

# Zur Erdbebensicherheit der Kernanlagen in der Schweiz: die Pioniere der "Steinzeit"

Autor(en): **Zwicky, Peter / Tiniç, Sener / Kluge, Daniel**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **118 (2000)**

Heft 40: **Erdbebenvorsorge in der Schweiz**

PDF erstellt am: **22.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79985>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Peter Zwicky, Zürich, Sener Tiniç, Baden, Daniel Kluge, Villigen

# Zur Erdbebensicherheit der Kernanlagen in der Schweiz

## Die Pioniere der «Steinzeit»

**«Die Baudynamik und das Erdbebeningenieurwesen befinden sich noch in der Steinzeit... deshalb sind diese Gebiete so faszinierend», sagte Professor Hugo Bachmann in seiner Abschiedsvorlesung. Es darf wohl ohne zu übertreiben angefügt werden, dass die Planer, Ersteller, Betreiber und Aufsichtsbehörden der Kernkraftwerke einen wesentlichen Anteil der «steinzeitlichen» Pionierarbeit geleistet haben. Wegen des Risikopotentials der Werke waren die Anforderungen an die Erdbebensicherheit seit den Anfängen in den späten 60er-Jahren höher als bei andern Bauwerken. Sie sind seither noch beträchtlich verschärft worden und haben die Forschung und Entwicklung stark beeinflusst.**

Ein Erdbeben stellt unkontrolliert freigesetzte Energie dar. Trotz grosser Fortschritte in der Erdbebenforschung können heute Ort und Grösse eines auftretenden Erdbebens in einer gewissen Zeitperiode nicht durch eigentliche Prognosen, sondern nur durch Wahrscheinlichkeiten ausgedrückt werden. Diese Aussagen sind mit Unsicherheiten behaftet.

Im Gegensatz dazu beruht die Stromproduktion im Kernkraftwerk auf genau berechneten und gesteuerten Vorgängen. Die Untersuchung der Erdbebensicherheit eines Kraftwerks kann als Antwort auf die Frage «Wie wird der unkontrollierte Vorgang, also ein Erdbeben, die kontrollierten Prozesse im Kernkraftwerk beeinflussen?» formuliert werden. Die Gewährleistung der Erdbebensicherheit bedeutet, dass die Prozesse im Reaktor trotz des Störfalls Erdbeben unter Kontrolle bleiben und keine Radioaktivität in die Umwelt gelangt. Dazu braucht es mehr als nur das Abbrechen des nuklearen Spaltprozesses (Reaktorabschaltung), was durch Einfahren der Kontrollstäbe sehr schnell, innert weniger Sekunden, möglich ist. Notwendig ist auch das sichere Abführen der Nachwärme, d.h. der im Reaktorkühlsystem vorhandenen und auch nach der Reaktorabschaltung noch anfallenden Wärme. Dies bedeutet, dass Notkühlsysteme mit mehreren Flüssigkeits-

1  
Die Kernkraftwerke Beznau 1 und 2

behältern, elektrischen und mechanischen Einrichtungen nach dem Erdbeben funktionieren müssen. Diese Systeme beziehen den Strom aus Notstromsystemen. Die Erdbebensicherheit des Kernkraftwerks ist dann gewährleistet, wenn die nötige Anzahl sicherheitsrelevanter Systeme nach dem Erdbeben funktionstüchtig bleibt. Deswegen umfasst eine Erdbebenuntersuchung nicht nur die Stabilitäts- und Spannungsanalyse der Bauwerke, sondern auch der sicherheitsrelevanten Einrichtungen.

### Der Beitrag der Standortwahl

Mit der Standortwahl kann die Erdbebensicherheit am stärksten beeinflusst werden. Die Kernanlagen werden weltweit üblicherweise in seismisch relativ schwach gefährdeten Regionen errichtet, weit entfernt von aktiven Verwerfungen, auf tragfähigem Baugrund ohne Verflüssigungs- und Rutschgefahr. Eine Standortuntersuchung kann mehrere Jahre dauern. Sie berücksichtigt die lokalen Baugrundverhältnisse und die Seismizität in Einflusszonen bis zu einem Radius von rund 200km um den Standort, wobei die Untersuchungstiefe mit der Entfernung abnimmt. Bild 2 zeigt die Standorte der Kernkraftwerke in der Schweiz und die relative regionale Erdbebengefährdung. Die Werke stehen in seismisch relativ ruhigen Zonen, ausserhalb der Gebiete mit erhöhter Gefährdung.

