Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 81 (1990)

Heft: 20

Artikel: Risikoanalysen als Instrument zur Erhöhung der Sicherheit von KKW

Autor: Weber, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903174

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: 02.07.2025

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

Risikoanalysen als Instrument zur Erhöhung der Sicherheit von KKW

R. Weber

Seit der Katastrophe von Tschernobyl im Jahre 1986 stehen Reaktor-Sicherheitsstudien bzw. «Risikoanalysen» im Mittelpunkt der Kernenergie-Diskussion. Ihr rechnerisches Ergebnis, eine Wahrscheinlichkeitszahl für das Eintreten eines schweren Unfalles, trägt jedoch kaum zur Annäherung der Standpunkte bei. Diese Studien, die jeweils etliche Jahre und Millionen kosten, liefern jedoch auch Erkenntnisse über Schwachstellen in Kernkraftwerken und damit eine Grundlage zur Erhöhung ihrer Sicherheit.

Depuis la catastrophe de Tchernobyl en 1986, la discussion sur le nucléaire tourne essentiellement autour des études de sécurité, ou plus précisément des analyses du risque. Leur résultat mathématique, un calcul des probabilités d'apparition d'un accident grave, ne contribue toutefois guère à rapprocher les avis. Néanmoins, ces longues et fort coûteuses études mettent aussi en évidence les points faibles dans les centrales nucléaires et fournissent des informations fondamentales permettant d'en améliorer la sécurité.

Adresse des Autors:
Dr. *Rudolf Weber*, Wissenschaftsjournalist, 5225 Oberbözberg

Im Zeitalter der Segelschiffe musste ein Schiffseigner aufgrund der Erfahrung damit rechnen, dass jedes Jahr von zehn Schiffen nur deren neun zurückkehrten. Die Wahrscheinlichkeit, dass eines im Sturm verloren ging oder an Klippen zerschellte, betrug also ein Zehntel bzw. 10^{-1}. Sie wurde kleiner, als stählerne Dampfer aufkamen, die vom Wind unabhängig waren, und sie hat dramatisch abgenommen, seit Funk und später Radar die Schiffe vor Stürmen und Eisbergen warnen. In den sechziger Jahren stiessen dann die Supertanker in eine neue Dimension von Grösse, Baukosten und Frachtwert vor, wofür man nicht auf die Erfahrung zurückgreifen konnte. Daher liessen einige Reeder, ehe sie investierten, ihr Risiko aufgrund von theoretischen Wahrscheinlichkeiten bzw. Probabilitäten abschätzen – die probabilistische Risiko- oder Sicherheitsanalyse, kurz PRA bzw. PSA, war aus der Taufe gehoben. Sogleich bedienten sich auch Flugzeugbau und Raumfahrt, dann auch die Kerntechnik des neuen Hilfsmittels, ebenfalls Gebiete mit vielschichtiger Technik und ohne Erfahrungswerte.

Rasmussen begründet Methodik

In der Kerntechnik bedeutet Sicherheit, dass keine unzulässigen Mengen radioaktiver Spaltprodukte unkontrolliert an die Umwelt gelangen. Letzteres kann bei einem Leichtwasserreaktor nur dann eintreten, wenn der Kern ohne Wasser bzw. Kühlung wäre, weil das sein Schmelzen zur Folge hätte. Aus der Sicht der sechziger Jahre konzentrierten sich Sicherheitsbetrachtungen auf solche Kühlmittelverlust-Störfälle, verursacht von Lecks im Kühlkreislauf des Reaktors. Im Vordergrund stand der Bruch einer Hauptkühlmittel-Leitung als «Auslegungsstörfall». Dagegen setzte man als Massnahme die Kernnotkühlung, welche den Kern auch nach einem Leitungsbruch mit Wasser bedeckt.

