Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 94 (1976)

Heft: 38: GEP Generalversammlung in Genf, 23. bis 26. September

Artikel: Das Erdbeben im Friaul vom 6. Mai 1976 - Beanspruchung und Beschädigung von Bauwerken

Autor: Glauser, E. / Gugerli, H. / Heimgartner, E. / [s.n.] / [s.n.]

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-73166

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

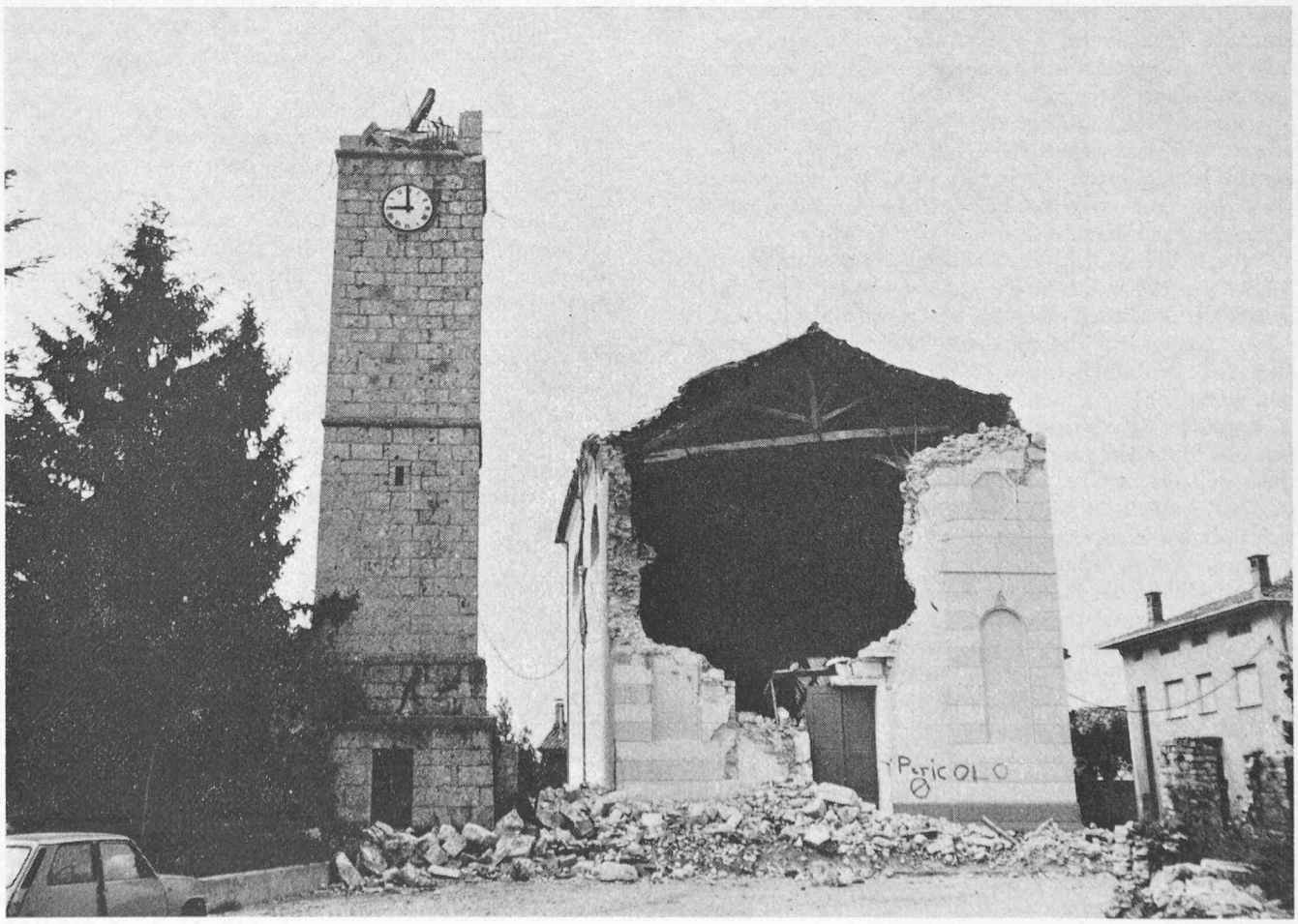
Das Erdbeben im Friaul vom 6. Mai 1976 — Beanspruchung und Beschädigung von Bauwerken

Von **E. Glauser, H. Gugerli, E. Heimgartner, B. Rast** und **R. Sägesser**, Zürich

DK 550.346

Am Abend des 6. Mai 1976 sind viele Teile Europas durch ein starkes Erdbeben erschüttert worden, das von der nordostitalienischen Region Friaul ausging. Die Richter-Magnitude (M) wurde von den Seismologen mit 6,2 bestimmt. Die Schäden im Friaul, die sich über eine Fläche von etwa 4500 km² verteilten, waren verheerend. Ungefähr 1000 Tote, 1000 Schwerverletzte, 100000 Obdachlose, 20000 zerstörte oder schwerbeschädigte Wohnungen und 6000 betroffene Industrie- und Gewerbebetriebe bildeten die erschütternde Bilanz des etwa 40 Sekunden dauernden Hauptbebens. In der Woche vom 31. Mai bis zum 4. Juni 1976 weilte eine kleine Gruppe von Schweizer Ingenieuren im Erdbebengebiet, um in erster Linie die Schäden an modernen Wohn- und Industriebauten zu untersuchen. Da das Friaul in jüngster Zeit eine sehr starke bauliche Entwicklung durchgemacht hat, konnten von einer solchen Schadenaufnahme zahlreiche wertvolle Erkenntnisse erwartet werden. Die während des Aufenthaltes im Erdbebengebiet zusammengetragenen Informationen und Photoaufnahmen sind in einem umfangreichen Bericht verwertet worden, der an die direkt interessierten Stellen abgegeben wurde. Im vorliegenden Beitrag, der einen geringen Teil des vorhandenen Anschauungsmaterials enthält, haben sich die Verfasser bemüht, die Natur des Bebens und die wichtigsten Erkenntnisse aus den Schadenaufnahmen ausführlich darzustellen. Der Artikel beginnt mit einer knappen Beschreibung des Erdbebengebietes, seiner Bauformen und Erdbebenvorschriften. Anschliessend wird eine ausführliche geophysikalische, seismologische und physikalische Beschreibung des Bebens die Ursache der beobachteten Gebäudeschäden darlegen. Die eigentliche Darstellung der Schäden besteht aus einer Übersicht, einer Beschreibung typischer Bauwerkschäden und einer nach Bauelementen und Konstruktionsformen gegliederten Formulierung der wichtigsten Erkenntnisse. Wenn von den zahlreichen Lehren aus den Schadenbeobachtungen eine Erkenntnis besonders hervorgehoben werden soll, dann vielleicht die folgende: «Allein schon die Vorstellung, dass Bauwerke die bei einem Erdbeben auftretenden Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aufnehmen müssen, führt auch ohne eigentliche Erdbebenbemessung zu Konsequenzen in der Gebäudekonzeption, mit denen sich bereits eine beachtliche Anzahl von Schäden verhindern lässt.»

Kirche Farla di Maiano. Die Turmuhr zeigt die Zeit des Erdbebens an. Kirchturmspitze und Glockenstuhl sind infolge des Bebens eingestürzt



Bedeutung der Aufnahme von Erdbebenschäden

Eine Wissenschaft entwickelt sich nur dann weiter, wenn sich ihre Vorstellungen und Gedankenmodelle fortwährend am Forschungsobjekt selbst überprüfen lassen. Im Labor ist dieses Vorgehen verhältnismässig leicht, es gestaltet sich jedoch wesentlich aufwendiger, wenn das Forschungsobjekt in der Natur beobachtet werden muss. Noch schwieriger wird es, wenn das zu untersuchende Naturphänomen selten und zudem örtlich wie auch zeitlich unberechenbar auftritt.

Die an der zweiten zwischenstaatlichen UNESCO-Konferenz in Paris [1] versammelten Erdbebenfachleute vertraten einmütig die Überzeugung, es müssten für ein besseres theoretisches Verständnis der Bebenwirkungen noch vermehrt Grundlagen beschafft werden. Diese bestehen aus *eingehenden Beobachtungen der Auswirkungen des Naturphänomens* und können durch nichts Gleichwertiges ersetzt werden. Allein auf der Basis einer Fülle zuverlässiger Daten sei es möglich, *theoretische Methoden* zu entwickeln, mit denen sich die unermesslichen Verluste zukünftiger Erdbeben wirksam vermindern liessen.

Diese umfangreiche und zeitraubende Feldarbeit versuchten die Bauingenieure zu vermeiden, indem sie Bauwerke *künstlich* erzeugten Erschütterungen aussetzten oder *Modelle* von Bauwerken auf *Schütteltischen* simulierten Starkbeben unterwarfen. Der Wert darartiger Modellversuche ist stark umstritten. Die Interpretation der Messungen scheitert im wesentlichen daran, dass weder für die Fortpflanzung der Bebenerschütterungen im Boden noch für das Bauwerk und sein Zusammenwirken mit dem Baugrund umfassende Modellgesetze formuliert werden können.

Die von einem Erdbeben ausgelösten Energien sind beträchtlich. Die vom Erdbeben im Friaul freigesetzte Energie lässt sich nach einer *empirischen* Beziehung von *Gutenberg und Richter* mit etwa 30 Millionen kWh angeben. Um die vom Erdbeben in wenigen Sekunden verbreitete Energie zu erzeugen, braucht das Kernkraftwerk Mühleberg etwa vier Tage. Eine andere Abschätzung zeigt, dass die unterirdische Explosion einer Atombombe mit einer Sprengkraft von einer Megatonne TNT eine ähnliche Wirkung wie das Hauptbeben vom 6. Mai verursacht hätte. Diese Überlegungen begründen die unüberwindbaren Schwierigkeiten, das Verhalten eines wirklichen Bauwerkes bei einem Erdbeben auf experimentellem Weg zu ermitteln.

Auch die Möglichkeit, schlüssige Erkenntnisse durch Modellversuche zu erarbeiten, ist nicht weniger schwierig. Das *dynamische* Verhalten eines Bauwerkes wird massgebend von seinen zahlreichen Bestandteilen beeinflusst, die in einer statischen Berechnung nicht für das Tragverhalten, sondern nur global als Belastung berücksichtigt werden. Fassaden, Trennwände, Rohrleitungen, Maschinen und Möblierung können das Verhalten ganz wesentlich beeinflussen, wobei nicht ohne weiteres klar ist, ob sich dieser Einfluss günstig oder ungünstig auf die Beanspruchungen auswirkt. Dasselbe lässt sich über das Zusammenwirken von Gebäude und Baugrund aussagen. Auf der anderen Seite ist bekannt, wie die gegenseitige Reibung der Bauelemente und die elastisch-plastische Verformung der Baumaterialien die Beanspruchungen drastisch zu vermindern vermögen. Es dürfte jedoch schwierig, wenn nicht unmöglich sein, solche Gegebenheiten wirklichkeitsgetreu in einem Modellversuch einzubauen.

Ausgangslage

Am 6. Mai 1976, abends um 9 Uhr, verspürten viele Bewohner in der Schweiz ein längerdauerndes Zittern ihrer Umgebung, das sich je nach Ort als Geschirrklappern, Aufschaukeln von Wasseroberflächen, Wackeln von Stühlen und Pendeln von Lampen bemerkbar machte. In den Hochhäusern wurden die Bewegungen teilweise so stark verspürt, dass die Bewohner erschreckt ins Freie flüchteten.

Erdbebenkatastrophe in der nordostitalienischen Region Friaul

Aus den Massenmedien war am nächsten Morgen zu vernehmen, dass der Ursprung des über weite Bereiche Europas verspürten Erdstosses in der nordostitalienischen Region Friaul lag und die Gegend nördlich der Stadt *Udine* von einem starken Erdbeben heimgesucht worden war. Trotzdem die Nachrichten über das Ausmass der Schäden wegen des Unterbruchs der Strassen- und Fernmeldeverbindungen nur spärlich flossen, liess sich aus der grossen Anzahl der Opfer doch erkennen, dass eine Naturkatastrophe grösseren Ausmasses am *südlichen Alpenfuss,* also in einem der Schweiz benachbarten Gebiet, stattgefunden hatte.

Untersuchungen im Erdbebengebiet

Es war zu erwarten, dass das Erdbebengebiet, das in *jüngster Zeit eine starke bauliche Entwicklung* erfahren hatte, eine *Fülle von Anschauungsmaterial* bot *für den Ingenieur,* der sich in seiner Tätigkeit laufend mit der Erdbebensicherheit von Bauwerken befasst. Die ungewohnte Aussicht, einen Einblick in das *Grenztragverhalten* verschiedenartigster Bauwerke zu gewinnen, die alle durch das gleiche Ereignis beschädigt oder zerstört worden waren, liessen eine Besichtigung an Ort und Stelle lohnend erscheinen. Mit dem Aufenthalt im Erdbebengebiet wurden folgende Ziele verfolgt:

- Beurteilung der Erdbebencharakteristiken sowie der räumlichen und materiellen Auswirkungen an der Erdoberfläche
- Untersuchung typischer Beschädigungen und Zerstörungen an Bauwerken, insbesondere des Grenztragverhaltens.

Dagegen konnte es sich nicht darum handeln, eine umfassende Schadenaufnahme durchzuführen, da dies weder den Interessen noch den vorhandenen Möglichkeiten entsprochen hätte. Das Hauptgewicht lag deshalb bei der Untersuchung der wesentlichsten und typischen Schadenfälle, obwohl dadurch die Beschreibung des Schadenausmasses unvollständig bleibt.

Der Aufenthalt im Erdbebengebiet dauerte vom Montag, dem 31. Mai 1976 bis Freitag, dem 4. Juni 1976. Der zeitliche Abstand von vier Wochen zum Hauptbeben wurde noch als annehmbar erachtet. Wohl waren die Aufräume- und Reparaturarbeiten über weite Gebiete bereits voll im Gange, dafür konnte man sich überall ohne grosse Behinderungen frei bewegen und sich auch bereits über die Art der Wiederherstellungsarbeiten informieren.

Während des Aufenthaltes im Erdbebengebiet wurde eine Fülle von Informationen und Dokumentationsmaterial zusammengetragen, unter anderem Gesprächsnotizen, Skizzen, mehrere hundert Photoaufnahmen und Zeitungsauszüge, die zusammen mit den persönlichen Eindrücken der Teilnehmer zu einem reich dokumentierten, umfangreichen Bericht verarbeitet wurden, der an die direktinteressierten Stellen abgegeben wurde. An den Untersuchungen im Erdbebengebiet nahmen aus dem Ingenieurbüro Basler & Hofmann *E. Glauser, E. Heimgartner, A. Branger, H. Gugerli* und *B. Rast* teil. Die Gruppe wurde unterstützt von *R.J. Hopkirk,* Elektro-Watt Ingenieurunternehmung AG und *H. Stauber* von der Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG.

Übersicht über das Friaul

Region

Lage und Gliederung

Das Friaul liegt im nordöstlichen Teil Italiens. Es reicht vom Adriatischen Meer bis zu den Alpen. Im Norden und im Osten wird es vom österreichischen Bundesland Kärnten und dem jugoslawischen Soča-Tal begrenzt. Neben *Triest* bildet das

Friaul den wichtigsten Teil der seit 1963 *autonomen Region Friaul–Julisch Venetien* und umfasst im wesentlichen die *Provinzen Udine und Pordenone*. Die Landschaft — die Stromgebiete des *Tagliamento* und des unteren *Isonzo* — gliedert sich in die südliche, an das Adriatische Meer stossende Schwemmlandebene mit rund 40 Prozent der Fläche, die Hügelzone mit rund 20 Prozent Bodenfläche und den nördlichen, gebirgigen Teil mit alpinem Charakter.

Geologie

Der nördliche, zum Südfuss der Alpen zählende Teil des Friauls besteht geologisch gesehen vorwiegend aus Folgen von *Kalk- und Dolomitgestein,* die teilweise stark aufgefaltet sind. Südöstlich des Epizentralgebietes des Erdbebens vom 6. Mai 1976 liegt ein Gebiet mit *Mergel- und tonhaltigem Gestein.* Die Hügelzone im mittleren Friaul wird hauptsächlich durch *Moränen* gebildet, während das Tiefland und weitere Gebiete entlang des Tagliamento durch die Alpenflüsse aufgeschüttet wurden, also *quartären* Ursprungs sind.

Bevölkerung

Ungefähr die Hälfte der rund 800000 Einwohner gehört heute noch zum *Volksstamm der Rätoromanen* und spricht Furlan, eine Sprache, die ihren Charakter wegen der ausgeprägten geographischen und politischen Isolation vom späten Mittelalter bis in unsere Zeit bewahren konnte. Da das Friaul immer wieder als Stiefkind behandelt wurde, bestehen von alters her Bestrebungen zur politischen Unabhängigkeit. Die geographische und sprachliche *Randlage* in Italien wirkte sich auch zum Nachteil der wirtschaftlichen Entwicklung aus. Seit der Jahrhundertwende besteht daher ein intensiver Auswanderungsstrom ins übrige Europa wie auch nach Übersee. Viele Friulaner suchten namentlich auch in der Schweiz Arbeit. Dazu kommt noch eine starke Entvölkerung der Berggebiete in Richtung der grösseren Industriezentren der Region und des übrigen Oberitalien.

