
Naturgefahren – Schutzkonzepte

Hochwasser und Erdbeben als Beispiele

Daniel Vischer & Stephan Müller

Die Jahre 1990 bis 1999 wurden von den Vereinten Nationen als Dekade zur Verminderung von Naturkatastrophen («International Decade for Natural Disaster Reduction») bezeichnet. Was geht das die Schweiz an? – Hier wird eine kurze Übersicht über die Naturgefahren und die entsprechenden Schutzkonzepte vermittelt. Dazu werden zwei Beispiele aus schweizerischer Sicht geschildert. Den Fachgebieten der Autoren entsprechend beziehen sie sich auf Hochwasser und Erdbeben.

1 WAS SIND NATURGEFAHREN?

Zu den Naturgefahren werden in der Regel folgende Ereignisse gezählt: Stürme, einschliesslich Hagel, Kälteeinbrüche, Schnee- und Eislawinen, Hochwasser, Murgänge, Vulkanausbrüche, Erdbeben, einschliesslich Tsunamis, Bergstürze, Sturmfluten, grosse Rutschungen, Dürre, Wald- und Steppenbrände. Auch die Heuschreckenplage wird in den davon betroffenen Ländern als Naturgefahr betrachtet. Und eigentlich müsste man noch andere, von der Fauna und Flora ausgehende Gefahren dazuzählen, man denke etwa an die durch gewisse Erreger verursachten Epidemien (1).

Ereignisse, die als Naturgefahren bezeichnet und dann bei ihrem Auftreten als Naturkatastrophen gewertet werden, haben offenbar eines gemeinsam: *Es handelt sich um Ereignisse, die rein natürlichen Ursprungs sein können.* Dementsprechend sind sie auch schon seit Urzeiten bekannt und als sogenannte höhere Gewalt gefürchtet. Das schliesst aber nicht aus, dass sie noch durch anthropogene Einflüsse verstärkt oder gar durch solche allein ausgelöst werden können. So entstehen Wald- und Steppenbrände in einigen Fällen auf natürliche Weise durch Blitzschlag, in anderen jedoch durch fahrlässige oder vorsätzliche Brandstiftung.

Zum Wesen der Naturkatastrophen gehören auch eine gewisse Seltenheit, Unberechenbarkeit und Plötzlichkeit des Auftretens. Eine Naturkatastrophe wird als Drama empfunden und übt – wie es die Zahl der Schaulustigen vor Ort und am Fernseher jeweils unterstreicht – eine grosse Faszination aus. Davon ausgenommen sind die Dürre und die Kälteeinbrüche, die sich eher schleichend bemerkbar machen und keine vergleichbare Aufmerksamkeit erfahren.

2 GIBT ES GEMEINSAMKEITEN BEI DEN SCHUTZKONZEPTEN?

Inwiefern gleichen sich die Naturkatastrophen in ihrer Erscheinungsform? Eine naheliegende, aber dennoch anregende Antwort ist die: Mit Ausnahme der Dürre

und der Kälteeinbrüche, die, wie schon angedeutet, etwas andere Aspekte aufweisen, manifestieren sich alle Naturkatastrophen mehr oder weniger deutlich durch *drei Zonen*:

(a) *Die Entstehungs- oder die Ursprungszone*

In dieser Zone entsteht das seltene Naturereignis, das zu einer Katastrophe führt.

(b) *Die Translations- oder die Ausbreitungszone*

Das katastrophale Naturereignis schlägt dort einen bestimmten Weg ein oder breitet sich allseitig aus.

(c) *Die Wirkungszone oder das Katastrophengebiet*

Das katastrophale Naturereignis erreicht den menschlichen Lebensraum, verheert diesen und bedroht des Menschen Gesundheit und Leben.

Am besten wäre es, man könnte die Gefahr schon in der Entstehungs- oder Ursprungszone bannen. Das ist beispielsweise bei Lawinen möglich, wo sich notorische Anrisszonen ausmachen und sichern lassen. Die Schutzkonzepte konzentrieren sich dort meist auf den Schneerückhalt mittels Lawinenverbauungen. Bei anderen Naturgefahren, wie bei Erdbeben und Stürmen ist eine solche Prävention aber ausgeschlossen.

Bei vielen Naturereignissen kann die Translations- oder Ausbreitungszone beeinflusst werden. Die entsprechenden Massnahmen lassen sich unter dem Begriff *Eindämmung der Gefahr* zusammenfassen: Die Gefahr entsteht zwar, ihre Ausbreitung wird aber begrenzt. Dazu dienen bei Lawinen, Murgängen und Hochwassern mannigfache Schutzdämme sowie bei Waldbränden breite Schneisen. Bei grossen Bergstürzen und Hangrutschungen ist die Eindämmung allerdings nur beschränkt möglich, bei Erdbeben und Sturm überhaupt nicht.

In der Wirkungszone, beziehungsweise im Katastrophengebiet begegnet man der Gefahr nach Möglichkeit durch Objektschutz. Darunter versteht man die katastrophenfeste Ausbildung menschlicher Lebensräume. Zu diesen gehören vorwiegend Gebäude und Verkehrsanlagen, die beispielsweise sturmfest, lawinensicher, erdbebensicher und hochwassersicher angeordnet oder ausgestaltet werden können. Wo der Objektschutz fehlt oder ungenügend ist, muss man sich auf die Katastrophenhilfe verlassen. Diese sucht den Schaden durch Rettungs- und andere Hilfsaktionen zu mindern. Einen einschlägigen Beitrag dazu liefern auch die Versicherungen gegen die sogenannten Elementarschäden.

3 DIE HOCHWASSERGEFAHR LÄNGS DEN ALPENFLÜSSEN

Die drei Zonen einer Hochwasserkatastrophe lassen sich wie folgt definieren: Das Einzugsgebiet des ausufernden Flusses ist naturgemäss die Entstehungs- oder Ursprungszone. Das Flussbett selbst kann als Translations- oder Ausbreitungszone betrachtet werden. Und das eigentliche Überschwemmungsgebiet bildet die Wirkungszone oder das Katastrophengebiet.

3.1 Die Entstehung der Hochwasser

Die verheerenden Hochwasser in den Alpenflüssen entstehen fast immer durch Starkniederschläge. Eine Ausnahme bilden die wenigen Fälle, wo Gletscherseen ausbrechen, wie etwa der Gornersee bei Zermatt. Weniger gefährlich als gemeinhin angenommen wirkt dagegen die Schneeschmelze.

Für die Hochwasserbildung ist naturgemäss die Intensität, die Dauer und die Ausdehnung der Starkniederschläge massgebend. Dabei geht es nicht um einen Punktniederschlag bei einem bestimmten Regenschwanz, sondern um einen Gebietsniederschlag. Trägt man eine grosse Menge von Beobachtungen zusammen, erkennt man zwei wesentliche Beziehungen: Die Intensität der Starkniederschläge nimmt einerseits mit der Dauer und andererseits mit der Ausdehnung ab. Das entspricht ja auch der Alltagserfahrung: Heftige Platzregen dauern nur kurz und überregnen bloss ein kleines Gebiet; längerdauernde Starkregen sind weniger intensiv, dafür aber meist grossräumiger wirksam. Die Folge ist, dass die Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten verhältnismässig grösser ausfallen als in kleinen. Das heisst, der Hochwasserabfluss pro Quadratkilometer ist in kleinen Einzugsgebieten wesentlich grösser.

