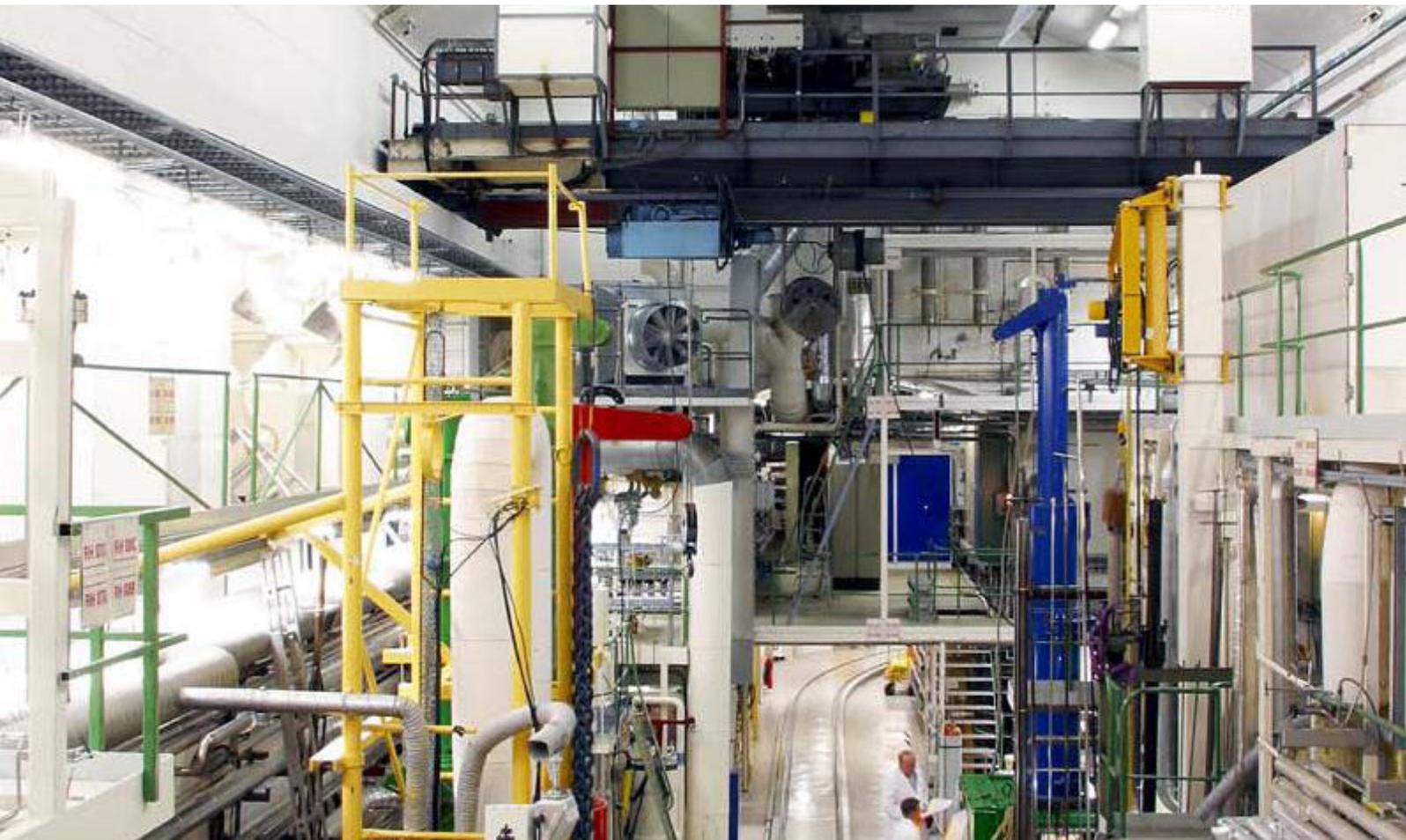


Überblicksbericht 2012

Forschungsprogramm Regulatorische Sicherheitsforschung



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN

Titelbild:**Halden Reactor Project**

Blick in die Halle des Halden-Reaktors. Der Siedewasserreaktor mit einer maximalen thermischen Leistung von 20 Megawatt befindet sich in einer Felskaverne (Quelle: Halden Reactor Project).

Jahresberichte zu allen Projekten des Forschungsprogramms *Regulatorische Sicherheitsforschung* inklusive Publikationen und Details zur nationalen und internationalen Zusammenarbeit finden sich im Erfahrungs- und Forschungsbericht 2012 des ENSI. Er kann unter www.ensi.ch heruntergeladen werden.

BFE Forschungsprogramm Regulatorische Sicherheitsforschung

Überblicksbericht 2012

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern

Programmleiter (Autor):

Dr. Reiner Mailänder, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI,
Industriestrasse 19, CH-5200 Brugg (reiner.mailaender@ensi.ch)

Bereichsleiter BFE:

Dr. Michael Moser (michael.moser@bfe.admin.ch)

www.ensi.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Einleitung

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI ist die Aufsichtsbehörde des Bundes für die Kernanlagen. Es prüft laufend die Sicherheit in den Kernkraftwerken und beaufsichtigt die Transporte und die Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle sowie die Arbeiten zur geologischen Tiefenlagerung. Das ENSI übt seine Aufsichtstätigkeit unabhängig von politischen und wirtschaftlichen Interessen aus. Oberstes Ziel der Aufsichtstätigkeit des ENSI ist der Schutz von Menschen und Umwelt vor Schäden durch Radioaktivität, wie es Artikel 4 des Kernenergiegesetzes KEG vorgibt.

