

KIT SCIENTIFIC REPORTS 7723

50 Jahre Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung im KIT

Bernhard Kienzler

Bernhard Kienzler

**50 Jahre Forschungs- und Entwicklungsarbeiten
zur Endlagerung im KIT**

Karlsruhe Institute of Technology
KIT SCIENTIFIC REPORTS 7723

50 Jahre Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung im KIT

von
Bernhard Kienzler

Report-Nr. KIT-SR 7723

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2016

ISSN 1869-9669

ISBN 978-3-7315-0586-0

DOI: 10.5445/KSP/1000059829

Kurzfassung

Ausgehend von den politischen und gesellschaftlichen Randbedingungen für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (F&E) zur sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland, werden die im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) durchgeführten Arbeiten seit der Gründung der Studiengruppe Tief Lagerung im Jahr 1964 zusammengestellt. Die Organisationformen, in denen die F&E-Arbeiten zur Endlagerung im KfK eingebunden waren, werden genannt, insbesondere das heutige Institut für Nukleare Entsorgung (INE). Die wesentlichen Forschungsthemen und der Einfluss des Projekts Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen und Abfallbehandlung (PWA) auf die Themenschwerpunkte werden aufgezeigt.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung und Entsorgung radioaktiver Abfälle im KIT schließen auch die gegenwärtigen Forschungsthemen ein, sowie die Einbindung in Lehre und Ausbildung und Beratungsaufgaben. Abschließend werden Forschungsarbeiten zur sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle im Rahmen verschiedener nationaler (BMW/BMBF) und internationaler Förderprogramme (EURATOM) sowie die nationalen und internationale Kooperationen vorgestellt.

In mehreren Anhängen werden eine Zeittafel, Abschriften interessanter historischer Dokumente und weitere Informationen beigelegt.

Abstract

Research and development (R&D) for safe disposal of radioactive wastes at the Nuclear research Center Karlsruhe (KfK) is presented since the establishment of an respective working group in 1964. The political and societal boundary conditions for R&D on safe disposal of radioactive wastes are referred to. The organizational forms with respect to nuclear waste disposal at KfK are shown, especially the Institute for Nuclear Waste Disposal (INE). The most important research topics as well as the influence of the reprocessing project PWA on the research topics are exemplified.

The current research topics including the involvement in training and education or consultation services is presented. Finally, R&D in the scope of various funding programs (funded by EURATOM, German funding organizations or others) and the national and international co-operations are discussed.

Several appendices complete the information e.g. by a chronological table or copies of some historic documents.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract.....	iii
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xi
Abkürzungsverzeichnis	xiii
Vorwort.....	xvii
1 Einleitung.....	1
2 Historischer Hintergrund.....	3
3 Politische und gesellschaftliche Randbedingungen	7
3.1 Generelle Endlageroptionen	9
3.2 Behandlung und Aufkommen von radioaktiven Abfällen im Kernforschungszentrum.....	10
3.3 Internationale und nationale Klassifizierung der Abfälle	11
4 Organisation der F&E-Arbeiten zur Endlagerung im Kernforschungszentrum Karlsruhe.....	15
4.1 Institut für Nukleare Entsorgung.....	15
4.2 Zuordnung der Endlagerforschung zu Schwerpunkten.....	19
4.3 Projektträger	20
4.4 Weitere beteiligte Institute des heutigen KIT	22
5 Forschungsarbeiten der Studiengruppe Tieflagerung (1964 – 1969).....	23
5.1 Endlagerung in Steinsalzformationen	24
5.2 Versenkung radioaktiver Abfälle im Meer	26
5.3 Oberflächenlagerung und Vergraben von Abfällen	27
6 Forschungsarbeiten im Rahmen der Kooperation von KfK und GSF (1968 – 1981)	29
6.1 Forschungsarbeiten im Salzbergwerk Asse	30
6.2 Sicherheitsstudien.....	31
6.3 Prototypkaverne	33
6.4 Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung (EGT)	34
6.5 Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE)	35
6.6 Eignungsanalyse Konrad.....	37
6.7 1-zu-1-Gebinde-Experimente.....	38
7 Forschungsarbeiten im Rahmen von PWA (1970 – 1990)	41
7.1 Konditionierung von Abfällen	41
7.1.1 Zementierung.....	42
7.1.2 Bituminierung	42
7.1.3 Verglasung	43
7.1.4 Keramikentwicklung.....	44
7.1.5 Andere Verfahren	45
7.2 Tritiumverpressung (Lh 2-Projekt)	46

7.3	In-situ Verfestigung	48
7.4	Korrosion von Behälterwerkstoffen	49
7.5	Systemstudie "Radioaktive Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland"	50
8	Forschungsarbeiten im INE von 1990 bis heute.....	53
8.1	Einrichtungen des INE	55
8.1.1	Laserspektroskopische Methoden	56
8.1.2	ANKA / INE Beamline	57
8.2	Actinidenabtrennung.....	58
8.3	Lehre und Ausbildung.....	59
8.4	Beratungsaufgaben	59
9	Forschungsarbeiten im Rahmen von EURATOM	61
10	Forschungsarbeiten im Rahmen von Projektförderung	65
10.1	Entsorgungsalternativen: Direkte Endlagerung von abgebrannten Kernbrennstoffen	65
10.2	GEISHA: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein.	65
10.3	F&E-Arbeiten zu kristallinen Wirtsgesteinen	66
10.3.1	Experimente im Untertagelabor Äspö, Schweden	66
10.3.2	Beteiligung an den CRR-/CFM-Experimenten in Grimsel, Schweiz	67
10.4	Numerische Simulation zum thermomechanischen Verhalten von Hohlräumen und Bauwerken im Steinsalz	67
11	Auftragsforschung zur Endlagerung	69
11.1	AKEnd	69
11.2	HMGU-Vorhaben.....	69
11.3	BfS-Vorhaben	70
11.4	F&E Vorhaben mit Industriepartnern.....	72
12	Nationale und internationale Kooperationen und Beteiligungen	73
12.1	Nationales Datenbank Projekt THEREDA	73
12.2	MIGRATION Konferenzen	74
13	Was haben 50 Jahre F&E-Arbeiten zur Endlagerung bewirkt?	75
14	Zusammenfassung	79
15	Literaturverzeichnis	83
Index.....		95
Anhang.....		97
A.	Zeittafel der Entwicklung der Kerntechnik in Deutschland und der Endlagerforschung.	97
B.	Bezeichnungen des Forschungszentrums	102
C.	Abschrift des ersten Dokuments zur Abfallbehandlung und Endlagerung in KfK (GLA 69/689)	103
D.	Aufgabenstellung der Studiengruppe Tieflagerung.....	105
E.	Methoden zur Behandlung und Herkunft der radioaktiver Abfälle in den Anfangsjahren der KfK	106
F.	Zuordnung der Endlagerforschung zu den verschiedenen Arbeitsschwerpunkten und Arbeitsthemen	109
G.	Beitrag zur Delegierten Versammlung am 1. Juni 1977	111

H.	Genehmigungssituation des Salzbergwerks Asse	115
I.	Thesen zur Rolle und zu den Beziehungen der EGT im System der Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland	116
J.	Definition des Safety Case und Safety Assessment.....	117
K.	Konzepte zur Durchführung von Langzeit-Sicherheitsanalysen.....	119
L.	Beteiligung des KIT an EURATOM-Projekten zu Endlagerthemen	121

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Logo des Kernforschungszentrums.....	3
Abb. 2	Offizielle Informationen der Bundesregierung zur Kernenergie aus dem Jahr 1977 bzw. 1974	8
Abb. 3	Anfall fester radioaktiver Abfälle (einschließlich Rückstände der Einengung) seit 1960 [20].	11
Abb. 4	Klassifizierung radioaktiver Abfälle in Deutschland [24].	13
Abb. 5	Gebäude 524, bis 1979 Hauptgebäude der ABRA, von 1979 bis 1991 Gebäude der Abteilung Endlagerung des INE	16
Abb. 6	Anzahl der Publikationen aus dem Institut für Nukleare Entsorgung bzw. seiner Vorgängerorganisationen	18
Abb. 7	Institutsleiter des INE: links Prof. Jae Il Kim und sein Vorgänger Dr. Helmut Krause; rechts: Prof. Thomas Fanghänel, Nachfolger von Prof. Jae Il Kim.	18
Abb. 8	Salzstrukturen in der Norddeutschen Tiefebene (Bild entnommen aus [38]).	24
Abb. 9	Fallversuche zur Erprobung der „behälterlosen Einlagerungstechnik“ in der Prototyp-Kaverne [61].	34
Abb. 10	Blick von oben in die Auslaugbehälter mit korrodierten simulierten zementierten Verdampferkonzentrate nach ca. 25 Jahren Korrosion und Auslaugung in NaCl-Lösung (a) und in MgCl ₂ -reicher Lösung (b).	40
Abb. 11	Blick in das Plutonium Labor des INE	55
Abb. 12	Abgeschirmte Boxenlinie im INE	56
Abb. 13	Durch Laserlicht angeregte Fluoreszenz eines Actinids in Lösung (Küvette in der Bildmitte).	57
Abb. 14	Messaufbau an der INE-Beamline für Actiniden-Forschung an der Synchrotronstrahlungsquelle ANKA	58
Abb. 15	Logos der kürzlich von KIT-INE koordinierten Euratom Projekte	62
Abb. 16	Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen: Von FEP zu Szenarien, Modellen und Bewertung der Ergebnisse	120

Tabellenverzeichnis

Tab. I	Minimale und Maximale Aktivitätskonzentrationen der als inaktiv definierten Flockungsschlämme [45] im Vergleich zu Freigabewerten gemäß heute gültigen Strahlenschutzverordnung [46].....	27
Tab. II	Herkunft der radioaktiven Abwässer im Kernforschungszentrum Karlsruhe in 1969 [22].	107
Tab. III	Personalstärke, Investitionen und Betriebsaufwendungen für Endlagerforschung	110

Abkürzungsverzeichnis

ABRA	Abteilung Behandlung radioaktiver Abfälle (GfK)
ADB	Abteilung Dekontaminationsbetriebe (GfK)
ADINA	Finite Elemente Code
ASD	Abteilung Strahlenschutz und Dekontamination des Kernforschungszentrums. Diese Abteilung wurde 1969 umorganisiert. Es wurden zwei neue Abteilungen gebildet: ASS (Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit) und die Abteilung ADB (Abteilung Dekontaminationsbetriebe). Von letzterer wurde 1974 die wissenschaftliche Abteilung Behandlung radioaktiver Abfälle (ABRA) abgetrennt.
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMAT	Bundesministerium für Atomfragen (1955), Bundesministerium für Atomkernenergie und Wasserwirtschaft (1957) und seit 1962 Bundesministerium für Wissenschaftliche Forschung (BMWF)
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
BMwF	Bundesministerium für wissenschaftliche Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
Bq	Einheit der Aktivität: Becquerel entsprechen 1 Zerfall pro Sekunde
Ci	Einheit der Aktivität: Curie entsprechen 3.7×10^{10} Zerfälle pro Sekunde (Bq)
CHEMLAB	Bohrloch-Sonde für Experimente mit radioaktiven Stoffen im Äspö HRL
CHEMVAL	Thermodynamische Datenbank im Rahmen des EU Projektes MIRAGE
COCO Club	Arbeitspaket „Komplexierung und Kolloide“ im Rahmen des EU Projektes MIRAGE
CFM	<u>C</u> olloid <u>F</u> ormation and <u>M</u> igration Experiment im Schweizer Untertagelabor Grimsel zur Untersuchung der Bildung und des Transports von Kolloiden und ihr Einfluss auf die Radionuklidmobilität
CRR	<u>C</u> olloid and <u>R</u> adionuclide <u>R</u> etention Projekt im Schweizer Untertagelabor Grimsel.
DBE	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Tochtergesellschaft der GNS.
DBETEC	DBE TECHNOLOGY GmbH, Tochter der DBE, Beratungs- und Ingenieurunternehmen im Bereich der Entsorgung radioaktiver Stoffe.
DWK	Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen, Trägergesellschaften waren die deutschen Energieversorgungsunternehmen (EVU) gemäß dem Verursacherprinzip.
EGT	Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung

ESK	Endlagersicherheitskommission
EURATOM	Europäische Atomgemeinschaft wurde 1957 von Frankreich, Italien, den Beneluxstaaten und Deutschland gegründet (Römische Verträge) und besteht noch heute fast unverändert. Alle EU Mitgliedsstaaten sind auch Mitglieder in EURATOM. Die Schweiz ist im Forschungsrahmenprogramm von EURATOM finanziell und inhaltlich beteiligt.
EUROCHIMIC	Von 1967 bis 1974 in Mol in Belgien betriebene Wiederaufarbeitungsanlage, ein Gemeinschaftsprojekt von 13 Mitgliedsstaaten der OECD. Es wurden insgesamt etwa 180 t Brennstoff aus Leistungsreaktoren und 30 t hochangereicherter Brennstoff aus Materialtestreaktoren aufgearbeitet.
FIPS	Pilotanlage zur Verglasung hochradioaktiver Abfälle in der Kernforschungsanlage Jülich
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe
GfK	Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe
GLA	Generallandesarchiv Karlsruhe
GNS	Gesellschaft für Nuklear-Service mbH, Tochtergesellschaft der EVU.
GSF	Gesellschaft für Strahlenforschung
GTS	Grimsel Test Site, Untertagelabor im Granitgestein in der Schweiz
HAWC	Highly active waste concentrate (WAK)
HDB	Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe (früher bei KfK/FZK, heute WAK)
HEWC	highly enriched waste concentrate (EUROCHIMIC)
HGF	Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren
HRL	Hard Rock Laboratory Äspö, Schweden
IFT	Institut für Tieflagerung der GSF in Clausthal-Zellerfeld, ab 19xx in Braunschweig Institut der GSF
INE	Institut für nukleare Entsorgungstechnik, ab 1990 Institut für nukleare Entsorgung (KIT)
ITU	Europäisches Institut für transurane auf dem Gelände des KIT Campus Nord
KEWA	Kernbrennstoff-Wiederaufarbeitungstechnik GmbH, Hannover, Trägergesellschafter waren die Unternehmen Bayer, Hoechst, Gelsenberg und NUKEM.
KFA	Kernforschungsanlage Jülich
KfK	Kernforschungszentrum Karlsruhe
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LEWC	low enriched waste concentrate (EUROCHIMIC)
LH2	Erdölbohrung bei Leopoldshafen
MZK	Maximal zulässiger Konzentrationen
NEZ	Nationales Entsorgungszentrum (Gorleben)

OECD/NEA	Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) / Nuclear Energy Agency
PAMELA	Anlage zur Verglasung flüssiger hochradioaktiver Abfälle in einem direkt beheizten keramischen Schmelzofen (realisiert von INE in Mol, Belgien)
PNS	Projekt Nukleare Sicherheit
PoF	Projekt-orientierten Förderung im Rahmen der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF)
PSB	Projekt Schneller Brüter
PSI	Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz
PTKA	Projektträger Karlsruhe, PTKA-WTE Wasstertechnologie und Entsorgung, früher: PTE Projektträger Entsorgung
PVA	Pilotverglasungsanlage, inaktive Anlage zur Verglasung flüssiger Abfälle in einem direkt beheizten keramischen Schmelzofen als Mock-up Anlage zur Demonstration, Test, und Schulung.
PWA	Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung
RSK	Reaktorsicherheitskommission
SGT	Studiengruppe Tief Lagerung
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm
SRA	Systemstudie 'Radioaktive Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland'
TSS	Thermische Simulation der Streckenlagerung (Projekt im Salzbergwerk Asse)
VEK	Verglasungseinrichtung Karlsruhe zur Verglasung flüssiger hochradioaktiver Abfälle von der WAK in einem direkt beheizten keramischen Schmelzofen
VERA	Pilotanlage zur Verglasung hochradioaktiver Abfälle im Kernforschungszentrum Karlsruhe
WAK	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe

Vorwort

In der vorliegenden Arbeit soll aufgezeigt werden, wie sich innerhalb der vergangenen 50 Jahre die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung im KIT von den ingenieurtechnischen Methoden der Problemlösung zu der Gewinnung grundlegender wissenschaftlicher Erkenntnissen über das Verhalten von Abfällen und die Mobilisierung bzw. Rückhaltung der Radionuklide verändert haben. Selbstverständlich hängen Entscheidungen zu den Forschungsthemen von den politischen Randbedingungen, aber auch vom Engagement einzelner Personen, deren Meinungen und Interessen ab. Es liegt mir aber fern, bestimmte Entscheidungen bzw. Forschungsarbeiten, die in der Vergangenheit getroffen bzw. durchgeführt wurden, zu kritisieren. Ich habe vielmehr versucht aufzuzeigen, wie die Forschungsarbeiten in das politische und gesellschaftliche Umfeld eingeordnet waren oder beeinflusst wurden.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung, die im KIT bzw. dem früheren (Kern-)Forschungszentrum Karlsruhe durchgeführt wurden. Andere Institutionen und Einrichtungen, wie die BGR, die DBE, das HMI oder die Universitäten München, FU und TU Berlin, Clausthal, usw., die ebenfalls mit Endlagerforschung befasst waren, wurden weitgehend ausgeklammert. Zahlreiche Arbeiten aus dem KIT bzw. seiner Vorgängerorganisation und im INE wurden ebenfalls ausgelassen bzw. zusammengefasst. Dieses Vorgehen stellt keine Wertung dar: (a) Ich habe mich auf die Forschungsarbeiten zur Endlagerung beschränkt und (b) habe mich auf die politischen und gesellschaftlichen Vorgänge und die damit verbundenen Entscheidungen konzentriert. Auf einzelne Ergebnisse der Forschungsarbeiten wird ebenfalls nicht eingegangen und auch keine umfassende Zusammenstellung oder Review dieser Arbeiten angestrebt.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Dr. Helmut Krause, dem früheren Leiter des Instituts, für die kritische Durchsicht, Anmerkungen und Richtigstellungen bezüglich einiger historischer Fakten.

1 Einleitung

Im Rahmen der in Deutschland geführten Diskussionen bezüglich der Endlagerung radioaktiver Abfälle wird immer wieder der Vorwurf erhoben, dass die vorgeschlagenen Konzepte nicht hinreichend durchdacht und bewertet worden waren, Fehlentscheidungen getroffen wurden und die beteiligten Wissenschaftler unkritisch waren. Um diesen Vorwürfen zu entgegnen, werden im Folgenden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung aufgezeigt. Es wird versucht, diese nicht nur in ihren zeitlichen Zusammenhang, sondern auch in die jeweiligen vorherrschenden politischen und wirtschaftlichen Situationen einzuordnen. Als Quellen dienen historische Überblicke über die Entwicklung der Kerntechnik in Deutschland, wie beispielsweise die Dissertationen von Detlev Möller zum Thema „Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland“[1], Wolfgang Issel „Die Wiederaufarbeitung von bestrahlten Kernbrennstoffen in der Bundesrepublik Deutschland“[2] und Anselm Tiggemann „Die „Achillesferse“ der Kernenergie in Deutschland. Zur Kernenergiekontroverse und Geschichte der Entsorgung von den Anfängen bis Gorleben 1955 bis 1985“ [3]. Leider fehlen in den Schriften des Kernforschungszentrums im Allgemeinen Hinweise auf die Forschungsarbeiten zur Endlagerung bzw. Endlager-sicherheit (z. B. [4] oder [5]). Eine Zeittafel der Entwicklung der Kerntechnik in Deutschland und der damit zusammenhängenden Endlagerforschung ist im Anhang A an Hand der Daten des Deutschen Atomforums (DAtF [6]) zusammengestellt.

Es ist nicht beabsichtigt eine historische Abhandlung ähnlich der oben genannten Dissertationen zu verfassen, sondern vielmehr soll aufgezeigt werden, was bisher an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu radioaktiven Abfällen bzw. zur sicheren Endlagerung dieser Abfälle durchgeführt worden ist. Hierbei ist der Schwerpunkt auf die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Kernforschungszentrums (heute KIT) gelegt. Bezüglich der Bewertung der F&E-Arbeiten sind folgende Fragen von Relevanz: Welche Abfälle? Wo und wie sind sie angefallen? Wie wurden sie behandelt? Welche Endlager-Optionen wurden verfolgt? Wie stellte man sich einen langfristigen Einschluss der Abfälle vor? Was wurde unternommen, um die technische Machbarkeit und die Sicherheit eines solchen Einschlusses zu bewerkstelligen? Wo und wie wurden Standortabklärungen durchgeführt? Welches waren die behördlichen Anforderungen? Welches waren die Schwerpunkte der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten? Wie haben sich die wissenschaftlichen Ideen und Lösungsansätze geändert? Ähnliche Frage haben auch die Kollegen Hadermann, Issler und Zurkinder in ihrem Buch „Die nukleare Entsorgung in der Schweiz 1945-2006“ gestellt [7].

Der Zweck der Kernreaktor Bau- und Betriebsgesellschaft mbH, dem späteren Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK), war „die Gewinnung, Sammlung und Auswertung wissenschaftlicher Erkenntnisse und Erfahrungen beim Bau und beim Betrieb einer Reaktorstation für die friedliche Entwicklung und Nutzbarmachung der Kernenergie im Interesse der Allgemeinheit“[8]. Damit lag die Ausrichtung auf den Ingenieur- und Naturwissenschaften, deren Aufgabe klar festgelegt war. Seit der Gründung des Forschungszentrums änderte sich der Zweck und die Ausrichtung. Damit einher ging eine Änderung des Namens der Einrichtung (siehe Anhang B „Bezeichnungen des Forschungszentrums“). Aus diesem Grund werden im Folgenden auch unterschiedliche Bezeichnungen für diese Einrichtung verwendet.

In der frühen Phase, der seit über 50 Jahren stattfindenden Endlagerforschung, standen ingenieurtechnische Problemlösungen im Vordergrund, die meist in Berichtsform (graue Literatur) dokumentiert oder gelegentlich auf speziellen Konferenzen vorgetragen wurden. Demgegenüber wird heute die Publikation von wissenschaftlichen Ergebnissen in referierten Zeitschriften erwartet. Insofern ergibt sich leicht der Eindruck, dass damals keine seriösen Arbeiten geleistet wurden. Erschwerend kommt hinzu, dass viele Ergebnisse nur in Jahres- oder Projektberichten zusammengefasst sind bzw. in den sogenannten „Primärberichten“, die weder frei zugänglich waren, noch vollständig erhalten sind.

Eine besondere Schwierigkeit bei der Aufarbeitung der F&E-Arbeiten im Kernforschungszentrum (aber auch im KIT) besteht darin, dass eine systematische Archivierung von Unterlagen in den Instituten nicht vorgenommen wurde. Daher sind viele Unterlagen mit dem Ausscheiden von Mitarbeitern verloren gegangen.

Weitere Quellen waren das Generallandesarchiv Karlsruhe, wo die Akten der Geschäftsführung des Kernforschungszentrum archiviert sind. Dort finden sich Informationen über den Aufbau, Finanzierung und Entwicklung des KfK von der Gründung 1956 bis 1995. Die Korrespondenz mit anderen Forschungseinrichtungen und den verschiedenen Bundes- und Landesministerien ist verfügbar, sowie die Vernetzung des KfK. Weiter Quellen waren Veröffentlichungen und publizierte Berichte, Konferenzbeiträge sowie Protokolle und Schriftwechsel, die im INE archiviert sind. Eigene (subjektive) Wahrnehmungen wurden ebenfalls verwendet.

Der Bericht versucht den historischen Hintergrund darzustellen, einschließlich der damals verfügbaren Behandlungsmethoden für radioaktive Abfälle im Kernforschungszentrum, die anfallenden Mengen und ihre Klassifizierung. Der daraus erwachsende Bedarf an F&E-Arbeiten zur Endlagerung und dessen Organisation im Kernforschungszentrum Karlsruhe wird aufgezeigt. Anschließend wird die zeitliche Abfolge der Forschungsschwerpunkte beschrieben. Abschließend werden einige aktuelle Forschungsthemen sowie einzelne Projekte und die nationalen und internationalen Kooperationen vorgestellt. Zeittafel und Details sowie einige Hintergrundinformationen sind in mehreren Anhängen wiedergegeben.

2 Historischer Hintergrund

Im Jahr 1956 wurde die Kernreaktor Bau- und Betriebsgesellschaft mbH, später Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK), dann Forschungszentrum Karlsruhe gegründet. Bereits 1962 nahm der Forschungsreaktor 2 (FR 2), der erste in Eigenbau realisierte deutsche Reaktor, auf dem Gelände des heutigen KIT Campus Nord bei Eggenstein-Leopoldshafen den Betrieb auf. Der FR2 nutzte zunächst metallisches Natururan und hatte eine Leistung von 12 MW. In 1966 wurden Umrüstungen vorgenommen und die Natururanbrennelemente durch UO_2 -Brennelemente mit einer ^{235}U -Anreicherung von 2% ersetzt. Die Leistung betrug danach 44 MW. Der Reaktor wurde mit schwerem Wasser moderiert und gekühlt. Der FR2 wurde in 1981 endgültig abgeschaltet.



Abb. 1 Logo des Kernforschungszentrums

Die Abfallbehandlung und Endlagerung war seit der Gründung der Kernreaktor Bau- und Betriebsgesellschaft mbH ein wichtiges Thema. Das erste bekannte Dokument hierzu findet sich im General Landesarchiv 69/689 und stammt aus dem Jahr 1956. In diesem Schreiben (DI Wa/No. vom 06.11.1956 an die Vorstände der Kernreaktorbau- und Betriebsgesellschaft Prof. Haxel, Dr. Ritter und Prof. Wirtz) wurde darauf hingewiesen, dass beim Reaktorbetrieb radioaktive Anfälle entstehen und dass eine einwandfreie Abfallbeseitigung Voraussetzung für einen sicheren Betrieb ist. Aus diesem Grund wurde gefordert, dass bei Betriebsbeginn der Reaktorstation die Abfallbeseitigungsanlagen ebenfalls betriebsbereit sein müssen und daher sollten die Unterlagen für Planung und Konstruktion der Abfallbehandlung im gleichen Maße gesammelt werden, wie die Planung des Reaktors und der Reaktorstation fortschreitet. Die Abschrift des Schreibens (GLA 69/689 (erstes Dokument)) findet sich im Anhang C. Der Name des Verfassers DI Wa konnte nicht ermittelt werden.

Neben dem FR2 waren weitere Forschungsreaktoren im Kernforschungszentrum Karlsruhe in Betrieb:

1. Schneller-Thermische Argonaut-Reaktor (STARK) 1963 bis 1976,
2. Mehrzweckforschungsreaktor (MZFR), ein schwerwassergekühlter und -moderierter Druckwasserreaktor (1965-1984) 58 MW,
3. Schnelle Nullenergie-Anordnung (SNEAK), Nullleistung von 1966 bis 1985,
4. Siemens-Unterrichtsreaktor und der
5. Brutreaktor-Prototyp KNK (Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage). Der KNK wurde von 1971 bis 1974 mit einem thermischen Kern als KNK I und von 1977 bis zur endgültigen Abschaltung 1991 mit einem schnellen Kern (KNK II) betrieben.

Weitere Anlagen auf dem Gelände des Kernforschungszentrums, die radioaktiven Abfall produzierten waren das Institut für Heiße Chemie mit den Heißen Zellen, das Institut für Radiochemie, das Institut für Strahlenbiologie, das Institut für Materialforschung und das Europäische Institut für Transurane.

Zur Vorbereitung eines Planungs- und Projektauftrags für ein Endlager für radioaktive Abfälle beauftragte 1963 das Bundesministerium für wissenschaftliche Forschung (BMwF) die Gesellschaft für Kernforschung mbH Karlsruhe mit der Aufstellung einer Studiengruppe Tieflagerung (SGT), bestehend aus Experten der Abfallbeseitigung, Geologen und Technikern ([1], S. 101). Die Aufgabenstellung der Studiengruppe Tieflagerung (SGT) ist in deren Jahresbericht 1964 [9] aufgeführt und im Anhang D wiedergegeben. Leiter der SGT war Dr. Helmut Krause, der spätere Direktor des Instituts für Nukleare Entsorgungstechnik (INE). Zu Beginn waren außer Dr. Krause weitere vier Mitarbeiter der SGT zugeordnet.

Im Jahr 1960 wurde die Versuchs- und Ausbildungsstätte für Strahlenschutz der Gesellschaft für Kernforschung gegründet. Daraus ging 1964 die Gesellschaft für Strahlenforschung m.b.H. (GSF, heute HMGU) hervor [10]. Bis zum Ende des Jahres 2007 trug die Einrichtung den Namen „GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit“, wobei das Akronym „GSF“ auf die frühere Bezeichnung „Gesellschaft für Strahlenforschung“ zurückging. Forschungsschwerpunkte der früheren Versuchs- und Ausbildungsstätte für Strahlenschutz waren hämatologische Forschung, Strahlen- und Nuklearbiologie. Zwischen 1972 und 1982 betrieb GSF den Forschungsreaktor Neuherberg, der sich heute im sicheren Einschluss befindet.

Auf der Basis von Gutachten der damaligen Bundesanstalt für Bodenforschung, Hannover (heute Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR) bearbeitete die SGT Möglichkeiten zur Errichtung einer Kaverne in einem Salzstock zur Endlagerung [11]. Die vorgeschlagenen Optionen zur Endlagerung in einer nichtbegehbaren Kaverne erschienen dem Bundesministerium für wissenschaftliche Forschung (BMwF) für die „tatsächliche Entwicklung eines Routineverfahrens für die Beseitigung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik“ nicht geeignet zu sein.

Im Jahr 1960 wurde die Gesellschaft für Strahlenforschung mbH (GSF) gegründet, die 1964 im Auftrag des BMwF das Bergwerk Asse II pachtete, um in enger Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Kernforschung mbH (GfK) Voruntersuchungen zur Eignung dieses Bergwerks als Versuchsendlager durchführen sollte. Seit 1965 war die GSF Betreiber des Bergwerks Asse II. Zur wissenschaftlichen Erforschung der Tieflagerung radioaktiver Abfälle sowie zum Betrieb des Bergwerks Asse II wurden 1965 das Institut für Tieflagerung der GSF sowie die Betriebsabteilung des Instituts für Tieflagerung gegründet [12]. In Zusammenhang mit dem Erwerb des Salzbergwerks Asse soll nicht unerwähnt bleiben, dass es auch gegen-

sätzliche Meinungen gab, wie in einem Schreiben von Dr. Krause, ADB, an die Geschäftsführung der GfK vom 26.01.1971 (GLA 69/273) durch folgende Aussage belegt wird:

„Aufgrund dieser Literaturstudien, theoretischen Überlegungen, sowie einer Reihe von Informationsgesprächen mit verschiedenen Partnern wurden Verhandlungen mit dem Eigentümer des Salzbergwerkes Asse (Wintershall) über den Erwerb des Bergwerks sowie mit dem Oberbergamt über seine Eignung als Endlager aufgenommen. Dies geschah größtenteils gegen den Willen des Ministeriums, das sich von Augenschein sowie Gerüchten so stark beeindruckt ließ, dass dort selbst lange nach dem Kauf noch der Eindruck bestand, dass die Asse in höchstem Grade gefährdet und damit letzten Endes ein Reinfall sei. Die Endphase der Kaufverhandlungen wurde von der inzwischen vom BMwF beauftragten GSF abgewickelt.“

3 Politische und gesellschaftliche Randbedingungen

Im Rahmen UN-Vollversammlung 1953 hielt der amerikanische Präsident Eisenhower eine Rede mit dem Titel „Atoms for Peace“, in welcher er seine Vorstellungen von der friedlichen Nutzung der Kernenergie darstellte. Diese sollte der Energieerzeugung, aber auch in der Medizin, zur Bekämpfung von Krankheitsüberträgern und der Ernährung dienen. Zur Gewährleistung der sicheren und friedlichen Nutzung der Kernenergie und der Radioaktivität und der entsprechenden Technologien wurde 1957 die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEA) in Wien gegründet. In diesem Zuge wurde im Jahr 1954 das Verbot der Atomforschung in Deutschland aufgehoben und Franz-Josef Strauß wurde 1955 erster Minister für Atomfragen (BMAt). Das Ministerium wurde 1957 in Bundesministerium für Atomkernenergie und Wasserwirtschaft und 1961 in Bundesministerium für Atomkernenergie umbenannt. Danach lagen die Aufgaben beim Forschungsministerium. In dieser Zeit wurden mehrere Kernenergie Forschungszentren gegründet: 1956 das Kernforschungszentrum Karlsruhe (GfK, KfK, FZK, KIT), die Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt mbH in Geesthacht (GKSS, heute Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Material- und Küstenforschung), die Kernforschungsanlage Jülich (KFA, heute Forschungszentrum Jülich FZJ). Im Jahr 1957 wurde das Hahn-Meitner Institut in Berlin (HMI) und 1960 die Versuchs- und Ausbildungsstätte für Strahlenschutz, die 1964 zur Gesellschaft für Strahlenforschung (GSF) in Neuherberg bei München weiterentwickelt wird.