### Die Auslegungsanforderungen und die Berechnung der Tragwerke

Der Auslegung der Anlage werden das sogenannte Sicherheitserdbeben (Safe Shutdown Earthquake, SSE) und das Be-

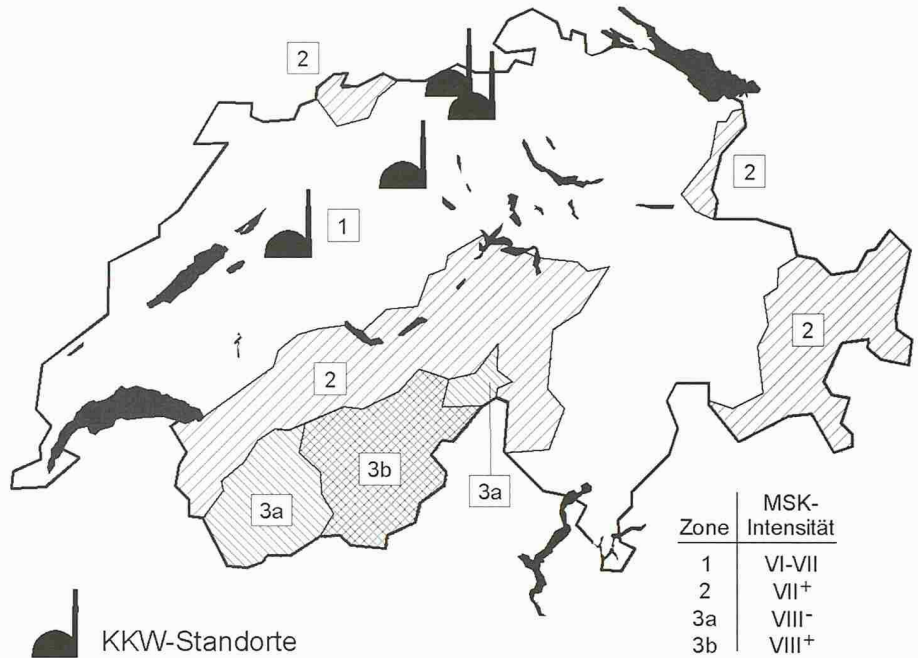


triebserdeben (Operating Basis Earthquake, OBE) zugrundegelegt. Das SSE repräsentiert ein Ereignis mit der statistischen Wiederkehrperiode von 10 000 Jahren, bei welchem die Anlage sicher abgeschaltet werden und die Integrität des Kühlsystems gewährleistet bleiben muss. Die Stärke des OBE wird aufgrund wirtschaftlich-betrieblicher Kriterien des Kernkraftwerks festgelegt. Das OBE soll während des Betriebs mit einer Ereigniswahrscheinlichkeit von höchstens rund 10 % erreicht oder überschritten werden. Dies entspricht einer Wiederkehrperiode von einigen hundert Jahren. Nach einem OBE muss nebst dem sicheren Abschalten ein Weiterführen des Betriebs möglich sein, nach einer Kontrolle und gewissen Instandstellungsarbeiten.

Die Bauwerke der Anlagen sind aufgrund ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung klassiert. Bei den Bauwerken der Erdbebenklasse I wird gefordert, dass bei Einwirkungen bis zur Stärke eines SSE keine Materialbeanspruchungen über die Fließgrenze zu erwarten sind. Plastische Verformungen mit entsprechenden Kraftumlagerungen werden für solche Bauwerke grundsätzlich nicht zugelassen. Nichtlineares Verhalten wird im kontrollierten Ausmass nur in Ausnahmefällen toleriert.

Die Erdbebenberechnungen der Bauwerke liefern die Schnittkräfte für die Bemessung und die Nachweise der Bauteile und sowie die Bemessungsspektren und Relativverschiebungen für die Qualifikation der Ausrüstungen. Die Berechnungsmethoden wurden seit der Pionierzeit kontinuierlich weiterentwickelt.