Wirtschaft

Nur rund vier Fünftel des Gebietes sind für die Land- und Forstwirtschaft nutzbar, während die unproduktiven Gebiete mit 20 Prozent einen bedeutenden Anteil darstellen. Noch arbeitet ein überdurchschnittlicher Teil der Bevölkerung in der *Landwirtschaft.* Die Viehzucht erzeugt ungefähr die Hälfte der landwirtschaftlichen Produkte. Ein bedeutender Teil des bebaubaren Landes liegt in der Bergzone, wo sich nur kleine Erträge erwirtschaften lassen. Grosse Bewässerungs- und Entwässerungsanlagen, welche die Nähe des Tagliamento ausnützen, ermöglichen heute eine ertragreichere Bebauung eines Teiles der südlichen Tiefebene, die früher grösstenteils aus Sumpfgebieten bestand.

Neben dem stark verbreiteten *Kleingewerbe* bestanden nur wenige *Industriebetriebe,* bis in den fünfziger Jahren die industrielle Entwicklung einsetzte, die in den letzten Jahren der Region ein *kleines Wirtschaftswunder* brachte. Besonders stark vertreten ist die aufstrebende *Möbelindustrie,* die bereits nationale Bedeutung erlangt hat und gegenwärtig etwa 80% des italienischen Bedarfs deckt. Da der Region die Bodenschätze fehlen, siedelte sich keine Schwerindustrie an mit Ausnahme der kleineren *Stahlwerke* in den *Industriezonen von Osoppo und Udine,* wo einige *metallverarbeitende Betriebe* entstanden. Der wirtschaftliche Aufschwung wird augenfällig an der Vielzahl neuer Industrie- und Gewerbebauten, die überall förmlich aus dem Boden schossen. Davon profitierte natürlich auch das lokale Baugewerbe.

Infrastruktur

Die Tiefebene ist mit einem weitverzweigten Strassennetz gut erschlossen. Die Berggebiete weisen ausser den Talstrassen viele Übergänge auf, welche die einzelnen Seitentäler des Tagliamento gut untereinander verbinden. Als Verbindung zwischen *Wien* und dem *oberitalienischen Raum* spielt auch die Nord-Süd-Achse eine bedeutende Rolle. Die *Tauern-Autobahn Udine–Gemona–Tarvisio–Klagenfurt* befindet sich im Bau und ist im südlichen Abschnitt bald vollendet. Das Eisenbahnnetz stellt neben den lokalen ebenfalls die wichtige, internationale Verbindung zwischen Italien und Österreich her.

Auf einem hohen Stand steht die *Nutzung der Wasserkräfte* in Speicherkraftwerken. Die *Kavernenzentrale Somplago* ist mit 180 MW installierter Leistung eines der modernen Kraftwerke der Region. Die seltenen Flusskraftwerke in der Ebene des Tagliamento weisen infolge ihrer geringen Leistung nur lokale Bedeutung auf.

Bauwerke und Bauweise

Hochbauten

In der *traditionellen* Bauweise des Friauls herrschen *Natursteine und Holz* als Baumaterialien vor. Die Mauern der älteren Wohnhäuser wurden aus Bollensteinen mit Kalkmörtel erstellt, während Dächer und Decken aus Holzbalken bestehen. Die Hauptfassaden von Kirchen und Profanbauten oder auch Kirchtürme dagegen wurden vielfach mit *behauenen Quadersteinen* errichtet. Die an älteren Gebäuden anzutreffenden Bauteile aus *Bausteinen* und *Beton* stammen von nachträglichen Erweiterungen oder Renovationen. Die vielen, neu erstellten Wohn- und Geschäftshäuser der Region weisen fast ausschliesslich ein *Stahlbetonskelett als Tragstruktur* auf. Die Ausfachungen der Stahlbetonskelette bestehen aus Backsteinwänden, wo nicht infolge gewerblicher Nutzung im Erdgeschoss ganz oder teilweise darauf verzichtet wurde. Sowohl die Wohngeschossdecken wie vielfach auch die geneigten Dachplatten sind als *Hourdisdecken* ausgeführt. Als reine Mauerwerkbauten mit Tragwänden aus Backsteinen oder Betonhohlsteinen werden höchstens niedrige Wohnhäuser erstellt. Bei den modernen Industriehallen fand hauptsächlich die *Vorfabrikation mit Stahlbetonelementen* Verwendung, und zwar nicht nur für Tragelemente, sondern auch für Fassadenplatten. Die Elemente der Tragstruktur sind lediglich aufeinandergestellt und übertragen Horizontalbelastungen nur über Reibung.

Brücken

Die älteren Strassenbrücken sind ausschliesslich *Natursteinbogenbrücken* kleiner Spannweiten. Die neueren Konstruktionen, insbesondere im Bereich der Autobahn, bestehen vorwiegend aus *vorgespanntem Beton.* Dabei wurden im Zusammenhang mit der Vorfabrikation statisch bestimmte Tragsysteme (einfache Balken, Gerberträger) bevorzugt. Bei Autobahnüberführung sind jedoch auch über mehrere Felder durchlaufende *Balken- und Plattenbrücken* aus Ortbeton anzutreffen.

Vorschriften für die Bemessung gegen Erdbebenlasten

Die *italienische Staatsverwaltung* hat in ihrer Funktion als normengebende Instanz auch *spezielle Bauvorschriften für die erdbebengefährdeten Gebiete* erlassen und bereits mehrmals einem neuen Erkenntnisstand angepasst. In diesen Normen werden auch die Gebiete festgelegt, in denen die Bauwerke gegen Bebenwirkung zu bemessen sind. Diese Einteilung ist sehr feingliedrig und umfasst einzelne, namentlich aufgeführte Gemeinden und Gemeindegebiete.

Verfügungen

Seit dem 8. Mai 1975 sind folgende Vorschriften für Bauwerke in erdbebengefährdeten Gebieten in Kraft:

- Gesetz Nr. 64 vom 2.2.1974
- «Decreto ministriale» vom 3.3.1975 [2]

- Norme techniche per le costruzioni in zone sismiche [3]
- Reglement Nr. 3797.

Diese Bestimmungen enthalten sowohl Bemessungsvorschriften wie auch weitere Bauvorschriften und sind in wesentlichen Punkten untenstehend zusammengefasst. Zusätzlich zu den staatlichen Verfügungen wurden *Interpretationen zum Normentext* publiziert (z.B. [4]).

Zoneneinteilung

Um die seit der Jahrhundertwende (1893) bekannten Erdbebengebiete mit Bebenstärken grösser als Intensität VIII (MM) zu erfassen, wurden Zonen ausgeschieden, in denen die technischen Normen für die Bemessung von Bauwerken verbindlich sind. Der Katalog wird laufend überarbeitet, zurzeit sind rund 15–20 Prozent der Gesamtfläche Italiens einer Erdbebenzone zugeordnet. Sie umfassen, wie beispielsweise in der «Carta Sismica d'Italia» [5] dargestellt, im wesentlichen die *Gebiete östlich von Rom* und *Neapel, Kalabrien* und *Teile Siziliens*. In Norditalien sind nur verhältnismässig kleine Gebiete um *Belluno* und *Tolmezzo* in eine Erdbebenzone eingestuft.

Die Erdbebenzonen wurden entsprechend der Häufigkeit und der Stärke der Beben in *zwei Kategorien* unterteilt, die sich wie folgt charakterisieren lassen:

Kategorie 1: Gebiete grosser Erdbebenhäufigkeit und -stärke

Kategorie 2: Gebiete geringerer Erdbebenhäufigkeit und -stärke.

Die Grenze zwischen den Gebieten der Kategorie 1 und 2 liegt ungefähr bei den Intensitätsstufen IX bis X (MM) für die bisher aufgezeichneten Beben. Die Erdbebenzonen des Friauls gehören bisher alle der 2. Kategorie an und umfassten im wesentlichen Bereiche der Gemeinden *Tolmezzo, Trasaghis* und *Venzone* (Bild 1). Die grösseren Industriegebiete bei den Ortschaften *Rivoli di Osoppo* und *Buia* liegen weiter südlich. Daher sind die in den letzten Jahren dort entstandenen Neubauten nicht für Erdbebenbelastungen bemessen worden.

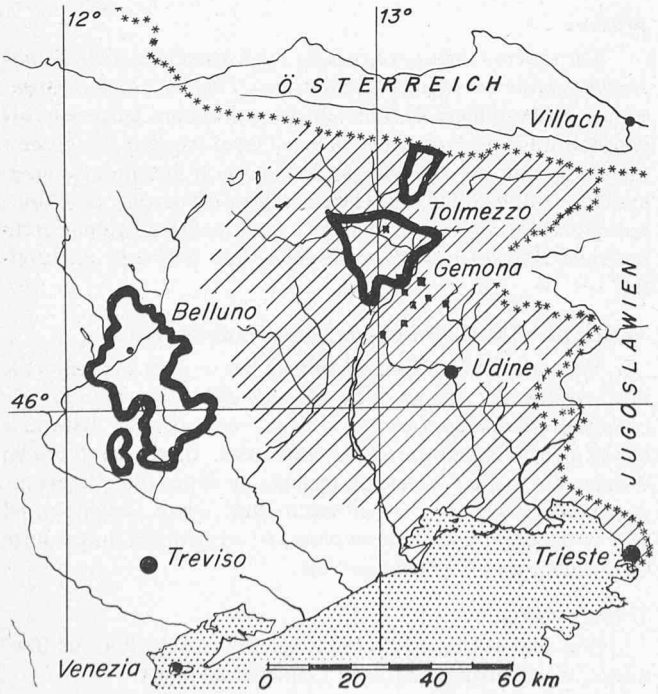


Bild 1. Erdbebenzonen im Friaul. Innerhalb der stark umrandeten Zonen sind die Bauwerke nach den Erdbebennormen [3] zu bemessen

Bemessungsgrundlagen

Die gegenwärtig gültigen *Bemessungsvorschriften vom Mai 1975* umfassen alle Konstruktionen, die für die Sicherheit der Bevölkerung wesentlich sind und in einem als seismische Zone erklärten Gebiet liegen. Der den Berechnungen gemäss [3] zugrunde zulegende sogenannte *Seismizitätsgrad* S wird in staatlichen Dekreten festgelegt. Für die bisher ausgeschiedenen Gebiete des Friauls gilt S = 9. Zur Ermittlung der horizontalen und vertikalen Beanspruchungen ist eine *quasi-statische* oder *dynamische Analyse* durchzuführen. Eine Überlagerung der festgelegten Erdbebenbelastung in den zwei Hauptrichtungen wird nicht gefordert.

Für die *quasi-statische Berechnung* der Bauwerke werden vorerst horizontale und vertikale Ersatzlasten ermittelt. Im folgenden wird kurz der Rechenvorgang bei der Bestimmung der horizontalen Ersatzlasten aufgezeigt. Die Vertikalbelastung wird auf ähnliche Art ermittelt.

Horizontale Ersatzkraft $F_h = C \cdot R \cdot W$

darin bedeuten: $C = \frac{S-2}{100}$ Koeffizient für die seismische Intensität

$S =$ Seismizitätsgrad (1. Kategorie $S = 12$; 2. Kategorie $S = 9$)

$R =$ Koeffizient für die Berücksichtigung des Gebäudeverhaltens, üblicherweise $R = 1$

$W =$ Eigengewicht

Das *unterschiedliche dynamische* Verhalten der Gebäude bei der Erdbebenerregung wird in Abhängigkeit der Eigenschwingzeit T_0 berücksichtigt. Für langsam schwingende Gebäude mit einer Eigenschwingzeit T_0 von mehr als 0,85 Sekunden darf der Faktor R abgemindert werden. Für die 2. Kategorie ergibt sich damit im Maximum eine horizontale statische Ersatzlast von 7 Prozent des Eigengewichtes. Falls die Erdbebenwirkung dynamisch analysiert wird, kann ein *linear-elastisches* Verhalten angenommen und eine *modale Analyse* durchgeführt werden. Das Verhaltensspektrum, aus dem die spektralen Beschleunigungswerte für die einzelnen Eigenschwingungen abgelesen werden, stimmt mit dem zur Ermittlung der statischen Ersatzlasten überein. Bei der modalen Methode sind mindestens die ersten drei Eigenschwingungen zu berücksichtigen und die zugehörigen Beschleunigungen oder Verschiebungen geometrisch zu addieren.

Die *Spannungsnachweise* werden mit den Beanspruchungen aus ständig wirkenden Lasten und Erdbeben, jedoch *ohne Wind*, durchgeführt. Dabei sind die in den Normen festgelegten, zulässigen Beanspruchungen für Ausnahmebelastungen einzuhalten. Die Verschiebungen η sind infolge Überschreitens der Elastizitätsgrenze grösser als nach der linear-elastischen Theorie ermittelt und sind mit

$$\eta = \eta \text{ ständig} \pm \Phi \cdot \eta \text{ Erdbeben}$$

anzusetzen. Bei statischen Analysen wird $\Phi = 6$, für dynamische Analysen $\Phi = 4$ gefordert.

Für die *Anordnung* der Gebäude sind noch weitere, teilweise sehr detaillierte Vorschriften zu berücksichtigen. Unter anderem wird die *maximale Höhe von Neubauten* von ihrer Bauart abhängig gemacht. So wird beispielsweise die Höhe der *Mauerwerkbauten* auf 11 m beschränkt, während für *Skelettbauten* keine Grenze besteht. Um Verschüttungen der Verkehrswege zu vermeiden, ist auch der *Mindestgebäudeabstand* vorgeschrieben. Für Bauten über zwei Stockwerke muss ein Abstand vom entfernten Strassenrand von mindestens 10 m eingehalten werden. Zwischen zusammengebauten, selbständi-

gen Gebäuden muss der Abstand mindestens ein Prozent der Gebäudehöhe betragen, um eine gegenseitige Beeinflussung zu vermeiden.

Vorschriften für die einzelnen Bauweisen

Für die vorherrschenden Bauweisen wurden sehr ausführliche Vorschriften erlassen, die sich sowohl auf die Ermittlung der massgebenden Beanspruchung wie auch auf die konstruktive Ausführung beziehen. Für *Mauerwerkbauten* wurden keine Berechnungsvorschriften erlassen, dafür jedoch eine ganze Reihe konstruktiver Richtlinien. Sie betreffen vor allem die Materialwahl sowie Beschränkungen für Mauerhöhen, freie Mauerlängen und Öffnungen. Für die in Italien weitverbreiteten *Stahlbetonskelettbauten* sind sehr ausführliche Berechnungsvorschriften enthalten. Für die Ermittlung der horizontalen statischen Ersatzlasten wird ausser den oben erwähnten wichtigsten Bestimmungsgrössen Seismizitätsgrad und Gebäudeverhalten, zusätzlich noch der *Einfluss der Fundationsverhältnisse,* die *Art der Gebäudekonstruktion* sowie die *Massenverteilung* berücksichtigt. Von den Flächennutzlasten ist je nach Verwendungszweck des Gebäudes ein verschieden grosser Anteil einzurechnen. *Exzentrizitäten* zwischen Massenschwerpunkt und Schubmittelpunkt sowie *Torsion* sind für die Beanspruchungen zu berücksichtigen. Bei Bauwerken mit rechteckigem Grundriss ist eine minimale Exzentrizität anzunehmen, die für lange Gebäude auf mindestens 5 Prozent der Bauwerklänge festgelegt ist.

In den Erdbebennormen werden aber nicht nur Vorschriften für die Bemessung von Neubauten festgelegt, sondern auch *Renovationen* und *Reparaturen* an Gebäuden aus Mauerwerk unterliegen besonderen Bedingungen, die sich vor allem auf Verstärkungen und Ersatz einzelner Bauteile durch armierten Beton beziehen.

Bemerkung

Die Abhängigkeit der tatsächlich *auftretenden Beschleunigungen* von der Steifigkeit und Dämpfung des Schwingungssystems wird in den Erdbebennormen nur rudimentär berücksichtigt. Zu deren Veranschaulichung sind in Bild 2 die bei einem typischen Erdbeben der Intensität IX (MM) auftretenden, absoluten Beschleunigungen und die nach den italienischen Erdbebenvorschriften für die Bemessung der Bauwerke zugrunde zulegenden horizontalen Beschleunigungswerte als Funktion der Tragwerksteifigkeit (Kreisfrequenz der Grundschwingung) eingetragen.

Daraus wird ersichtlich: Die Beschleunigungswerte der Normen und damit die Bemessungswerte sind bedeutend geringer als die eines tatsächlichen Erdbebens der angenommenen Stärke. Die Begründung zu dieser Abschwächung liegt

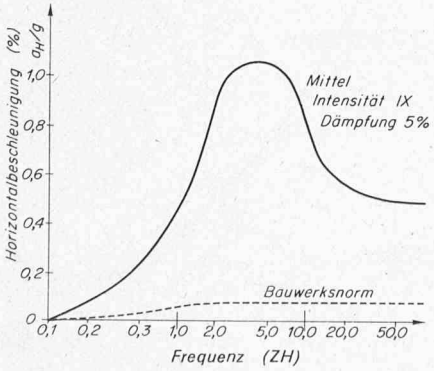


Bild 2. Verlauf der Horizontalbeschleunigung für Erdbeben der Intensität IX (MSK) nach [9]. Die gestrichelte Linie wiedergibt den in der konventionellen Erdbebennorm [2] zugrundegelegten Beschleunigungsverlauf

in der Voraussetzung für die Bemessungsverfahren der Erdbebenvorschriften, wo ein starke Energieabsorption durch unelastisches Verhalten der Baustoffe und Konstruktionselemente während eines starken Erdbebens angenommen wird. Sollten sich solche energieabsorbierende Mechanismen in genügender Zahl auch wirklich ausbilden, dann ist eine Verminderung der Bebenbelastungen sicher zulässig. Damit werden aber beim Bemessungserdbeben stillschweigend Beschädigungen des Gebäudes in Kauf genommen. Dass solche Beschädigungen aber nicht zum Einsturz eines Gebäudes führen können, kann jedoch nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden.