1975 aber zeigte sich, dass in Kernkraftwerken auch kleine Ursachen ganz grosse Wirkung haben können, z.B. einen Kühlmittelverlust ohne vorherigen Bruch einer Hauptkühlmittel-Leitung: In der amerikanischen Anlage Browns Ferry steckte ein Monteur mit einer Kerze unabsichtlich die Isolierungen der Reaktor-Steuerkabel in Brand, was den Ausfall der Reaktorsteuerung zur Folge hatte. Dadurch aufgeschreckt, gaben die US-Sicherheitsbehörden eine umfassende PRA in Auftrag. 1977 wurde sie veröffentlicht und nach ihrem Leiter als Rasmussen-Studie bekannt. Sie bezifferte die Wahrscheinlichkeit eines Kernschmelzens mit etwa 10^{-5}, d.h. einmal in 100 000 Reaktor-Betriebsjahren.

Ereignis- und Fehlerbäume

Wie gelangen Rasmussen und seine Mitarbeiter zu ihren Ergebnissen? Zunächst stellen sie einen «Ereignisbaum» auf. Beispielsweise nehmen sie als auslösendes Ereignis an, die normale Stromversorgung des Kernkraftwerks falle aus. Springt dann, wie vorgesehen, die Reaktorschnellabschaltung an oder nicht? Wenn nein, kann es zum Kernschmelzen kommen. Wenn aber ja, stellt sich die Frage, ob – wie vorgesehen – die Notstromversorgung anspricht (die zum Betrieb der Einrichtungen zur Nachwärme-Abfuhr ausreicht). Wieder gibt es die beiden Möglichkeiten einer Ja-/Nein-Weiche bzw. Verzweigung. Über weitere Weichen allen denkbaren Pfaden folgend, gelangt man schliesslich zum Endpunkt, d.h. zu einer Aussage, ob die Kernkühlung beherrscht werde oder nicht. Zeichnet man die Pfade und Weichen auf, ergibt sich ein im-

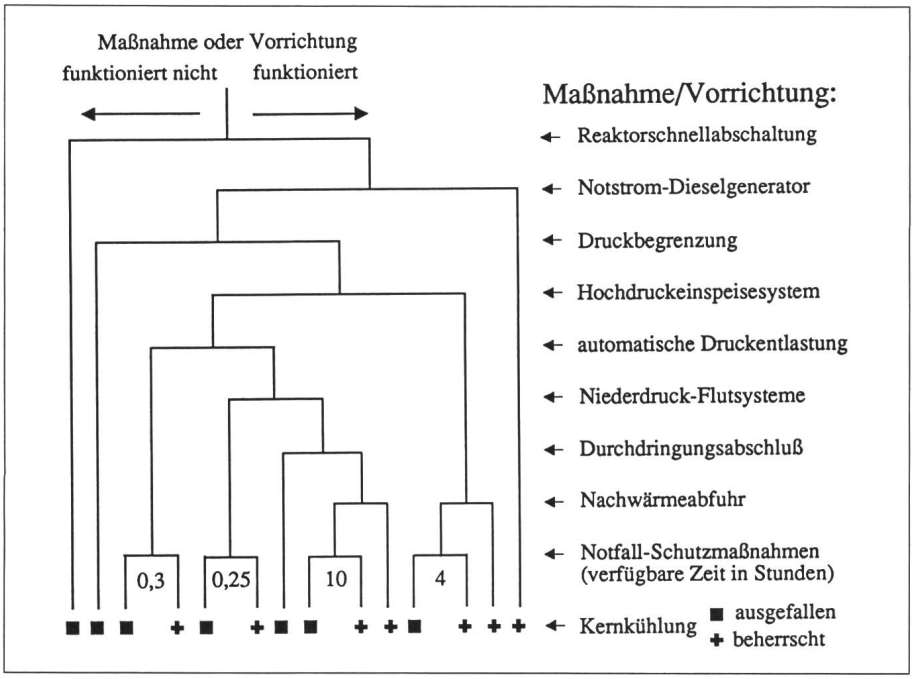

Bild 1 Ereignisbaum am Beispiel «Notstromfall», d.h. Ausfall der normalen Stromversorgung eines Leichtwasserreaktors: Welche Pfade führen zum Verlust der Kernkühlung? Sie ergeben sich aus Verzweigungen, wo für diesen Fall vorgesehene Vorrichtungen ansprechen oder nicht. Aus dem Ereignisbaum wird ein Fehlerbaum, indem man an den Verzweigungen die Ausfallwahrscheinlichkeiten der einzelnen Vorrichtungen einsetzt.

