

Untersuchung der Phänomene schwererer Störfälle außerhalb des Druckbehälters

H. Alsmeyer, J.J. Foit, L. Meyer, IKET; W. Schütz, IRS

Einführung

Im Verlauf eines schweren Kernschmelzenunfalls kann bei langzeitigem, aber sehr unwahrscheinlichem Ausfall der Kühlung der geschmolzene Brennstoff den Reaktordruckbehälter (RDB) durchschmelzen und in die Reaktorgrube und auf das Betonfundament austreten. Untersuchungen zu den dabei auftretenden, wichtigen Vorgängen wurden im Forschungszentrum Karlsruhe bereits in den 80er Jahren in großen Versuchsanlagen begonnen. Diese Arbeiten verfolgten zunächst das Ziel, im Rahmen der in Deutschland und USA durchgeführten Sicherheitsstudien die Gefährdung aus schweren Reaktorunfällen zu quantifizieren [1]. Insbesondere der Reaktorunfall in Tschernobyl (1986) unterstrich, trotz vieler gravierender Defizite im Vergleich mit den Sicherheitskonzepten westlicher Reaktoren, die Notwendigkeit solcher Untersuchungen. Die Fragen, für die im Forschungszentrum bereits vor Tschernobyl Antworten erarbeitet wurden, betreffen u. a. den Angriff des Betonfundaments durch die Schmelze, insbesondere die Fundamentdurchdringung und den Anstieg des Drucks im Sicherheitsbehälter.

Obwohl die Eintrittswahrscheinlichkeit für so schwere Unfälle in deutschen Reaktoren sehr klein ist – sie liegt etwa bei 10^{-5} pro Reaktorjahr – wurden, vor dem Hintergrund einer wachsenden Sensibilität der Öffentlichkeit die Anforderungen an die Sicherheit im Falle schwerer Unfälle wesentlich erhöht. Für die in Deutschland

laufenden Reaktoren wurden daher zusätzliche Maßnahmen ergriffen, die einerseits die Eingriffsmöglichkeiten beim Unfall verbessern und andererseits die eventuelle Freisetzung von Radioaktivität nach außen stark verringern [2]. Dazu gehören zum Beispiel die gefilterte Druckentlastung und der frühzeitige Wasserstoffabbau im Sicherheitsbehälter. Diese Maßnahmen basieren auch auf einer vertieften Unfallanalyse in verschiedenen Versuchsanlagen des Zentrums, die auch weiterhin mit der Zielsetzung betrieben werden, den Unfallablauf besser zu verstehen und Eingriffsmöglichkeiten aufzuzeigen.

Bei der anschließenden Darstellung folgen wir der zeitlichen Entwicklung des Unfalls, beginnend mit dem Austritt der heißen Kernschmelze aus dem Reaktordruckbehälter bis zum langzeitigen Angriff des Fundaments und der eventuellen Kühlung der Schmelze im Fundamentbereich.

Dispersion der Schmelze

Der Austritt der Schmelze aus dem Druckbehälter kann im Zentrum der Bodenkalotte oder durch seitliches Versagen etwa in Höhe der Schmelzenoberfläche erfolgen. Dies hängt von den Details des Unfallablaufs, eventuell eingeleiteten Kühlmaßnahmen wie auch von Durchbrüchen im Boden des Druckbehälters ab.

Unterstellt man, dass die Druckentlastung des Primärkreises erfolgreich durchgeführt wurde, dass also der die Schmelze treibende Dampfdruck auf deutlich

unter 20 bar abgesenkt ist, so können die Reaktionskräfte bei RDB-Versagen von den Auflagern des RDB abgetragen werden. Die Schmelze kann jedoch, je nach der vorliegenden Geometrie, in wesentlichen Teilen aus der Reaktorgrube ausgetragen und in angrenzende Räume oder in den Sicherheitsbehälter verlagert werden. Sie wird dabei zum großen Teil fein fragmentiert und kann dadurch sehr effektiv thermisch und chemisch mit dem Dampf und der Atmosphäre im Sicherheitsbehälter reagieren. Diese Materialtransportprozesse sowie die thermischen und chemischen Wechselwirkungen werden mit dem Ziel untersucht, mögliche Gefährdungen für die Integrität des Reaktorsicherheitsbehälters und Gegenmaßnahmen dazu aufzuzeigen.

