

Überblicksbericht 2010

Forschungsprogramm Regulatorische Sicherheitsforschung



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN

Titelbild:**OECD Halden Reactor Project: Blick in das Halden Man-Machine Laboratory (HAMMLAB)**

Das Halden Reactor Project [1] untersucht in seinem Bereich Mensch – Technik – Organisation (MTO) den Einfluss von Arbeitsumgebung und Organisation auf die Sicherheit von Kernkraftwerken. Dazu werden auch Experimente mit Operateur-Teams unter simulierten Notfallbedingungen im speziell dafür eingerichteten Halden Man-Machine Laboratory durchgeführt. Sie dienen dazu, die Zuverlässigkeit menschlicher Handlungen zu bestimmen und die Gestaltung von Kontrollräumen zu verbessern (Quelle: Halden Reactor Project).

BFE Forschungsprogramm Regulatorische Sicherheitsforschung

Überblicksbericht 2010

Auftraggeber:

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Industriestrasse 19
CH-5200 Brugg

Programmleiter BFE (Autor):

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

Bereichsleiter BFE:

Dr. Christophe de Reyff (Christophe.deReyff@bfe.admin.ch)

Jahresberichte zu allen Projekten des Forschungsprogramms inklusive Publikationen und Details zur nationalen und internationalen Zusammenarbeit finden sich im Erfahrungs- und Forschungsbericht 2010 des ENSI. Er kann unter www.ensi.ch heruntergeladen oder dort als Druckversion bestellt werden.

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.

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:

- Die Resultate von Forschungsprojekten sollen unmittelbar der laufenden Aufsichtstätigkeit des ENSI dienen. Forschungsergebnisse gehen einerseits in vom ENSI zu erstellende Richtlinien ein, die rechtliche Anforderungen in den Bereichen Kernenergie und Strahlenschutz konkretisieren. Andererseits zieht das ENSI auch für konkrete Einzelentscheide die Ergebnisse von Forschungsprojekten als Grundlage heran.
- Die vom ENSI geförderten Forschungsprojekte dienen dem Kompetenzerhalt nicht nur innerhalb des ENSI, sondern darüber hinaus auch bei Forschungsinstitutionen. Das ENSI will mit diesen Forschungsprojekten insbesondere die Ausbildung im Bereich der nuklearen Sicherheit fördern.

- 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 auch Resultate, die in der Schweiz alleine nicht erzielt werden könnten. Dazu muss das ENSI auch eigene Beiträge leisten können. 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 in die Aufsichtstätigkeit ein und dienen damit direkt der Sicherheit. Gerade die Projektbegleitung verschafft den Fachsektionen auch 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, der geplante Bau von neuen Kernkraftwerken und die Entsorgung der radioaktiven Abfälle. Diesen Herausforderungen trägt das ENSI in den Programmschwerpunkten Rechnung. Die vom Bund geförderten Projekte stellen nur einen Teil des Forschungsprogramms dar. Der überwiegende Teil der Kosten wird vom ENSI den Beauftragten in Rechnung gestellt.

Programmschwerpunkte

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 abgebrannt sind und ausgetauscht werden; beim Brennstoff und den Brennstab-Hüllrohren 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 (Containment); bei diesen sind eher 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 eingegeben werden. 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 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 hier Projekte der OECD sowie der In-

ternationalen Atomenergie-Agentur IAEA. Einerseits wird die Robustheit von sicherheitsrelevanten elektrischen Systemen gegenüber den Auswirkungen von Überspannungen betrachtet; diese können vom Hochspannungsbereich ausgehen und sich wegen ihres hohen Energiegehalts auf eine grosse Zahl von Kraftwerkssystemen negativ auswirken. Andererseits geht es um die Auswirkungen von Erdbeben und Flugzeugabstürzen auf die Tragwerke von sicherheitsrelevanten Gebäuden. Weil dabei aufwändige Experimente und Simulationen durchgeführt werden, ist die internationale Zusammenarbeit wichtig.