Im Jahr 1959 hatten Geologen der damaligen Bundesanstalt für Bodenforschung, Hannover (heute Bundesanstalt für Geowissenschaften für Rohstoffe) angeregt, radioaktive Abfälle in Formationen des tiefen geologischen Untergrundes einzubringen. Als Verfahren wurde vorgeschlagen, in einem der über 200 Salzstöcke Nordwestdeutschlands eine künstliche Kaverne anzulegen. Diese Empfehlung wurde in das zweite deutsche Atomprogramm (1963 - 67) aufgenommen.

Im Herbst 1973 fand der Jom-Kippur-Krieg zwischen Ägypten, Syrien und Israel statt. Um die westlichen Länder wegen ihrer Unterstützung Israels unter Druck zu setzen, drosselten die erdölexportierender Länder (OPEC) bewusst die Fördermengen. Als Folge stieg der Ölpreis von ~ 3 US\$ pro Barrel auf 5 US\$ und bis Ende 1974 auf ca. 12 US\$ an. In Deutschland wurde als direkte Reaktion ein Energiesicherungsgesetz erlassen, das das Einsparen von Öl zum Ziel hatte. Die Folge der Ölpreiserhöhung (Ölkrise) war eine Wirtschaftskrise mit einem Anstieg von Kurzarbeit, Arbeitslosigkeit, Sozialausgaben und Insolvenzen von Unternehmen. Es lag auf der Hand, dass die Nutzung der Kernenergie als Instrument zur Reduktion der Dominanz des Rohöls bei der Energieversorgung angesehen wurde. Dies äußerte sich auch im Selbstverständnis und im F&E-Programm des Kernforschungszentrums Karlsruhe [13].



Abb. 2 Offizielle Informationen der Bundesregierung zur Kernenergie aus dem Jahr 1977 bzw. 1974

In den 1970er Jahren wurden eine Reihe von politischen und gesellschaftlichen Randbedingungen geschaffen, die die Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Entsorgung und Endlagerung maßgeblich beeinflussten. Hierzu gehören die Grundsätze, die Dr. M. Hagen, BMFT, im Rahmen des 2. Statusberichts des Projekts PWA [14] mit dem Titel „Stand der Verwirklichung des Entsorgungskonzeptes aus der Sicht der Bundesregierung“ vorstellte. Diese beinhalteten

- "Grundsätze zur Entsorgungsvorsorge für Kernkraftwerke" mit Definition des Verursacherprinzips (1977).
- Errichtung eines "Nuklearen Entsorgungszentrums (NEZ)". 1977 stellte die Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen (DWK) beim Niedersächsischen Sozialministerium als zuständiger Genehmigungsbehörde den Antrag auf Genehmigung der Errichtung und des Betriebs des Entsorgungszentrums [14]. Ziel des NEZ war, eine Wiederaufarbeitungsanlage, eine Brennelementefabrik, ein Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente, eine Konditionierungsanlage für atomare Abfälle und ein unterirdisches Endlager an einem Standort zu integrieren.
- Novelle zum Atomgesetz mit Definition des Entsorgungskonzeptes der Bundesregierung, das die rechtlichen Voraussetzungen für die Verwertung radioaktiver Reststoffe und die Beseitigung radioaktiver Abfälle schuf (gem. § 9 a Atomgesetz). Die Verantwortung für die Sicherstellung und die Beseitigung der radioaktiven Abfälle wurde dem Bund, vertreten durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, übertragen.

Seit etwa 1975 nahm die Skepsis in der Bevölkerung gegenüber der Kernenergie zu. Dies führte zu großen Protestdemonstrationen in Whyll oder Brokdorf. Die Proteste verstärkten sich nach dem Kernschmelzunfall im März 1979 im amerikanischen Kernkraftwerk Three Mile Island bei Harrisburg. Die Bundesregierung setzte allerdings ihr Atomprogramm fort und unterstützte die Planung und Implementierung des "Nuklearen Entsorgungszentrums" sowie die Erkundung des Salzstocks Gorleben als Endlager.

Erst als Folge des Unfalls am Kernkraftwerk Tschernobyl im Jahr 1986 änderte sich die politische Landschaft: Es wurde das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) eingerichtet und der SPD Parteitag beschloss den Ausstieg aus der nuklearen Energienutzung.

3.1 Generelle Endlageroptionen

Vom 16. bis 21. November 1959 fand in Monaco eine IAEA Konferenz zum Thema „Disposal of radioactive waste“ mit 300 Teilnehmern aus 32 Ländern und 11 internationalen Organisationen statt. Schwerpunkte der Konferenz waren „Origin and Nature of the Material“, „Discharge into the Ground“, „Discharge of Waste into Water“, „Disposal in the Air“ [15]. An dieser Konferenz nahmen auch Vertreter aus Deutschland teil. Im Wesentlichen waren für die Unterbringung radioaktiver Abfälle 6 Optionen in der Diskussion (siehe auch Ramdohr [16]):

1. Ableitung in Oberflächengewässer und in die Atmosphäre
2. Vergraben und Versickern im Boden
3. Versenkung ins Meer
4. Aufbewahrung in Behältern
5. Einbringen in tiefere geologische Formationen
6. Lagerung im Polareis

Allerdings gab es bereits damals klare Aussagen des zuständigen Atom-Ministeriums zu den diskutierten Optionen:

„Eine unkontrollierte Beseitigung radioaktiver Stoffe, z.B. durch Versenkung von Atommüll in das Meer, wird im Hinblick auf die Nichtvorhersehbarkeit der damit verbundenen Gefahren abgelehnt.“ Minister Siegfried Balke Bundesministerium für Atomkernenergie, 1961 ([1], Seite 130).

„Die Einbringung radioaktiver Abfälle in Polargebiete stellt eine unkontrollierte Beseitigung radioaktiver Abfälle dar. Soweit ich für die Einlagerung radioaktiver Abfälle zu sorgen habe, ziehe ich eine kontrollierbare Aufbewahrung unter allen Umständen vor.“ Siegfried Balke, Bundesministerium für Atomkernenergie ([1], Seite 68).

„Die oberirdische Endlagerung radioaktiver Abfälle, wie sie in den USA und teilweise auch in Europa praktiziert wird, scheidet für die Bundesrepublik wegen der hohen Bevölkerungsdichte, der möglichen Gefährdung des Grundwassers, aus Kostengründen und in Ermangelung geeigneter geologischer Gegebenheiten (aride Gebiete, Senken unter NN) aus. Für die Langzeitlagerung radioaktiver Abfälle kommen daher nur unterirdische geologische Schichten in Frage; besonders geeignet erscheinen Salzstöcke oder aufgelassene Salzbergwerke.“ Straimer, Unterabteilungsleiter im Bundesministerium für Atomkernenergie, 1961 ([1], Seite 96).

3.2 Behandlung und Aufkommen von radioaktiven Abfällen im Kernforschungszentrum

Bereits vor der Inbetriebnahme des FR2 wurden am Institut für Heiße Chemie F&E-Arbeiten zur Behandlung von radioaktiven Abfällen aus den im Bau bzw. in der Planung befindlichen Anlagen durchgeführt [17, 18] und entsprechende Anlagen entwickelt bzw. angepasst und aufgebaut [19]. Krawczynski unterschied zwischen „Festabfällen“, die getrocknete organische Ionenaustauscherharze aus dem FR2 enthielten und in dicht verschweißten Behältern aus Edelstahl gelagert wurden und „radioaktiven Abwässern“, die bei Experimenten mit offenen radioaktiven Stoffen der Institute und im geringen Maße am Reaktor anfielen.

Die am KfK anfallenden Abwässer wurden kategorisiert [19]:

1. Regenwasser,
2. Häusliche Abwässer (Fäkalien sowie Wasch- und Badeabwässer),
3. Chemische, radioaktiv nicht kontaminierte Abwässer,
4. Radioaktiv möglicherweise kontaminierte Abwässer,
 - a. Dusch- und Wäscherei-Abwässer,
 - b. Chemie-Abwässer,
5. Chemie-Abwässer, radioaktiv stets verunreinigt,
6. Abwässer aus dem Reaktor (Spülwasser),
7. Radioaktive flüssige Konzentrate.

Das Ziel der Behandlung war die Vermeidung der Vermischung der relativ kleinen Mengen kontaminierter Wässer mit den großen Mengen kontaminationsfreier Abwässer. Vom Klärwerk durften nur solche Wässer, deren spezifische Aktivität unterhalb der Freigrenzen lagen, in den Vorfluter abgegeben werden. Die Behandlung der inaktiven „Chemie-Abwässer“ (III) umfasste eine Neutralisation mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bzw. mit Salzsäure sowie Flockung mit Eisen-(III)-Salzen oder Aluminiumhydroxid unter gleichzeitiger Belüftung. Bei Anwesenheit von besonderen Giften, wie Chromaten, Cyaniden usw. wurden diese im Chargenbetrieb nach „bekannten Methoden“ entgiftet.

Die „möglicherweise radioaktiv verunreinigten Abwässer“ der Kategorie (IV) wurden in korrosionsschutzten Stahlbehältern gesammelt. In diesen Behältern wurde dann die spezifische Aktivität ausgemessen und bei Unterschreiten der Grenzwerte ins Abwassernetz gegeben. Bei Überschreitung der Toleranzkonzentration wurden die Wässer per Tankwagen oder Spezialtransportwagen zur „Entaktivierungsanlage“ gebracht. Krawczynski [19] führte 8 bestehende Institute bzw. Einrichtungen sowie 5 in der Planung/im Bau befindliche Einrichtungen auf dem Gelände des KfK auf, die solche Abwässer lieferten.

Stets radioaktiv verunreinigte Abwässer der Kategorie (V) wurden, ähnlich wie diejenigen der Kategorie (IV) gesammelt, wobei besonderer Wert auf Korrosionsschutz und Strahlenschutz gelegt wurde. Der Transport erfolgte in strahlengeschützten Spezialtransportwagen.

Abwasser der Kategorie VI wurden nur aus dem FR2-Reaktor als schwach radioaktiv kontaminierte Abwässer aus Reinigungsarbeiten erwartet. Diese wurden dort gesammelt und über eine Rohrleitung in die Entaktivierungsanlage gepumpt.

Abwässer der Kategorie VII waren radioaktive flüssige Konzentrate, die in geringen Volumina anfielen. Diese wurden in Spezialflaschen unter Strahlenschutzbedingungen gesammelt und transportiert. Eine weitere Einengung war nicht vorgesehen, sondern diese Abfälle wurden mit Zement zu Beton gemischt und erreichten dadurch eine gute Fixierung.

Die genannten Anlagen waren für kleine Volumina ausgerichtet. Insbesondere durch die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) wurden Anlagen für größere Durchsätze und für höhere Aktivitäten benötigt. Hierzu wurden neue Behandlungsmethoden etabliert. Details zu den Behandlungsmethoden und zur Herkunft der radioaktiver Abfälle aus den Instituten und Anlagen des Kernforschungszentrums sind im Anhang E zusammengestellt.

In der Abb. 3 ist das jährliche Aufkommen von konditionierten Abfällen im Kernforschungszentrum dargestellt [20]. Dieses akkumulierte sich bis zur ersten Phase der Versuchseinlagerung ab April 1967 in das Salzbergwerk Asse II auf 1300 m^3 entsprechend mehr als 6500 200-Liter-Rollreifendässer.

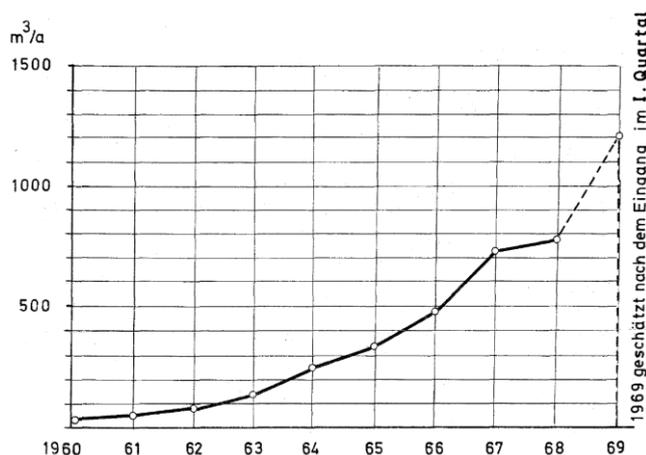


Abb. 3 Anfall fester radioaktiver Abfälle (einschließlich Rückstände der Einengung) seit 1960 [20].

3.3 Internationale und nationale Klassifizierung der Abfälle

Internationale Klassifizierung radioaktiver Abfälle

Im Rahmen der Monaco Konferenz 1969 [15] gab es einen Vortrag von D. W. Pritchard, The Johns Hopkins University, Baltimore, (Proc. Vol. 2, p 231-248) in dem die damalige Klassifizierung der radioaktiven Abfälle dargestellt wurde:

„Die Klassifizierung von radioaktiven Stoffen in die drei Kategorien „hochaktiv“, „mittelaktiv“ und „schwachaktiv“ war und ist ein sehr willkürliches Verfahren. So werden die Spaltprodukte in den abgebrannten Brennelementen sowie nach der Trennung von nützlichen Brennstoff in Chemieanlagen „hochaktive Abfälle“ genannt. Zu den mittelaktiven Abfälle gehören große kontaminierte Komponenten oder Gebinde mit verbrauchten Ionenaustauschharzen, deren Aktivität in der Größenordnung von 10 bis 1000 Curie liegen (3.7×10^{11} bis 3.7×10^{13} Bq). Schwachaktive Abfälle sind Laborabfälle, kontaminierte Kleidung, Glaswaren und Kleingeräte. Gebinde mit diesen Abfällen haben in der Regel Aktivitäten im

Milli-Curie-Bereich oder weniger. Gebinde mit einer Aktivität in der Größenordnung von einem Curie (3.7×10^{10} Bq) oder weniger werden als schwachaktiver Abfall eingestuft.“

In den meisten Ländern wurde eine Klassifizierung der Abfälle entsprechend der beabsichtigten Endlagerung eingeführt. Hierbei wurde zwischen Abfällen mit kurzlebigen Isotopen und solchen mit langlebiger Radioaktivität unterschieden. Insbesondere wurde auch zwischen alpha-haltigen und nicht alpha-haltigen Abfällen unterschieden. In Deutschland war dies nicht der Fall, wie ein Zitat aus einem Vortrag im Rahmen eines IAEA Symposiums zeigt: „*The concept employed in the Federal Republic of Germany for disposing of waste in deep underground repositories does not require a commitment concerning a fixed conservative upper exclusion limit for the content of long lived alpha emitters in any waste form, such as the widely discussed value of 10 nCi/g (370 Bq/g)*“ [21].

Klassifizierung radioaktiver Abfälle in Deutschland

β/γ -Aktivität: Im Zusammenhang mit der Routineeinlagerung von radioaktiven Abfällen im Salzbergwerk Asse wurden Bedingungen für die Annahme der radioaktiven Abfälle entworfen, die einerseits die Sicherheitsaspekte der Asse befriedigten und andererseits wirtschaftlich tragbar waren. Die spezifischen Aktivitäten in den Abfallstoffen wurden unter Berücksichtigung der zulässigen Oberflächendosisleistungen, der Stabilität der Verpackung und der Qualität der Fixierung festgelegt [22]. Nach Hild [23] wurden folgende Unterscheidungen getroffen

- Schwachaktiver Abfall ohne zusätzliche Abschirmung mit einer Oberflächendosisrate von ≤ 200 mR/h.
- Mittelaktiver Abfall der eine zusätzliche Abschirmung für Transport und Handhabung erforderte mit einer Oberflächendosisrate > 1 R/h, wobei durch die Aktivitätskonzentration keine nennenswerte Wärme entwickelt werden sollte.
- Wärmeproduzierender Abfall, der eine erhebliche Abschirmung für den Transport und Handhabung erforderte.

Die Klassifizierung der Abfälle nach ihrer Radioaktivität wurde seit 1992 modifiziert in wärmeerzeugende Abfälle und Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeerzeugung [24]. Zu den wärmeerzeugenden Abfällen gehörten abgebrannte Brennelemente, hochradioaktive Glasprodukte und verpresste Brennelementhüllen und -strukturteile. Die mittelradioaktiven Abfälle entfielen in dieser Klassifizierung.

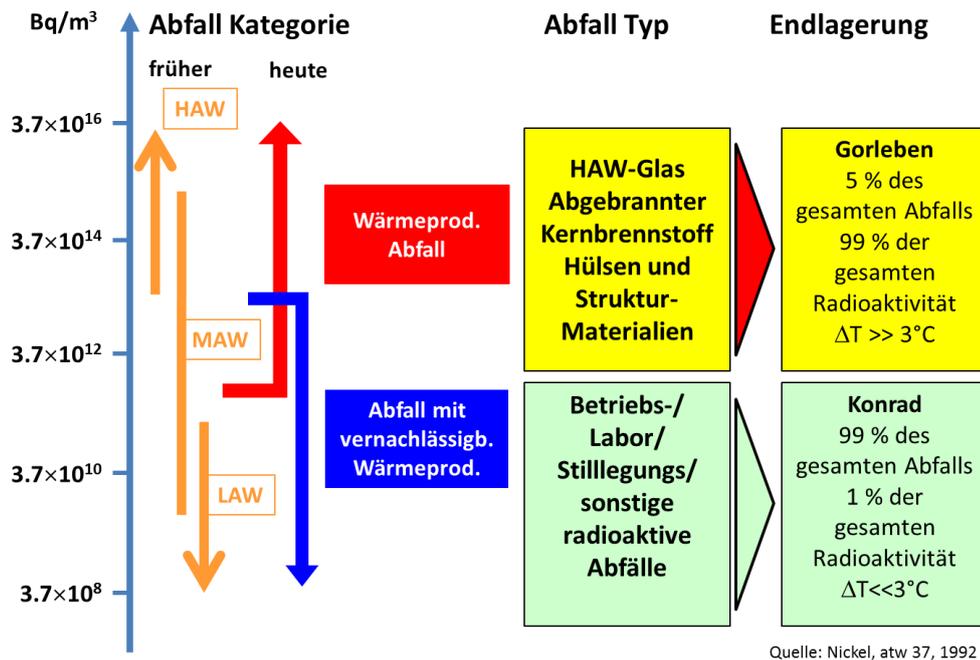


Abb. 4 Klassifizierung radioaktiver Abfälle in Deutschland [24].

α -Aktivität: Die Festlegung einer Obergrenze der α -Aktivität in den schwach- und mittelradioaktiven Abfällen unterstellt, dass langfristig eine Freisetzung von Radionukliden stattfinden kann und dass der Ingestionspfad langfristig dosisbestimmend ist. Ausgehend von der 1. Strahlenschutzverordnung (SSVO), welche maximal zulässige Konzentrationen (MZK-Werte) im Wasser angab, wurde das sogenannte „Gefährdungspotential“ berechnet [25]. Das Gefährdungspotential wurde quantitativ durch die Wassermenge beschrieben, die benötigt wird, um die in den Abfällen gebundenen Radionuklide so zu verdünnen, dass die für Trinkwasser zulässige spezifische Aktivität nicht überschritten wird. Je größer die benötigte Wassermenge ist, desto größer ist das Gefährdungspotential.

Das Gefährdungspotential wurde auf den Gehalt an α -strahlenden Actiniden angewandt und in Beziehung zu Uranlagerstätten gesetzt: Abbauwürdige Uranerz-Lager hatten damals einen Gehalt von über 0.2 % Uran. In den Uranerzen sind neben Uran auch alle Tochternuklide der Zerfallsreihe in ihrem Aktivitäts-Gleichgewicht enthalten. Das von seiner MZK in Wasser her gefährlichste Radionuklid der Uran-Zerfallsreihe war ^{226}Ra mit der MZK 10^{-8} Ci/m³. In einem 3-prozentigen Uranerz (spezifische Aktivität von ^{238}U : 3×10^{-7} Ci/g) wären 10^{-2} Ci/t ^{226}Ra enthalten. Wollte man diese Aktivität mit Wasser auf den MZK-Wert verdünnen, d.h. dass das Wasser als Trinkwasser verwendet werden könnte, so würde man je Tonne Uranerz 10^6 m³ Wasser benötigen. Diese Wassermenge wurde als Maß für das Gefährdungspotential von Uranerz angesehen.

Die meisten α -Strahler in den radioaktiven Abfällen, d.h. die Pu-, Am-, Cm-Isotope, hatten in Wasser eine MZK von 5×10^{-6} Ci/m³, mithin eine um den Faktor 500 höhere MZK als ^{226}Ra . Radioaktive Abfälle mit einem Gehalt von 5 Ci α -Strahlern je Tonne hatten somit das gleiche Gefährdungspotential wie 3-prozentige Uranerze.

Aus diesem Vergleich wurde geschlossen, „dass bei einem Gehalt von 5 Ci langlebiger α -Strahler je Tonne schwach- oder mittelaktiven Abfalls das Gefährdungspotential der Abfälle auch unter den widrigsten Umständen, Absaufen des Lagers, Auslaugen der Abfälle, Rückkehr der kontaminierten Sole in die Biosphäre, nicht das Gefährdungspotential von natürlich vorkommenden Uranerz-Lagern übersteigt“ [25].

4 Organisation der F&E-Arbeiten zur Endlagerung im Kernforschungszentrum Karlsruhe

4.1 Institut für Nukleare Entsorgung

In den Anfangsjahren des Kernforschungszentrums war der Umgang mit anfallenden radioaktiven Abfällen der Abteilung Strahlenschutz und Dekontamination (ASD) übertragen worden. Diese Abteilung wurde 1969 umorganisiert und es wurden zwei neue Abteilungen gebildet: ASS (Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit) und die Abteilung ADB (Abteilung Dekontaminationsbetriebe). Von letzterer wurde 1974 die wissenschaftliche „Abteilung Behandlung Radioaktiver Abfälle (ABRA)“ abgetrennt.

In der Abteilung ADB fanden sich die sogenannten „Betriebe“, die „Labore“ sowie die „Projektgruppe Endlagerung“. Während in den „Betrieben“ die Behandlung der angelieferten radioaktiven Abfälle stattfand (Abwasserdekontamination, Eingang von radioaktiven Festabfällen, Ausgang an das Endlager im Salzbergwerk Asse, Gerätedekontamination und die Dekontaminations-Einsatzgruppe) wurden in den Laboren F&E-Arbeiten zu Verfahren durchgeführt mit dem Ziel, diese später in den „Betrieben“ einzusetzen. Dieses umfassten die Bituminierung (Auslaug- und Strahlenbeständigkeit), Zementierung von Verdampferkonzentraten, Zerstörung von Salpetersäure durch Reaktion mit Ameisensäure, Fixierung hochaktiver Spaltproduktlösungen in Glas und Keramik und Versuche zur Oberflächendekontamination [20]. Zu Beginn der Kooperation zwischen dem Kernforschungszentrum Karlsruhe und der GSF Institut für Tief Lagerung waren die Arbeiten der „Projektgruppe Endlagerung“ in der ADB auf Endlagerung von mittelradioaktiven Abfällen ausgerichtet: Konstruktion und Bau einer Beschickungsanlage für mittelradioaktive Abfälle im Salzbergwerk Asse, Prüfungen zur Zulassung von Einzelabschirmbehältern und Entwicklung eines Sammelabschirmbehälters für den Transport mittelradioaktiver Abfälle von Karlsruhe zum Salzbergwerk Asse [26].

Nach der Trennung der wissenschaftlichen „Abteilung Behandlung Radioaktiver Abfälle (ABRA)“ von den Betrieben, dann unter der Bezeichnung Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe (HDB), umfasste die ABRA weiterhin die „Labore“ und die „Projektgruppe Endlagerung“. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Abteilung Behandlung radioaktiver Abfälle (ABRA) wurden auf den Gebieten der Behandlung, des Transports und der Endlagerung radioaktiver Abfälle und der Dekontamination von Oberflächen durchgeführt. Die Schwerpunkte der Arbeiten waren die Verfestigung hochaktiver Spaltproduktlösungen zu Borosilikatgläsern, die Entwicklung von Verfahren zur Verarbeitung mittelaktiver Abfalllösungen und F+E-Arbeiten zum Transport und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle [27]. Aus dieser Aufgabenstellung heraus ergab sich auch die spätere Entwicklung des Instituts für Nukleare Entsorgung (INE), in welchem die Verfestigung hochaktiver Spaltproduktlösungen zu Borosilikatgläsern bis zur Realisierung entsprechender Verglasungsanlagen weitergeführt wurde. Bis 1978 war die ABRA auf verschiedenen Gebäude (meist Baracken) innerhalb des Kernforschungszentrums verteilt. Im Jahr 1978 konnte die ABRA ein neuerrichtetes Gebäude (712) beziehen, welches aus einem Bürotrakt, einem radioaktiven Labortrakt und einem Technikum bestand. Die Abteilung „Endlagerung“ blieb weiterhin in

einer Baracke (524) konzentriert. Die räumliche Trennung der drei Abteilungen der ABRA „Chemie“, „Verfahrenstechnik“, und „Endlagerung“ förderte eine hierarchische Struktur und behinderte den Austausch und die Kooperation zwischen den Abteilungen. Erst im Jahr 1994 wurden die drei Abteilungen nach Errichtung des Gebäudes 714 zusammengeführt.



Abb. 5 Gebäude 524, bis 1979 Hauptgebäude der ABRA, von 1979 bis 1991 Gebäude der Abteilung Endlagerung des INE

Als Ergebnis einer Struktur- und Berufungskommission wurde die ABRA im Jahr 1980 zum wissenschaftlichen „Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (INE)“ aufgewertet und Dr. Krause zum Institutsleiter berufen (GLA 69 KfK-GF-1 Nr.707,1). In den 1990er Jahren wurde das Institut in „Institut für Nukleare Entsorgung (INE)“ umbenannt.

Die Arbeiten des INE im Rahmen des Projekts „Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung (PWA)“ zielten auf die Errichtung eines Nuklearen Entsorgungszentrums, dessen Kernstück eine Wiederaufarbeitungsanlage mit einem Durchsatz von 1400 Tonnen abgebranntem Kernbrennstoff pro Jahr war. Nachdem dieses Vorhaben aufgegeben worden war [28], wurden andere Standorte gesucht. Die Wahl fiel 1985 auf Wackersdorf in Bayern, und führte zu einem der politisch umstrittensten Bauprojekte der 1980er Jahre in der Bundesrepublik Deutschland [29]. Das Vorhaben wurde 1989 nach zahlreichen Protesten aufgegeben und die Industrie verzichtete auf den Bau einer deutschen Wiederaufarbeitungsanlage. Mit dem Ausstieg aus der Schnellbrütertechnologie und der Einstellung des Projekts zum Bau einer deutschen Wiederaufarbeitungsanlage wurden die F&E-Arbeiten zum Kernbrennstoffkreislauf, die im Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung (PWA) koordiniert waren, größtenteils zurückgefahren und ab dem Jahr 1990 im Arbeitsschwerpunkt „Nukleare Entsorgung (NE)“ zusammengefasst. Da im Lauf der 1980er Jahre die Finanzierung kerntechnische Forschungsarbeiten zurückgefahren wurde,

gab es Überlegungen das Institut für Nukleare Entsorgung (INE) zunehmend im Bereich der Konditionierung konventioneller Abfälle anzusiedeln [30]. Die Zuordnung der Endlagerforschung zu übergeordneten Arbeitsschwerpunkten und Arbeitsthemen des Kernforschungszentrums sind in Anhang F zusammengestellt.

Im Hahn-Meitner Institut für Kernforschung, Berlin (HMI, heute Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie) hatte sich um Werner Lutze eine Arbeitsgruppe gebildet, die sich mit Forschungsarbeiten zur Verglasung von hochradioaktiven Abfällen und dem werkstoffkundlichen Verhalten von Gläsern und Keramiken unter Endlagerbedingungen befasste. Diese Gruppe wurde 1989 ins Kernforschungszentrum Karlsruhe in das INE transferiert.

Als anlässlich des altersbedingten Ausscheidens von Dr. Krause als Institutsleiter des INE eine Strukturkommission gebildet wurde, wurde im Jahr 1990 ein „Konzept für die künftigen Arbeiten des Instituts für Nukleare Entsorgungstechnik (INE)“ erarbeitet [31].

Das künftige Arbeitsprogramm des Instituts musste dem Verzicht auf den Bau der Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf und dem fortgeschrittenen Kenntnisstand über die Eigenschaften von Abfallprodukten und ihrer Herstellungsverfahren Rechnung tragen. Die verfahrenstechnischen Entwicklungsarbeiten zur Verglasung hochradioaktiver Abfälle sollten weitergeführt werden. Die Arbeiten zur Behandlung radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf wurden eingestellt.

Der Schwerpunkt der Arbeiten sollte sich zur Endlagerforschung verlagern, wobei die chemischen und physikalisch-chemischen Untersuchungen an Festkörpern und Lösungen Priorität erhielten. Diese Forschungsarbeiten sollten auf die Aufklärung des stofflichen Langzeitverhaltens von Abfällen im geochemischen Milieu von Endlagern und dem physikalisch-chemischen Verhalten wichtiger Radionuklide im Endlagernahbereich ausgerichtet sein. An die Stelle der bis zu diesem Zeitpunkt ausschließlichen Zuarbeit zu Projekten sollte eine eigenständige Forschung treten. Diese sollte auf den Nahbereich im Endlager um die Abfälle ausgerichtet sein, wobei hochaktive Glasprodukte und bestrahlte Kernbrennstoffe im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen sollten.

Die Strukturkommission stimmte diesem Konzept zu und Prof. Jae-Il Kim wurde zum Nachfolger von Dr. Krause berufen. Bis zu diesem Zeitpunkt finden sich in der Literaturdatenbank des KIT über 280 Publikationen zum Thema „Endlagerung“ aus dem INE und seinen Vorgänger-Abteilungen. Hinzu kamen ca. 170 sogenannte „Primärberichte“, deren Inhalt enthielt *„Informationen von vorläufigem Charakter und ist in erster Linie zur aktuellen internen Unterrichtung zwischen den Instituten und den externen Zusammenarbeitspartnern des Kernforschungszentrums Karlsruhe bestimmt. Eine Weitergabe des Berichts oder seines Inhalts an Dritte bedarf der Zustimmung der Abt. Patente und Lizenzen des KfK“*. Weitere 60 Publikationen zu Endlagerfragestellungen wurden vom damaligen Projektträger Entsorgung unter der Leitung von Dr. Closs bzw. dessen Vorgängerorganisation Pt UBSn (Dr. Löschhorn) veröffentlicht. Die Abb. 6 zeigt die Entwicklung der Anzahl an Publikationen, die Mitarbeiter des Instituts für Nukleare Entsorgung bzw. seiner Vorgängerorganisationen veröffentlicht haben (Basis: KIT Katalog Plus).

