert der außergewöhnlichen Einwirkung mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von $P \leq 10^{-4}/a$ festzulegen**“.

Anmerkung:

Diese Hinweise in den Berechnungs-Normen zeigen, dass es kaum quantifizierte Vorgaben gibt, wenn es um Risiken geht. Immerhin wird als Zielgröße für die Versagenswahrscheinlichkeit übereinstimmend ein Wert von $P_f \approx 10^{-5}$ angegeben.

Die Realität zeigt, dass wir diese Zielgröße um drei bis vier Größenordnungen beim Erdbebenrisiko „übererfüllen“.

4.5 Risikodiskussion allgemein

Neueste wissenschaftliche Erkenntnisse sind z.B. wichtig, um für die Gesellschaft inakzeptable Schäden zu vermeiden. Üblicherweise führen Katastrophen dazu, geltende Regeln zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Hierzu ein paar wenige Beispiele.

Nach dem **Einsturz der Eislaufhalle in Bad Reichenhall** im Jahre 2006 hat man zwar nicht die Schneelasten geändert, jedoch eine Richtlinie zur wiederkehrenden Bauwerksprüfung erlassen; die VDI-Richtlinie 6200 (Standicherheit von Bauwerken – regelmäßige Überprüfung). Das wäre aufgrund der Todeswahrscheinlichkeiten durch Gebäudeeinsturz risikanalytisch nicht erforderlich gewesen, war jedoch politisch gewollt.

In den vergangenen zwei Dekaden, traten so genannte **Jahrhunderthochwasser** alle paar Jahre auf (2002 Elbhochwasser, 2002 Donauhochwasser, 2005 Alpenhochwasser, 2006 Elbhochwasser, 2009 Mitteleuropa, 2013 Mitteleuropa, 2016 Simbach etc.)⁵. Für 2013 werden die Hochwasserschäden in Europa auf 12 Milliarden € geschätzt, der größte Teil entfiel auf Deutschland und in 2016 werden die Hochwasserschäden in Deutschland auf 2,6 Milliarden € geschätzt. Für 2021 dürfen sie nach ersten Schätzungen 35 Milliarden € betragen. Das hat in Deutschland jedoch nicht dazu geführt, das „Jahrhunderthochwasser“ den aktuellen Beobachtungen anzupassen.

Insbesondere das verheerende **Loma-Prieta-Erdbeben** in Kalifornien im Jahre 1989 mit 62 Toten und etwa 6 Milliarden US \$ Schäden hat dazu geführt, dass die Erdbebenforschung intensiviert wurde und die Erdbebennormen angepasst wurden, auch in Europa und in Deutschland (DIN 4149:2005-04). Wenn nun in Deutschland die Einwirkungen infolge Erdbeben so deutlich vergrößert werden, sowohl was die nachweispflichtigen Erdbebenzonen angeht als auch die Höhe der Beschleunigungen, dann muss man sich fragen, ob die Gesellschaft die finanziellen Folgen zu tragen bereit ist, vor dem Hintergrund, dass eine sehr große Sicherheit in Bezug auf die Naturgefahr Erdbeben bereits gegeben

⁵ https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Hochwasser-Ereignissen (Aufruf 04. Juni 2021)

ist. Nun sind nicht nur Menschen zu schützen, sondern auch Güter. Insofern sind auch Sachschäden zu berücksichtigen. Letztere sind auch zu begrenzen, können aber versichert werden. In Bayern sind in den letzten 631 Jahren keine sächlichen Erdbebenschäden dokumentiert. Auch nicht an unwiederbringlichen Kulturgütern.

Interessant ist auch die Frage, ob es ein **Recht auf Sicherheit** gibt? In der **Menschenrechtserklärung der UN** ist unter Artikel 3 zu lesen: „Jeder hat das Recht auf Leben, Freiheit und **Sicherheit** der Person.“ Dabei wird Sicherheit jedoch nicht quantifiziert. Das **Grundgesetz** kennt kein Recht auf Sicherheit. Allerdings kann man aus GG I Art. 2 (2) „Jeder hat das Recht auf Leben und körperliche Unversehrtheit.“ ein Recht auf Sicherheit herauslesen, wenn wir als Bauingenieure verantwortlich dafür sind, dass Gebäude und Bauwerke durch Standsicherheit die körperliche Unversehrtheit sicherstellen.