Menschliche Faktoren

Übergeordnetes Ziel in diesem Bereich ist die Reduktion der Unsicherheit menschlicher Handlungen bei der probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA), die das Risiko von Störfällen in Kernkraftwerken quantitativ erfasst. Der Bereich umfasst zwei Schwerpunkte. Erstens geht es um den Einfluss menschlicher Handlungen auf Störfälle und deren Beherrschung. Dabei wird vor allem die Zuverlässigkeit des Operateurverhaltens unter verschiedenen Bedingungen mit der so genannten Human Reliability Analysis (HRA) untersucht. Während die versehentliche Unterlassung erforderlicher Eingriffe relativ gut untersucht ist, sind fehlerhafte Handlungen, welche den Verlauf eines Störfalls negativ beeinflussen können, weniger gut erforscht. Diese so genannten Errors of Commission werden daher im Projekt HRA systematisch identifiziert und quantifiziert. Zweiter Schwerpunkt ist der Einfluss der Kontrollraumgestaltung auf die Leistung der Operateure.

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 und mit Hilfe von Experimenten validiert. Sie dienen auch als

Grundlage für die quantitative Ermittlung des Anlagenrisikos in probabilistischen Sicherheitsanalysen. Zunehmend werden verschiedene Modelle gekoppelt, um das Anlageverhalten umfassender simulieren zu können. Das ist auch wichtig für die Beurteilung der Sicherheitseinrichtungen neuer Kernkraftwerke. Diese verwenden vermehrt so genannte passive Komponenten, die als zuverlässiger gelten im Vergleich zu aktiv betriebenen Komponenten wie Pumpen. Sie funktionieren allein auf der Grundlage einfacher physikalischer Vorgänge, welche an die in der Anlage ablaufenden Phänomene wie Druck- und Temperaturänderungen gekoppelt sind.

Strahlenschutz

Die Arbeiten in diesem umfassen ein breites Spektrum anwendungsbezogener Themen. Sie reichen von der Überprüfung und Kalibrierung von Messsystemen für ionisierende Strahlung und der Messung der Ortsdosisleistung in der Umgebung von Kernanlagen aus der Luft (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.

Entsorgung

Bei der geologischen Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle spielt die Untersuchung geeigneter Gesteinsformationen eine zentrale Rolle. Dazu werden hydrogeologische, geochemische und felsmechanische Eigenschaften des Opalinustons im Felslabor Mont Terri untersucht. Die Auslegung eines Tiefenlagers und dessen Überwachung wird ebenso beleuchtet wie die Eigenschaften der darin einzulagernden Abfälle. Zudem werden die in einem Tiefenlager ablaufenden physikalisch-chemischen Prozesse betrachtet. Schliesslich wird auch die atmosphärische Zirkulation während der letzten Eiszeit erforscht, um daraus Rückschlüsse auf eine zukünftig mögliche Klimaentwicklung und Gletscherverbreitung ziehen zu können.

