



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung

Februar 2010

Forschungsprogramm

Regulatorische Sicherheitsforschung

Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Autor:

Dr. Reiner Mailänder, Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), reiner.mailaender@ensi.ch

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

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Im Rahmen der regulatorischen Sicherheitsforschung vergibt und koordiniert das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) Forschungsaufträge mit dem Ziel, den aktuellen wissenschaftlich-technischen Kenntnisstand zu ermitteln, zu erweitern und für die Aufsicht verfügbar zu machen. Diese Forschungsprojekte tragen zu Erhaltung und Ausbau der hohen Sicherheit der Schweizer Kernanlagen bei. Das ENSI betreibt nationale und internationale Forschungsprojekte in den vier folgenden Themenbereichen:

- Im Bereich **Reaktorsicherheit** stehen die Materialforschung für die Alterungsüberwachung sowie die Forschung über Stör- und Unfälle zur Weiterentwicklung von Sicherheitsanalysen im Vordergrund. Zudem beteiligt sich das ENSI an einer Reihe von internationalen Datenbankprojekten und erhält so Informationen über Ursachen, Häufigkeit und Verläufen von Störfällen.
- Der **Strahlenschutz** dient dem Schutz des Personals, der Bevölkerung und der Umgebung der Kernanlagen vor ionisierender Strahlung. Hier liegen die Schwerpunkte in den Bereichen Strahlenmesstechnik und Radioanalytik.
- Im Bereich **Entsorgung** geht es um die Untersuchung geeigneter Gesteinsformationen für die geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle. Zudem werden die in einem Tiefenlager ablaufenden physikalisch-chemischen Prozesse betrachtet, um Einschluss- und Rückhaltungsvermögen der technischen und natürlichen Barrieren zu bestimmen.
- **Mensch, Organisation und Sicherheitskultur** haben einen wesentlichen Einfluss auf die Sicherheit einer Kernanlage. Die dazu vom ENSI unterstützten Forschungsprojekte beschäftigen sich mit dem Einfluss menschlicher Handlungen in Störfallsituationen und mit Anforderungsprofilen für das Personal von Kernkraftwerken (KKW).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Reaktorsicherheit

KORA – Korrosionsrisswachstum in austenitischen Strukturwerkstoffen [1]: KORA beschäftigt sich mit Alterungsvorgängen an Stahlkomponenten des Primärkreislaufs von KKW, namentlich mit zwei Prozessen: Spannungsrisskorrosion und Korrosionsermüdung. Spannungsrisskorrosion kann lange und dünne verzweigte Risse hervorrufen, die mit dem blossen Auge nicht zu erkennen sind. Einflussfaktoren sind mechanische Belastungen, die Umgebung (Wasserchemie des Primärkreislaufs) und die Werkstoffeigenschaften. Korrosionsermüdung ist eine ähnliche Form des umgebungsbedingten Risswachstums als Folge zyklischer mechanischer Belastung, z. B. durch Schwingungen. Die Ergebnisse des Projekts sollen auch dazu beitragen, Anforderungen für den Langzeitbetrieb der KKW festzulegen. Das Projekt KORA gliedert sich in der zweiten Phase 2009-11 in drei Teilprojekte:

- Das Teilprojekt I (Korrosionsermüdung in austenitischen Stählen) beschäftigte sich 2009 mit Initiierungsprozessen von Ermüdungsrissen, insbesondere bei langen Phasen konstanter Belastung im Anschluss an schnell ablaufende Transienten. Zudem wurden zwei neue Prüfstände konzipiert und einer davon bereits aufgebaut (Fig. 1). Die Prüfstände sind für Untersuchungen zur Schwingrisskorrosion an durchströmten Hohlproben ausgelegt, wobei die Umgebungs- und Lastbedingungen im KKW nachgebildet werden.
- Im Teilprojekt II geht es um Spannungsrisskorrosion in Schweissnähten aus hoch und niedrig legierten Stählen (Mischnähten). Es wurden Testkörper für zerstörungsfreie Prüfungen erzeugt, mit denen die Prüftechnik weiterentwickelt werden soll.
- Das Teilprojekt III befasst sich mit der zerstörungsfreien Messung der Initiierung von Spannungskorrosionsrissen in rostfreien und niedrig legierten Stählen. Dazu wurde die zuvor aufgebaute Messtechnik zum elektrochemischen Rauschen weiter optimiert.

PISA – Pressure Vessel Integrity and Safety Analysis [2]: Für Langzeitbetrieb der Schweizer Kernkraftwerke ist nachzuweisen, dass die Integrität des

Reaktordruckbehälters (RDB) für Normalbetrieb, Betriebsstörungen und postulierte Störfälle gewährleistet bleibt. Das Projekt *PISA* wurde 2009 als Nachfolger des Projekts *Diagnostik* begonnen. Es soll den Wissensstand auf dem Gebiet der Spröbruch-Sicherheitsnachweise des RDB analysieren. Daraufhin werden erweiterte Messungen und Modellberechnungen zur Strukturintegrität des RDB unter Langzeitbedingungen durchgeführt.

Das Projekt umfasst folgende Teile:

- Untersuchungen zu fortschrittlichen Messmethoden mit dem Ziel, den Versprödungsgrad des RDB-Materials zerstörungsfrei zu bestimmen. Die im Vorgängerprojekt als aussichtsreich eingestufte Messung des thermoelektrischen Effekts (Seebeck-Koeffizient) soll messtechnisch verbessert werden. Erste Anpassungen des Versuchsaufbaus im Jahre 2009 zeigten eine deutliche Reduzierung der Messwertstreuung und eine höhere Reproduzierbarkeit für Einzelmessungen.
- Es wurden Literaturstudien begonnen zum aktuellen Kenntnisstand der Schädigungsmechanismen und Modelle der mikrostrukturellen Vorgänge bei Neutronenbestrahlung von RDB-Stählen.

- Schliesslich wurden Untersuchungen zu probabilistischen Methoden gestartet, die im Rahmen der Sicherheits- und Spröbruch-Sicherheitsnachweise des RDB eingesetzt werden können. Mittels Vergleichstests werden Software-Module hinsichtlich Tauglichkeit für Sicherheitsanalysen zur Werkstoffalterung evaluiert.

Bruchmechanische Werkstoffcharakterisierung zur Überwachung der Neutronenversprödung von Reaktordruckbehältern für den Langzeitbetrieb von Kernkraftwerken [3]: Der RDB altert vor allem in Form von Versprödung, welche durch die Neutronenbestrahlung hervorgerufen wird. Deshalb müssen die Materialeigenschaften des RDB im Rahmen der Überwachung durchgängig gemessen und bewertet werden. In den laufenden Anlagen bestehen die Überwachungsprogramme aus Proben des Grundwerkstoffs und der Schweißmaterialien des RDB. Diese Proben werden mit mechanischen und bruchmechanischen Werkstoffprüferfahren geprüft. Bei der klassischen Methode zur Bewertung der Neutronenversprödung, dem RT_{NDT} -Konzept, wird eine materialspezifische Referenztemperatur und deren bestrahlungsinduzierte Verschiebung zur Justierung einer universellen Bruchzähigkeitskurve ermittelt. Die Bewertung basiert auf Messwerten aus dem Kerbschlagbiegeversuch.