Das Erdbeben vom 6. Mai 1976

Noch heute stehen die Zeiger vieler Kirchturmuhren auf neun Uhr: Sie sind unter der Erschütterung am 6. Mai 1976 um 21 Uhr Lokalzeit stehengeblieben. Die genaue Zeit des Einsetzens des Hauptstosses wird mit 20.59.07 h Lokalzeit (19.59.07 h G.M.T.) angegeben. Das *Epizentrum* des Bebens, das sich bei *Gemona* befindet, wurde von verschiedenen europäischen Stationen genau mit Lat. 46,24° und Long. 13,28° berechnet. Die Stärke des Bebens wurde vom *Osservatorio Monte Porzio, Roma,* mit einer Magnitude $M = 6{,}2$ (Richter-Skala) angegeben, seine Epizentralintensität mit I_0 = IX bis X (MM).

Aufzeichnungen

Der am nächsten beim Epizentrum stationierte Beschleunigungsaufzeichner (Akzelerograph) der staatlichen italienischen Elektrizitätsgesellschaft ENEL befindet sich in *Tolmezzo* (Lat. 46,38°/Long. 12,98°). Die Station ist rund 15 km vom Epizentrum entfernt und liegt in einer Zone mit der Bebenintensität I = VII bis VIII (MSK). Das Gerät ist für sogenannte *Starkbebenregistrierungen* geeignet und bekannt unter der Typenbezeichnung Teledyne RFT-250. Beim Erreichen einer Auslösebeschleunigung von 0,01 g (g = Gravitationskonstante, 9,81 m/s²) beginnen die Beschleunigungsaufzeichnungen zweier Horizontal- und einer Vertikalkomponente auf einem Film. In Bild 3 ist die Phase des eigentlichen Starkausschlages, die rund 4,5 Sekunden dauerte, deutlich erkennbar. Die Gesamtdauer des Hauptstosses betrug insgesamt etwa 40 Sekunden.

Der *Schweizerische Erdbebendienst* hat die Stärke des Bebens mit $M = 6{,}5$ (Richter-Skala) berechnet. Das Beben wurde in unserem Land unter anderem durch die *Station Basel* aufgezeichnet. Der Beginn der Aufzeichnung (Vertikalkomponente) ist in Bild 4 wiedergegeben. Deutlich kommt hier bereits die zeitliche Verzerrung zum Ausdruck. Die unterschiedlichen Wellengeschwindigkeiten von Longitudinal-, Transversal- und Oberflächenwellen sowie die Durchmischung der verschiedenen direkten und reflektierten Wellen bewirken in der 400 km vom Herd entfernten Station bereits ein mehrminütiges Signal. Die Aufzeichnung gibt im wesentlichen den Vorgang wider. Beim Einsetzen der ersten stärkeren Amplitude des Hauptstosses konnte die Aufzeichnung bei diesem hochempfindlichen Seismographen nicht mehr ordnungsgemäss folgen. Das Gerät ist ein Geschwindigkeitsmesser und, im Gegensatz zum oben erwähnten Beschleunigungsmesser, bedeuten hier einzelne Maximalamplituden wegen ihrer Frequenzkoppelung keine für den Bauingenieur direkt verwertbaren Grössen mehr.

Makroseismische Auswertung

Klassiert man die beobachteten Schäden nach einer festgelegten Schadenskala und verbindet man auf der Karte die Orte gleicher Intensität, so entstehen einfache *Isoseistenkarten.* Eine Isoseistenlinie festzulegen kann allerdings örtlich schwierig

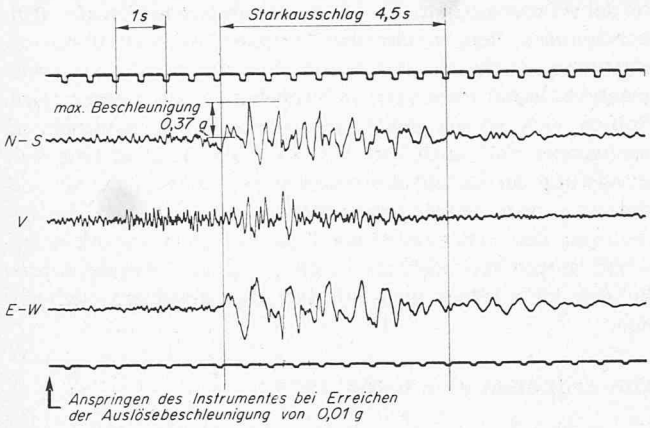


Bild 3. Oben: Starkbebenaufzeichnung mit Drei-Komponenten-Beschleunigungsschreiber Typ Teledyne RFT-250 (Station Tolmezzo). Technische Daten: Eigenfrequenz 22,5 Hz, kritische Dämpfung 50 %, Sensitivität auf Originalfilm 1 cm $\geq$ 1 sec $\geq$ 0,52 *g*

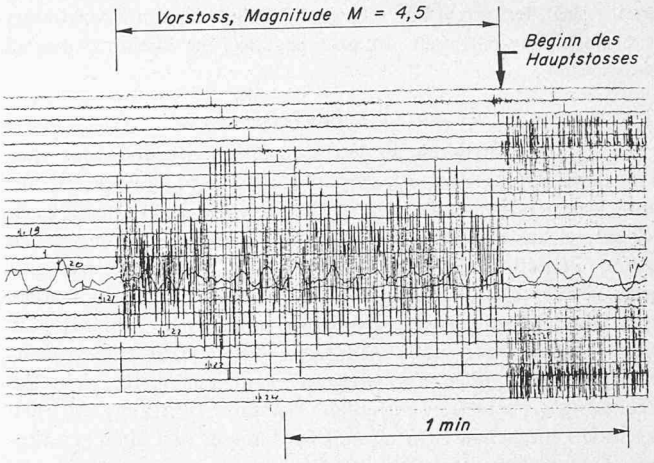


Bild 4. Rechts: Aufzeichnung des hochempfindlichen elektrodynamischen Seismographen der Station Basel

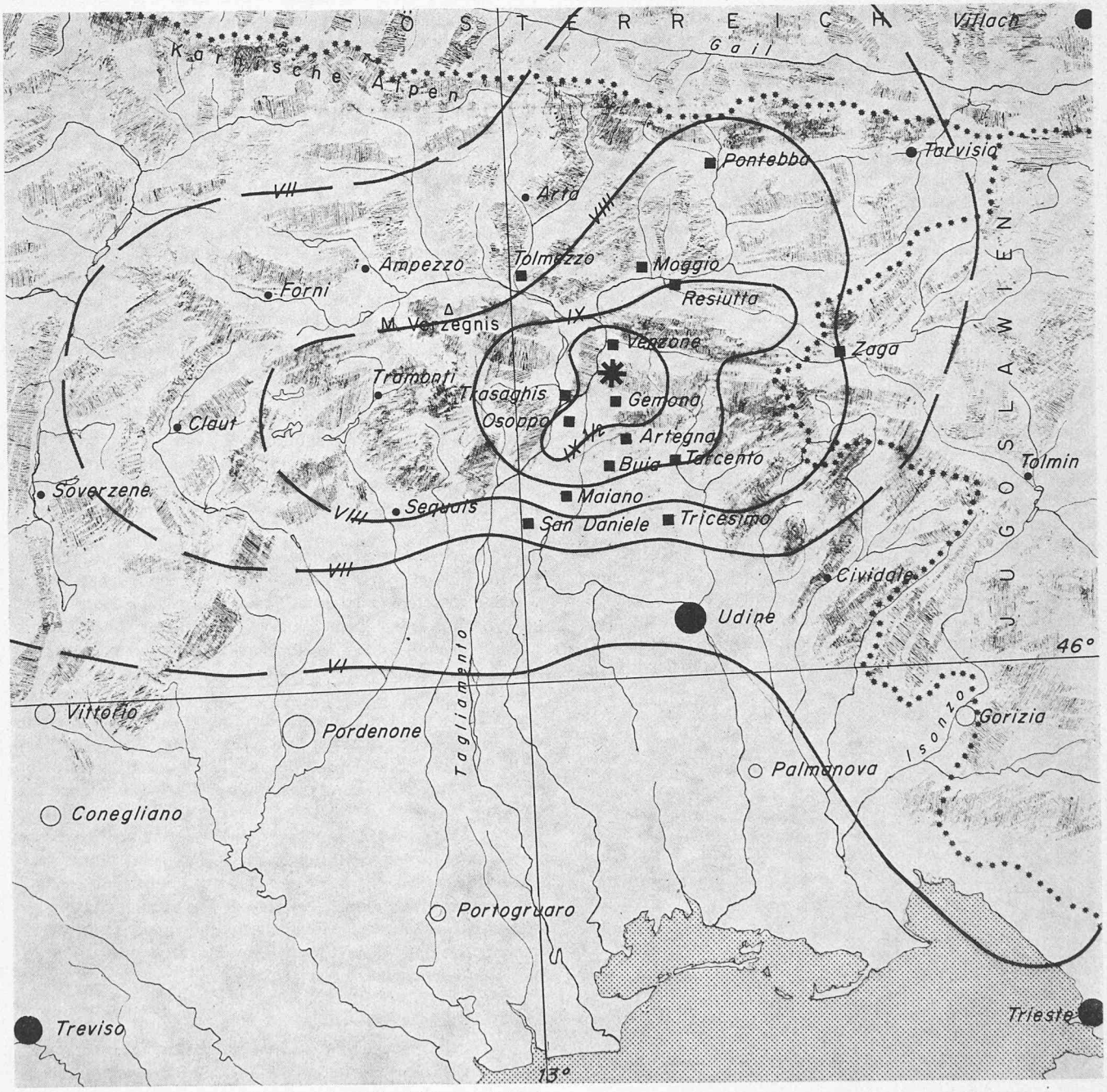


Bild 5. Isoseistenkarte des Gebietes stärkster Erschütterung, Intensitäten $I \geq$ VI (MSK-Skala). Stern-Signatur: Epizentrum

sein, wenn grosse Schwankungen im Schadenbild auftreten, sei dies infolge geologisch-tektonischer Wechsel oder völlig verschiedener Baukonstruktionen. Bei einer grossen Zahl von Einzelbeobachtungen, wie dies hier der Fall war, gestattet diese Art der Darstellung (Bild 5), auf einfache Weise wesentliches über die Charakteristik eines Bebens auszusagen.

Das *Zentrum grösster Zerstörung (Gemona–Venzone–Osoppo)* liegt damit rund 12 km vom rechnerisch ermittelten Epizentrum entfernt. Auffallend ist die rasche Abminderung der Intensitäten in Nord-Süd-Richtung, besonders nach Süden.

Die Auswirkungen des diesjährigen Bebens werden im Vergleich mit dem *Beben von Verzegnis* vom 27. März 1928 deutlich, dessen epizentrale Intensität I_0 = IX (MSK) betrug. Seine Ausbreitung war damals bedeutend beschränkter. So war der mittlere Isoseistenradius für I = VIII rund 3 km, für I = VII rund 4,5 km, für I = VI rund 12 km usw. Die Ausbreitung jenes Bebens reichte somit etwa fünf mal weniger weit als beim Beben vom 6. Mai 1976.

Trägt man die Meldungen verschiedener europäischer Erdbebenstationen auf einer Karte ein, so ergibt sich eine Darstellung wie in Bild 6 gezeichnet. Der mittlere Schütterradius, verstanden als Distanz zur Isoseiste mit einer Intensität III beträgt 600 bis 700 km. Praktisch ganz Zentraleuropa liegt damit innerhalb des Schüttergebietes.

Die so verwerteten makroseismischen Beobachtungen erlauben es, sogenannte *Abminderungsgesetze* zu ermitteln. Bild 7 zeigt die Abminderungskurve für mittlere Radien, errechnet nach der *Formel von Sponheuer* [6]. Darin eingezeichnet sind die aus den obigen Darstellungen herausgelesenen Intensitätsstufen. Zum Vergleich ist auch die Abminderungskurve des Bebens von 1928 eingezeichnet. Der Vergleich bestätigt die erwähnte geringe Ausbreitung jenes Bebens.

Für die Gefährdung von Bauwerken sind die Serien der *Nachstösse* von grosser Wichtigkeit. Nicht selten sind es die Nachstösse, die begonnene Beschädigungen zu einer Zerstörung bringen. Beim Beben vom 6. Mai 1976 erstreckte sich die Abfolge der Nachstösse *über mehr als zwei Monate* mit bemerkenswert konstanter Epizentrallage. Bis zum 18. August 1976 wurden in der *Schweiz* nach Angaben des *Schweizerischen Erdbebendienstes* insgesamt über 800 Nachstösse instrumentell registriert. Die Zahl der von der Bevölkerung im Friaul verspürten Nachstösse mit Intensitäten $I \geq$ IV beläuft sich bis zum 14. Juli 1976 auf etwa 150 (Bild 8).

Interpretation der Bebenstärken

In der Ingenieurpraxis bedeuten Bebenstärken lediglich einen Eingabeparameter bei der Verwendung von gewissen Normen oder bei dynamischen Analysen. Die dabei immer wieder auftretenden *Diskrepanzen bei der Umrechnung von Magnituden in Intensitäten oder gar Beschleunigungen* sind bekannt. Nachfolgend sollen einige wichtigere im Friaul festgestellte *Korrelationen* wiedergegeben werden, wozu kurz die Definitionen der verschiedenen Begriffe in Erinnerung gerufen seien.

Die *Magnitude M* wurde erstmals von *Richter* definiert als *Logarithmus der Maximalamplitude in Tausendstelmillimeter,* aufgezeichnet durch den damaligen Standard-Torsionsseismometer (Typ Wood-Anderson), in einer Epizentraldistanz von 100 km. Zugrunde gelegt wurde ferner eine Herdtiefe von 15 bis 20 km (Kalifornien). *Die Magnitude ist ein Mass für die ausgestrahlte, elastische Energie.* Bei Abweichung von Instrumententyp, Herdtiefe oder Distanz werden Korrekturformeln verwendet, woraus sich jeweils eine gewisse Streuung der Interpretation ergeben kann. Auch der örtlich vorherrschende Stationsuntergrund kann zu einer Überhöhung oder Abschwächung des Signals führen. Die Bestimmung der Magnitude erfolgt daher grundsätzlich durch *Mittelung von Messgrössen mehrerer Stationen* (Registriernetz).

Es soll an dieser Stelle festgehalten werden, dass *in der Schweiz kein einziges Starkbebengerät* (strong motion recorder) installiert ist, dessen Resultate der Öffentlichkeit zugänglich sind (und nur ein einziges in privatem Besitz).

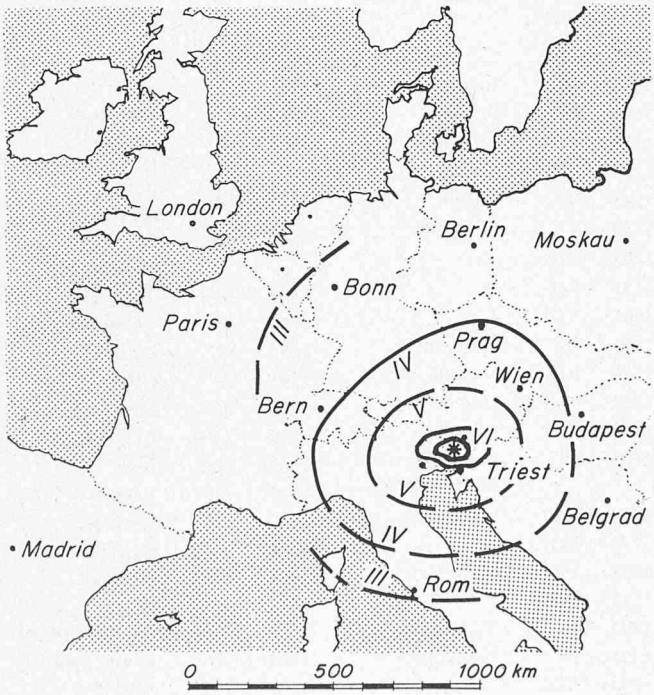


Bild 6. Schüttergebiet des Bebens im Friaul vom 6. Mai 1976

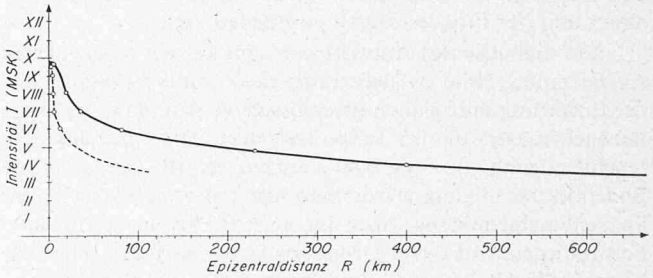


Bild 7. Abminderungskurve nach dem Gesetz von Sponheuer [6]

$$I_0 - I = 0{,}56 \sqrt{\frac{R^2 + H^2}{H}} + 1{,}3\,\alpha \left(\sqrt{R^2 + H^2} - H\right)$$

mit H: Herdtiefe = rd. 10 km, α: Abminderungskoeffizient = 0,001, R: Epizentraldistanz, variabel. Gestrichelte Kurve: Beben von Verzegnis (27. März 1928)

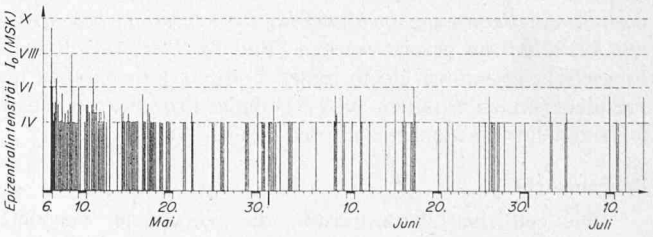


Bild 8. Nachstösse mit Intensitäten $I \geq$ IV (MSK) bis zum 14. Juli 1976 (rd. 150 Stösse)

Für die vor allem *ohne Instrumente feststellbaren Wirkungen* eines Erdbebens wird als Mass die *Intensität I* verwendet. Es sind verschiedene Skalen im Gebrauch (Tabelle 1). In der Schweiz war noch bis 1970 die *Rossi-Forel (RF)-Skala* gebräuchlich. International (vor allem in den USA) wurde die *Modified Mercalli* (MM)-Skala, neuerdings die *«Medwedew-Sponheuer-Karnik» (MSK)-Skala* (heute für Europa verbindlich) verwendet. Wegen der präzis umschriebenen Schadenstufen wird im Rahmen dieser Studie grundsätzlich die MSK-Skala bevorzugt.