Highlights 2010

KORA-II – Korrosionsrisswachstum in austenitischen Strukturwerkstoffen

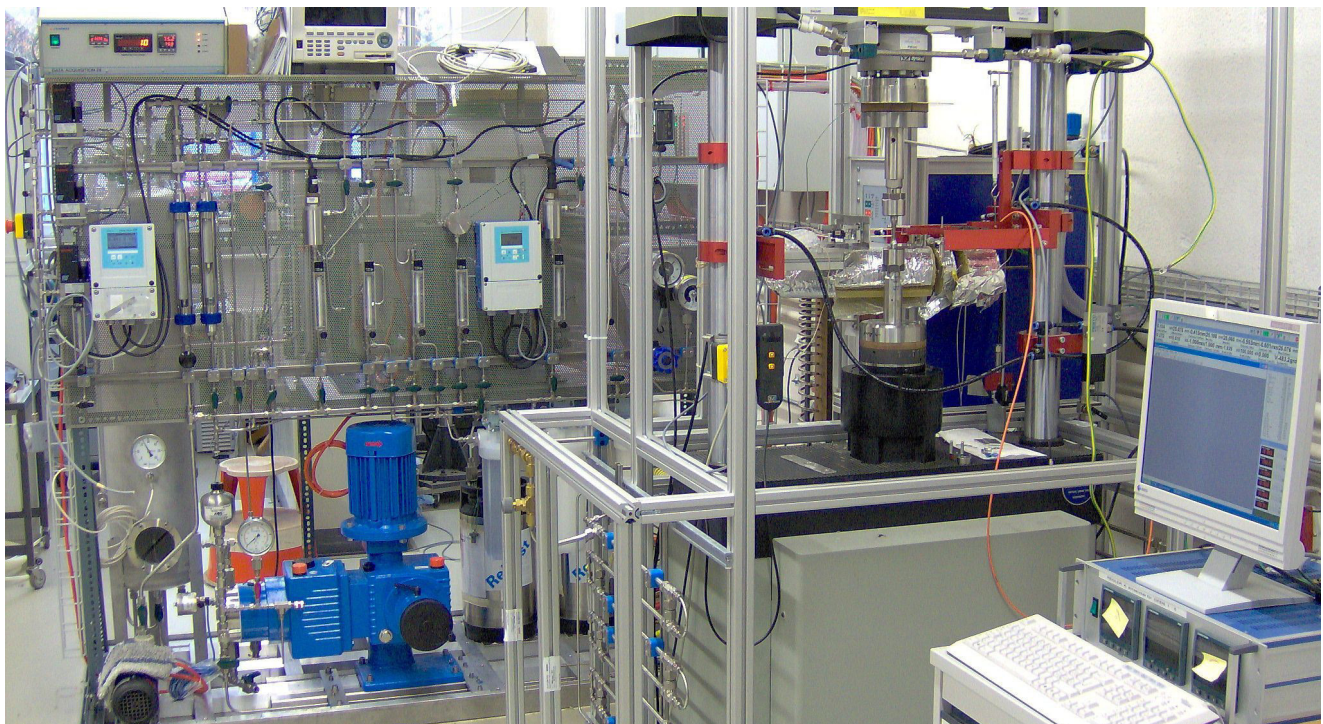
Das Projekt KORA wird am Labor für Nukleare Materialien des Paul Scherrer Instituts PSI durchgeführt. Es beschäftigt sich mit Schädigungsmechanismen an Stahlkomponenten des Primärkreislaufs von Kernkraftwerken, namentlich mit zwei Prozessen: Spannungsrisskorrosion und Schwingrisskorrosion. Spannungsrisskorrosion kann auftreten, wenn ungünstige Bedingungen für mechanische Belastung, Wasserchemie im Primärkreislauf und Werkstoffzustand zusammentreffen. In diesen Fällen können dann relativ lange, verzweigte Risse entstehen. Schwingrisskorrosion ist eine spezielle Form des umgebungsbedingten Risswachstums, in der mechanische Belastungen zyklisch auftreten. Das Projekt KORA gliedert sich in der zweiten Phase 2009–2011 in drei Teilprojekte.

- Im Teilprojekt I (*Schwingrisskorrosion in austenitischen Stählen*) wurden 2010 zwei neu konzipierte Prüfstände in Betrieb genommen. Mit ihnen können Versuche an durchströmten Hohlproben durchgeführt werden. Deren komplexe thermomechanische Belastungen

und die verschiedenen Umgebungsbedingungen kommen denjenigen an Komponenten im Kernkraftwerk sehr nahe. Dazu gehören insbesondere last- und dehnungskontrollierte Versuche mit kleiner Dehnamplitude, die mit Temperaturwechseln der durch die Proben strömenden Flüssigkeit überlagert werden. In weiteren Experimenten wurden relativ lange Phasen konstanter Belastung im Anschluss an eine Folge schnell ablaufender Lastwechsel nachgefahren, wie sie im typischen Kraftwerksbetrieb auftreten. Die bisherigen Ergebnisse zeigen keinen wesentlichen Einfluss der Haltezeiten auf die Rissausbreitungsgeschwindigkeit unter typischen Wasserchemie-Bedingungen für Leichtwasserreaktoren.

- Das Teilprojekt II beschäftigt sich mit *Spannungsrisskorrosion in Mischnähten*. Diese stellen eine Kombination einer Nickelbasislegierung als Schweißmaterial, hier Inconel-182, mit einem niedriglegierten ferritischen Stahl wie dem des Reaktordruckbehälters (RDB) dar. Das Ausbreitungsverhalten von Spannungskorrosionsrissen im Grenzbereich zwischen diesen Materialien wurde weiterhin untersucht.