Aufbauend auf den DCH-Experimenten (Direct Containment Heating) in SANDIA/USA werden diese Vorgänge in den DISCO Experimenten (DISpersion von CO₂-rium) im IKET untersucht, mit Schwerpunkt auf den engen Kavernen typischer europäischer Reaktoren. In einer 1:18 skalierten Geometrie wird die Corium-Schmelze durch kalte Modellflüssigkeiten oder heiße Thermit-schmelzen ($T > 2000^\circ\text{C}$) (Abb. 1) simuliert. In den Versuchsreihen wurden systematisch die Berstdrücke, die Versagensquerschnitte und -orte, die Treibgase (Stickstoff oder Dampf) und die Atmosphäre im Sicherheitsbehälter (Luft oder Dampf-Luftgemisch) variiert.

Versagt der RDB am Boden, können bei Drücken nahe 20 bar bis zu 75 % der Schmelze aus der

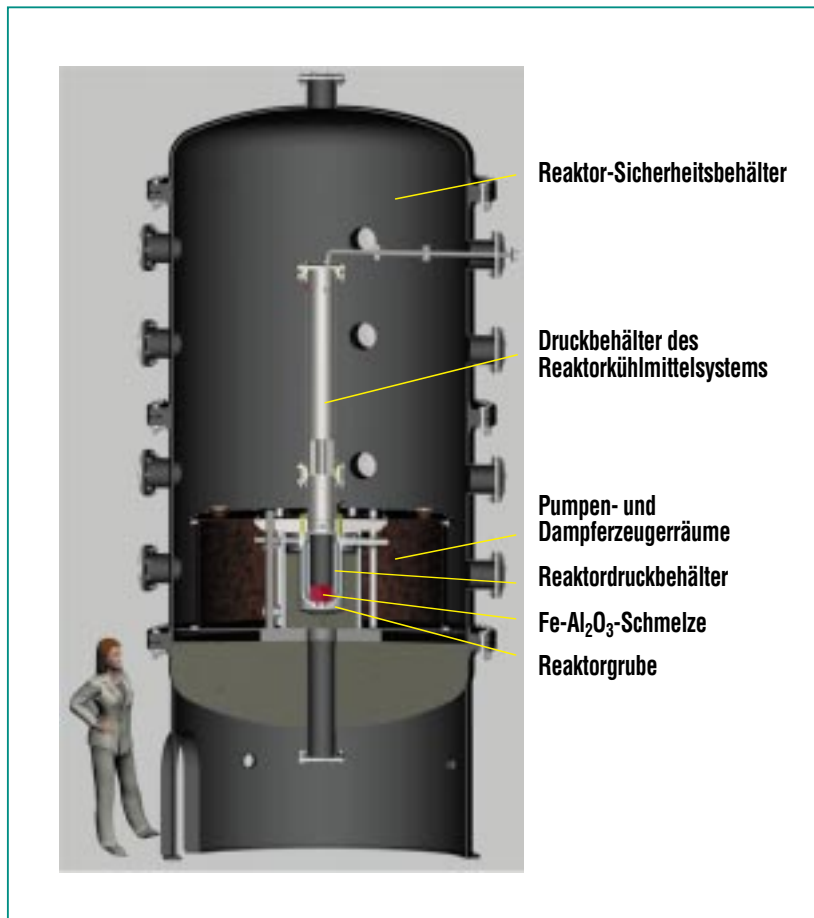


Abb. 1: Die Versuchsanlage DISCO-H modelliert die Hauptkomponenten und Volumina eines Druckwasserreaktors.

Reaktorkaverne ausgetragen werden. Bei Restdrücken unter 5 bar sinkt dieser Anteil unter 10 %. Bei seitlichem Versagen ist der Schmelzeausstrag wesentlich geringer.

Durch Wärmeübergang von den kleinen Schmelzetröpfchen an die Atmosphäre im Sicherheitsbehälter und durch die Verbrennung des Wasserstoffes, der durch die Reaktion des metallischen Teils der Schmelze mit dem Dampf erzeugt wird, kann sich der Druck im Sicherheitsbehälter kurzzeitig um 2 bis 4 bar erhöhen. Ist der direkte Weg aus

der Reaktorgrube in den Sicherheitsbehälter versperrt, und nur eine Verbindung in die relativ engen Pumpen- und Dampferzeugerräume vorhanden, so ist die Wasserstoffproduktion und -verbrennung geringer. Damit vermindern sich auch der Energieeintrag in die Atmosphäre und der Druckanstieg.