Während also ein bestimmtes Erdbeben streng genommen nur *eine* Magnitude haben kann, sind je nach dem Standort des Beobachters beliebig viele Intensitäten, aber wiederum nur *eine* Epizentralintensität möglich. Die unterschiedlichen Definitionen erklären auch, dass es problematisch ist, beide Begriffe direkt miteinander in Verbindung zu bringen. In der Ingenieurpraxis können unvollständige instrumentelle Aufzeichnungen, die *Zuhilfenahme historischer Daten* oder die *unterschiedliche Handhabung der Normen verschiedener Länder* eine Korrelation notwendig machen.

Beim Beben vom 6. Mai 1976 hat sich die Magnitude-Intensitätsbeziehung nach Karnik [7], die für das angrenzende Slowenien ermittelt wurde, bestätigt:

$$M = 0{,}66\, I_0 + 1{,}7 \log H - 1{,}6$$

(genau für Herdtiefe H = 12 km)

Mit grösster Vorsicht sind die entsprechenden Beziehungen für die Umrechnung in Bodenbeschleunigungen zu handhaben.

Die in Bild 3 gezeigte Aufzeichnung mit I = VII bis VIII und einer maximalen Beschleunigung von 0,37 g genügt der *Formel von Trifunac* [8].

Die *Spitzenbodenbeschleunigung* hat für die Bemessung von Bauwerken nur einen beschränkten Wert. Ein Bauwerk dürfte durch ein Beben in den meisten Fällen nicht durch den Einzelstoss am Fundament, sondern durch die *Aufschaukelung* aus repetitiven Stossamplituden die zur Zerstörung führenden Beschleunigungen erfahren. Es sollte somit eher von einer repräsentativeren (sich wiederholenden) Amplitude als Bemessungsgrösse gesprochen werden. Zudem sind die Zeitdauer und der Frequenzinhalt von Bedeutung.

Ein digitalisiertes Antwortspektrum aus der vorhandenen Aufzeichnung (Bild 3) steht noch nicht zur Verfügung. Aus der Erfahrung darf jedoch geschlossen werden, dass bei dieser Bebencharakteristik im Epizentralgebiet eine Spitzenbodenbeschleunigung von etwa 0,40 g aufgetreten ist. Die wirksame Bodenbeschleunigung würde man hier mit etwa $^2/_3$ bis $^3/_4$ der Spitzenbeschleunigung, also mit $a_0 = 0{,}35\, g$ am kompakten Fels festlegen. Mit dieser Grundbeschleunigung als Eichgrösse können die gewünschten Antwortspektren normiert werden. Mangels eines direkt digitalisierten Spektrums soll hier ein der Situation angepasstes Bemessungsspektrum, wie es etwa für Kernkraftwerke Verwendung findet [9, 12] konstruiert werden.

Die Mehrzahl der Gebäude im Tal des Tagliamento und an den Seitenhängen ist auf quartären Ablagerungen fundiert. Um eine Vorstellung der modalen Beschleunigungen zu erhalten, die im Epizentralgebiet auf die Gebäude wirkten, soll deshalb ein *Bemessungsspektrum für Lockergestein bei mittleren Verhältnissen* gezeigt werden (Bild 9). Der Aufschaukelungseffekt gegenüber einem reinen Felsuntergrund macht im Frequenzbereich zwischen 30–6 Hz wenige Prozente aus, unter 6 Hz zunehmend mehr bis auf den 3fachen Wert.

Bebenursache

Die zeitliche Charakteristik, die berechnete Herdtiefe von 10 km, die richtungsabhängige Abminderung sowie die Faltenstruktur des Epizentralgebietes lassen eindeutig auf ein

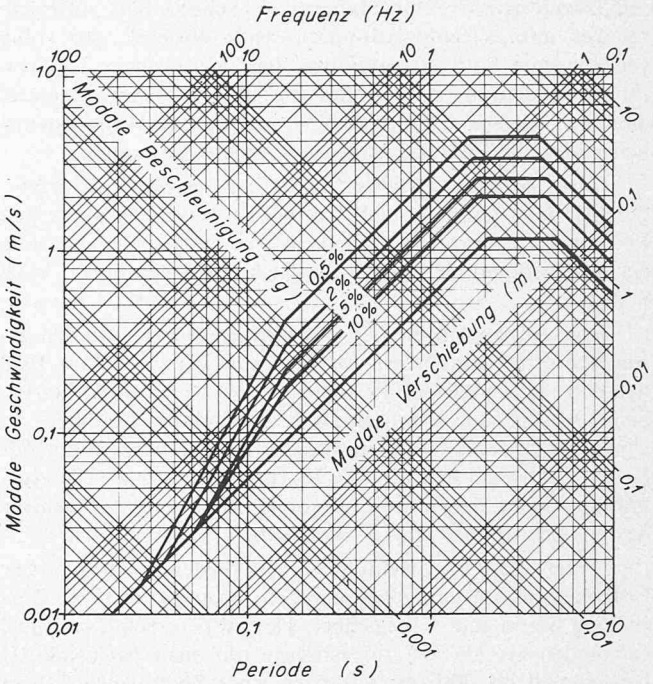


Bild 9. Repräsentatives Antwortspektrum im Epizentralgebiet für Lockergestein. Vertrauensintervall 75 %, modale Dämpfungen 2 %, 5 %, 10 %. Bemessungsspektrum nach *Wash 1255*

Tabelle 1. Vergleich von drei gebräuchlichen Intensitätsskalen

Skala		Grad der Intensität											
MSK	1964	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
MM	1931	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
RF	1883	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X			

Beben vom 6. Mai 1976 im Friaul

Tabelle 2. Zusammenstellung der Beben in der Region Friaul mit Intensität VII und stärker (Periode 1000–1975)

Jahr	Intensität (MSK)	Epizentralgebiet	Jahr	Intensität (MSK)	Epizentralgebiet
1000	IX	Villach	1839	VII	Arta
1170	IX	Villach	1841	VII	Tolmezzo
1278	VIII	Cividale	1853	VII	Amaro (E Tolmezzo)
1279	VIII	Cividale			
1348	X	Villach	1857	VII	Rosegg (E Villach)
1389	VII	Resiutta			
1403	VIII	*	1873	IX	Soverzene (N Belluno)
1451	VII	*	1889	VIII	Tolmezzo
1455	VIII	*	1889	VII	Tolmezzo
1511	IX	Tricesimo	1892	VII	Claut
1514	VII	Gemona	1895	VII	Claut
1529	VII	Udine	1896	VII	Pontebba
1690	IX	Villach	1898	VII½	Cividale
1700	IX	Enemonzo (W Tolmezzo)	1908	VIII	Arta
			1920	VII	Venzone
1750	VII	Pordenone	1924	VII	Ampezzo
1776	VIII	*	1928	IX	Verzegnis
1788	IX	Tolmezzo	1931	VII	Gemona
1789	VII	*	1936	IX	Sacile (W Pordenone)
1790	IX	Tolmezzo			
1794	IX	Tramonti	1959	VII	Sauris–Forni–Zuglio
1794	VIII	Tramonti			
1812	VIII½	Pordenone–Sequals	1959	VIII½	Arta
			1960	VII	Karnische Alpen

tektonisches Beben schliessen, und zwar auf eine «flache» Unterschiebung Süd-Nord, die dort im Zusammenhang mit der «Wurzelzone» der Alpen steht.

Tektonische Beben, wozu sämtliche seismischen Aktivitäten in unserer Gegend zu zählen sind, zeichnen sich aus durch einen plötzlichen «strain release», ein ruckartiges Nachgeben zweier Spannungsblöcke entlang vorgegebener Scherflächen.

Friaul als Erdbebengebiet

Ein Blick auf die Karte der in Mitteleuropa aufgetretenen starken Erdbeben zeigt in Italien und im angrenzenden Jugoslawien Gebiete, die weit aktiver sind als das Friaul. Dennoch ist das Friaul ein wohlbekanntes Erdbebengebiet, sind doch seit über 800 Jahren zahlreiche, starke, seismische Ereignisse aufgezeichnet worden. Die stärksten Beben suchten indessen meist den *nördlichen* Teil des Friaul heim, aber auch im Schadengebiet des jüngsten Bebens wurden schon Beben mit der Intensität VII (MSK) beobachtet. Der südliche Teil des Friauls weist dagegen keine wesentliche seismische Tätigkeit auf. Tabelle 2 enthält eine Zusammenstellung der heute bekannten Beben des Friauls mit epizentralen Intensitäten vom Grade VII und stärker [10].

Das wohl stärkste bekannte Erdbeben der Region, das Beben in *Villach* (25. Jan. 1348) führte in *Gemona* zur Zerstörung von über der Hälfte der Gebäude, in Villach selbst waren über 1000 Tote zu beklagen. Auch beim Beben vom 26. März 1511 stürzten in den Dörfern des jüngst erschütterten Epizentralgebietes zahlreiche Gebäude, Schlösser und Kirchen ein. Seit 1511 sind die stärkeren Beben der Region eher nördlich und westlich dieses Epizentralgebietes aufgetreten, womit z.B. in Gemona seither keine grösseren Zerstörungen (Gebäudeeinstürze) bekannt geworden sind. Das Alter der Gebäude, die beim jüngsten Beben erschüttert wurden, kann somit ohne weiteres 4 bis 5 Jahrhunderte betragen.

Das Mass für die Aktivität einer Region wird charakterisiert durch die Anzahl der Beben, die in dieser Region und in einem bestimmten Zeitraum eine gewisse Stärke erreicht oder überschritten haben (kumulative Häufigkeit). Im Häufigkeits-Intensitätsdiagramm werden für verschiedene Intensitäten I_0* die Häufigkeiten N [$I_0 \geq I_0$*] aufgetragen. Bild 10 zeigt das Häufigkeits-Intensitätsdiagramm für die Region Friaul. Demnach sind im Zeitraum 1000 bis 1975 etwa 40 Beben mit der Intensität $I_0 \geq$ VII aufgetreten.

Bereits Gutenberg und Richter [11] fanden eine lineare Beziehung zwischen dem Logarithmus der Häufigkeit N und der Intensität I_0:

$$\log N = a - b \cdot I_0$$

Während der Parameter a vom Zeitraum und von der Gebietsfläche abhängt, so ist der b-Wert, d.h. die Steigung der obigen Geraden, eine unabhängige Grösse, dem beim Vergleich seismischer Regionen eine grosse Bedeutung zukommt. Ein kleiner b-Wert bedeutet ein grosses Verhältnis von starken Schadenbeben zu relativ schwachen, die Bevölkerung warnenden Ereignissen und ist somit ein Mass für die Anfälligkeit und Gefährdung eines Gebietes. Der sich aus Bild 10 ergebende Wert b = 0,4 ist kleiner als Werte in andern Regionen Mitteleuropas (0,5 bis 0,7). Das Friaul muss somit als seismisch eher *heimtückisches* Gebiet bezeichnet werden.

Vorhersage und Erdbebenrisiko

Aus den obigen Daten lässt sich die Beziehung zwischen mittlerer Wiederkehrperiode und Intensität ableiten. Sie ist letztlich ein *einfaches Vorhersagegesetz* und hat damit eine zentrale Bedeutung. Für das Friaul ergibt sich die Kurve von Bild 11. Sie gibt an, mit welcher Frequenz ein Beben mit der Intensität I_0 oder grösser im Mittel auftritt. Daraus geht hervor: ein Beben der Intensität neuneinhalb ist im Mittel alle 250 Jahre zu erwarten.

Gleichzeitig ist die Aussagefähigkeit dieses Gesetzes beschränkt, indem damit insbesondere die örtlichen Unterschiede nicht erfasst werden können. An einem bestimmten Standort kann nämlich eine gewisse Intensität auftreten, entweder, weil ein Beben ganz in der Nähe seinen Ursprung hat, oder aber ein stärkeres Beben mit entferntem Epizentrum Auswirkungen zeigt. Die verschiedenen Ursachen leisten einen Beitrag zum kumulativen Standortrisiko.

Die Bedeutung *umfassender Risikostudien* ist von mehreren Ländern erkannt worden. Auch in der *Schweiz* ist eine *Erdbebenrisikostudie* unter dem Patronat der *Abteilung für die Sicherheit der Kernanlagen* (ASK) in Bearbeitung. Resultate werden im Laufe des Jahres 1977 veröffentlicht werden.

Schadenausmass

Geographische Übersicht

Die Verteilung der Schäden auf *italienischem Territorium* kann einer Schadensaufnahme entnommen werden, die von der Regionalverwaltung durchgeführt wurde (Bild 12). Die 119 Gemeinden der Provinzen Udine und Pordenone, in denen nennenswerte Beschädigungen oder Zerstörungen auftraten, wurden dabei *drei* verschiedenen Zonen zugeordnet:

- 41 Gemeinden des nördlichen Teils der Region mit einer Fläche von ungefähr 1700 km² wurden als *zerstört* eingestuft. Zu den bekannteren Ortschaften mit starken Zerstörungen gehören *Gemona, Venzone, Osoppo, Trasaghis, San Daniele, Maiano, Buia* und *Tarcento*.

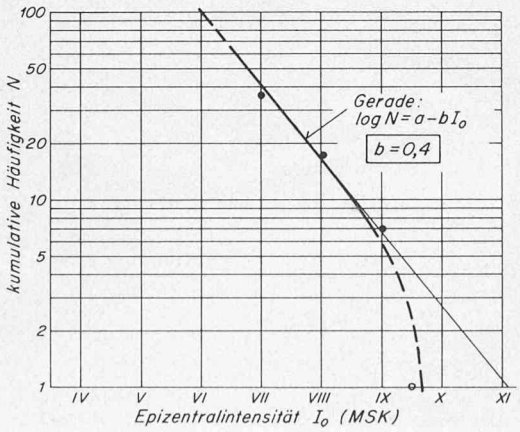
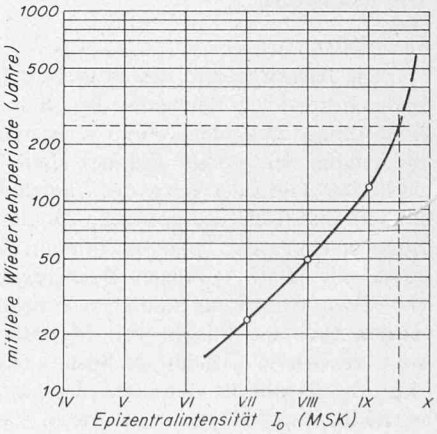


Bild 10. Links: Kumulative Bebenhäufigkeit N in Abhängigkeit von der Intensität I_0 für die Region Friaul exkl. Villach (Zeitraum 1000 bis 1975)

Bild 11. Rechts: Mittlere Wiederkehrperiode für Beben in der Region Friaul (exkl. Villach) mit Intensitäten $I_0 \geq$ VI



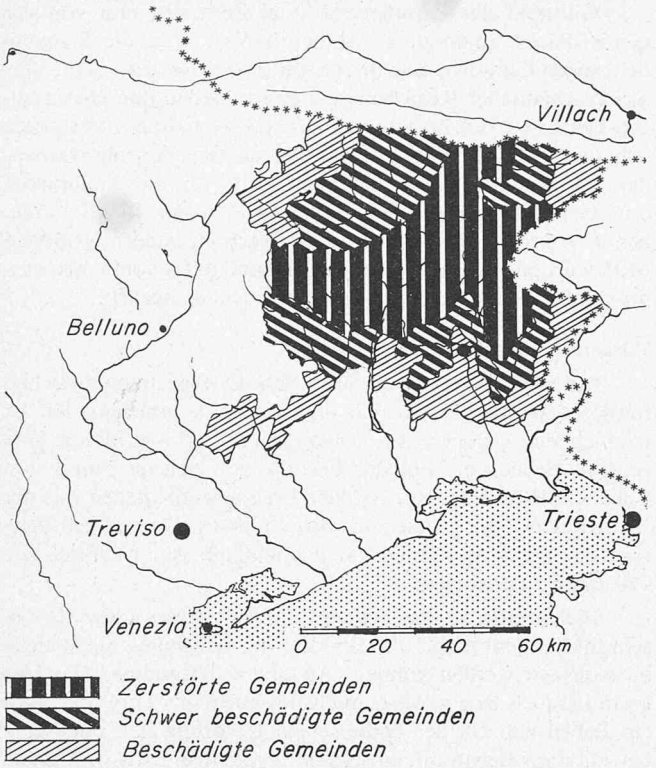


Bild 12. Einstufung der Gemeinden in drei Schadenzonen gemäss Erhebungen der Bauverwaltung der Region Friaul-Julisch Venetien

- 45 Gemeinden mit einem Gebiet von weiteren 1600 km², welche die obige Zone umgeben, gelten als *schwer beschädigt*. Dazu gehören beispielsweise *Spilimbergo, Tricesimo* und *Cividale* in der Hügelzone des mittleren Friaul sowie *Tolmezzo* im Norden.
- 33 Gemeinden schliesslich mit ebenfalls rund 1200 km² wurden als *beschädigt* deklariert. Sie bilden einen äusseren Gürtel um die beiden anderen Zonen und umfassen neben anderen die Provinzhauptstädte *Udine* und *Pordenone* sowie die Grenzstadt *Tarvisio*.