Bei der Wahrnehmung seiner Aufsichtstätigkeit ist es für das ENSI unerlässlich, im Bereich der Nuklearsicherheit auf dem Stand von Wissenschaft und Technik zu sein. Das ENSI verfolgt daher mit dem Programm «Regulatorische Sicherheitsforschung» vor allem die drei folgenden Ziele:

1. Die Resultate von Forschungsprojekten sollen der laufenden Aufsichtstätigkeit des ENSI dienen. Forschungsergebnisse gehen in vom ENSI zu erstellende Richtlinien ein und werden auch für konkrete Einzelentscheide als Grundlage he-

rangezogen. Bestimmte Forschungsprojekte entwickeln und verbessern auch Hilfsmittel für die Aufsicht wie zum Beispiel Computerprogramme.

2. Die vom ENSI geförderten Forschungsprojekte stellen den Kompetenzerhalt bei den Fachleuten des ENSI und bei seinen externen Experten sicher. Das ENSI fördert mit diesen Forschungsprojekten insbesondere die Ausbildung im Bereich der nuklearen Sicherheit.

3. Nicht zuletzt dienen Forschungsprojekte der internationalen Vernetzung des ENSI und der schweizerischen Forschung. Der internationale Austausch ist im Bereich der nuklearen Sicherheit ausserordentlich wichtig. Die Projekte des Forschungsprogramms werden grossteils von Organisationen aus verschiedenen Ländern finanziert oder zumindest in Kooperation mit internationalen Partnern durchgeführt. So erhält das ENSI Resultate, die in der Schweiz alleine nicht erzielt werden könnten. Das ENSI ist in über 70 internationalen Gremien vertreten. In vielen von diesen werden Forschungsprojekte gesteuert und deren Ergebnisse in internationale Standards umgesetzt.

Zur Strategie des ENSI gehört es, dass jedes Forschungsprojekt durch eine Expertin oder einen Experten aus den ENSI-Fachsektionen begleitet wird. So fliessen die im Projekt gewonnenen Erfahrungen direkt in die Aufsichtstätigkeit ein. Gerade die Projektbegleitung verschafft den Fachsektionen die Möglichkeit, ihre Kompetenzen zu erhalten und weiter zu entwickeln.

Das Forschungsprogramm trägt zur Bewältigung der zentralen Herausforderungen des ENSI bei. Zu diesen zählen insbesondere der Langzeitbetrieb der bestehenden Kernkraftwerke und die Entsorgung der radioaktiven Abfälle. Zudem ist davon auszugehen, dass sich weiterer Forschungsbedarf aus der Aufarbeitung des Unfalls von Fukushima ergibt.

Den Herausforderungen trägt das ENSI in den Programmschwerpunkten Rechnung. Die vom Bund geförderten Projekte stellen nur einen Teil des Forschungsprogramms dar. Den überwiegenden Teil der Kosten stellt das ENSI den Beaufichtigten in Rechnung.

IEA Klassifikation: 4.1.1 Light-water reactors (LWRs)

Schweizer Klassifikation: 3.1.1 Sicherheit

Programmschwerpunkte

Das Programm *Regulatorische Sicherheitsforschung* gliedert sich in sieben Themenbereiche:

Brennstoffe und Materialien

Dieser Themenbereich beschäftigt sich mit dem Reaktorkern sowie den Strukturmaterialien der wichtigsten gestaffelten Barrieren, welche den Brennstoff und den Reaktorkern umgeben und die radioaktiven Stoffe einschliessen. Die Brennelemente werden mehrere Jahre im Reaktorkern eingesetzt, bevor sie verbraucht sind und ausgetauscht werden; beim Brennstoff und den Brennstabhüllrohren stehen deshalb die Anforderungen während dem Normalbetrieb und während bestimmten Störfällen im Mittelpunkt. Anders ist dies bei den wenigen nicht austauschbaren Komponenten des Primärkreislaufs, vor allem dem Reaktordruckbehälter, sowie beim Sicherheitsbehälter, dem so genannten Containment; bei diesen sind vor allem die Prozesse der Materialalterung entscheidend. Im Hinblick auf den Langzeitbetrieb der Kernkraftwerke muss gewährleistet sein, dass für alle Anforderungen weiterhin ausreichende Sicherheitsmargen vorhanden sind.

Datenbanken zu Schäden und internen Ereignissen

Die Projekte in diesem Bereich werden von der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung OECD koordiniert. Sie fördern den internationalen Erfahrungsaustausch über Störfälle in Kernkraftwerken sowie über Schäden an Komponenten, die Störfälle auslösen können. Dazu werden themenspezifische Datenbanken aufgebaut, in die systematisch Schadensfälle und Ereignisse aus den teilnehmenden OECD-Staaten eingegeben werden, zum Beispiel zu Schäden an Rohrleitungen und Kabeln sowie Feuerereignissen. Die Daten werden anschliessend ausgewertet mit dem Ziel, auf der Basis einer grösseren Anzahl von Fällen systematische Hinweise auf Schadens- bzw. Störfallursachen zu erhalten. Ein Zusammenschluss auf internationaler Basis ist dazu notwendig, weil die relevanten Ereignisse und Schäden in Kernkraftwerken selten sind.

Externe Ereignisse

Neben den Schäden, die durch Ereignisse innerhalb eines Kernkraftwerks entstehen können, berücksichtigen die Sicherheitsanalysen auch Ereignisse, die eine Anlage von aussen treffen können. Das ENSI unterstützt zu diesem Bereich mehrheitlich internationale Projekte, die aufwändige Experimente und Simulationen durchführen und damit den Erfahrungsaustausch zwischen den Ländern fördern. Speziell auf die Schweizer Verhältnisse zugeschnitten sind schliesslich die Expertengruppe Starkbeben des Schweizerischen Erdbebendienstes SED und die neue Plattform Extremereignisse PLATEX, an der mehrere Bundesbehörden beteiligt sind. PLATEX soll sich zunächst mit Fragen der Hochwassergefährdung befassen.