Einerseits wird die Rissausbreitung bei hohen Beanspruchungen charakterisiert, un andererseits wird der Einfluss des Schwefelgehalts im RDB-Stahl sowie sehr geringer Chloridkonzentrationen im Wasser des Primärkreislaufs analysiert. Unter den oxidierenden Bedingungen der Normalwasserchemie für Siedewasserreaktoren können demnach bereits sehr geringe Chloridkonzentrationen ausreichen, um eine Rissverlängerung aus dem Inconel-182 in das ferritischen Grundmaterial zu ermöglichen. Unter den reduzierenden Bedingungen der Wasserstoffchemie-Fahrweise, die heute in den schweizerischen Siedewasserreaktoren angewendet wird, ist Risswachstum aus dem Inconel-182-Schweißgut in den Behälterwerkstoff hinein dagegen nicht beobachtet worden. Zudem wurden Probekörper mit Mischnähten hergestellt, in die realitätsnahe Spannungskorrosionsrisse eingebracht und zerstörungsfrei untersucht wurden. Sie sind auch für das neue internationale Projekt PARENT vorgesehen, mit dem die zerstörungsfreie Prüftechnik weiter entwickelt werden soll und an dem sich das ENSI seit Ende 2010 ebenfalls beteiligt.



Figur 1: Einer der neu in Betrieb genommenen Versuchsstände zur Untersuchung der thermomechanischen Ermüdung von Werkstoffen unter realitätsnahen Umgebungs- und Lastbedingungen (Quelle: PSI).



Figur 2: Im Halden-Labor für virtuelle Realität. (Quelle: HRP)

- Im Teilprojekt III wird die *Initiierung von Spannungskorrosionsrissen in rostfreien und niedrig legierten Stählen* untersucht. Die Arbeiten im Berichtsjahr konzentrierten sich auf den Einfluss unterschiedlicher Chloridkonzentration auf die Korrosionsrissanfälligkeit für einen ferritischen Reaktorstahl. Dabei wurde auch die im Rahmen des KORA-Projektes optimierte Methode des elektrochemischen Rauschens eingesetzt.

Das Projekt KORA leistet wertvolle Beiträge für die Aufsichtstätigkeit des ENSI im Hinblick auf den Langzeitbetrieb der bestehenden Kernkraftwerke. Dabei ist die Materialalterung vor allem der nicht austauschbaren Komponenten ein wichtiges Thema, wie zum Beispiel der Umgebungseinfluss bei der Ermüdung austenitischer Reaktorstähle. So sind Erkenntnisse aus dem Projekt in der neuen Richtlinie ENSI-B01 zur Alterungsüberwachung berücksichtigt worden.

OECD Halden Reactor Project, Bereich Mensch – Technik – Organisation

Das OECD Halden Reactor Project (HRP) ist ein seit über 50 Jahren laufendes gemeinsames Forschungsprogramm von über 100 Institutionen aus 18 Staaten. Es hat zwei Stossrichtungen: Brennstoff- und Materialverhalten sowie Mensch – Technik – Organisation (MTO). Experimentelle Arbeiten werden primär im norwegischen Halden von rund 250 wissenschaftlichen Mitarbeitenden durchgeführt. Dort

stehen ein Versuchsreaktor, eine Werkstatt zur Herstellung instrumentierter Brennstoff-Versuchsanordnungen, ein Labor sowie ein Simulationszentrum zur Verfügung. Forschungseinrichtungen in den Mitgliedsländern (z. B. PSI) oder die Nuklearindustrie (z. B. Kernkraftwerk Leibstadt) beteiligen sich ebenfalls an Experimenten. Das ENSI hat Einsitz im Board of Management, dem leitenden Gremium des Projekts, und stellte 2010 dessen Vorsitzenden.

Der Bereich MTO umfasst Studien zu wichtigen Themen für den sicheren Betrieb bestehender Kernanlagen, für die Modernisierung von Kontrollräumen und digitalen Systemen sowie für die Auslegung zukünftiger Kernkraftwerke:

- Analysemethoden für die *menschliche Zuverlässigkeit* werden evaluiert, indem die Reaktionen von Operateur-Teams auf verschiedene simulierte Notfälle im Halden Man – Machine Laboratory (HAMMLAB) getestet werden. So läuft unter massgeblicher Beteiligung des PSI eine Studie, bei der 13 Gruppen von Wissenschaftlern ihre Methoden und die damit gemachten Voraussagen mit den Testergebnissen von 14 Operateur-Teams vergleichen.
- Kontrollanzeige- und Steuerungselemente der nahen Zukunft werden im Versuchslabor implementiert und von Fachleuten bewertet. Dabei stellt sich vor allem die Frage, wie die *Schnittstellen zwischen Menschen und technischen Systemen* (Human – System Interface HSI) einzuschätzen sind. Gerade die bei neuen Kontrollräumen verstärkt eingesetzten

Bildschirme mit Berührungseingabe (Touch Interfaces) sowie innovative, stärker automatisierte Systeme wurden im Berichtsjahr 2010 getestet.