Figur 1: Die neu entwickelte Einrichtung für Versuche zur thermomechanischen Ermüdung von Werkstoffen unter Umgebungs- und Lastbedingungen im KKW (Quelle: PSI)

In der im Oktober 2009 abgeschlossenen Projektphase wurde eine alternative Methode untersucht, die bereits in den USA als Standard (ASTM E1921) verwendet wird. Dieses so genannte Masterkurve(MC)-Konzept beschreibt die Temperaturabhängigkeit der Bruchzähigkeit K_{Jc} im spröduktilen Übergangsbereich ferritischer Stähle auf probabilistischer Grundlage. Sie basiert auf einer statistisch definierten Universalkurve, die mit einer Referenztemperatur T_0 werkstoffspezifisch justiert werden kann. Dabei wird T_0 direkt aus bruchmechanischen Versuchen mit Kleinproben ermittelt. Die Untersuchungen konnten zeigen, dass die MC-Referenztemperatur T_0 mit guter Genauigkeit weitgehend unabhängig von der Probengrösse und Risslänge bestimmt werden kann. Differenzen von T_0 von ca. 15 Kelvin ergaben sich bei der Verwendung von verschiedenen Probentypen, Biegeproben und Kompaktzugproben. Dieser Unterschied ist je nach Probentyp bei der Festlegung der unteren Grenzkurve der Bruchzähigkeit zu berücksichtigen. Mit dem MC-Konzept steht eine alternative bruchmechanische Methode zur Verfügung, die im Rahmen des Spröbruch-Sicherheitsnachweises angewendet werden kann. Der Vorteil der Methode besteht in der Übertragbarkeit der T_0 -Bestimmung auf grosse Bauteile und der Verwendung von Kleinproben, die in den Bestrahlungskapseln im Reaktor vorhanden sind. Die Ergebnisse gehen in das neue Regelwerk des ENSI ein.

Machbarkeitsstudie für zerstörungsfreie Messungen an der Stahldruckschale des Primär-Containments von Kernkraftwerken [4]: Der Primärkreislauf inklusive Reaktordruckbehälter wird im Rahmen der gestaffelten Sicherheitsbarrieren von einer Stahldruckschale umschlossen. Diese ist je nach Konstruktion des Kernkraftwerks im Auflagebereich des Fundaments sowohl von der inneren wie auch der äusseren Oberfläche direkt von einem Betonmantel umgeben.

Da es durch unerwartete Borsäure-Einwirkung zu lokalen Korrosionsangriffen an der Stahldruckschale kommen kann, ist eine periodische Überprüfung auf mögliche Wanddickenabnahmen wichtig. Die dafür übliche Ultraschallmessung ist an den frei zugänglichen Bereichen der Stahldruckschale relativ einfach, nicht dagegen in den vom Fundament umgebenen Bereichen. Dort werden bisher an ausgewählten Stellen Betonkernbohrungen durchgeführt, die nach Abschluss der Messungen wieder verschlossen werden.

Das ENSI hat zur Beurteilung von neuartigen Prüfverfahren an einer verdeckten Stahldruckschale im Jahre 2009 eine Machbarkeitsstudie gestartet. Dazu wird an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) ein Testkörper aufgebaut, welcher die schwierige Prüfsituation nachbilden soll. Dieser besteht aus einem massiven Stahlblech, in das unterschiedliche Fehlstellen eingebracht sind und das zum Teil in direktem Kontakt mit armiertem Beton einschliesslich Zwischenschichten aus Mineralwolle steht. An dem Testkörper sollen unterschiedliche zerstörungsfreie Messverfahren theoretisch und experimentell hinsichtlich ihrer Eignung zur Inspektion von verdeckter Korrosion an einer Stahldruckschale überprüft werden.

STARS V – Safety Research in Relation to Transient Analysis for the Reactors in Switzerland [5]:

Die Aufgabe des seit 1988 laufenden STARS-Projekts ist die Pflege und Weiterentwicklung von Methoden und Rechenprogrammen für die Durchführung von deterministischen Sicherheitsanalysen. STARS führt stationäre und störfallbedingte neutronenphysikalische und thermohydraulische Berechnungen für Systeme, Reaktorkerne und andere Konfigurationen wie Lager oder Behälter durch und unterstützt so das ENSI bei der Beurteilung der Einhaltung des gestaffelten Sicherheitskonzepts als auch der Wirksamkeit (Integrität) der hintereinander gestaffelten Barrieren der Kernkraftwerke. Neu kam 2009 die Hilfe beim Aufbau der ENSI-Sektion «Deterministische Sicherheitsanalysen» hinzu. Die im Jahre 2009 durchgeführten Forschungsarbeiten umfassten:

- Im Bereich Brennstoffverhalten wurde das Rechenprogramm *Falcon* durch die Implementierung experimentell validierter physikalischer Modelle weiter entwickelt.
- Für den Bereich Systemtechnik wurden die bestehenden Modellierungen aller Schweizerischen Kernanlagen auf das Rechenprogramm *Trace* übertragen, dem aktuellsten Programm für die Simulation des Systemverhaltens von Leichtwasserreaktoren. Die Modelle wurden anhand bestehender Anlagendaten, durch die Nachrechnung von Experimenten an grosstechnischen Versuchsanlagen und durch den Vergleich mit anderen bereits überprüften Rechenprogrammen validiert. Ein langfristiges Ziel ist zudem die Einführung integraler Analysemethoden, mit denen beispielsweise physikalische Modelle, der Detaillierungsgrad der räumlichen

Modellierung und die Schnittstellen zwischen den Analyseprogrammen problemspezifisch herangezogen werden (multi-physics). Als Prototyp wurde eine Prozedur entwickelt, mit der ein 3D-Modell des RDB des *European Pressurized Water Reactors* (EPR) generiert werden konnte. Schliesslich wurden Anwendungen von CFD-Programmen (Computational Fluid Dynamics) für den EPR und den Siedewasserreaktor BWR/6 (KKW Leibstadt) entwickelt.

- Der Bereich Reaktorkern beschäftigte sich mit der Quantifizierung von Unsicherheiten bei der Analyse von Reaktorkern- und Anlagentransienten bei der Verwendung von multi-physics-Programmsystemen. STARS beteiligte sich an einem OECD-Vergleichstest mit der Analyse von Auswirkungen der Unsicherheiten von Wirkungsquerschnittsdaten (Mass für die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung von Neutronen mit Atomkernen). Dabei werden die direkten Unsicherheiten der Wirkungsquerschnitte ebenso betrachtet wie diejenigen ihrer Modellierung in einem dynamischen 3D-Reaktormodell. Die Berechnung des nuklearen Aufheizvorgangs eines Siedewasserreaktors zeigte die erwartete starke Abhängigkeit des Reaktor-Leistungsverlaufs von den Wirkungsquerschnitten, da bei kleinen Leistungen die Wechselwirkung zwischen nuklearen und thermohydraulischen Effekten stark ist.

OECD SCIP – Studsvik Cladding Integrity Project [6]: Die Hüllrohre der Brennelemente umschliessen den als Tabletten (Pellets) vorliegenden nuklearen Brennstoff und bilden die primäre Barriere gegen die Freisetzung von radioaktiven Spaltprodukten. Sie müssen vielfältigen Belastungen standhalten, insbesondere bei erhöhten Abbränden. Das ENSI beteiligt sich zusammen mit 24 anderen Organisationen seit Mitte des Jahres 2009 am OECD-Projekt SCIP. Dieses befasst sich mit den wichtigsten Schädigungsmechanismen, die in den Hüllrohren aus Zirkoniumlegierungen – auch unter Einbeziehung des Pelleteinflusses – ablaufen können. Dazu werden Versuche sowohl am Forschungsreaktor Studsvik in Schweden als auch am Halden-Reaktor in Norwegen durchgeführt. Das Projekt SCIP lief in einer ersten Phase von 2004 bis Mitte 2009. Bis Ende 2009 wurde das Programm der auf fünf Jahre angesetzten Projektphase II konkretisiert, die sich vor allem mit folgenden Themen beschäftigen wird:

- *Mechanische Interaktion zwischen Brennstoff und Hüllrohr*: Die Brennstofftabletten verändern bei Leistungsänderungen ihre Form und können dadurch stellenweise starken Druck auf das Hüllrohr ausüben.
- *Interaktion zwischen Brennstoff und Hüllrohr durch Spannungsrissskorrosion*: Beim Betrieb anfallende gasförmige Spaltprodukte werden teilweise aus der festen oxidischen Tablettenmatrix in die Hohlräume im Inneren des Hüllrohrs freigesetzt. Beim Kontakt mit dem Hüllrohr können sie besonders an mechanisch beanspruchten Stellen die Rissbildung fördern (Spannungsrissskorrosion).
- *Durch Wasserstoff induzierte Hüllrohr-Schwächung*: Wasserstoff wird bei der Korrosion des Hüllrohrs freigesetzt und dringt von aussen in die Zirkoniumlegierung des Hüllrohrs ein. Dabei kann der Wasserstoff in Hydridform zu einer allgemeinen Versprödung des Hüllrohrs führen oder die Rissbildung von aussen forcieren.