Auch in den angrenzenden österreichischen und jugoslawischen Gebieten traten Bauwerkschäden auf, allerdings geringeren Ausmasses. Die nach Bild 12 erwartete Abnahme der Beschädigungen im jugoslawischen Grenzgebiet wurden durch einen persönlichen Augenschein bestätigt, da detaillierte Unterlagen nicht erhältlich waren. Das nahe der Grenze gelegene Dorf *Bregin* war der am stärksten in Mitleidenschaft gezogene jugoslawische Ort und würde nach italienischer Terminologie etwa am Rande der Zone mit schweren Beschädigungen eingestuft.

Schadenübersicht

Kulturgüter

Die Auswirkungen des Erdbebens auf die vielen bedeutenden historischen Bauwerke, die sich in Gebieten mit grossen Zerstörungen befanden, waren verheerend (Bild 13). So liegt in Gemona der grösste Teil des alten Städtchens in Trümmern. Der Turm der Burg, der Campanile aus dem 12. Jahrhundert und Teile des gotischen Domes stürzten in sich zusammen, einzig der Palazzo Communale überstand die Erdstösse mit relativ geringen Beschädigungen. In ähnlichem Masse wurde auch das Städtchen Venzone betroffen. Zerstört wurden auch die Burgen von Magnano und Artegna. Das frisch renovierte Castello di Susans (Maiano) entging dem Einsturz, obwohl die vier charakteristischen Ecktürme schwer beschädigt wurden. Auch die vielen Dorfkirchen mit ihren Glockentürmen wiesen durchwegs starke Beschädigungen auf oder liegen vollständig in Trümmern. Beträchtlich sind die Verluste an Kunstwerken, welche die historischen Bauwerke schmückten. Allerdings wurden grosse Anstrengungen unternommen, um Fresken, Gemälde, Statuen und Orgeln aus den Ruinen zu retten, die mit jedem Nachbeben weiter zusammenstürzten.

Die Zerstörung historischer Bauwerke, die der Bedrohung aus Bränden, kriegerischen Ereignissen und Erdbeben durch viele Jahrhunderte standgehalten hatten, ist ein Beweis für die ungewöhnliche Stärke des Bebens vom 6. Mai 1976.

Wohnbauten

Das Ausmass der Schäden an den Wohnbauten lässt sich an der Zahl der betroffenen Bevölkerung ermessen: Die ungefähr 1000 Toten und über 1000 Schwerverletzten hatten sich zum Zeitpunkt des Hauptstosses um 9 Uhr abends grösstenteils zu Hause aufgehalten. Die Zahl der Obdachlosen unmittelbar nach dem Beben betrug ungefähr 100000. Über 20000 Wohnungen wurden zerstört oder schwer beschädigt, allein 8000 im Gebiet Gemona–Venzone–Osoppo.

Die *alten Dorfkerne* im Epizentralgebiet bieten über weite Bereiche ein Bild totaler Zerstörung. Die vorwiegend aus runden Bollensteinen und Holz erstellten Häuser schwerer Bauart waren den grossen Horizontalbeschleunigungen nicht gewachsen. Auch die enge Verschachtelung der Bauten dürfte ihren Anteil an den grossen Zerstörungen haben («Dominoeffekt»). Allerdings waren beträchtliche Unterschiede feststellbar. So blieb neben einem eingestürzten Haus ein beinahe unbeschädigtes Gebäude stehen (Bild 14). Solche Bauten waren dann in Backstein oder Beton erstellt oder auch jüngst renoviert

Bild 13. Ansicht des zerstörten mittelalterlichen Städtchens Gemona. Eingestürzte und beschädigte Häuser an der geräumten Strasse, im Hintergrund die Ruine des Burgturms

worden. Das stark unterschiedliche Verhalten von Gebäuden äusserlich ähnlicher Bauweise dürfte wenigstens teilweise auf den Einfluss des Baugrundes auf die lokale Erdbebenerregung zurückzuführen sein. Beispielsweise waren die Schäden in *Braulins,* das zwischen den beiden stark zerstörten Orten Gemona und Trasaghis liegt, verhältnismässig gering.

Die Tragstruktur der *neueren Wohnhäuser,* die aus Back- oder Betonsteinen bestanden und oft ein Stahlbetonskelett aufwiesen, erfuhren im allgemeinen geringere Schäden als Natursteinbauten, jedoch waren auch bei diesen Konstruktionen starke Unterschiede zu beobachten. In Pordenone, das in der äussersten Schadenszone liegt, befanden sich die einzigen *Hochhäuser* des Erdbebengebietes. Während das Stahlbetonskelett der Gebäude im wesentlichen unbeschädigt blieb, bewirkten die Zerstörungen an den Backsteinwänden grössere Schäden an den Inneneinrichtungen und machten die Häuser vorläufig unbewohnbar.

Wirtschaft

Einen Massstab für die von der Wirtschaft erlittenen Schäden liefern die Angaben, wonach etwa 3000 Gewerbe-, 2700 Handelsbetriebe sowie 300 Industriefirmen von den Auswirkungen des Bebens betroffen wurden; rund 20000 Arbeitsplätze sind gefährdet.

Die *Handwerker- und Handelsbetriebe* befanden sich grösstenteils in den *Erdgeschossen* gemischter Wohn- und Geschäftshäuser. Charakteristisch für derart genutzte neuere Gebäude waren aufgelöste Erdgeschosse, die oft schwere Beschädigungen zeigten.

An den *Industriebauten,* die wegen des erst in den letzten Jahren einsetzenden wirtschaftlichen Aufstiegs vorwiegend neuen Datums sind, richtete das Erdbeben ausgedehnte Schäden und Zerstörungen an. Die grösstenteils aus *vorfabrizierten Stahlbetonelementen* erstellten Fabrikationshallen waren ausschliesslich für die Aufnahme von Vertikallasten konzipiert. Sie waren den Horizontalbeschleunigungen oft nicht gewachsen. Wo der *Maschinenpark* nicht durch eingestürzte Bauteile zerstört oder beschädigt wurde, waren oft Schäden infolge Weggleitens von Maschinen von ihren Auflagern zu beobachten. *Rohrleitungen* wurden wohl stark deformiert, Brüche konnten jedoch kaum beobachtet werden. Die Flexibilität und das plastische Verformungsvermögen genügten, um die grossen Verformungen aufzunehmen.

Auch die *Landwirtschaft* hat schwer unter dem Erdbeben gelitten. Durch die Zerstörung von Wohnhäusern und Ställen entstanden grosse Verluste an Tieren und Fahrhabe. Daneben bewirkten auch Steinschlag und Rutschungen beträchtliche Schäden am landwirtschaftlich genutzten Boden.

Verkehrswege

Die Schäden am *Strassennetz* hielten sich in verhältnismässig geringem Rahmen. An direkten Einwirkungen konnten nur einige wenige Risse und Rutschungen an Strassenkörpern beobachtet werden (Bild 15), die auf die *Verdichtung des Bodens* durch die Erdstösse zurückzuführen sein dürften. Grösseres Ausmass nahmen die Strassenunterbrechungen durch vom Erdbeben ausgelöste *Felsstürze* an, vor allem im Bereich der vielen steilen Talflanken.

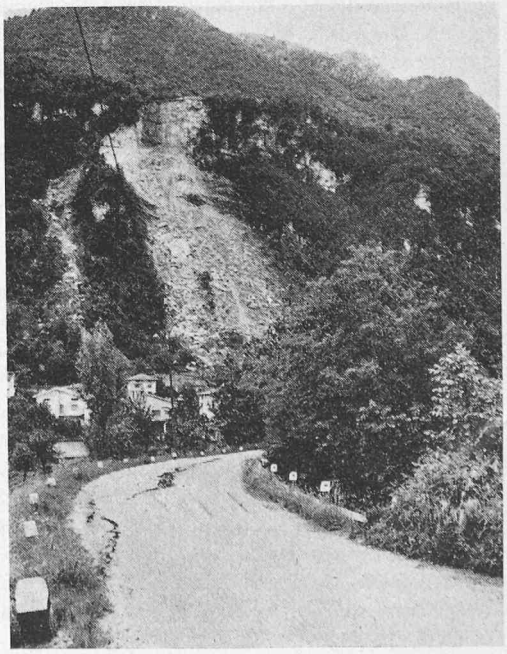
Das grösste Bauvorhaben, das sich in der Region im Bau befindet, ist die *Autobahn A 23* von *Udine nach Tarvisio.* Die Hauptschäden konzentrierten sich auf die *Brückenbauwerke,* die sich in verschiedenen Ausführungsphasen befinden. Die Schäden an den Ortsbetonfahrbahnträgern, vor allem aber an den vorfabrizierten Balkenbrücken betrafen durchgehend die Lagerung auf den Pfeilern und den Widerlagern. Schäden am Kieskoffer des Strassenkörpers konnten nur vereinzelt in einem Dammbereich beobachtet werden, während aus den Tunnelabschnitten keine Schäden bekannt sind.

Auch die Schäden an den *Eisenbahnlinien* sind beträchtlich. Drei Züge entgleisten während des Bebens; keine Reisenden wurden jedoch verletzt. Die Hochbauten in den Bahnhofanlagen sowie entlang der Strecke wurden im Epizentralgebiet weitgehend zerstört. Der Oberbau des Bahnkörpers litt unter den unterschiedlichen Setzungen des Schotterbettes; Schienen wurden verbogen. Eine ältere Stahlbrücke über den Tagliamento wurde verschoben und die Pfeiler beschädigt. Die internationale Linie Udine–Tarvisio wurde durch kleinere Felsstürze vorübergehend unterbrochen. Wegen der Gefahr des Absturzes grösserer Gesteinsmassen musste die Linie für längere Zeit gesperrt werden, bis die entsprechenden Sicherungsmassnahmen an den Felsabhängen durchgeführt waren.

Die *Rohölpipeline Triest–Ingoldstadt* wurde infolge der Beschädigung einer Pumpstation für eine kürzere Zeit ausser Betrieb gesetzt, die Stahlrohrleitung selbst blieb jedoch vollständig intakt.

Bild 14. Unten: Unmittelbar gegenüber liegen sich beinahe unbeschädigte und vollständig eingestürzte Häuser im stark zerstörten Dorf Osoppo

Bild 15. Rechts: Felssturz in oberflächlich angewittertem Gestein am Rand des Dorfes Braulins zwischen Gemona und Trasaghis. Im Vordergrund breite Risse in der auf einem Damm verlaufenden Strasse



Versorgungseinrichtungen

Die *Wasserversorgung* brach in den Gemeinden des Epizentralgebietes weitgehend zusammen. Ausser geborstenen Leitungen waren auch hydrologische Veränderungen, wie *Absinken des Grundwasserspiegels* und *Versiegen von Quellen* dafür verantwortlich.

Von den verschiedenen im Erdbebengebiet gelegenen *Speicherwerken* der staatlichen Elektrizitätsgesellschaft (ENEL) lag das *Kraftwerk Somplago* nordöstlich von Gemona dem Epizentrum am nächsten. Die Staumauer, der Druckstollen und die unterirdische Zentrale blieben intakt, nur das offene Teilstück des Abflusskanals des *Lago di Cavazzo* wurde beschädigt. In den Freiluftschaltanlagen wurden abgebrochene Isolatoren und verschobene Transformatoren beobachtet. Das *Verteilnetz* wurde hauptsächlich im Bereich der Hausanschlüsse stark betroffen durch die vielen Gebäudeeinstürze.

Landschaft

Auch das Gesicht der Naturlandschaft hat sich unter den Einwirkungen der Erdstösse verändert. *Felsstürze, Steinschlag* und *Erdrutsche* stellen seit altersher eine Bedrohung der Siedlungen und Verkehrswege des Friauls dar, durch das Erdbeben wurden jedoch viele derartige Ereignisse in ihrem Ablauf beschleunigt. Am Rand des Dorfes Braulins, das zwischen Gemona und Trasaghis am Fusse eines Abhangs liegt, lösten sich beispielsweise durch Verwitterung bereits gelockerte Felsmassen (Bild 15) und zerstörten mehrere Wohnhäuser. Offene Erdspalten dagegen konnten bei diesem Beben nicht beobachtet werden.

Hilfeleistung und Wiederaufbau

In diesem Abschnitt sollen kurz die Probleme der Hilfeleistungen und des Wiederaufbaus gestreift werden, wie sie sich etwa zwei Monate nach dem Hauptbeben darstellten. Das Vorgehen nach dem Hauptstoss kann grob in *drei Abschnitte* unterteilt werden, deren Übergänge allerdings fliessend sind:

- Kurzfristige Hilfeleistungen unmittelbar nach dem Erdbeben
- Mittelfristige Hilfeleistungen bzw. Wiederaufbau bis Wintereinbruch
- Längerfristiger Wiederaufbau.

Erstes Ziel der Hilfeleistungen war die Bergung der Opfer aus den Ruinen und die medizinische Versorgung der Verletzten. Da die Spitäler im engeren Schadengebiet nicht mehr benutzt werden konnten oder durften, musste der Grossteil der Verletzten in die Spitäler der umliegenden Regionen überführt werden. Die Obdachlosen wurden in Zelten und Wohnwagen untergebracht und von der Armee versorgt. Wegen des gewaltigen Transportvolumens, das für die Hilfeleistungen zu bewältigen war, kam der Funktionsfähigkeit der Verkehrswege eine besondere Bedeutung zu. Während Bahn und Strasse im Hügelland sowie im Tal des Tagliamento nicht unterbrochen waren oder relativ rasch wieder in Betrieb genommen werden konnten, forderte die Öffnung der Verbindungsstrassen zu den entlegenen kleinen Siedlungen der Bergregion einen grossen Aufwand. Schon in dieser ersten Phase wurden von der Regionalverwaltung Schadenerhebungen durchgeführt als Grundlage für gesetzgeberische, administrative und finanzielle Massnahmen für die späteren Hilfeleistungen und den Wiederaufbau.

Mittelfristiges Ziel, das bis zum Einbruch der kalten Jahreszeit unter allen Umständen erreicht werden muss, ist das Erstellen fester Behausungen für alle Obdachlosen. Neben der Instandstellung wenig beschädigter Gebäude bleibt keine andere Möglichkeit, als die ausgedehnte *Verwendung vorfabrizierter Wohnungen.* In Gemona beispielsweise werden voraussichtlich 5000 Bewohner in 1400 vorfabrizierten Wohnungen überwintern und weitere 5000 in 700 wiederhergestellten Zweifamilienhäusern.

Die grosse Aufgabe ist der *Wiederaufbau der Wirtschaft.* Um neue Auswanderungen zu verhindern, und auch die Marktanteile zu halten, kommt der *Sicherung der Arbeitsplätze* Priorität zu. Die grösseren Industriebetriebe versuchten die Produktion zumindest in vermindertem Umfang möglichst rasch wieder aufzunehmen oder bezogen provisorische Produktionsstätten am Rand der Erdbebenzone.

Als *längerfristiges Ziel* gilt die *Erstellung definitiver Wohnstätten* für die ganze Bevölkerung. Bereits sind heftige *Diskussionen um das Siedlungskonzept für die neuen Dörfer* entbrannt. Als grundsätzlich verschiedene Lösungen werden der Wiederaufbau der historischen Dorfkerne unter Einbezug der Monumente und die Neuplanung der Siedlungen ausserhalb der früheren Dörfer, verbunden mit dem Aufbau der historischen Stätten im Sinne von Museen, diskutiert. Neben Gesichtspunkten der Erdbebensicherheit und finanzieller Belange gilt es vor allem auch, die *sozialen* Probleme zu berücksichtigen.

Zur Erreichung der oben dargelegten Ziele sind auch die erforderlichen Mittel bereitzustellen. Es sind in erster Linie *Arbeitskräfte* und *Geld* notwendig, jedoch muss auch an die umfangreiche gesetzgeberische und administrative Arbeit erinnert werden, die wegen ihres Autonomiestatus' grösstenteils die Region Friaul–Julisch Venetien zu leisten hat. Der italienische Staat hat bisher über 800 Milliarden Lire à fonds perdu für die Hilfe im Erdbebengebiet bewilligt, ohne die Mittel aus der Region zu berücksichtigen. Zudem besteht die Möglichkeit, Kredite zu erleichterten Bedingungen aufzunehmen.