Bisher ist unklar, wie mit Bestandsbauwerken umgegangen werden soll. Besteht Bestandsschutz? Andererseits werden im Zuge der Pflicht zur energetischen Gebäudesanierung und im Zuge der Erfüllung der Nachhaltigkeitsziele mit dem Erhalt der grauen Energie erhebliche Sanierungen und Revitalisierungen von Bestandsgebäuden auf uns zukommen. Auch hier gilt die Pflicht zur Gefahrenabwehr für Leib und Leben.

Bestandsbauten könnte man risikobasiert in Abhängigkeit von der (Rest-)Nutzungsdauer mit Hilfe von Erfüllungsfaktoren bewerten. Das könnte in Anlehnung an die schweizerische SIA 269/8 oder an den BBR-Leitfaden Erdbebensicherheit, 2006, geschehen. Eine weitere Grundlage könnte „*DIN EN 1998-3 - 2010-12 Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 3: Beurteilung und Ertüchtigung von Gebäuden*“ sein. Es ist allerdings bisher unklar, ob der Teil 3 überhaupt eingeführt werden soll.

Die schweizerische Norm SIA 269/8 regelt ein Verfahren zur Bestandsbeurteilung von Gebäuden. Der risikobasierte Ansatz erfordert die Berechnung des Erfüllungsfaktors. Danach wird die Verhältnismäßigkeit beurteilt. Dabei geht das Personenrisiko ein. Es wird unterschieden in Kollektiv- und Individualrisiko. Für das Individualrisiko wird eine Todeswahrscheinlichkeit von 10^{-5} *p. a.* als akzeptabel erachtet. Ergänzend wird die Zahlungsbereitschaft der Gesellschaft berücksichtigt. Dabei sind die Grenzkosten 10 Mio. Franken pro gerettetes Menschenleben.

In Deutschland zählen Einwirkungen aus Erdbeben zu den Katastrophenlastfällen. Die erdbebengerechte Planung, Bemessung and Ausführung von üblichen Gebäuden zielt ab auf den Schutz von Leib und Leben sowie Sachgütern, nicht aber auf die Schadensfreiheit von Gebäuden bei Starkbeben.

5. Baurechtliche Einordnung

Eine baurechtliche Einordnung erscheint nicht ganz einfach.

Akkermann diskutiert in [Akkermann 2021] vergleichsweise ausführlich Fragen des Baurechts und des Bestandsschutzes, insbesondere in Bezug auf die LBO Baden-Württemberg.

Akkermann schreibt in [Akkermann 2021]: „Obgleich die Anwendung dieser novellierten Erdbebengefährdungen bei „üblichen“ Gebäuden derzeit nur für Neubauten vorgesehen ist, stellt sich im Kontext der in den Landesbauordnungen verankerten Pflicht zur Verkehrssicherheit und Gefahrenabwehr für Leib und Leben die Frage, inwieweit auch Bestandsbauwerke hiervon betroffen sein müssen.“

Gemäß § 3 der Musterbauordnung (MBO), der sich entsprechend in den Landesbauordnungen (LBO) wiederfindet, sind bauliche Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden. Darüber hinaus fordert § 16 MBO die Einhaltung der Verkehrssicherheit.