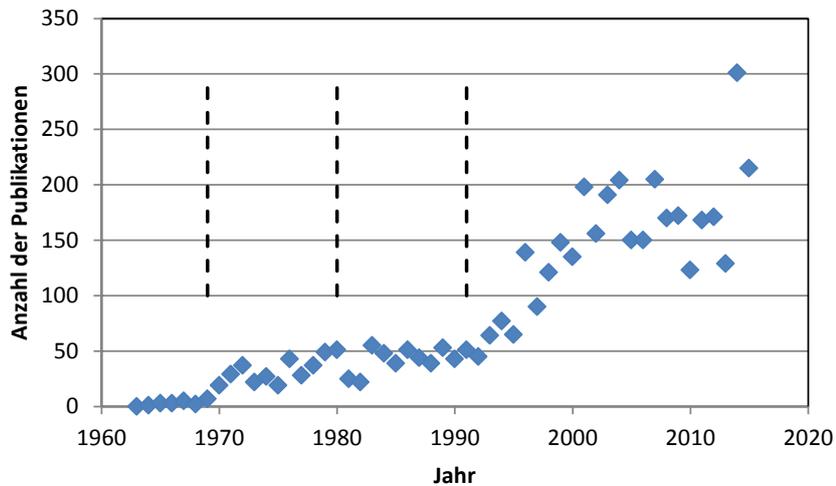


Abb. 6 Anzahl der Publikationen aus dem Institut für Nukleare Entsorgung bzw. seiner Vorgängerorganisationen. Die senkrechten Linien entsprechen den im folgenden unterschiedenen Zeitbereichen.

Bezüglich der äußeren Faktoren mit Einfluss auf die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung wird auf die Zeittafel im Anhang A verwiesen. Die F&E-Arbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle im INE verschoben sich kontinuierlich vom direkten Anwendungsbezug zu Arbeiten zum fundamentalen Prozessverständnis bezüglich der Wirksamkeit von technischen, geotechnischen und natürlichen Barrieren in einem Endlager. Aufgrund des Ursprungs des INE war aber immer eine enge Verknüpfung zwischen F&E-Arbeiten zur Abfallbehandlung und Konditionierung und zur Abfallcharakterisierung mit der Endlagerung gegeben. Im Jahr 2002 wurde Prof. Thomas Fanghänel zum Nachfolger von Prof. Kim berufen.

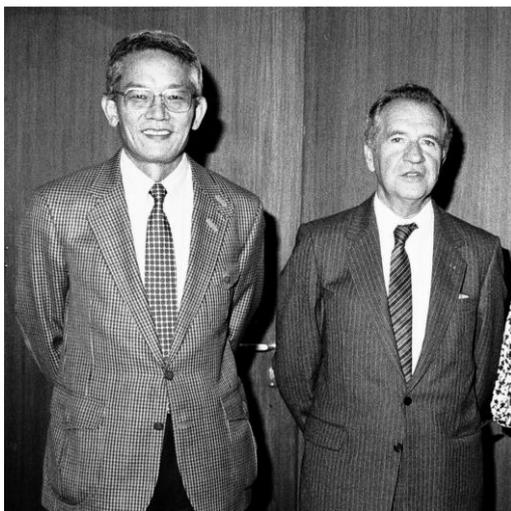


Abb. 7 Institutsleiter des INE: links Prof. Jae Il Kim und sein Vorgänger Dr. Helmut Krause; rechts: Prof. Thomas Fanghänel, Nachfolger von Prof. Jae Il Kim.

Prof. Fanghänel wechselte 2006 als Leiter in das europäische Institut für Transurane auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe- Kommissarisch leitete dann Dr. Klaus Gompper das Institut. Eine gemeinsame Berufungskommission der Universität Karlsruhe und des Forschungszentrums Karlsruhe wurde eingesetzt für die Stelle als Leiter des Instituts für Nukleare Entsorgung (INE) und Inhaber einer W3-Professur für „Radiochemie“ nach dem Jülicher Modell¹ an der Fakultät für Chemie und Biowissenschaften der Universität Karlsruhe. Mit der Berufung von Prof. Dr. Horst Geckeis im Jahr 2008 war eine direkte Verbindung des INE mit der Universität vorhanden, die sich in der Arbeit zahlreicher Doktoranden/innen im INE auswirkte.

4.2 Zuordnung der Endlagerforschung zu Schwerpunkten

Seit der Gründung des Projekts „Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung (PWA)“ in 1974 gab es eine enge Kooperation zwischen der Gesellschaft für Kernforschung mbH und der Industrie DWK. Die DWK finanzierte einen Teil der Forschungsprojekte im Rahmen von PWA. Im Gegenzug unterstützte die GfK die Industrie während der Planungs- und Konstruktionsphase der Großanlage zur Wiederaufarbeitung von Leichtwasserbrennelementen durch Überlassung von bereits vorhandenem Know-how sowie durch zukünftige F+E-Arbeiten im Rahmen des Projektes Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung (PWA) sowie des Projektes nukleare Sicherheit (PNS) [32].

Nach Beendigung des Projekts zum Bau einer deutschen Wiederaufarbeitungsanlage wurden die F&E-Arbeiten zum Kernbrennstoffkreislauf neu strukturiert. Die F&E-Arbeiten des früheren PWA-Schwerpunkts „Endlagerung“ im INE wurden ab dem Jahr 1990 im Arbeitsschwerpunkt „Nukleare Entsorgung (NE)“ zusammengefasst. Ab 1993 konzentrierten sich die F&E-Arbeiten im Arbeitsschwerpunkt NE auf zwei Arbeitsthemen: (1) Sicherheitsforschung zur Endlagerung und (2) Immobilisierung von hochradioaktivem Abfall. Neben der Zuordnung zu den verschiedenen Arbeitsschwerpunkten und –themen sind im Anhang F auch die in den Programmbudgets vorgegebenen Personal- und Sachmittel für die Endlagerforschung zusammengestellt.

Im Rahmen der Projekt-orientierten Förderung (PoF) der Helmholtz-Gemeinschaft wurden die F&E-Arbeiten des Forschungszentrums Karlsruhe und des Forschungszentrums Jülich zum Programm Nukleare Sicherheitsforschung (NUKLEAR) zusammengefasst. Das Programm war dem Forschungsbereich

¹ (siehe <http://www.forschung-und-lehre.de/wordpress/?p=8543>) Eine „gemeinsame Berufung“ auf eine Professur an einer Universität und auf eine Leitungsposition an der außeruniversitären Forschungseinrichtung ist die Ausgestaltung der Professur in verschiedenen Modellen möglich:

Im sogenannten Beurlaubungsmodell (Jülicher Modell) erfolgt zunächst die Berufung auf die Professur an der jeweiligen Universität im Beamten- oder Angestelltenverhältnis. Gleichzeitig wird der Professor jedoch zur Wahrnehmung seiner Leitungsaufgaben im Forschungsinstitut beurlaubt. Im Hinblick auf diese Leitungsposition schließt der Berufene mit dem Forschungsinstitut einen eigenständigen Anstellungsvertrag ab. Das Gehalt wird durch das Forschungsinstitut ausgezahlt.

Beim Zuweisungsmodell (Berliner Modell) wird der Berufene dagegen aus der Universitätsprofessur nicht beurlaubt, sondern vielmehr der Forschungseinrichtung zur Wahrnehmung seiner Leitungsaufgaben zugewiesen. Er nimmt daher die Leitungsposition im Rahmen seines Hauptamtes als Professor wahr. Entsprechend erfolgt die Vergütung nicht durch das Forschungsinstitut, sondern durch die Universität bzw. das Land. Der Professor schließt mit der Forschungseinrichtung lediglich einen Vertrag über seine Leitungsaufgaben ab; eine eigenständige Vergütungsklausel enthält der Vertrag nicht.

Im Nebentätigkeitsmodell (Karlsruher Modell) nimmt der Professor die Leitungsposition im Forschungsinstitut „nur“ im Rahmen einer Nebentätigkeit wahr, die neben seine Universitätsprofessur tritt. Er schließt mit dem Forschungsinstitut einen entsprechenden Dienstvertrag ab, der die Aufgabenfelder und die hierfür vorgesehene Vergütung regelt.

Energie der HGF zugeordnet und hatte zur Aufgabe, die wissenschaftlichen Aspekte der Sicherheit von Kernreaktoren und der Sicherheit der Nuklearen Entsorgung zu untersuchen. Das Programm hatte zwei Themen: (1) Sicherheitsforschung für Kernreaktoren und (2) Sicherheitsforschung zur Nuklearen Entsorgung. Die positive HGF-Begutachtung durch ein internationales Gremium fand vom 26. - 28. Februar 2003 statt.

Das Programm NUKLEAR unterzog sich mit den beiden o.g. Themen auch der Evaluierung durch die HGF im März 2009. Das Programmthema (2) "Safety Research for Nuclear Waste Disposal" war in 3 Unterthemen gegliedert:

PT 2.1: Characterisation and immobilization of nuclear waste

PT 2.2: Reduction of radiotoxicity

PT 2.3: Long-term safety of nuclear waste disposal

Das Ziel der F&E-Arbeiten war die Gewinnung grundlegender wissenschaftlicher Erkenntnisse und die Entwicklung von technischen Konzepten um die Sicherheit eines nuklearen Endlagers langfristig zu gewährleisten.

Die dritte Begutachtung durch die HGF fand im Januar 2015 statt. Aufgrund des Ausstiegsbeschlusses aus der nuklearen Energiegewinnung und dem Beitritt des Forschungszentrums Dresden Rossendorf zur HGF wurde das Programm umbenannt: "Nuclear Waste Management and Safety as well as Radiation Research (NUSAFE)". In diesem HGF-Programm wurden wieder zwei Themen definiert, wobei das Thema "Nuclear Waste Management" an die erste Stelle rückte vor das Thema "Reactor Safety". Ebenfalls in diesem Programm war das Querschnittsthema „Strahlenforschung“ angesiedelt. Das Thema "Nuclear Waste Management" war unterteilt in

Subtopic 1: Waste Repository

Subtopic 2: Waste Management Strategy

In allen HGF-Begutachtungen sowie in den Zwischenbegutachtungen wurden die durchgeführten und geplanten F&E-Arbeiten des INE sehr positiv gewürdigt.

4.3 Projektträger

Die Finanzierung der Endlagerforschung basierte auch in den 1990 Jahren im Wesentlichen auf zwei Säulen:

1. Die institutionelle Förderung wurde/wird durch die zuständigen Bundesministerien (BMBF bzw. BMWi) den Forschungszentren und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) über deren F&E-Programm zugeteilt. Im Falle der HGF-Zentren erfolgt die Mittelzuteilung im Rahmen der Projekt orientierten Förderung (PoF) über HGF.
2. Die Projektförderung erfolgt über den Projektträger (PTE, jetzt PTKA-WTE), der Vorhaben beispielsweise bei GRS, DBE (DBETech), Universitäten und Großforschungszentren fördert [33].

Die Zuständigkeiten für die Endlagerforschung teilen sich heute das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUB), das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und

das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Die Förderung über das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat zum Ziel, die kerntechnische Kompetenz für den geordneten Ausstieg aus der Kernenergie zu sichern. Dies betrifft den Rückbau der kerntechnischen Anlagen und die sichere Entsorgung von radioaktivem Material. Das BMWi ist zuständig für die anwendungsorientierte, standort-unabhängige Forschung und fördert deshalb die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die sichere Endlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle. Basis für die Arbeiten ist das Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. Im Rahmen ressortspezifischer Förderkonzepte, „BMWi-Förderkonzepts 2015 – 2018“ [34]) und des BMBF-Förderkonzepts „Grundlagenforschung 2020+“ erfolgen die Fördermaßnahmen und werden entsprechende F&E-Projekte bearbeitet. Grundsätzlich wird zwischen **standortunabhängiger anwendungsorientierter Grundlagenforschung** (früher BMFT, heute BMWi) und **standortbezogenen, d.h. anlagenspezifischer bzw. Endlagerprojekt-spezifischer Forschungsarbeiten** (BMU) unterschieden. Für die Förderung der **Endlagerprojekt-spezifischen Forschungsarbeiten gelten andere Finanzierungsmodelle**. Verantwortlich für projekt- und standortbezogene Arbeiten ist das BMUB, das sich hierbei auf des Bundesamtes für Strahlenschutz als Vorhabensträger (Implementer) bedient (BfS). Bisher wurden diese Forschungsvorhaben vom BfS beauftragt und über die Endlagervorausleistungsverordnung den Abfallverursachern in Rechnung gestellt.

Im Kernforschungszentrum existierte seit 1979 eine sogenannte Projektbegleitung "F+E-Entsorgung", die Seminare organisierte und halbjährlich Primärberichte zu den F&E-Arbeiten nuklearchemischer Hochschulinstitute zum nuklearen Brennstoffkreislauf zusammenfasste. In diesem Zusammenhang wurden Einzelarbeiten über „Oxidation von Zircaloy“ (TU Darmstadt), „Verhalten von Tritium im in Zircaloy“ (TU Darmstadt) oder zu einem „Tritiummonitor auf Feldeffekttransistor-Basis“ und „Laser-optischer Strömungsmesser“ (Battelle-Institut. eV. Frankfurt) erstellt. Seit Anfang der 1980er Jahre wurden diese Arbeiten durch den Projektträger „Universitätsforschung zum nuklearen Brennstoffkreislauf“ betreut. Ab 1991 übernahm der Projektträger Entsorgung im Auftrag der Bundesressorts die Bearbeitung und Betreuung der Projektförderung.

Im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF früher BMFT) und und seit 1998 für die Ministerien: Wirtschaft und Arbeit, Wirtschaft und Technologie und Wirtschaft und Energie (BMWi) fungierte das Forschungszentrum Karlsruhe seit 1991 als Projektträger auf dem Gebiet „Entsorgung“. Die Projektförderung erfolgte immer auf der Basis von Ressort-Förderkonzepten (hier aktueller Titel und dann Bezug auf PT-Seite). Bis zum Jahre 2011 wurden auch F&E-Vorhaben mit Bezug zur untertägigen Ablagerung chemotoxischer Abfälle gefördert. Details über förderungswürdige Themen im Rahmen der „Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ wurden regelmäßig in sogenannten Förderkonzepten des Projektträgers veröffentlicht, zuletzt für die Phase 2015 - 2018 [35].

Die Erarbeitung der wissenschaftlich-technischen Grundlagen für die Endlagerung Wärme entwickelnder, hochradioaktiver Abfälle und der erforderlichen Sicherheitsnachweis sollten durch interdisziplinäre Zusammenarbeit auf der Grundlage eines gesamt-gesellschaftlichen Konsens und mit dem Willen zur Lösung bearbeitet werden. Ein wichtiger Aspekt der Förderung der Ministerien war und ist die Aus- und /Weiterbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Deshalb wurde immer Wert auf Universitätsförderung gelegt.

Bis zum Jahr 2005 war es dem INE nicht möglich, Fördermittel beim Projektträger zu beantragen. Dies änderte sich erst, als bei INE die Arbeiten zur Endlagerforschung in kristallinen Gesteinen, die aus der Grundfinanzierung bestritten wurden, eingestellt werden sollten.

4.4 Weitere beteiligte Institute des heutigen KIT

Andere Institute, die heute ebenfalls dem KIT angehören, beteiligten sich an einzelnen Themen im Rahmen der Endlagerforschung.

Zur Prüfung der Korrosionsbeständigkeit von zementierten Abfallprodukten führte das *Institut für Baustofftechnologie* der Universität Karlsruhe (Leitung Prof. H.K. Hilsdorf) Anfang der 1980er Jahre im Auftrag der ABRA Untersuchungen zur Korrosion von unterschiedlich zusammengesetzten Zementstein-, Mörtel- und Betonproben in Kontakt mit konzentrierten Salzlösungen durch.

1976 wurde Prof. Natau auf den "*Lehrstuhl für Felsmechanik*" der TU Karlsruhe berufen. Damals entwickelte sich die Methode der finiten Elemente und es konnten erste numerischen Modellrechnungen zur Felsmechanik durchgeführt werden. Die Brauchbarkeit dieser Methoden hing jedoch auch von der hinreichenden Kenntnis der Gesteinsparameter und der Rand- und Anfangsbedingungen ab. Prof. Natau förderte den Aufbau eines felsmechanischen Labors mit entsprechenden Versuchseinrichtungen. Im Zusammenhang mit der Schachtanlage Asse II war Prof. Natau in zahlreiche Projekte durch die GSF eingebunden..

Im Jahr 1975 wurde im geleitete Institut für Angewandte Systemtechnik und Reaktorphysik (IASR) des Kernforschungszentrums Karlsruhe eine Arbeitsgruppe für Systemanalyse etabliert, aus der sich 1977 die Abteilung für Angewandte Systemanalyse (AFAS) entwickelte. 1995 wurde AFAS zum *Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse* (ITAS). Das Institut beteiligt sich an F&E-Arbeiten zu Endlagerung radioaktiver Abfälle in ethischen, ökologischen, ökonomischen, sozialen, politischen, institutionellen und kulturellen Themen.

Zur Zeit werden spezielle Themen im Rahmen der Endlagerforschung auch vom Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW) des KIT bearbeitet.

5 Forschungsarbeiten der Studiengruppe Tieflagerung (1964 - 1969)

Die Aufgabenstellung der „Projektgruppe Endlagerung radioaktiver Abfälle“, die im April 1964 in „Studiengruppe Tieflagerung (SGT)“ umbenannt wurde, ist, wie sie vom Bundesminister für wissenschaftliche Forschung definiert war, im Anhang D wiedergegeben. Auf Grund des im Kapitel 2.3 beschriebenen Anfalls von radioaktiven Abfällen und der Notwendigkeit, diese entsprechend zu lagern, war die Bereitschaft im Kernforschungszentrum groß, Arbeiten zur endgültigen Beseitigung dieser Abfälle aufzunehmen und die Studiengruppe einzurichten. Die Studiengruppe Tieflagerung berichtete direkt dem Vorstand der GfK. Beim Generallandesarchiv Karlsruhe sind 39 Besprechungs- und Aktennotizen aus der Zeit von 1963 bis 1965 archiviert (69/689). Die SGT entwickelte folgende Anforderungen an ein Endlager für radioaktive Abfallstoffe [36]:

1. räumliche Trennung vom Biozyklus;
2. gute Wärmeableitung zur Abführung der Strahlungswärme;
3. strukturelle Stabilität der Lagerräume;
4. wirtschaftlich günstige Lösung.

In der Publikation [36] wird weiter ausgeführt: „Bei der Suche nach einem Medium, das alle diese Anforderungen erfüllt, ist man in den USA und unabhängig davon auch bei uns auf Salzgestein, insbesondere auf das reine Steinsalz, gestoßen. Steinsalz erlaubt die Anlage großer Hohlräume ohne Ausbau und zu geringen Kosten, es ist völlig dicht gegen Flüssigkeiten und Gase, es besitzt eine gute Wärmeleitfähigkeit (im Mittel etwa 3mal so gut wie Granit) und es ist schließlich reichlich und in jeder gewünschten Tiefenlage im geologischen Untergrund vorhanden, so dass bei Anlage eines Lagers im Steinsalz eine vollkommene Entfernung der Abfälle aus dem Biozyklus gewährleistet ist.“ Belegt wird diese Aussage durch zwei Gutachten der Bundesanstalt für Bodenforschung, Hannover (H.J. Martini 1963 sowie Martini, W. Richter-Bernburg, E. Hofrichter, 1964).

Die Studiengruppe war bei einem EURATOM Vertrag beteiligt, in dessen Rahmen verschiedene Zonen in Europa hinsichtlich ihrer Eignung zur Endlagerung radioaktiver Abfälle bewertet wurden [37].

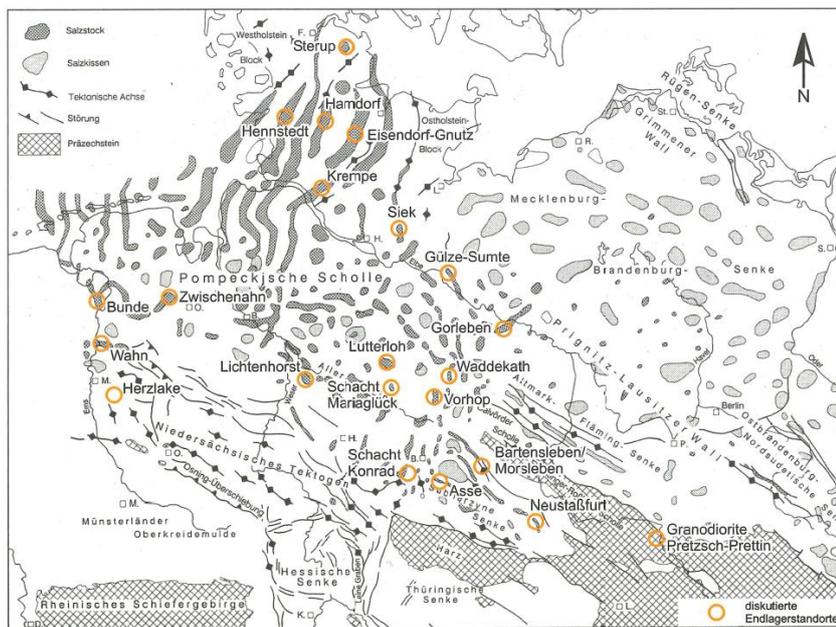


Abb. 8 Salzstrukturen in der Norddeutschen Tiefebene (Bild entnommen aus [38]).

5.1 Endlagerung in Steinsalzformationen

Im Jahresbericht 1964 publizierte die SGT eine umfangreiche Liste ihrer Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Die Arbeiten umfassten Literaturstudien zu den Möglichkeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen, wobei die verschiedenen Arten der Endlagerung in Salzkavernen und Bergwerken analysiert wurden.

Aufgrund der Empfehlung der beiden Gutachten der Bundesanstalt für Bodenforschung (H.J. Martini 1963, Martini, W. Richter-Bernburg, E. Hofrichter, 1964) wurde 1964 die Planung einer Salzkaverne vorgenommen, wobei die Dimensionierung auf Basis einer Schätzungen der Abfallmengen und der Transportkosten erfolgte. Die Standortwahl für eine Salzkaverne wurde anhand von geologischen Gegebenheiten, aber auch der Möglichkeit, die anfallende Sole kostengünstig ableiten zu können und weiteren wirtschaftlichen und technischen Aspekten bewertet. Die GfK stellte bei der Europäischen Atomgemeinschaft einen Forschungsantrag für die Errichtung und den Probetrieb einer als Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle geeigneten Prototyp-Salzkaverne. Der erste Entwurf des Antrags P 576 vom 05.12.1963 belief sich auf eine Fördersumme von 3.46 Mio. DM und umfasste folgende Gliederung:

1. Einleitung mit Darstellung der Situation in Deutschland und anderen Ländern
2. Aufgabenstellung
3. Arbeitsprogramm
 - a. Voruntersuchungen (Abschätzung der Abfallmengen, Ermittlung der Transportkosten)
 - b. Standortwahl
 - c. Projektierung und Errichtung einer Versuchskaverne (Technische Details, Sicherheitsbetrachtungen, Errichtung eine Versuchskaverne einschließlich der Beschickungsanlage)
 - d. Probetrieb

4. Zeitplan

5. Kostenvoranschlag

Da ein Teil der Arbeiten 1964 auf die GSF übertragen worden war, wurde diese dadurch ebenfalls Vertragspartner der europäischen Forschungsförderung durch die Europäische Atomgemeinschaft (EURATOM).

Die SGT war auch beteiligt an den Vorarbeiten für den Erwerb des Salzbergwerks Asse. Es fanden mehrere Treffen mit dem vorherigen Betreiber des Salzbergwerks, der Fa. Wintershall AG statt. Bei diesen Treffen wurde auch die Anlage am 29.01.1964 besichtigt, wobei zum Lösungszutritt im Protokoll folgendes vermerkt ist: „Auf der 750m-Sohle befindet sich ein Sammelbecken für magnesiumhaltige Lauge, die in geringer Menge, 700 l/Tag, aus den alten Carnallit-Abbauen zufließt, und ein Behälter zum Auffangen des Tropfwassers aus dem Schacht.“ Weiter fanden Besprechungen der Studiengruppe mit dem Bergamt Wolfenbüttel zur Abklärung der Genehmigungsfähigkeit der Versuchsvorhaben statt sowie die Vorstellung der geplanten Endlagerungsvorhaben beim Landratsamt Wolfenbüttel (29.07.1964). Bei einer weiteren Besprechung über Forschungsarbeiten im Steinsalzbergwerk Asse beim Bergamt Wolfenbüttel am 30.06.1965 gab Dr. Krause Auskunft über die geplanten Versuche zur Lagerung von niedrigaktiven Abfällen. „Es sollen 600 Fässer einbetonierte Verdampferkonzentrate, 550 Fässer Fällschlämme und etwa 200 Fässer paketierte Abfälle eingelagert werden. Zu diesem Zweck wurden die Abbaukammern 4 und 10 auf der 750 m Sohle ausgewählt.“

Das vorgeschlagene Versuchsprogramm im Salzbergwerk Asse erstreckte sich auch auf Planungsarbeiten für die Lagerung hochaktiver Abfälle und bestrahlter Kernbrennstoffe. (Seit Mai 1964 wurde auch über die Einlagerung von abgebranntem AVR Brennstoff diskutiert.) Das Versuchsprogramm im Salzbergwerk Asse umfasste folgende Untersuchungen:

- a. geophysikalische Untersuchungen der Eigenschaften des Gesteins bezüglich der Standfestigkeit und der Eignung zur Lagerung (Druckfestigkeit, Einwirkung von Wärme und Gebirgsdruck. Bestrahlungseffekte, Permeabilitätsmessungen).
- b. Untersuchungen zur Lagerungstechnik schwach- und mittelaktiver Abfälle (Abdichtung, Belüftungstechnik, Tracerversuche, Korrosionsversuche an Abfällen und Strukturmaterialien).
- c. Fragen der Umfüll- und Einbringtechnik für hochaktive Abfälle / ausgebrannte Kernbrennstoffe (Transportfahrzeuge und Umfülleinrichtungen, Auslegung von Lagern für hochaktive Abfälle):

Diese in 1964 begonnenen Arbeiten führten dann in 1966 zu den ersten Sicherheitsstudien und der Versuchslagerung niedrig aktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse II [39] bzw. 1967 zu einem „Memorandum über die sichere Lagerung niedrig- und mittelaktiver Rückstände (außer Kernbrennstoffen) im Salzbergwerk Asse“ [40], welches als Basis für die Sicherheitsstudie [41] für die Routineeinlagerung von schwachradioaktiven Abfälle in die Schachanlage Asse II diente.

Insgesamt wurden vier Versuchseinlagerungskampagnen im Salzbergwerk Asse II ab April 1967 durchgeführt, wobei in Phase 1 ausschließlich vom Kernforschungszentrum Karlsruhe 1722 200-Liter-Fässer geliefert wurden [42]. Zur Versuchseinlagerung von schwachaktiven Abfällen war die frühere Abbaukammer 4 als Lagerkammer eingerichtet worden. Die 1. Einlagerungsphase dauerte von April bis

Oktober 1967. Der Zugang zu dieser Lagerkammer lag auf dem Niveau der Sohle¹ und die Abfallgebände wurden mit Hilfe eines Staplers übereinander stehend eingelagert. Die 2. Einlagerungsphase begann im Oktober 1967 und wurde im Frühjahr 1968 abgeschlossen. Von Januar bis April wurden 1353 Abfallfässer von je 200 l Inhalt eingelagert. Der Gesamtbestand erhöhte sich damit auf rd. 4500 Fässer. In den späteren Versuchskampagnen wurden die Abfallgebände liegend eingelagert. Für die Routineeinlagerung wurden Zugänge in die Lagerkammern unterhalb der Firste² hergestellt und die schwachaktiven Abfälle über eine Böschung abgekippt. Nach dem Einbringen einer gewissen Zahl von Gebänden mittels eines Schaufelladers, wurden diese mit Salzgrus überschüttet und so die Kammer vom Zugang her sukzessive befüllt. Durch diese Art der Einlagerung konnte die Dosisbelastung des Personals signifikant reduziert werden. Details der eingelagerten Abfälle und der Einlagerungstechniken finden sich auf folgender Internetseite http://www.asse.bund.de/Asse/DE/themen/was-ist/geschichte/geschichte_node.html. Der Transport der Abfälle zur Schachtanlage erfolgte durch die Deutsche Bundesbahn bzw. durch Spediteure [43].

Es fällt bei diesen frühen Arbeiten auf, dass die Konvergenz, die später für den sicheren Einschluss der Abfälle in das Salzgestein die wesentliche Rolle spielte, nicht als Kriterium herangezogen und in den Untersuchungen betrachtet wurde. Möglicherweise war man sich der Konvergenz, die aufgrund des visko-plastischen Verhaltens des Salzgesteins zum Verschließen von offenen Grubenräumen führt, nicht bewusst. Im Jahr 1969 wurde eine Formel zur Berechnung der Konvergenzrate als Funktion der Druckverhältnisse, Geometrie und Tiefe veröffentlicht [44] und die Ergebnisse aus den Versuchen zur Ermittlung der Wärmeausbreitung und des thermomechanischen Verhaltens von Salzgestein lieferten hierzu vertiefte Erkenntnisse.

5.2 Versenkung radioaktiver Abfälle im Meer

Zur Versenkung radioaktiver Abfälle im Meer wurden 1964 Vorarbeiten für eine Probeversenkung in das Meer vorgestellt, und ein entsprechender Programmvorschlag wurde mit dem BMWF und dem Deutschen Hydrographischen Institut ausgearbeitet und vom BMWF der OECD vorgelegt. Von der Studiengruppe wurde in diesem Zusammenhang geprüft, welche der in Deutschland lagernden Abfälle für eine Probeversenkung geeignet wären.

Im Jahresbericht 1968 [43] ist die erste und einzige Versenkung von radioaktiven Abfällen aus Deutschland im Atlantik beschrieben: „Unter der Schirmherrschaft der europäischen Kernenergieagentur (ENEA) wurde im Sommer 1967 von 5 Ländern eine Versuchsversenkung radioaktiver Abfälle im Atlantischen Ozean durchgeführt. Die Bundesrepublik Deutschland beteiligte sich an dieser Aktion mit 480 Stück 200 l Fässern zementierter radioaktiver Abfälle aus dem Kernforschungszentrum Karlsruhe mit einem Gesamtgewicht von 180 t. Es handelte sich bei diesen Abfällen um Verdampferkonzentrate mit relativ geringer spezifischer Aktivität. Das mittlere spezifische Gewicht betrug 1.7 t/m^3 .“

¹ Untere Begrenzungsfläche einer Strecke oder Kammer

² Obere Begrenzung eines Grubenbaus

5.3 Oberflächenlagerung und Vergraben von Abfällen

1963 wurde eine Arbeitsgruppe gebildet, die mit der Bewertung der Entsorgungsoption „Oberflächenlagerung und Vergraben von Abfällen“ beauftragt war. In einer Notiz zur 2. Sitzung der Arbeitsgruppe „Beseitigung radioaktiver Abfälle durch Vergraben im Boden“ am 3. Juli 1963 in Neuherberg wurde durch das BMWF die Aufgabenstellung definiert: „Die Arbeitsgruppe sollte zunächst auf die Erstellung eines Gutachtens als Grundlage einer Genehmigung für das Vergraben geringfügig kontaminierter Abfälle (Aktivitätsbereich ca. 10 – 100 $\mu\text{Ci}/\text{m}^3$) begrenzt sein. Mit der Zunahme des Anfalls radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik wird es jedoch erforderlich sein, die Beseitigung radioaktiver Abfälle durch Vergraben im Boden eingehender zu studieren. Zur Beurteilung der Sicherheit des Vergrabens radioaktiver Abfälle im Boden muss das Verhalten radioaktiver Stoffe, die absichtlich oder unabsichtlich in den Boden eingebracht wurden, genau bekannt sein. Die dabei angeschnittenen Fragen sind nicht nur für die Abfallbeseitigung, sondern auch für die Standortwahl kerntechnischer Anlagen von grundsätzlicher Bedeutung. Dabei werden verschiedene naturwissenschaftliche Disziplinen angesprochen“ (III C 4- 5845-6, 10. Oktober 1963, Dr. Schw/Grie).