Für weitergehende Aussagen sind anlagenbezogene Experimente und eine sorgfältige Übertragung mit Rechenprogrammen notwendig. Mit einem leistungsfähigen Thermohydraulik-Code werden die Experimente analy-

siert und dabei die darin verwendeten Modelle verbessert. Das Ziel ist, eine Extrapolation von den Experimenten in kleinem Maßstab mit Modellfluiden auf den Reaktormaßstab und die prototypischen Uranoxid-Stahlschmelzen durchführen zu können.

Erosion durch Schmelzestrahle

Bei lokalem Versagen des Druckbehälters kann, getrieben durch den Druck des Dampfes im Primärkreis, der Schmelzeausstoß für wenige Sekunden als kompakter Strahl erfolgen, gefolgt von einem dispergierenden Strahl nach dem Gasdurchbruch. Die KAJET-Experimente untersuchten die erodierende Wirkung dieses Schmelzestrahls, wenn dieser, getrieben von Gasdrücken bis zu 2 MPa, auf den Beton in der Reaktorgrube trifft. Die Kernschmelze wurde dabei durch Thermitschmelze mit Temperaturen von etwa 2000°C simuliert.

Die Versuche untersuchten die Erosion der beiden Betonsorten „Konstruktions-Beton“ und „Borosilikatglas-Beton“. Es wurden insgesamt sieben Experimente (KJ02 bis KJ08) erfolgreich durchgeführt. Um die Wirkung der beiden Schmelzephase Metall und Oxid in einem Versuch unabhängig voneinander untersuchen zu können (die beiden Phasen trennen sich aufgrund ihres Dichteunterschiedes und werden nacheinander ausgestoßen), wurde eine um 90° drehbare Probetrommel mit zwei Betonprobekörpern eingesetzt.

Nach der Beaufschlagung der ersten Probe durch den Eisenstrahl wurde die zweite Probe in den Strahlbereich geschwenkt und vom Oxidstrahl beaufschlagt. Zur zeitabhängigen Erfassung der Erosionsfront waren die Probekörper mit Thermoelementen instrumentiert.

Typische Versuchsparameter und Ergebnisse am Beispiel KJ08 mit Konstruktionsbeton sind: Schmelzemasse 75 kg Eisen bzw. 84,5 kg Oxid; Schmelzetemperatur 2050 °C; Treibdruck 0,8 MPa; Dauer der Wechselwirkung 5,8 s bzw. 2,9 s; Erosionstiefe 65 mm bzw. 29 mm; erodiertes Betonvolumen 180 ml bzw. 95 ml (Abb. 2).

Insgesamt steht nun eine Datenbasis aus zwei Versuchsreihen

mit 0,3 MPa bis 0,8 MPa Treibdruck zur Verfügung, nämlich KJ02-04 und KJ08 für Konstruktions-Beton und KJ05, 06, 07 für Borosilikatglas-Beton. Die maximalen Tiefenerosionsraten lagen bei 11 mm/s. Generell gilt, dass die Erosionsraten für Oxidstrahlen geringer sind als für Eisenstrahlen. Ebenso sind die Raten für Borosilikatglas-Beton geringer als für Konstruktionsbeton. Mit dem Treibdruck steigen auch die Erosionsraten an.

Die theoretische Interpretation der Experimente erfolgte in Zusammenarbeit mit der Ruhr-Universität Bochum. Das Aufschmelzen des Betons durch den Wärmeeintrag des auftreffenden Schmelzestrahls wurde dabei als der entscheidende Mechanismus identifiziert.

Ausbreitung von Schmelze

Wenn die Schmelze mit geringer Rate aus dem Druckbehälter austritt, z. B. nach vollständigem Abfall des Primärkreisdrucks, ist das Ausbreitverhalten der Schmelze auf dem Beton von großem Interesse, da dies den Angriff des Betons und die eventuelle Kühlbarkeit der Schmelze beeinflusst. Nach früheren Experimenten im Forschungszentrum und in europäischen Partnerländern ist das Ziel der EU geförderten Experimente ECOKATS, die Datenbasis durch Großexperimente zu vervollständigen und diese zur abschließenden Validierung von Rechenprogrammen zu verwenden.