Menschliche Faktoren

Übergeordnetes Ziel ist hier die Reduktion der Unsicherheit menschlicher Handlungen bei der probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA), die das Risiko von Störfällen in Kernkraftwerken quantitativ erfasst. Der Bereich umfasst vor allem zwei Schwerpunkte. Einerseits geht es um den Einfluss menschlicher Handlungen auf Störfälle und deren Beherrschung. Dabei wird vor allem die Zuverlässigkeit des Operateurerhaltens unter verschiedenen Bedingungen mit der so genannten Human Reliability Analysis (HRA) untersucht. Zweiter Schwerpunkt ist der Einfluss der Kontrollraumgestaltung auf die Leistung der Operateure (Human-System Interface), der insbesondere im Halden Reactor Project betrachtet wird.

Systemverhalten und Störfallabläufe

Dieser Bereich betrifft die in der Reaktoranlage und im Containment ablaufenden Prozesse, ausgehend vom Normalbetrieb über Änderungen des Reaktorverhaltens, die bei Störfällen in kurzer Zeit ablaufen können, bis hin zu Kernschmelz-Unfällen. Für so genannte deterministische Sicherheitsanalysen werden Computermodelle dieser Vorgänge erstellt, mit Hilfe von Experimenten validiert und laufend weiterentwi-

ckelt. Sie dienen auch als Grundlage für die quantitative Ermittlung des Anlagenrisikos in probabilistischen Sicherheitsanalysen.

Strahlenschutz

Die Arbeiten im Bereich Strahlenschutz umfassen ein breites Spektrum anwendungsbezogener Themen. Sie reichen von der Überprüfung und Kalibrierung von Messsystemen für ionisierende Strahlung und der von Helikoptern aus durchgeführten Messung der Ortsdosisleistung in der Umgebung von Kernanlagen (Aeroradiometrie) bis hin zur Entwicklung neuer Analysemethoden für Radionuklide. Zudem trägt die Mitarbeit an internationalen Normen zur länderübergreifenden Harmonisierung im Strahlenschutz bei. Mit diesen Aktivitäten wird der Strahlenschutz in den Schweiz auf dem Stand der Technik gehalten und die Ausbildung von Nachwuchskräften gefördert.

Stilllegung und Entsorgung

Mit dem Fortschreiten der Standortsuche gemäss dem Sachplan geologische Tiefenlager wird auch die Forschung im Bereich Entsorgung immer wichtiger. Dabei spielt die Untersuchung des Opalinustons im Felslabor Mont Terri eine zentrale Rolle. Die Auslegung eines Tiefenlagers und dessen Überwachung wird ebenso beleuchtet wie die Eigenschaften der darin einzulagernden Abfälle und die in einem Tiefenlager ablaufende Gasentwicklung. Darüber hinaus beschäftigen sich Projekte mit langfristigen Prozessen, welche die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers beeinträchtigen können, nämlich die Tiefenerosion durch Gletscher und die Abtragung infolge tektonischer Hebung der Landschaft. Neu im Forschungsprogramm sind zwei Projekte zum internationalen Wissens- und Erfahrungsaustausch bei Stilllegungsprojekten und eines zu gekoppelten thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen Prozessen in Tiefenlagern (DECOVALEX). Im ebenfalls neuen EU-Projekt SITEX soll der regulatorische Bedarf für die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers diskutiert und evaluiert werden.

Highlights aus Forschung und Entwicklung

OECD Halden Reactor Project – Bereich Brennstoffe und Materialien

Das OECD Halden Reactor Project (HRP) ist ein seit über 50 Jahren laufendes gemeinsames Forschungsprogramm von inzwischen über 130 Institutionen aus 19 Staaten. Es hat zwei Stossrichtungen: Brennstoff- und Materialverhalten sowie Mensch-Technik-Organisation. Experimentelle Arbeiten werden primär im südnorwegischen Halden, nahe der Grenze zu Schweden, von rund 250 wissenschaftlichen Mitarbeitenden durchgeführt. Dort stehen ein Versuchsreaktor, eine Werkstatt zur Herstellung instrumentierter Brennstoff-Versuchsanordnungen, ein Labor zur Interaktion von Mensch und Maschine (Man-Machine Laboratory) sowie zwei Simulationszentren (Virtual Reality Centre und das neue FutureLab) zur Verfügung. Forschungseinrichtungen in den Mitgliedsländern und die Nuklearindustrie beteiligen sich ebenfalls an Experimenten. Das ENSI hat Einsitz im Board of Management, dem leitenden Gremium des Projekts.

Der Versuchsreaktor befindet sich in einer Felskaverne (siehe Titelbild). Es handelt sich um einen Siedewasserreaktor mit einer maximalen thermischen Leistung von 20 Megawatt, der bei einem Druck von etwa 33 bar betrieben wird. Zur Kühlung und zugleich zur Moderierung der Neutronen dienen rund 14 Tonnen Schwerwasser. Während des Betriebs ist die Felskaverne nicht zugänglich, der Kontrollraum befindet sich in einem nahe gelegenen Gebäude (Abbildung 1). Die vom Reaktor erzeugte Wärme wird nebenbei dazu genutzt, um eine benachbarte Papierfabrik mit Dampf zu versorgen.

Die Arbeiten im hier beschriebenen Projektbereich liefern Erkenntnisse über Eigenschaften und Verhalten von Brennstoffen und Materialien, die lange Zeit in Reaktoren im Einsatz sind. Bei den Kernbrennstoff-Experimenten werden Brennstabsegmente in instrumentierte Versuchsanordnungen eingesetzt und im Halden-Reaktor weiter bestrahlt. Die Instrumentierungen werden von den Fachleuten des HRP laufend weiter entwickelt. Die Brennstabsegmente können während der Bestrahlung auch Druck-



Figur 1: Der neue Kontrollraum des Halden-Reaktors. Dieser wurde 2012 modernisiert, wozu der Bereich Mensch-Technik-Organisation des HRP wesentliche Beiträge leistete. Quelle: HRP