In diesem Zusammenhang wurde eine Studie zur „Endlagerung von Flockungsschlämmen mit radioaktiven Verunreinigungen durch Vergraben“ durchgeführt. Die Flockungsschlämme fielen bei der Behandlung chemischen nicht-radioaktiv kontaminierter Abwässer an (siehe Kap. 3.2). Die Radioaktivität in diesen Abwässern stammte nicht aus dem Fall-out der Kernwaffenversuche in den 1960er Jahren sondern kam durch eine Anreicherung der Restaktivitäten aus den freigegebenen Abwässern zu Stande (Sitzungsprotokoll der Besprechung am 15.10.1963 in Neuherberg). Die Studie prüfte die Option, die sehr schwach kontaminierten Flockungsschlämme in flachen Gruben von max. 1 m Tiefe oberhalb des Grundwassers zu lagern [45]. Im Rahmen dieser Studie wurden auch Ausbreitungsrechnungen und Risikoabschätzungen durchgeführt. Man kam zu dem Ergebnis, dass dieses Vergraben „bei den im Kernforschungszentrum Karlsruhe vorliegenden Verhältnissen zu keinerlei Bedenken Anlass gibt.“ In der Tab. I sind die damaligen Aktivitätskonzentrationen angegeben und mit heutigen Freigabewerten verglichen.

Tab. I Minimale und Maximale Aktivitätskonzentrationen der als inaktiv definierten Flockungsschlämme [45] im Vergleich zu Freigabewerten gemäß heute gültigen Strahlenschutzverordnung [46].

	Aktivität _{min}	Aktivität _{max}	Freigabe Werte
	Bq/ml	Bq/ml	Bq/ml
alpha	1.11	1.48	0.1
beta	11.10	14.80	1.0
gamma	14.80	37.00	1.0
⁹⁰ Sr	0.44	0.59	2.0
Anfall / $\text{m}^3 \text{a}^{-1}$	500	1000	

Die Beseitigung radioaktiver Abfälle, insbesondere der schwach kontaminierten Flockungsschlämme, durch Vergraben im Boden wurde jedoch nicht realisiert.

6 Forschungsarbeiten im Rahmen der Kooperation von KfK und GSF (1968 - 1981)

Seit 1968 existierte eine enge Kooperation zwischen der Gesellschaft für Strahlenforschung mbH München und der Gesellschaft für Kernforschung mbH Karlsruhe auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Dies zeigte sich daran, dass die bisherigen Jahresberichte der SGT durch gemeinsame Jahresberichte zur Tieflagerung radioaktiver Abfälle abgelöst wurden [43]. Bei den durchgeführten F&E-Arbeiten waren für die geowissenschaftlichen Untersuchungen das Institut für Tieflagerung, Clausthal-Zellerfeld, der Gesellschaft für Strahlenforschung, für die bergtechnische Herrichtung und den bergbaulichen Betrieb des Salzbergwerkes Asse II die Betriebsabteilung für Tieflagerung, Wolfenbüttel, der Gesellschaft für Strahlenforschung und für kerntechnische Studien sowie für die Entwicklung und Erprobung von Einrichtungen für die Einlagerung der radioaktiven Abfälle die Studiengruppe Tieflagerung, der Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe, verantwortlich.

Insgesamt war man in dieser Zeit optimistisch in Kürze ein Endlager auch für hochradioaktive Abfälle einrichten zu können. Als Beispiel ist ein Vortragsmanuskript zum „Stand der Arbeiten auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle“ aus dem Jahr 1977 von C. Schuchardt, ABRA, (Beitrag zur Delegierten Versammlung am 1. Juni 1977) im Anhang G wiedergegeben.

Die Zusammenarbeit zwischen den beiden Forschungseinrichtungen GfK und GSF war häufig durch Kompetenzgerangel bestimmt. Bereits kurz nach Etablierung der SGT gab es Versuche, die Studiengruppe bei der GSF anzusiedeln. Diesem Ansinnen wurde in einem Schreiben der Vorstände des GfK an das zuständige Ministerium BMWF im Jahr 1964 energisch widersprochen (GLA 69/689).

Vor Einrichtung des Instituts für Tieflagerung und der Berufung von Prof. Borchert als dessen Leiter durch die GSF gab es einen weiteren Anlauf der GSF die Gesamtkompetenz auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle zu übertragen. In einem internen „Vermerk“ des Vorstands von GfK, Dr. Greifeld vom 15.03.1965 (GLA 69/689) sind zahlreicher Gegenargumente zusammengefasst.

Umgekehrt versuchte GfK in den Jahren 1970 bzw. 1971 die Asse einschließlich des Instituts für Tieflagerung ins Kernforschungszentrum zu übernehmen. Die Argumente wurden in verschiedenen internen Schreiben dargestellt (z.B. Krause 12.08.1970) und von den Vorständen Greifeld und Haxel dem BMBW am 31.03.1971 mitgeteilt (GLA 69/273). Die Organisation sollte in Form des „Modells GfK-Versuchsanlagen“ erfolgen (GLA 69 KfK-GF-1 Nr. 584).

Als Prof. Borchert, der Leiter des Instituts für Tieflagerung der GSF in der Ruhestand ging, berief die GSF zum 01.07.1973 Dr. Klaus Kühn zu seinem Nachfolger. Nach der Gründung der Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung radioaktiver Abfälle (EGT), erfolgte in den Jahren 1980/81 erneut der Versuch, die Aktivitäten und das Personal beider Forschungseinrichtungen zusammenzufassen und es wurden bereits entsprechende Räumlichkeiten gesucht. Auch diesem Versuch wurde von KfK entschieden widersprochen.

Inwieweit diese Versuche der Bündelung der F&E-Arbeiten der beiden Organisationen auf deren Initiativen oder auf Initiativen der Bundesministerien beruhten, kann anhand der gesichteten Unterlagen nicht geklärt werden. Die Grundzüge für die Überführung des Instituts für Tieflagerung und des Betriebs der Schachanlage ASSE II von der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF) zur Deutschen Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern (DBE) wurden allerdings von den Bundesministerien diskutiert (INE-Archiv Ordner 360: 315 - 5557 - 14 - 1/79 vom 01.02.1980 und Ergebnisprotokoll 315 - 5557 - 14 - 1/80 vom 10.03.1980).

Seit Anfang der 1980er Jahre fanden nur noch wenige gemeinsame Forschungsarbeiten von ABRA und IfT statt.

6.1 Forschungsarbeiten im Salzbergwerk Asse

Mitarbeiter der GfK waren an zahlreichen Forschungsarbeiten im Salzbergwerk Asse beteiligt. Diese betrafen im Wesentlichen Arbeiten im Zusammenhang mit der geplanten Endlagerung von wärmeproduzierenden Abfällen und umfassten

- Versuche zur Ermittlung der Wärmeausbreitung und des thermomechanischen Verhaltens von Salzgestein.
- Einfluss von Wärme, Salz, Salzlauge und radioaktiver Strahlung auf Materialien, die für die Fertigung von Behältern für hochaktive, wärmeentwickelnde Abfälle und deren spätere Einlagerung in Frage kamen.

Bereits im Jahr 1966 wurden Untersuchungen im Salzbergwerk Asse begonnen, um „wärmetechnische Fragen unter wirklichkeitsnahen Bedingungen“ für die Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen in das Salzbergwerk Asse zu beantworten [47].

Die F&E-Arbeiten zur „Versuchseinlagerung hochaktiver Glasblöcke im Salzbergwerk Asse“ wurden im Rahmen des indirekten Aktionsprogramms der europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) „Bewirtschaftung und Lagerung von radioaktiven Abfällen, Programmbogen Nr.7: Lagerung von hochaktiven Abfällen in geologischen Formationen“ von 1975 bis 1979 gefördert. Die Arbeiten erstreckten sich über folgende Punkte:

- Simulationsversuche im älteren Steinsalz (unverrohrte und verrohrte Bohrlöcher).
- Entwicklung einer Standardsonde zur Erfassung der mechanischen Veränderung in Bohrlöchern (Konvergenz) [48].
- Ermittlung von Absolutspannungen in der Asse, rheologischen Eigenschaften des Salzes
- Korrosionsverhalten von Werkstoffen für die Bohrlochauskleidung und Abfallverpackung unter erhöhtem Druck
- Migration und Freisetzung von Laugentröpfchen.
- Verbesserung von Rechenprogrammen zur Modellierung der Temperaturen, der Standfestigkeit und der thermomechanischen Belastungen durch hochaktive Wärmequellen.
- Entwicklung von Rechenverfahren zur Untersuchung der Vorgänge, die nach Eindringen von Wasser oder Lauge in die Grubenräume im Zusammenhang mit der Wärmeentwicklung der hochaktiven Abfälle zu erwarten wären (Konvektion, stofflicher Austausch).

Direkte Beiträge des KfK zu laufenden Experimenten im Salzbergwerk Asse fanden bis Anfang der 1980er Jahre statt, wobei Temperatur- und thermomechanische Versuche in verschiedenen Konfigurationen zur Endlagerung von Wärme-produzierenden Abfällen im Vordergrund standen. Diese Experimente waren kombiniert mit Modellrechnungen zu Temperaturfeldern und der Thermomechanik. Es wurden auch Modellrechnungen zur Konvergenz von Asse-spezifischen Hohlräumen (z. B. Prototypkaverne) durchgeführt.

Die Kooperation zwischen KfK und GSF basierte zum großen Teil auf der Nutzung des Salzbergwerks Asse II als Versuchsanlage. Im Anhang H ist die Genehmigungssituation für die Einlagerung radioaktiver Abfälle in das Salzbergwerk Asse zusammengefasst. Mit In-Kraft treten des „Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und dem Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)“ im Jahr 1976 änderten sich wesentliche Voraussetzungen bezüglich der Genehmigung. Nach den neuen AtomG lag die Verantwortlichkeit für die Endlagerung ausschließlich beim Bund, der hierfür die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), später das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) benannte. Vor diesem Gesetz lag die Erfassung der radioaktiven Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland (freiwillig) beim KfK [49], danach wurde die Erfassung der Abfälle und Mengen von BfS übernommen [50-56]. In dem neuen Atomgesetz wurde die Planfeststellung als Voraussetzung für die Errichtung und den Betrieb eines Endlagers definiert. Zur Durchführung ihrer Aufgaben konnte sich die PTB bzw. das BfS eines „Dritten“ bedienen. Die Folge dieses Gesetzes war, dass die Einlagerungsgenehmigung für radioaktive Abfälle in das Salzbergwerk Asse zum 31.12.1978 erlosch. Zunächst bemühte sich die GSF als „Dritter“ benannt zu werden, allerdings übernahm diese Funktion die neugegründete Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern (DBE).

Erst ab dem Jahr 2000 wurden im INE wieder Forschungsarbeiten für die endgültige Stilllegung des Salzbergwerks Asse II aufgenommen (siehe Kap. 11.2). Diese Arbeiten wurden beauftragt und finanziert durch das Helmholtz Zentrum München und betrafen die Korrosion von Behälterwerkstoffen (Gasentwicklung), Zementkorrosion, Löslichkeiten von Actiniden und von langlebigen Spaltprodukten, Quellterme und die Radionuklidsorption.

6.2 Sicherheitsstudien

Für die Genehmigung der Einlagerung radioaktiver Abfälle in das Salzbergwerk Asse II, musste gegenüber der Bergbehörde die Sicherheit der eingelagerten Abfälle nachgewiesen werden. Diese Nachweise wurden in sogenannten Sicherheitsstudien erbracht. Die erste Sicherheitsstudie stammt aus 1966 „Sicherheitsstudien zu den Forschungsarbeiten und der Versuchslagerung niedrig radioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse II“ mit den Autoren E. Albrecht, K. Kühn, H. Krause, H. Ramdohr. Neben der Beschreibung der Anlage und des Betriebs enthielt diese Studie das Kapitel II „Sicherheitsstudien über mögliche Störfälle und Gegenmaßnahmen“, welches unter anderem die unkontrollierte Kettenreaktion, Schäden am Einlagerungsgut, Gebirgsbewegungen, Wassereintrich, Brand, Explosion, menschliches Versagen, Sabotage und Streik enthielt. Bereits in dem von den gleichen Autoren bearbeiteten „Memorandum über sichere Lagerung niedrig- und mittelaktiver Rückstände (außer Kernbrennstoffe) im Salzbergwerk Asse II“ wurden die gleichen Störfälle und Gegenmaßnahmen vorgestellt.

Mit dem Übergang von der Versuchseinlagerung in die Routineeinlagerung von schwach- und mittelaktiven Rückständen wurden die "Sicherheitsstudien für die Einlagerung radioaktiver Rückstände im

Salzbergwerk Asse II" überarbeitet und 1970 bei der Bergbehörde eingereicht. Die Sicherheitsstudien waren in einen allgemeinen Teil A und in einen speziellen Teil B aufgeteilt. Der allgemeine Teil A mit der Überschrift "Bergtechnische Anlagen und Betriebsvorgänge" gliederte sich in die vier Abschnitte Aufgabe der Anlage, Beschreibung des Bergwerkes, mögliche Störfälle und Gegenmaßnahmen sowie Schutz- und 'Sicherheitsmaßnahmen". Der spezielle Teil B war überschrieben mit „Anlagen und Betriebsvorgänge zur Einlagerung radioaktiver Rückstände" und sollte Kapitel über alle Versuchs- und Routineeinlagerungen von schwach- mittel- und hochaktiven Rückständen beinhalten.

Weitere Sicherheitsstudien wurden angefertigt für die „Endlagerung verbrauchter Brennelemente aus dem AVR-Versuchskernkraftwerk im Salzbergwerk Asse" (1975) und eine „Kurze Sicherheitsbetrachtung für Auslaugung und Aktivitätstransport aus der 10 000 m³-Prototypkaverne Asse (1976). Während die ersten Sicherheitsbetrachtungen für die radioaktiven Abfälle im Salzbergwerk Asse II nur beschreibenden Charakter hatten, wurde seit Anfang der 1970er Jahre versucht quantitative Kriterien einzuführen.

Untersuchungen zur langfristigen Sicherheit bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle auf der Basis des sogenannten „*Uranerzmodells*" wurden im Jahresbericht 1974 der ABRA von W. Bechthold, W. Diefenbacher vorgestellt. Ähnlich wie zur Begründung der zulässigen α -Aktivität in den einzelnen Gebinden, wurde für hochaktive Abfälle ebenfalls das Gefährdungspotential belastet. Man ging davon aus, dass bis zum Abklingen der Spaltprodukte das Gefährdungspotential durch ⁹⁰Sr bestimmt wird. Danach rührte der wesentlichste Beitrag zum gesamten Gefährdungspotential der Abfälle von Americium. Das maximale Gefährdungspotential sollte nach dem Abklingen des Americiums nach 10⁴ bis 10⁵ Jahren erreicht werden. Nach 10⁵ Jahren sollte das Gefährdungspotential nur noch 1.1×10⁵ m³/t betragen. Das relative Gefährdungspotential des hochaktiven Abfalls (d.h. das berechnete Gefährdungspotential bezogen auf das Gefährdungspotential eines 3-prozentigen Uranerzes) würde nach dem Abklingen des ⁹⁰Sr unter 10 und nach 7000 Jahren unter 1 liegen. Auch durch das vorübergehende Ansteigen der Pu-Aktivität zwischen 10⁴ und 10⁵ Jahren würde das relative Gefährdungspotential 1 nicht wieder überschritten.

Nachdem die Einlagerungsgenehmigung für radioaktive Abfälle in das Salzbergwerk Asse zum 31.12.1978 erloschen war, erarbeitete die GSF auf Anregung des Landes Niedersachsen einen Plan zur rückholbaren Zwischenlagerung von LAW, für welchen auch ein Genehmigungsverfahren in Gang gesetzt wurde sowie parallel dazu ein Planfeststellungsverfahren für die Fortsetzung von Versuchen auch mit radioaktiven Abfällen im Salzbergwerk Asse. Sicherheitsberichte wurden für die rückholbaren Zwischenlagerung von LAW nach §3 der Strahlenschutzverordnung und § 6 des Atomgesetzes zur Aufbewahrung von kernbrennstoffhaltigen Abfällen [57] und für die Fortsetzung der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse nach § 9b des Atomgesetzes [58] erstellt. Bei der Erstellung dieser beiden Berichte waren Mitarbeiter von KfK kaum beteiligt, die GSF stützte sich hierbei auf Zuarbeiten durch die Firma NUKEM, Hanau.

Die rückholbare Zwischenlagerung in der Asse scheiterte allerdings an der Forderung, dass der Bund Auslagerungsorte für die rückholbar eingebrachten Abfälle benennen sollte (Ollig, BMFT 315 - 5555 - 6 - 26/80 vom 12.05.1980).

6.3 Prototypkaverne

Grunderwerbsschwierigkeiten verhinderten die Durchführung des Vorhabens zur Solung einer Kaverne in Küstennähe für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (siehe Kap. 5.1) [47]. Da jedoch der mit EURATOM abgeschlossene Forschungsvertrag 00664 - 12 WAS D zum Ziel hatte, eine Versuchskaverne zur Endlagerung radioaktiver Rückstände zu errichten, sowie die zur Einlagerung notwendigen technischen Einrichtungen zu entwickeln, wurde untersucht, welche Möglichkeiten der Errichtung einer Kavernenanlage sich auf dem Salzstock Asse boten. Die Untersuchungen ergaben, dass sowohl nach geologischen als auch bergtechnischen Gesichtspunkten die Erstellung einer Kavernenanlage auf diesem Standort grundsätzlich möglich wären. Vorbedingung hierzu war jedoch eine Untersuchungsbohrung zur Erkundung der Deckgebirgsschichten. Aus Gründen der Grubensicherheit war allerdings das Ausloten des Kavernenraumes nicht möglich, vielmehr sollte er durch bergmännischen Abbau geschaffen werden. 1974 wurde mit dem Schachtbau begonnen. In einer Prototyp-Kavernenanlage sollte die Einlagerung mittelradioaktiver Abfälle in den Kavernenhohlraum zwischen 959 m und 996 m Teufe erfolgen. Die Kaverne hatte ein Volumen von ca. 10000 m³. Eine Beschreibung findet sich in Jahresberichten der Abteilung Endlagerung der ABRA [59]. Mit diesem Vorhaben war beabsichtigt den umständlichen Untertagetransport der Abschirmbehälter für mittelradioaktive Abfälle zu vermeiden.

Bei der hier vorgesehenen Einlagerungstechnik sollten die Abfälle von *Übertage* bis zur Endladeanlage in einer Teufe von ca. 918 m mittels einer Schacht-Förderanlage abgesenkt und von diesem Niveau aus im freien Fall von ca. 70 m in die Kaverne eingebracht werden. Entgegen der praktizierten Technik in der Kammer 8a (Schachtanlage Asse II, 511 m Sohle), bei der die Abfallbehälter so eingebracht wurden, dass sie in Form und Dichtheit während des Einlagerungsvorgangs erhalten blieben, würden bei der Kaverneneinlagerung die Abfallbehälter durch das Abwerfen zerstört. Diese Art der Einlagerungstechnik würde mit einfachen technischen Mitteln die Verwirklichung der sogenannten behälterlosen Lagerung der Abfälle erlauben. Bei dieser Art der Einlagerung wäre damit zu rechnen, dass der eigentliche Lagerraum durch Staubbildung (Aerosole) kontaminiert wird. Diese Einlagerungstechnik sollte zu einem wesentlich geringeren freien Hohlraum innerhalb des Lagergutes führen, als bei der in der Kammer 8a praktizierten Technik. Die behälterlose Einlagerung war ein wesentliches Ziel, das mit der Prototyp-Kavernenanlage verfolgt wurde.

Seit 1976 wurden Untersuchungsprogramme zur Erfassung der Temperatur, der Radiolysegase, der Staubkonzentration, etc. entwickelt und geplant [60]. Besonders die Staub- und Aerosolbildung war ein wichtiger Aspekt, da unter allen Umständen vermieden werden musste, dass der Kavernenschacht oberhalb von 918 m kontaminiert wird. Der Kavernenschacht war als Notausgang für das Bergwerk Asse II eingerichtet. Ein ebenfalls wichtiger Aspekt war die Radiolysegasbildung, da dadurch zündfähige Gemische entstehen könnten. Zündfunken wären bei der Einlagerung von Stahlbehältern unvermeidbar gewesen (Abb. 9).



a)



b)

Abb. 9 Fallversuche zur Erprobung der „behälterlosen Einlagerungstechnik“ in der Prototyp-Kaverne [61].

- a) Zerstörung eines Gebindes mit simulierten zementierten Abfällen nach Abwurf
- b) Funkenbildung beim Aufschlag eines Gebindes auf ein bereits abgeworfenes Stahlfass.

6.4 Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung (EGT)

Im Jahr 1978 wurde die Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung (EGT) gegründet mit dem Ziel die Arbeiten auf dem Gebiet der sicheren Lagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Schichten zwischen KfK und GSF zu intensivieren. Die EGT sollte die wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen für die Errichtung und den Betrieb von Endlagern für radioaktive Stoffe schaffen. Ihre Rolle und ihre Beziehungen im System der Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland wurde in einem Thesenpapier zusammengefasst (siehe Anhang I).

Die Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung definierte vier Arbeitsbereiche mit unterschiedlichen Aufgaben, wobei die beiden Bereiche Sicherheit und Kerntechnik dem KfK, die beiden anderen der GSF zugeordnet waren.

Arbeitsbereich Sicherheit

mit den Themen „Analyse von Störfällen in Endlagersystemen“, „Sicherheitskonzepte und Erarbeitung sicherheitsrelevanter Standards“ und „Erstellung von Genehmigungsunterlagen“.

Arbeitsbereiche Kerntechnik

mit den Themen „Endlagerfähigkeit radioaktiver Abfälle“, „Verpackung für Transport und Endlagerung sowie Abschirmbehälter für radioaktiver Abfälle“ und „Entwicklung von Anlagen und Einrichtungen für die Einlagerung radioaktiver Abfälle“.

Arbeitsbereich Geowissenschaften

mit den Themen „Eignung Standorten für die Errichtung von Endlagern“, „Eigenschaften des Lagermediums und Auswahlkriterien für geeignete Lagerfelder“, „Kriterien für die Auslegung, den Betrieb und für die Stilllegung und Verwahrung von Endlagern“.

Arbeitsbereiche Versuchsanlage mit den Themen „Durchführung des Bergwerksbetriebes einschließlich Versuchseinlagerung radioaktiver Abfälle“, „Strahlenschutz“, „Versuchsfelder und Technologie“, „Baumaßnahmen“, „Besucherbetreuung“.

Die einzelnen Themen innerhalb dieser Arbeitsbereiche wurden sehr detailliert in einem Papier der EGT am 25.08.1977 den Mitarbeitern mitgeteilt.

Die EGT entwickelte jedoch eine hierarchische Struktur, die der wissenschaftlichen Kooperation nicht förderlich war. Hinzu kamen das Fehlen einer klaren Arbeitsteilung. In einem Brief von Prof. Böhm, Vorstand des KfK, an Dr. Ziegler, BMBF wurde am 20.11.1980 mitgeteilt: *„Nachdem wir in letzter Zeit mehrfach über die Frage einer klareren Abgrenzung der Arbeiten von GSF und KfK auf dem Gebiet der Endlagerung gesprochen haben, übersende ich Ihnen in der Anlage zu Ihrer Information einen Entwurf einer entsprechenden Übereinkunft, die zwischen GSF und KfK einvernehmlich festgelegt wurde“*. Solche Irritationen nahmen zu. Hinzu kamen Einschätzungen der Ministerien, die die Arbeiten der EGT „als nicht sehr erfolgreich bezeichneten“ (Dr. Ziegler, BMFT mitgeteilt im Protokoll der 30. EGT-Sitzung am 16.10.1980 in Braunschweig (INE-Archiv Ordner 813)).

Zwar drückte Prof. Levi, Vorstand der GSF, „den Wunsch aus, dass die EGT weitergeführt und ggf. auf eine breitere Basis gestellt wird, um Kooperation und Kontakte zwischen allen mit den Problemen der Endlagerung beschäftigten Institutionen weiter zu intensivieren“ (Protokoll der 32. EGT-Sitzung am 08.07.1981 in München (INE-Archiv Ordner 813)), doch erschien im Jahr 1981 der letzte gemeinsame Jahresbericht der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung GmbH, München und dem Kernforschungszentrum Karlsruhe, der im Rahmen der EGT verfasst wurde [62]. Die letzten Arbeiten, die unter EGT publiziert wurden, stammen aus dem Jahr 1984 [63, 64].

6.5 Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE)

1977 stellte die Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen (DWK) beim Niedersächsischen Sozialministerium den Antrag auf Genehmigung der Errichtung und des Betriebs des Nuklearen Entsorgungszentrums (NEZ) bei Gorleben [14]. Dort sollten eine Wiederaufarbeitungsanlage, eine Brennelementefabrik, ein Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente, eine Konditionierungsanlage für atomare Abfälle und ein unterirdisches Endlager an einem Standort integriert werden.

Das Projekt SICHERHEITSSTUDIEN ENTSORGUNG (PSE) wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie implementiert und sollte sich mit Sicherheitsstudien zum gesamten NEZ befassen. Die Studien basierten auf dem „Nukleare Entsorgungszentrum“ wie es von DWK und PTB für den Standort Gorleben konzeptionell geplant war und der räumlichen Vereinigung aller erforderlichen Prozesse einschließlich der Abfallendlagerung an einem Standort. Der Plan eines Nuklearen Entsorgungszentrums (NEZ) wurde auf Grund eines Beschlusses der Niedersächsischen Landesregierung 1979 zwar nicht endgültig aufgegeben, aber auch nicht mehr aktiv weiterverfolgt. Gorleben blieb nur noch potentieller Standort für das Endlager und für ein Zwischenlager. Die Planung des Endlagers blieb von dieser Konzeptänderung weitgehend unberührt.

Das Projekt PSE hatte zunächst eine Laufzeit von 1978 bis 1981 und wurde danach um weitere drei Jahre verlängert. Insgesamt beteiligten sich 14 Organisationen an PSE, einschließlich KfK und GSF. Die

Projektleitung lag beim Hahn-Meitner-Institut für Kernforschung Berlin GmbH, Mitglieder der Projektleitung waren Prof. Dr. H. W. Levi, HMI (später GSF), Prof. Dr. G. Memmert (TU Berlin), Prof. Dr. H. Venzlaff (BGR) und Dr. H.-J. Wingender (NUKEM). Die folgende Beschreibung des PSE wurde aus dem zusammenfassenden Zwischenbericht 1981 des PSE entnommen [65]. Das Projekt war in 8 Teilprojekte gegliedert. Während der ersten Projektphase war der Personaleinsatz 204 Personenjahre (davon 6 MJ bei KfK) mit Kosten von 21 Mio. DM [65].

Unter einer Sicherheitsanalyse einer Anlage verstand man die Analyse und Berechnung der mit der Implementierung dieser Anlage verbundenen Gefährdung der Bevölkerung. Für die Entsorgungseinrichtungen bedeutete dies die Identifikation und Bewertung der möglichen Störfälle, die eine Freisetzung von Radionukliden zur Folge haben. Zur Bewertung der Störfälle werden Modelle für die Nuklidfreisetzung mit Modellen für die Konsequenzen der Nuklidfreisetzung verknüpft, so dass sich letztlich die Wahrscheinlichkeiten der Störfälle und die Folgen für den Menschen angeben lassen. PSE hatte daher folgende Hauptziele:

- Entwicklung von Methoden und Beschaffung experimenteller Daten, orientiert an den Zielsetzungen einer Risikoanalyse,
- Erprobung und Demonstration von Methoden und Daten anhand von Planungsunterlagen beispielhafter Anlagen bzw. Anlagenteile,
- Aussagen über Störfallabläufe in typischen Anlagenteilen sowie über die Wirkung von Barrieren anhand von probabilistischen bzw. deterministischen Werten für die Radionuklidfreisetzung bei nichtbestimmungsgemäßigem Betrieb.

Damit sollen die methodischen Voraussetzungen geschaffen werden für eine mögliche spätere Durchführung einer Risikoanalyse von Entsorgungsanlagen. Im Einzelnen mussten mögliche Konsequenzen aus nichtbestimmungsgemäßigem Betrieb von Entsorgungsanlagen analysiert werden:

- Freisetzung von Radionukliden aus der Wiederaufarbeitung und der oberirdischen Anlagen für Abfallbehandlung und Zwischenlagerung einschließlich der außerbetrieblichen Transporte
- Freisetzung von Radionukliden aus dem geologischen Endlager (aus den Abfallformen, dem Grubengebäude und dem Salzstock)

Die Hauptfreisetzungswegen und ihre Verknüpfung wurden im Rahmen von PSE entsprechend der definierten Teilsysteme des Integrierten Entsorgungskonzeptes untersucht:

- Transport der Brennelemente;
- Wiederaufarbeitung mit mechanischer Zerkleinerung der Brennelemente, chemischer Auflösung des Kernbrennstoffs und Trennung des Urans und Plutoniums von den radioaktiven Abfällen
- Rückhaltung, Zwischenlagerung und Abfallbehandlung,
- Endlagerung der konditionierten radioaktiven Abfälle.

Eine Risikostudie der Entsorgung mit einer Zielsetzung ähnlich der der Deutschen Reaktor-Sicherheitsstudie (DRS), d.h. Abschätzung eines kollektiven Gesundheitsrisikos als statistischer Erwartungswert, setzte eine weit detailliertere Kenntnis der Anlagen voraus, als sie zu der Zeit existierten und dem Planungsstadium entsprechend existieren konnte. Als Forschungsprojekt, das die Realisierung der

integrierten Entsorgung begleiten sollte, lieferte das Vorhaben Beiträge zur sicherheitstechnischen Verbesserung der Anlagen in der Planungsphase und Vorarbeiten für eine später vorzunehmende Abschätzung des verbleibenden Risikos. Dagegen war PSE nicht darauf angelegt, die Erfüllung von Genehmigungsvoraussetzungen nachzuweisen. Wesentliche Vorarbeiten für PSE im Bereich der oberirdischen technischen Anlagen wurden innerhalb der Systemstudie "Radioaktive Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland" (SRA) geleistet. Die Anwendung der Fehlerbaumanalysen auf Entsorgungsanlagen und deren numerische Behandlung wurden hier bereits erprobt.

Für die Nuklid Ausbreitung im Rahmen einer Sicherheitsanalyse des Endlagers im Steinsalz wurde auf Vorarbeiten hauptsächlich in den USA zurückgegriffen. Dies betraf sowohl die Modelle und Rechenprogramme als auch die hydrologischen und geochemischen Daten für risikobestimmende Radionuklide.

Während das PSE sich in der ersten Projektphase mit diversen Einzelheiten von Rechenverfahren, etc. erging, wurden 1980 bei KfK die ersten „Berechnungen und Sensitivitätsbetrachtungen zur Aktivitätsfreisetzung aus einem ersoffenen Endlager für radioaktive Abfälle anhand eines einfachen Störfallmodells“ durchgeführt und publiziert [66]. In dieser Arbeit wurde zum ersten Mal die Konvergenz des Steinsalzes als potentielle Antriebskraft für die Freisetzung von kontaminierten Lösungen aus dem Endlagerbergwerk in einer Steinsalzformation definiert.

6.6 Eignungsanalyse Konrad

Von der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, den Stahlwerken Peine und Salzgitter und dem Kernforschungszentrum Karlsruhe wurde in einem vom Bundesministerium für Forschung und Technologie geförderten Forschungsvorhaben untersucht, ob das stillgelegte Eisenerzbergwerk Konrad für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen aus dem Betrieb von Kernkraftwerken, aus der Stilllegung von Kernkraftwerken, aus Großforschungszentren, Landessammelstellen und der Industrie geeignet ist. Die dabei durchgeführten Untersuchungen waren überwiegend Forschungsarbeiten und damit eine Vorstufe zu einem später durchzuführenden Planfeststellungsverfahren. Vom Kernforschungszentrum Karlsruhe wurden kerntechnische Aspekte der Eignungsanalyse bearbeitet:

- Zusammenstellung der anfallenden Abfälle aus Kernkraftwerken, Großforschungszentren, Landessammelstellen und der Industrie im Hinblick auf Mengen und Radionuklid-Inventare,
- Beschreibung der Abfallprodukte sowie die Verpackungen,
- Aspekte der Einlagerungstechnik,
- Strahlenschutz
- Störfallanalysen.