Wie eng korreliert nun aber dieser Hochwasserabfluss mit der Einzugsgebietsgrösse? Gemäss einer Reihe von gängigen Hochwasserformeln scheint der Zusammenhang unmittelbar gegeben. Leider entspricht das der Wirklichkeit nicht. Wie viele Untersuchungen zeigen, stammt eine Hochwasserspitze nämlich nicht aus dem ganzen Einzugsgebiet. Für grosse Gebiete, wie etwa das gesamte Aaregebiet, ist das evident. Für wesentlich kleinere Einzugsgebiete gilt diese Wahrheit aber auch. Gerade bei den hochgelegenen alpinen Gebieten stellt sich ja meist eine Schneefallgrenze ein. Dementsprechend trägt grundsätzlich nur der darunterliegende Teil des Einzugsgebietes zur unmittelbaren Hochwasserbildung bei. In anderen Worten: Dieser Teil ist von der beim Starkniederschlagsereignis herrschenden Temperatur abhängig. So entstanden die Hochwasserkatastrophen von 1987 in Uri (Abb. 1), im Goms und im Puschlav oder von 1993 in Brig (Abb. 2) unter anderem deshalb, weil die Temperatur relativ hoch war und damit auch die Schneefallgrenze.

Aber auch jener Einzugsgebietsteil, der unterhalb der Schneefallgrenze liegt, ist nicht voll hochwasserwirksam. Aus neueren Forschungsarbeiten folgt, dass eigentlich nur ein mehr oder weniger breiter Landstreifen beidseitig der Abflussrinnen – gemeint sind neben den eigentlichen Fliessgewässern auch perennierende Bäche – eine Rolle spielt. Was ausserhalb geschieht, führt bei einem Starkniederschlag zwar auch zu einem Abfluss. Dieser fliesst aber zu spät ab, um zur Bildung der eigentlichen Hochwasserspitze beizusteuern.

Die tatsächlichen Verhältnisse sind aber noch komplizierter. Denn es kommt nicht bloss auf die Ausdehnung der beteiligten Einzugsgebietsflächen an, sondern auch auf deren Zustand. Je nachdem gibt der Landstreifen viel Regenwasser in

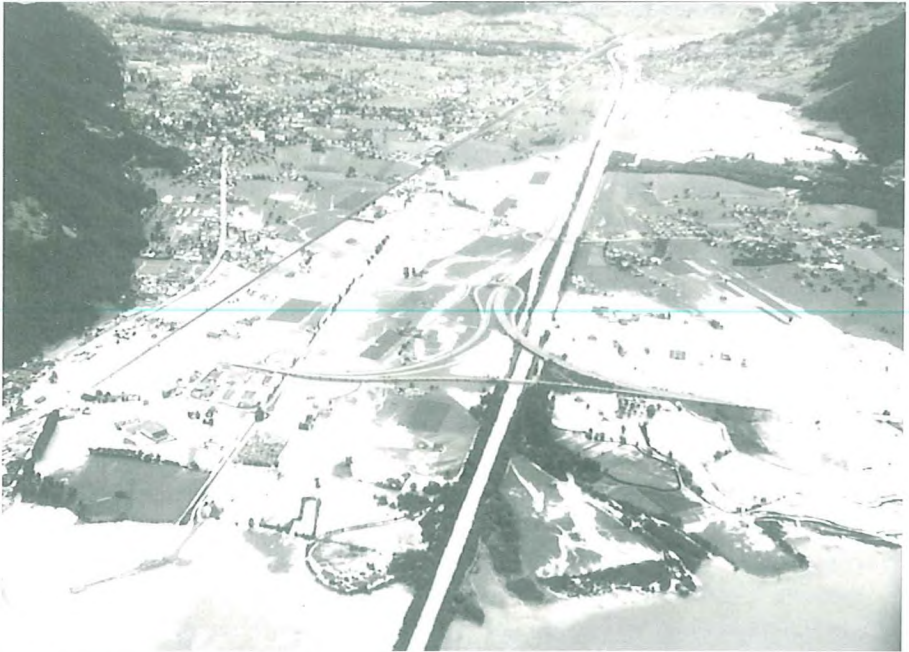


Abb. 1. Überschwemmung der Urner Reussebene am 25. August 1987 infolge von überströmten und dann gebrochenen Reussdämmen. Neben der Landwirtschaft wurden vor allem einige neue Verkehrsträger betroffen (Foto: R. Meier, Baden).

die Abflussrinnen ab oder nicht. Die Parameter sind Legion. Am bekanntesten sind die natürlichen Versiegelungseffekte. Dazu gehören vor allem ein vorangehender Frost, der die Oberfläche zufriert, oder ein Vorregen, der den Boden sättigt. Die Bodenverdichtung infolge des intensiven Landbaus usw. ist im Alpenraum weniger wichtig.

Angesichts all dieser Zusammenhänge ist es verständlich, dass sich Hochwasserspitzen anhand von zu erwartenden Regenintensitäten und Einzugsgebietseigenschaften kaum zutreffend berechnen lassen. Auch ist es völlig unzulässig, von einem hundertjährigen Starkniederschlag ein hundertjähriges Hochwasser zu erwarten. Als Beispiel kann das bereits erwähnte Ereignis von 1987 in Uri (Abb. 1) angeführt werden. Damals erzeugten rund 50jährige Regengüsse ein 200jähriges Reusshochwasser.

Den besten Einblick in die Grösse und Jährlichkeit der Hochwasserspitzen erhält man durch direkte Abflussmessungen am interessierenden Ort. Da Abflussmessstationen aber in Bau und Betrieb kostspielig sind und sich bei Hochwasser schlecht eichen lassen, sind sie nur in Ausnahmefällen zu rechtfertigen. Zudem zeigt sich immer wieder, dass solche Stationen bei Katastrophenhochwassern – also gerade dann, wenn sie für die Hochwasserhydrologie interessant wären – zerstört werden oder zumindest ausfallen.

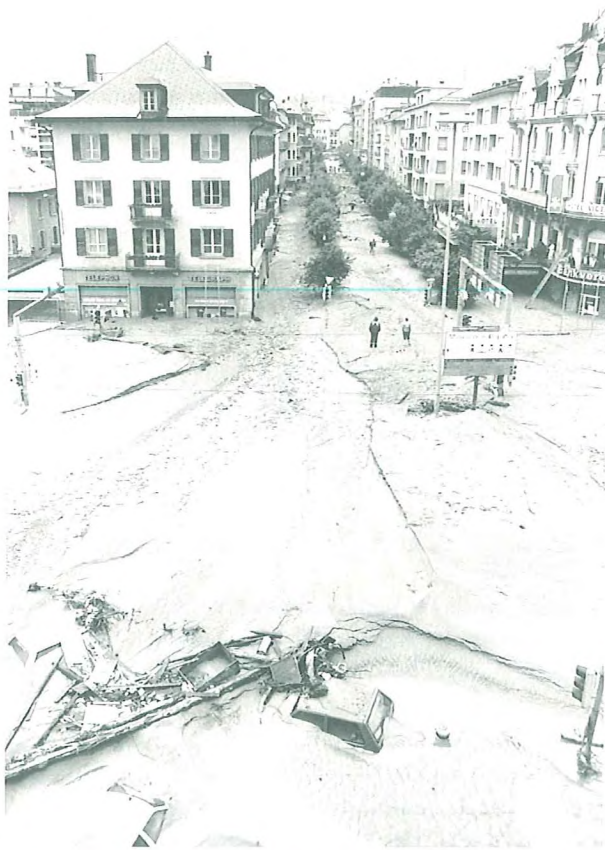


Abb. 2. Überschwemmung in Brig am 24. September 1993. Die Sedimente decken einige Plätze und Strassen bis zu 2 m ein. Zum zivilisatorischen Treibzeug gehören heute insbesondere die Autos (Foto: ASL, Lausanne).