MELCOR – Überprüfung und Weiterentwicklung des Rechencodes MELCOR für die Analyse schwerer Unfälle in Leichtwasserreaktoren [7]: Das Rechenprogramm MELCOR dient der Simulation von schweren Unfällen in Leichtwasserreaktoren. Es bildet Unfälle vom einleitenden Ereignis bis zur Freisetzung radioaktiver Substanzen in die Umgebung ab und wird laufend den aktuellen Erkenntnissen der Unfallforschung angepasst.

Als besonders bedeutsam für die Beschreibung von schweren Unfällen gilt die Oxidation der Brennstoff-Hüllrohre bei trocken gelegten Brennstäben im Reaktorbehälter oder im Brennstofflagerbecken. Das Phänomen kann zu beschleunigter Kernzerstörung und erhöhter Freisetzung von Spaltprodukten führen. Typischerweise erfolgt die Oxidation unter sauerstoffreichen Bedingungen anfänglich sehr schnell und geht mit dem Anwachsen der schützenden Oxidschicht nach einigen Minuten in einen linearen Verlauf über. Bei Temperatursprüngen können Teile der dickeren Oxidschicht jedoch abbrechen, womit sich an diesen Stellen die Oxidationsreaktion wieder beschleunigt. Auf der Grundlage von Experimenten am Forschungszentrum Karlsruhe wurde am PSI für diesen physikalischen Prozess ein genaueres Modell entwickelt. Das Modell wird nun in MELCOR implementiert und auf seine Kompatibilität mit dem Standard MELCOR-Modell getestet.

MSWI – Melt-Structure-Water Interactions during Severe Accidents in LWR [8]: Das Projekt liefert Erkenntnisse zu den komplexen Abläufen bei schweren Unfällen insbesondere in Siedewasserreaktoren, auf deren Grundlage möglichst präzise Modellierungen erstellt werden. Die Stossrichtung liegt auf einem möglichst umfassenden Verständnis des Zusammenspiels der Prozesse bei einer Kernschmelze und auf der Anwendbarkeit der Resultate. Dadurch werden z.B. belastbare Quantifizierungen des Risikos einer grossen Freisetzung radioaktiver Stoffe möglich. Sie sind wichtig für Entscheide über technische Nachrüstungen sowie bei der Optimierung von Unfallbeherrschungsstrategien und der Notfallplanung. In den vier Projektbereichen wurden 2009 folgende Ergebnisse erzielt:

- *Kühlbarkeit einer Kernschmelze im RDB und Unfallbeherrschungsstrategien (INCOSAM)*: Mittels des im Projekt erweiterten Rechenprogramms RELAP wurde die Wirksamkeit der Steuerstabsantriebskühlung auf den Wärmetransfer in der Kernschmelze simuliert. Im Zentrum stand, wie stark der Wasserdurchfluss gegenüber normalem Durchfluss zu erhöhen ist, um ein Kriechversagen der Steuerstab-Führungsrohre zu verhindern.
- *Formation von Schmelzpartikelschüttungen inner- und ausserhalb des RDB (DEFOR)*: Basierend auf Versuchsreihen zur Porosität der Kernschmelze, welche von verschiedenen Faktoren abhängt, wurde eine numerische Simulation weiter entwickelt. Mit diesem können die verschiedenen Rückkopplungs- und Selbstorganisationsprozesse in der Schmelzpartikelschüttung analysiert werden.
- *Kühlbarkeit der Schmelzpartikelschüttung inner- und ausserhalb des RDB (POMECO)*: Es wurden Versuche zur Charakterisierung der Druckverluste von Flüssigkeitsströmungen in Partikelschüttungen durchgeführt. Darauf aufbauend wurde ein Modell für die Simulation dieser Prozesse ermittelt.
- *Risikobeurteilung von Dampfexplosionen beim Eintritt von Kernschmelze in Wasser (SERA)*: Es wurden Versuche durchgeführt, bei denen ein einzelner Tropfen eines geschmolzenen oxidischen Ersatzmaterials in eine Wasservorlage fällt. Dabei konnte gezeigt werden, dass bei Temperaturen, die rund 200 °C über dem Schmelz-

punkt lagen, energiereiche Dampfexplosionen stattfanden.

OECD Halden Reactor Project (HRP), Teil Brennstoff- und Materialverhalten [9]: Am OECD Halden Reactor Project (HRP) nehmen über 130 Wissenschafts-, Behörden- und Industrieorganisationen aus 19 Staaten teil. Es hat zwei Stossrichtungen: Brennstoff- und Materialverhalten sowie Mensch-Technologie-Organisation (MTO). Im Bereich Brennstoff und Materialverhalten stehen zurzeit der Hochabbrand von Brennstoffen in Leichtwasserreaktoren und der Einfluss von Strahlung, Wasserchemie sowie mechanischen und thermischen Belastungen auf die Materialalterung von Kerneinbauten im Vordergrund. Der Bereich MTO wird im Kapitel «Mensch, Organisation und Sicherheitskultur» ausgeführt [23].

Im Berichtsjahr wurden zwölf experimentelle Kernbrennstoff-Anordnungen mit geringem bis hohem Abbrand bestrahlt, wobei die thermohydraulischen Bedingungen von Leichtwasserreaktoren simuliert werden. Es wurden Kenngrössen der keramischen Brennstoffe, vorab Uranoxide mit verschiedenen Zusätzen (Additiven), unter Betriebs- und Störfallbedingungen ermittelt. In vergleichenden Bestrahlungen wurden zudem Brennstab-Hüllrohre bezüglich Korrosion und Abscheidungen auf der Hüllrohr-Aussenseite untersucht.

Die Versuche an Hochabbrand-Brennstoffen aus kommerziellen Reaktoren unter Bedingungen, wie sie bei einem Kühlmittelverlust-Störfall auftreten, wurden fortgesetzt. Es wurden je zwei Tests an Brennstoffen für Druck- und Siedewasserreaktoren (DWR bzw. SWR) durchgeführt. Insbesondere die beiden Brennstoffproben aus dem KKW Leibstadt lieferten interessante Ergebnisse bezüglich Gasfreisetzung aus dem Brennstoff bzw. Hüllrohrdehnung und Brennstoffschwelen.

Ein Experiment zur Spaltgasfreisetzung aus Uranoxid-Brennstoffen mit Additiven bei hoher linearer Stableistung wurde abgeschlossen, und die Nachuntersuchungen sind im Gang. Ein neues Experiment zur Spaltgasfreisetzung mit Additivbrennstoff wird vorbereitet. Das Inertmatrixbrennstoff-Experiment, für welches das Paul Scherrer Institut (PSI) den Brennstoff produziert hatte, wurde aus dem Halden-Reaktor ausgebaut, und die Untersuchungen in den Heissen Zellen wurden abgeschlossen.