Für diese Experimente wurde ein neuer Typ von Thermiterschmelze entwickelt, die einen Erstarrungsbereich zwischen 1822 K und 1373 K besitzt und bezüglich des Ausbreitverhaltens wesentliche Eigenschaften der Kernschmelze aufweist. Für die Ausbreitung von Schmelzen ist vor allem deren Viskosität wichtig, die allerdings wegen der hohen Temperaturen nicht direkt gemessen werden konnte. Sie wurde daher aus einem Experiment bestimmt, in dem 193 kg Schmelze mit einer Anfangstemperatur von 1893 K in einem langen Kanal ausgebreitet wurden, dessen Boden mit keramischem Material ausgekleidet war. Die Ausbreitung wurde 55 s lang mit einem annähernd konstanten Volumenstrom von 1 l/s gespeist. Aus den gemessenen Frontpositionen als Funktion der Zeit wurde unter Verwendung von hierfür entwickelten Näherungs-

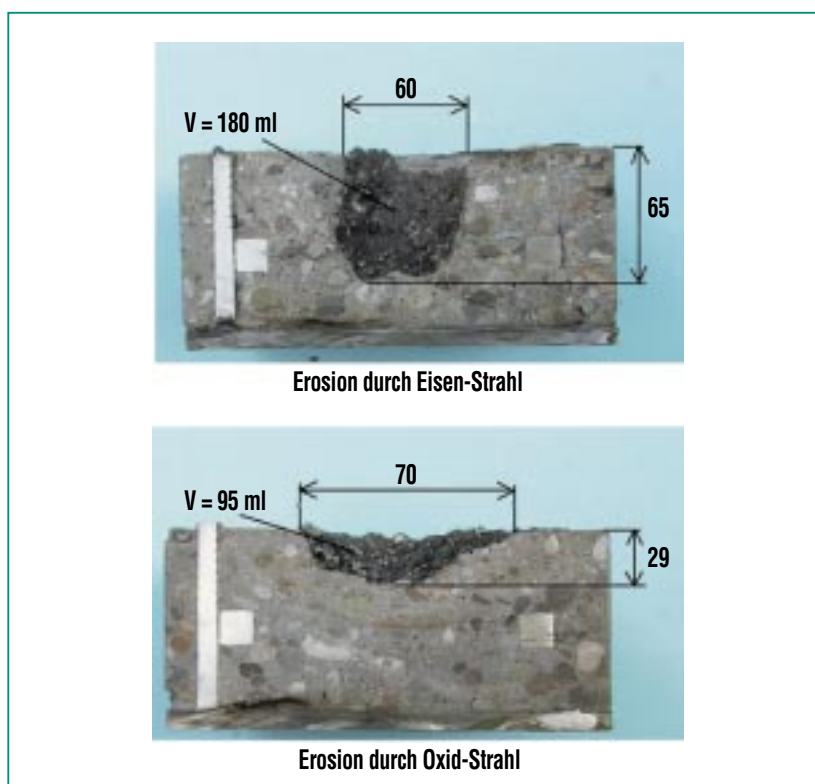


Abb. 2: Schnitt durch die Betonprobekörper (Maße in mm).



Abb. 3: ECOKATS-1, Ende der Ausbreitung.

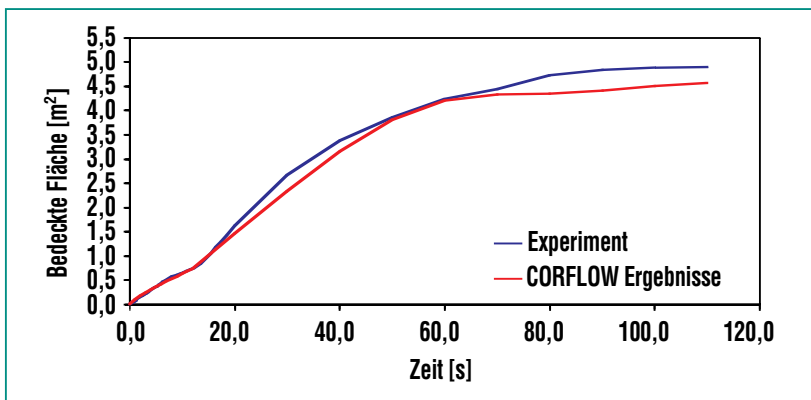


Abb. 4: Vergleich Experiment mit Nachrechnung.