3.2 Das Abflauen der Hochwasserwellen

Im vorangehenden Abschnitt wurde erwähnt, dass die hochwasserbildenden Prozesse im Einzugsgebiet komplex sind. Glücklicherweise gestalten sich die Prozesse im Gewässernetz selber etwas einfacher. Dort lässt sich das Abflussschehen weitgehend durch die Gleichungen der Hydromechanik in Abhängigkeit von der Geometrie erfassen. Die einzige Schwierigkeit besteht in der richtigen Abschätzung der Reibung, die sich der Bewegung entgegenstellt. Sie hängt zwar auch von der Geometrie des Gewässers ab, lässt sich aber nicht ohne weiteres ablesen. Zudem verändert sich ein Fluss- und Bachbett während eines Hochwassers in einer meist schlecht voraussehbaren Weise.

Hochwasserabflüsse sind selbstverständlich nicht stationär. Sie schwellen rasch an, erreichen ihren Spitzenwert und flauen dann langsam wieder ab. Diese

Abhängigkeit des Abflusses von der Zeit wird als Hochwasserwelle bezeichnet. Im Gewässernetz eines Einzugsgebietes überlagern sich somit die Hochwasserwellen aus den verschiedenen Runsen und Bächen zu einer grösseren Hochwasserwelle im Hauptgewässer. Dabei macht sich ein Abminderungs- oder Retentionseffekt bemerkbar. Er entsteht dadurch, dass grössere Abflüsse eine grössere Wassertiefe erzeugen. Sie müssen sozusagen zuerst das Bach- oder Flussbett auffüllen, bevor sie weiterfliessen können. Dieses «Füllwasser» fehlt ihnen dann während der Anschwellzeit, so dass die Hochwasserspitze gedämpft wird. Besonders augenfällig ist der Retentionseffekt von natürlichen und künstlichen Seen, deren Wasserstand nicht durch Regulierorgane konstant gehalten wird. Als Beispiel sei das Hochwasser im Alpenrhein vom Juli 1987 angeführt. Es bewirkte in Diepoldsau einen kurzfristigen Anstieg des Abflusses von mehr als 2000 m³/s. Das machte sich im Abfluss des Hochrheins bei Neuhausen mit einem längerfristigen Anstieg von knapp 200 m³/s bemerkbar. Beim Durchgang durch den Bodensee wurde die Hochwasserspitze also auf weniger als einen Zehntel verringert.

3.3 Die Ausuferungen

Ob ein Hochwasser ausufert, hängt von der Abflusskapazität des Bach- oder Flussbettes ab. Diese Kapazität entspricht dem sogenannten bordvollen Abfluss. Ist die Spitze eines Hochwassers grösser, so überbortet es und tritt damit über die Ufer.

Im allgemeinen wird angenommen, dass der bordvolle Abfluss für einen bestimmten Ort im Gewässernetz eine feste Grösse darstellt. So wird in der Praxis beispielsweise gesagt: «Der bordvolle Abfluss bei der kritischen Stelle im Dorf X entspricht dem 5jährlichen Hochwasser.» Eine solche Aussage ist aber nur statthaft, wenn die Geometrie des Bach- oder Flussbetts selbst während eines Hochwasserabflusses unverändert bleibt. In vielen Fällen bewirkt die Schleppkraft eines Hochwassers nämlich bemerkenswerte Bettumlagerungen. Gefürchtet sind dabei vor allem Verstopfungen von Nebenarmen oder markante Sohlenerhöhungen. So ist etwa die Saltina in Brig im September 1993 (siehe Abb. 2) nicht deshalb ausgeufert, weil der Hochwasserabfluss exzessiv war, sondern weil sich ihr Bett anhub. Ihr Spitzenabfluss hatte die Grössenordnung eines rund 100jährlichen Hochwassers und überschritt an sich die Kapazität der ursprünglichen Schussrinne nicht. Doch führte die Saltina soviel Geschiebe mit sich, dass dieses unter der Brücke Brig-Glis liegenblieb und dort die Kapazität der Schussrinne verminderte und dann sogar aufhob.

3.4 Hochwasserschutzmassnahmen

Gegen die Ursache der Hochwasser, das heisst gegen die Starkniederschläge, lässt sich nichts unternehmen. Hingegen kann man in den abflussbildenden Prozess eingreifen. Dies geschieht durch Massnahmen, welche eine rasche Konzentration

der Wassermassen im Gewässernetz verhindern. Dazu dienen die sogenannten Regenrückhalte- oder Hochwasserrückhaltebecken. Sie gleichen Wasserreservoirien oder Stauseen. Im Normalfall sind sie leer oder fast leer. Aber im Hochwasserfall halten sie einen Teil der Zuflüsse fest und geben diesen erst später und dosiert weiter. In der Schweiz existieren heute rund 50 eigentliche Hochwasserrückhaltebecken. Sie liegen hauptsächlich in der Nordostschweiz. Im Alpenraum wirken natürlich die Kraftwerksspeicher als solche, am Alpenfuss die natürlichen Seen. Eine besondere Spielart der Hochwasserrückhaltebecken stellen bewusst ausgesparte Ausuferungszonen an Stellen dar, wo keine grossen Überschwemmungsschäden entstehen können. Ebenfalls zu erwähnen sind die vielen kleinen Massnahmen, die der heutige Gewässerschutz anstrebt: Dachwasserver-sickerungen, Auflockerungen von Plätzen und Strassen, speicherfähige Abwassersysteme vom Strassenablauf bis zur Kläranlage.

Im Bereich des Überschwemmungsgebietes sind zwei grundsätzlich verschiedene Schutzkonzepte möglich: die Verhinderung der Ausuferung oder der Objektschutz. Beim ersten Konzept erhöht man die Kapazität beziehungsweise den bordvollen Abfluss des Baches oder Flusses. Der Katalog der entsprechenden flussbaulichen Massnahmen umfasst die

- Entfernung abflusshemmender Hindernisse wie Einbauten und Uferbestokkungen, tiefliegende Brücken und zu enge Durchlässe
- Vergrösserung des Abflussprofils durch die Errichtung von Längsdämmen, Gerinneverbreiterungen und Sohlenabsenkungen
- Steigerung des Abflussvermögens durch Laufverkürzung bei gleichzeitiger Gefällserhöhung, etwa durch Begradigungen oder Mäanderdurchstiche
- Verkleinerung der Gerinnerauhigkeit mittels Pflästerungen
- Sicherung von Sohle und Böschungen gegen Erosion.

Eine in letzter Zeit vermehrt angewandte Alternative besteht in der Schaffung von Hochwasserentlastungen. Das sind künstliche Gerinne, die oberhalb von Überschwemmungsgebieten vom Bach oder Fluss abzweigen und die Hochwasser gefahrlos ableiten helfen. Sie münden entweder unterhalb des Einzugsgebiets wieder ein oder in ein anderes Gewässer aus. Als Beispiel sei der 7,4 km lange Langetenstollen angeführt. Sein Einlauf liegt oberhalb von Langenthal und leitet das Langetenhochwasser in die Aare ab. Die natürliche Langeten ufert bei Langenthal dementsprechend nur noch sehr selten aus.