Bild 2 Im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) wird in internationaler Zusammenarbeit die Reaktion zwischen Kernschmelze und Beton untersucht, um realistische Messwerte für Quellterm-Studien zu gewinnen. Diese Reaktion würde stattfinden, nachdem die Schmelze durch den Reaktordruckbehälter gedrungen und auf das Betonfundament des Reaktorgebäudes gefallen wäre. Für die Versuche wurde auf dem KfK-Gelände ein eigenes Gebäude errichtet, die Beton-Test-Anlage BETA (Betontiegel-Schmelz-Anlage). Photo KfK

mer feiner verzweigtes Astwerk - ein Ereignisbaum. Dieser listet also auf, welche Folgeereignisse nach einem bestimmten auslösenden Ereignis eintreten können, je nachdem, ob die vorgesehenen Massnahmen greifen oder nicht.

Der nächste Schritt von Rasmussen & Co. besteht darin, aus Ereignisbäumen Fehlerbäume zu machen. Dazu geben sie an jeder Weiche eines Ereignisbaums die Wahrscheinlichkeiten an - z.B. spreche die Reaktorschnellabschaltung in 999 999 von einer Million Fällen an und nur in einem von einer Million nicht (Wahrscheinlichkeit 10^{-6}). Indem man die Wahrscheinlichkeitszahlen an den Weichen eines Pfades miteinander multipliziert, erhält man die Eintrittshäufigkeit eines bestimmten Pfades. Und die Summe der Eintrittshäufigkeiten aller Versagenspfade ergibt zuletzt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Ausfall der Stromversorgung ungenügende Kernkühlung nach sich zöge.

Durch «Harrisburg» bestätigt

So mathematisch korrekt diese Rasmussen-Methodik auch ist, so sind ihre Ergebnisse doch zwangsläufig ungenau. Zum einen fehlen - 1975 noch mehr als heute - verlässliche Statistiken über das Versagen von Teilen eines Kernkraftwerks. Zuverlässig kann eine Statistik ja nur sein, wenn sie eine grosse Zahl von Ereignissen umfasst, aber diese grosse Zahl gibt es in der jungen und auf höchste Qualität getrimmten Kerntechnik eben (noch) nicht. Rasmussen wie seine Nachfolger müssen sich daher mit Schätzungen behelfen, die allerdings auf der sicheren Seite liegen oder «konservativ» sind, so dass das Endergebnis jedenfalls schlechter als die Wirklichkeit ausfällt. Zum andern gibt es keine Gewähr dafür, dass wirklich alle wichtigen Versagenspfade erkannt und keine übersehen werden.

Ergebnis der Rasmussen-Studie waren schliesslich Zahlen für die Häufigkeiten verschiedener Unfall-Abläufe mit Kernschmelzen und dessen Folgen. Kernenergie-Gegner interpretierten die Studie dahingehend, dass die schlimmsten denkbaren Folgen ja auch schon morgen eintreten könnten, während Befürworter diese Wahrscheinlichkeit für derart gering hielten, dass man den Fall «praktisch ausschliessen» dürfe. Kernkraftwerk-Her-

steller und -Betreiber wiederum stuften die Arbeit allzu theoretisch-wissenschaftlich und für die Praxis ohne grosse Bedeutung ein.