lösungen die Viskosität abgeschätzt. Dies ist möglich, da Oxidschmelzen zunächst dünne thermische Grenzschichten ausbilden, die die Frontbewegung in der Anfangsphase der Ausbreitung kaum beeinflussen. Diese Phase dauerte 12 s an. Danach führte die in der Umgebung der Front sich herausbildende mit-schwimmende Kruste zu einer Verlangsamung des Ausbreitungsvorganges. Unmittelbar nach dem Stillstand dieser Kruste nach 28 s floss die heiße Schmelze darunter mit erhöhter Geschwindigkeit weiter. Dieser Vorgang wiederholte sich mit einer Verankerung einer zweiten Kruste nach 45 s. Das Ende der Frontbewegung war mit dem Stillstand

einer dritten Kruste nach 74 s erreicht, 16 s nachdem die Schmelzeinspeisung beendet war.

Der ECOKATS-1 Versuch untersucht die Ausbreitung auf einer großen, ebenen Betonfläche. Die Ausbreitungsgeometrie bestand aus einem 2.6 m langen und 0.29 m breiten Kanal, der in eine 3 m x 4 m große Fläche mündete (Abb. 3). Die große Oxidmasse von 547 kg, die bei einer Anfangstemperatur von 1873 K mit einem annähernd konstanten Volumenstrom von 2 l/s auf die Ausbreitungsfläche geleitet wurde, ermöglichte es, den Einfluss der Abkühlung der Schmelze auf die 3-dim Ausbreitung zu untersuchen, ohne dass die Schmelzeinspeisung vor der Ausbildung

starker Krusten beendet war. Die Ausbreitung von heißen Schmelzen auf Beton wird einerseits durch die freigesetzten Gase beeinflusst, indem die Viskosität durch die in der Schmelze enthaltenen Blasen verändert wird. Durch die Gasströmung steigt die Viskosität um das vierfache an, was die aus früheren Versuchen gewonnenen Erkenntnisse untermauert. Andererseits ist bei den hier vorherrschenden niedrigen Ausflussraten die Ausbildung von Krusten an der Ausbreitungsfront von großer Bedeutung, die wie ein Damm eine ungestörten Ausbreitung behindern und zu einer komplexen Schmelzfront führen.

Es ist nicht möglich, diese Vorgänge in einem Rechenprogramm (CORFLOW) im Detail zu modellieren. Daher wird zur Beurteilung der Güte der Rechenergebnisse die im Experiment bedeckte Fläche als Maßstab genommen. Die erzielte Übereinstimmung (Abb. 4) belegt die Leistungsfähigkeit des eingesetzten Rechenprogramms. Im Hinblick auf die Anwendung für die Reaktorsicherheit steht damit ein Werkzeug zur Verfügung, das auch unter sehr ungünstigen Bedingungen, nämlich bei kleinen Ausströmraten und geringer Überhitzung der Schmelze, zuverlässige Aussagen zum Ausbreitverhalten der Schmelze erlaubt.

Fundamenterosion und Kühlbarkeit

Die Kernschmelze hat bei Austritt aus dem Druckbehälter eine Anfangstemperatur von etwa 2000°C. Unter dieser extremen

Beanspruchung zersetzt sich der Beton der Reaktorkaverne, wodurch Gase in den Sicherheitsbehälter freigesetzt werden, während die Schmelze, beheizt durch die nukleare Nachwärme, in das Fundament vordringt.

Wie die Verwendung der BETA Experimente im Rechenprogramm WECHSL gezeigt hat, ist eine Durchdringung des Betonfundaments nicht auszuschließen, wenn nicht eine wirksame Kühlung der Schmelze einsetzt, die die Nachwärme langfristig aus der Schmelze entzieht. Hierzu werden aktuell, unter Beteiligung von Partnern im Rahmenprogramm der EU, zwei Konzepte verfolgt:

- a) Kühlung durch Wasseraufgabe auf die Schmelze,
- b) Kühlung durch Injektion von Wasser von unten in die Schmelze.