Beim Objektschutz nimmt man die Ausuferung des Flusses oder Baches grundsätzlich in Kauf und schützt bloss einzelne Objekte im Überschwemmungsgebiet. Fasst man den Begriff des Objektschutzes etwas weit, gehört zum Massnahmenkatalog folgendes:

- Bauliche Vorkehrungen zum Schutz bestimmter Anlagen wie die hochwasser-feste Ausbildung von Bauten und Verkehrswegen oder die Schaffung von Schutzpoldern durch Binnendämme

- Warndienst bei Hochwassergefahr, um Sicherheitsmassnahmen zu ermöglichen, beispielsweise die Errichtung temporärer Schutzbauten und Barrikaden aus Sandsäcken usw., oder die Evakuierung von Menschen, Tieren, Geräten, Material
- Rettungs- und Hilfsdienst (Katastropheneinsatz) zur Rettung bedrohter Menschen und Tiere während der Flut sowie für Bergungs- und Räumungsarbeiten nach der Flut.

Als präventive Möglichkeit bieten sich selbstverständlich auch planerische Massnahmen an. Dazu zählt die Ausscheidung von Gefahren- und Schutzzonen mit bestimmten Auflagen, im Extremfall mit Bauverbot. Die Erstellung von Gefahrenzonenplänen und damit von Überflutungskarten wird in der Schweiz neuerdings durch das revidierte Wasserbaugesetz und das revidierte Forstgesetz vorgeschrieben. Der bauliche Objektschutz, der früher einmal verbreitet war, dürfte dadurch eine gewisse Wiederbelebung erfahren.

3.5 Die Hochwassergefahr

Trotz der föderalistischen Struktur der Schweiz wurde der Hochwasserschutz im ganzen Land ziemlich gleichmässig vorangetrieben. Deshalb ist er auch überall etwa auf demselben Stand. Genügt dieser?

Als Erfolg der Hochwasserschutzmassnahmen darf gewertet werden, dass die Zahl der Todesopfer bei Hochwasser- und Murgangereignissen klein ist. Sie betrug in der Dekade von 1986 bis 1995 bloss 25. Ein Fragezeichen setzen aber die Sachschäden. Sie erreichten in derselben Dekade eine Summe von 3,1 Milliarden Franken. Davon entstanden 1,3 Milliarden Franken 1987 und 0,9 Milliarden Franken 1993. In den übrigen Jahren lag der Schnitt bei 100 Millionen Franken. Ist das akzeptabel?

Die Sorge der Fachleute spiegelt sich im Diagramm der Abb. 3 wider: Die grossen Anstrengungen im Hochwasserschutz liegen weit zurück. Sie drückten früher einmal die Wahrscheinlichkeit von ausufernden Hochwassern stark herab. Dadurch sank das Hochwasserrisiko (im Sinne eines jährlichen Schadenserwartungswerts) auf ein akzeptierbares Restrisiko. Der verbesserte Schutz führte aber zu einer Art Kolonisierung der einstigen Überflutungsfächen. Zuerst geschah dies durch eine intensivierete Landwirtschaft, dann durch eine Ausdehnung der Siedlungstätigkeit und schliesslich durch den Ausbau von Verkehrswegen und Industrieanlagen. Damit stieg das Gefahrenpotential (hier als mittlerer Schaden pro Ausuferung definiert) zuerst langsam, dann aber immer schneller an. Heute erreicht es in gewissen Gebieten Werte, die das einstige Gefahrenpotential um Grössenordnungen übertrifft. Folglich liegt dort auch das Hochwasserrisiko weit über dem früheren Risiko.

Angesichts dieser Entwicklung empfiehlt sich dringend eine Schwachstellenanalyse. Sie muss die Wirksamkeit der bestehenden Schutzmassnahmen angesichts des heutigen Hochwasserrisikos überprüfen. Dort, wo dieses Risiko zu

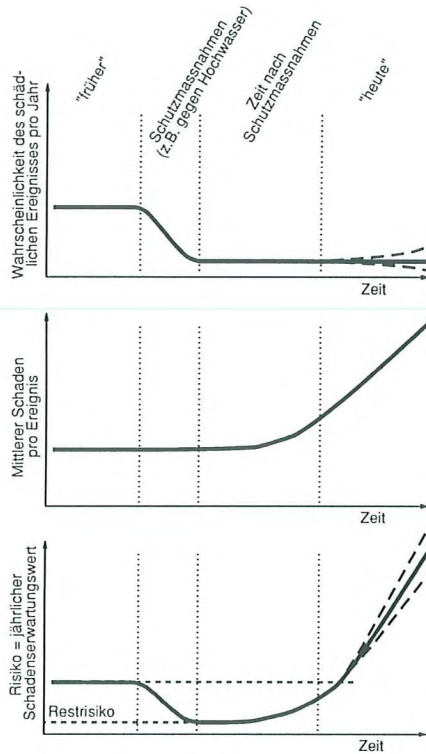


Abb. 3. Entwicklung des Hochwasserrisikos: Der Anstieg des Gefahrenpotentials (mittlerer Schaden pro Ausuferungsereignis) lässt das Hochwasserrisiko auf Werte anwachsen, die gebietsweise weit über dem früheren Risiko liegen (vgl. Text). Gestrichelt sind die verschärfenden oder entschärfenden Einflüsse der gegenwärtigen Klimaänderung angedeutet (aus NFP 31/Info 8, Januar 1996).

gross ist, gilt es zu handeln. Der Katalog der Möglichkeiten vom Hochwasserrückhalt bis zum Objektschutz und den planerischen Massnahmen wurde weiter oben ja festgehalten. Das gleiche Vorgehen drängt sich selbstverständlich auch bei den anderen Naturgefahren auf.

4 DAS ERDBEBENRISIKO IN DER SCHWEIZ

In der Schweiz können auch enorme Erdbebenschäden auftreten. Eine Standortbestimmung gibt einen Überblick über die bisherigen Bemühungen zur Verminderung des Erdbebenrisikos und weist auf den grossen Nachholbedarf beim Objektschutz, insbesondere bei der Verstärkung bestehender Bauwerke und bei den Vorkehrungen durch zeitgemässe Baunormen hin.

Das Erdbebenrisiko setzt sich aus drei Faktoren zusammen, die unabhängig voneinander ermittelt werden müssen (2):

- (a) die objektiv vorhandene Erdbebengefährdung, d. h. wie häufig tritt während einer bestimmten Zeit an einem Ort eine bestimmte Intensität auf?

- (b) die Schadensanfälligkeit von Bauten, d. h. wie widerstandsfähig sind Gebäude gegen durch Erdbeben verursachte Erschütterungen?
- (c) der Schadenswert, d. h. wie hoch ist der durch das Erdbeben verursachte mögliche Schaden an betroffenen Menschen und Gütern?

Wenn die bisher aufgetretene Erdbebenhäufigkeit in einem Gebiet bekannt ist, können – zusammen mit speziellen geologischen Karten – als erstes die Zonen erhöhter Erdbebenaktivität festgelegt werden. Berücksichtigt man weiterhin die Abschwächung der Erschütterungen mit zunehmender Entfernung vom Epizentrum und ebenfalls die spezifische Beschaffenheit des Untergrundes, so lässt sich das Ergebnis kartenmässig darstellen. Seit 1978 existiert eine derartige Karte der Erdbebengefährdung auch für die Schweiz¹.

Aus solchen Karten kann für jeden beliebigen Ort die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer bestimmten Intensität, stellvertretend für ein charakteristisches Schadensbild, entnommen werden. Aus diesem Grunde werden sie auch immer mehr bei der Ausarbeitung von Baunormen herangezogen.