«Harrisburg», das sich 1979 ereignete, gab beiden Lagern recht. In diesem US-Kernkraftwerk ereignete sich zwei Jahre nach Veröffentlichung der Rasmussen-Studie ein teilweises Kernschmelzen, zugleich aber hielt der Sicherheitsbehälter um den Reaktor, das Containment, dicht und liess keine radioaktiven Stoffe in die Umgebung entweichen. Von nun an wurden die Rasmussen-Studie und ihre Methodik ernst genommen – so z.B. baute auch die 1976 begonnene deutsche Reaktorsicherheitsstudie darauf auf.

Bild 3 Das Innere von BETA: Im schwarz umhüllten Tiegel (links) «fressen» sich 600 kg einer 2400 °C heissen, nicht radioaktiven Schmelze aus Reaktorstahl bis zu einen Meter tief in Reaktorbeton. Durch die 5 bis 7 Meter starken Betonfundamente deutscher Druckwasserreaktoren würde die Schmelze frühestens nach 4 Tagen bis in den Erdboden vordringen und dort (infolge Kühlung durch das Grundwasser) erstarren. Photo KfK

Tschernobyl verstärkt Interesse

1986 brachte die Katastrophe von Tschernobyl neues Interesse an schweren Reaktorunfällen, die auf Befürworterseite bis dahin nicht für möglich gehalten worden waren. Zwar war in der Ukraine ein ganz anderer Reaktortyp als die im Westen vorherrschenden Leichtwasserreaktoren durchgegangen, noch dazu ohne Containment. Doch gänzlich ausschliessen, das hatte auch der 1979 vorgestellte Teil A der deutschen Studie ergeben, durfte man ein Versagen des Containments und daher einen schweren Unfall auch im Westen nicht mehr. PRA wurden nun von den Sicherheitsbehörden aller westlichen Kernenergie-Länder verlangt und für alle ihre Kernkraftwerke vorgesehen. Hatte man sich nämlich vorher mit allgemeinen Studien über einen Reaktortyp zufriedengegeben, so folgte man jetzt der Erkenntnis, dass jede Anlage ihre Eigenheiten hat, die sie in Sachen Sicherheit von anderen, auch solchen desselben Typs, unterscheidet.

Mit Nachdruck und grossen personellen wie finanziellen Mitteln betreiben vor allem Deutschland, Frankreich, Grossbritannien, Japan und die USA theoretische wie experimentelle Arbeiten zur Sicherheitsforschung. Aber auch die Schweiz, die Reaktorsicherheit angesichts der hohen Bevölkerungsdichte immer grossgeschrieben hat, spricht kräftig mit. Zentrum der schweizerischen PRA-Arbeiten ist das Paul-Scherrer-Institut in Würenlingen. In der Person von Dr. Peter Hosemann leitet ein Fachmann das Programm «LWR-Sicherheit», der schon an der deutschen PRA von Anfang an mitgearbeitet hatte. Hosemann unterscheidet in einer umfassenden PRA drei Stufen, nämlich Reaktor-Analyse, Quellterm-Studie und Unfallfolgen-Abschätzung.

Umfassende PRA: drei Stufen

Für die Reaktor-Analyse macht sich das PRA-Team, das selbstverständlich die Kerntechnik aus dem ff kennt, mit den Besonderheiten der zu studierenden Anlage vertraut und erstellt daraufhin erste Ereignis- und Fehlerbäume. Aus diesen werden jene Pfade und Mechanismen herausgesucht, die Unfälle auslösen könnten. Pfade mit ähnlichem Verlauf fasst man zu Gruppen zusammen, deren jede ihren charakteristischen Ereignis- und Fehlerbaum erhält. Als besondere Schwierigkeit dabei nennt Hosemann das Abschätzen der Wahrscheinlichkeit, dass das Bedienungspersonal eines Kernkraftwerks Fehler begeht. Von all den Abläufen, die da zusammenkommen, nimmt man schliesslich nur die repräsentativen, weil sonst der Rechenaufwand ins Unermessliche stiege. Auch so bleiben ungefähr 15 Fehlerbäume (von ursprünglich über 150) übrig, deren jeder den Umfang eines dicken Kataloges annimmt. Am Ende steht eine Wahrscheinlichkeit für das Kernschmelzen – beispielsweise einmal in 100 000 Betriebsjahren wie bei Rasmussen.