Die Versuche mit Reaktormaterialien gelten vorab der strahlungsinduzierten Spannungsrisskorrosion in normaler und reduzierender Wasserchemie. Interessante Ergebnisse bezüglich strahlungsinduzierten Veränderungen der Eigenschaften erhielt man für rostfreie Stähle von Reaktorstrukturen. Der günstige Einfluss der reduzierenden Wasserchemie auf das Risswachstum unter Bestrahlung konnte experimentell nachgewiesen werden.

OECD CABRI Waterloop Project [10]: Am Forschungsreaktor CABRI in Cadarache, Frankreich, werden Versuche zum Hochabbrandverhalten von Brennstäben bei schnellen Reaktivitätsstörfällen durchgeführt. Das sind Störfälle, bei denen der Reaktor durch schnelle unkontrollierte Bewegung eines Steuerelements bzw. Steuerstabs kurzzeitig überkritisch wird. Das Projekt stützt sich auch auf Tests Programms *Prometra*, welches das mechanische Verhalten bestrahlter Hüllrohrproben bei den für RIA (Reactivity Initiated Accident) typischen hohen Dehnungsraten untersucht. Die wichtigsten Arbeiten im Jahre 2009 umfassten:

- Der Umbau der Kernstruktur, erforderlich für die Umstellung von Natrium- auf Wasserkühlung, wurde inklusive der nötigen Tests abgeschlossen. Vorausberechnungen zu mehreren geplanten CABRI-RIA-Versuchen wurden durchgeführt.
- Mehrere mechanische Dehnungsversuche an bestrahlten Zr-4-Hüllrohren wurden bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Das Verformungsverhalten hängt ausser von der Temperatur auch von der Dicke der äusseren Schicht mit ausgeschiedenen Hydriden ab.
- Am PSI wurden Messungen zur Verteilung der Hydridausscheidungen in SWR-Prometra-Proben durchgeführt. Für ein Hüllrohrsegment aus dem KKW Leibstadt lagen sie zwischen 4,7 % und 16,8 %.

OECD MCCI – Melt Coolability and Concrete Interaction [11]: Das Projekt OECD MCCI (*Melt Coolability and Concrete Interaction*) bezieht sich auf schwere Unfälle, bei denen der Reaktorkern wegen fehlender Kühlung schmilzt und anschliessend auch der Reaktordruckbehälter versagt. Dann gelangt die Schmelze im Reaktorgebäude auf das Betonfundament, dessen Durchschmelzen durch Kühlung verhindert werden soll. Am *Argonne National Laboratory* in Chicago werden Versuche zur Kühlbarkeit

von Kernschmelze und der Wechselwirkung zwischen Kernschmelze und Beton durchgeführt. Im Jahre 2009 wurden vor allem folgende Arbeiten durchgeführt:

- Im April 2009 wurde Test Nr. 12 der Reihe *Small-Scale Water Ingression and Crust Strength* (SSWICS-12) durchgeführt. Erstmals wurde die Kühlung der aufgeheizten Kernschmelze durch am Fundament angebrachte Düsen eingeleitet; dabei wurden Wasser und Stickstoff eingespeist. Die beobachtete Effektivität der Kühlung war deutlich höher als in den bisherigen Tests der Reihe SSWICS. Zudem ergaben sich Daten zur erforderlichen Dimensionierung (Förderdruck, Durchfluss) der Kühlungseinrichtung.
- Ein erster Test der Reihe *Water-Cooled Basement* (WCB-1) wurde im Juli 2009 durchgeführt (Dauer 230 Minuten). Unterhalb des Fundaments, welches mit der Kernschmelze in Wechselwirkung steht, befindet sich ein mit Kühlwasser durchströmtes Rohrleitungssystem. Zusätzlich gibt es ein System zur Flutung mit Kühlwasser von oberhalb, welches aktiviert wurde, nach dem sich die Kernschmelze auf etwa 2000 °C aufgeheizt hatte. In der Flutungsphase stabilisierte sich die Temperatur bei etwa 1700 °C, und die Betonabtragung am Fundament endete, bevor eine nennenswerte Beschädigung des darunter befindlichen Kühlsystems auftrat (Fig. 2).



Figur 2: Zustand des Fundament-Kühlsystems, fotografiert nach WCB-1-Testende und Demontage (Quelle: OECD/MCCI-2009-TR05).

Datenbankprojekte der OECD [12–16]: Diese Projekte fördern den internationalen Erfahrungsaustausch über Störfälle sowie Schäden an KKW-Komponenten, die Störfälle auslösen können. Dazu werden themenspezifische Datenbanken aufgebaut, in die systematisch Schadensfälle und Ereignisse aus den teilnehmenden OECD-Staaten eingegeben werden. Die Daten werden anschliessend statistisch ausgewertet mit dem Ziel, Hinweise auf Schadens- bzw. Störfallursachen zu erhalten. Ein Zusammenschluss auf internationaler Basis ist dazu notwendig, weil die relevanten Ereignisse und Schäden in KKW selten sind. Das ENSI beteiligte sich 2009 an folgenden Projekten:

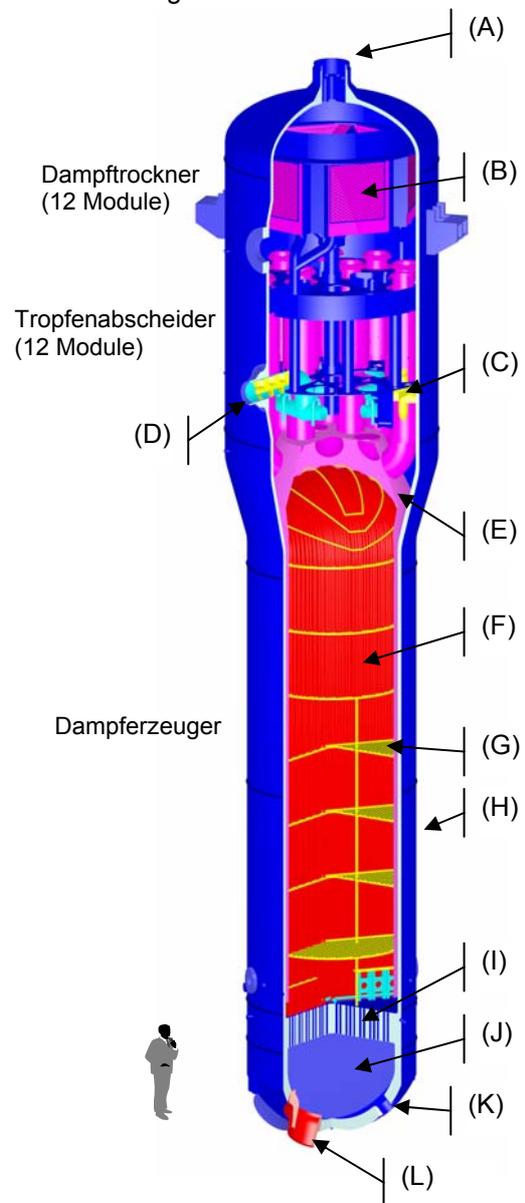
- *OECD OPDE – Piping Failure Data Exchange Project* [12]: Diese Datenbank beinhaltet Informationen von Schadensbefunden an sicherheitstechnisch klassierten und risikorelevanten Rohrleitungen in Kernkraftwerken, die zu Wandstärkeschwächungen, Rissen, Leckagen oder Brüchen geführt haben. Die internationale Arbeitsgruppe des Projektes hat den Status-Bericht für die Projekt-Periode 2002–2008 fertiggestellt und im November 2009 veröffentlicht. Die Sammlung von Schadensfällen an Rohrleitungen in Kernkraftwerken wurde 2009 weitergeführt. Drei der vier Schweizer KKW-Betreiber haben ihre aktive Teilnahme am Projekt aufgenommen. Die neu eingegebenen Datensätze aus Schweizer KKW betreffen Schäden, die keine grösseren Auswirkungen auf den sicheren Betrieb der Anlagen hatten und im Rahmen der Instandhaltung behoben werden konnten.
- *OECD SCAP – Stress Corrosion Cracking and Cable Ageing Project* [13]: Mit dieser Datenbank werden Schäden aus den KKW gesammelt und ausgewertet, die auf Spannungsrisskorrosion an Behältern und Rohrleitungen zurückzuführen sind, oder durch Alterung an elektrischen Kabeln entstehen. Die Schweiz beteiligt sich seit 2009 an am SCAP-Teilprojekt zur Spannungsrisskorrosion. Zu diesem Thema wurde 2009 eine umfangreiche Wissensdatenbank erstellt. Aus der Vielzahl an Datenbankeinträgen, die für die unterschiedlichen Arten der Spannungsrisskorrosions-Befunde gesammelt wurden, wurden wichtige Referenz-Schadensfälle identifiziert. Der aktuelle Kenntnisstand zu den wichtigsten Mechanismen der Spannungsrisskorrosion wurde in einem durch internationale Experten erstellten Bericht zusammengefasst.
- *OECD ICDE – International Common Cause Failure Data Exchange* [14]: Diese Datenbank beschäftigt sich mit Ereignissen, bei denen gleichartige Fehler an mindestens zwei (sicherheitsrelevanten) Komponenten aufgrund gemeinsamer Ursache auftraten, so genannte «Common Cause Failure (CCF)»-Ereignisse. Die Datenbank enthält mit den 2009 erfolgten Eingaben etwa 1500 Datensätze zu potenziellen oder effektiven CCF-Ereignissen für zehn verschiedene Komponententypen. Darüber hinaus wurden Kodierungsrichtlinien und Analyseberichte für verschiedene Komponenten aktualisiert, konzipiert bzw. fertig gestellt. Die Datenbankanwendung wurde um zusätzliche Funktionen erweitert, um die Verwaltung und Auswertung der Datensätze zu erleichtern.
- *OECD FIRE – Fire Incident Record Exchange* [15]: Das Ziel des 2003 gestarteten Projekts ist es, mit der Erhebung und der Analyse von Daten zu Brandereignissen in Kernkraftwerken dazu beizutragen, Ursachen, Ausbreitung und Auswirkungen von Bränden besser zu verstehen. Ausserdem soll die Brandverhütung weiter optimiert und die phänomenologische und statistische Basis für probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) von KKW verbessert werden. Im Jahre 2009 wurden planmässig Daten zu weiteren Brandereignissen gesammelt, soweit möglich auch zurückgehend bis 1990. Zudem wurden erste detaillierte Analysen mit Hilfe der Datenbank durchgeführt. Zur Dokumentation der zweiten Projektphase wurde ein Bericht erstellt.
- *OECD Compsis – Exchange of Operating Experience Concerning Computer-based Systems Important to Safety* [16]: Im Compsis-Projekt werden Betriebserfahrungen von rechnerbasierten Systemen gesammelt, speziell von digitalen Leittechniksystemen. Dies kann Informationen liefern über die Ursachen und Fehlerarten von Ereignissen mit rechnerbasierten Systemen und über die wechselseitige Beeinflussung von Hard- und Software. Hauptziel war 2009 weiterhin die Erfassung und Bereitstellung von Daten. Eine erste Analyse gibt Hinweise, welche Fehlerarten und Tätigkeiten im Lebenszyklus rechnerbasierter Systeme besonders zu beachten sind. Zudem wurde eine Qualitätsmanagement-Vorschrift für Kriterien von Meldungen und Publikationen überarbeitet.

Strahlenschutz

Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Strahlenmesstechnik [17]: Dieses Projekt befasst sich der Eichung und Kalibrierung von Dosimetrieystemen und Strahlenmessgeräten. Einerseits ist dabei die Personenosimetrie wichtig, also die Messung der äusseren und inneren Strahlenexposition von Menschen. Zudem geht es um Messungen zur Freigabe von Materialien aus kontrollierten Zonen und zur Überwachung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung. Die wichtigsten Ergebnisse im Jahre 2009 waren:

- Das Gebiet um die KKW Mühleberg und Gösgen wurde aeroradiometrisch ausgemessen. Mit Ausnahme der Betriebsareale der Kernanlagen wurden keine erhöhten Messwerte registriert. Auf den Betriebsarealen wurden die gesetzlichen Grenzwerte eingehalten.
- PSI-Vertreter beteiligten sich an der Revision der internationalen Strahlenschutznormen ISO 7503 (Messung und Beurteilung von Oberflächenkontaminationen) und ISO 2889 (Sampling Airborne Radioactive Materials from Stacks and Ducts of Nuclear Facilities).
- Zur Validierung der Monte-Carlo-Kalibrierung des PSI-Ganzkörperzählers wurde die Detektorgeometrie bestimmt und das virtuelle Detektormodell erstellt. Anschliessend wurden Messungen im Ganzkörperzähler mit einfachen Geometrien durchgeführt, das Detektormodell wurde verifiziert und angepasst. Erste Messungen mit komplexen Geometrien zeigten aber noch nicht die gewünschte Genauigkeit.
- Die Verwendung des Materials CR-39 als Detektor in der Personen-Neutronendosimetrie wurde untersucht. Auf das Detektormaterial einfallende Neutronen hinterlassen darin Spuren. Sie werden in einem chemischen Ätzprozess sichtbar gemacht und mittels computergestützter Bildanalyse und digitaler Mikroskopie ausgewertet. Das PSI überprüfte die Reproduzierbarkeit der Auswertung, die Linearität im Dosisbereich von 0,5 bis 100 mSv und den Einfluss der Ätzparameter Temperatur und Zeit auf die Ergebnisse.
- Es konnte gezeigt werden, dass die neuen MADUK-Sonden (Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der KKW) extrem empfindlich sind. Selbst Erhöhun-

gen der Ortsdosisleistung um ungefähr 20 nSv/h aufgrund der Abgabe von Positronenstrahlern im West-Areal des PSI konnten nachgewiesen werden. Unter Strahlenschutz-Gesichtspunkten ist diese Erhöhung unerheblich.



Figur 3: Dampferzeuger eines Druckwasserreaktors (Framatome Design 33/19): (A) Dampfaustritt; (B) Trockner Schikanen; (C) Wasserabscheider; (D) Haupt-Speisewassereintritt; (E) Leitmantel; (F) U-Rohrbündel (3238 U-Rohre); (G) Rohrhalter (7 Platten); (H) Druckmantel; (I) Rohrboden; (J) Trennwand; (K) Hauptkühlmittelaustritt; (L) Hauptkühlmitteleintritt; (Quelle: PSI/KKB).

Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Radioanalytik [18]: In der Radioanalytik werden chemische und physikalisch-chemische Untersuchungen in Verbindung mit Kernstrahlungsmessungen an verschiedensten radionuklidhaltigen Proben durchgeführt. Im Jahr 2009 wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Eine Schnellmethode zur Bestimmung der Strontiumisotope ^{89}Sr und ^{90}Sr in Frischmilch wurde entwickelt. Sie basiert auf einer organischen Verbindung, welche zusammen mit dem Strontium einen Komplex (Chelat) bildet.
- Die Entwicklungsarbeiten für die simultane Bestimmung der Plutoniumisotope ^{241}Pu , ^{240}Pu , ^{239}Pu und ^{238}Pu in Schlammproben mittels der Methoden *Liquid Scintillation Counting* (LSC), sowie *Alpha- und Massenspektrometrie* (MS) wurden beendet.
- Ein Verfahren zur Bestimmung des Wasserstoffisotops ^3H (Tritium) und des Kohlenstoffisotops ^{14}C (Radiokarbon) in Schlammproben und Reaktorrückbaukomponenten mittels eines geschlossenen Gasextraktionssystems wurde entwickelt.
- Bei Vergleichsmessungen auf internationaler Ebene liess sich eine sehr gute Übereinstimmung der PSI-Resultate mit den Referenzwerten feststellen.