Die Schadensanfälligkeit von Gebäuden hängt von verschiedenen Faktoren ab, die von der Qualität des Baugrundes über konstruktive und materialtechnische Aspekte bis hin zur Inneneinrichtung reichen. Sie kann ganz wesentlich durch die Beachtung geeigneter Baumassnahmen – einfachen wie komplizierten – verringert werden. Ebenso können Personenschäden durch richtiges Verhalten vor, während und nach einem Erdbeben entscheidend beeinflusst werden.

Ausser den direkt sichtbaren Schäden müssen auch andere indirekte Verluste durch Betriebsausfälle, Arbeitslosigkeit oder Produktionsunterbrechungen für die Festlegung des gesamten volkswirtschaftlichen Schadenswertes in Betracht gezogen werden. So haben die Erdbeben und ihre ökonomischen Langzeitauswirkungen zum Beispiel in den Vereinigten Staaten seit 1900 insgesamt zu Verlusten von mehr als 25 Mrd. Dollar geführt. Interessanterweise waren es dabei die mittelstarken Beben, die den grössten Schadensanteil verursachten, weil sie eben insgesamt wesentlich häufiger auftreten als die sehr starken Beben. Das bedeutet aber auch, dass schon relativ bescheidene Schutzmassnahmen gegen mittelstarke Beben den Gesamtschaden beträchtlich herabsetzen können. Das ist eine wichtige Erkenntnis aus vielen Erdbebenfällen, die natürlich auch von den Versicherungen bei der Ausrichtung ihrer Prämien einkalkuliert wird.

4.1 Die Magnitude und die Intensität von Erdbeben

Die gemessene Magnitude und die beobachtete Intensität sind die zwei wichtigsten Angaben über die Stärke eines Erdbebens. Sie geben einerseits die Energie und andererseits die Auswirkung eines Erdbebens wieder und werden sehr oft verwechselt. In Wirklichkeit beschreiben Magnitude und Intensität zwei ganz

¹ Erdbebengefährdung in der Schweiz 1:500 000. Geophysikalische Karten der Schweiz, Nr. 8. Zu beziehen beim Bundesamt für Landestopographie, Wabern/Bern.

verschiedene Aspekte eines Erdbebens, wie etwa die Wattzahl und die dadurch erreichte Helligkeit bei einer Lampe. Nachfolgend sollen diese beiden Grössen und die zugehörigen Skalen genauer beschrieben werden.

Die *Magnitude* ist ein Mass für die im Erdbebenherd freigesetzte Energie und wird mit Hilfe der Aufzeichnungen von Seismographen bestimmt. Sie wird meistens in der vielzitierten Richterskala² festgelegt. Die Magnitudenskala selbst ist unbegrenzt, praktisch haben aber die stärksten bisher registrierten Erdbeben höchstens den Wert 9 erreicht. Die kleinsten registrierbaren Erdbeben können auf der anderen Seite sehr wohl negative Werte von etwa minus 2 haben, was mit der logarithmischen Einteilung der Skala zusammenhängt. Man ist heute sicher, dass es eine Maximalmagnitude für Erdbeben gibt, die nicht überschritten wird, da die Erde Spannungen nur bis zu einer bestimmten naturgegebenen Grenze speichern kann. Wie die Magnitude mit der freigesetzten Energie zusammenhängt, kann man sich am besten anhand einer kleinen Tabelle klarmachen:

Erdbeben	Magnitude	Energie in Millionen kWh	Sprengstoff-äquivalent in Tonnen TNT
Brig 1960	5	0,3	200
Agadir 1960	6	10,0	6 000
El Asnam 1980	7	300,0	200 000
Mexiko 1985	8	10 000,0	6 Millionen
Chile 1960	9	300 000,0	200 Millionen

Zum Vergleich: Die Atombombe von Hiroshima hatte eine Sprengkraft von etwa 20 000 Tonnen TNT. Ein sehr schwaches Erdbeben mit einer Magnitude von minus 2 würde in dieser Tabelle nur eine verschwindend kleine Energie haben, die etwa einem Backstein entspricht, der aus 1 Meter Höhe auf den Boden fällt. Zwischen dem kleinsten und grössten Erdbeben ist also in bezug auf die Energie ein weit grösserer Unterschied, als die Magnitudenwerte auf den ersten Blick vermuten lassen.

Im Gegensatz zur Magnitude beschreibt die *Intensität* die Auswirkung eines Bebens an der Erdoberfläche, die sich von Ort zu Ort je nach der Entfernung vom Epizentrum und der Bodenbeschaffenheit ändert. Sie kann ohne Instrumente, lediglich anhand von Wahrnehmungen während und nach einem Beben, festgelegt werden. Dies ist natürlich besonders von Vorteil, wenn die Stärke eines historischen Erdbebens ermittelt werden soll, für das zwar keine instrumentellen

2 Nach dem Amerikaner C.F. Richter (1935).

Aufzeichnungen, dafür aber detaillierte Schadensbeschreibungen vorhanden sind. Das Mass für die Intensität ist durch die heute in Europa allgemein gültige 12stufige MSK-Skala³ festgelegt. Diese Skala ist weitgehend identisch mit der in der übrigen Welt verwendeten älteren 12stufigen Mercalli-Skala⁴.

4.2 Die aktuelle Seismizität der Schweiz

In den vergangenen 20 Jahren wurde die nachfolgende gerundete Anzahl von Erdbeben in und nahe der Schweiz registriert (3):

Anzahl Erdbeben 1975–1995	Magnituden (nach Richter)	Grösste Intensität (MSK-Skala)	
3000 (unvollständig)	1.1 bis 2.0	II–III	(nicht verspürt)
1000	2.1 bis 3.0	IV	(leicht verspürt)
100	3.1 bis 4.0	V–VI	(stark verspürt)
10	4.1 bis 5.0	VII	(leichte Schäden)
1 (Sierentz, Süd-Elsass)	5.1 bis 6.0	VIII–IX	(mittlere Schäden)

Der Magnitudenbereich 1 bis 2 ist unvollständig erfasst, da zur Lokalisierung solch schwacher Beben mindestens drei Stationen im Entfernungsbereich von nicht mehr als 10–20 km erforderlich sind. Diese Bedingung ist aber nicht über die ganze Schweiz hinweg erfüllt.

Die geographische Verteilung von Erdbeben in der Schweiz für den Zeitraum 1975–95 (Abb. 4) zeigt im wesentlichen das gleiche Bild wie in den früheren Jahrhunderten. Grössere Erdbeben bis Intensität VIII, in einzelnen Fällen bis IX, hat es in der Geschichte der Schweiz immer wieder gegeben. Es gibt eine Karte, die zeigt, wo die Beben der vergangenen Jahrhunderte aufgetreten sind. Interessante Informationen über historische Erdbeben sind meist in Stadt- und Kirchenchroniken zu finden, in denen die Schäden und Auswirkungen sehr anschaulich, wenn auch oft nicht sehr wahrheitsgetreu, beschrieben werden. Das in vielen Büchern erwähnte Beben von Basel am 21. Oktober 1356 war das stärkste jemals in Mitteleuropa aufgetretene Ereignis dieser Art. Im Ratsbuch von Basel wird dieses folgendermassen beschrieben: «Man sol wissen, dass dise Stat von dem Erdpidem zerstöret und zerbrochen wart, und beleib anhein Kilche, Turne noch steinin Huss, weder in der Stat noch in den Vorstetten ganz, und wurdent

3 Nach V. Medvedev, W. Sponheuer und V. Karnik, die diese Skala 1964 für die Europäische Seismologische Kommission entwickelt haben.