Akkermann folgert: „Der bestehende Konflikt zwischen „materiellem Bestandsschutz“ und „Gefahr in Verzug“ bei Bestandsbauwerken wird aufgrund der nach EC 8/NA:2020 erhöhten Einwirkungen nochmals verschärft.“

Wittemann schreibt in [Wittemann 2020]: „Ganz aktuell befinden wir uns in einer Übergangsphase, in der die Tragwerksplaner in eine unangenehme Haftungsfalle geraten können. Da der neue Nationale Anhang (NA) noch nicht bauaufsichtlich eingeführt ist, also noch nicht in der Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen enthalten ist, ist bauaufsichtlich die DIN 4149 gültig. Da aber schon bekannt ist, dass sich mancherorts deutlich höhere Erdbebenbeanspruchungen ergeben, könnte ein Bauherr argumentieren, dass die neuen Regeln allgemein anerkannte Regeln der Bautechnik sind. Da der Tragwerksplaner der Bauherrschaft die allgemein anerkannten Regeln der Bautechnik zum Zeitpunkt der Abnahme schuldet, könnte sich hieraus ein Anspruch ergeben, wenn die Auslegung noch nach der „alten“ Erdbebennorm erfolgt ist. Spätestens wenn der NA als Weißdruck vorliegt, wird die Gefahr nicht mehr zu vernachlässigen sein. Es ist daher dem Tragwerksplaner anzuraten, mit dem Bauherren abzuklären, was er haben will und eine schriftliche Vereinbarung hierüber zu treffen. ... Denn wenn ein Bauvorhaben heute begonnen wird, kann es zwei, drei Jahre bis zur Abnahme dauern und in der Zwischenzeit liegt mit großer Wahrscheinlichkeit die neue Norm vor.“

Es wird deutlich, dass das Baurecht eindeutige Übergangsregeln festlegen muss, damit die Haftungsfragen für Architekten und Bauingenieure geregelt sind.

6. Zusammenfassung

Im Unterabschnitt 4.4 wird dargelegt, dass gem. Anhang B der DIN 1055-100:2001-03, in der Tabelle B.1 in Verbindung mit Tabelle B.2 ein Bauwerk mit 50 Jahren Nutzungsdauer eine Zielgröße der Versagenswahrscheinlichkeit von $P_f \approx 10^{-5}$ haben soll. Demgegenüber ist die Versagenswahrscheinlichkeit von Bauwerken infolge Erdbeben mit Todesfolge in Deutschland $M_{p.a.} \approx 4,4 * 10^{-9}$. In Bayern sind keine Toten infolge Erdbeben bekannt. Nach [Proske 2004] beträgt eine gesellschaftlich akzeptable Todeswahrscheinlichkeit $M_{p.a.} \approx 10^{-6}$.

Die generierten Kosten durch die neuen erhöhten Erdbebenanforderungen betragen für Deutschland 460 Mio. € p.a. (Tab. 7). Das Normrisiko beträgt $R_{Norm} = 0,048 \text{ Milliarden} = 48 \text{ Mio. € p. a.}$ Die tatsächlichen Mehrkosten durch die erhöhten Erdbebenanforderungen übersteigen das Normrisiko um das fast 10-fache und die aufsummierten historischen Schäden um das etwa 45-fache. Darin wird eine signifikante Diskrepanz deutlich, über die gesellschaftlich diskutiert werden muss.

Unabhängig von einem eindeutig definierten Grenzkrisiko und damit der Festlegung eines akzeptablen Risikos, zeigt Abb. 8, dass die Naturgefahr Erdbeben gemäß Norm (Eintretenswahrscheinlichkeit 475 Jahre) in Deutschland im Bereich niedrig bis mittleres Risiko anzusehen ist. Für Bayern ergibt sich ein niedriges Risiko.

Die dokumentierten Schäden infolge **Hochwasser** übersteigen die dokumentierten Schäden infolge Erdbeben um das etwa 485-fache, bezogen auf die Schäden p.a. Das führt aber nicht dazu, dass das Bemessungshochwasser (Jahrhunderthochwasser) in Deutschland angehoben wird.

Seit 1613 (408 Jahre) wurden ca. 2938 Tote infolge Hochwasser in Deutschland gezählt; das sind 7,2 Tote p.a. oder etwa 84-mal so viele wie durch Erdbeben.