ARTIST – Aerosol Trapping in the Steam Generator [19]: Das internationale Projekt ARTIST untersucht DWR-Unfallsequenzen mit Kernschmelze, Dampferzeuger-Heizrohrbruch und fehlerhafter Isolation des Dampferzeugers (Fig. 3). Bei solchen Unfallsequenzen können radioaktive Stoffe unter Umgehung der Sicherheitssysteme direkt an die Umwelt abgegeben werden. Daher sind sie trotz ihrer nach heutigem Kenntnisstand ausserordentlich geringen Eintretenshäufigkeit wichtig. Im Projekt ARTIST wird untersucht, welcher Anteil der bei einem solchen Unfall freigesetzten Spaltprodukte in Form von Aerosolen und Tropfen im Dampferzeuger zurückgehalten wird. Der 2009 gestartete Projektabschnitt ARTIST-II konzentriert sich in fünf Teilprojekten (Phasen I, II, V, VI und VIII) auf verschiedene Einzelaspekte des Aerosol- und Tropfentransports, die bisher noch nicht betrachtet wurden und im Laufe von ARTIST-I zusätzliche Bedeutung erlangt haben. Sie beschäftigen sich mit unterschiedlichen Bereichen innerhalb des Dampferzeugers. Die Ablagerungs- und Wiederaustragungsprozesse werden bei unterschiedlichen Gasgeschwindigkeiten, Aerosolgrössen und -materialien und Wasserständen im Dampferzeuger studiert.

Eines der Ziele des Jahres 2009 war die Entwicklung von Methoden, mit denen Aerosole in hohen Konzentrationen und in einer Form erzeugt werden, bei der die Resuspension von an Oberflächen

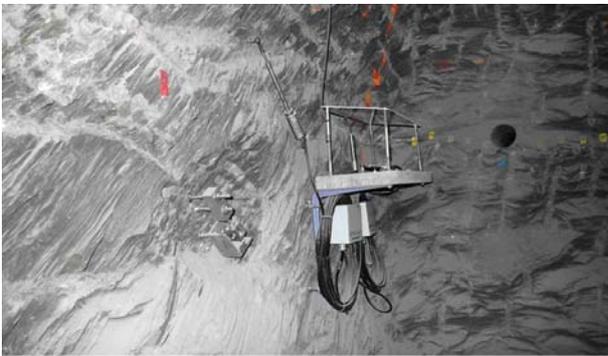
abgeschiedenen Aerosolen minimiert wird. Dies ist wichtig für die Projektphasen I und II zur Aerosol-Rückhaltung in den Dampferzeugerrohren bzw. dem Nahbereich des Heizrohrbruches. Die geplanten Versuche der Phasen V (Aerosol-Rückhaltung bei gefluteter Sekundärseite des Dampferzeugers) und VIII (Aerosol-Rückhaltung bei geflutetem Tropfenabscheider) wurden erfolgreich durchgeführt. In den vier Tests der Phase V wurde die Aerosol-Rückhaltung bei minimalen und maximalen Gasdurchsätzen für zwei unterschiedliche Aerosolgrössen bestimmt. Die Rückhaltung steigt demnach mit zunehmendem Gasdurchsatz und zunehmender Partikelgrösse. Einer der Tests der Phase VIII wurde bei minimalem Gasdurchsatz durchgeführt, während bei den weiteren beiden Tests der Gasdurchsatz in vier Stufen vom minimalen bis auf den maximalen Wert erhöht wurde. Die Rückhaltung ist bei allen Tests sehr hoch und praktisch unabhängig vom Gasdurchsatz und von der Partikelgrösse. Der Abscheideprozess wird dominiert durch die hohe Wasservorlage und das komplexe Strömungsverhalten im gefluteten Tropfenabscheider.

Transport und Entsorgung

Forschungsprojekt Felslabor Mont Terri [20]: Das internationale Forschungsprojekt Felslabor Mont-Terri hat zum Ziel, die geologischen, hydrogeologischen, geochemischen und felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons zu untersuchen. Diese Eigenschaften sind für die Beurteilung der Sicherheit und der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers für radioaktive Abfälle in diesem Gestein massgebend.

Der Schwerpunkt der ENSI Forschungsarbeiten lag 2009 auf dem RC-Experiment («Rock Mass Characterisation»), welches von der Ingenieurgeologie der ETH Zürich durchgeführt wird. Im Vordergrund dieses mehrjährigen Experimentes stehen einerseits die Untersuchung der durch den Bau eines neuen Stollens (Galerie-08) induzierten Deformationen und andererseits die Erfassung der sehr langsam ablaufenden langfristigen Verformungen. Von besonderem Interesse ist der Einfluss bestehender Diskontinuitäten (Trennflächen wie Klüfte, Scherzonen, Störungen, Schichtung) auf das mechanische Gebirgsverhalten des Opalinustons. Die Verformungsmessungen in Beobachtungsbohrungen, die geodätischen Verschiebungsmessungen am Hohlraumrand sowie die mittels Laseraufnahmen evaluierten flächenhaften Verschiebungen im

Versuchsabschnitt wurden zum grössten Teil wissenschaftlich ausgewertet. Anhand der Daten zeigt sich, dass das Gebirgsverhalten stark von der Gesteins- und Gebirgsanisotropie sowie von Heterogenitäten kontrolliert wird. Die Beobachtungen während des Ausbruchs des Stollenabschnittes zeigen, dass das mechanische Verhalten des Opalinuston durch eine Kombination von Gleitverschiebungen entlang von bestehenden Trennflächen (Scherzonen, Klüfte), Scherversagen entlang der Schichtung sowie spröden Bruchprozessen bestimmt wird. Um dieses Gebirgsverhalten zu verifizieren, wurden zudem Laborversuche an Opalinuston-Gesteinsproben zur Ermittlung felsmechanischer Kennwerte durchgeführt (ETH Zürich zusammen mit der Technischen Universität Graz).



Figur 4: Messanordnung des CD-Experimentes mit 3D-Jointmeter (links) und Crackmeter (rechts) zur Erfassung der Öffnung und Schliessung diskreter Schichtfugen im Opalinuston in Abhängigkeit vom Lokalklima (Quelle: ETH Zürich).

Das ENSI beteiligte sich ferner an zwei weiteren kleinen Folgeexperimenten in der EZ-B Nische des ENSI: Im Cyclic-Deformation(CD)-Experiment, dargestellt in Fig. 4, wird das zyklische Austrocknungsverhalten der Stollenwand in Abhängigkeit des Stollenklimas (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) untersucht. Mit dem Evaporation-Logging(FM-D)-Experiment evaluiert das ENSI zusammen mit Swisstopo eine neue Methode der Durchlässigkeitsbestimmung (evaporation logging) in Bohrungen.

FORGE – Fate of Repository Gases [21]: Die in einem geologischen Tiefenlager eingelagerten Metalle und organischen Stoffe produzieren durch Korrosionsprozesse oder aufgrund des Stoffwechsels von vorhandenen Mikroben Gase wie Wasserstoff und Methan in den Einlagerungstollen. In dichten Wirtgesteinen kann dieses Gas nur langsam abgeführt werden, und es kommt zu einem Druckaufbau in den Lagerstollen. Die für die

Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers wichtige Frage ist, ob durch diesen Druckaufbau die Rückhaltefähigkeit des Wirtgesteins durch die Bildung von Rissen gefährdet wird.