Als «Quellterm» bezeichnet man die Gesamtheit der radioaktiven Spaltprodukte, die bei einem Kernschmelzen aus dem Reaktor in die Umgebung freigesetzt würden. Gegenstand von Quellterm-Studien, die sich an die Abläufe der zuvor bestimmten Ereignis- und Fehlerbäume anschliessen, sind – der Reihe nach – die im Reaktor zu Beginn des Schmelzens enthaltene Ra-

Bild 4 Für Versuche, wie sich Aerosole im Innern des Containments ausbreiten, abbauen und ablagern, steht im Battelle-Institut in Frankfurt ein Modell-Containment. Sein Durchmesser ist mit 20 Metern rund ein Drittel so gross wie der des 1200-Megawatt-Kernkraftwerks Biblis A. Bei einem Vesuch zur Nachbildung der Freisetzung von Aerosolen nach einem Kernschmelzen haben sich Aerosole, hier aus nichtradioaktivem Eisenoxid, als bräunlicher Belag auf allen Innenflächen niedergeschlagen, insbesondere auf kalten. Photo KfK

dioaktivität, der Ablauf der Kernzerstörung, das Versagen von Reaktordruck- und Sicherheitsbehälter, die Rückhaltung von Spaltprodukten in Wasser und an Oberflächen und schliesslich die Freisetzung von Spaltprodukten über Leckagewege nach aussen. Es gilt, all die verschiedenen Spaltprodukt-Elemente je nach Schmelz-Ablauf sowie chemischer und physikalischer Form zu verfolgen. Am PSI macht man das nicht nur in der Theorie, vielmehr stellt man auch Experimente an. Bei Versuchen zur Klärung der Frage, wie viele Spaltprodukte, die mit einem Gas- und Wasserdampfstrom in eine Wasservorlage eintreten, dort hängenbleiben, ist Würenlingen sogar international führend.