Ähnlich sieht es bei **Sturmschäden** aus. Seit 2007 beziffern sich die Sturmschäden auf ca. 19,5 Milliarden. Das sind etwa 0,9 Milliarden p.a. Man sieht, dass die Erdbebenschäden um etwa zwei Größenordnungen kleiner sind.

Es stellt sich nun die Frage, wie man mit derartigen Diskrepanzen umgeht, wie sie durch Tab. 7 sichtbar werden. Das können nicht Ingenieure entscheiden. Das ist eine gesellschaftliche, d.h. politische Aufgabe.

Die vorgelegte Risikoanalyse verdeutlicht, dass bereits mit den bestehenden Einwirkungen der DIN 4149 die Erreichung des baulichen Sicherheitsniveaus übererfüllt wird.

Der im vorliegenden Gutachten betrachtete Gebäudebestand stammt zu einem großen Teil aus Baujahren, in denen in Bayern keinerlei Anforderungen an eine Erdbebenauslegung bestanden. Für die übrigen neueren Gebäude galt zum Zeitpunkt der Planung und Errichtung die DIN 4149 (2005), die derzeit bauaufsichtlich eingeführt ist. Ein denkbarer Weg zur Verringerung der oben beschriebenen Diskrepanzen in der Risikovorsorge könnte in Bayern darin bestehen, dass die Anforderungen der neuen Norm DIN EN 19998-1/NA (2021) auf das niedrigere Niveau der DIN 4149 (2005) kalibriert werden.

Die vorgelegte Risikoanalyse untermauert den Vorschlag der Vereinigung der Prüfengeure für Baustatik in Bayern (VPI 2019), ggf. auch mit kleineren Modifikationen.

Im Einklang mit der neuen Philosophie des EC8/NA könnte in Bayern Folgendes gelten:

1. Für Beschleunigungen $S_{ap,R} < 1,0 \frac{m}{s^2}$ ist die Bedingung für sehr geringe Seismizität immer erfüllt.
2. Beschleunigungen $S_{ap,R} \geq 1,0 \frac{m}{s^2}$ dürfen mit dem Faktor 0,7 abgemindert werden.

Mit dieser pauschalen Regelung würde man etwas über dem Einwirkungsniveau der DIN 4149 liegen.

Flankierend sollte der Freistaat ein hinreichend enges Netz an seismologischen Messstationen aufbauen, um ggfls. auf neue Erkenntnisse (stärkere Erdbeben) reagieren zu können.

7. Literatur:

- [1] DIN 1055-100:2001-03 Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln (zurückgezogen, Nachfolgenorm ist DIN EN 1990)
- [2] DIN 1076 (1999): Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung 11/1999
- [3] DIN EN 1990:2010-12, Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010
- [4] DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten
- [5] DIN EN 1991-1-3/NA:2010-12. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-3:2003 + AC:2009
- [6] DIN EN 1991-1-7:2010-12, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen; Deutsche Fassung EN 1991-1-7:2006 + AC:2010
- [7] E DIN EN 1998-1/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau; 2020
- [8] DIN EN 1998-1/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau; Januar 2011
- [9] DIN EN 1998-1: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009, Dezember 2010.
- [10] DIN EN 1998-3: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 3: Beurteilung und Ertüchtigung von Gebäuden. Deutsche Fassung EN 1998-3:2005+AC:2010. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin, Dezember 2010.
- [11] DIN 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin 2005.
- [12] DIN SPEC 91390:2019-12: Integriertes Risikomanagement für den Schutz der Bevölkerung
- [13] DIN ISO 31000: Risikomanagement - Leitlinien, Oktober 2018
- [14] DIN ISO 31010: Risikomanagement - Verfahren zur Risikobeurteilung (IEC/ISO 31010:2009); Deutsche Fassung EN 31010:2010, November 2010
- [15] Akkermann J. (2021): Erdbebensicherheit von Stahlbeton-Bestandstragwerken im Kontext der Eurocode-8-Anwendung. Bautechnik 98 (2021), Heft 4, 263-276, <https://doi.org/10.1002/bate.202100008>
- [16] BBK 2010: Methode der Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz, Wissenschaftsforum Band 8, ISBN-13: 978-3-939347-28-6, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
- [17] BBK 2019, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe: Risikoanalyse – Erdbeben Rhein-Erft-Kreis, Bundesdrucksache 19/23825 vom 21.10.2020
- [18] Butenweg C., Koussini M., Gebbeken N. (2021): *Vergleich der neuen Erdbebenkarten in Deutschland und mit den Anrainerstaaten*. Bericht zum gleichnamigen DIBt-Forschungsvorhaben, Fraunhofer IRB-Verlag 2021, ISBN
- [19] GEM: Global Earthquake Model: <https://www.globalquakemodel.org/gem>
- [20] Grünthal, G., Bosse, C. (1996). Probabilistische Karte der Erdbebengefährdung der Bundesrepublik Deutschland – Erdbebenzonierungskarte für das Nationale Anwendungsdokument zum Eurocode 8: Forschungsbericht (Scientific Technical Report STR 96/10). Potsdam, GeoForschungsZentrum Postdam.