Das Institut für Nukleare Entsorgungstechnik des Kernforschungszentrums Karlsruhe publizierte die Zusammenfassung der Ergebnisse der im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten [67]. Zahlreiche Einzelergebnisse sind in den Arbeitsberichten enthalten, die von den an dem Vorhaben beteiligten Mitarbeitern im Laufe ihrer Tätigkeit erstellt worden sind. Die vollständige Eignungsanalyse findet sich im gemeinsamen Bericht der beteiligten Partner [68]. Große Teile dieser Eignungsanalyse finden sich in den Unterlagen zur Planfeststellung wieder [69].

Es sei besonders darauf hingewiesen, dass bestimmte Einzelunterlagen, wie z.B. die Störfallanalyse mit dem Titel „Untersuchung der Radionuklid Ausbreitung als Folge eines angenommenen Wasserzutritts zu den Abfällen im Eisenerzbergwerk Konrad“ [70] einer kritischen Analyse durch die Gegner des Projekts unterzogen wurde.

6.7 1-zu-1-Gebinde-Experimente

Die Auslaugbeständigkeit wurde allgemein als Hauptkriterium für die Bewertung der Qualität von verfestigten radioaktiven Abfällen betrachtet. Wesentliche Eigenschaften von zementierten radioaktiven Abfällen werden durch den Herstellungsprozess beeinflusst. Dem Zusammenhang zwischen Herstellungsverfahren und Auslagverhalten wurde seit den 1970er Jahren für den Fall eines Lösungszutritts in die Schachanlage Asse II sowohl in den Forschungseinrichtungen als auch von Seiten der Genehmigungsbehörden nachgegangen. Untersuchungen zur Ermittlung der Produkteigenschaften von Beton bzw. Zementprodukten waren Bestandteil der bergamtlichen Genehmigung zur Einlagerung schwachradioaktiver Abfälle in die Schachanlage Asse II [71].

Im Jahr 1978 wurde auf Veranlassung des Sachverständigenkreises „Behandlung und Beseitigung radioaktiver Abfälle“ des damaligen Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) ein „Arbeitskreis LAW/MAW-Produkte“ gebildet, in dem Vorschläge zur Produktcharakterisierung und zu Produktkontrollverfahren der zementierten Abfälle erarbeitet werden sollten [72]. Im gleichen Jahr organisierte das damalige Kernforschungszentrum Karlsruhe ein Seminar über "Zement- bzw. Betoneigenschaften unter Bedingungen im Endlager für radioaktive Abfälle Asse II". Das Ziel der Veranstaltung war die "Wichtung und Komplettierung der korrosionsbestimmenden Eigenschaften von Zementen und Betonen in Salzlaugen, wie Zementsorte, Wasser/Zement-(W/Z)-Verhältnis, Verdichtungsgrad, Alter des Zementsteins, Verflüssigerzusatz, Beladung mit Zuschlagstoffen (Sand, Ton, Bentonit), Beladung mit Zuschlägen (Trass, Schlacke), Beladung mit Salzen, Zusatz von Dichtungsmitteln; daraus die Ableitung von Empfehlungen für geeignete und ungeeignete Zementsorten, Zuschläge und Verarbeitungsmethoden". Mitarbeiter des Oberbergamts Clausthal und des Bergamts Goslar nahmen an der Veranstaltung teil. Vertreter der Zement- und Tiefbohrindustrie sowie der Universität und des Kernforschungszentrums Karlsruhe hielten Vorträge zu folgenden Themen:

- Zementkorrosion in Salzlaugen, korrosionssensitive Eigenschaften und Korrelation mit der Festigkeit von Beton und Sulfat-beständigen Zementen in NaCl-, MgCl₂-, MgSO₄-Lösungen
- Einflüsse von NaCl- bzw. Bentonitzusatz auf die Eigenschaften von Tiefbohrzementen,
- Erfahrungen beim Verpressen von Zementen, speziell bei Magnesiacement im Kalibergbau,
- Experimente zur Zementauswahl für Abfallsalze und Auslagversuche mit abfallbeladenen Zementproben, sowie Schnelltestverfahren für Zemente,
- Verdichtungsmethoden für abfallbeladene Zementsuspensionen unter den Bedingungen in abgeschirmten Zellen.

Ein Ergebnis dieses Seminars war die Definition eines weitergehenden Versuchsprogrammes zu Auslaug- und Korrosionsexperimenten. In diesem Zusammenhang stellte sich die Frage, ob sich die Eigenschaften von Laborproben auf reale Gebinde übertragen lassen und wie sich der Einfluss des technischen Zementierungsprozesses auf die Eigenschaften (insbesondere die Auslaugbeständigkeit) auswirkt. Im Falle zementierter, radioaktiver Abfälle beeinflusst die Porenstruktur das Auslaug- und Korrosionsverhalten

der Produkte und damit die Radionuklidrückhaltung [73, 74]. Um das Verhalten von Laborproben auf reale Gebinde übertragen zu können und den Einfluss des technischen Zementierungsprozesses auf die Eigenschaften der Abfälle zu untersuchen, wurden seit 1978 Auslaugexperimente im realen Maßstab in der Schachanlage Asse II durchgeführt. Hierzu zementierte man ein inaktives Simulat, das der typischen Zusammensetzung von mittelradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Kernbrennstoffe mittels des Purex-Prozesses entsprach. Die Zusammensetzung und Eigenschaften der Konzentrate sind in [74] publiziert. Der Hauptbestandteil der Konzentrate war Natriumnitrat. Die Zementprodukte wurden so hergestellt, dass das resultierende Produkt eine Salzbeladung von etwa 10 Gew.-% NaNO_3 aufwies. Zur Untersuchung des Auslaugverhaltens von Radionukliden wurde das Abfallsimulat in einigen Gebinden vor dem Zementieren mit Cäsium, Neptunium oder Uran dotiert.

Die Zielsetzungen des von 1978 bis 2013 laufenden Untersuchungsprogramms umfassten folgende Fragen:

- Beständigkeit der zementierten Abfälle.
- Übertragbarkeit der Daten von kleinskaligen und von Hand gemischten Laborproben auf reale Gebinde.
- Einfluss des Herstellungsprozesses insbesondere des W/Z-Verhältnisses auf die Porenstruktur, das Auslaug- und Korrosionsverhalten sowie die Radionuklidrückhaltung.
- Radionuklidrückhaltung.
- Geochemische Entwicklung der Lösungen in Kontakt mit den Zementprodukten.
- Kinetik der Korrosionsprozesse.

Folgende Aussagen konnten aus den Experimenten abgeleitet werden (Kienzler 2016):

- Die Beständigkeit der zementierten Abfälle hängt von ihrer Porosität sowie von der Art der angreifenden Lösung ab, wobei MgCl_2 -Lösung deutlich korrosiver als NaCl -Lösung ist (siehe Abb. 10)
- Der Herstellungsprozess beeinflusst die Eigenschaften der Zementprodukte hauptsächlich durch das verwendete Wasser-zu-Zement-Verhältnis, welches die Porosität der Zementprodukte bestimmt.
- Uran(VI) wird in feste Mineralphasen eingebaut und die Urankonzentrationen in den angreifenden Lösungen sind durch die Löslichkeit der festen Phasen Diuranat bzw. Uranophan bestimmt.
- Die Neptuniumkonzentration wird durch Sorption an den mehr oder weniger korrodierten Zementphasen bestimmt.
- Die geochemisch berechneten pH-Werte und Lösungskonzentrationen zeigten eine hervorragende Übereinstimmung mit den Messwerten.



a) Probekörper #35 nach 25.3 Jahren Auslaugung in NaCl-Lösung b) Probekörper #36 nach 23.3 Jahren Auslaugung in MgCl₂-Lösung

Abb. 10 Blick von oben in die Auslaugbehälter mit korrodierten simulierten zementierten Verdampferkonzentrate nach ca. 25 Jahren Korrosion und Auslaugung in NaCl-Lösung (a) und in MgCl₂-reicher Lösung (b).

7 Forschungsarbeiten im Rahmen von PWA (1970 - 1990)

Seit 1960 wurden im Kernforschungszentrum im Institut für Heiße Chemie (IHCh) Forschungsarbeiten zur Wiederaufarbeitung von abgebrannten Kernbrennstoffen durchgeführt [75-77]. Schon im Jahr 1964 erstellte ein Firmenkonsortium „Ingenieurgesellschaft Kernverfahrenstechnik (IGK)“, bestehend aus Leybold Hoch-Vakuum Anlagen GmbH, Lurgi Gesellschaft für Chemietechnik GmbH, und Friedrich Uhde GmbH, im Auftrag des Bundesministeriums für wissenschaftliche Forschung, Bad Godesberg einen „Entwurf für eine Wiederaufbereitungsanlage für bestrahlte Brennstoffe“ [78] im industriellen Maßstab. Als Vorstufe zu einer kommerziellen Wiederaufbereitungsanlage konzipierte die GfK zusammen mit der späteren Betreibergesellschaft Gesellschaft zur Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen (GWK) und dem IGK Konsortium die Pilotanlage Wiederaufbereitungsanlage Karlsruhe (WAK) mit dem Ziel, Untersuchungen zur sicheren Betriebsführung des Wiederaufbereitungsprozesses (PUREX) durchzuführen, die chemischen und technischen Prozesse der Wiederaufarbeitung zu optimieren und eine industrielle Nutzung dieser Technik zu etablieren [79]. Die WAK nahm 1971 den heißen Betrieb auf. Nach einer Referenzkampagne erfolgte 1973 die Übergabe der WAK von der GfK an die Betreibergesellschaft GWK. Auf Grund der Menge und Radioaktivität der zu erwartenden Abfälle rückten bereits in den 1960er Jahren Forschungsarbeiten zur Konditionierung und Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in den Fokus.

Das Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung (PWA) wurde 1974 als internes Projekt der Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe gegründet. Allerdings wurden schon seit 1960 im Rahmen von Institutsarbeiten, die auch zeitweilig als Schwerpunktprogramme koordiniert wurden, in der GfK einschlägige Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zur Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung von Leichtwasserreaktorbrennstoffen sowie Schnellbrüterbrennstoffen ausgeführt [32]. Die Abfallkonditionierung durch verschiedene Verfahren war ein unabdingbarer Bestandteil dieser Arbeiten. Im Rahmen des ersten Statusberichtes des Projektes Wiederaufbereitung und Abfallbehandlung, bei welchem auch der zuständige Bundesminister Matthöfer (BMFT) anwesend war, gab es unter anderem Vorträge zu „Arbeiten zur Behandlung radioaktiver Abfälle aus Wiederaufbereitungsanlagen“ (Krause) und zur „Verfestigung hochaktiver Abfälle“ (Scheffler) [80]. Die Arbeiten im Rahmen von PWA stehen jedoch in engem Zusammenhang mit den F&E-Arbeiten zur Endlagerung, so dass sie im Folgenden kurz dargestellt werden.

7.1 Konditionierung von Abfällen

Seit Beginn der Behandlung radioaktiver Abfälle waren geeignete Konditionierungsverfahren für unterschiedliche Abfallarten wesentliche Forschungsvorhaben. Diese beinhalteten Maßnahmen zur Volumenreduktion (Verbrennen und Verpressen) sowie zur Überführung von flüssigen Abfällen in feste Abfallprodukte. Im Folgenden sind einige der untersuchten Verfahren zusammengestellt.

7.1.1 Zementierung

Zahlreiche Untersuchungen an zementierten simulierten und realen schwach- und mittelaktiven Zementprodukten wurden seit Anfang der siebziger Jahre durchgeführt. Die Arbeiten zielten auf die Herstellung der Abfallprodukte für verschiedene Rohabfälle und das Abbindeverhalten. Die endlagerrelevante Charakterisierung der Zementprodukte beinhaltete neben deren Auslaug- und Korrosionsverhalten in verschiedenen Salzlösungen auch die Radionuklidfreisetzung. Es zeigte sich, dass Cäsium schlecht in den Zementprodukt-Salzlösungssystemen zurückgehalten wurde. Zur Verbesserung der Rückhalteigenschaften wurden verschiedene Zementarten, wie Portlandzement oder Hochofenzement, oder Beimischungen verschiedener anorganischer Stoffe (Ton, Bentonit, Attapulgit) getestet. Die Druckfestigkeit und die Feinstaubbildung bei mechanischer Belastung (Absturz) wurde ebenfalls ermittelt.

Insgesamt finden sich in der Publikationsdatenbank des KIT (Campus Nord) etwa 100 Referenzen mit dem Stichwort Zement. Weitere 50 unveröffentlichte Berichte wurden für verschiedene Zwecke erstellt.

7.1.2 Bituminierung

Bereits im Jahr 1964 wurden Versuche zum chargenweisen Bituminieren von radioaktiven Abfällen am KfK durchgeführt [81]. Zwar war das Anfangsbetriebsverhalten zufriedenstellend, doch gab es Schwierigkeiten nach längerem Betrieb. Die Experimente wurden mit simulierten Verdampferkonzentrat-Lösungen durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse der in den Jahren 1967-1977 durchgeführten F+E-Arbeiten zur Fixierung radioaktiver Abfallkonzentrate in Bitumen und zur Charakterisierung der hergestellten Produkte zusammengefasst und 1980 publiziert [82]. Hierzu gehörten auch Betriebserfahrungen, wie sie im Kernforschungszentrum Karlsruhe bei der Bituminierung von schwach- und mittelaktiven Verdampferkonzentraten gesammelt wurden.

Zwar zeichneten sich bituminierte Abfallprodukte durch eine deutlich höhere Abfallbeladung (bis zu 40 - 50 Gew.% NaNO_3) aus im Vergleich zu zementierten Produkten, die maximal mit 10 Gew.% NaNO_3 beladen werden können. Allerdings ist Bitumen brennbar, was zu Problemen bei der Herstellung führen kann: 1974 ereignete sich in der Abfüllzelle der Bitumenanlage eine Verpuffung mit einem anschließenden Brand. Beim Abfüllen wurde bereits in der Nacht ein starkes Gasen des Bitumenendproduktes festgestellt. Da dieses jedoch häufiger vorkam und in der Regel auf Wasserdampfeinschlüsse im Bitumen zurückzuführen war, wurde lediglich die Einspeisung des Konzentrates reduziert. Am folgenden Morgen wurde ein bräunlich-gelber Rauch in der Abfüllzelle festgestellt. Kurz darauf kam es zu einer Verpuffung in der Zelle, als deren Folge die beiden zuletzt befüllten Fässer zu brennen begannen [83]. Als wahrscheinliche Ursache dieses Störfalles wurde der unbemerkte Ausfall des Rührwerkes in einem Vorlagebehälter identifiziert. Die Brennbarkeit der bituminierten Abfallprodukte führte letztlich dazu, dass das Risiko bei der Zwischenlagerung dieser Produkte als relativ hoch eingeschätzt wurde (z.B. Brand nach Flugzeugabsturz). Daher wurde dieses Konditionierungsverfahren im KfK aufgegeben.

7.1.3 Verglasung

Arbeiten zur Verglasung von hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung wurden bereits 1967 aufgenommen. Im Jahresbericht 1968 [20] findet sich eine Darstellung der bis zu diesem Zeitpunkt durchgeführten Arbeiten. Diese erstreckten sich über folgende Aspekte:

- Glasschmelzversuche
- Aktivitätsverluste bei der Glasschmelze
- Auslaug- und Korrosionsuntersuchungen
- Strahleneinwirkung auf das Glas
- Versuche in der Laboratoriumsglasschmelzanlage
- Planung der Pilot-Anlage

Es wurden eine Reihe von Schmelzverfahren entwickelt.

VERA

Im Jahresbericht von 1970 der Abteilung Dekontaminationsbetriebe wird die Mehrzweck-Versuchsanlage für die Verfestigung von hochradioaktiven Abfalllösungen (VERA) erwähnt [84]. Die Arbeiten zum Bau wurden in 1971 aufgrund des Beschlusses zur Zusammenlegung dieser Anlage mit der geplanten Betriebsanlage an der WAK eingestellt. An Stelle der beiden Einrichtungen sollte die Anlage VERA 2 auf dem Gelände der WAK errichtet werden, die gleichzeitig als Versuchseinrichtung zur Weiterentwicklung von Verfestigungs-Verfahren und zur betriebsmäßigen Verfestigung des HAW der WAK dienen sollte. Die Verglasungsanlage VERA 2 ist im Jahresbericht 1972 der Abteilung Dekontaminationsbetriebe im Detail beschrieben [85].

Diese inaktive Pilot-Anlage zur Verfestigung hochaktiver Spaltproduktabfalllösungen bestand aus einer Denitrierstufe und einem Kalzinator (Betriebstemperatur max. 450 °C), in welchem die simulierte HAW-Lösung mit suspendierten Glasbildnern zu einem Kalzinat umgesetzt wurde.

An den Austrag der Kalzinatoreinheit war die mit Mittelfrequenzinduktion geheizte Glasschmelzstufe bestehend aus drei Induktionsspulen angeflanscht, wobei die erste Spule den eigentlichen Glasschmelztiegel heizte, die zwei kleinen Induktionsspulen dienten zur Heizung des Glasablaufstutzens des Tiegels.

Der Schmelztiegel bestand aus INCONEL 600 und erreichte im allgemeinen Standzeiten von über 1000 Betriebsstunden. Besonders korrosionsgefährdet war die Tiegelwand an der Grenzfläche Schmelz-Abgasatmosphäre und bei Anwesenheit von Sulfationen in der Schmelze

PAMELA

Das 2-stufige Verfahren der VERA wurde aufgegeben und durch das einstufige Verfahren ersetzt, bei welchem die Spaltproduktlösung in einem Schmelzofen gleichzeitig eingedampft, denitriert, getrocknet, kalziniert und mit einer Glasfritte zu einem homogenen Borosilikat-Glas verschmolzen wird. Das Glas wird in einem elektrisch direkt beheizten keramischen Glasschmelzofen hergestellt, in den die HAW-Lösung flüssig eingespeist wird. Die Schmelzbadwände bestehen aus Hochtemperaturkeramik, die Platten-Elektroden, die in die Glasschmelze hineinragen, bestehen aus Inconel 690. Dieses Verfahren erforderte eine bestimmte elektrische Leitfähigkeit der Glasschmelze und eine bestimmte Viskosität, um die Heizleistung in die Glasschmelze einzutragen und später das Glasprodukt aus dem Schmelzofen

kontrolliert abzulassen. Das Verfahren wurde erstmals im heißen Betrieb in der PAMELA Anlage zur Verglasung hochradioaktiver Abfalllösungen in Mol/Belgien angewandt [86]. Die Anlage war ab 1985 in Betrieb und verarbeitete dort ca. 50 m³ LEWC -(low Enriched Waste Concentrate) und 800 m³ HEWC-(High Enriched Waste Concentrate)-Abfalllösung.

Es ist anzumerken, dass der Name PAMELA ursprünglich von einem anderen Verglasungsverfahren auf der Basis von Phosphatgläsern abgeleitet wurde. Gläser auf Phosphatbasis zeichnen sich durch vergleichsweise niedrige Schmelztemperaturen, hohe Aufnahmefähigkeit für Spaltprodukttoxide, insbesondere für größere Konzentrationen an Sulfat- und Molybdat-Ionen, ohne ein Auftreten von Phasenausscheidungen aus. Andererseits ist ihre Herstellung mit einer starken Werkstoffkorrosion verbunden (Korrosivität der Schmelze gegenüber dem Tiegelmateriale). Sie neigen zur Entglasung (Kristallisation) und weisen insbesondere bei höheren Temperaturen eine schlechte Auslaugresistenz auf [87].

Die Arbeiten zur Entwicklung und Optimierung von Verglasungsanlagen mit direkt beheiztem keramischem Schmelzöfen wurden bis 2015 im INE fortgesetzt, wobei erfolgreich die HAW-Lösung der WAK in ein Borosilikatglas überführt wurde (VEK) und eine angepasste Anlage über ein Industriekonsortium nach China geliefert wurde (VPC).

7.1.4 Keramikentwicklung

Ende der 1970er Jahre wurden in verschiedenen Ländern keramische Materialien entwickelt, welche bessere hydrolytische Beständigkeit als HAW-Gläser aufweisen sollten. Das bekannteste war das von Ringwood entwickelte SYNROCK Verfahren, welches auf dem Titanat-Phasengemisch Ba-Hollandit ($\text{BaAl}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$), Perovskit (CaTiO_3) und Zirconolit ($\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$) beruhte [88]. Das Ziel der F&E-Arbeiten zur Keramikentwicklung im Zeitraum von 1977 bis 1991 im INE verfolgte eine andere Keramiklinie: Die Immobilisierung von actinidenhaltigen Abfällen in einer aluminiumsilikatischen keramische Matrix. Das Verfahren wurde zunächst im Labormaßstab entwickelt und die Produkte untersucht. Die Ermittlung von Eingangsdaten für das zugehörige Verfahren im (halb)technischen Maßstab war ebenfalls Bestandteil dieser Arbeiten.

Actinidenhaltige Abfälle, für welche eine „Keramisierung“ erwogen wurde fallen an im Rahmen der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Kernbrennstoffen und der Fertigung von MOX-Brennelementen. Nach dem damaligen Konzept der DWK war hierfür Zement als Verfestigungsmatrix vor-gesehen.

Für die Herstellung von keramischen Abfallprodukten lassen sich im Prinzip die gleichen Verfahrensschritte und keramischen Rohmaterialien verwenden wie in der industriellen Porzellanproduktion. Die keramischen Rohmaterialien Kaolin, Bentonit und reaktiver Korund sind preiswert und kommerziell erhältlich. Das Grundprinzip der Herstellung keramischer Abfallprodukte basiert darauf, dass die Abfälle in Form von Pulvern oder Suspensionen (vorbehandelte Abfalllösungen) den Keramikbildnern zugegeben werden, gefolgt von einem Homogenisierungs-, Formgebungs- und Wärmebehandlungsschritt bei maximal 1250 -1330°C. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens ist in [89] gegeben.

Im Rahmen dieser Arbeiten wurden

- Phasenbestand der gesinterten TRU-Abfallkeramikprodukte,
- Auslaugbeständigkeit,
- Dichte, offene Porosität, Druckfestigkeit und
- Strahlenbeständigkeit

untersucht. Es konnte experimentell nachgewiesen werden, dass aluminiumsilikatische keramische Matrices in der Lage waren, unterschiedliche transuranelement- und spaltproduktthaltige Abfälle aufzunehmen und die Radionuklide effektiv zu immobilisieren. Keramikprodukte mit Abfallbeladungen von 20 bis zu 60 Gew. % (TRU-Asche) waren im Labormaßstab möglich. Es konnten formstabile, makroskopisch rissfreie Keramiken nach den Verfahrensschritten "Abfallvorbehandlung", "Homogenisieren und Formgeben" und "Sintern" bei 1250 - 1320°C und 15 Minuten Haltezeit hergestellt werden.

Der Vorteil der Keramiken gegenüber der Einbindung dieser Abfälle in Zement lag neben der besseren Auslaug- und Korrosionsresistenz vor allem in dem um mehr als einen Faktor 10 geringeren Volumen des Abfallprodukts. Weiterhin traten bei der Keramisierung von Auflöserückständen Probleme durch die Sedimentation von Edelmetallen und die begrenzte Aufnahmefähigkeit für Molybdän nicht auf.

Auslaugtests nach dem IAEA-Vorschlag [90] an transuranelementhaltigen Keramiken in $MgCl_2$ -reicher Lösung ergaben nach einer Gesamtauslaugzeit von ca. einem Jahr Auslaugraten zwischen 5×10^{-3} und 1×10^{-4} g/m²d bezogen auf die Transuran-Elemente. Die Korrosionsraten der inaktiven Keramiken mit simuliertem Mischabfall nach der Soxhlet-Methode (DIW, 100°C) lagen bei 0,5 g/m²d nach einer Testdauer von 14 Tagen.

Strahlenschäden an der keramischen Matrix, verursacht durch eine α -Dosis bis 8×10^9 Gy (Dotierung mit 20 Gew. % ²³⁸PuO₂) konnten weder durch keramographische Untersuchungen, durch DTA, noch durch Auslaugtests nachgewiesen werden.

Die aluminiumsilikatischen keramischen Abfallprodukte zeigten eine deutlich höhere hydrolytische Beständigkeit im Vergleich zu Glas- oder Zementprodukten.

Anlagen zur Herstellung von inaktiven aluminiumsilikatischen Keramiken im technischen Maßstab zum Einsatz in der konventionellen Keramikindustrie sind Stand der Technik und ausgereift. Ihre Anpassung an Alphaboxen- und Fernbedienungstechnik wurde im Prinzip gezeigt [91]. Das Vorhaben wurde nach der Entscheidung der deutschen Industrie, auf eine eigene Wiederaufarbeitungsanlage zu verzichten, eingestellt.

7.1.5 Andere Verfahren

Thermitverfahren

In 1968 publizierte eine russische und eine amerikanische Arbeitsgruppe Verfahren um radioaktive Abfälle mittels einer Thermitreaktion in eine keramische Masse zu überführen, die ein besseres Auslaugverhalten als Glas haben sollten. Dieses Verfahren wurde aufgegriffen und eigene Entwicklungsarbeiten durchgeführt [92, 93].

Das im Labormaßstab entwickelte Thermitverfahren zur Verfestigung hochaktiver Spaltproduktlösungen bildete in der Variante der Mangandioxid-Aluminium-Thermitreaktion eine Alternative zur Einschmelzung in Glas. In einigen wichtigen Eigenschaften (wie Erweichungspunkt, Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Auslaugrate) war das Thermitprodukt dem Glas deutlich überlegen. Darüber hinaus wurde hervorgehoben, dass die langwierige Abkühlung, wie beim Glas, nicht erforderlich sei.

Nassveraschung

Ebenfalls ein Verfahren, das zur Erhöhung der Endlagersicherheit entwickelt wurde, war die Nassveraschung brennbarer plutoniumhaltiger Festabfälle [94]. Der Prozess der Nassveraschung beruhte auf der oxidativen Zersetzung des organischen Abfalls (PVC, Neopren, Polyäthylen und Zellstoff) mittels konzentrierter Schwefel- und Salpetersäure bei einer Temperatur von 250°C. Dabei wurden die Materialien – formal gesehen – zuerst durch die Schwefelsäure verkohlt und anschließend durch die Salpetersäure oxidiert. Unter diesen Bedingungen wurde Plutoniumoxid innerhalb von ca. 8 Stunden ohne Zugabe weiterer Hilfsstoffe in das leicht lösliche Plutoniumsulfat umgesetzt. Der gesamte Prozess war endotherm. Es entstanden gasförmige und feste Reaktionsprodukte: SO₂, NO und HCl (aus der Zersetzung von PVC und Neopren) und wurden zusammen mit den anderen gasförmigen Oxidationsprodukten aus dem Reaktor ausgetragen. Die aktive Demonstration des Verfahrens wurde bei der Eurochimic-Anlage in Mol/Belgien durchgeführt. Mit der Nassveraschung von rund 800 kg Abfall konnten 6,3 kg Plutonium zurückgewonnen werden.

Reduzierung der Abfallarten und -volumina

Im Hinblick auf die geplante Wiederaufarbeitung von kurzgeköhlten Brennelementen aus schnellen Brutreaktoren wurden F&E-Arbeiten zur Entwicklung eines fortgeschrittenen Behandlungskonzepts für Abfälle aus den Brennstoffkreislauf vorangetrieben. Dieses basierte auf der Zusammenfassung der Abfallströme, die die Konzentrierung nahezu der gesamten Radionuklide in einem einzigen Abfallstrom zum Ziel hatte und damit eine Reduzierung der Vielzahl der verschiedenen Abfallformen und die Verringerung der Abfallvolumina erreichen könnte. Es sollten die für Wärmeentwicklung, Dosisleistung und Alphaaktivität verantwortlichen Radionuklide aus den flüssigen Abfallströmen durch einfache Fällungsmethoden abgetrennt und dann zusammen mit den hochradioaktiven Abfällen in den qualitativ hochwertigen Matrices Glas oder Keramik verfestigt werden. Die Hauptmenge des Abfalls, der in Zement oder Bitumen verfestigt werden sollte, wäre dann schwachaktiv und enthielte nur kurzlebige Nuklide [95]. Die erzielten Ergebnisse waren jedoch obsolet, als auf den Bau einer deutschen Wiederaufarbeitungsanlage im Jahr 1989 verzichtet wurde.

7.2 Tritiumverpressung (Lh 2-Projekt)

H. Krause und H. Hepp, Abteilung Strahlenschutz und Dekontamination der GfK, legten 1968 eine „Übersicht über Möglichkeiten zur Beseitigung von tritiumhaltigem Abwasser“ vor, die folgende Möglichkeiten bewertete [96]:

- Verfestigung tritiumhaltiger Abwässer durch Fixierung an Zement bzw. an wasserbindenden oder saugfähigen Materialien.
- Anreicherung durch Destillation

- Beseitigung der verfestigten Tritiumabfälle durch Einlagerung im Salzbergwerk bzw. durch Vergraben im Boden oder Versenken in das Meer
- Einbringung nichtfixierter tritiumhaltiger Abwässer in das Meer
- Verdampfung in die Luft
- Elektrolyse
- Einpressen in poröse Gesteine des tiefen Untergrundes

Nach der im Jahr 1979 verabschiedeten Berechnungsgrundlage für radioaktiven Ableitungen mit der Abluft oder in Oberflächengewässer [97] konnten die tritiumhaltigen Abwässer des Kernforschungszentrums über einen knapp 3 km langen Rohrkanal in einen als Vorfluter dienenden Altrheinarm abgegeben werden. Die Abwässer wurden in diesem Vorfluter über eine Strecke von ca. 24 km mit Oberflächenwasser gemischt bis sie den Rhein erreichten. Beispielsweise wurden im Jahr 1984 insgesamt 10^8 MBq Tritium in Form von tritiiertem Wasser (HTO) zusammen mit 3×10^5 m³ Abwasser in den Rhein abgegeben [98].

Für die großen Volumina von Tritiumwasser aus den geplanten Wiederaufarbeitungsanlagen war man jedoch auf der Suche nach geeigneten Endlageroptionen. Die Einlagerung tritiumhaltiger Wässer in das Salzbergwerk Asse II war auf Grund der geringen zulässigen Konzentrationen in den Abfällen (10 mCi/200-Liter Fass) nicht möglich.

Das Einpressen tritiumhaltiger Abwässer in poröse Gesteine des tiefen Untergrundes erschien als geeignete Methode. F&E-Arbeiten wurden durchgeführt mit dem Ziel, diese Abwässer durch Einpressen in poröse Schichten des tiefen Untergrundes zu entsorgen. Eine erschöpfte Erdöllagerstätte im Erdölfeld Leopoldshafen erschien geeignet zur Einbringung dieser Wässer. Ausführliche Details zu diesen Arbeiten finden sich in einem Konferenzbeitrag [99], im Jahresbericht 1972 der Abteilung Dekontaminationsbetriebe [85] und eine Zusammenfassung der Arbeiten ist im Jahresbericht 1972 zur Endlagerung radioaktiver Abfälle gegeben [100].