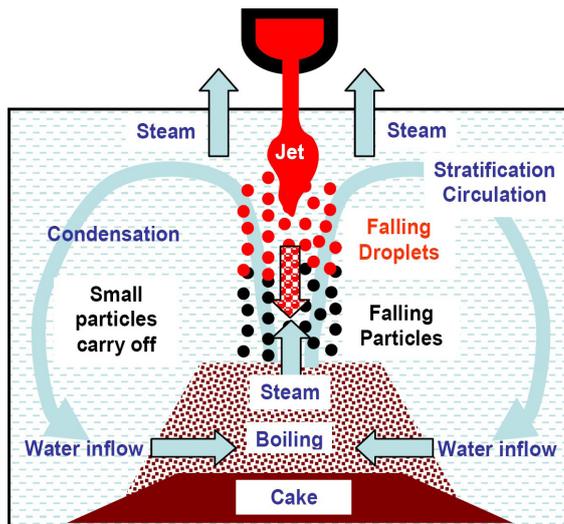
und Temperaturänderungen ausgesetzt werden. Die Reaktion von Brennstoffen und Hüllrohren auf diese Änderungen wird laufend sowie im Anschluss an den Versuch mittels Nachbestrahlungs-Experimenten analysiert.

Der Halden-Reaktor ist in der Regel jährlich während zwei Versuchsphasen von mehreren Monaten im Betrieb, in den Zwischenphasen werden die Versuche eingerichtet und Wartungsarbeiten vorgenommen. Im Jahre 2012 war der Reaktor wie geplant rund 190 Tage im Volllast-Betrieb, dabei wurden 14 Experimente ausgeführt. Zumeist werden dabei Kernbrennstoff-Anordnungen in so genannten Loop Systems bestrahlt, in denen die thermohydraulischen Bedingungen von Leichtwasserreaktoren simuliert werden. Dank ausgeklügelter Instrumentierung können zahlreiche Parameter wie Temperaturverlauf oder Brennstab-Innendruck und Brennstab-Verformung während des Versuchsablaufs gemessen werden. Andere Daten werden durch anschliessende Untersuchungen der eingesetzten Materialien im Hotlabor in Kjeller östlich von Oslo gewonnen (sogenannte Post Irradiation Examination PIE).

Von den im Jahre 2012 durchgeführten Versuchen sollen diejenigen zu Kühlmittelverlust-Störfällen herausgegriffen werden. Bereits seit mehreren Jahren

läuft dazu eine ganze Versuchsserie mit der Nummer IFA-650. Bei einem solchen Störfall werden die Brennstäbe in relativ kurzer Zeit erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen ausgesetzt. Es kommt zum Aufblähen der Brennstäbe, von Fachleuten auch «Ballooning» genannt. Beim anschliessenden Wiederauffüllen des Reaktordruckbehälters werden die Brennstäbe mit kühlem Wasser abgeschreckt, was zu grossen Materialspannungen führt. Mit diesen Versuchen sollen die Grenzen der Belastbarkeit der Hüllrohre und das Verhalten des Brennstoffs untersucht und die derzeitigen Sicherheitskriterien überprüft werden. Daran ist die Schweiz in zweierlei Hinsicht massgeblich beteiligt: ein Teil der verwendeten Brennstoffe stammt aus dem Kernkraftwerk Leibstadt (KKL), und von Experten des Paul Scherrer Instituts (PSI) werden die Versuche mit speziellen Computerprogrammen vorausberechnet. Damit kann der Versuch genauer geplant werden. Zugleich können aber auch die Computerprogramme zur Simulation des Brennstab-Verhaltens getestet und verbessert werden, indem man Abweichungen vom realen Versuchsverlauf analysiert.

Ein im Mai 2011 durchgeführter Versuch mit Brennstoff aus dem KKL (IFA-650.12), bei dem das Hüllrohr infolge von Spannungen in der Abkühlphase versagte und Brennstoff austrat, wurde



Figur 2: Schematische Darstellung der im Projekt MSWI untersuchten Prozesse (Cake=massiver unterer Teil der Schmelzpartikel-Schüttung). Quelle: KTH Stockholm.

2012 mit Messungen im Hotlabor ausgewertet. Demnach war dabei die Trennung zwischen Hüllrohr und Brennstoff komplett (sogenanntes Defueling), und der Brennstoff wies eine sehr feine Konsistenz auf. Der folgende Versuch IFA-650.13 wurde ebenfalls mit Brennstoff aus dem KKL durchgeführt. Die Vorausrechnungen waren wiederum vom PSI erstellt worden, und wie geplant kam es zu einem kompletten Bersten des Hüllrohrs. Gemäss ersten Gamma-Strahlenmessungen trat dennoch relativ wenig Brennstoff aus. Auch dieser Versuch muss nun genauer ausgewertet werden. Weitere Versuche in dieser Serie sind bereits in Vorbereitung bzw. Planung.

Das HRP, insbesondere die Versuchsserie IFA-650, hatte zusammen mit dem schwedischen Studsvik Cladding Integrity Project SCIP-II im Jahre 2012 unmittelbaren Einfluss auf die Aufsichtstätigkeit des ENSI. Gestützt auf die Versuchsergebnisse hat das ENSI die Betreiber der Schweizer Kernkraftwerke aufgefordert, die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf ihre Anlagen zu überprüfen. Mit dem Engagement beim HRP gewinnt die Schweiz neue Erkenntnisse im Bereich Brennstoff- und Materialensicherheit und kann ihre eigene Kompetenz auf diesem Gebiet verstärken. Weitere Informationen zum HRP finden sich auf der Internetseite des Projekts unter www.hrp.no.

Bruchmechanische Bewertung von mehrlagigen Schweißnähten des Reaktordruckbehälters

Im Reaktordruckbehälter (RDB) befindet sich der wärmeerzeugende Reaktorkern mit den Brennelementen. Der RDB ist Teil des Primärkreislaufs, der das unter hohem Druck stehende Kühlmittel einschliesst, und somit eine von mehreren Barrieren, die das Austreten radioaktiver Stoffe verhindern sollen. Zugleich ist der RDB aufgrund seiner Dimensionen eine der wenigen nicht austauschbaren Komponenten eines Kernkraftwerks. Im Hinblick auf den Langzeitbetrieb der Kernkraftwerke muss für solche Komponenten gewährleistet bleiben, dass für alle Anforderungen weiterhin ausreichende Sicherheitsmargen vorhanden sind. Dies gilt nicht nur für den Normalbetrieb, sondern auch für noch stärkere Belastungen, wie sie während schnell ablaufenden Störfällen auftreten können.