- *Elektronische Visualisierungsinstrumente*, die mit virtueller Realität arbeiten, gelten als viel versprechend sowohl für die HSI-Gestaltung als auch für die Planung und Schulung (Fig. 1). Für die Bewertung von 3D-Modellen von Kontrollraum-Auslegungen wurde im Berichtsjahr eine Prototyp-Software erarbeitet. Zudem wurden ein Hilfsmittel zur Strahlungsfeld-Visualisierung für portable Geräte und ein zugehöriger Prüfstand entwickelt. Dieses Hilfsmittel besteht aus einem Echtzeitsystem zur Positionsbestimmung in Innenräumen und einem Strahlungsrechner mit Visualisierungs-Software.
- Bei komplexen technischen Systemen wie Kernanlagen ist die *Verlässlichkeit von Software und digitaler Leittechnik*, wie sie bei neuen und bei der Modernisierung bestehender Anlagen eingesetzt werden, eine zentrale Fragestellung. Die Anforderungen an sicherheitsrelevante digitale Systeme müssen in Form des so genannten Requirements Engineering erhoben werden. Für diesen Prozess werden Vorgaben anhand bestehender Erfahrungen entwickelt. Für Sicherheitsanalysen bedeutsam ist ein Projekt des HRP zur Entwicklung einer Testmethode für Software, die aus Komponenten zusammengesetzt ist, die bereits in bestehenden Systemen genutzt werden. Ein weiterer Forschungsbereich des HRP betrifft Techniken zur



Figur 3: Nische des RC-Experiments mit den Beobachtungsbohrungen parallel zur Galerie-2008 (Quelle: ENSI)

Online-Überwachung, die wichtig für die Validierung von Signalen und die Entdeckung von Fehlern sind.

Im Berichtsjahr wurde das Forschungsprogramm für die kommende Dreijahresperiode 2012–2014 aufgelegt. Die Projektleitung besuchte alle Mitgliedsstaaten und diskutierte das Programm mit den beteiligten Organisationen. In der Schweiz fand hierzu am 23. November 2010 unter Leitung des ENSI ein eintägiges Kolloquium am PSI statt. Die Mitgliedsländer konnten ihre Präferenzen hinsichtlich der vorgeschlagenen Projekte einbringen. Auf dieser Basis wird das HRP das Programm im Jahre 2011 finalisieren. Bereits im Dezember 2010 bestätigten alle Mitglieder des Board of Management, dass ihre Länder sich weiterhin am HRP beteiligen wollen.

Forschungsprojekt Felslabor Mont Terri

Die geologische Tiefenlagerung in der Schweiz konzentriert sich auf Gesteinschichten mit hohem Tongehalt. Das Forschungsprojekt im Felslabor Mont Terri [2] hat zum Ziel, die hydrogeologischen, geochemischen und felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons zu untersuchen. Dieses für die Tiefenlagerung wichtige Gestein liegt am Mont-Terri bei St. Ursanne vor und

ist über einen horizontalen Zugangsstollen gut zugänglich. Das Felslabor mit seinem Stollensystem hat eine Gesteinsüberdeckung von rund 300 m und befindet sich unmittelbar neben dem Sicherheitsstollen des Autobahntunnels der Transjurane. Am seit 1996 laufenden Forschungsprojekt beteiligen sich heute 14 Organisationen aus 7 Ländern (Schweiz, Frankreich, Deutschland, Spanien, Belgien, Japan und USA). Das ENSI beteiligt sich seit 2003 mit eigenen Arbeiten, die vor allem von der Ingenieurgeologie der ETH Zürich durchgeführt werden, und an denen auch die Technische Universität Graz, die deutsche Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR (Geophysik), die Firma Chevron (Felsmechanik) und die Swisstopo als Geoinformationszentrum des Bundes (Geodäsie) beteiligt sind.