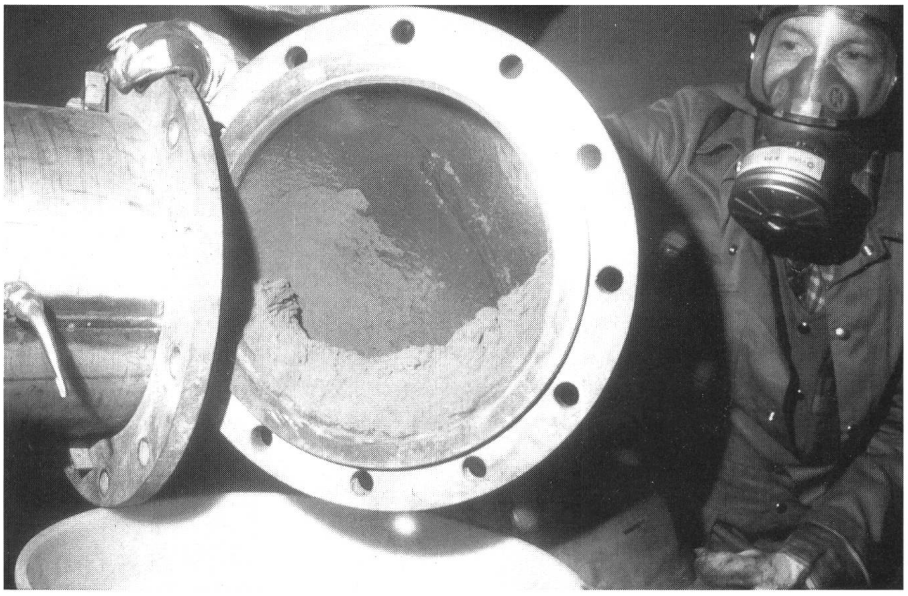

Bild 5 Im unvollendet gebliebenen Kernkraftwerk Marviken, Schweden, wurden Aerosol-Freisetzungsversuche aus Reaktorbauteilen voller Grösse – Reaktordruckbehälter und Druckhalter – angestellt. 16 Organisationen aus Europa, Nordamerika und Asien beteiligten sich an den Kosten von insgesamt 30 Millionen US-Dollar. Die Vesuche mit nicht radioaktivem Jod, Cäsium und Tellur haben u.a. gezeigt, dass sich in der Rohrleitung zur Druckentlastung des Reaktordruckbehälters grosse Mengen Aerosole ablagern.

Auch bei der Abschätzung der Unfallfolgen bleibt die Methodik dieselbe. Es werden verschiedene Abläufe verfolgt, und je Ablauf müssen bis zu 2500 verschiedene Wetterbedingungen berücksichtigt werden, um die Ausbreitung der radioaktiven Stoffe mit dem Wind beschreiben zu können. Vor allem die Entwicklung der Ausbreitung über die Zeit ist wichtig, weil man daraus Anhaltspunkte für Schutzmassnahmen wie eine eventuelle Evakuierung gewinnt.

Enormer Aufwand

Die Ereignis- und Fehlerbäume werden längst nicht mehr von Hand gezeichnet, sind doch bisweilen an die 5000 einzelne Teile miteinander logisch zu verknüpfen. Diese Verknüpfung in Form mathematischer Gleichungen ist eine schwierige Aufgabe, die viel Können und Erfahrung voraussetzt. Sie wird heute erleichtert durch standardisierte Rechnerprogramme, die auch auf PC laufen. Für die Berechnung von Quellterm und Unfallfolgen aber sind Grossrechner unentbehrlich. Das verdeutlicht schon die Summe von 46 vollen Tagen, die der Grossrechner der ETH Zürich allein für zwei Pfade einer Quellterm-Studie am Kernkraftwerk Mühleberg benötigte. Da ein Rechentag rund 130 000 Franken kostet und ein Dutzend hochqualifizierter Fachleute mindestens ein Jahr lang an einer Quellterm-Studie arbeiten, erreichen die Gesamtkosten leicht fünf und mehr Millionen Franken. Die Kosten für eine Reaktor-Analyse und für eine Unfallfolgen-Abschätzung liegen je in derselben Grössenordnung.

Internationale Zusammenarbeit ist in Sachen PRA selbstverständlich, zumal sie das Problem der Vollständigkeit mildert: Je mehr verschiedene Stellen nach Versagenspfaden spüren, desto grösser die Chance, dass kein wichtiger unentdeckt bleibt. Ein solcher Pfad, der von einem simplen Leck in einem Dampferzeuger-Rohr eines Druckwasserreaktors zum Kernschmelzen führt, wurde erstmals 1989 in der deutschen Risikostudie, Phase B, berücksichtigt. Da sich die letztendlich ausgewiesene Kernschmelz-Wahrscheinlichkeit als Summe der Eintrittshäufigkeiten aller Versagenspfade ergibt, vermöchte auch ein «vergessener» Pfad dieses Ergebnis nicht we-