Als Standard für Bauwerke gilt heute eine lineare dynamische Berechnung mit der Finite-Element-Methode, unter Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Interaktion. Je nach Schwerpunkt der Fragestellung werden Berechnungen mit der Antwortspektren-Methode, mit der Integration im Zeitbereich oder - vor allem für die Berechnung der Boden-Bauwerk-Interaktion - mit Lösung der Bewegungsgleichungen im Frequenzbereich durchgeführt. In speziellen Fällen werden auch nichtlineare dynamische Berechnungen verwendet. Das Bild 3 zeigt die Modellierung eines Bauwerks des Zentralen Zwischenlagers Würenlingen und eine damit berechnete typische Eigenschwingung.

Für die Modellierung des Gesamtsystems und für die Definition der Erdbebenanregung auf Fundamentniveau sind die dynamischen Eigenschaften des Baugrundes massgebend. Die Profile der Scherwellengeschwindigkeiten, der Materialdämpfung, die Dehnungsabhängigkeit dieser Parameter sowie die passende Beschreibung der Abstrahlungsdämpfung im Boden werden gründlich untersucht und in das Gesamtmodell integriert. Zudem werden mit Freifeldberechnungen die lokalen Aufschaukelungseffekte und deren Einfluss auf das Bauwerk berücksichtigt.

**Der Nutzen experimenteller Untersuchungen**

«Experimentelle Forschung kann nicht durch Computersimulation ersetzt werden», heisst eine weitere wichtige These der Abschiedsvorlesung von Pro-

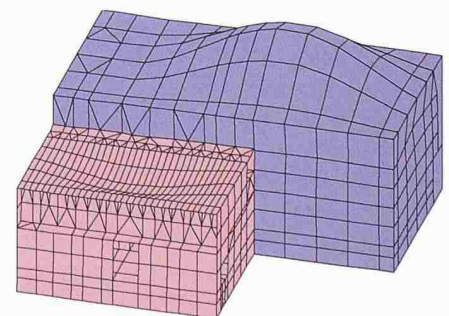
fessor Bachmann. Für die Erdbebenqualifikation der Kernanlagen sind bis heute zahlreiche vor allem internationale Forschungsprogramme durchgeführt worden. Durch die Beteiligung der Schweizer Industrie und der Aufsichtsbehörden an den dynamischen Grossversuchen am stillgelegten Heissdampfreaktor in Deutschland, an den Modelltests in Taiwan und an den Rütteltischversuchen in Japan konnten wertvolle Erfahrungen über die Möglichkeiten und Grenzen der Berechnungsmodelle gewonnen werden.

Auch an den Anlagen in der Schweiz sind schon umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt und ausgewertet worden, so beispielsweise bei den Kernkraftwerken Beznau, mit den Schwingungsversuchen am fertigerstellten Borwassertankgebäude und mit den Schwingungsmessungen in der Dampfausblasestation. Nicht nur die experimentelle Forschung, sondern auch die experimentelle seismische Qualifikation von Ausrüstungen (z.B. Rütteltischtests für elektrische Schaltschränke, Armaturen, Ventile) liefert Erkenntnisse zum dynamischen Verhalten, die in die Modellierungen zurückfliessen.

**Die seismische Requalifikation**

Das erste Kernkraftwerk der Schweiz, Beznau 1, wurde Mitte der 60er-Jahre projektiert und 1969 in Betrieb genommen. Diesem folgten 1971 Beznau 2 und 1972 Mühleberg. Diese drei Kernkraftwerke gehören zur ersten Generation. Sie wurden nach den damaligen Anforderungen an die Erdbebensicherheit gemäss amerikanischen Vorschriften ausgelegt und ge-

2 Die Erdbebengefährdungszonen der Schweiz gemäss der Norm SIA 160 und die Standorte der Kernkraftwerke



3 Finite-Element-Modell für die Berechnung eines Bauwerks des Zentralen Zwischenlagers Würenlingen mit typischer Eigenschwingung

baut. Die neuen Kernkraftwerke Gösgen (1979) und Leibstadt (1984) wurden nach strengeren Anforderungen ausgelegt.

Im Rahmen von Nachrüstprojekten sind deshalb die älteren Kernkraftwerke seismisch requalifiziert worden. Dabei wurden alle bestehenden sicherheitsrelevanten Bauten und Komponenten mit umfangreichen Untersuchungen nachgeprüft und entsprechend nachgerüstet. Die zusätzlich redundanten Notstandssysteme wurden in neuen erdbebensicheren Gebäuden untergebracht. Mit der Requalifikation wurde die Erdbebensicherheit der älteren Anlagen auf das Niveau der neuen Anlagen gehoben.