- Kontinuierliche Messungen des Verformungsverhaltens des Opalinustons während des Vortriebs der Galerie zeigten wechselnd Dehnung (Extension) und Kompression. Extension wurde jeweils vor der Tunnelbrust der Galerie beobachtet, kompressives Verhalten dagegen hinter der Tunnelbrust. Während der damit verbundenen Spannungsumlagerungen hatten stoffliche und tektonische Diskontinuitäten (Unstetigkeiten) einen starken Einfluss auf das Deformationsverhalten. Tektonische Störungszonen zeigten

dabei mehrheitlich kompressives Verhalten oder wirkten als mechanische Barrieren bei der Weiterleitung der extensiven Deformation. Scherzonen erwiesen sich als bevorzugte Orientierung für longitudinale (längsgerichtete) Verformungen. Nach Fertigstellung der Galerie wurden die Messungen weiter geführt, um das langfristige Verformungsverhalten des Gebirges zu verstehen. Die Auswertung dieser Messergebnisse ist derzeit im Gang.

- Die ausgeprägten Schichtung im Opalinuston beeinflusst das mechanische Gebirgsverhalten massgeblich (Anisotropie). Daher wurden im Labor an Probekörpern aus der tonigen Fazies umfangreiche felsmechanische Tests durchgeführt. Mit einaxialen und triaxialen Druckversuchen wurden erste Rissbildungen bei Differentialspannungen von rund 2,0 MPa beobachtet; sie sind eine Folge von Spannungskonzentrationen im Mikrobereich. 100 felsmechanische Spaltzugversuche an Bohrkernproben zeigten, dass bei einem Wassergehalt von 7,5–8,6 Gewichtsprozent die mittlere Zugfestigkeit parallel zur Schichtung bei 1,65 MPa +/- 12 % liegt. Trockene Proben zeigten eine deutlich höhere Zugfestigkeit; diese war zudem nicht abhängig vom Karbonatgehalt der Probe. Mittels Scherversuchen wurden ferner die mechanischen

Eigenschaften tektonischer Trennflächen untersucht, in Kombination mit hoch auflösenden Oberflächenscans sowie anhand von Dünnschliffen auch deren Bruchverhalten. Die tektonische Scherung führte zur Ausbildung von einigen Zentimeter mächtigen Scherbändern. Diese bestehen aus mehreren Trennflächen mit Rutschharnischen und wurden in den Laborversuchen erneut verschert. Die Bewegungen verteilen sich dabei auf der gesamten Breite des Scherbandes. Basierend auf zehn Versuchen wurde im Massstabsbereich der Prüfkörper für die Spitzen- und Rest-Scherfestigkeit ein ähnlicher Reibungswinkel von 20° und eine ähnliche Kohäsion von 0,2 MPa ermittelt. Ein Einfluss der Oberflächenmorphologie

(Rauigkeit) war nicht zu erkennen. Die Scherfestigkeit bestehender Trennflächen entspricht somit der Restscherfestigkeit. Steifigkeitskontrollierte Scherversuche an intakten Proben ergaben Restfestigkeiten in derselben Grössenordnung.

- Die Detailauswertung der geodätischen Vermessungsdaten im Experimentabschnitt der Galerie zeigte, dass die dortigen Verschiebungsbeiträge unterschiedlich sind und vom Grad der Zerklüftung abhängen. Ziel ist nun, mittels eines numerischen Modells das mechanische Verhalten des Gebirges grossräumig abzubilden.

Daneben beteiligt sich das ENSI weiterhin an zwei kleineren Experimenten. Das Cyclic-Deformation (CD-)

Experiment einerseits untersucht das zyklische Austrocknungsverhalten der Stollenwand in Abhängigkeit des Stollenklimas (Temperatur, Luftfeuchtigkeit), und mit dem Evaporation-Logging (FM-D-)Experiment evaluiert das ENSI andererseits zusammen mit der Swisstopo eine neue Methode der Durchlässigkeitsbestimmung in Bohrungen.

Die Gesteinseigenschaften sind für die Beurteilung der Sicherheit und die Abklärung der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers massgebend. Dafür liefert das Mont Terri-Projekt dem ENSI wertvolle Daten. Zugleich erhält und fördert es die Fachkompetenz beim ENSI und seinen Experten.

Nationale Zusammenarbeit

Der wichtigste inländische Partner des ENSI beim Programm «Regulatorische Sicherheitsforschung» ist mit Abstand das Paul Scherrer Institut PSI. Insbesondere der PSI-Bereich Nukleare Energie und Sicherheit NES 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 der Swisstopo zusammen, die das internationale Forschungsprojekt Mont Terri koordiniert.