- [21]Grünthal, G., Stromeyer D., Bosse C., Cotton F., Bindi D. (2018a): The probabilistic seismic hazard assessment of Germany – version 2016, considering the range of epistemic uncertainties and aleatory variability. Bull. Earthquake Eng. (2018) 16:4339-4395, Bull Earthquake Eng (2018) 16:4339-4395, <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0315-y>
- [22]Grünthal G., Stromeyer D., Bosse C., Cotton F., Bindi D. (2018b): Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands – Version 2016 – für DIN EN 1998-1/NA. – Bautechnik, 95, 5, pp. 371-384.
- [23]Grünthal, G. (2020): Vergleich der neuen Erdbebengefährdungskarten der Schweiz, Deutschlands, Österreichs und Frankreichs für die Nationalen Anhänge zum Eurocode 8, Bautechnik, Verlag Ernst und Sohn, Juli 2020.
- [24]Grünthal, G., Bosse, C., (2021): Unterschiede, Beziehungen und Gemeinsamkeiten der Erdbebenkarten nach bisherigem und neuem Nationalen Anhang Eurocode 8 – Bautechnik, 98, 5, pp. 1-16.
- [25]Leydecker G. (2011): Erdbebenkatalog für Deutschland – mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2008. Geologisches Jahrbuch, Reihe E Geophysik, Heft 59, Hrsg. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover 2011 ISBN 978-3-510-95989-1
- [26]National Building Code of Canada 2015, NBCC 2015
- [27]Proske D. (2004): Katalog der Risiken. Eigenverlag, Dresden 2004, 1. Auflage, ISBN 3-00-014396-3
- [28]Renn O. (2014): Das Risikoparadox – Warum wir uns vor dem falschen fürchten. Fischer Verlag 2014, ISBN 978-3-596-19811-5
- [29]Schwarz J.; Langhammer T.; Kaufmann C. (2006) Quantifizierung der Schadenspotentiale infolge Erdbeben – Teil 2: Modellstudie Baden-Württemberg in: Bautechnik 83, H. 12, S. 827–841. <https://doi.org/10.1002/bate.200610072>
- [30]Schwarz et al. (2010a): Magnitudenorientierter Erdbebenkatalog für deutsche und angrenzende Gebiete EK DAG – erweiterter Ahorner-Katalog, Version 1.0, März 2010, Teil A, Bauhaus-Universität Weimar
- [31]Schwarz et al. (2010b): Magnitudenorientierter Erdbebenkatalog für deutsche und angrenzende Gebiete EK DAG – erweiterter Ahorner-Katalog, Version 1.0, März 2010, Teil B, Bauhaus-Universität Weimar
- [32]Schwarz et al. (2010c): Magnitudenorientierter Erdbebenkatalog für deutsche und angrenzende Gebiete EK DAG – erweiterter Ahorner-Katalog, Version 1.0, März 2010, Teil C, Bauhaus-Universität Weimar
- [33]Schwarz et al. (2015): Magnitudenorientierter Erdbebenkatalog für deutsche und angrenzende Gebiete EK DAG – erweiterter Ahorner-Katalog, Version 2.1, Dez. 2015, Bauhaus-Universität Weimar
- [34]Schwarz et al. (2018): Magnitudenorientierter Erdbebenkatalog für deutsche und angrenzende Gebiete EK DAG – erweiterter Ahorner-Katalog, Version 2.2, Dez. 2018, ISBN: 978-3-95773-276-7, Bauhaus-Universitätsverlag Weimar
- [35]Schwarz J. et al. (2021): Intensitäts- und magnitudenorientierter Erdbebenkatalog für deutsche und angrenzende Gebiete EK DAG – erweiterter Ahorner-Katalog. Bauingenieur Bd. 96, 2021 Nr. 4, DOI 10.375/544/0005-6650-2021-04-33, S11-S15
- [36]SIA 261: Einwirkungen auf Tragwerke, Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein, 2020.
- [37]SIA 269/8: Erhaltung von Tragwerken – Erdbeben (2017)
- [38]European facilities for Earthquake Hazard and Risk (EFEHR); <http://www.efehr.org/en/hazard-data-access/hazard-maps/>