Ein RDB setzt sich für Druckwasserreaktoren aus mehreren geschmiedeten Stahlringen zusammen, die durch umlaufende, mehrlagige Schweißnähte miteinander verbunden sind. Die Bestrahlung mit Neutronen führt im kernnahen Bereich zu Veränderungen der Mikrostruktur des RDB-Materials. Die Folge ist eine Abnahme der Zähigkeit,

das heisst das Material wird allmählich spröder. Diese Materialveränderungen der RDB-Werkstoffe werden durch ein Überwachungsprogramm mit sogenannten Einhängeproben zeitlich vorleidend geprüft und quantifiziert. Solche Proben aus Originalwerkstoffen werden im Reaktor vergleichbaren Bedingungen ausgesetzt wie das RDB-Material und dann im Labor untersucht. Die Ergebnisse fließen in den sicherheitstechnischen Nachweis der strukturellen Integrität des RDB ein, den sogenannten Sprödbbruch-Sicherheitsnachweis.

Für die speziell entwickelten RDB-Stähle ist ein relativ steiler Temperaturübergang vom spröden zum zähen Werkstoffverhalten typisch. In diesem Übergangsbereich kann eine Referenztemperatur definiert werden, die sich mit zunehmender Bestrahlung erhöht und damit ein Mass für den Versprödungsgrad darstellt. Für die Bestimmung der Referenztemperatur stehen zwei verschiedene bruchmechanische Ansätze zur Verfügung: Seit mehreren Jahrzehnten wurde dafür das indirekte, halbempirische RTNDT-Konzept (Reference Temperature for Nil Ductility Transition) verwendet. Es nutzt Daten aus den Kerbschlag-Biegeversuchen an bestrahlten Proben. Ein neueres Konzept, die sogenannte Masterkurve-Methode, bestimmt die Referenztemperatur auf direktem Wege mit Hilfe werkstoffwissenschaftlicher und statistischer Modelle. Dieses Verfahren hat den Vorteil, mittels kleiner Bestrahlungsproben direkt bruchmechanische und damit auf Bauteile übertragbare Kennwerte zu ermitteln. Es ist aber grundsätzlich für homogenes Material definiert, wie es die RDB-Stahlringe darstellen. Inhomogenes Material wie die mehrlagigen Schweißnähte zwischen den Ringen war bis dahin wenig untersucht worden.

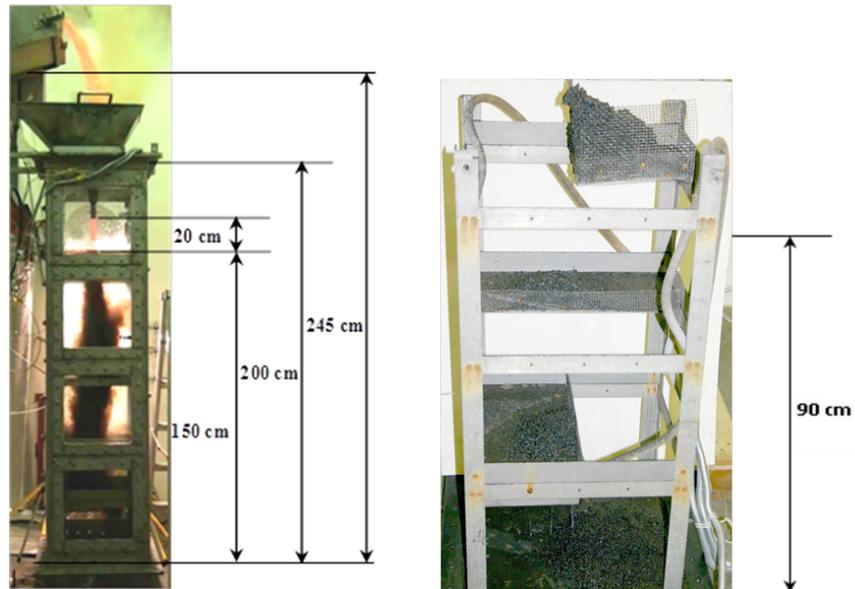
Das hier beschriebene Projekt, das am Helmholtz-Zentrum in Dresden-Rossendorf durchgeführt wurde, sollte nun klären, ob und unter welchen Bedingungen die Masterkurve-Methode auch für die mehrlagigen Schweißnähte angewendet werden kann. Dazu wurden zahlreiche Proben aus der originalen RDB-Umfangsschweißnaht des nicht in Betrieb gegangenen deutschen Kernkraftwerks Biblis C bruchmechanisch untersucht. Wichtig war insbesondere die Orientie-

zung der Proben parallel und senkrecht zur Schweissrichtung und deren Einfluss auf die Streuung der Bruchzähigkeit. Es konnte gezeigt werden, dass Proben mit beiden Orientierungen mit Hilfe der Masterkurve-Methode grundsätzlich auswertbar sind. Das inhomogene Schweissgefüge kann aber zu einer relativ starken Streuung der Bruchzähigkeit führen, weshalb eine spezielle Sicherheitsmarge berücksichtigt werden muss. Zusätzlich wurden sogenannte fraktographische und metallographische, also mikroskopische Untersuchungen an den Proben vorgenommen. Demnach wirkt sich die Variation des Gefüges, welche durch die inhomogenen Schweissnähte bedingt ist, nicht wesentlich darauf aus, wo die Risse entstehen.