Durch die öffentlichen Leistungen wird jedoch sicher nur ein Teil der finanziellen Schäden des Erdbebens gedeckt werden können, da die Risiken solcher Naturkatastrophen *nicht durch Versicherungen gedeckt* sind und die Schäden primär von den Gebäudebesitzern zu tragen sind. Der eigentliche Wiederaufbau kann voraussichtlich weitgehend von der einheimischen Bevölkerung bewerkstelligt werden. Unter ihr befinden sich viele qualifizierte Baufachleute, die heute Mühe haben, im benachbarten Ausland eine Stelle zu finden.

Beschreibung typischer Bauwerkschäden

Die grosse Zahl von Bauwerken mit ihren verschiedenen Aufgaben und Funktionen zeigen wesentlich Unterschiede im Verhalten unter Erdbebenbelastung. Bei der Beobachtung und Untersuchung der Beschädigungen an vielen Bauwerken zeigte sich, wie verschiedene Beschädigungen und Einstürze unterschiedlicher Schwere für die einzelnen Bauwerkarten gemeinsame Merkmale aufweisen. Anhand ausgewählter Beispiele, die stellvertretend für eine Reihe ähnlicher Beobachtungen stehen, wird das Schadverhalten verschiedener Bauwerkarten charakterisiert.

Back- und Betonsteinbauten

Wohnhaus mit Werkstatt bei Artegna

Das dreistöckige Gebäude besteht aus einem Kellergeschoss in Stahlbeton und einer Werkstatt mit darüberliegendem Wohngeschoss aus Betonhohlsteinen. Die eine Längswand des durchgehenden Werkstattgeschosses wird durch drei Tore unterbrochen, die andere von einem Fensterband. Das Obergeschoss dagegen ist durch viele Trennwände ausgesteift und weist relativ wenige Fenster auf. Die Kellerdecke wurde in Stahlbeton erstellt, die des Erdgeschosses und das Dach sind als Hourdisplatten ausgebildet.

Während Keller- und Obergeschoss nur geringfügige Beschädigungen aufweisen, wurde das Werkstattgeschoss stärker zerstört. In der durch den Eingang unterbrochenen Querwand öffneten sich ungefähr 10 cm breite Diagonalrisse in typischer Kreuzform (Bild 16). Im Bereich des Fensterbandes und der Tore wurden die Mauerpfosten stark beschädigt, weil Teile

des Mauerwerks herausbrachen oder zermalmt wurden. Die durch Öffnungen stark geschwächten Betonhohlsteinwände des Erdgeschosses wurden überbeansprucht und konnten die aus der Erdbebenerregung entstehenden Schubkräfte des verhältnismässig schweren Obergeschosses nicht auf das steife Kellergeschoss übertragen.

Hotel bei Venzone

Das vor ungefähr 20 Jahren errichtete Hotelgebäude besteht aus fünf Obergeschossen und ist einfach unterkellert. Die Aussenwände wurden in einer gemischten Bauweise aus Backsteinen und behauenen Natursteinen aufgemauert. Wegen der breiten Fenster und Türen blieben in der Vorderwand des Erdgeschosses nur schmale Mauerstücke übrig (Bild 17). Der vordere Teil des Gebäudes ist auf Fels fundiert, die abgewandte Seite auf Kies. Auch bei diesem mehrstöckigen Gebäude blieben die Obergeschosse praktisch unbeschädigt und die Zerstörungen betrafen vorwiegend das Erdgeschoss. Die Mauerpfosten zwischen den Fenstern der Vorderfront sind durch die Schubbeanspruchung vollständig gebrochen und die eine Stirnfassade weist einen Diagonalriss auf. Beide Schäden dürften, neben der Schwächung des Erdgeschosses, massgebend auf die *unterschiedlichen Fundationsverhältnisse* zurückzuführen sein, da sich der rückwärtige, auf Kies fundierte Teil, stärker setzte als der auf Fels gelagerte vordere Bereich. Das zwischen 15 und 20 Jahre alte Gebäude wurde nach längeren Diskussionen zwischen Besitzer und beigezogenem Ingenieur abgebrochen, da eine Sanierung der Tragstruktur grosse Probleme geboten hätte und deshalb verworfen wurde.

Generelles Verhalten der Back- und Hohlsteinbauten

Viele Back- und Hohlsteinbauten wiesen Beschädigungen im Erdgeschoss auf. Die massive Ausbildung der geschlossenen Obergeschosse führte zu grossen horizontalen Schubkräften, denen lokal nur verhältnismässig kleine Schubflächen gegenüberstanden.

Bild 16 Wohnhaus mit Werkstatt bei Artegna mit Kellergeschoss in Stahlbeton und zwei Stockwerken in Betonhohlsteinen. Kreuzförmig verlaufende klaffende Diagonalrisse und herausgebrochene Mauerteile infolge hoher Schubbeanspruchung an einer Stirnseite

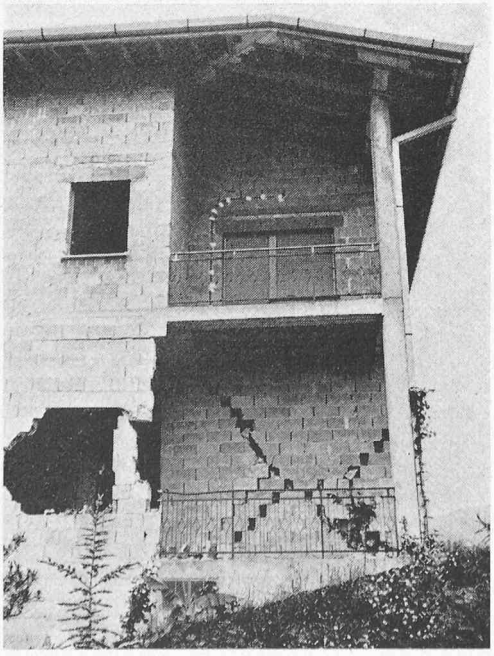


Bild 17. Fünfgeschossiges Hotelgebäude bei Venzone mit Wänden aus behauenen Natur- und Backsteinen. Beschädigung im Erdgeschoss durch typische X-Risse in den Fensterpfosten der Vorderfront und Diagonalriss auf der Stirnseite infolge inhomogenen Fundationsverhältnissen

Das meistverbreitete Schadenbild waren *Diagonalrisse,* die wegen des oszillierenden Beschleunigungsverlaufes *kreuzförmig* auftragen (Bild 16). Besonders häufig traten diese X-Risse bei horizontalen, vereinzelt aber auch bei vertikalen Fensterbändern auf. Bei geringerer Festigkeit der Mörtelfuge konnten jedoch auch Horizontalrisse beobachtet werden. Solche Schäden waren nicht nur an Fensterpfosten anzutreffen (Bild 21), sondern es wurden auch ganze Obergeschosse leicht verschoben. Anderen Ursprungs sind die nur einseitig verlaufenden Diagonalrisse, die auf differentielle Setzungen in nichthomogenem Untergrund zurückzuführen sind.

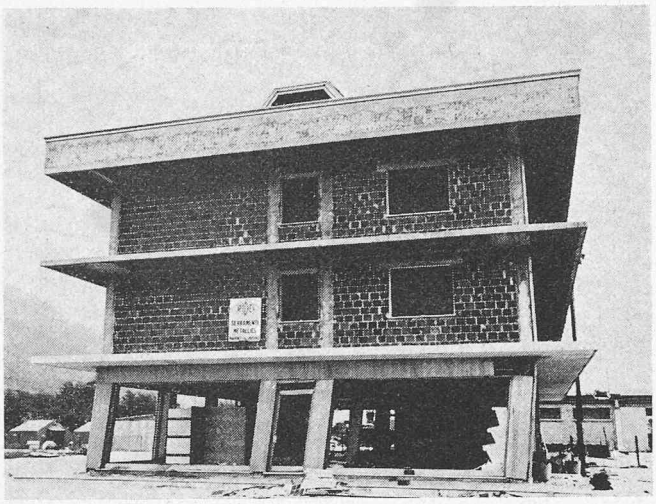
Ortbetonskelettbauten

Wohn- und Geschäftshaus bei Artegna

Der dreistöckige Stahlbetonskelettbau war erst im Rohbau vollendet. Da das Erdgeschoss als Verkaufslokal vorgesehen war, wurde nur die hintere Längsfassade mit Backsteinen ausgefacht, während die Vorder- und Seitenfassaden verglast waren (Bild 18). Das in einer Ecke angeordnete Treppenhaus war mit Backsteinmauern abgeschlossen. Im Gegensatz zum Parterre sind die beiden oberen Stockwerke als Wohngeschosse durchgehend mit Backsteinwänden ausgesteift. Die Fundation besteht aus einer durchgehenden Stahlbetonplatte.

Die Beschädigungen beschränkten sich auch hier ausschliesslich auf das Erdgeschoss. Die Stahlbetonstützen standen stark schief (Maximalauslenkung aus der Vertikalen bis 10 Prozent der Stützenhöhe) und bei den Einspannstellen an den Stützenenden konnten Biegegelenke beobachtet werden verbunden mit Betonabplatzungen, ausgeknickter Längsarmierung und Bruchzustand des Betons. Die Backsteinwände des Treppenhauses, das als kleiner Kern wirkte, wurden weitgehend zerstört, die Ausfachungen der hinteren Längsfassade blieben jedoch intakt.

Die Bewegungen, die zwischen Boden und Decke des Erdgeschosses stattgefunden haben, sind eine Folge der *Anordnung der Backsteinwände.* Das *Treppenhaus* bildete das *kinematische Drehzentrum,* da die ausgesteifte Längswand und der Kern, trotz seiner weitgehenden Zerstörung keine Verschiebungen zuliessen. Zusätzlich zum ungenügenden Translationswiderstand des unausgesteiften Bereichs des Erdgeschosses führten die stark exzentrisch angeordneten Ausfachungen noch zu einer beträchtlichen Torsionserregung, der die Konstruktion ebenfalls nur ungenügenden Widerstand entgegensetzen konnte.



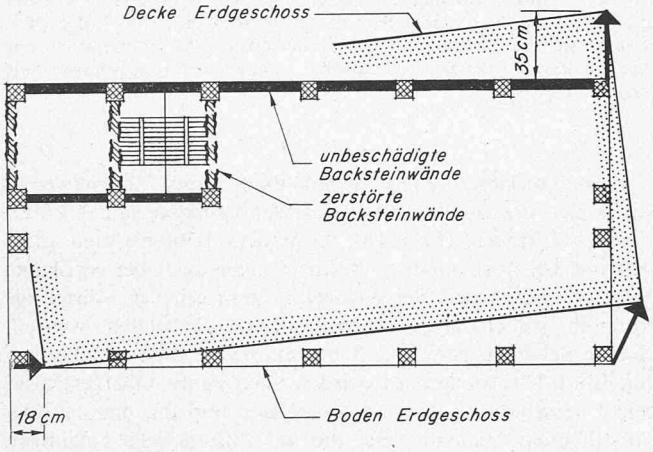


Bild 18. Wohnhaus mit Verkaufslokal bei Artegna. Stahlbetonskelettbau mit Backsteinfüllwänden in den Obergeschossen, im vorne offenen Erdgeschoss ist nur die hintere Längswand und das Treppenhaus ausgefacht. Die Drehbewegung des Gebäudes wurde durch die versteifende Wirkung der Treppenhauswände verursacht

Neues Spital in Tolmezzo

Das neue Spital in Tolmezzo ist in den Jahren 1969 bis 1974 erbaut worden. Es ist als Stahlbetonskelettbau mit Backsteinmauerfüllung angelegt. Da Tolmezzo bereits aufgrund des Erdbebens von 1928 in die Erdbebenzone 2. Kategorie eingestuft worden war, ist das Gebäude gemäss den zum Zeitpunkt der Projektierung gültigen Vorschriften auf Erdbeben ausgelegt. Die Gebäudehöhe war somit auf sieben Stockwerke begrenzt. In der seismischen Analyse, vom Centro Nazionale delle Richerche (CNR) durchgeführt, wurde eine Grundbeschleunigung von 0,10 *g* zugrunde gelegt. Die verschiedenen Bauteile sind konsequent gegeneinander abgefugt, was zu einem übersichtlichen Schwingungsverhalten der einzelnen Abschnitte führte. Die fünf Zentimeter breiten, durchgehenden Fugen waren mit Styropor gefüllt.

Das Tragskelett sowie die Backsteinwände überstanden das Erdbeben ohne Beschädigungen. In vielen Räumen waren jedoch Verputzrisse sichtbar, meist entlang den Unterputzleitungen. Die bei einer Fuge in allen Stockwerken abgerissenen Fugenabdeckungen lassen auf starke gegenseitige Verschiebungen schliessen, die mit dem unterschiedlichen Schwingungsverhalten der benachbarten Gebäudeteile erklärt werden können.

Obwohl die Präfektur nach dem Erdbeben die Evakuation des Spitals anordnete, sind die Schäden als gering zu bezeichnen. Eine Instandstellung wird mit verhältnismässig geringem Aufwand möglich sein. Das Bauwerk überstand die Erdbeben ohne nennenswerte Beschädigungen, einmal wegen der Entfernung zum Epizentrum und vor allem aber, weil seine Tragstruktur für seismische Beanspruchung ausgelegt worden war. Wesentliche Bedeutung kam auch dem über der Höhe gleichmässigen Steifigkeitsverlauf und den Fugen zu.

Allgemeines Verhalten der Ortbetonskelettbauten

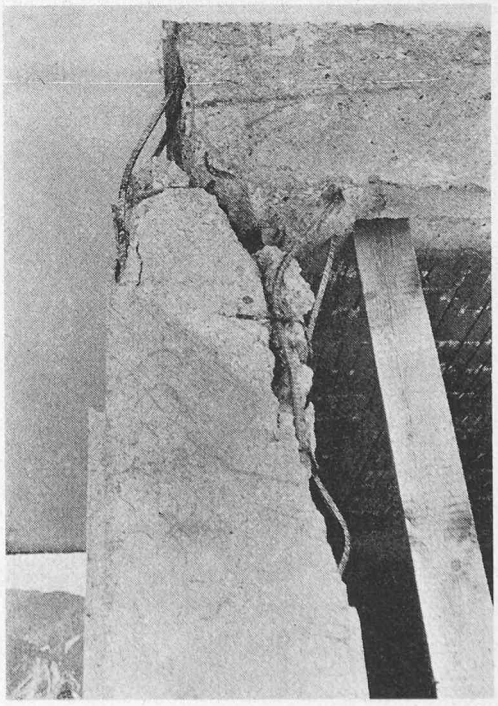
Viele Schäden an den Ortbetonskelettbauten hatten ihre Ursache nicht in der Ausbildung des Tragskelettes, sondern in der Anordnung der Backsteinwände, wobei das unterschiedliche Verhalten der beiden Konstruktionselemente zu berücksichtigen ist. Während das Stahlbetonskelett infolge Plastifizierung grosse Deformationen aufzunehmen vermag, vergleichsweise aber einen geringen Verformungswiderstand aufbringt, so verhalten sich die Backsteinwände wesentlich steifer, erlauben aber infolge des spröden Verhaltens nur geringe Deformationen bis zum Bruch. Jede Backsteinwand, sowohl die Fassadenwände wie auch die sonst unbedeutenden Innenwände, beeinflusst somit das Verhalten des Bauwerks bei einem Erdbeben wesentlich. Deshalb entstanden bei offenen Erdgeschossen infolge einzelner Mauerwerkwände grosse Unterschiede in der Schubsteifigkeit, die zu konzentrierten Beschädigungen führten. Die Ursache von Schäden, die vom Tragskelett ausgingen, sind meist durch die ungenügende Gestaltung konstruktiver Details bedingt, beispielsweise der Anschlüsse von Riegeln an Stützen (Bild 19).

Vorfabrizierte Stahlbetonskelettbauten

Holzlagerhalle südlich Magnano

Die doppelschiffige offene Halle (Bild 20) bestand aus Stützen, die durch Längsträger zusammengehalten waren, den auf den Längsträgern angeordneten kurzen Stützen mit den Dachbindern und Betondachplatten. Den Horizontalschub der Dreigelenkbogenbinder übernahmen Zugbänder.

Bild 19. Abscheren einer Stütze bei der Verbindung mit dem Riegel infolge ungenügender Verbügelung



Im einen Schiff stürzten insgesamt drei Abschnitte der Dachhaut zusammen. Mehrere Stützenköpfe im Auflagerbereich der Dreigelenkbogen wurden zerstört und die Stützenfüsse zeigten Risse. Die Schadenursache liegt in der allgemein sehr leichten Ausführung der Tragkonstruktion, die mit ihren Zugbändern und Reibungsverbindungen nicht für die Aufnahme grösserer Horizontalkräfte geeignet war. Zudem waren auch die Auflagerbereiche mit den Verankerungen der Zugbänder nicht genügend bemessen.

Möbelfabrik Fantoni in Rivoli di Osoppo

Der dreiteilige, ein- bis zweistöckige Hallenkomplex war vor ungefähr einem Jahr in Betrieb genommen worden. Für das Skelett wurde durchgehend dasselbe Konstruktionsprinzip angewandt, nämlich Stützen mit darübergelegten Längsträgern, auf denen die Dachbinder ruhten. Diese Elemente waren ohne Verbindung, jedoch mit relativ grosser Auflagertiefe von 30 cm aufeinandergestellt. Die Fassade bestand aus Glasflächen in Metallrahmen.

Der schwerste Schaden an der Tragkonstruktion betraf einen Hallenteil, bei dem ein grosser Teil der Dachträger von ihren Auflagern heruntergefallen war. In anderen Bereichen konnten an einzelnen Stützen Betonabplatzungen mit ausgeknickten Armierungsstäben beobachtet werden, am stärksten im Bereich einer Umfassungsmauer aus Beton. Die Glasfassaden und die Inneneinrichtungen wurden zu einem grossen Teil beschädigt oder zerstört.