- [39]Das interaktive Tool zur Erdbebeneinwirkung nach E DIN EN 1998-1/ NA:2020; http://www-app1.gfz-potsdam.de/pb53/Koor/Koordinatenabfrage_DIN_html.php
- [40]Richter Charles F. (1935): *An instrumental earthquake magnitude scale*. In: *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 25, Nr. 1, Januar 1935, [ISSN 0037-1106](https://doi.org/10.1785/bssa-1935-0001), S. 1–32.
- [41]SHARE: <http://www.efehr.org:8080/jetspeed/portal/hazard.psml>, publisher: European Facility for Earthquake Hazard and Risk, data gathered on 27. May 2014.
- [42]VDI 6200 (2010): Standsicherheit von Bauwerken - Regelmäßige Überprüfung
- [43]VPI Bayern (2019): Erläuterungen und Begründungen zum Einspruch gegen DIN EN 1998-1/NA:2018-10, vom 20.01.2019
- [44]Wenk Th. [2008]: was kostet Erdbebensicherung von Gebäuden? Zeitschrift Tec21, Band 134 (2008), Heft 35, ETH Zürich, 18-22
- [45]Wittmann K. [2020]: Neue Erdbebennorm für Neubauten maßgebend. Interview, in: INGBW aktuell 12/2020, S. 7

8. Abkürzungsverzeichnis

- AKW: Atomkraftwerk
- BauProtect: Buildings and Utilities Protection (Forschungsgruppe UniBwM)
- BBK: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
- BMBF: Bundesministerium für Bildung und Forschung
- DACH: Deutschland, Österreich, Schweiz
- DIN: Deutsches Institut für Normung
- DLR: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
- E: Eintretenswahrscheinlichkeit
- EC: Eurocode
- EMS: Europäische Makroseismische Skala
- FZ RISK: Forschungszentrum Risiko, Infrastruktur, Sicherheit und Konflikt
- GERES: Seismisches Netz von Primärstationen
- GG: Grundgesetz
- GMPE: Ground Motion Prediction Equations
- GRSN: German Regional Seismic Network
- I: Intensität
- ISO: International Organization for Standardization
- K: Kosten
- KTA: Kerntechnische Anlagen
- LBO: Landesbauordnung
- M: Magnitude
- MBO: Musterbauordnung
- M.p.a.: Mortality per anno
- NA: Nationaler Anhang
- PGA: Peak Ground Acceleration
- PSHA: Probabilistic Seismic Hazard Assessment
- R: Risiko
- SHARE: Seismic Hazard Harmonization in Europe
- SIA: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
- TNT: Trinitrotoluol (Sprengstoff)
- UN: United Nations
- VDI: Verein Deutscher Ingenieure
- VPI: Vereinigung der Prüferingenieure