Zusammengefasst zeigte das Projekt auf, dass die Masterkurve-Methode auch bei den mehrlagigen Schweissnähten angewandt werden kann; Bedingung dafür ist, dass bestimmte Korrekturfaktoren für die Probengröße und Sicherheitsmargen für die durch Inhomogenitäten bedingte Streuung der Ergebnisse beachtet werden. In diesem Sinne wurden die Resultate des Projekts in die ENSI-Richtlinie B01 übernommen (siehe dortigen Anhang 5, abrufbar unter www.ensi.ch). Sie regelt die Anforderungen an die Alterungsüberwachung für den Betrieb von schweizerischen Kernanlagen. Das Projekt hatte somit unmittelbaren praktischen Nutzen für die Aufsichtstätigkeit des ENSI und konnte im Jahre 2012 erfolgreich abgeschlossen werden.

MSWI – Wechselwirkungen von Kernschmelze, Wasser und Anlagenteilen bei schweren Unfällen

Das Projekt MSWI (Melt-Structure-Water-Interactions during Severe Accidents) befasst sich mit Vorgängen, die bei einem schweren Unfall in einem Siedewasserreaktor (SWR) auftreten können. Dabei kann der Reaktorkern wegen fehlender Kühlung schmelzen. Gelingt es im Zuge der Unfallbeherrschung nicht, die Kernschmelze ausreichend zu kühlen, kann der umgebende Reaktordruckbehälter (RDB) versagen und die Kernschmelze austreten. In diesem Fall trifft diese im In-



Figur 3: Versuch zum Auftreffen von Schmelze auf eine Wasservorlage und der Bildung einer Partikelschüttung in verschiedenen Wassertiefen. Quelle: KTH Stockholm.

nern des Sicherheitsbehälters (Containment) in der Regel auf eine Wasservorlage. Denn in einem solchen Fall ist bei vielen SWR, so auch bei den Schweizer Anlagen, vorgesehen, dass das Containment rechtzeitig geflutet wird.

Wenn der RDB versagt und die Kernschmelze in eine Wasservorlage fällt, sind zwei Vorgänge für die weitere Entwicklung des Unfalls entscheidend (siehe auch Abbildung 2). Erstens kann der Kontakt zwischen geschmolzenem Metall und Wasser unter Umständen zu einer schlagartigen Verdampfung des Wassers führen (Dampfexplosion). Zweitens bildet die Kernschmelze auf dem Boden des Containments eine Schüttung. Diese entwickelt wegen der andauernden atomaren Zerfälle aber auch weiter Wärme (Nachzerfallswärme). Die Verteilung und Struktur der Schüttung entscheidet darüber, ob die Wärme aus der Schmelze mit der Wasservorlage abgeführt werden kann. Ist dies nicht der Fall, so besteht die Gefahr, dass die Schmelze sich in den mehrere Meter mächtigen Betonboden hineinfrisst und diesen im Extremfall durchschmilzt.

Mit diesen komplexen Vorgängen beschäftigt sich die schwedische Königliche Technische Hochschule (KTH) in Stockholm im Rahmen des Projekts MSWI. Partner dabei sind die schwedische

Aufsichtsbehörde (SSM), schwedische Kraftwerksbetreiber, das Nordic Nuclear Safety Research Program (NKS), die EU (SARNET-Programm) und bereits seit 1996 auch das ENSI. Die KTH führt Experimente durch und versucht auf diese Weise, das Verständnis für die Prozesse zu verbessern. Zudem fliesst das gewonnene Wissen in die Entwicklung von Computerprogrammen zur Simulation der Unfallentwicklung ein. All dies dient dazu, Unsicherheiten zu reduzieren, die bei der Quantifizierung der Risiken eines schweren Unfalles bestehen.

Im Jahre 2012 wurde eine weitere, fünf Jahre dauernde Projektphase gestartet. Die Arbeiten des Jahres 2012 gliedern sich in folgende Teilprojekte:

(i) Austritt der Kernschmelze aus dem RDB: Bei der Frage, auf welche Art der RDB bei einem Kernschmelzunfall versagt, spielen beim SWR die Durchlässe an der halbkugelförmigen Unterseite des RDB eine wichtige Rolle; sie dienen als Führungsrohre für die Steuerstäbe und die Instrumentierung des Reaktorkerns. Die bisherigen Arbeiten zeigen, dass je nach Position der Führungsrohre am RDB die Führungsrohre herausfallen oder sich im Rohr verklemmen können. Ein weiterer Parameter, der untersucht wurde, ist der Druck im RDB. Wird der Druck beispielsweise von 60 bar auf 3

bar verringert, verlängert sich demnach die Zeit bis zum Versagen des RDB je nach Menge der Kernschmelze um 25 bis 43 Minuten. Solche Erkenntnisse können hilfreich sein, um geeignete Massnahmen im Rahmen der Unfalbeherrschung vorzusehen.

(ii) Auswirkungen von Dampfexplosionen: Hier geht es um die Drücke und Impulse, welche aus Dampfexplosionen resultieren und auf die Containment-Wandung übertragen werden. Dazu wurde eine Parameterstudie mit Hilfe von Computermodellen durchgeführt. Variiert wurden insbesondere der Durchmesser mit dem der Schmelzstrahl (Jet) aus dem RDB austritt, die Grösse der Schmelzetropfen und die Temperatur der Wasservorlage in der Reaktorgrube. Als Basis dienen Resultate von früheren Versuchen, bei denen die Kernschmelze durch Oxide der Metalle Wolfram, Wismut und Zirkonium simuliert wurde. Der Druck in der Reaktorgrube und der Impuls auf die Wände waren bei grösseren Schmelzstrahl-Durchmessern höher als bei kleineren, bei Durchmessern zwischen 30 oder 40 cm Durchmesser zeigte sich aber keine grosse Variati-

on. Bei grösseren Tropfen ist die Masse an Schmelze im Wasser grösser, womit auch höhere Drücke und Impulse erreicht werden. Tiefere Wassertemperaturen bewirkten nicht etwa weniger, sondern mehr Dampfentwicklung. Dies liegt daran, dass dann mehr Schmelzetropfen in Kontakt mit Wasser kommen, der Schmelzestrahler also offenbar stärker zerteilt wird.