Internationale Zusammenarbeit

Bei der Forschung zur nuklearen Sicherheit ist von den internationalen Organisationen die Kernenergieagentur NEA der OECD der wichtigste Partner des ENSI. 29 der 34 OECD-Staaten sind Mitglied der NEA. Zusammen verfügen sie über 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 OPDE, OECD ICDE, OECD COMSIS, OECD FIRE, MSWI, OECD MCCI, Mont Terri Project. Darüber hinaus kooperieren folgende vom Bund geförderte Projekte mit internationalen Partnern: KORA, Generischer Strahlenschutz.

Referenzen

[1] OECD/NEA Halden Reactor Project (<http://www.oecd-nea.org/jointproj/halden.html>)

[2] Mont Terri Projekt (<http://www.mont-terri.ch>)

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

● OECD HALDEN REACTOR PROJECT

R+D 4.1.4*

Lead:	OECD-NEA	Funding:	ENSI
Contact:	Markus Straub markus.straub@ensi.ch	Period:	2009–2011
Abstract:	Das Projekt hat zwei Stossrichtungen: Brennstoff- und Materialverhalten sowie Mensch-Technologie-Organisation (MTO). Im Bereich Brennstoff und Materialverhalten stehen der Hochabbau von Brennstoffen in Leichtwasserreaktoren und der Einfluss von Strahlung, Wasserchemie sowie mechanischen und thermischen Belastungen auf die Materialalterung von Kerneinbauten im Vordergrund. Im Bereich MTO werden empirische Studien durchgeführt zur menschlichen Zuverlässigkeit.		

● KORA-II KORROSIONSRISSEWACHSTUM IN AUSTENITISCHEN STRUKTURWERKSTOFFEN

R+D 4.1.4

Lead:	PSI	Funding:	ENSI
Contact:	Klaus Germerdonk klaus.germerdonk@ensi.ch	Period:	2009–2011
Abstract:	KORA beschäftigt sich mit den Schädigungsmechanismen der Spannungs- und Schwingrisskorrosion. Spannungsrissskorrosion kann auftreten, wenn ungünstige Bedingungen für mechanische Belastung, Wasserchemie und Werkstoffzustand zusammenkommen. In diesen Fällen können dann relativ lange, verzweigte Risse entstehen. Schwingrisskorrosion ist eine spezielle Form des umgebungsbedingten Risswachstums, in der mechanische Belastungen zyklisch auftreten.		

● BRUCHMECHANISCHE BEWERTUNG VON REAKTORDRUCKBEHÄLTER-MEHRLAGENSCHWEISSNÄHTEN

R+D 4.1.4

Lead:	Forschungszentrum Dresden-Rossendorf	Funding:	ENSI
Contact:	Dietmar Kalkhof dietmar.kalkhof@ensi.ch	Period:	2010–2012
Abstract:	Die Integrität des Reaktordruckbehälters (RDB) ist eine grundlegende Voraussetzung für den sicheren und langfristigen Betrieb von Kernkraftwerken. Die Materialeigenschaften der RDB-Werkstoffe (Grundmaterial der Schmiederinge, Schweißmaterial) ändern sich mit zunehmendem Alter der Anlage. Insbesondere ist die Versprödung des Materials aufgrund der Neutronenbestrahlung zu bewerten. Seit ca. 15 Jahren steht dafür ein zusätzliches Auswerteverfahren zur Verfügung.		

● OECD OPDE–OECD PIPING FAILURE DATA EXCHANGE PROJECT

R+D 4.1.4

Lead:	OECD-NEA	Funding:	ENSI
Contact:	Susanne Schulz susanne.schulz@ensi.ch	Period:	2005–2010
Abstract:	Die Datenbank OPDE (OECD Piping Failure Data Exchange Project) ist ein internationales Projekt der OECD-NEA, welches dazu dient, eine umfangreiche Datensammlung von Schäden an Rohrleitungen in Kernkraftwerken zu erstellen und zu pflegen. In die dafür erstellte Datenbank werden systematisch Schadensfälle und Ereignisse aus den teilnehmenden OECD-Staaten eingegeben. Die Daten werden ausgewertet mit dem Ziel, systematische Hinweise auf Schadens- bzw. Störfallursachen zu erhalten.		