Im Kernkraftwerk Beznau zum Beispiel wurden in den Jahren 1992 und 1993 nachträglich sogenannte Notstandssysteme in Betrieb genommen. Diese sind in den gebunkerten Notstandsgebäuden untergebracht. Die neuen Systeme erweitern die bereits bestehenden Sicherheitseinrichtungen. Sie sind in der Lage, auch bei Einwirkungen von aussen den Reaktor abzuschalten und mit eigenen Ausrüstungen, Hilfsanlagen und Betriebsmittelvorräten während mindestens zehn Stunden ohne Bedienungsmannschaft in einem sicheren Zustand zu halten.

#### **Die Bedeutung der Betriebssicherheit**

In der Kerntechnik wird der Betriebssicherheit grösste Beachtung geschenkt, dies nicht nur im Normalbetrieb, sondern auch bei allfälligen ausserordentlichen Vorkommnissen, so bei unvorhersehbaren Defekten an Anlageteilen. Aus diesem Grund sind die wichtigen Komponenten der Anlage, wie Steuerungen und Alarmauslösungen, gleich doppelt und mehrfach vorhanden. Fällt eine bei einem Erdbeben aus, steht immer noch eine zweite oder dritte zur Verfügung, welche dieselben Funktionen erfüllen kann.

Jedes Kernkraftwerk verfügt über eine seismische Instrumentierung. Diese liefert Daten über seismische Erschütterungen, welche die Anlage betroffen haben. Damit gibt sie Entscheidungsgrundlagen über den Anlagenbetrieb nach einem Erdbeben. Darüber hinaus dient das Datenmaterial zur Überprüfung von Berechnungen und zur Entwicklung von Berechnungsmodellen. Ein im freien Feld installiertes Starkbebenmessgerät ist Bestandteil dieser Instrumentierung. Wenn die Schwingungsamplituden der Bodenbewegungen einen gewissen Schwellenwert übersteigen, werden die Bodenschwingungen aufgezeichnet. Im Freifeldgerät beim Kernkraftwerk Beznau wurden beispielsweise bis jetzt zwei Erdbeben registriert, nämlich die Erdbeben von Mühlhausen am 15. Juli 1980

und von Wutöschingen am 30. Dezember 1992. Die registrierten Beschleunigungswerte waren sehr klein. Dennoch konnten die Seismogramme ausgewertet und mit den Auslegungsgrundlagen verglichen werden.

#### **Die Aufgaben der Zukunft**

Heute ist die Zukunft der Kernanlagen umstritten und ungewiss. Als neue Anlagen stehen vorerst nur die unvermeidlichen Abfallager für die Zwischenlagerung und schliesslich für die Endlagerung der radioaktiven Abfälle in der Planung.

Die bestehenden Werke erfordern aber weiterhin unsere Pflege und Aufmerksamkeit. Sie sind laufend bezüglich des aktuellen Stands der Technik zu prüfen und falls erforderlich auch nachzurüsten. Praktisch erfolgt das in der Schweiz durch periodische Sicherheitsüberprüfungen, welche die Aufsichtsbehörde in Zehnjahresintervallen verlangt und beurteilt.

Ein weiteres Instrument der Risiko- steuerung stellen die bei allen Werken durchgeführten probabilistischen Risikoanalysen dar. Deren Ergebnisse - insbesondere der teilweise beträchtliche Beitrag des Erdbebenrisikos zum Gesamtrisiko - haben die Aufsichtsbehörde dazu bewogen, eine Richtlinie für die Neubestimmung der standortspezifischen Erdbebengefährdung aller vier Werke zu erarbeiten. Damit sollen die Erkenntnisse aus den neueren geophysikalischen Untersuchungen im Schweizer Mittelland einfließen, und die Grundlagen sollen bezüglich des methodischen Umgangs mit Unsicherheiten dem aktuellen Stand der Technik entsprechen.

---

#### Adressen der Verfasser

*Peter Zwicky*, Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Forchstrasse 395, 8029 Zürich, *Sener Timi*, Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Parkstrasse 23, 5401 Baden, *Daniel Kluge*, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, 5232 Villigen-HSK