(iii) Kühlbarkeit einer Schmelzpartikel-Schüttung: Wenn die Kernschmelze als Strahl aus dem RDB austritt und in die Wasservorlage eintritt, so wird der Strahl in zunehmender Tiefe immer weiter aufgetrennt (siehe auch Abbildung 3). Am Boden des Containments bildet sich daraufhin eine Schüttung aus Schmelzpartikeln. Für die Untersuchungen dieser Schüttbettbildung wurden weitere Experimente durchgeführt, bei denen die Distanz zwischen Austritt der Schmelze und Wasseroberfläche variiert wurde. Bei Austritt der Schmelze unterhalb der Wasseroberfläche resultierten grössere Schmelzpartikel und eine Änderung der Morphologie, verglichen mit dem Austritt weiter oben. Bei den Untersuchungen zur Ausbreitung des Schmelzparti-

kel-Schüttbetts zeigte sich, dass dieses nach der Ablagerung meist grösstenteils immobil ist. Durch später auftretende Strömungen von Wasser und Dampf wird nur noch die oberste Schicht der Schmelzpartikel verlagert. Die Mächtigkeit dieser Schicht beträgt einige Partikeldurchmesser. Dieses Verhalten ist nicht abhängig von der Grösse des verwendeten Behälters und der Menge der Schmelze.

Im Zuge der laufenden Projektphase soll bis Ende 2016 eine Struktur zur Unfallanalyse entwickelt werden, mit der Gefährdungen der Containment-Integrität quantifiziert werden können. Dabei sollen deterministische und probabilistische Analysen kombiniert werden. Das ENSI sieht darin einen wertvollen Beitrag zur Stufe 2 von probabilistischen Sicherheitsanalysen, in der Unfallverläufe von der Kernschmelze bis zur Freisetzung grösserer Mengen von Radioaktivität betrachtet werden. Zudem können die Unterlagen für die Beherrschung schwerer Unfallsituationen (Severe Accident Management Guidelines SAMG) optimiert werden.

Nationale Zusammenarbeit

Der wichtigste inländische Partner des ENSI beim Programm «Regulatorische Sicherheitsforschung» ist das Paul Scherrer Institut PSI, insbesondere der PSI-Bereich Nukleare Energie und Sicherheit NES. Das PSI hat im Rahmen der internationalen Nuklearsicherheit einen ausgezeichneten Ruf und trägt wesentlich dazu bei, dass die Schweiz international eine massgebende Rolle bei der Weiterentwicklung der

Sicherheitsvorgaben spielt. Bei den vom Bund geförderten Projekten arbeitet das ENSI darüber hinaus mit dem Geoinformationszentrum des Bundes Swisstopo zusammen, welches das internationale Forschungsprojekt Mont Terri koordiniert. Darüber hinaus sind insbesondere die Forschungsgruppe Ingenieurgeologie der ETH Zürich und die Universität Bern weitere nationale Partner.

Internationale Zusammenarbeit

Der wichtigste internationale Partner des ENSI bei der Forschung ist die Kernenergieagentur NEA der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung OECD. Die NEA-Mitgliedsstaaten verfügen zusammen über ca. 85 % der weltweiten nuklearen Stromerzeugungskapazität. Die NEA mit Sitz in Paris unterstützt ihre Mitgliedsländer bei der Weiterentwicklung der technischen, wissenschaftlichen und rechtlichen Grundlagen.

Folgende vom Bund geförderte Projekte werden durch mehrere internationale Partner finanziert: OECD Halden Reactor Project, OECD CODAP, OECD ICDE, OECD CADAK, OECD FIRE, MSWI, OECD Clay Club und Mont Terri Project. Darüber hinaus kooperieren folgende vom Bund geförderte Projekte mit internationalen Partnern: SAFE und Generischer Strahlenschutz. Auch die übrigen Projekte werden grösstenteils durch Institutionen aus verschiedenen Ländern finanziert oder kooperieren mit internationalen Partnern.

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- OECD HALDEN REACTOR PROJECT** 4.1.4*

Lead:	OECD-NEA	Funding:	ENSI
Contact:	Reiner Mailänder	Period:	2012–2014

Abstract: Das Projekt hat zwei Stossrichtungen: Brennstoff- und Materialverhalten sowie Mensch-Technologie-Organisation (MTO). Im Bereich Brennstoff und Materialverhalten stehen der Hochabbrand von Brennstoffen und die Materialalterung von Kerneinbauten im Vordergrund. Im Bereich MTO werden Studien durchgeführt zur menschlichen Zuverlässigkeit sowie zum Zusammenspiel zwischen Operateuren und Instrumenten der Kontrollräume.
- SAFE – SAFE LTO IN THE CONTEXT OF ENVIRONMENTAL EFFECTS ON FRACTURE, FATIGUE AND EAC** 4.1.4

Lead:	PSI	Funding:	ENSI
Contact:	Klaus Germerdonk	Period:	2012–2014

Abstract: SAFE befasst sich mit möglichen Umgebungseinflüssen auf die Bruchzähigkeit und die Ermüdung in wichtigen LWR Strukturwerkstoffen, dem SpRK-Risswachstum in RDB-Mischnähten sowie Grundlagenuntersuchungen zur SpRK-Risikobildung in ferritischen und austenitischen Stählen.
- BRUCHMECHANISCHE BEWERTUNG VON REAKTORDRUCKBEHÄLTER-MEHLAGENSCHWEISSNÄHTEN** 4.1.4

Lead:	Forschungszentrum Dresden-Rossendorf	Funding:	ENSI
Contact:	Dietmar Kalkhof	Period:	2010–2012