● OECD COMPSIS–EXCHANGE OF OPERATING EXPERIENCE CONCERNING COMPUTER-BASED SYSTEMS IMPORTANT TO SAFETY

R+D 4.1.4

Lead:	OECD-NEA	Funding:	ENSI
Contact:	Rudolf Jäggi rudolf.jaeggi@ensi.ch	Period:	2005–2010
Abstract:	Im COMPSIS-Projekt der Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD wurde eine internationale Datenbank über Betriebserfahrungen mit computerbasierten Systemen in Kernkraftwerken erstellt. In diese werden systematisch Schadensfälle und Ereignisse aus den teilnehmenden OECD-Staaten eingegeben. Die Daten werden anschliessend ausgewertet mit dem Ziel, auf der Basis einer grösseren Anzahl von Fällen systematische Hinweise auf Schadens- bzw. Störfallursachen zu erhalten.		

● OECD ICDE–INTERNATIONAL COMMON-CAUSE FAILURE DATA EXCHANGE

R+D 4.1.4

Lead:	OECD-NEA	Funding:	ENSI
Contact:	Roland Beutler roland.beutler@ensi.ch	Period:	2004–2011
Abstract:	Das International Common-Cause Failure Data Exchange (ICDE) Projekt wird seit 1998 unter der Federführung der OECD Nuclear Energy Agency betrieben. Generelles 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.		

● 1.2.4 OECD FIRE–FIRE INCIDENT RECORD EXCHANGE

R+D 4.1.4

Lead:	OECD-NEA	Funding:	ENSI
Contact:	Annette Ramezani annette.ramezani@ensi.ch	Period:	2004–2010
Abstract:	Das Ziel des Projektes »OECD Fire Incident Record Exchange“ (OECD FIRE) ist die Erhebung und die Analyse von Daten z. B. über Ereignissen in Kernkraftwerken der OECD-Mitgliedsstaaten. Das Projekt soll dazu beitragen, die Ursachen, die Ausbreitung und die Auswirkungen von Bränden besser zu verstehen. Es ist zudem darauf ausgerichtet, die Brandverhütung weiter zu optimieren und die phänomenologische und statistische Basis für Probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) von Kernkraftwerken zu verbessern.		

● **CSARP–COOPERATION IN THE SEVERE ACCIDENT RESEACH PROGRAM**

R+D 4.1.4

Lead:	U.S.NRC	Funding:	ENSI
Contact:	Markus Straub markus.straub@ensi.ch	Period:	2008–2012
Abstract:	Rahmenvertrag für die Kooperation mit der U.S.NRC bei der Forschung zu schweren Reaktorunfällen.		

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

R+D 4.1.4

Lead:	Königlich-Technische Hochschule (KTH) Stockholm	Funding:	ENSI
Contact:	Rainer Hausherr rainer.hausherr@ensi.ch	Period:	2010–2011
Abstract:	Das Projekt dient der Untersuchung von Phänomenen, welche bei einem schweren Unfall mit Kernschmelze in einem Siedewasserreaktor (SWR) auftreten könnten. Das übergeordnete Projektziel besteht darin, das Verständnis der bei einem schweren Unfall ablaufenden Prozesse zu verbessern. Dafür werden Experimente durchgeführt, Methoden und Modelle erforscht und Rechenprogramme (Codes) entwickelt.		

● **ZUSAMMENARBEIT IN DER GENERISCHEN STRAHLENSCHUTZFORSCHUNG**

R+D 4.1.4

Lead:	PSI	Funding:	ENSI
Contact:	Franz Cartier franz.cartier@ensi.ch	Period:	2010–2012
Abstract:	Die Personendosimetrie durch äussere und innere Bestrahlung ist eine wichtige Aufgabe des Strahlenschutzes. Gemäss Dosimetrieverordnung werden hohe Anforderungen an die Dosimetrie gestellt. Trotz hohem Stand der Messtechnik im Strahlenschutz ergeben sich immer neue Anforderungen aus der Praxis, denen mit Neuentwicklungen von Messmethoden und mit neuen Lösungsansätzen begegnet werden muss.		

● **FORSCHUNGSPROJEKT FELSLABOR MONT TERRI**

R+D 4.1.4

Lead:	Mont-Terri-Konsortium unter Leitung von Swisstopo	Funding:	ENSI
Contact:	Erik Frank erik.frank@ensi.ch	Period:	2007–2012
Abstract:	Das seit 1996 laufende internationale Forschungsprojekt Felslabor Mont-Terri bei St. Ursanne hat zum Ziel, die hydrogeologischen, geochemischen und felsmechanischen Eigenschaften des Opalinuston 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.		