4 Nach dem Italiener G. Mercalli (1902).

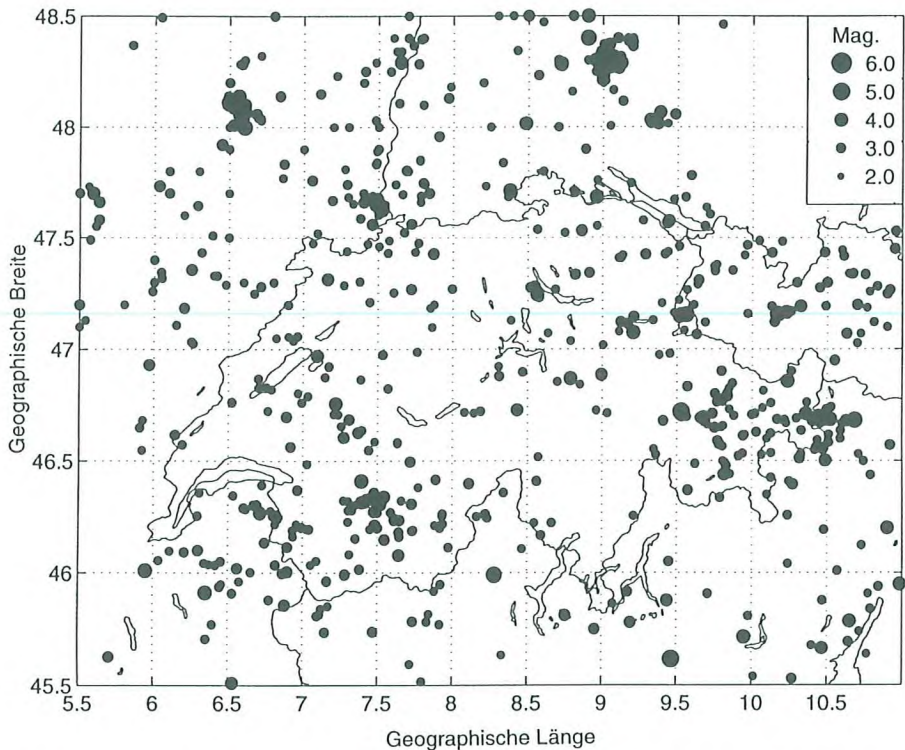


Abb. 4. Seismizität der Schweiz – Verteilung der Epizentren im Zeitraum 1975–1995 von Erdbeben mit Magnituden 2.0–5.2 (nach RÜTTENER, 1995).

grösselich zerstört. Auch viel der Burggrabe an viel Stetten in.» Das in der Folge ausgebrochene Feuer wütete etwa eine Woche lang in der Stadt und vergrösserte den Schaden beträchtlich. Im Umkreis von 30 km wurden ausserdem mehr als 20 Burgen zerstört, und sogar in 300 km Entfernung im Burgund traten nachgewiesenermassen noch Beschädigungen an den Stadtmauern auf. Aufgrund dieser Informationen kann man recht zuverlässig den Gesamtschaden abschätzen, selbst wenn die mittelalterliche Bauweise nicht genau bekannt ist. Weiterhin können wir den Beschreibungen entnehmen, dass dieses Beben im Epizentralgebiet südlich von Basel mindestens die Intensität IX in der MSK-Skala erreicht haben muss.

Insgesamt waren in den vergangenen zwei Jahrhunderten die meisten starken Erdbeben allerdings im Wallis zu verzeichnen. Bei genauerer Analyse muss aber festgestellt werden, dass gegenwärtig die Aktivität im Oberwallis und in der Innerschweiz geringer ist. Dies weist auf die Tatsache hin, dass ein Zeitfenster von 20 Jahren offenbar nicht ausreicht, um ein repräsentatives Bild der Seismizität zu erhalten. Man muss daraus schliessen, dass es langfristige zeitliche oder regionale Schwankungen in der Erdbebenaktivität gibt, die eine zusätzliche

Erforschung der historischen Erdbeben unbedingt erforderlich machen. Die Richter-Magnitude der in Abb. 4 dargestellten Erdbeben reicht von etwa 2.0 bis 5.2 und ist annähernd homogen für das ganze Gebiet erfasst. Bemerkenswert ist der Ursprung einiger Beben (Hypozentren) im Voralpengebiet, die eindeutig am Übergang von der Erdkruste zum Erdmantel in 25–30 km Tiefe liegen. Diese Tatsache war bis 1975 nicht bekannt und lässt darauf schliessen, dass offenbar tektonische Bruchvorgänge bis zu dieser Tiefe stattfinden können. Eine Kartierung der Erdbebengefährdung setzt die langzeitliche Erfassung bzw. historische Erforschung bisher aufgetretener Erdbeben voraus. Erst wenn diese Daten in zuverlässiger Form vorliegen, können die statistischen Gesetzmässigkeiten abgeleitet werden, die zu der heute üblichen probabilistischen Methode der Gefährdungsermittlung erforderlich sind. Ein spezielles Projekt in der Schweiz hat 1978 zur ersten landesweiten Gefährdungskarte in Europa geführt, die u. a. auch als Grundlage zur Festlegung der Erdbebenkriterien für die Kernkraftwerke und für die neuen Baunormen der Schweiz diente. Gegenwärtig arbeitet der Schweizerische Erdbebedienst an einer Verbesserung dieser Karten, wobei vor allem die seither instrumentell wesentlich genauer bestimmten Epizentren und der Einfluss sowie das dynamische Verhalten des geologischen Untergrundes berücksichtigt werden.

Die in der Schweiz registrierten Erdbeben sind teilweise als Serien von Ereignissen mit fast identischem Hypozentrum und Herdmechanismus aufgetreten. Wegen der grossen Ähnlichkeit der Seismogramme innerhalb jeder Serie konnten in mehreren Fällen mittels Kreuzkorrelation der Signale Unterschiede in der Lokalisierung der einzelnen Erdbebenherde von weniger als 100 m festgestellt werden. Mit dieser Methode kann die Lage der Bruchfläche im Erdinneren genauer kartiert werden, so dass es möglich ist, den Deformationsvorgang detaillierter zu analysieren. Ausserdem hat sich gezeigt, dass solche Erdbebenseerien durch wiederholte Verschiebungen auf der gleichen Bruchfläche verursacht werden. Wie solche wiederholten Bruchvorgänge mit Zeitintervallen von Sekunden bis Stunden aus dynamischer Sicht überhaupt stattfinden können, ist noch nicht geklärt und deshalb Ziel weiterer Studien.

4.3 Wie gross ist die Erdbebengefährdung der Schweiz?

In der Schweiz muss erfahrungsgemäss im Zeitraum von 100 Jahren etwa mit einer Bebenhäufigkeit wie in der folgenden Tab. gerechnet werden (4). Aus der Erdbebengefährdungskarte der Schweiz von 1978 ist die in Abb. 5 wiedergegebene Schweizer Karte mit vier Gefährdungszonen hervorgegangen. Sie enthält die Auswertung aller bekannten Erdbeben in der Schweiz vom Jahr 1200 bis heute. Während in der Nordschweiz die Gebiete mit der geringsten Gefährdung liegen, ist das Wallis relativ am stärksten betroffen. Anders ausgedrückt besagt die Karte, dass in den Zonen 1, 2, 3 und 4 entsprechend einmal, zweimal, dreimal oder viermal im Mittel pro 100 Jahre mit einer Erdbebenerschütterung der Intensität VI oder mehr gerechnet werden muss. Die Zone 4 in der Schweiz weist

Mittlere Anzahl Beben in 100 Jahren:	Maximale Magnituden (Richter-Skala):	Grösste Intensitäten (MSK-Skala)
10 000	2–3	III–IV
1000	3–4	V–VI
100	4–5	VII
10	5–6	VIII
1	bis 6.5	IX–X

aber zum Beispiel immer noch eine wesentlich niedrigere Erdbebengefährdung auf als die aktivsten Erdbebengebiete in Italien, Ex-Jugoslawien oder Griechenland.