Experimente zur Kühlung von oben erfordern große Ausbreitflächen, damit nicht die Seitenwände die Bildung einer Oberflächenkruste in untypischer Weise beeinflussen, was sich auf die zu untersuchenden Kühlvorgänge auswirken würde. Um eine

Schmelze von mindestens 20 cm Höhe zu realisieren, wurden im Experiment ECOKATS-2 3200 kg simulierter Kernschmelze, bestehend aus Metall- und Oxidanteil, in eine Betonkaverne von 2 m x 2 m ausgegossen (Abb. 5 a). Innerhalb von 40 s war die Schmelze gleichmäßig ausgebreitet und verursachte, wie erwartet, eine starke Betonerosion. In dieser frühen Phase wurde die Flutung der Schmelze durch Aufgabe von 4 Litern Wasser/s von einer Seite her ausgelöst. Der Kontakt des Wassers mit der Schmelzenoberfläche verlief sehr ruhig, ohne dass es zu heftigen Reaktionen zwischen Schmelze und Wasser kam. Unter der zunächst dünnen Wasserschicht bildete die Schmelze eine anfangs noch hell glühende, dünne Oberflächenkruste aus. Diese Kruste besitzt Löcher, durch die die Gase aus der andauernden Betonerosion abströmen. Die Kruste kühlt sich schnell ab und wird dunkel, was auch den Übergang von Film- zu Blasensieden kennzeichnet. Diesen Übergang zeigt Abb. 5 b, mit dem von rechts nach links fortschreitendem Abkühlen der Oberfläche.

Die Kruste ist bis auf die gasdurchströmten Löcher geschlossen und fest mit der seitlichen Betonwand verankert. Dies verhindert das Eindringen des Wassers von oben und damit ein Aufbrechen der Schmelze, was die Voraussetzung für einen wirksamen Wärmeentzug aus dem inneren der Schmelze wäre. Infolge der Gasfreisetzung aus dem Beton wird jedoch durch den entstehenden Gasdruck die Kruste im inneren Bereich der Fläche um bis zu 20 cm angehoben und bildet eine teilweise poröse Struktur aus. Weiterhin transportieren die Gase aus den Löchern in der Kruste Lava-ähnliche Schmelze in die obere Wasserschicht, was zum Aufbau von etwa 15 Vulkankegeln mit bis zu 20 cm Höhe führt. Wie der nur langsame Temperaturabfall am Boden der Schmelze zeigt, tragen diese Vorgänge allerdings nur wenig zur Verbesserung der Kühlung bei, so dass die Kühlung im wesentlichen durch die Wärmeleitung in der Oberflächenkruste begrenzt wird. Daher erstarrt im Verlaufe des Experiments der Zentralbereich der Schmelze in Form einer kompakten Schicht, die ein Eindringen des Kühlwassers von oben nicht zulässt. Die Nachuntersuchungen zeigen, dass lediglich die oberen 4 cm der oxidischen Schmelzeschicht in eine gut kühlbare Konfiguration überführt wurden. Daher kann unter Reaktorbedingungen ein Stopp der Fundamenterosion allein durch Flutung von oben nicht erwartet werden. Diese Ergebnisse bestätigen Experimente des Argonne National Laboratory/USA, die mit nachbeheizten Schmelzen auf der Basis von UO_2 , aller-

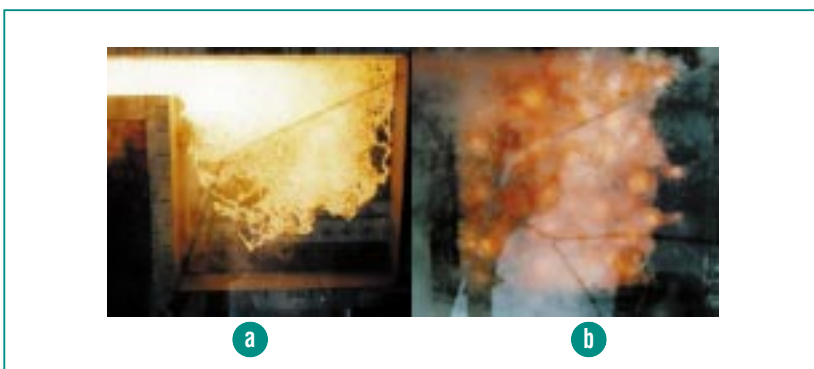


Abb 5: Simulierte Kernschmelze auf einer 2 x 2 m² Betonfläche; Ausbreitung (a) und Kühlung durch Wasseraufgabe von oben (b).