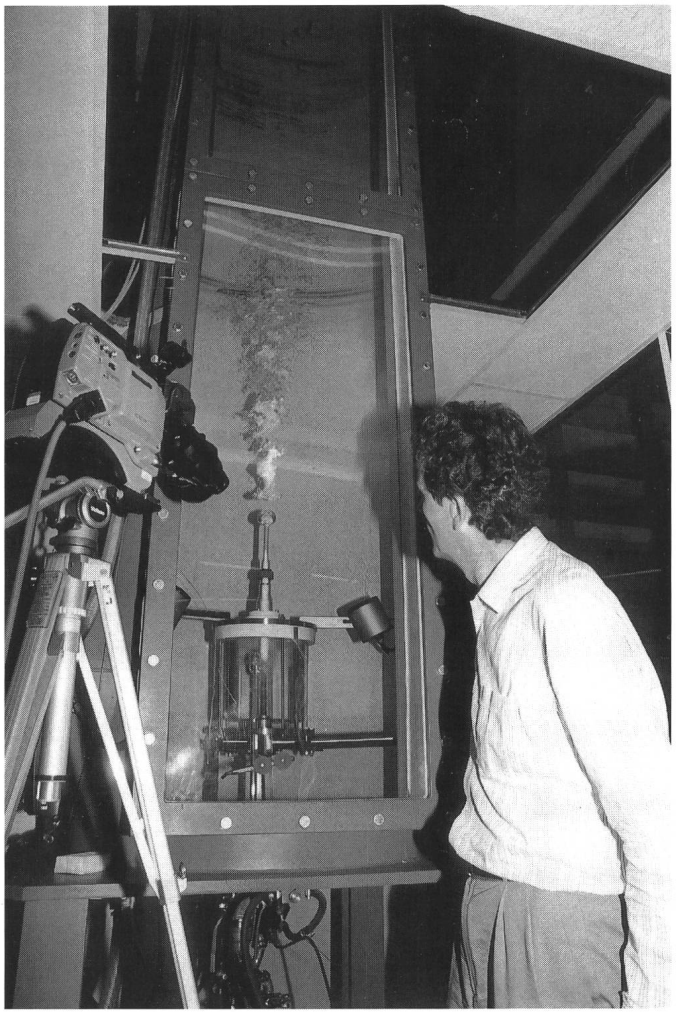

Bild 6
Am schweizerischen Paul-Scherrer-Institut lässt man im Experiment POSEIDON spaltprodukthaltige Gase und Wasserdampf durch eine Art Wasserturm aufsteigen, um herauszufinden, welche und wie viele Spaltprodukte im Wasser zurückgehalten werden. Die Filmkamera (links) dient der Zuordnung zwischen Form, Grösse und Menge der Blasen einerseits und dem Rückhaltegrad anderseits.
Photo Weber

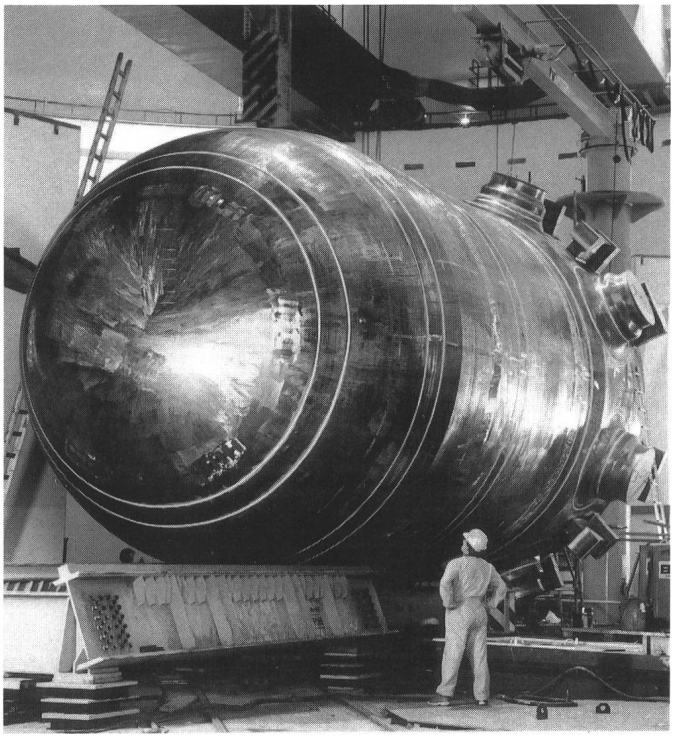

Bild 7
Im Brennpunkt der Reaktorsicherheitsstudien steht der Reaktordruckbehälter (RDB) aus zähem Stahl, hier jener des deutschen Druckwasserreaktor-Kernkraftwerks Brokdorf mit 13 Metern Höhe, 5 Metern Durchmesser, 24 cm Wandstärke und rund 500 Tonnen Gewicht. Der RDB umschliesst den Reaktorkern und soll sicherstellen, dass dieser jederzeit mit Wasser zur Reaktorkühlung bedeckt ist.
Photo Siemens-KWU