Ganz anders kann es allerdings aussehen, wenn die Risiken, d. h. die möglichen Schäden betrachtet werden. Ein Erdbeben der in der Schweiz äusserst seltenen Intensität IX, wie 1356 in Basel, würde heute in der betroffenen Region – man denke an die Ballung der chemischen Industrie – Schäden in Milliardenhöhe (auf ungefähr 75 Mrd. Franken geschätzt) verursachen. Auf der anderen Seite sollte man beachten, dass es in der Schweiz kein Gebiet gibt, das gar keine Erdbebengefährdung aufweisen würde.

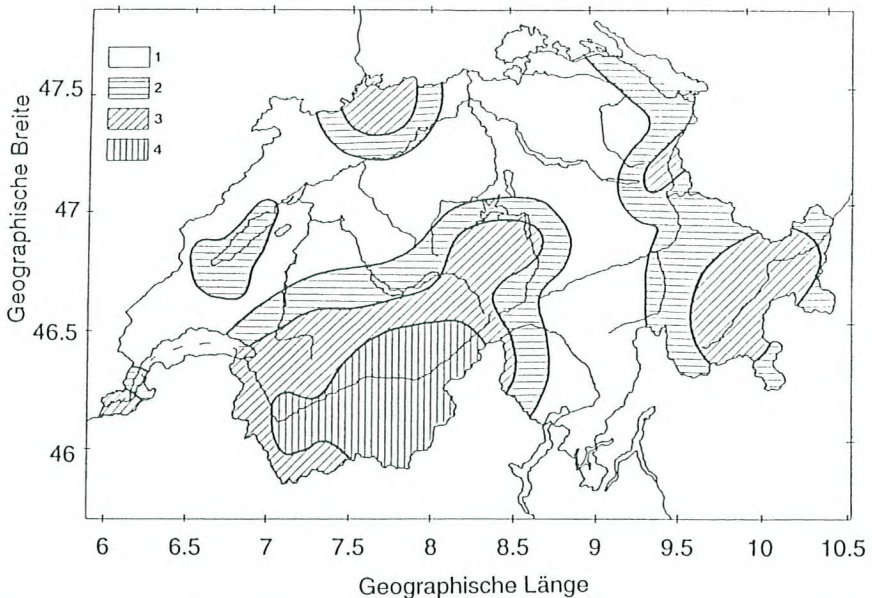


Abb. 5. Seismische Gefährdungszonen der Schweiz (Bodenbeschleunigungen, mit welchen im Zeitraum von etwa 500 Jahren mindestens einmal zu rechnen ist: 1 = gering (bis 5% g); 2 = mässig (5–10% g); 3 = erhöht (10–20% g); 4 = hoch (über 20% g). g = Erdbeschleunigung (9,81 m/s²).

Neben der rein statistischen Untersuchung des Auftretens der Erdbeben ist auch deren Ursache und Mechanismus von grossem Interesse. Die Forschungsrichtung «Seismotektonik» befasst sich hier mit den Zusammenhängen zwischen Erdbebentätigkeit und den an der Erdoberfläche sichtbaren geologischen Strukturen sowie den heutigen regionalen Spannungszuständen und Deformationsmechanismen im Untergrund. Schon relativ früh hat man erkannt, dass die Erdkruste bei einer NNW-SSE gerichteten maximalen Einengungsrichtung unter der Nordschweiz einer relativ gleichmässigen Deformation unterworfen zu sein scheint.

4.4 Wie reagieren Gebäude bei Erdbeben?

Gebäude (zum Beispiel Häuser mit wenigen Stockwerken, Lagerhallen) sind normalerweise so konstruiert, dass sie vor allem das eigene Gewicht tragen können und es dabei möglichst gleichmässig auf die Grundmauern verteilen. Infolgedessen sind sie auch gegen zusätzliche, senkrecht wirkende Erdbebenkräfte im allgemeinen ganz gut geschützt. Erdbeben verursachen aber nachweislich auch Schwingungen im Untergrund, die in waagrechter Richtung auf das Fundament eines Gebäudes einwirken können. Da Gebäude relativ starre Gebilde sind, geben sie diesen Kräften nicht genügend nach, wodurch sehr oft gerade in horizontaler Richtung die grösseren Beanspruchungen auftreten. Dagegen sind aber die meisten Gebäude viel weniger gerüstet als gegen senkrechte Beanspruchung. Speziell bei älteren Gebäuden können oft Schäden beobachtet werden, die je nach der Richtung, in der sie beansprucht werden, ganz typisch sind.

Im Folgenden sollen nun ein paar der prinzipiellen Faktoren besprochen werden, die einen wesentlichen Einfluss auf den Schadensverlauf bei einem Erdbeben haben (5). Der Konstruktionstyp, und dabei hauptsächlich der Grundriss, ist der erste wichtige Faktor. Jedes Gebäude mit einem nichtsymmetrischen Grund- und Aufriss ist von vorneherein stärker gefährdet. Ein hohes Gebäude, das mit einem niedrigeren zusammengebaut ist, aber auch Säulen, Wände und Liftschächte, die nicht symmetrisch zum Grundriss angebracht sind, können zum Beispiel das Schadenspotential vergrössern. Solche Gebäude schwingen oder reagieren in sehr komplizierter Weise, was nicht, oder zumindest nicht exakt, im voraus berechnet werden kann. Des weiteren ist die Qualität des Baumaterials und der Bauausführung von grossem Einfluss. Gerade in dieser Hinsicht ist eine Überprüfung oft schwierig. Ein Gebäude ist generell immer so sicher wie das schwächste tragende Element! Die Erfahrungen bei den grossen Beben der vergangenen Jahre im Mittelmeerraum und in Südamerika haben gezeigt, dass ein Grossteil aller Schäden gerade auf die Vernachlässigung dieser bautechnischen Grundregeln bzw. auf das Fehlen einer wirksamen Kontrolle zurückzuführen ist. Die moderne Bautechnik verfügt sehr wohl über eine ganze Reihe von wirksamen Massnahmen, um mit vernünftigem Aufwand Schäden an Gebäuden zu verringern oder zumindest deren totalen Einsturz zu verhindern. Eine völlig erdbebensichere Bauweise wäre allerdings unerschwinglich teuer.

Unter dem Schadensmass bei einem Erdbeben versteht man allgemein die Anzahl beschädigter Gebäude in einem bestimmten Gebiet, ausgedrückt zum Beispiel in Prozent. Das Schadensmass kann sehr unterschiedlich ausfallen, je nach Intensität des Bebens und je nach Schadensanfälligkeit des Bautyps. Teilt man die Bauten in verschiedene Standardtypen ein, wie in Abb. 6, dann zeigt das Schadensmass einen jeweils charakteristischen Verlauf. In dieser Darstellung werden die Intensitätsstufen VII bis X berücksichtigt, da nur für sie zuverlässige Schadenserhebungen vorliegen. Bemerkenswert ist nun weniger der zu erwartende Unterschied im Schadensmass zwischen den einzelnen Bautypen, als vielmehr der sehr positive Einfluss von erdbebengerechter Bauweise, das heisst der gezielten Herabsetzung der Schadensanfälligkeit. Eine erdbebengerechte Bauweise kann vielfach schon durch die Einhaltung traditioneller Bauregeln erreicht werden, bei komplizierten oder funktionell wichtigen Bauten aber sind immer besondere Berechnungen erforderlich. In praktisch allen Fällen, die normale Bauten betreffen, geben die neuen Bestimmungen im Rahmen der Schweizerischen Baunormen (SIA 160) über die erforderlichen Massnahmen Auskunft (5).