Da das Abgleiten der Dachbinder von den Auflagern nur durch ein erhebliches Auseinanderbewegen der gegenüberliegenden Längsträger erklärt werden kann und zudem keine wesentlichen inelastischen Deformationen der Stützen beobachtet werden konnten, dürften die grossen Deformationen hauptsächlich auf *Verschiebungen in den Fundationen* zurückzuführen sein. Die Stützenbeschädigungen bei der ungenügend abgefugten Umfassungsmauer zeigten, wie Sekundärelemente in der Tragkonstruktion unvorhergesehene Beanspruchungen bewirken, die zu Zerstörungen führen können. Die Schäden an den Glasfassaden sowie den Inneneinrichtungen, die auch in Bereichen mit intakter Tragstruktur auftraten, sind auf die grossen *Deformationen der weichen Hallenkonstruktion* zurückzuführen.

Lagerhalle beim Bahnhof Gemona

Das Stahlbetonskelett der Lagerhalle (Bild 21) bestand aus einzelnen Rahmen mit darübergelegten Dachelementen. Die Fassade wurde aus vorfabrizierten Betonelementen gebildet, die gut am Tragskelett verankert und deren Fugen mit einer Kunststoffmasse vergossen waren. An einer Stirnwand war ein Anbau aus Back- und Betonhohlsteinen direkt an die Halle angeschlossen.

Das Tragskelett der Halle weist nur unbedeutende Beschädigungen auf und an den Fassadenelementen waren vereinzelt feine Diagonalrisse erkennbar. Die Scherlippen in der Fugenmasse lassen jedoch auf grosse Schubverformungen zwischen den Fassadenelementen schliessen. Im Bereich des Anbaus war die Fassade zudem leicht eingedrückt. Der Anbau selbst wurde im Bereich der Fensterpfosten abgeschert und das Dach rund 20 Zentimeter weggeschoben.

Bei diesem besonderen Konstruktionsprinzip sind nur unbedeutende Schäden entstanden. Dies liess sich an weiteren Hallenbauten sowie auch an einem Einfamilienhaus bestätigen und dürfte zu einem grossen Teil auf die aussteifende Wirkung der Fassadenhaut und die Reibung in der Fugenmasse zurückzuführen sein. Die Zerstörungen am *ungenügend abgefugten* Anbau sind auf das stark unterschiedliche Schwingungsverhalten der beiden Gebäude zurückzuführen. Die beim Aufprall erzeugte Impulsbelastung verschob das Dach des Anbaus um ein mehrfaches der Bewegung der Hallenwand.

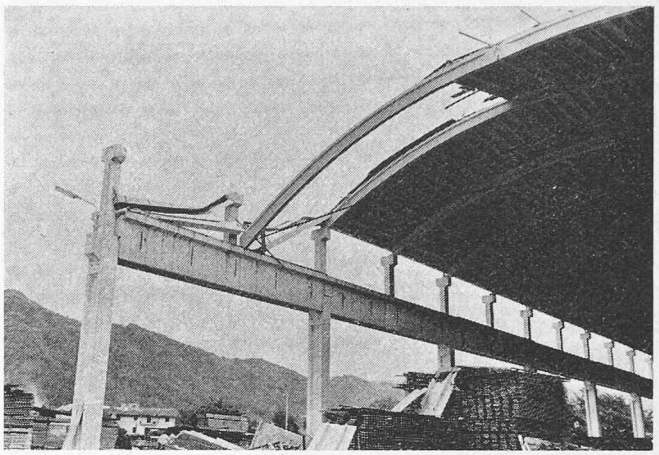


Bild 20. Offene Halle aus vorfabrizierten Stahlbetonelementen südlich Magnano. Dachbinder als Dreigelenkbogen mit Zugband auf Stützen aufgelegt. Einsturz eines Dachsegments und Beschädigung eines weiteren Segments infolge Abgleiten des Binders ab dem Auflager

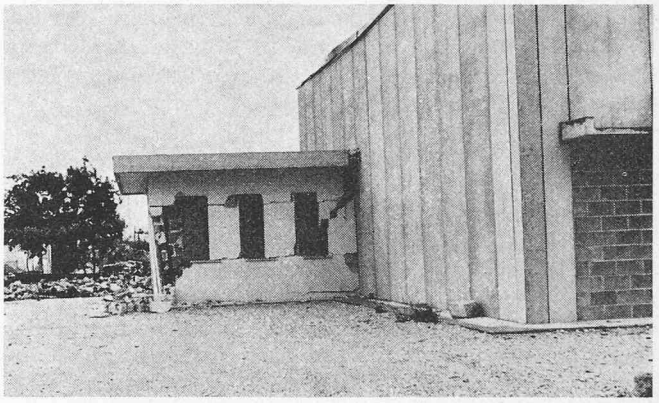


Bild 21. Vorfabrizierte Lagerhalle mit Backsteinanbau in Gemona. Tragskelett der Halle unbeschädigt. Steinwand bei Aufprall an steifen Anbau leicht eingedrückt. Dach des Anbaus durch die Impulsbelastung infolge ungenügender Fugenbreite abgeschert und weggeschoben

Allgemeines Verhalten der vorfabrizierten Stahlbetonskelettbauten

Die vorfabrizierten Stahlbetonskelettbauten wiesen vielfach Zerstörungen auf, die auf die Verbindungen der einzelnen Elemente zurückzuführen sind. Die vielen *Gelenke* und *Auflagerungen* führen zu Tragwerken, die Horizontallasten nur *geringen* Widerstand entgegensetzen können und *wenig plastische Deformationsmöglichkeiten* aufweisen. Wegen der Verwendung reiner Reibungsverbindungen war die Stabilität der Tragkonstruktion oft nicht gewährleistet. Dagegen haben gut verankerte Betonelemente für die Fassade wesentlich zum befriedigenden Verhalten einiger Bauwerke beigetragen. Kleinere stabilisierende Bauteile aus Mauerwerk konnten die grossen Beanspruchungen der weichen Tragstruktur nicht wesentlich behindern und wurden oft zerstört.

Natursteinbogenbrücken

Strassenbrücke über den Tagliamento zwischen Gemona und Trasaghis

Die Natursteinbogenbrücke überspannte den Tagliamento in 17 Spannweiten zu ungefähr 13 m. Durch massive Pfeiler im Flussbett sowie grosse Widerlager ist die Brücke im Boden verankert. Der grösste Schaden am langen Bauwerk war ein Spalt in einer Widerlagermauer, während sonst nur vereinzelte, vom Beben verursachte feine Risse sichtbar waren.

Allgemeines Verhalten der Natursteinbogenbrücken

Grössere Schäden an Natursteinbogenbrücken konnten nicht festgestellt werden. Die massive, schwere Bauweise *ohne Dilatationsfugen* war den Erdbebenstössen gut gewachsen. Vereinzelt sind jedoch die *aufgesetzten Flügelmauern* als Folge der Erregung eingestürzt.

Stahlbetonbrücken

Autobahnbrücke über die Strasse Buia-Maiano

Die beiden nebeneinanderliegenden dreifeldrigen Autobahnbrücken mit Randspannweiten von zehn Metern und der Mittelöffnung von rund fünfzehn Metern sind stark schiefwinklig gelagert. Der als Hohlkasten mit kleiner Bauhöhe konzipierte Fahrbahnträger ist in Längsrichtung vorgespannt. Die Zwischenabstützungen bestehen je aus einem durch vier Pfeiler getragenen massiven Joch. Der Brückenträger ist auf den Widerlagern und Jochen auf Neoprenelagern schwimmend gelagert.

Der Brückenträger selber blieb intakt, wurde jedoch infolge der Auflagerschiefe beträchtlich abgedreht und verschoben (Bild 22). Dadurch entstanden ausgedehnte Beschädigungen an der Auflagerung, weil die Brücke teilweise von den Lagerkörpern abgeschoben wurde. Die beiden Widerlager wurden durch den anprallenden Brückenträger auseinandergedrückt und schwer beschädigt.

Autobahnbrücke über den Tagliamento bei Osoppo

Die Autobahnbrücke über den Tagliamento setzt sich aus 34 Spannweiten zu rund 30 m zusammen. Die zwei getrennten Brücken bestehen aus vorfabrizierten einfachen Balken aus Spannbeton und darübergelegten vorfabrizierten Fahrbahnplatten. Von den vier Längsträgern jeder Brücke sind je zwei durch Querträger verbunden. Die einzelnen Brückenabschnitte waren bei jedem Pfeiler gegeneinander abgefugt und auf Teflon gleitend gelagert. Die Abstützung erfolgte über massive Pfeilerscheiben. Die kastenförmigen Widerlager wurden durch hohe Flügelmauern abgeschlossen.

Bild 22. Dreifeldrige Autobahnbrücke über die Strasse Buia–Maiano. Brückenträger infolge starken seitlichen Verschiebungen von den Neoprenelagern auf die Stützenjoche heruntergefallen

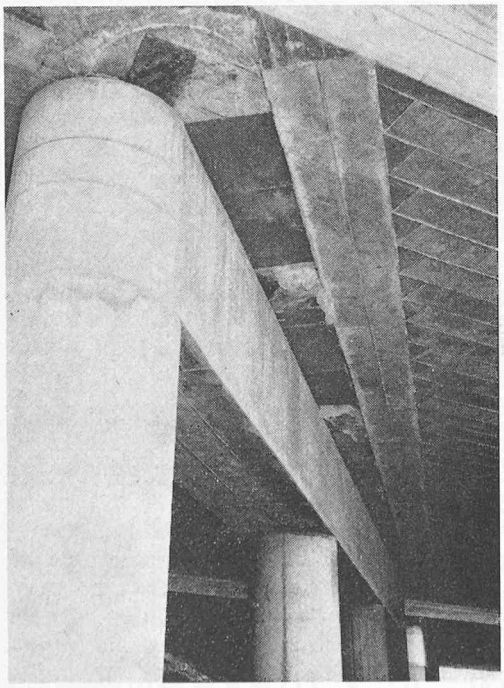


Bild 23. Autobahnbrücke mit 32 Feldern über den Tagliamento. Auflager der vorfabrizierten Träger auf massiven Pfeilerscheiben. Betonabplatzungen an den Trägern und vollständig zerstörte Auflagerkonsole infolge Anpralls des durch das Beben beschleunigten Trägers. Linker Brückenträger vom Auflager abgerutscht

Auch hier konzentrierte sich die Erdbebenbeschädigung auf die *Auflagerbereiche,* die sehr stark in Mitleidenschaft gezogen wurden (Bild 23). Die grossen Verschiebungen der einzelnen Brückenfelder in Längsrichtung führten zu Betonabplatzungen an den Längsträgern und zerstörten Lagerkörper und Anprallkonsolen. Die hohen Widerlagermauern wurden durch den Anprall der Endfelder stark zerrissen.

Allgemeines Verhalten der Stahlbetonbrücken

Während der Oberbau allgemein wenig beschädigt wurde, erlitten viele Balken- und Plattenbrücken ausgedehnte Zerstörungen im Bereich der *Lagerung.* Die schweren Brückenträger wurden durch die Bebenwirkung vor allem in *Längsrichtung* beschleunigt und prallten an den Widerlagermauern an. Infolge *schiefer* Lagerung wurden einige Brücken durch das Hin- und Herschlagen *abgedreht* und *ab den Lagerkörpern geschoben.* Durch die enormen Aufprallkräfte platzte der Beton an den Brückenträgern ab, während die weniger stabilen Widerlager weggedrückt und meist stark zerstört wurden.

Turmartige Bauwerke

Wasserturm der italienischen Staatsbahnen im Bahnhof Gemona

Das pilzförmige Bauwerk bestand aus einem hohlzylindrigen Schaft und einem aufgesetzten Wasserreservoir mit einem Fassungsvermögen von rund 75 m³. Boden und Wände des Speicherbeckens mit 10 m Durchmesser waren in Stahlbeton ausgeführt, das Dach als Hourdisplatte. Der Schaft hatte einen Durchmesser von 2 m und eine Wandstärke von 20 cm. Er war innen wie aussen mit einer orthogonalen Armierung bewehrt. Am Fusse des Schaftes war ein kleiner Einstieg vorhanden.

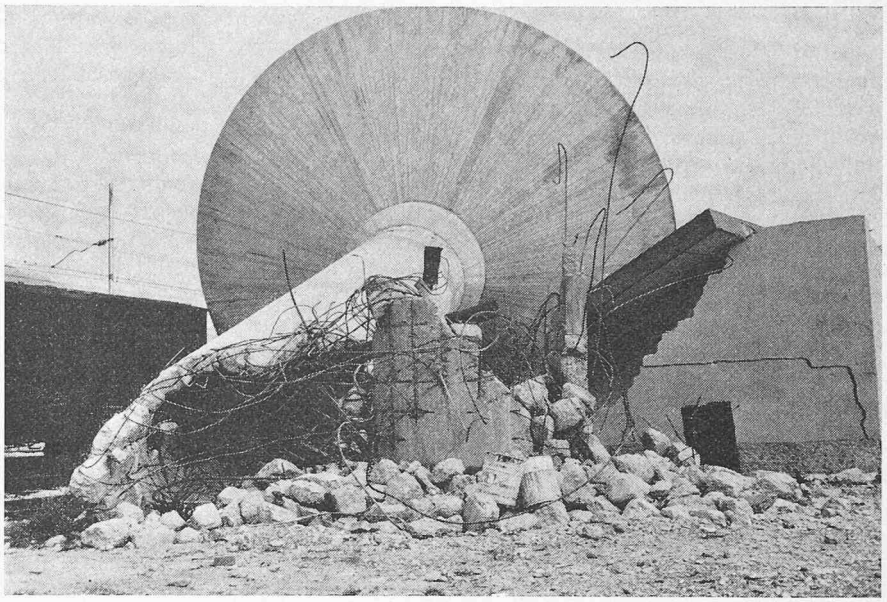
Der umgestürzte Wasserturm bildet einen der spektakulärsten Schadenfälle des Erdbebens (Bild 24). Die hochliegende Masse des Reservoirs erzeugte eine *grosse Biegebeanspruchung am Schaftfuss,* die zur Zerstörung des Betons und zum Umkippen der ganzen Konstruktion führte. Die Schwächung durch die Öffnung am Schaftfuss dürfte den Einsturz noch beschleunigt haben.

Kanäle

Kraftwerkkanal ENEL bei Trasaghis

Der Kanal dient als Abfluss des *Lago di Cavazzo,* einem Speicherbecken der hydroelektrischen Zentrale Somplago und setzt sich aus einem geschlossenen Freispiegelstollen und einem offenen Abschnitt zusammen. Das beschädigte offene Teilstück des Kanals ist als Trapezquerschnitt ausgebildet und besteht aus unarmierten Betonplatten von 15 cm Stärke, die alle 3 × 3 m abgefugt sind. Die Sohle besteht aus einer, die

Bild 24. Umgekippter Wasserturm der italienischen Staatsbahnen im Bahnhof Gemona. Schaftfuss auf eine Länge von 2 bis 3 Meter vollständig zerstört und Beton ausgebröckelt



beiden Schenkel aus je zwei Platten. Ein beachtlicher Anteil der Platten zerbrach, meist in horizontale Bruchlinien in Plattenmitte. Die oberste Plattenreihe wurde allgemein mehr in Mitleidenschaft gezogen als die übrigen. Vollständig zertrümmert wurde die Auskleidung in der Nähe der Widerlager von Überführungen.

Wegen der grossen Leckage durch das ebenfalls zerstörte Auslaufbauwerk konnte der Kanal nicht mehr benutzt werden, was zu einem längeren Betriebsunterbruch in der unbeschädigten Zentrale Somplago führte. Die Sanierung wurde deshalb mit grosser Eile vorangetrieben. Ein Teil der zerbrochenen Platten wurde herausgerissen und ersetzt, die restlichen wurden über den bestehenden neu betoniert und mit diesen verdübelt.

Schadenbeurteilung

Bei genauerer Betrachtung der bei den verschiedenen Bauformen aufgetretenen Erdbebeneinwirkungen wird deutlich, wie viele der Beschädigungen auf ähnlichen baulichen Ursachen beruhen. Davon ausgehend sollen in diesem Abschnitt einige qualitative Erkenntnisse für die Auslegung von Bauwerken zusammengestellt werden. Obwohl diese Folgerungen auch durch Beobachtungen bei anderen Erdbeben weitgehend bestätigt werden konnten, wurden die Schadensbilder doch stark durch die Eigenheiten des Erdbebens und des Epizentralgebietes geprägt.

Die Hauptursache für die ausgedehnten Beschädigungen bildet sicher die Nichtberücksichtigung von Erdbebenwirkungen bei der Auslegung der Gebäude. Allein schon die Vorstellung, dass Gebäude, die bei einem Erdbeben auftretenden Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aufnehmen müssen, führt auch ohne eigentliche Erdbebenbemessung zu Konsequenzen in der Gebäudeauslegung, mit denen sich bereits eine beachtliche Anzahl von Schäden verhindern liesse.