sentlich zu verändern. Ein realistisch möglicher Pfad zu einer «Leistungsexkursion» bzw. zu einem Durchgehen des Reaktors wie in Tschernobyl ist in Leichtwasserreaktoren westlicher Bauart bisher nicht ausfindig gemacht worden, so dass man ihn nach Überzeugung der PRA-Fachleute ausschliessen kann. Im übrigen sind die Ergebnisse der Versuche am PSI zur Spaltprodukt-Rückhaltung ebenso wie einzelne theoretische Schritte und Rechenprogramme ein wichtiges Tauschobjekt: Nur wer auch geben kann, dem wird gegeben – in diesem Fall eben Informationen.

Sicherheit erhöht

Zur Bedeutung von Wahrscheinlichkeit und Risiko meint Peter Hosemann: «Diese doch abstrakten Zahlen werden dem Nicht-Fachmann nie viel sagen. Ungleich wichtiger ist doch, dass man anhand der Fehlerbäume Schwachstellen in der Anlage erkennt, beispielsweise, ob die Ausfallhäufigkeit gewisser Pumpen zu hoch ist. Aus dieser Kenntnis heraus kann man dann gezielt Verbesserungen anbringen, etwa zuverlässigere Pumpen einbauen, und damit die Sicherheit der Anlage erhöhen. Das haben inzwischen auch die Betreiber erkannt, so dass sie heute der PRA sehr wohlwollend gegenüberstehen.» Ein markantes Beispiel für eine Verbesserung aufgrund der PRA ist die kontrollierte Entlüftung des Containments, mit der alle deutschen und schweizerischen Kernkraftwerke nachgerüstet wurden oder werden – im Falle eines Kernschmelzens soll sie den Druck so weit abbauen, dass das Containment intakt bleibt. Es soll allerdings auch schon Nachrüstungen gegeben haben, die vom Standpunkt der PRA aus wenig sinnvoll waren, aber einer gewissen Mode entsprachen.

Wie Hosemann sehen auch andere führende PRA-Leute die PRA in erster Linie als Instrument zur Erhöhung der Sicherheit – sowohl im nachhinein bei bestehenden Anlagen als auch durch Übernahme der Erkenntnisse in die Planung neuer Anlagen. Die Sicherheit eines Kernkraftwerks ist nie etwas abgeschlossenes, sondern bedarf steter Aufmerksamkeit und Nachrüstung auf den neuesten Stand der Sicherheitstechnik. Das gilt auch für andere vielschichtige Anlagen unserer Industriegesellschaft, und nicht von ungefähr bedient sich nunmehr auch die chemische Industrie der PRA-Methodik.

ASEA BROWN BOVERI

VOTRE PARTENAIRE COMPETENT POUR:

Transformateurs de distribution

- À BAIN D'HUILE
- AU FLUIDE SILICONE
- À RÉSINE MOULÉE

IHR KOMPETENTER PARTNER FÜR:

Verteiltransformatoren

- MIT ÖLFÜLLUNG
- MIT SILIKONFÜLLUNG
- IN GIESSHARZAUSFÜHRUNG

ABB Sécheron SA

CH-1211 Genève 21 / Suisse
Tél. standard: + 41 22 / 739 41 11
Téléfax: + 41 22 / 738 73 05
Télex: 22 130

CH - 5017 90 FD

ABB
ASEA BROWN BOVERI