Abstract: Die Integrität des Reaktor Druckbehälters (RDB) ist eine grundlegende Voraussetzung für den sicheren und langfristigen Betrieb von Kernkraftwerken. Das Ziel des Projektes besteht darin, die Anwendbarkeit des Masterkurvenkonzeptes für inhomogene Materialzustände von Mehrlagenschweißnähten des RDB zu überprüfen.
- OECD CODAP – COMPONENT OPERATIONAL EXPERIENCE DEGRADATION AND AGEING PROGRAMME** 4.1.4

Lead:	OECD-NEA	Funding:	ENSI
Contact:	Susanne Schulz	Period:	2005–2014

Abstract: Die Datenbank OPDE (OECD Piping Failure Data Exchange Project) ist ein internationales Projekt der OECD-NEA, welches dazu dient, eine umfangreiche Datensammlung Alterungs- und Schädigungsmechanismen von mechanischen Ausrüstungen in Kernkraftwerken zu erstellen und zu pflegen.
- OECD CADAQ – CABLE AGEING DATA AND KNOWLEDGE PROJECT** 4.1.4

Lead:	OECD-NEA	Funding:	ENSI
Contact:	Franz Altkind	Period:	2012–2014

Abstract: Das OECD-Projekt CADAQ beschäftigt sich mit Alterungsphänomenen von elektrischen Kabeln. CADAQ hat sich zum Ziel gesetzt, die technische Basis für die Lebensdauer von klassierten elektrischen Kabeln unter dem Gesichtspunkt von Unsicherheiten bei den Qualifikationstests, welche vor der Erstinbetriebnahme stattfanden, neu zu beurteilen.
- OECD ICDE – INTERNATIONAL COMMON-CAUSE FAILURE DATA EXCHANGE** 4.1.4

Lead:	OECD-NEA	Funding:	ENSI
Contact:	Roland Beutler	Period:	2004–2014

Abstract: Ziel dieses Projektes ist die Förderung des internationalen Erfahrungsaustausches über so genannte Common-Cause Failure- (CCF) Ereignisse. Dies sind Ereignisse, bei denen gleichartige Fehler an mindestens zwei Komponenten auf Grund einer gemeinsamen Ursache auftreten. In die dafür erstellte Datenbank werden systematisch Schadensfälle und Ereignisse aus den teilnehmenden OECD-Staaten eingegeben und ausgewertet.
- OECD FIRE – FIRE INCIDENT RECORD EXCHANGE** 4.1.4

Lead:	OECD-NEA	Funding:	ENSI
Contact:	Annette Ramezian	Period:	2004–2013

Abstract: Das Ziel des Projekts ist die Erhebung und die Analyse von Daten zu Brandereignissen in Kernkraftwerken. Es soll dazu beitragen, die Ursachen, die Ausbreitung und die Auswirkungen von Bränden besser zu verstehen, die Brandverhütung weiter zu optimieren und die Basis für Probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) von Kernkraftwerken zu verbessern.

● CSARP – COOPERATION IN THE SEVERE ACCIDENT RESEACH PROGRAM

4.1.4

Lead:	U.S.NRC	Funding:	ENSI
Contact:	Annatina Müller	Period:	2008–2013
Abstract:	Rahmenvertrag für die Kooperation mit der U.S.NRC für Forschung und Informationsaustausch zu schweren Reaktorunfällen.		

● MSWI – MELT-STRUCTURE-WATER-INTERACTIONS DURING SEVERE ACCIDENTS IN LWR

4.1.4

Lead:	Königlich-Technische Hochschule (KTH) Stockholm	Funding:	ENSI
Contact:	Rainer Hausherr	Period:	2012–2016
Abstract:	Das Projekt dient der Untersuchung von Phänomenen, welche bei einem schweren Unfall mit Kernschmelze in einem Siedewasserreaktor (SWR) auftreten könnten: Kühlbarkeit einer Kernschmelze im Reaktordruckbehälter, Bildung von Schmelzpartikelschüttungen, Kühlbarkeit einer Schmelzpartikelschüttung, Risikobeurteilung von Dampfexplosionen.		

● ZUSAMMENARBEIT IN DER GENERISCHEN STRAHLENSCHUTZFORSCHUNG

4.1.4

Lead:	PSI	Funding:	ENSI
Contact:	Franz Cartier	Period:	2010–2012
Abstract:	Im PSI befasst sich die Sektion Messwesen der Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit (ASI) mit Fragen der Personendosimetrie, der Oberflächenkontaminations- und der Aerosolmesstechnik sowie mit der Weiterentwicklung der Radioanalytik. Das Projekt soll es dem ENSI ermöglichen, geeignete Studien, Entwicklungsarbeiten und Messkampagnen im vereinbarten Rahmen durch die Sektion Messwesen durchführen zu lassen.		

● FORSCHUNGSPROJEKT FELSLABOR MONT TERRI

4.1.4

Lead:	Mont-Terri-Konsortium unter Leitung von Swisstopo	Funding:	ENSI
Contact:	Erik Frank	Period:	2007–2012
Abstract:	Das internationale Forschungsprojekt Felslabor Mont-Terri bei St. Ursanne hat zum Ziel, die hydrogeologischen, geochemischen und felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons zu untersuchen. Diese Eigenschaften sind für die Beurteilung der Sicherheit und die Abklärung der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers für radioaktive Abfälle in diesem Gestein massgebend.		

● OECD WORKING GROUP ON MEASUREMENTS AND PHYSICAL UNDERSTANDING OF GROUNDWATER FLOW THROUGH ARGILLACEOUS MEDIA ("CLAY CLUB")

4.1.4

Lead:	OECD-NEA	Funding:	ENSI
Contact:	Erik Frank	Period:	2011–2014
Abstract:	Ziel des Clay Clubs ist es, den internationalen Stand der Wissenschaft in der Tongesteinsforschung zu verfolgen, den Kenntnisstand der sicherheitsrelevanten Prozesse und Parameter von Tongesteinen zu diskutieren, allfällige Lücken zu erkennen und mit gemeinsamen Projekten zu schliessen.		