Bei dieser Lagerstätte handelte es sich um eine isolierte Öllinse im Cyrenenmergel im Teufenbereich von 934 bis 945 m, aus der bis zur Einstellung der Ölförderung ca. 23000 m³ „Nass Öl“ gefördert wurden. Nach Beantragung und Erteilung einer Teilgenehmigung durch die zuständige Bergbehörde wurde das für die Versenkungsversuche ausgewählte Bohrloch Lh2 gemäß den im Betriebsplan festgelegten technischen Maßnahmen hergerichtet. Als ergänzende Sicherheitsmaßnahme wurde gleichzeitig auch der Zustand der benachbarten Ölförderbohrung Lh 12 kontrolliert, die noch aus einer zweiten rund 300 m unter dem Einpresshorizont liegenden Öllinse Rohöl förderte. Nach Abschluss der bergmännischen Arbeiten wurde ein umfangreiches Messprogramm durchgeführt. Der Lagerstättendruck des Einpresshorizontes betrug 7.7 MPa, was erwarten ließ, dass rund 11000 m³ tritiumhaltige Abwässer versenkt werden könnten, bis der ursprüngliche geologische Lagerstättendruck wieder erreicht wäre. Bei ersten inaktiven Einpressversuchen mit Salzwasser aus der Ölproduktion konnten, bei einem Pumpendruck zwischen 6 und 8 MPa Einpressraten von rund 8.5 m³/h erreicht werden.

Am 19. April 1973 stellte die GfK den Antrag auf wasserrechtliche Genehmigung für die Versenkung tritiumhaltiger Wässer in eine erschöpfte Erdöllagerstätte im Erdölfeld Leopoldshafen an das zuständige Ministerium bzw. an das Landesbergamt Baden-Württemberg in Freiburg. Der Antrag wurde offengelegt und bis 1976 gingen 8 Einsprüche beim Landesbergamt ein, die mit 14 Stellungnahmen, Gutachten und Ergänzungen des Kernforschungszentrums beantwortet wurden. Letztlich wurde

auf möglicherweise noch vorhandenes Öl im Einpresshorizont hingewiesen (Schuchardt mündliche Überlieferung) und mit Schreiben vom 20. August 1981 RA/Dr.No-te von KfK an das Landesbergamt Baden-Württemberg wurde der Antrag auf die Versenkung tritiumhaltiger Abwässer in die Bohrung "Leopoldshafen 2" zurückgezogen.

7.3 In-situ Verfestigung

Das Projekt "LAGERUNG UND VERFESTIGUNG VON MAW/LAW IN UNTERTÄGIGEN HOHLRÄUMEN" basierte auf einer Studie von Battelle [101], dem Konzept des Integrierten Entsorgungszentrums (siehe Kap. 6.5) und den Erfahrungen aus dem Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM), das im Kali- und Steinsalzbergwerk Bartensleben in der DDR seit 1971 in Betrieb war [102].

An dem sogenannten „in-situ Projekt“ beteiligten sich Forschungsorganisationen und Industriefirmen (Amtliche Material Prüfanstalt für Steine und Erden, Clausthal-Zellerfeld, Fa. F.J. Gattys Verfahrenstechnik GmbH, GSF, KfK, Gelsenberg AG, und die NUKEM GmbH). Im 1. Zwischenbericht 1978 von R. Köster, R. Kraemer und R. Kroebel wurden die Ziele des Projekts zusammengestellt [103].

Die Aufgabenstellung der 1. Projektphase bestand darin, den prinzipiellen Nachweis der technischen Durchführbarkeit und Genehmigungsfähigkeit für eine behälterlose Einlagerung von radioaktiven Abfall-Binder-Suspensionen zu erbringen. Diese Suspensionen aus Abfall-Zement bzw. aus vorfixiertem Abfallgranulat mit Zement sollten in untertägigen Hohlräumen in Salzformationen eingebracht werden und sich dort verfestigen.

Das vorgeschlagene Konzept stellte eine Alternative zur praktizierten Fasseinlagerung in der Versuchsendlagerstätte ASSE II für schwach- und mittelaktive Abfälle dar. Die Motivation für das vorgeschlagene behälterlose Einlagerungskonzept ergab sich aus der örtlichen Konzentration der Abfallproduzenten und des Endlagers innerhalb des geplanten deutschen Entsorgungszentrums, wo die Notwendigkeit von Abfalltransporten über öffentliche Verkehrswege in den entsprechenden Transportbehältern nicht notwendig war. Das vorgeschlagene Konzept versprach sicherheitstechnische, betriebstechnische und auch wirtschaftliche Vorteile gegenüber der konventionellen Fasseinlagerung:

- a. Bewältigung von großen Abfallmengen aus dem NEZ.
- b. Geringe Anzahl von Verfahrensschritten durch Wegfall von Verpackung und Reduzierung der Dosisbelastung des Betriebspersonals.
- c. Vollständiger Versatz des Hohlraumes (Kaverne) und somit langfristig die geringste Störung des ursprünglichen Gebirgszustandes.
- d. Hoher Nutzungsgrad.
- e. Minimierung der Herstellungs- und Anlagekosten.
- f. Eine einzige Verbindung mit vergleichsweise kleinem Querschnitt zur Biosphäre.
- g. Entwicklungspotential um auch andere Abfallstoffe (z.B. T-Abwässer, Ionentauscherharze, Aschen u.a.m.) zu beseitigen.
- h. Integration in das begehbare Endlager (HAW-Behältern und sonstige Abfallbehälter)

Bereits im Jahre 1975 wurde von KfK (damals GfK), GSF und AMPA ein F+E-Programmorschlag eingereicht, der sich im Wesentlichen auf stoffliche und geologisch-gebirgsmechanische Untersuchungen der

in-situ-Verfestigung beschränkte. Der BMFT-Sachverständigenkreis "Behandlung und Beseitigung radioaktiver Abfälle" erweiterte das Programm wesentlich auf den Gebieten Verfahrenstechnik und Förder-technik. Daraufhin wurde unter Federführung der Fa. KEWA von AMPA, KfK, GSF, der Fa. NUKEM und anderen in 1976 ein detailliertes Arbeitsprogramm erstellt. Die Fa. KEWA beendete ihre Mitarbeit an diesem Projekt, worauf zunächst eine Verzögerung der Arbeiten eintrat. Die Projektleitung wurde dann dem PWA (KfK) übertragen. Insgesamt wurden 11 mögliche Varianten in drei Referenzsystemen entwickelt mit Fragenstellungen aus den Bereichen:

- der stofflichen Eigenschaften des einzulagernden Abfall-Binder-Gemisches bzw. Abfallgranulates und des verfestigten Produktes,
- der gebirgsmechanischen Sicherheit,
- der Wärme- und Radiolysegas-Entwicklung und
- der verfahrenstechnischen Probleme wie Fördern, Dosieren und Mischen sowie Abgasführung.

Auf dieser Basis wurde die 2. Projektphase bis Ende 1980 definiert mit folgender Zielstellung:

- a. Eindeutige Aussage über die technische Durchführbarkeit des Projektes
- b. Bereitstellung ausreichender Unterlagen für ein sicherheitstechnisches Konzeptgutachten.
- c. Erste Kostenschätzungen für Investitionen und den Einlagerungsbetrieb nach dem projektierten Verfahren.
- d. Detaillierung der nachfolgenden Projektphasen einschließlich der erforderlichen projektbegleitenden F+E-Arbeiten für eine prototypische Anlage.

Unabhängig von der spezifischen Fragestellung nach der technischen Durchführbarkeit und Genehmigungsfähigkeit einer behälterlosen Einlagerungstechnik waren die stofflichen Untersuchungen von allgemeinerem Interesse. Die Ergebnisse betrafen die Eignung von anorganischen Bindern als Endlagermatrix für schwach- und mittelaktive Rohabfälle einschließlich tritiumhaltiger Abwässer, die auch für die konventionelle Fasseinlagerung relevant waren.

Das diesem Projekt nach der 2. Phase bescheinigte Entwicklungspotential [104] war Anlass für den Sachverständigenkreis Endlagerung und für die Reaktorsicherheitskommission (Unterausschuss Endlagerung), eine Empfehlung zur Weiterförderung des in-situ Projektes für die dritte und letzte Projektphase auszusprechen, die auch vom BMFT bewilligt wurde. Ein Großversuch im technischen Maßstab zum Einbringen der Abfallgranulat-Binder-Gemische konnte in die Prototyp-Kaverne an der Schachanlage Asse II durchgeführt werden. Leider zeigten diese Versuche, dass das vorgeschlagene drucklose Förderkonzept zur Entmischung der Abfallgranulat-Zementsuspension durch die Schwerkraft führte und somit die Verstopfung des Förderrohres bewirkte.

7.4 Korrosion von Behälterwerkstoffen

Im Jahr 1980 wurden Korrosionsuntersuchungen an metallischen und keramischen Werkstoffen zur Auswahl geeigneter Verpackungsmaterialien für verglaste hochaktive Abfälle (HAW) im INE begonnen. Eine wesentliche Anforderung an die Verpackung war eine Standzeit von einigen 100 Jahren zu gewährleisten. Innerhalb dieser Zeitspanne sollte die maximale Temperatur im Lagerfeld auf Werte unterhalb

100°C abgefallen sein. Ein Screening verschiedener Werkstoffe (Cr-Ni-Stähle, Nickelbasislegierungen, Baustahl sowie die Werkstoffe Ti 99,8 - Pd und der Stahl X1CrMoTi 182 (ELA-Ferrit) wurde vorgenommen und 1981 publiziert [105]. Auch marktgängige, polykristalline Materialien Al_2O_3 , SiC und ZrO_2 wurden untersucht. Bei diesen Werkstoffen wurden die Korngrenzen (glasige Phase aus Verunreinigungen und Sinterhilfsmitteln) angegriffen, was längerfristig eine Abnahme ihrer Festigkeit erwarten ließ. SiC war ebenfalls nicht beständig, da das in das SiC infiltrierte Silizium durch Korrosion herausgelöst wurde [106].

Die systematischen Untersuchungen des Korrosionsverhaltens wurden an den aktiv korrodierenden Baustählen, Ti 99,8 – Pd und Hastelloy C4 bei Temperaturen zwischen 90°C und 200°C luftdicht in Autoklaven durchgeführt. Eine Reihe von Untersuchungen erstreckte sich über die Korrosion unter γ -Strahlung, die Anwesenheit von Sulfid und verschiedene Vorbehandlungen des Materials (Anlieferungszustand, poliert, geschweißt, etc.).

Die Ergebnisse der Experimente unterstützte die Auswahl von aktiv korrodierenden Stählen für die Konstruktion von Behältern wie des POLLUX-Behälters und der Brennstabkockille (BSK 3). Der wesentliche Nachteil der legierten Stähle lag darin, dass diese ihre Korrosionsbeständigkeit durch eine dünne Oxidschicht auf der Oberfläche erhalten. Chlorid-Ionen können diese Oxidschicht durchdringen, zur Bildung von „grünem Rost“ führen und lokale Korrosion (Lochfrass) verursachen. Das Auftreten dieser Prozesse unterlag einer unterschiedlich langen Inkubationszeit, die nicht prognostizierbar war. Lokale Korrosionserscheinungen wurden an den hochlegierten Stählen in Salzlösungen beobachtet. Insgesamt wurden über 100 Arbeiten zu Korrosionsuntersuchungen zwischen 1980 und 2004 veröffentlicht.

7.5 Systemstudie "Radioaktive Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland"

Die Systemstudie „Radioaktive Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland“ wurde im Auftrag des BMFT in den Jahren 1976 bis 1977 erstellt. Die Studie sollte die mit dem Anfall radioaktiver Abfälle verbundene Probleme auf breiter Basis erfassen, um ein dem Abfallaufkommen bis zum Jahr 2000 angepasstes Abfallentsorgungssystem in der Bundesrepublik Deutschland vorzubereiten. An der Bearbeitung waren die Industrie und die Kernforschungszentren, sowie die Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW e. V. beteiligt, wobei die Projektleitung bei der Fa. NUKEM GmbH lag. Die Systemstudie war in mehrere Phasen gegliedert, die zunächst den Anfall an radioaktiven Abfällen und die Entsorgungspraxis, die eingesetzten Technologien und die für die Weiterentwicklung erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erfassen sollten. Es war beabsichtigt das Potential der Methodik in einer probabilistischen Risikoanalyse zu bewerten.

Insgesamt wurden 6 Berichte zu der Systemstudie erstellt:

- SRA 1: Anfall an radioaktiven Abfällen in der Bundesrepublik Deutschland.
- SRA 2: Technologien und Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Beseitigung radioaktiver Abfälle
- SRA 3: Forschungs- und Entwicklungsprogramm für die Beseitigung radioaktiver Abfälle
- SRA4: Das Recht der Beseitigung radioaktiver Abfälle

- SRA 5: Methodik und Anwendung der probabilistischen Risikoanalyse
- SRA 6: Die Entsorgung von radioaktiven Abfällen in der Bundesrepublik Deutschland

Mitarbeiter von KfK waren besonders an den Berichten SRA 1, SRA 2 und SRA 6 beteiligt. Im Band SRA 6 „Die Entsorgung von radioaktiven Abfällen in der Bundesrepublik Deutschland“ [107] sind Beurteilungen für die Entsorgungsstrategien der Kernkraftwerke, der Wiederaufarbeitungsanlage (mit einem Durchsatz von 1400 t Kernbrennstoff pro Jahr) und der sonstigen Brennstoffkreislauf-Industrie und für die außerhalb des Brennstoffkreislaufes anfallenden Abfälle zusammengefasst, sowie Volumina und Kosten abgeschätzt. Vorschläge für die Erfassung der Abfall-Daten und Entsorgung wurden aufgeführt. Im Band SRA 5 [108] ist die *Methodik und Anwendung der probabilistischen Risikoanalyse* im Zusammenhang mit dem Aufbau eines Entsorgungssystems beschrieben.

8 Forschungsarbeiten im INE von 1990 bis heute

Im Jahr 1989 beschloss die deutsche Industrie keine eigene Wiederaufarbeitungsanlage zu bauen. Daher waren einige der vorher wichtigen Forschungsschwerpunkte des INE obsolet geworden. Mit der Übernahme der Institutsleitung durch Prof. Jae Il Kim wurden die F&E-Arbeiten im INE neu geordnet. Es wurde eine flache Organisationsstruktur eingeführt, die F&E-Arbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle verstärkt und die Arbeiten zur Abfallbehandlung, – charakterisierung und zur Verfahrenstechnik beendet bzw. zurückgefahren. Die F&E-Arbeiten des INE wurden als gesellschaftliche Vorsorgeforschung zum nachhaltigen Schutz von Mensch und Natur vor radioaktiven Belastungen durch das Endlager verstanden. Folgende Prämissen waren Grundlage für die weiteren F&E-Arbeiten des INE:

- Tatsache war, dass in Deutschland radioaktive Abfälle vorhanden waren, sich weitere sammeln würden und diese sicher entsorgt werden mussten.
- Fragen zur Sicherheit der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen bzw. abgebrannten Brennelementen über die erforderlichen langen Zeiträume nicht hinreichend beantwortet waren.
- Eine wissenschaftlich fundierte Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern komplexe Zusammenhänge und Wechselwirkungen berücksichtigen mussten.
- Die Komplexität sich nicht nur auf die Geologie, die langlebigen Radionuklide und ihre Interaktionen, die Unsicherheiten bei der Extrapolation von Labordaten auf lange Zeiträume, sondern auch auf die Evolution durch menschliche Einwirkungen erstreckte.
- Die Zeiträume, die bei Langzeitsicherheitsbetrachtungen zu berücksichtigen sind weit über das hinausgehen, was in den Ingenieurwissenschaften üblicherweise betrachtet wird.

Mittlerweile hatte sich im internationalen Sprachgebrauch der Begriff „safety case“ eingebürgert (siehe Anhang J) [109]. Dieser Begriff steht im Sinn einer juristischen Verhandlungssache. Und wird verwendet, um überzeugend darzulegen, dass es einen Satz vernünftiger und belegbarer Argumente gibt, der zeigt, dass das Endlager sicher sein wird. Er beinhaltet auch eine ausführliche und verständliche Erläuterung, wie die Sicherheit erreicht wird, und eine Diskussion der Ungewissheiten, die aus dem begrenzten wissenschaftlichen Verständnis des Systemverhaltens resultieren. Die verstärkte Hinwendung zur Diskussion der Ungewissheiten führte zu wissenschaftlichen Herausforderungen, die es erforderlich machten, neue Konzepte und innovative Lösungsansätze zu entwickeln. Im Jahresbericht 1994 [110] ist das neue Konzept des Instituts folgendermaßen definiert: *Als Grundlagen für wissenschaftlich fundierte Langzeitsicherheitsanalysen wurden Forschungsarbeiten zur Beurteilung der Wirksamkeit des Multibarriersystems eines Endlagers bestehend aus den Abfallprodukt/ingenieurtechnischen Barrieren, geotechnischen Barrieren (Nahbereich) und der geologischen Barriere hinsichtlich der Radionuklidimmobilisierung unter Berücksichtigung von Störfallszenarien durchgeführt. Im Rahmen der Forschungsarbeiten zur Immobilisierung der Radionuklide durch technische Barrieren wird das Korrosionsverhalten von HAW-Gläsern, abgebranntem Kernbrennstoff und von Behältermaterialien untersucht. Die Quantifizierung der Radionuklidenausbreitung im Nahbereich des Endlagers beinhaltet die Beschreibung der thermischen und thermomechanischen Prozesse, sowie Grundlagenuntersuchungen zu den physikalisch-chemischen*

Eigenschaften der Radionuklide in aquatischen Systemen. Die Forschungsarbeiten zum Verhalten der Actiniden und langlebiger Spaltprodukte im Aquifersystem konzentrieren sich besonders auf die Quantifizierung von Sorptions- und Kolloidbildungsprozessen und von Transportphänomenen. Basierend auf den Ergebnissen zu den Einzelprozessen werden geochemische Modelle gekoppelt mit Transportmodellen zur Migration von Radionukliden als Grundlage für Langzeitsicherheitsanalysen entwickelt. Die Ergebnisse insbesondere zur Chemie der Radionuklide in aquatischen Systemen haben grundlegenden Charakter und sind somit ein wesentlicher Betrag zur Entwicklung des Wissensgebietes.

Auf dem wissenschaftlich fundierten Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern für hochradioaktive Abfälle lag das Potential des Instituts, auf den geochemischen Aspekten der Langzeitsicherheitsforschung. Mit dieser Ausrichtung einher ging eine strikte Abgrenzung der im Forschungszentrum bearbeiteten Aspekte der Endlagersicherheitsforschung zu den Arbeiten, die bei der GSF durchgeführt wurden. Insbesondere die Modellierung im Rahmen der Sicherheitsanalysen war vollständig bei GSF angesiedelt. Im INE wurden Modellrechnungen für kleinskaligen Detailsystemen durchgeführt, wie z.B. zur Thermochemie, zur Geochemie und Radionuklidlöslichkeit und zur Auswertung von Säulenversuchen und Migrationsexperimenten. Konzepte zur Durchführung von Sicherheitsanalysen sind im Anhang K kurz vorgestellt. Allerdings war das INE in verschiedenen Arbeitsgruppen eingebunden, die sich theoretisch und praktisch mit dem Sicherheitsnachweis für Endlager befassten. Hierzu gehören die seit 1996 vom BfS organisierten „Geochemie-Workshops“, die in unregelmäßigen Abständen abgehalten wurden, der Arbeitskreis „Szenarienentwicklung“, der von der GRS, Köln ins Leben gerufen worden war. Dieser Arbeitskreis erarbeitete Definitionen der „Features“, „Events“ und „Processes“ (Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse), die die Basis für die Erstellung und Modellierung von Szenarien darstellen. Darüber hinaus waren Mitarbeiter des INE an in diesem Arbeitskreis entwickelten Konzepten zum Umgang mit unbeabsichtigten zukünftigen menschlichen Eingriffen in ein Endlager eingebunden.

Bis heute befassen sich die Forschungsarbeiten zur Endlagerung im INE mit den folgenden Schwerpunkten:

- Grundlegende Untersuchungen zum molekularen Prozessverständnis. In diesem Schwerpunkt finden sich Arbeiten zur
 - Aquatischen Chemie und Thermodynamik von Actiniden und langlebigen Spalt- und Aktivierungsprodukten,
 - Wechselwirkung von Radionukliden mit Mineraloberflächen (Sorption),
 - Sekundärphasen Bildung,
 - Stabilität von Kolloiden und Wechselwirkungen der natürlichen Kolloid mit Actiniden,
 - Quantenchemische Rechenverfahren.

- Angewandte Untersuchungen zur Radionuklidrückhaltung im Multibarrierensystem. Diese F&E-Arbeiten umfassen die Untersuchung der
 - Reaktionen der Abfallprodukte (HAW-Glas, abgebrannter Kernbrennstoff, metallische Werkstoffe, zementierte Abfälle) im Endlager,
 - Strahlenchemische Effekte,
 - Migrationsexperimente im Labor und in Untertagelaboratorien,
 - Diffusionsexperimente mit Actiniden,
 - Reaktive Transport Modellierung.

- Entwicklung von Speziationmethoden zur Aufklärung der molekularen Strukturen von Actiniden in Spurenkonzentrationen. In diesem Bereich wurden verschiedene Verfahren entwickelt
 - Laserspektroskopie wie zeitaufgelöste Laserfluoreszenz Spektroskopie (TRLFS), Laser Photoakustik Spektroskopie (LPAS) und Laser induzierte Breakdown Detektion bzw. Spektroskopie (LIBD / LIBS),
 - Röntgen-Spektroskopie (Kap. 7.1.2),
 - Massenspektrometrische Verfahren.

8.1 Einrichtungen des INE

Seit 1985 hat das INE eine Umgangsgenehmigung gemäß § 9-des Atomgesetzes (AtG). Die Genehmigung erstreckt sich über Kernbrennstoffe (^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{235}U , ^{233}U), Uran mit der natürlichen Isotopenmischung (Natururan) und sonstige radioaktive Stoffen mit einer Gesamtaktivität bis zum 10^{10} fachen der Freigrenzen. Zum Umgang mit den radioaktiven Stoffen verfügt das INE über einen Kontrollbereich, in dem die erforderliche Infrastruktur und die analytischen Verfahren aufgebaut sind. Viele Arbeiten werden in Handschuhboxen durchgeführt, welche neben dem Schutz der Mitarbeiter/innen bezüglich Kontamination bzw. Inkorporation von Radionukliden auch die Aufgabe haben, eine Inertgas-Atmosphäre aufrecht zu erhalten.



Abb. 11 Blick in das Plutonium Labor des INE

Ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal des INE ist die Abgeschirmte Boxenlinie. Diese besteht aus einer Linie von sieben miteinander verbundenen Boxen aus Edelstahl, in denen hochradioaktive Stoffe, wie Kernbrennstoffproben) gehandhabt werden können.



Abb. 12 Abgeschirmte Boxenlinie im INE

8.1.1 Laserspektroskopische Methoden

Seit Mitte der 1980er Jahre erfuhr die Entwicklung der Lasertechnik einen rasanten Aufschwung. Laser wurden zunehmend für spektroskopische Analyseverfahren verfügbar. Diese Methoden nutzen die hohe Intensität, den engen Frequenzbereich (monochromatisches Licht), die scharfe Bündelung des Strahls und die Kohärenz des Laserlichts aus. Seit im INE die Quantifizierung der Radionuklidverbreitung in und aus dem Endlager und die damit verbundene Grundlagenuntersuchungen zu den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Radionuklide in den aquatischen Systemen sowie an Oberflächen eine zentrale Rolle bekam, war es notwendig entsprechende chemische Speziationmethoden für die Actiniden im Spurenkonzentrationsbereich verfügbar zu haben. Hierzu boten sich verschiedene Laser-basierte Methoden an, die eine Variation des Frequenzbereichs des Laserlichts oder extrem kurze und intensive Strahlpulse mit exakter Wiederholfrequenz erforderten. Die Methoden erforderten nur geringe Probenvorbereitung und zeichneten sich durch extrem hohe Empfindlichkeiten aus. Heute gehören diese Methoden zu den Standardverfahren des Instituts.

Die zeitaufgelöste Laser-Fluoreszenz Spektroskopie (TRLFS) erlaubt die Charakterisierung des chemischen Umfelds vieler Lanthaniden sowie der drei- und sechswertigen Actiniden. Besonders für Curium ist die TRLFS bis in einen extremen Spurenkonzentrationsbereich (10^8 Atome) sowohl in Festkörpern als auch in Lösung empfindlich. Ebenfalls mit dieser Methode lässt sich die Anzahl der Wassermoleküle in der Umgebung des angeregten Atoms bestimmen. Die Lebensdauern liefern strukturelle Informationen, die Hinweise auf die Art der Komplexe bzw. auf die Sorptions- und Einbaureaktionen in Mineralphasen liefern.

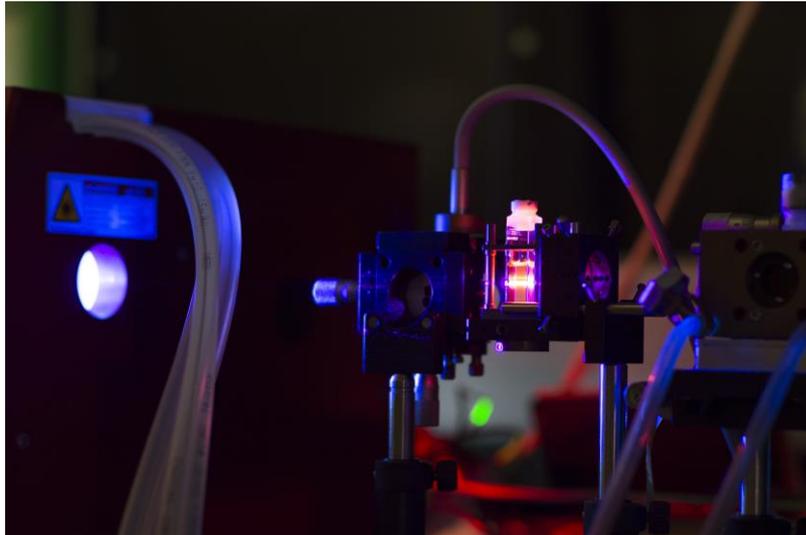


Abb. 13 Durch Laserlicht angeregte Fluoreszenz eines Actinids in Lösung (Küvette in der Bildmitte).

Zur Bestimmung von Oxidationszuständen in Lösung wurde die Laser-induzierte Photoakustik-Spektroskopie (LPAS) entwickelt. Die Frequenz-abhängige Lichtabsorption führt zu lokaler Erwärmung und zur Erzeugung einer Schallwelle, die gemessen werden kann.

Eine weitere Laser-basierte Methode ist die Laser-induzierte Breakdown Detektion (LIBD). Diese Methode fokussiert einen Laserstrahl in eine Flüssigkeitsprobe, in welcher Nano-Teilchen (Kolloide) vorliegen. Die Energie des Laserstrahls wird dabei so eingestellt, dass der Laserstrahl unbeeinflusst die Lösung durchstrahlt. Kommt jedoch ein Nano-Teilchen in den Strahl wird die Lichtenergie absorbiert und das Teilchen verdampft. Hierdurch entsteht ein Licht- bzw. ein Schallsignal, welches detektiert wird. Die Häufigkeit dieser Signal steht für die Konzentration der Teilchen, die Energie für die Teilchengröße. Die LIBD wurde auch als transportable Methode aufgebaut und in den Untertagelaboratorien Äspö HRL und in der Grimsel Test Site eingesetzt.

Unter dem Titelwort „TRLFS“ wurden von INE bisher 92 Arbeiten publiziert, unter „LIBD“ finden sich 36 und unter „LPAS“ 3 Publikationen aus dem INE im Katalog der KIT Bibliothek.

8.1.2 ANKA / INE Beamline

Ende der 1990er Jahre wurde mit dem Bau der Synchrotronstrahlungsquelle ANKA in Forschungszentrum Karlsruhe begonnen. Das Ziel dieser F&E-Arbeiten war ursprünglich auf den Einsatz von Synchrotronstrahlung zur Weiterentwicklung des röntgentiefenlithographischen Verfahrens (LIGA) im Programm Mikrosystemtechnik ausgerichtet [111]. Für Spezialanwendungen, die Synchrotronstrahlung benötigten, konnten eigene Messstationen an der ANKA-Maschine aufgebaut und betrieben werden. Als Spezialanwendungen wurde von INE im Jahr 2005 die INE-Beamline für Actiniden-Forschung eingerichtet und in Betrieb genommen.



Abb. 14 Messaufbau an der INE-Beamline für Actiniden-Forschung an der Synchrotronstrahlungsquelle ANKA

Die Beamline war mit spezieller Instrumentierung für die Röntgen-spektroskopische Charakterisierung von actinidenhaltigen Proben und anderen radioaktiven Stoffen eingerichtet. Bestandteil der Beamline ist eine „experimentelle Hütte“, die als Kontrollbereich ausgestattet ist und in welcher radioaktive Proben bis zum 10^6 -fachen der Freigrenze bzw. bis zu 200 mg spaltbaren Materials untersucht werden können. Selbstverständlich müssen diese Proben in einem geeigneten Containment eingeschlossen sein. Der Photonen-Energiebereich, der abgedeckt werden kann, liegt zwischen ~ 2.1 keV (P K-edge) und ~ 25 keV (Pd K-edge). Mit diesem Energiebereich können die Lanthaniden L-edges und die Actiniden M- und L3-edges bis zum Californium untersucht werden. Eine Reihe von Analysenverfahren steht zur Verfügung: Röntgen-Absorption-Fein-Struktur-(XAFS)-Spektroskopie im Transmissions- und Fluoreszenz-Modus, Mikrofokus-(einschließlich konfokal) -XAFS und Röntgenfluoreszenz-Analysen und Kombinationen von (μ) XAFS und (μ) -Röntgendiffraktometrie [112, 113].

8.2 Actinidenabtrennung

In den Jahren 1975 bis 1982 wurde die Abtrennung von Actiniden und langlebigen Spaltprodukten und ihre Transmutation mit Neutronen in kurzlebige Nuklide als ein mögliches Waste Management Konzept (P&T) in USA angesehen. Allerdings kam man im Rahmen der ISPRA Konferenzen 1978 und 1980 zum Ergebnis, dass P&T hohe Kosten verursacht, zu einem erhöhten Kurzzeitrisko führt und dass ein nicht quantifizierbarer Gewinn an Langzeitsicherheit aus diesem Waste Management Konzept resultiert.

Während der Präsidentschaft von Ronald Reagan in den USA (1981–1989) wurde die sogenannte Strategic Defense Initiative (SDI) entwickelt. Im Rahmen dieser Strategie wurden neue Hochenergie- bzw. Hochflussbeschleuniger konzipiert. Auf dieser Basis, publizierte 1992 Bowman [114] einen Vorschlag zur Entwicklung eines unterkritisch zu betreibenden Reaktors. Der Reaktor sollte über einen Teilchenbeschleuniger eine Spallationsquelle betreiben, die den Reaktor mit Neutronen versorgt. Solche Reaktoren könnten sowohl der Stromproduktion als auch zur Transmutation langlebiger Radionuklide dienen. Seit dieser Zeit wurde das P&T Konzept wieder als eine mögliche Option angesehen.

Zur effizienten Nutzung der Neutronen im Transmutationsprozess war es erforderlich, Neutronenfänger, wie Uran, Plutonium oder die Lanthaniden aus dem zu transmutierenden Stoff abzutrennen. Während Uran und Plutonium bei der Wiederaufarbeitung von den Spaltprodukten und den minoren Actiniden getrennt werden, ist die Trennung der Lanthaniden von den dreiwertigen Actiniden Americium und Curium schwierig. Ein wesentlicher Fortschritt wurde von Kolarik und Müllich, INE erzielt mit dem N-Donator Extraktionsmittel alkylated 2,6-ditriazinylpyridines (BTP). Mit diesem Extraktionsmittel wurden Unterschiede in den Verteilungskoeffizienten zwischen Actiniden und Lanthaniden von über 100 erreicht.

Im Rahmen des P&T-Konzepts befasste sich INE ausschließlich mit der Abtrennung von Actiniden von den Spaltprodukten (Lanthaniden). Diese Arbeiten wurden auch unter dem Aspekt gesehen, dass abgetrennte Actiniden in spezielle Abfallprodukte (Keramiken/ SYNROCK) eingebunden werden könnten, die eine deutlich höhere thermodynamische Stabilität aufweisen als Glasprodukte.

Insgesamt finden sich zur Actinidenabtrennung über 250 Verweise in der KIT Veröffentlichungsdatenbank.