Bauelemente

Wände

Die vorwiegend in Backstein oder in Betonhohlstein gemauerten Tragwände und die Füllwände in Skelettbauten verhalten sich gegenüber horizontalen Verschiebungen sehr steif. Die Horizontalverschiebungen erzeugen deshalb in den gemauerten Wänden sehr hohe Schubbeanspruchungen. Bei ungenügender Wandstärke oder zahlreichen Öffnungen sind die Mauerwerkwände jedoch nicht mehr in der Lage, die Horizontalkräfte aus der Bebenerschütterung aufzunehmen. Bei Überbeanspruchung reissen die Wände meist kreuzweise unter 45 Grad, wobei sich die Risse entsprechend den Festigkeitsverhältnissen entlang den Mörtelfugen oder durch die Steine fortpflanzen. Infolge des naturgemäss spröden Verhaltens des Mauerwerks weiten sich die Risse aus. Es entstehen klaffende Fugen oder die betroffenen Wände stürzen sogar ein. In einem Skelettbau vermag das Stahlbetontraggerüst unter Umständen weiterhin die Gebäudelasten aufzunehmen, bei reinen Mauerwerkbauten ist dagegen zumindest ein lokaler Einsturz des Gebäudes unabwendbar.

Stahlbetonstützen

Da die Stahlbetonstützen im allgemeinen bedeutend weicher sind als Wände, übernehmen die letzten vorerst praktisch die gesamte Erdbebenbeanspruchung. Bei offener Bauweise jedoch wird die gesamte Beanspruchung auf die Stützen übertragen. Die freistehenden Stahlbetonstützen von einstöckigen Lagerhallen waren meistens genügend stark, um die entsprechenden Beanspruchungen ohne Zerstörungen aufzunehmen, in vielen Fällen sogar ohne bleibende Risse. Bei teilweisen Versteifungen, beispielsweise durch An- oder Einbauten oder starre, darüberliegende Stockwerke mit schweren Auflasten resultieren höhere Beanspruchungen, die meist zu plastischen Deformationen an den Einspannstellen führen. Dabei kann die jeweils durch Zugbeanspruchung überdehnte Armierung infolge wechselnder Beanspruchungsrichtung auf der Druckseite ausknicken. Die damit verbundenen Betonabplatzungen und das Ausknicken können auch durch verstärkte Verbügelung nicht wesentlich eingeschränkt werden, jedoch wird die Rotationsfähigkeit des plastischen Gelenks erhöht und ein Versagen auf Schub verhindert. Sofern es also möglich ist, die Stützen auf die effektiven Erdbebenkräfte zu bemessen, muss zumindest die plastische Deformation der Stützen in allen Richtungen gewährleistet sein. Die Bewegungen dürfen nicht durch Sekundärelemente behindert werden. Eine für die Einsturzsicherheit verbesserte Konstruktionsweise könnte darin bestehen, die Stützen so zu gestalten, dass sich die zur Energieabsorption erforderlichen Fliessgelenke in den Riegeln ausbilden.

Decken

Die Deckenplatten zwischen den einzelnen Stockwerken sind normalerweise mit erheblichen Sicherheitsfaktoren für Vertikallasten bemessen. Dadurch kann die vertikale Belastung eines Bebens ohne wesentliche Überbeanspruchungen aufgenommen werden. Dagegen stellen die Geschossdecken grössere Massenkonzentrationen dar, die bei einem Beben horizontal wirkende Trägheitskräfte erzeugen und über die senkrechten Strukturelemente abgetragen werden müssen.

Tragkonstruktionen

Offene Erdgeschosse

Als besonders gefährdet erwiesen sich die offenen oder wenig ausgesteiften, meist gewerblich genutzten Erdgeschosse. Die lokal starken Zerstörungen im Bereich solcher Schwachstellen lösten den Einsturz ganzer Gebäude aus oder erforderten deren Abbruch auch bei sonst nur unbedeutenden Beschädigungen, da sich eine Sanierung äusserst schwierig gestaltet hätte.

Die stark unterschiedlichen Steifigkeitsverhältnisse in einem Tragwerk haben zur Folge, dass lokale Schwachstellen bei der Bebenbelastung als erste überbeansprucht und plastisch verformt werden. Dadurch können die stärkeren Gebäudeteile nicht mehr irreversibel verformt werden und die Energieabsorption beschränkt sich auf die schwächsten Bauteile. Eine regelmässig über das ganze Bauwerk verteilte Plastifizierung ist jedoch eine Voraussetzung dafür, dass die Zerstörungen auf ein akzeptables Mass bechränkt bleiben. Bei der Bemessung von Tragwerken mit verminderten Beschleunigungswerten ist aber sicherzustellen, dass die ganze Tragstruktur zur Energieabsorption beiträgt, um lokale Überbeanspruchungen zu verhindern.

Torsionsbeanspruchung

Mehrere von der Tragstruktur her symmetrische Bauwerke erlitten Schäden durch zusätzliche Drehbewegungen des Gebäudes um die Vertikalachse. Infolge der überlagerten Bewegung werden einzelne Gebäudeteile entlastet, andere dafür wesentlich stärker verformt als nur durch die üblicherweise berücksichtigten Translationsbewegungen. Die Torsionsbelastung wird verursacht durch die unsymmetrische Anordnung der Tragstruktur und der Wände, aber auch von Zufälligkeiten in der Steifigkeit und Ausführung von Füllwänden und zusätzlichen Einrichtungen. Wegen des nicht überblickbaren Einflusses der für Vertikallasten nichttragenden Sekundärelemente kann eine Asymmetrie im Grundriss kaum ausgeschlossen werden. Den Auswirkungen der Torsionsbelastung kann nur durch entsprechende Berücksichtigung in der Berechnung und durch eine genügende Torsionssteifigkeit des Gebäudegrundrisses begegnet werden.

Zusammengebaute Gebäude

An Bauwerken mit Gebäudeabschnitten *stark unterschiedlicher Steifigkeit* wegen verschiedener Konstruktionsarten (z.B. Stahlbetonskelett und reiner Backsteinbau) oder stark unterschiedlicher Abmessungen konnten grössere Schäden festgestellt werden, die auf die Behinderung des individuellen Verformungsverhaltens zurückzuführen sind. Prinzipiell lässt sich das Problem des unterschiedlichen Schwingungsverhaltens einzelner Bauteile beherrschen durch die *Anordnung von Fugen,* die das Bauwerk in Abschnitte mit übersichtlichem Schwingungsverhalten unterteilen. Die Fugenbreite ist genügend gross zu wählen, da starke Unsicherheiten eine genaue Berechnung verunmöglichen. Es ist beispielsweise zu berücksichtigen, dass die üblicherweise am homogenen Tragwerk ermittelten Deformationen durch Rissbildung oder Plastifizierung unter Erdbebenbelastung erheblich grösser ausfallen können. Dazu ermöglicht ein genügend grosser Bewegungsspielraum eine stärkere Plastifizierung und damit eine grössere Tragkapazität für Erdbebenbelastung.

Sonderbauwerke

Für die Bemessung von Bauwerken, die infolge ihrer besonderen Form und Massenverteilung den Rahmen des üblichen sprengen, z.B. Brücken und Wassertürme, ist die Anwendung vereinfachter Erdbebenvorschriften nicht mehr möglich. Daher ist eine *dynamische Analyse,* die das Schwingungsverhalten des Tragwerks berücksichtigt und auf den effektiven physikalischen Begebenheiten des Erdbebens beruht, für eine zuverlässige Ermittlung des Verhaltens meist unumgänglich.

Sekundäre Bauelemente

Alle zu einem Bauwerk gehörenden Elemente und Einrichtungen beeinflussen das Schwingungsverhalten der Tragstruktur. Dazu sind insbesondere Trennwände, angehängte Fassadenplatten, Verkleidungen, Rohrleitungen und übrige Einrichtungen zu zählen. Diese sekundären Bauelemente werden im allgemeinen nicht in die Tragwerkanalyse einbezogen und daher auch nicht auf Erdbebenbeanspruchung ausgelegt. Bereits bei geringen Bewegungen können sie daher Beschädigungen erleiden, die eine zunehmende Veränderung des Schwingungsverhaltens bewirken. Dabei ist nicht vorauszusagen, ob sich die zusätzlichen Einflüsse auf das Tragverhalten durch stärkere Energieabsorption günstig oder beispielsweise durch zusätzliche Torsionsbewegungen ungünstig auswirken. Sofern angestrebt wird, dass Sekundärelemente die Erdbebenbelastung ohne wesentliche Beschädigung überstehen, sind sie zusammen mit dem Tragsystem zu analysieren und zu bemessen.

Verbindungen und Lagerung

Verbindung von Tragelementen

Werden bei der Auslegung und Bemessung von *vorfabrizierten* Bauwerken die Erdbebenkräfte nur mit der in den Normen geforderten Grösse oder überhaupt nicht berücksichtigt, kann dies zu stark unterdimensionierten Verbindungen der Tragelemente führen. Tragfähige Verbindungen sind auf die wirklichen Erdbebenbeanspruchungen auszulegen, die im Bauwerk auftreten können. Auch bereits bei schwacher Bebenbeanspruchung dürften reine Reibungsverbindungen nicht mehr genügen, die auftretenden Kräfte zu übertragen.

Befestigung von sekundären Bauelementen

Die nicht zur Tragstruktur gehörenden Bauteile, beispielsweise vorfabrizierte Fassadenplatten, Trennwände und Einrichtungen, insbesondere Maschinen, Lagergestelle und Rohrleitungen werden im Normalfalle direkt oder indirekt mit der Tragstruktur verbunden. Infolge der Bebenwirkung sind viele Schäden durch Verschiebungen oder Umstürzen von nicht oder nur ungenügend befestigten Fassadenplatten und Maschinen entstanden. Bei der Befestigung von Sekundärelementen sind die effektiven Beschleunigungen am Ort der Fixierung zu berücksichtigen, die erheblich grösser sein können als die Bodenerschütterungen.

Brückenlagerung

Im Gegensatz zu den alten Steinbogenbrücken wies ein beträchtlicher Teil der neu erstellten Stahlbetonbrücken Beschädigungen auf, die sich vornehmlich auf *Lager, Stützen* und *Widerlager* beschränkten. Von der Massenanordnung her gehören die Brückenbauten zu den Sonderbauwerken, da hier im allgemeinen schwere Träger von Balken- und Plattenbrükken auf verhältnismässig hohen und damit weichen Abstüt-

zungen gelagert sind. Die konventionellen Anforderungen an das Betriebsverhalten, die Aufnahme der Verkehrslasten, der Temperaturdehnungen und der Bremskräfte führen zu Lösungen, die häufig ein befriedigendes Verhalten während eines Erdbebens ausschliessen. Eine Stabilisierung der gewaltigen Massenkräfte bei einer Teilnahme des Bauwerks an der Erdbebenerschütterung ist mit herkömmlichen Methoden nicht zu verwirklichen. Eine Isolation des Brückenträgers, welche die Übertragung der Erdbebenerregung verhindern soll, führt zu Lagerkonstruktionen, deren Zuverlässigkeit diskutabel erscheint. Anzumerken bleibt: Die im Friaul vom Erdbeben betroffenen Stahlbetonbrücken haben wohl grosse und schwer zu reparierende Schäden erlitten, sie waren aber in keinem Fall einsturzgefährdet.

Verdankungen

Die Untersuchungen der Gebäudebeschädigungen im Friaul geschahen im Auftrag der Abteilung für die Sicherheit der Kernanlagen und mit Unterstützung der Kernkraftwerke *Leibstadt AG*, der *Kernkraftwerke Kaiseraugst AG*, der *Bernischen Kraftwerke AG* sowie der *l'Energie de l'Ouest-Suisse S.A.* Die Arbeiten im Erdbebengebiet wurden von Signore *Jannece* von der regionalen Bauverwaltung in Udine mit einem Überblick über das Schadenausmass unterstützt. Die Resultate der Erdbebenbeschleunigungsaufzeichnungen wurden von *Dr. Giuliani* vom *Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare* in *Rom* zur Verfügung gestellt. Der *Schweizerische Erdbebendienst* am *Institut für Geophysik der ETH Zürich* leistete Beiträge zur seismologischen Beurteilung des Bebens.

Literaturverzeichnis

[1] *Glauser, E.* und *Merz, H.:* «Erfassung und Verminderung von Erdbebenrisiken, zwischenstaatliche Konferenz im Rahmen der UNESCO», Schweiz. Bauzeitung, 94. Jahrgang, Heft 18, 1976.

[2] *«Decreto ministeriale»* 3. 3. 1975, publiziert in der *Gazetta ufficiale* vom 8. 4. 1975.

[3] *«Norme techniche per le costruzioni in zone sismiche»*, Roma, Istitute poligrafico dello Stato, 1976.

[4] *Dante, Bruno:* «L'edifizia nelle zone sismiche», Dedalo Libri, Bari.

[5] *Iaccarino, E.* (CNEN): «Carta sismica d'Italia», 1973.

[6] *Sponheuer, W.:* «Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik», Freiberger Forschungshefte C88, Berlin, 1960.

[7] *Karnik, V. / UNESCO:* «Survey of the seismicity of the Balkan Region: Catalogue of earthquakes.» Part I 1901–1970. Part II prior to 1901. Skopje, 1974.

[8] *Trifunac, M.D.:* «A note on the range of peak amplitudes of recorded accelerations, velocities and displacements with respect to the Modified Mercalli Intensity Scale», Earthquake Notes, Vol. 47, No. 1 (1976).

[9] *WASH – 1255. Newmark, N.:* Consulting Engineer Services, «A study of vertical and horizontal earthquake spectra», Directorate of Licensing U.S. Atomic Energy Commission, Washington D.C., April 1973.

[10] *Carozzo, M.T. et al:* «General catalogue of Italian earthquakes», Comitato Nazionale Energia Nucleare, Rom, 1973.

[11] *Gutenberg, B.* und *Richter, C.F.:* «Seismicity of the Earth and Associated Phenomena», Princeton University Press, Princeton, N.J., 1954.

[12] *USAEC Regulatory Guide: «Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants»*, Rev. 1, 12/1973, U.S. Atomic Energy Commission.

Adresse der Verfasser: *Basler & Hofmann*, Ingenieure und Planer AG, Forchstrasse 395, 8029 Zürich.

Der Januskopf der Herbizide – Gewässerunterhalt und Ökologie

DK 632.954

Noch mehr Menschen in der Dritten Welt müssten (ver)hungern und in den hochtechnisierten Staaten würden die Agrarpreise rasch klettern, gäbe es keine chemischen Schädlingsbekämpfungsmittel. Doch ist diese Betrachtung einseitig, denn je höher der Anteil dieser Substanzen in unserer Umwelt, desto gefährdeter ist der wichtigste Roh- und Lebensstoff: das Wasser. Bereits heute werden Flüsse (wie die norddeutsche Weser) und Seen (wie der oberbayerische Wagingersee) belüftet, das heisst künstlich mit Sauerstoff versorgt, um sie vor dem «Umkippen», dem ökologischen Tod zu bewahren.

Deshalb mutet auf den ersten Blick wie ein Irrtum an, womit sich eine Forschungsgruppe unter der Leitung von Prof. *B. Baitsch* an der Universität Bonn seit Juli 1975 beschäftigt: Die Gewässerunterhaltung mit Herbiziden.

Die Beherrschung des Bodenwasserhaushalts erfordert umfangreiche kulturtechnische Massnahmen, von denen bei unseren Klima- und Bodenverhältnissen der Bau und die Unterhaltung von Entwässerungsnetzen besondere Bedeutung besitzen. Dies aber bedeutet hohe Investitionen, die freilich nur dann gerechtfertigt sind, wenn die technischen Anlagen jederzeit die an sie gestellten Anforderungen erfüllen. Hierzu ist wegen der biologischen und mechanischen Beanspruchung der Gräben eine ständige Unterhaltung notwendig, deren Aufwand im Sinne einer volkswirtschaftlichen Kosten-Nutzen-Analyse besondere Bedeutung zukommt.

Der Lehrstuhl für Landwirtschaftlichen Wasserbau und Kulturtechnik, dem Prof. Baitsch vorsteht, hat sich in den vergangenen Jahren intensiv mit den Problemen der Gewässerunterhaltung befasst. Insbesondere wurde die hydraulische Leistungsfähigkeit mechanisch unterhaltener Entwässerungsgräben in umfangreichen Versuchsprogrammen geklärt; dabei hat sich ein verstärkter Trend von der mechanischen zur chemischen Unterhaltung durch Herbizide («chemische Sense») herauskristallisiert, und zwar aus folgenden Gründen:

1. Die Langzeitwirkung dieser Unkrautvertilgungsmittel gewährleistet eine kontinuierliche hydraulische Leistungsfähigkeit der Entwässerungsnetze
2. Die Durchführung der chemischen Unterhaltung ist technisch problemlos und kostengünstig
3. Umweltschäden sind bei gewissenhafter Anwendung der Mittel unerheblich oder nicht feststellbar.

Dem stehen Argumente gegenüber, die den Einsatz von Herbiziden für die Gewässerunterhaltung doch bedenklich erscheinen lassen:

1. Langzeitig wirken sich die Herbizide in Trockenjahren negativ auf das Entwässerungsziel (Dränvorflut – Beherrschung des Grundwasserstandes) aus
2. Durch die Anwendung von Herbiziden wird wegen deren Wirkungsweise die Vegetation in den behandelten Grabenprofilen vollkommen oder zumindest weitgehend zerstört. Dies kann zu erheblichen Erosionen und verstärkten Anlandungen führen, die für die Instandsetzungen wesentlich kürzere Intervalle erforderlich machen – wodurch die mechanische Unterhaltung billiger erscheint
3. Es entsteht eine unmittelbare und mittelbare Beeinflussung der Gewässer und Uferzonen, die zusätzliche Umweltbelastungen hervorruft.

Nachdem die meisten der hier vorgetragenen Für- und Gegenargumente nicht ausreichend beantwortet sind, ist es