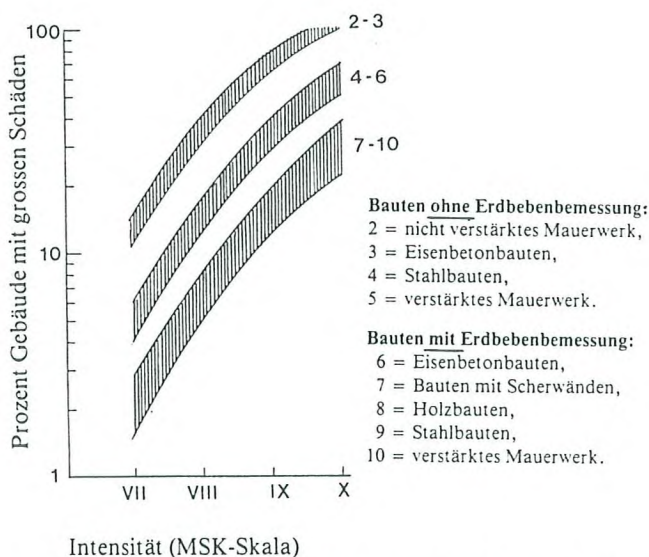


Abb. 6. Das Schadensmass. Prozentualer Anteil von Gebäuden mit schweren Schäden bei verschiedenen Erdbebenintensitäten. Dargestellt ist der Einfluss von unterschiedlicher Bauweise und erdbebengerechter Konstruktion.

4.5 Das Erdbebenrisiko bei Spezialbauten

Die Beachtung von Baunormen unter Berücksichtigung der etwas vereinfachten Erdbebenzonen, wie sie in Abb. 5 dargestellt sind, genügt in den meisten Fällen, um den gewünschten Minimalschutz gegen Erdbebeneinwirkungen zu erhalten.

Es gibt allerdings Bauten, die hier vom Gesetzgeber ausdrücklich ausgenommen sind. Für diese sind immer spezielle und weit aufwendigere Abklärungen und Massnahmen gegen Erdbebeneinwirkungen erforderlich. Zu solchen Bauten zählen Kernkraftwerke und grosse Stauanlagen. In beiden Fällen sind die akzeptierbaren und vom Gesetzgeber zugelassenen Risiken weit tiefer als für normale Bauten. Für Kernkraftwerke muss zum Beispiel nachgewiesen werden, dass sie ohne wesentlichen Schaden einer Erdbebenerschütterung standhalten, die am Standort im statistischen Mittel nur einmal in einem Zeitraum von 10 000 Jahren (oder anders ausgedrückt: mit einem Prozent Wahrscheinlichkeit in 100 Jahren) zu erwarten ist. Man spricht hier vom sogenannten «Sicherheitsbeben»⁵, bei dem das Werk immer noch «dicht» bleiben muss und ausserdem problemlos abgeschaltet werden kann. In der Nordschweiz ergeben sich, je nach Standort der Anlage, berechnete Erdbebenintensitäten zwischen VII und IX bzw. Bodenbeschleunigungen zwischen 15 und 30 Prozent der Erdbeschleunigung. Sowohl die notwendigen dynamischen Berechnungen⁶ als auch die baulichen Massnahmen sind sehr kostspielig und führen daher häufig zu harten Auseinandersetzungen zwischen den Bewilligungsbehörden und den Betreibern von Anlagen.

Die Mehrzahl der grossen Stauanlagen in der Schweiz liegt im Alpengebiet und damit – im Gegensatz zu den Kernanlagen – in den Zonen mit relativ hoher Erdbebengefährdung. Der Einfluss von Erdbeben auf die Talsperren und deren Umgebung wurde zum Zeitpunkt der Erbauung nach dem jeweiligen Stand der Technik berücksichtigt, meist indem man eine zusätzliche sog. statische Erdbebenersatzlast⁷ miteinbezog, die etwa 10 bis 15 Prozent des Eigengewichts der Mauer ausmacht. Heute stehen leistungsfähige Rechenanlagen und sehr aufwendige Computerprogramme für die dynamische Berechnung einer Staumauer oder eines Staudammes zur Verfügung.

Weitere Spezialanlagen sind Bohrtürme, Pipelines und chemische Anlagen, die bei Zerstörung oder Bruch zu grossen Umweltschäden führen können. So wurde in diesem Zusammenhang in den vergangenen Jahren zum Beispiel das seismische Risiko in der Nordsee sehr genau untersucht. In jedem Fall sind spezielle Massnahmen erforderlich, um das Risiko auf ein akzeptables Mass zu verringern. Was allerdings akzeptabel ist, muss von Fall zu Fall entschieden werden und ist gelegentlich Gegenstand von Kontroversen.

Bei Deponien für toxischen und nuklearen Abfall ist es vor allen Dingen wichtig, langsame Verschiebungen in der Erdkruste, die über grosse Zeiträume (mehr als 100 000 Jahre) hinweg auftreten können, einigermassen zuverlässig abzuschätzen. Aussagen über die geologische Sicherheit solcher Deponien können erst nach langjährigen und aufwendigen Forschungen gemacht werden. In der Schweiz ist schon vor einigen Jahren eine ganze Reihe von neuen Untersu-

5 Vom Gesetzgeber festgelegt.

6 Berechnung des Schwingungsverhaltens einer Konstruktion bei wellenförmiger Anregung.

7 Berechnung der Verformung einer Konstruktion bei Annahme einer konstanten Last.

chungen und Verfahren zur Abklärung des langzeitlichen Risikos eingeleitet worden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass nur durch ständige Überwachung der seismischen Aktivität und geeignete bauliche Massnahmen das Erdbebenrisiko für Grossbauwerke quantitativ erfasst und verringert werden kann. In der Schweiz sind auf diesen Gebieten schon beträchtliche Fortschritte erzielt worden, aber viel Forschungsarbeit ist immer noch erforderlich, um zuverlässigere Aussagen über Gefahren und Risiken durch Erdbeben machen zu können.

Literatur

- (1) VISCHER, D. 1995. Naturgefahren – Schutzkonzepte. – Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 2, 59–62.
- (2) MAYER-ROSA, D. 1986. Erdbeben – Entstehung, Risiko und Hilfe. – Nat. Schweiz. UNESCO-Kommission & Schweiz. Geophysikal. Kommission, Zürich, 24 pp.
- (3) MÜLLER, ST. & MAYER-ROSA, D. 1995. Erdbeben in der Schweiz. In: «Festschrift Prof. Dr. Hugo Bachmann zum 60. Geburtstag». – Publ. SP-004 (Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich), pp. 83–88.
- (4) RÜTTENER, E. 1995. Earthquake Hazard Evaluation for Switzerland. – Matériaux pour la Géologie de la Suisse (Sér. Géophysique) 29, Zürich, 106 pp.
- (5) BACHMANN, H. et al., 1989. Die Erdbebenbestimmungen der Norm SIA 160. – Dokumentation SIA-D044, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), Zürich.