Abb. 6: COMET-Versuchsanlage.

dings in wesentlich kleinerer Geometrie, gewonnen wurden.

Eine wirksamere Kühlung der Schmelze gelingt, wenn Wasser von unten in die Schmelze eingegeben wird, was zu schneller Verdampfung und dem Aufbrechen der Schmelze führt. Dieses so genannte COMET-Konzept wird im Forschungszentrum entwickelt und optimiert. Dazu dient die COMET-Versuchsanlage, die nach wesentlicher Erweiterung der früher entwickelten Versuchs-

und Heiztechnik bei den BETA-Experimenten eingesetzt wird, und eine kontinuierliche Simulation der Nachwärme über den gesamten Versuchszeitraum ermöglicht (Abb. 6).

Nach Ausbreitung auf der ebenen COMET-Kühleinrichtung erodiert die Schmelze zunächst eine bis zu 10 cm hohe Opferschicht aus Beton und schmilzt dann Zutrittswege für das Flutwasser auf. Je nach Bauart erfolgt der Wasserzutritt aus einer Vielzahl von Kanälen, oder aus einer wasserführenden Betonschicht am Boden der Kühleinrichtung. Das Kühlwasser steht gegenüber der Schmelze unter einem geringen Überdruck, so dass die Kühlung rein passiv erfolgt.

Die Experimente zeigen, dass die Schmelze zuverlässig gestoppt und gekühlt werden kann (Abb. 7). Die Kühleinrichtung wird zur

Zeit bezüglich Bauhöhe und kühlbarer Schmelzenhöhe optimiert, um einen Einsatz in Reaktoren zu ermöglichen.

Ausblick

Die beschriebenen Experimente und die begleitende Entwicklung von Rechenprogrammen erhöhen wesentlich die Kenntnisse über den Ablauf schwerer Unfälle, aber auch über Eingriffsmöglichkeiten zur Unfallminderung. Damit leisten diese Arbeiten einen Beitrag zum weiteren, sicheren Betrieb der existierenden Reaktoren. Die internationale Einbindung und der intensive Austausch mit wichtigen Ländern innerhalb und außerhalb Europas mit Förderung durch die Europäische Union unterstützen damit die Absicherung eines international hohen Sicherheitsniveaus der Leichtwasserreaktoren.

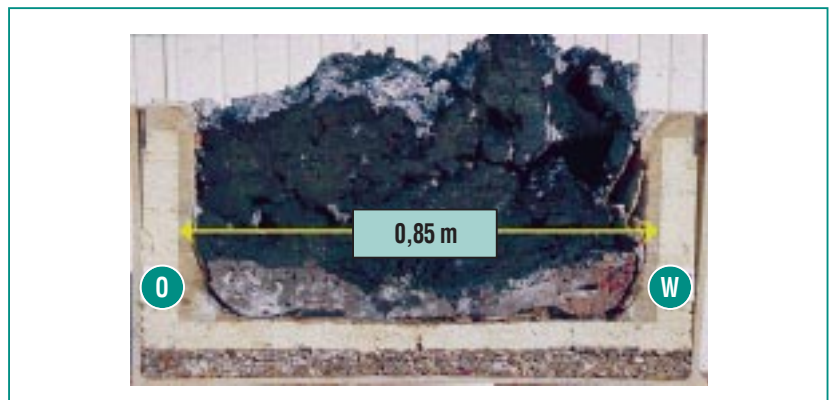


Abb. 7: Kühlbare, porös erstarrte Schmelze im Schnitt.

Literatur

[1] Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B, Verlag TÜV Rheinland, Bonn 1989

[2] Fortschritte bei der Beherrschung und Begrenzung der Folgen auslegungsüberschreitender Ereignisse, Fachtagung der KTG-

Fachgruppen Reaktorsicherheit und Thermo- und Fluidodynamik, Karlsruhe, 25. - 26. 9. 2003, FZKA 6935 (2004)