FORGE ist ein Projekt der EU mit 24 Teilnehmern. Es soll die sicherheitstechnische Bedeutung der durch Gase verursachten Prozesse im Nah- und Fernfeld eines Tiefenlagers untersuchen. Die Arbeiten sind in 5 Teilprogramme (Work Packages WP) unterteilt. Das ENSI arbeitete 2009 am WP1 (Behandlung von Gas in Sicherheitsanalysen) mit. Die Arbeiten beinhalten die Erstellung einer Bestandsaufnahme des technisch-wissenschaftlichen Wissens zur Gasproblematik, die Definition von vergleichenden Berechnungen zum Gastransport und die Durchführung von sicherheitstechnisch relevanten Berechnungen. Im Jahr 2009 wurde von den Projektteilnehmern ein Übersichtsbericht zur sicherheitstechnischen Bedeutung der durch Gase verursachten Prozesse im Nah- und Fernfeld eines Tiefenlagers erstellt. Zusätzlich wurden in der Arbeitsgruppe die Vergleichsberechnungen definiert.

Mensch, Organisation und Sicherheitskultur

HRA – Human Reliability Analysis [22]: Im Projekt HRA wird die Zuverlässigkeit von menschlichen Handlungen unter Berücksichtigung von verschiedenen Randbedingungen untersucht. Stand der Technik ist die Bestimmung der Fehlerwahrscheinlichkeiten für Handlungen, die während eines Störfalls gefordert sind, aber unterlassen werden. Hingegen fehlt eine effiziente Methode zur systematischen Identifizierung und Quantifizierung von ungeplanten Handlungen, welche den Verlauf eines Störfalls negativ beeinflussen, den so genannten EOC (Errors of Commission). Im Jahre 2009 wurden folgende Punkte bearbeitet:

- Methodenentwicklung zur systematischen Identifizierung und Quantifizierung von EOC sowie Anwendung der Methode für ein Schweizer KKW: Die in der Projektphase HRA-II entwickelte CESA-Methode (Commission Errors Search and Assessment) zur EOC-Ermittlung und -Bewertung wurde anhand internationaler Erfahrungen überprüft und, wo notwendig, verfeinert. Dazu wurden auch Simulatordaten verwendet, die im Rahmen des OECD *Halden Reactor Project* gewonnen wurden. Es wurde unter anderem geprüft, ob die bekannten HRA-Methoden die relevanten Einflussfaktoren für die Zuverlässigkeit

sigkeit von Operateurhandlungen richtig vorher-sagen und bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass die CESA-Methode diese Faktoren gut vorhersagt. Die CESA-Methode wurde zudem 2009 für ein zweites schweizerisches KKW ge-testet. Mit ihr wurden insgesamt 6 Handlungen mit «EOC-Potenzial» identifiziert und quantifi-ziert. Ein Teil davon hat demnach eine ver-gleichbare Wichtigkeit wie einige der Hand-lungen, die bereits in der werkspezifischen proba-bilistischen Sicherheitsanalyse berücksichtigt worden sind. Jedoch ist der Einfluss aller identi-fizierten EOC auf die Kernschadenshäufigkeit geringfügig. Die Analyse dieser EOC-Fälle gab keinen Anlass, Störfallvorschriften zu verbes-tern.

- *Entwicklung dynamischer Modelle, welche die Wechselwirkungen zwischen Mensch und Anlage abbilden, um die HRA zu unterstützen:* Ziel ist es, mit einem dynamischen Modell für das Anlagen- und Personalverhalten die HRA zu unterstützen. Die mit diesem Modell ermögliche Darstellung des Zeitverlaufs der Anlageparameter im Wechselspiel mit den Operateurhandlungen soll insbesondere die Modellierungsgrundlagen der Diagnoseprozesse der Operateure verbessern. Die Arbeiten konzentrierten sich 2009 auf die Simulation von Störfallszenarien und deren Auswertung für die HRA. Wichtig dabei war die Entwicklung einer Methode zur systematischen Auswertung der Simulationen.

OECD Halden Reactor Project (HRP), Teil Mensch–Technologie–Organisation (MTO) [23]: Das OECD Halden Reactor Project (HRP) wurde weiter oben mit seinem Bereich Brennstoff- und Materialverhalten beschrieben [9]. Im hier darge-stellten Bereich MTO werden empirische Studien durchgeführt zum Zusammenspiel zwischen Reak-toroperateuren und den Kontrollanzeigen und Steu-erpulten, die ihnen in den Kontrollräumen zur Ver-fügung stehen (Human–System Interface Design). Dabei stehen zukünftige technische Systeme und deren Schulung im Vordergrund. So wurde eine Datenerhebung mit Leistungstests und Interviews zu innovativen Anzeigesystemen abgeschlossen. Elektronische Visualisierungsinstrumente dienen dazu, die Strahlenexposition bei Arbeiten im Kern-kraftwerk zu reduzieren, indem Aufgaben in der virtuellen Umgebung geplant, geübt und daraufhin optimiert werden. Dazu wurden eine Übersicht über Richtlinien für die Auslegung von Kontroll-

räumen fertiggestellt und eine Software entwickelt, mit der in einem virtuellen Modell einer Kernanlage Strahlenquellen und Abschirmungsmassnahmen dar-gestellt werden. Die Studien im Bereich der menschlichen Zuverlässigkeit (Human Reliability Analysis) dienen dazu, Analysemethoden für Aus-löser und Wahrscheinlichkeit von menschlichem Versagen weiter zu verbessern. Es wurden Simu-latorversuche mit zehn Operateurgruppen durch-geführt, um Referenzdaten für deren Handlungen bei Störfällen zu erhalten. Für die Szenarien «Dampferzeuger-Heizrohrbruch» und «Speisewas-serverlust bei einem Druckwasserreaktor» wurden erste Resultate publiziert. Schliesslich wird die immer grösser werdende Abhängigkeit auch der nuklearen Sicherheitstechnik von rechnerbasierten Systemen und deren Zuverlässigkeit betrachtet. Zu den dabei wichtigen Fehlern, die durch die gleiche Ursache ausgelöst werden (so genannte Common Cause Failures), wurde eine Software für die Über-wachung der Reaktorleistung in einem Simulator geprüft. Zudem wurden verschiedene Leittechnik-Modernisierungsprojekte in einer retrospektiven Studie bezüglich der Anforderungen an das zu entwickelnde System untersucht.

Anforderungsanalyse für das Personal in Schweizer Kernkraftwerken [24]: Die Aufgaben des Personals (Schichtchef, Reaktoroperateure, Pikett-Ingenieur) im Kommandoraum eines KKW verlangen ihrer Tätigkeit angepasste Persönlich-keitsmerkmale. Die entsprechenden Anforderun-gen wurden letztmals Ende der achtziger Jahre ak-tualisiert. Seither haben sich die Anforderungen an alle diese Personen erweitert und bedürfen einer eingehenden Überarbeitung. Dabei stellte sich die Frage, ob sich für die drei Personengruppen abge-schlossene Anforderungsprofile erstellen lassen, wie weit sich diese Profile überschneiden und ob sich eine Methode entwickeln lässt, welche es auch Personen ohne spezielle Kenntnisse in der Eignungsdiagnostik ermöglicht, diese Profile den sich verändernden Bedürfnissen anzupassen.

Die bereits im Vorjahr erstellten Anforderungs-profile für den Normalbetrieb wurden 2009 noch um die Anforderungsprofile für den Störfall erwei-tert. Die vorangegangenen Untersuchungen hatten gezeigt, dass für die Erstellung signifikanter Profile die Befragung einer kleineren Anzahl von Perso-nen genügt. Deshalb, und auch aus Ressourcen-gründen, wurden die Befragungen für Störfälle nur in drei Werken für Reaktoroperateure und Schicht-

chefs durchgeführt. Für Pikett-Ingenieure erübrigte sich die Befragung, da diese ohnehin nur im gestörten Betrieb zum Einsatz kommen, was schon in der ersten Projektphase berücksichtigt wurde. Entgegen oft geäusselter Befürchtungen erwies sich die Anzahl der Fähigkeiten, die sich für die beiden Werkzustände (Normalbetrieb und Störfall) signifikant unterscheiden, als gering. Dies gilt sowohl bei der Tätigkeit als Reaktoroperator als

auch als Schichtchef. Damit verfügen die Kernkraftwerke nun über aktuelle Anforderungsprofile für die Rekrutierung von zulassungspflichtigem Betriebspersonal. Ausserdem wurde ein elektronisches Hilfsmittel erstellt, das die Werke befähigt, unabhängig von externer Unterstützung die Anforderungsprofile bei Veränderungen des Arbeitsumfeldes zu erheben.