8.3 Lehre und Ausbildung

Seit der Errichtung des Kernforschungszentrums wurden an der Universität Karlsruhe eine Reihe von Lehrstühlen etabliert, wie z.B. für „Physikalische Grundlagen der Reaktortechnik“ (Prof. Wirtz, 1954), für „Technologie der Reaktorbaustoffe“ (Prof. Becker, 1958) oder für „Kerntechnik“ später „Kernverfahrenstechnik“ (Prof. Smidt, 1965). Im Chemiebereich hatte der Leiter des Instituts für Radiochemie (Prof. Walter Seelmann-Eggebert) eine Professur an der Universität Karlsruhe, der Leiter des Institut für Heiße Chemie eine Professur an der Universität Heidelberg bzw. Mainz (Prof. Franz Baumgärtner).

Erst im Lauf der 1980er Jahre entwickelten sich personelle Verknüpfungen des Instituts mit verschiedenen Universitäten (Prof. H. Pentinghaus, Uni Münster, Prof. Jae-II Kim, TH München), so dass Diplom- und Doktorarbeiten am INE durchgeführt und betreut werden konnten. Seit dieser Zeit waren dann auch regelmäßig Nachwuchswissenschaftler im INE. Der Nachfolger von Prof. Kim, Prof. Thomas Fanghänel (2002 – 2006) erhielt eine C4 Professur am Physikalisch-Chemisches Institut der Universität Heidelberg und Prof. Horst Geckeis ist lehrtechnisch angebunden an das Institut für Anorganische Chemie des KIT. Heute sind zahlreich INE Mitarbeiter in die Lehre eingebunden.

Im Rahmen der Berufsausbildung von Laboranten und Technikern stellte und stellt das INE Ausbildungs- bzw. Praktikumsplätze zur Verfügung.

8.4 Beratungsaufgaben

In den Jahren 1978/9 wurden auf Empfehlung des Sachverständigenkreises „Behandlung und Beseitigung radioaktiver Abfälle“ des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) eine Reihe von Arbeitskreisen gegründet. Die Aufgabenstellung des Arbeitskreises LAW/MAW-Produkte war auf die qualitative und quantitative Charakterisierung der radioaktiven Abfallprodukte bezüglich ihrer Endlagerfähigkeit ausgerichtet. Reiner Köster, INE, wurde mit der Leitung des Arbeitskreises betraut. Am HMI in Berlin wurde der Arbeitskreis „Hochradioaktive Abfallprodukte“ (AK HAW-Produkte) etabliert. Seine Hauptaufgaben waren die Koordination der Forschungsarbeiten in den Großforschungseinrichtungen

zur Entwicklung und Charakterisierung von Abfallprodukten, die Qualitätssicherung und das Aufzeigen von F&E-Bereichen, die als Voraussetzung zur Genehmigung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle angesehen wurden. Der Vorsitzende war Werner Lutze, der mit seiner Gruppe im Jahr 1989 ins INE übersiedelte. Die Mitglieder der Arbeitskreise waren Vertreter der auf dem Gebiet der Entsorgung tätigen Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen, von Energieversorgungsunternehmen, der Industrie und Behörden.

Während der Arbeitskreises LAW/MAW-Produkte im Jahr 1982 seinen Abschlussbericht vorlegte [72], erweiterte der AK HAW-Produkte sein Themenspektrum hinsichtlich der direkten Endlagerung von abgebrannten Kernbrennstoffen, der Quellterme für Sicherheitsanalysen, der Rückführung von hochradioaktiven Abfallprodukten aus Frankreich und England und der Langzeitzwischenlagerung. Seit 1985 gab der AK HAW-Produkte eine Reihe wichtiger Empfehlungen (Stellungnahmen) ab, die in die Beratungen der Reaktorsicherheitskommission eingespeist wurden. Eine der weitreichendsten Empfehlungen des AK HAW-Produkte war die Definition von und die Art der Herstellung von drei hochkonzentrierten Salzlösungen, die - auch heute noch - als repräsentativ für die möglichen Lösungen in deutschen Salzstöcken angesehen werden. Diese Empfehlung ist die Basis von nahezu allen Korrosionsexperimenten, die in Deutschland an HAW-Glasprodukten, abgebrannten Kernbrennstoffen, zementierten Abfällen und Behältermaterialien sowie potentiellen Versatzstoffen durchgeführt wurden. In 2001 veröffentlichte der AK HAW-Produkte die bis zu dieser Zeit vorgelegten Empfehlungen [115]. Der AK HAW-Produkte besteht immer noch.

Vertreter des INE waren und sind in verschiedenen Kommissionen vertreten, die mit Endlagerfragen befasst sind. Prof. Jae Il Kim war Mitglied in der Reaktorsicherheitskommission (RSK), ebenso Prof. Thomas Fanghänel. Prof. Geckeis ist Mitglied der Endlagerkommission (ESK). Dr. B. Grambow war Mitglied des vom BMFT ins Leben gerufenen Expertenkreises „Natürliche Analoga. Dr. Kienzler war Mitglied im Ausschuss Ver- und Entsorgung der RSK.

9 Forschungsarbeiten im Rahmen von EURATOM

Die European Atomic Energy Community (EAEC oder EURATOM) wurde 1957 gegründet. Das Ziel dieses Vertrags der damaligen sechs Gründungsmitglieder war auf die Unabhängigkeit Europas bezüglich der friedlichen Nutzung der Kernenergie ausgerichtet. Hierzu wurden folgende wichtige Aufgaben definiert:

- Forschung und Weitergabe der erzielten Ergebnisse.
- Sicherheitsstandards
- Investitionen und Versorgung mit nuklearem Material (Erz und Brennstoff).
- Nukleare Safeguards (Kontrolle des spaltbaren Materials und Non-proliferation)
- Internationale Kooperation (mit Drittländern und internationalen Organisationen)
- "European Joint Undertakings" die späteren Projekte Joint Torus (JET) oder ITER.

Die Forschung wurde in zeitlich befristeten Framework Programmen (FP) organisiert: 1. Radioactive Waste Management Programme (1975 - 1984), FP 1: 1984 - 1987, FP 2: 1987 - 1991, FP 3: 1990 - 1994, FP 4: 1994 - 1998, FP 5: 1998 - 2002, FP 6: 2002 - 2006, FP 7: 2007 - 2013 und nachfolgend das Horizon 2020. In diesen Programmen standen im Teilbereich FISSION immer die Themen Reaktorsicherheit, Geologische Endlagerung¹ und Strahlenschutz im Vordergrund. Forschungsschwerpunkte waren bis zum 4. FP die Abfallbehandlung, Oberflächen- und Untertage-Endlagerung und Site Charakterisierung. Ab dem 5. FP stand forschungsmäßig die tiefe geologische Endlagerung im Vordergrund, wobei aber Governance, Public Involvement sowie Training und Education wichtige Komponenten waren. Anstelle der Abfallbehandlung traten Arbeiten zur Actiniden-Abtrennung aus dem hochradioaktiven Abfall und die Transmutation (P&T).

Bereits vor der Etablierung der europäischen Framework Programme wurde vom Kernforschungszentrum bei der Europäischen Atomgemeinschaft ein Forschungsantrag für die Errichtung und den Probebetrieb einer als Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle geeigneten Prototyp-Salzkaverne gestellt.

F&E-Arbeiten zur „Versuchseinlagerung hochaktiver Glasblöcke im Salzbergwerk Asse“ wurden im Rahmen des indirekten Aktionsprogramms der europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) „Bewirtschaftung und Lagerung von radioaktiven Abfällen, Programmbogen Nr.7: Lagerung von hochaktiven Abfällen in geologischen Formationen“ von 1975 bis 1979 gefördert. Im gleichen Programmbogen wurden in der Zeit von 1980 - 1982 die „Entwicklung von Rechenverfahren und Durchführung von Modellrechnungen zur thermomechanischen Wechselwirkung des Salzes mit der Bohrlochauskleidung bzw. mit eingelagerten Abfallblöcken“ gefördert.

¹ Für das Thema B - Contribute to the Development of Solutions for the Management of Radioactive Waste standen folgende Mittel zur Verfügung: FP 4: 170 Mio. €, FP 5: 191 Mio. €, FP 6: 209 Mio. €, FP 7: 287 Mio. €. Hinzu kamen die Mittel für die Joint Research Centers (JRC) zu denen das Institut für Transurane gehört, welche sich von 1994 bis 2013 auf knapp 1.4 Mrd. € beliefen. Die Reaktorforschung, Thema A, erhielt in dieser Zeit Forschungsförderung in Höhe von ca. 4.4 Mrd. €.

Im Rahmen der europäischen Framework Programme FP1 und FP2 wurden vom Kernforschungszentrum Karlsruhe, der GSF, der Technischen Universität München (TUM) und dem Hahn-Meitner Institut Berlin Berichte zu geförderten Projekten geliefert. Im Kernforschungszentrum wurden zum Thema „Abfallbehandlung“ 19, zum Thema „Endlagerung“ 16 Publikationen (EUR-Berichte) im Rahmen von EURATOM verfasst [116] und 18 EUR-Berichte von der GSF. Von HMI und FZJ wurden 3 bzw. 4 Berichte zur Verglasung bzw. Abfallbehandlung von hochradioaktiven Abfällen in diesem Zeitraum geliefert. Hinzu kamen zwei Berichte von der Industrie (NUKEM und DBE). Es ist anzumerken, dass in diesen Rahmenprogrammen einzelne Forschungsarbeiten gefördert und nicht nur Abschlussberichte zu Projekten als EUR-Berichte veröffentlicht wurden, sondern auch Zwischen- und Statusberichte von laufenden Vorhaben.

Seit 1983 wurde das Projekt MIRAGE (Migration of Radionuclides in the Geosphere/Migration von Radionukliden in der Geosphäre) von EURATOM gefördert [117]. Das Kernforschungszentrum war zu Beginn nicht involviert, jedoch die TUM. Als Prof. Kim die Leitung des INE übernahm, trug auch das INE zu diesem Projekt bei. Das Ziel von MIRAGE lag in der Ermittlung experimenteller Daten um Sicherheitsanalysen zu unterstützen. Der Schwerpunkt lag bei Untersuchungen vor Ort sowie beim Benchmarking von Messmethoden, Konzepten und Computercodes. Hierzu wurden verschiedene Unterprojekte definiert:

- Der „COCO Club“ (Colloids and Complexes/Kolloide und Komplexe) untersuchte die Komplexbildung von Radionukliden mit natürlichen (und künstlichen) organischen Stoffen, die Kolloidbildung im Grundwasser sowie grundlegende Retentionsmechanismen.
- Zur Langzeitprognose von Migrationsprozessen wurden Grundwasser- und geochemische Codes entwickelt und verbessert.
- Es wurde eine geochemische Datenbank CHEMVAL entwickelt.
- Die NAWG (Natural Analogue Working Group) zur Untersuchung von natürlich vorkommenden analogen Prozessen zur Vorhersage des langfristigen Verhaltens von Endlagern beteiligte sich ebenfalls an dem MIRAGE Projekt.

Seit dem 4. FP nahmen Mitarbeiter des INE an zahlreichen Forschungsprogrammen teil oder fungierten als Koordinatoren von EURATOM-Projekten. Eine Aufstellung der wichtigsten EU Projekte im Zusammenhang mit der Endlagerforschung ist im Anhang L gegeben. Ab dem 6. FP gab es die sogenannten „Integrated Projects (IP)“, von denen das IP FUNMIG von INE koordiniert wurde. An diesem Projekt beteiligten sich über 50 Partnerorganisationen [118-129]. Im 7. FP koordinierte das INE 3 Collaborative Projekte ReCosy [130], CROCK und FIRST-Nuclides. Im Rahmen des Horizon 2020 Rahmenprogramms koordiniert KIT-INE das Collaborative Project Cebama, welches die Quantifizierung von in allen Endlagern erforderlichen zement-basierten Materialien, deren Eigenschaften, Veränderungen und Barriereigenschaften zum Ziel hat.



Abb. 15 Logos der kürzlich von KIT-INE koordinierten Euratom Projekte

Ein wesentlicher Aspekt der europäischen Forschungsförderung seit dem 4. Rahmenprogramm war auf die Bildung von Forschungsnetzwerken ausgerichtet. Bereits im 4. Rahmenprogramm der EU wurden in der konzertierten Aktion "Joint European Thermodynamic Database for Environmental Modeling – JETDEM" die notwendigen Forschungsarbeiten im Bereich der wissenschaftlichen Grundlagen für den Nachweis der Langzeitsicherheit der nuklearen Endlagerung aufgezeigt [131]. JETDEM wurde vom INE koordiniert. Diese Action war auf grundlegende Kenntnisse zum Verhalten von Actiniden und Spaltprodukten in natürlichen aquatischen Systemen ausgerichtet, einschließlich:

1. Prozessverständnis bezüglich der Löslichkeit und Retention von Actiniden und Spaltprodukten in aquatischen Systemen;
2. Schließung bestehender Lücken in den verfügbaren thermodynamischen Datenbanken und
3. Reduktion von Unsicherheiten bei derzeit verwendeten thermodynamischen Konstanten

JETDEM führte zur Bewilligung des Projekts „Aquatic Chemistry and Thermodynamic of Actinides and Fission Products Relevant to Nuclear Waste Disposal (ACTAF)“ im 5. Framework Program der Europäischen Kommission (EURATOM) [132]. ACTAF umfasste folgende Kernthemen: Thermodynamik Actiniden, Wechselwirkung von Actiniden an der Mineral / Elektrolyt-Grenzfläche, und die Thermodynamik der sekundären Festphasenbildung. In ACTAF waren acht Organisationen beteiligt, es endete im Jahr 2003. Ebenfalls im FP 5 wurde das Projekt "Establishment of a Network of Excellence for Actinide Sciences (ACTINET-5)" von INE, CEA und ITU etabliert [133]. ACTINET-5 umfasste

1. grundlegende Chemie und Physik der Actiniden in fester und gelöster Form
2. Chemie der Actiniden im geologischen Milieu
3. Chemie und Physik von actinidenhaltigen Stoffen unter und nach der Bestrahlung.

Bereits in ACTINET-5 wurde die gemeinsame Nutzung von teuren experimentellen Einrichtungen als sogenannte "pooled systems" für Forschungsarbeiten und für Ausbildung und Training gefördert. Dieses Konzept wurde als "Network of Excellence for Actinide Sciences" im 6. Rahmenprogramm mit der Bezeichnung ACTINET-6 (2004-2008) fortgesetzt [134]. In diesem Netzwerk war die Actiniden-Forschung das zentrale Thema. Die gemeinsame Nutzung der verfügbaren Einrichtungen der „pooled facilities“ als Multi-Site-User-Anlagen wurde koordiniert, die Mobilität der Wissenschaftler zwischen den akademischen Institutionen und den nationalen Laboratorien, sowie die Exzellenz durch ein rigoroses Auswahlverfahren von Vorschlägen für Forschungsaktivitäten und Ausbildung wurde gefördert.

Dieses Konzept wurde mit dem ACTINET-I3 (ACTINET Integrated infrastructure initiative) [135] und TALISMAN (Transnational Access to Large Infrastructure for a Safe Management of Actinide) [136] im 7. Rahmenprogramm weiterverfolgt.

In diesen Netzwerken war INE mit seinen radioaktiven Laboratorien und der INE-Beamline an der ANKA eingebunden. Dank ACTINET kamen zahlreicher Gastwissenschaftler und Doktoranden ins Institut und es ergaben sich viele gemeinsame Projekte. Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass der engagierte Einsatz der Mitarbeiter des INE wesentlich zum Erfolg dieses Netzwerkes beitrug.

10 Forschungsarbeiten im Rahmen von Projektförderung

10.1 Entsorgungsalternativen: Direkte Endlagerung von abgebrannten Kernbrennstoffen

Im Atomgesetz von 1976 wurde im § 9a Abs. 1 der "schadlosen Verwertung" durch Wiederaufarbeitung der abgebrannten Kernbrennstoffe der Vorrang gegenüber ihrer Entsorgung als radioaktiver Abfälle eingeräumt. Die "geordnete Beseitigung" per Endlagerung sollte nur erfolgen, wenn die Wiederaufarbeitung nach dem Stand von Wissenschaft und Technik nicht möglich oder wirtschaftlich nicht vertretbar war. Im Zuge der Diskussionen um das NEZ (siehe Rede – Gegenrede [137]) hielt zwar die Bundesregierung am Entsorgungskonzept über die Wiederaufarbeitung fest, sprach sich aber auch für die Untersuchung anderer Entsorgungsstrategien aus. Dies wurde auch von den Ministerpräsidenten der Bundesländer unterstützt und man forderte zügige Untersuchungen, um Mitte der achtziger Jahre eine Entscheidung treffen zu können. Als Folge davon wurde beim Kernforschungszentrum Karlsruhe unter Beteiligung einer Reihe anderer Forschungseinrichtungen und Firmen im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie eine Studie durchgeführt, die Entsorgungsalternativen "integriertes Entsorgungskonzept" (Wiederaufarbeitung, Rückführung von Uran und Plutonium) und "direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente" unter technischen, sicherheitstechnischen, ökologischen und energiepolitischen Gesichtspunkten sowie im Hinblick auf die von diesen Konzepten ausgehende Proliferationsgefahr mit einander verglichen. Ein Gesamtvergleich der beiden Entsorgungskonzepte bzw. der beiden Brennstoffkreisläufe war zum damaligen Zeitpunkt noch nicht möglich, da vorher noch eine Reihe von Detailfragen zu klären waren. Daher wurden in der Studie die notwendigen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente in den nächsten Jahren aufgeführt, um den geforderten sicherheitstechnischen Vergleich der beiden Entsorgungsalternativen durchführen zu können [138].

An der Erstellung dieser Studie, deren Ergebnisse 1980 veröffentlicht wurden [138], waren zahlreiche Mitarbeiter der ABRA beteiligt.

10.2 GEISHA: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein.

Im Zeitraum 1994 - 1996 wurde auf Anregung von FZK-PTE eine Studie initiiert, in der eine Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und im Hartgestein erfolgen sollte. Diese Arbeiten wurde zum größten Teil vom Forschungszentrum Karlsruhe finanziert. Ziel dieser Studien war es, ein Endlagerkonzept für Hartgestein, das die für Deutschland typischen Eigenschaften aufweist, zu entwerfen und den für Steinsalz vorliegenden Konzepten gegenüberzustellen.

Die Ergebnisse der Studien wurden publiziert [139]. Es wurde ein Behälterkonzept zur direkten Endlagerung von abgebrannten Brennelementen entwickelt, das für ein Endlager in Hartgestein angemessen war. Für den Vergleich wurde ein Endlager in Hartgestein inklusive Kernmaterialüberwachungskonzept vorgeschlagen. Das Endlagerkonzept bei GEISHA für das Hartgestein orientierte sich am schwedischen KBS-3-Konzept. Der Nachweis der Langzeitsicherheit wird bei der Endlagerung über die Funktionsfähigkeit der Barrieren erbracht, bei Hartgestein vor allem über diejenigen im Nahfeld. Daher lag der Schwerpunkt der Studien bei den Nahfeldbarrieren Endlagergebäude und Verfüllmaterial, insbesondere bei deren Rolle im Rahmen einer Gesamtdarstellung der Geochemie des Mehrbarrierensystems. Schließlich wurde die Leistungsfähigkeit bisheriger Langzeitsicherheitsanalysen für Salz und Hartgestein dargestellt und die Notwendigkeit von Verbesserungen auf dem Gebiet der Geochemie hervorgehoben.

Beim INE wurde besonders die Rolle der Geochemie, des Mehrbarrierensystems, der Temperaturentwicklung und Fragen der Behälterwerkstoffe bearbeitet.

10.3 F&E-Arbeiten zu kristallinen Wirtsgesteinen

In Deutschland wurden Arbeiten mit Bezug zur Endlagerung in kristallinem Gestein bereits seit 1983 in geringem Maße durchgeführt (Felslabor Grimsel). Mit Beginn der Kooperation mit SKB im Jahr 1995 wurden die Aktivitäten auch in HRL Äspö begonnen. Es wurden eine Reihe von Themen bearbeitet, die die Actiniden- bzw. Kolloid-Migration in Klüften, die Charakterisierung von natürlichen Kolloiden in kristallinen Wässern und die Wechselwirkungen von Tonbarrieren mit Kluftwässern und Gestein beinhalteten.

10.3.1 Experimente im Untertagelabor Äspö, Schweden

In-situ Actinidenmigrationsexperimente im Äspö Hard Rock Laboratory (HRL) in Schweden fanden zwischen 1998 und 2005 statt. Vor Ort wurde die Bohrlochsonde CHEMLAB (SKB) in einer Tiefe von ca. 450 m eingesetzt. Für die Experimente wurden Bohrkerne mit natürlichen Klüften in einen Stahlmantel eingegossen und nach ihrer Charakterisierung im Labor in der CHEMLAB-Sonde einem Durchfluss des natürlichen Grundwassers ausgesetzt. In den Wasserstrom konnten Radionuklide, insbesondere auch Actiniden injiziert werden. Die Lösungen wurden dann in einer Handschuhbox gesammelt, verpackt und zur Analyse ins INE geschickt. Es wurden mehrere in-situ Versuche mit Neptunium, Plutonium, Americium, Uran, und Technetium durchgeführt, welche durch entsprechende Laborversuche ergänzt wurden. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der Rückhaltung der Radionuklide und der Sorptionsmechanismen wurde publiziert [140].

Ebenfalls im Äspö-HRL wurden Messungen zur Quantifizierung und Charakterisierung der im natürlichen Grundwasser auftretenden Kolloide als Funktion der Tiefe bzw. der Salinität mit Hilfe der transportablen Laser-Breakdown-Detektions-Anlage durchgeführt [141, 142]. Es zeigte sich eine deutliche Abnahme der Kolloidkonzentration mit steigendem Salzgehalt des Grundwassers.

10.3.2 Beteiligung an den CRR-/CFM-Experimenten in Grimsel, Schweiz

Die schweizerische Endlager Organisation Nagra betreibt das Felslabor Grimsel in den granitischen Gesteinen des Aarmassivs. Es ist über den Zugangstollen der Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) zugänglich, etwa einen Kilometer lang und wurde 1983 angelegt und 1995 - 1997 erweitert. In diesem Untertage-labor (GTS) beteiligt sich KIT seit vielen Jahren an internationalen Projekten, die die Mobilisierung und den Transport von Radionukliden untersuchen. Das erste Projekt, an dem das INE beteiligt war, war das CRR-Experiment (Colloid & Radionuclide Retardation), das auf die Aufklärung des Kolloideinflusses auf die Migration von Radionukliden im geklüfteten Gestein abzielte. In Grimsel konnte die Migration von kolloidgebundenen Actinidenhomologen demonstriert werden. Ein in-situ Migrationsexperiment mit den Radionukliden U, Pu, Am, Np, Tc, Cs, Sr wurde Anfang 2002 durchgeführt. Begleitende Migrations-experimente fanden im Labor mit Bohrkernen statt.

Unter den Begriffen "colloid borne actinide migration under in-situ conditions at the Grimsel Test Site" finden sich ca 30 Publikationen aus dem INE im KIT-Katalog Plus.

10.4 Numerische Simulation zum thermomechanischen Verhalten von Hohlräumen und Bauwerken im Steinsalz

Seit Beginn der Arbeiten im Salzbergwerk Asse wurde in Deutschland von verschiedenen Arbeitsgruppen ein umfangreiches experimentelles und theoretisches Know-how zur Salzmechanik erarbeitet. Auf dieser Grundlage wurde eine Reihe fortschrittlicher Stoffgesetze und Verfahrensweisen für die Ermittlung charakteristischer Kennwerte und die numerische Behandlung anspruchsvoller Simulationsaufgaben entwickelt und angewandt.

Im Rahmen mehrerer über den Projektträger geförderter Verbundvorhaben wurden Testrechnungen zur Spannungs-, Verformungs-, Dilatanz- und Schädigungsentwicklung in Steinsalzbergwerken durchgeführt. Beispiele sind Modellrechnungen zum TSS-Versuch (*t*hermische *S*imulation der *S*treckenlagerung) [143]. Von 2007 bis 2010 wurden 3D-Benchmark-Modellberechnungen zu einem realen, stark beanspruchten Untertagebauwerk im Steinsalz der Grube Angersdorf bei Halle an der Saale durchgeführt. Dabei wurde auch die Permeabilitätsentwicklung in der Auflockerungszone einbezogen. Das Projekt diente einer realitätsnäheren Einschätzung der Stoffgesetzmöglichkeiten im Hinblick auf deren Einsatz bei der praktischen Anwendung der Berechnung und Sicherheitsbewertung von Endlagern und Untertagedeponien im Steinsalz [144]. *Hierfür wurde am INE das Finite-Element-Programmsystem ADINA zur Untersuchung des Steinsalzverhaltens unter Endlagerbedingungen eingesetzt. Im Rahmen des Projekts wurde ein neues viskoplastisches Materialmodell zur Beschreibung der Dilatanz und Schädigung von Steinsalz entwickelt und an repräsentative Laborversuche angepasst. Mit diesem Stoffmodell wurde ein Ausschnitt des Kammersystems in der Grube Angersdorf numerisch simuliert. In dem ersten Rechenschritt wurde der Anfangsspannungszustand im Modell unter Berücksichtigung des Kriechverhaltens von Salz und Salzton berechnet. Anschließend wurde das Auffahren der Haupthohlräume behandelt und die Kriechverformungen über weitere 100 Jahre gerechnet. Die Simulationsergebnisse zum Zeitpunkt 50 Jahre nach dem Auffahren (Ist-Zustand) stimmen sehr gut mit den Ergebnissen der in situ Messungen überein. Die weitergeführte Simulation bis zum Ende liefert eine Prognose der künftigen Entwicklung.*

Weitere Arbeiten erstreckten sich auf die Interpretation von Erhitzerexperimenten, die in den 1980er Jahren in der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), NM, USA durchgeführt wurden.

11 Auftragsforschung zur Endlagerung

Neben den direkt geförderten Vorhaben zur Endlagerung bzw. zur Endlagersicherheit wurden im INE auch Projekte im Rahmen zur Verglasung hochradioaktiver Abfälle (USA, Japan, UK) und zur Charakterisierung von Abfallprodukten (HochTief), oder von Beschichtungsmaterialien, etc. durchgeführt. Diese Arbeiten werden hier nicht behandelt. Die im folgenden beschriebenen Auswahl an Arbeiten waren/sind Drittmittel-Projekte, die vom Auftraggeber finanziert wurden und die dabei erzielten Ergebnisse ausschließlich dem Auftraggeber gehören. Eine Publikation der Ergebnisse konnte nur mit Einverständnis des Auftraggebers erfolgen.

11.1 AKEnd

Unter Bundeskanzler Schröder (1998-2005) erhob die rot/grüne Bundesregierung Zweifel an der Eignung des Salzstocks Gorleben als Endlager. Sie verfügte die Unterbrechung der Erkundung des Salzstocks im Jahr 2000 für eine Zeitdauer zwischen drei und maximal zehn Jahren zur Klärung konzeptioneller und sicherheitstechnischer Fragen (Moratorium) [145]. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) richtete 1999 den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) ein [146]. *Der AkEnd hatte den Auftrag, ein nachvollziehbares Verfahren für die Suche und die Auswahl von Standorten zur Endlagerung aller Arten radioaktiver Abfälle in Deutschland zu entwickeln. Das Verfahren sollte die Beteiligung der Öffentlichkeit in geeigneter Form vorsehen und fundierte Kriterien beinhalten. Die Entwicklung sollte auf wissenschaftlicher Basis sachorientiert, unvoreingenommen und ohne Ausschluss relevanter Aspekte erfolgen. Dabei sollten die Vorgehensweisen und Erfahrungen in anderen Ländern berücksichtigt werden. Der AkEnd sollte seine Überlegungen schon während ihrer Entwicklung mit der nationalen und internationalen Fachwelt und mit der interessierten Öffentlichkeit erörtern.*

Als Randbedingungen für die Verfahrensentwicklung hatte das BMU die folgenden Vorgaben gemacht:

- *Alle radioaktiven Abfälle sollen in tiefen geologischen Formationen in Deutschland endgelagert werden.*
- *Für die Endlagerung aller Arten und Mengen radioaktiver Abfälle reicht ein Endlager aus, das ab 2030 betriebsbereit sein soll.*

Im Rahmen des AKEnd trug INE mit der Ermittlung von Eignungskriterien von geologischen Formationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mittels geochemischer Analysen bei [147, 148]. Es wurden Beiträge zu Studien geliefert, die das Endlager-Konzept nur für hochradioaktive Abfälle oder für alle Arten an Abfällen bezüglich der Vor- und Nachteile diskutierten.

11.2 HMGU-Vorhaben

Im Jahr 1997 erteilte das HMGU dem INE den Auftrag eine „Sichtung und Bewertung bisheriger Sicherheitsaussagen zum Salzbergwerk Asse hinsichtlich der physiko-chemischen Prozesse bei der Ausbreitung

von Radionukliden“ durchzuführen. Die Basis dieser Studie waren ein "Zusammenfassender Bericht über die Ergebnisse der Standorterkundung Asse" von 1987 und "Störfallbetrachtungen für ein mögliches Ersaufen des Grubengebäudes Asse II durch Vergleiche aus der Praxis des Deutschen Kali- und Steinsalzbergbaues und durch analytische Betrachtungen bei der rückholbaren Lagerung schwach radioaktiver Abfälle" von 1980. Beide erstellt vom Institut für Tief Lagerung der GSF. Zusätzlich wurden "Spezifische Daten ausgewählter Einlagerungskammern im Salzbergwerk Asse" zur Verfügung gestellt. Die Sichtung und Bewertung der Sicherheitsaussagen zum Salzbergwerk Asse sollte sich auf folgende Themenbereiche erstrecken:

- Auslaugverhalten von Abfallgebinden
- Löslichkeitsgrenzen relevanter Radionuklide
- Umlöse- und Ausfällungsprozesse von Radionukliden
- Ausbreitung von Radionukliden im Grubengebäude
- Rückhaltung von Radionukliden im Deckgebirge

Ausgehend von dieser Studie wurden weitere Aufträge zum Thema „Bewertung der Sorption und Desorption von Radionukliden an zusätzlich einzubringenden Versatzstoffen im Grubengebäude des Forschungsbergwerks Asse sowie die Beschreibung des geochemischen Milieus im Versatz“ erteilt. Zu diesem Auftrag wurden vier Berichte verfasst:

- Teil A: Bewertung der Radionuklidrückhaltung in den Einlagerungskammern und verfüllten Zugangsstrecken anhand einer Literaturstudie.
- Teil B: Modellierung der Veränderung des geochemischen Milieus in den Einlagerungskammern und ihren Zugangsstrecken durch zusätzlich einzubringende Versatzstoffe.
- Teil C: Modellierung der Elementlöslichkeiten in den ausgewählten versetzten Einlagerungskammern bzw. Zugangsstrecken.
- Zusammenfassender Abschlussbericht

Auf der Basis dieser theoretischen Studien erhielt INE den Auftrag ein „Experimentelles Programm zur Bestätigung der Ergebnisse von standortspezifischen Modellrechnungen für die Schachanlage Asse“ durchzuführen, welches experimentelle Daten zur Entwicklung des geochemischen Milieus in Abhängigkeit standortspezifischer Feststoff- und Lösungssysteme ermitteln sollte. Diese experimentellen Daten dienen zur Bestätigung der Methodik und der Ergebnisse des früheren Auftrags „Bewertung der Sorption und Desorption von Radionukliden an zusätzlich einzubringenden Versatzstoffen im Grubengebäude des Forschungsbergwerks Asse sowie die Beschreibung des geochemischen Milieus im Versatz“. Im Rahmen dieses Auftrags wurden über 20 Berichte angefertigt und dem HMGU übergeben. Ein wesentliches Ergebnis war die Definition des „quasi geschlossenen Systems“ in den Einlagerungskammern der Schachanlage Asse II, welches Basis für die Ermittlung der Radionuklidmobilisierung bzw. -rückhaltung bildet [149].