Nationale Zusammenarbeit

Innerhalb der Schweiz haben die Institute, welche die Forschungsarbeiten ausführten, effizient und kooperativ zusammengearbeitet. Regelmässige Gespräche mit dem ENSI ermöglichten eine Ausrichtung der Fachinhalte entsprechend der aktuellen Bedürfnisse. Dabei wurde die Umsetzung der Resultate in die schweizerische Sicherheits- und

Aufsichtspraxis berücksichtigt. Neben dem Paul Scherrer Institut arbeitet das ENSI im Rahmen der regulatorischen Sicherheitsforschung insbesondere mit folgenden Institutionen zusammen: ETH Zürich, Universität Zürich, Eidgenössische Materialprüfungsanstalt Empa.

Internationale Zusammenarbeit

Die folgenden Projekten sind direkt oder indirekt Teil von internationalen Kooperationsprogrammen inkl. EU-Rahmenprogrammen (Details in einzelnen Projektberichten, s. u.):

KORA [1], PISA [2], STARS [5] OECD-SCIP [6], MELCOR [7], MSWI [8], OECD Halden Reactor

Project [9, 23], OECD CABRI Water Loop Project [10], OECD MCCI [11], OECD OPDE [12], OECD SCAP [13], OECD ICDE [14], OECD FIRE [15], OECD COMPSIS [16], ARTIST [19], Mont Terri [20], FORGE [21].

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Die Projekte konnten im Berichtsjahr grösstenteils planmässig abgewickelt werden. Sie lieferten wichtige wissenschaftliche Grundlagen, welche direkt oder indirekt in die Aufsichtstätigkeit des ENSI einfließen werden. Der Transfer der wissenschaftlichen Ergebnisse in die operativen Bereiche des ENSI und umgekehrt erfolgt dank der guten Arbeitsbeziehungen mit den Projektleitern und ihren Teams reibungslos. Der Kompetenzerhalt und -ausbau in-

nerhalb der Aufsichtsbehörde sowie die Bereitstellung von interessanten Forschungsthemen für die Wissenschaftler sind somit gewährleistet. Die Forschungsprojekte, welche im Jahr 2010 gestartet werden, orientieren sich inhaltlich ebenfalls an den oben beschriebenen Schwerpunkten. Grösstenteils wird es sich dabei um Nachfolgeprojekte der im Berichtsjahr abgeschlossenen Aktivitäten handeln.

Liste der F+E-Projekte

Jahresberichte (JB) und Referenzen zu allen Projekten sowie weitere Informationen finden sich im *Erfahrungs- und Forschungsbericht 2009* des ENSI. Er kann unter www.ensi.ch heruntergeladen oder dort als Druckversion bestellt werden.

- [1] H.P. Seifert, M. Breimesser, H. Leber, M. Ramesh, S. Ritter (hans-peter.seifert@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **KORA II – Environmentally-Assisted Cracking in Austenitic LWR Structural Materials** (JB)
- [2] M. Niffenegger, H.P. Seifert, Q. Guian, H. Leber and P. Simon (markus.niffenegger@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **PISA – Pressure Vessel Integrity and Safety Analysis** (JB)
- [3] H.-W. Viehrig, C. Zurbuchen (h.w.viehrig@fzd.de), Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, D-01314 Dresden, **Bruchmechanische Werkstoffcharakterisierung zur Überwachung der Neutronenversprödung von Reaktordruckbehältern** (JB)
- [4] K. Germerdonk (klaus.germerdonk@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **Machbarkeitsstudie für zerstörungsfreie Messungen an der Stahldruckschale des Primär-Containments von Kernkraftwerken** (JB)
- [5] H. Ferroukhi, A. Manera, A. Vasiliev, G. Khvostov und Projekt Team, (hakim.ferroukhi@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **STARS – Safety Research in relation to Transient Analysis of the Reactors in Switzerland** (JB)
- [6] R. Mailänder (reiner.mailaender@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD SCIP – Studsvik Cladding Integrity Project** (JB)
- [7] J. Birchley, Y. Liao (jonathan.birchley@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Development and Assessment Program for the MELCOR Code** (JB)
- [8] W.M. Ma, P. Kudinov, A. Karbojian, R.C. Hansson, C.T. Tran, L.X. Li, F. Cadinu, (ma@safety.sci.kth.se), Division of Nuclear Power Safety – Royal Institute of Technology, Sweden, **MSWI – Melt-Structure-Water Interactions During Postulated Severe Accidents in LWRs** (JB)
- [9] W. Wiesenack, Ø. Berg (wolfgang.wiesenack@hrp.no), Institutt for energiteknikk, OECD Halden Reactor Project, NO-1751 Halden, **OECD Halden Reactor Project: Fuels and Materials / Man, Technology, Organisation** (JB)
- [10] A. Gorzel (andreas.gorzel@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD CABRI Waterloop Project** (JB)
- [11] B. Reer (bernhard.reer@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD MCCI – Melt Coolability and Concrete Interaction** (JB)
- [12] S. Schulz (susanne.schulz@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD OPDE – Piping Failure Data Exchange Project** (JB)
- [13] K. Germerdonk (klaus.germerdonk@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD SCAP – Stress Corrosion Cracking and Cable Ageing Project** (JB)
- [14] R. Beutler (roland.beutler@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD ICDE – Common Cause Failure Data Exchange** (JB)
- [15] A. Ramezani (annette.ramezani@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD FIRE – Fire Incident Record Exchange** (JB)
- [16] R. Jäggi (rudolf.jaeggi@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD COMPSIS – Exchange of Operating Experience Concerning Computer-based Systems Important to Safety** (JB)
- [17] Ch. Schuler, G. Butterweck, M. Boschung, S. Mayer und C. Wernli (christoph.schuler@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Strahlenmesstechnik** (JB)
- [18] J. Eikenberg, M. Jäggi, (jost.eikenberg@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Radioanalytik** (JB)
- [19] T. Lind, D. Suckow, S. Güntay, (terttaliisa.lind@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **ARTIST II– Aerosol Trapping in the Steam Generator** (JB)
- [20] F. Amann, E. Button, R. Thöny, S. Löw (florian.amann@erdw.ethz.ch), Chair for Engineering Geology, ETH Zürich, ETH Höggerberg, CH-8093 Zürich, **RC-Experiment Rock Mass Characterisation** (JB)
- [21] F. Altorfer (felix.altorfer@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **FORGE – Fate of Repository Gases** (JB)
- [22] V.N. Dang, L. Podofilini, D. Mercurio, (vinh.dang@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Human Reliability Analysis (HRA)** (JB)
- [23] W. Wiesenack, Ø. Berg (wolfgang.wiesenack@hrp.no), Institutt for energiteknikk, OECD Halden Reactor Project, NO-1751, Halden, Norway, **OECD Halden Reactor Project: Fuels and Materials / Man, Technology, Organisation** (JB)
- [24] S. Schumacher, M. Kleinmann, Universität Zürich, Psychologisches Institut, Arbeits- und Organisationspsychologie, Zürich, **Anforderungsanalyse für das Personal in Schweizer Kernkraftwerken. Erstellen werkzustandsabhängiger Profile und Abschluss des Projektes** (JB)