11.3 BfS-Vorhaben

Die F&E-Arbeiten, die im INE für das BfS durchgeführt wurden, waren seit 1994 vertraglich geregelt. Der Rahmenvertrag vom 17.11.1994 enthielt folgende Leistungsbereiche:

- Wirksamkeit von Multibarrieren (technische, geotechnische und geologische Barrieren)
- geochemisches Verhalten von Radionukliden im Nah- und Fernbereich
- geochemische Modellierung
- thermomechanische Auswirkungen auf Endlagerformationen
- physikalische Effekte (z. B. Gasbildung, Radiolyse etc.)

Auf der Basis dieser Vereinbarung wurden 2 Projekte bearbeitet:

- Nuklidmigration im Deckgebirge des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM)
 - Teil 1: Sorption im Grubengebäude (1995 – 2002) [150, 151]
 - Teil 2: Sorption im Deckgebirge (1995 – 1998) [152].
- Erstellung eines integrierten Nahfeldmodells von Gebinden hochaktiver Abfälle im Salzstock Gorleben: geochemisch fundierter Quellterm für HAW-Glas, abgebrannte Brennelemente und Zement (Quellterm Projekt).

Das Ziel des ERAM-Projektes war die Bereitstellung von Löslichkeits- und Sorptionsdaten an Versatzstoffen unter Berücksichtigung von in den Abfällen vorhandenen Komplexbildnern sowie die Ermittlung von Kd-Werten und Deckgebirgsgesteinen im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens für den Weiterbetrieb des ERAM. Darüber hinaus wurden die verfügbaren Deckgebirgsgesteine und -wässer verwendet, um sogenannte in-situ K_d -Werte abzuleiten [153].

Zur Bewertung der Sicherheit der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salzstock Gorleben war das Freisetzungverhalten von HAW-Glas, abgebrannten Kernbrennstoffen und Zement erforderlich und musste als Quellterm für die Anwendung in Modellrechnungen mathematisch beschreibbar sein. Im Rahmen des Projektes „Erstellung eines integrierten Nahfeldmodells von Gebinden hochaktiver Abfälle im Salzstock Gorleben: Geochemisch fundierter Quellterm für HAW-Glas, abgebrannte Brennelemente und Zement“ sollte im Jahr 1995 der damalige Stand von Wissenschaft und Technik über das Auslagverhalten hochaktiver Abfälle und über das zugehörige Radionuklidverhalten unter den in Gorleben zu erwartenden Bedingungen zusammengefasst, dokumentiert und ausgewertet werden. Die Datengrundlage waren Arbeiten des HMI zu Glas, für Kernbrennstoffe Arbeiten der KWU bis 1982 sowie Ergebnisse von F&E-Arbeiten des INE. Die Ergebnisse verschiedener EU-Projekte und anderer internationaler Arbeiten wurden ebenfalls berücksichtigt. Vom BfS wurden die Daten der vollständigen quantitativen chemischen Analyse der salinaren Lösungen und von Evaporitproben des für die Endlagerbereiche vorgesehenen stratigraphischen Horizontes in Gorleben zur Verfügung gestellt.

Die Arbeiten umfassten das Auslagverhalten der jeweiligen Abfallmatrix, die Freisetzung einzelner Radionuklide, die Modellierung der Auslagung und des Radionuklidverhaltens sowie die Durchführung standortspezifischer Experimente insbesondere mit der sogenannten Gorleben-Lauge.

Neben zahlreichen Zwischen- und Statusberichten wurden insgesamt 9 Abschlussberichte an den Auftraggeber BfS abgeliefert, die sich über das Auslagverhalten und Radionuklidfreisetzung von HAW-Glas, abgebrannten Kernbrennstoffen und zementierten Abfallprodukten bis zur Ableitung eines geochemisch fundierten Quellterms für diese Abfälle erstreckten.

Seit 2011 existiert ein neuer Rahmenvertrag zwischen dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) über "Studien zur Entwicklung des geochemischen Milieus und

den daraus resultierenden Radionuklidkonzentrationen". Dieser setzt die Randbedingungen für verschiedene Arbeiten des INE im Rahmen der Vorsorgemaßnahmen, der geordneten Schließung und der Rückfalloption (derzeit: Vollverfüllung) für die Schachtanlage Asse II.

Im Rahmen der „Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000“ [145], die zum ersten Moratorium führte, sollten konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen in Bezug auf die Endlagerung geklärt werden. Das BMU hatte 12 konkrete Fragen (Zweifelsfragen) erarbeitet, die grundsätzlich für alle in Deutschland möglichen Wirtsgesteine galten und geklärt werden sollten. Das BfS wurde beauftragt, diese Fragestellungen zu bearbeiten und die Ergebnisse in einem Synthesebericht zusammen zu fassen. Die 12 Fragestellungen wurden ausgeschrieben und die entsprechenden Aufträge durch das BfS erteilt. Die Arbeiten fanden im Zeitraum 2002 bis 2005 statt. In einem Workshop wurden die Ergebnisse vorgestellt und in einem Synthesebericht „Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle – Wirtsgesteine im Vergleich“ publiziert [154].

Das INE koordinierte und erarbeitete die Frage 5: „Geochemische Prozesse bei der Ausbreitung von Schadstoffen aus einem Endlager für radioaktive Abfälle (Geochemische Prozesse)“ [155] und war beteiligt an der Fragestellung 8: „Untersuchung zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgediente Brennelemente und radioaktive Abfälle (Kritikalität)“ [156].

11.4 F&E Vorhaben mit Industriepartnern

Industriepartner im Rahmen der Endlagerforschung des INE waren und sind ausländische Waste Management Organisationen. Für die französische Agence national pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) bearbeitete das INE unter anderem einen Auftrag zur den Hydrolysekonstanten und Löslichkeitsdaten für Hydroxide, Oxide und Carbonate für Actiniden und Radium sowie die thermodynamischen Daten der festen Radionuklidphasen.

Im Rahmen des belgischen Endlagerprogramms arbeitet INE seit 2007 an Themen zum Verhalten von abgebrannten Kernbrennstoffen unter den dort zu erwartenden Bedingungen, die durch Betonbehälterkonzept definiert sind. Mit ONDRAF-NIRAS wurde ein Rahmenvertrag bis zum Jahr 2020 abgeschlossen, der neben den Arbeiten zu Kernbrennstoff auch Arbeiten zum belgischen Wirtsgestein „Boom Clay“ umfasst.

Aufträge von der schwedischen Waste Management Organisation Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) erstreckten sich über den Einbau von Radium in Sulfatphasen und die Reaktion von Actiniden mit Degradationsprodukten von organischen radioaktiven Abfällen.

Weitere Aufträge für Studien zur Endlagerradioaktiver Abfälle erhielt das INE von der Gesellschaft für Nuklearservice (GNS), der DBE und dem Öko-Institut.

12 Nationale und internationale Kooperationen und Beteiligungen

Seit dem Bestehen des INE wurden zahlreiche Kooperationen mit nationalen und internationalen Institutionen gepflegt, wobei einige durch Kooperationsverträge bzw. durch Memoranden of Understanding formal geregelt waren. Am erfolgreichsten war die Kooperation mit dem Paul Scherer Institut (PSI, Labor für Entsorgung (PSI-LES) in der Schweiz auf dem Gebiet der Endlagersicherheitsforschung. Diese Kooperation war durch jährliche Workshops (Koordinierungstreffen) und dem darauf basierenden Vertrauen und persönlichen Freundschaften charakterisiert. Insgesamt finden sich ca. 20 gemeinsame Publikationen von Mitarbeitern des INE und des PSI-LES. Gerade dieses Zusammenarbeiten zwischen INE und PSI-LES zeigte, wie stark der Erfolg wissenschaftlicher Kooperationen von Personen und deren Engagement bestimmt ist. Es liegt auf der Hand, dass mit zunehmender Entfernung zwischen den kooperierenden Institutionen die Kooperationen schwieriger werden. Insgesamt waren jedoch Wissenschaftler aus Japan, Korea, Russland, USA, Frankreich, Israel und anderen Ländern im Rahmen von bilateralen Kooperationen im INE.

Im Rahmen internationaler Kooperationen war das INE in mehreren Coordinated Research Projects der IAEA eingebunden. Im Rahmen der OECD/NEA ist das INE Mitglied in den beiden Co-operative Projects „Clay Club“ und „Salt Club“ der „Integration Group for the Safety Case“ der OECD/NEA. Diese Arbeitsgruppen haben die Aufgabe die Kooperation zwischen den Mitgliedsländern bzw. Organisationen zu fördern, die diese Wirtsgesteine für die Endlagerung in Betracht ziehen. Weiterhin ist das INE in dem OECD/NEA „Thermochemical Database Project (TDB)“ sowohl in der Executive Group als auch im Management Board vertreten.

12.1 Nationales Datenbank Projekt THEREDA

Die Konsequenzen eines Wasserzutritts in ein Endlager wird anhand von numerischen Simulationsrechnungen mit integrierten Rechenmodellen ermittelt. Hierzu müssen die verschiedenen in der wässriger Lösung ablaufenden, homogenen und heterogenen Reaktionen mit Hilfe von thermodynamischer Konstanten zuverlässig parametrisiert sein. Von besonderer Bedeutung sind die Löslichkeiten der Radionuklide, die durch das jeweilige geochemische System bestimmt sind. Da in Deutschland im Salzgestein aber auch in tiefen Tonschichten mit hochkonzentrierten Lösungen zu rechnen ist, können die in anderen Ländern entwickelten Datenbasen nur bedingt verwendet werden.

Zur Erarbeitung einer einheitlichen und umfassenden thermodynamische Referenzdatenbasis rief INE einen *„Arbeitskreis Thermodynamische Standarddatenbasis“ (ATS)* ins Leben. Seit 2006 wurden die Aktivitäten des ATS im Projektverbund "THEREDA" (Thermodynamische Referenzdatenbasis) von *BMBF*, *BMWi* und *BfS* gefördert. Neben INE waren 4 Partnerorganisationen an THEREDA beteiligt [157].

Die Spezialität von THEREDA ist die Ausrichtung der Datenbank auf hochkonzentrierte Lösungen, in denen die chemischen Aktivitäten der einzelnen Spezies mit Hilfe des von K. Pitzer [158] entwickelten Aktivitätsmodells beschrieben wird [157].

12.2 MIGRATION Konferenzen

Seit der „Fourth International Conference on the Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere, MIGRATION 93“, ist das INE in die Organisation der MIGRATION Konferenz-Serie eingebunden. Die MIGRATION-Konferenzen bieten ein internationales Forum für den zeitnahen Austausch von wissenschaftlichen Informationen über chemische Prozesse des Migrationsverhalten von Actiniden und Spaltprodukten in natürlichen Aquifersystemen. Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen, das Prozessverständnis und die Modellierung dieser Prozesse sind wichtige Themen dieser Konferenzen. Diese Themen sind Grundlage für das mechanistische Verständnis der Migrationsverhalten von langlebigen Radionukliden in der Geosphäre und müssen in Langzeitsicherheitsanalysen von Endlagern berücksichtigt werden. Da diese Fragestellungen weltweit große Relevanz haben, finden die MIGRATION Konferenzen in zweijährigem Rhythmus abwechselnd in Europa, Nordamerika und Ostasien statt.

13 Was haben 50 Jahre F&E-Arbeiten zur Endlagerung bewirkt?

Im vorliegenden Bericht konnte dargelegt werden, dass das Bewusstsein zur Notwendigkeit der Behandlung und Endlagerung von radioaktiven Abfällen seit der Gründung des Kernforschungszentrums vorhanden war. In diesem Zusammenhang wurde zunächst auf Abfallbehandlungsmethoden der chemischen Industrie und zur Endlagerung auf Vorschläge aus dem Ausland zurückgegriffen. In der dicht besiedelten Rheinebene wurden allerdings Endlageroptionen wie das oberflächennahe Vergraben von (geringkontaminierten) Fällschlamm und die Verpressung von tritiumhaltigen Abwässern weniger aus wissenschaftlich-technischen, sondern aus Akzeptanzgründen nicht umgesetzt.

Auch die in den 1960er und 1970er Jahren international praktizierten Versenkung radioaktiver Abfälle im Meer wurde als Option geprüft und eine Anzahl von Abfällen (480 200 L-Fässer) zusammen mit insgesamt 35 310 Gebinden [159] aus anderen europäischen Ländern im Atlantik versenkt. Diese Entsorgungsmethode fand allerdings keine Akzeptanz bei den zuständigen Ministerien.

In Deutschland wurde die Endlagerung aller Arten radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen an Land präferiert. Vom Kernforschungszentrum wurde eine nicht begehbare Kaverne in einem norddeutschen Salzstock vorgeschlagen und eine Auswahl möglicher Standorte vorgelegt. Allerdings war auch hier die Akzeptanz der betroffenen Gemeinden und Bürger nicht gegeben.

Mit dem Kauf des Salzbergwerks Asse II durch die Gesellschaft für Strahlenforschung eröffnete sich eine Entsorgungsmöglichkeit für die im Kernforschungszentrum anfallenden Abfälle. KfK erarbeitete die kerntechnischen Aspekte die Sicherheitsberichte, wie die Aktivitätsbegrenzung in den Gebinden oder die Löslichkeit von Radionukliden in Salzlösungen, aber auch die Konzeption von Abschirmbehältern für den Transport und die Einlagerung (u. A. „Verlorene Betonabschirmungen VBA).

Die Euphorie bezüglich des Ausbaus der Kernenergienutzung in den 1960er und 1970er Jahren führte früh zur Notwendigkeit, auch Konzepte zur Endlagerung hochradioaktiver Wärme erzeugender Abfälle zu entwickeln. Die damit verbundene Aufheizung des Wirtsgesteins und die dadurch bedingte thermo-mechanische Effekte wurden von KfK zusammen mit der GSF in zahlreichen Versuchsfelder im Salzbergwerk Asse intensiv untersucht und mittels Rechenmodellen theoretisch beschrieben. Diese Versuche und die entwickelten thermo-mechanischen Rechenmodelle stellen bis heute die Basis für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Steinsalz Formationen dar.

Die Korrosion von Behältermaterialien wurde im Labor und in-situ im Forschungsbergwerk Asse II untersucht. Die Materialauswahl umfasste hauptsächlich verschiedene Stähle, Eisen- und Nickel-Basislegierungen und Titan-Palladium Legierungen. Die meisten hochlegierten Stähle zeigten nach mehr oder weniger langen Inkubationszeiten lokale Korrosionserscheinungen wie Lochfrass. Es gibt bis heute keine Möglichkeit die Dauer der Inkubationszeit vorherzusagen. Die geringste Neigung zur Korrosion wurde bei Ti-Pd Legierungen beobachtet. Allerdings zeigten auch niedriglegierte Stähle (Baustahl) in Salzlösungen zwar eine relativ hohe im Vergleich zu Ti-Pd, aber prognostizierbare gleichförmige Korrosionsrate. Diese Stähle bilden die Basis für Endlagerbehälter, wie den Pollux.

Im Zuge der Planung für das „Integrierte Entsorgungszentrum“ wurden umfangreiche Arbeiten zu Wechselwirkungen von radioaktiven Abfällen mit potentiell auftretenden Salzlösungen durchgeführt, wobei anfangs zementierte schwach- und mittelradioaktive und verglaste hochradioaktive Abfälle im Fokus standen. Im Laufe der 1990er Jahre gewann dann der abgebrannte Kernbrennstoff als Abfallform zunehmend Bedeutung. Die Arbeiten und Ergebnisse zu Zement in Salzlösungen stellen heute die Basis für den Quellterm der Radionuklidfreisetzung im Falle eines Lösungszutritts in das Salzbergwerk Asse dar. Die Arbeiten zu den hochradioaktiven Gläsern wurden zuletzt im Rahmen der „vorläufigen Sicherheitsstudie Gorleben“ in 2012 genutzt. Die Kompetenz des KIT bezüglich des Verhaltens von abgebranntem Kernbrennstoff unter Endlagerbedingungen bestätigte sich international bei der Koordinierung eines EU Projekts und durch Aufträge von ausländischen Abfallentsorgungsorganisationen.

Seit Ende der 1980er Jahren veränderten sich die ursprünglichen von ingenieurtechnischen Gesichtspunkten geprägten Sicherheitskonzepte für Endlager zu fundamentalem Vorgehen. Der Begriff „Safety Case“ wurde international eingeführt und sollte mit vernünftigen und belegbaren Argumenten die Sicherheit eines Endlagers belegen. Ein wesentlicher Bestandteil ist die Diskussion der Ungewissheiten, die aus dem begrenzten wissenschaftlichen Verständnis bzw. der Datenbasis beruhen. Hieraus ergaben sich Herausforderungen, die Einfluss auf das F&E-Programm des Forschungszentrums hatten. Dies führte dazu, dass verstärkt die fundamentalen geochemisch/thermodynamisch kontrollierten Prozess untersucht und quantifiziert wurden. Hierzu gehörten die Quantifizierung des Einflusses der Ionenstärke in hochkonzentrierten Salzlösungen und der Einfluss verschiedener Hydroxo-, Carbonato- oder anderer Komplexe auf die Radionuklidlöslichkeiten. Die bis dahin unbeachtete Existenz von Kolloiden und deren Komplexierungsverhalten für Radionuklide (insbesondere für die langlebigen Actiniden) gelangte durch die Entdeckung dieser Spezies als Vehikel für der Radionuklidtransport Bedeutung [160]. Die Ergebnisse des KIT fließen in die thermochemischen Datenbanken der NEA ein und werden in verschiedenen Endlagerprojekten (z.B. Waste Isolation Pilot Plant WIPP in USA) genutzt.

Seit Beginn der 1980er Jahren wurden in Deutschland bereits Untersuchungen hinsichtlich der Eignung anderer Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle initiiert. Ende der 1990er Jahre mit den Diskussionen um Ausstieg aus der Kernenergienutzung und der Abkehr vom Steinsalz als Endlager-Wirtsgestein wurde eine Umpriorisierung vorgenommen und die Untersuchungen anderer Wirtsgesteine, vor allem Tonstein, verstärkt. Durch das Interesse an nichtsalinaren Wirtsgesteine gewannen Forschungsarbeiten zur Radionuklidrückhaltung in diesen Gesteinen Bedeutung. Die F&E-Arbeiten erstrecken/erstrecken sich auf die Radionuklidrückhaltung in der gesamten Bandbreite der in Europa als Wirtsgestein in Frage kommenden Gesteine, wie Tongestein und kristalline Gesteine, aber auch verschiedene Deckgebirgsgesteine von Endlagerstandorten. Die Studien zur Radionuklidrückhaltung umfassen die Quantifizierung und Modellierung der verschiedenen Sorptionsprozesse auf der Basis des molekularen Prozessverständnisses, sowie Einbaureaktionen für Radionuklide in natürliche Gesteinskomponenten oder Ausfällungsreaktionen. Auch diese Arbeiten werden im nationalen und internationalen Kontext hoch geschätzt.

Die F&E-Arbeiten zur Endlagerforschung im KIT profitierten natürlich sehr stark von allgemeinen unabhängigen Entwicklungen der Technik. Dies betrifft die z.B. Laserentwicklung, die die Laserspektroskope ermöglichte und zum Verständnis des Verhaltens von Spurenkonzentrationen von Radionukliden beitrug. Auch auf den Gebiet der Modellierung lieferte die Entwicklung der Methode der Finiten Elemente, die 3-dimensionale thermomechanische Berechnungen von Endlagerstrukturen ermöglichte [161], einen

wesentlichen Input. Insgesamt fand in diesen 50 Jahren eine gewaltige Entwicklung der chemischen Analytik statt, die ihren Niederschlag in den F&E-Arbeiten zur Endlagerung fand.

Die Forschungsarbeiten zur sicheren Endlagerung im KIT entwickelten sich innerhalb dieser 50 Jahre von einem ingenieurtechnischen Vorgehen zur anwendungsorientierten Grundlagenforschung, die hohes wissenschaftliches Ansehen erlangt hat. Das KIT wird wesentliche Beiträge zu allen geochemischen und radiochemischen für alle in Frage kommenden Wirtsgesteine in Deutschland liefern. Die Mitarbeiter sind hoch motiviert und gerne bereit ihr Know-how auf allen Ebenen einzubringen.

14 Zusammenfassung

Die F&E-Arbeiten zur Behandlung radioaktiver Abfälle und deren sichere Endlagerung waren Thema seit der Gründung des Kernforschungszentrums Karlsruhe. Während der Implementierungs-Phase der Kerntechnik standen ingenieurtechnische Methoden im Vordergrund der Forschungsarbeiten. Diese Phase war bestimmt durch die Vorstellung von der unbegrenzten Möglichkeiten durch die friedliche Nutzung der Kernenergie bezüglich der Energieerzeugung, der Medizin, zur Bekämpfung von Krankheitsüberträgern und der Ernährung. Als Folge der Energiekrise 1973 wurde das Einsparen von Öl in Deutschland zum Ziel erklärt. Es lag auf der Hand, dass die Nutzung der Kernenergie als Instrument zur Reduktion der Dominanz des Rohöls bei der Energieversorgung angesehen wurde. Diese Implementierungsphase dauerte etwa bis 1974, wobei die Forschungsarbeiten auf die endlagergerechte Konditionierung und Charakterisierung der Abfälle ausgerichtet waren. Bezüglich der Endlagerung wurde in dieser Phase das Salzbergwerk Asse II erworben und zunächst als Versuchsendlager betrieben. Ab 1971 wurde dort routinemäßig endgelagert. In dieser frühen Phase der Endlagerforschung wurden auch Konzepte verfolgt, die heute in Deutschland undenkbar wären. Hierzu gehörten die Arbeiten zur behälterlosen Endlagerung in Salzkavernen, das Vergraben der Abfälle im Boden oder die Versenkung im Meer. Positive Aspekte der Forschungsarbeiten waren die deutliche Senkung der Dosisbelastung des Betriebspersonals und die Optimierung von Transportprozessen. Für die Planung der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle wurden sogenannte „Erhitzerversuche“ im Salzbergwerk Asse durchgeführt, welche wichtige Erkenntnisse über das thermomechanische Verhalten des Wirtsgesteins insbesondere die Konvergenzprozesse lieferten. Andere Wirtsgesteine wie kristalline Gesteine oder Tongesteine wurden in dieser Zeit zwar diskutiert, jedoch galt Steinsalz als die beste Option.

Der Ausbau der Kernenergie erreichte in den Jahren 1975 - 1985 ihren Höhepunkt. In den 1980er Jahren wurden 9 große Leistungsreaktoren in Deutschland in Betrieb genommen. In dieser Zeit wurde versucht den geschlossenen Brennstoffkreislauf zu etablieren. Hierzu diente der KNK als Prototyp eines schnellen Brutreaktors und die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe. In Gorleben sollte ein großes nationales Entsorgungszentrum einschließlich des Endlagers entstehen. In dieser Zeit orientierten sich die F&E-Arbeiten im Kernforschungszentrum an den Bedürfnissen der Industrie. Bezüglich der Endlagerforschung wurden mit Langzeit Auslaug- und Korrosionsuntersuchungen an Gläsern und Zementprodukten begonnen. Infolge der Verabschiedung der Novelle zum Atomgesetz im Jahr 1976 erlosch die Einlagerungsgenehmigung für das Salzbergwerk Asse. Das Kernforschungszentrum und die GSF versuchten ihre Kompetenz auf dem Gebiet der Endlagerforschung zu bündeln und gründeten die Entwicklungsgemeinschaft Tief Lagerung, die allerdings nur wenige Jahre bis 1981 existierte. In dieser Zeit wurde die Eignungsanalyse für das Eisenerzbergwerk Konrad durchgeführt. Die Endlagerforschung im KfK wurde von der Abteilung Behandlung Radioaktiver Abfälle (ABRA) in das wissenschaftliche Institut für Nukleare Entsorgungstechnik überführt. Die Bundesregierung unterstützte die Entwicklung der Kerntechnik und die Endlagerforschung. In der Bevölkerung jedoch verstärkte sich die Opposition gegen die nukleare Energieerzeugung. Dies zeigte sich an den großen Demonstrationen gegen das geplante KKW Wyl und Brokdorf. Die Opposition auch in den politischen Parteien verstärkte sich nach dem Kernschmelzunfall im amerikanischen KKW Three Mile Island. Für die Endlagerforschung hatte diese Entwicklung wenig direkte Auswirkungen.

Im Jahr 1986 ereignete sich der schwere Unfall im russischen KKW Tschernobyl. Als Reaktion wurde in Deutschland das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gegründet und der SPD-Parteitag beschloss den Ausstieg aus der Kernenergienutzung. Aufgrund zunehmender Proteste, abnehmender Unterstützung durch die Regierung und steigender Kosten verzichtete die Industrie auf die Errichtung einer eigenen Wiederaufarbeitungsanlage. Zur Wiederaufarbeitung abgebrannter Kernbrennstoffe wurden Verträge mit französischen bzw. britischen Unternehmen (Cogema bzw. BNFL) geschlossen und Brennelemente dorthin transportiert. Damit war dem gesetzlich geforderten Entsorgungsnachweis genüge getan. Es lag auf der Hand, dass nach Aufgabe der Wiederaufarbeitung die Arbeiten zur Abfallbehandlung weitgehend beendet wurden, lediglich die Arbeiten zur Verglasung von hochradioaktiven flüssigen Abfällen wurden fortgesetzt und eine heiße Anlage in Mol bei der Eurochimic Anlage in Betrieb genommen und der dort vorhandene Abfall erfolgreich zu Glas geschmolzen. In dieser Zeit wurden auch die Arbeiten zur Erkundung des Salzstocks in Gorleben durchgeführt.

Mit Prof. Jae Il Kim als Direktor des INE verlegten sich die Forschungsarbeiten von den technischen Anwendungen auf grundlagenorientierte Untersuchungen. Seit Mitte der 1990er Jahre wurden die F&E-Arbeiten zur Endlagerung als gesellschaftliche Vorsorgeforschung aufgefasst und die Untersuchungen zur Mobilisierung und Rückhaltung von Radionukliden in den verschiedenen Barrieren des Endlager standen im Vordergrund. Nach einer Änderung des Atomgesetzes in 1994 war auch die direkte Endlagerung abgebrannter Kernbrennstoffe zulässig. Daher wurde das Verhalten und die Mobilisierung von Radionukliden aus der Abfallform „abgebrannter Kernbrennstoff“ ins Forschungsprogramm aufgenommen. Neben dem bis dato präferierten Wirtsgestein Steinsalz förderte der Projektträger zunehmend Untersuchungen zur Endlagerung in nicht-salinaren Wirtsgesteinen. In diesem Zusammenhang wurde das Kompetenzspektrum des INE auf die kristalline und Tongesteine ausgedehnt und genießt internationale Anerkennung.

Seit etwa dem Jahr 2000 dauert die „Ausstiegsphase“ aus der Kernenergienutzung an. Das Budget der F&E-Arbeiten zur Endlagerung ist seit Jahren gedeckelt, die Forschungsarbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle werden zunehmend durch Projekte bestimmt. Forschungsarbeiten werden für ausländische Waste Management Organisationen, das BfS, EU-Projekte in den Forschungsrahmenprogrammen (EURATOM) oder durch den Projektträger PTKA finanziert. Die Forschungsthemen richten sich auf das Verständnis der Prozesse auf der molekularen Ebene, denen Radionuklide auf ihrem Weg vom Abfall im Endlager in die Biosphäre unterworfen sind. Diese thematische Ausrichtung macht diese Forschungsthemen nach wie vor interessant für Studenten und Doktoranden.

Die in dieser Arbeit vorgenommene Zusammenstellung der Endlagerforschung über einen Zeitraum von über 50 Jahren zeigt die Entwicklung der Forschung auf. Anfänglich waren die Forschungsthemen durch das ingenieurmäßige Vorgehen zu Lösung des Abfallproblems bestimmt. Hierbei wurde relativ kurze Zeiträume von einigen 1000 Jahren unterstellt. Auch das Akzeptanzproblem stellte sich nur bedingt. Im Zuge der zunehmenden Opposition in der Bevölkerung gegen über der nuklearen Energieerzeugung und deren Einfluss auf die Politik musste sich auch die Richtung der Endlagerforschung verändern. „Ausprobieren“ wurde durch wissenschaftliche Untersuchungen und Erkenntnisse ersetzt.

Die Anwendung moderner wissenschaftlichen Methoden bei der Endlagerforschung lieferte einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung des Wissensgebiets insgesamt. Die gewonnenen Erkenntnisse haben wesentlich zum Verständnis und zur Quantifizierung der Prozesse beigetragen, die die Mobilisierung aber auch die Rückhaltung der Radionuklide bewirken. Früher wurde versucht die Technik der

Entsorgung in den Vordergrund zu stellen und die Isolation der Abfälle bzw. Rückhaltung der Radionuklide in einer Salzformation axiomatisch unterstellt. Heute wird zwar weiterhin davon ausgegangen, dass das Endlager trocken bleibt und keine Lösungen oder Wasser zu den Abfällen gelangt. Für den Fall eines solchen Ereignis, unabhängig zu welchem Zeitpunkt dieser in der Zukunft auftreten würde, sind wir heute in der Lage, anhand von thermodynamischen und geochemischen Erkenntnissen einen Sicherheitsnachweis zu führen. Der heute erforderliche Sicherheitsnachweis über eine Million Jahre [162] kann nur auf Basis fundamentalen Prozessverständnisses auf der molekularen aber auch der makroskopischen Ebene geführt werden.

Die zunehmende Skepsis gegen über der Kernenergie und der damit verbundene Ausstiegbeschluss Atomgesetz §1, „1. die Nutzung der Kernenergie zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität geordnet zu beenden und bis zum Zeitpunkt der Beendigung den geordneten Betrieb sicherzustellen“, hat dazu geführt, dass in Deutschland kaum noch Labors zur Untersuchung des Verhaltens radioaktiver Abfälle und Actiniden unter Endlagerbedingungen verfügbar sind. Experimente mit Actiniden und besonders Langzeitversuche, die mehrere Jahre Äquilibrierung erfordern, sind nur noch im INE möglich. Insofern verfügt das KIT mit dem Institut für Nukleare Entsorgung mit seinem Kontrollbereich und den entsprechenden Einrichtungen und Umgangsgenehmigungen über ein Alleinstellungsmerkmal, das auch im internationalen Rahmen Anerkennung findet.

15 Literaturverzeichnis

- [1] D. Möller, *Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland*. Frankfurt: Peter Lang, Internationaler Verlag der Wissenschaften, 2009.
- [2] W. Issel, *Die Wiederaufarbeitung von bestrahlten Kernbrennstoffen in der Bundesrepublik Deutschland*. Frankfurt: Peter Lang, Europäischer Verlag der Wissenschaften, 2002.
- [3] A. Tiggemann, *Die „Achillesferse“ der Kernenergie in Deutschland. Zur Kernenergiekontroverse und Geschichte der Entsorgung von den Anfängen bis Gorleben 1955 bis 1985* Lauf an der Pegnitz Europaforum-Verlag, 2004.
- [4] M. Hartmann, *Der Weg zum KIT : von der jahrzehntelangen Zusammenarbeit des Forschungszentrums Karlsruhe mit der Universität Karlsruhe (TH) zur Gründung des Karlsruher Instituts für Technologie; eine Darstellung nach den Aussagen von Zeitzeugen*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2013.
- [5] *Geschichten aus der Geschichte : 50 Jahre Forschungszentrum Karlsruhe; bereit für die Zukunft*. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gesellschaft, 2006.
- [6] DAfF. (2016). *Geschichte der Kernenergie* Available: <http://www.kernenergie.de/kernenergie/themen/geschichte/>
- [7] J. Hadermann, H. Issler und A. Zurkinden, *Die nukleare Entsorgung in der Schweiz 1945–2006: Von den Anfängen bis zum Entsorgungsnachweis*. Zürich: Verlag Neue Züricher Zeitung, 2014.
- [8] W. Kliefoth, „Kernreaktor-Bau-und-Betriebsgesellschaft / Europäische Organisation für Kernforschung“, *Physik Journal*, Vol. 12, pp. 425-428, 1956.
- [9] H. Krause und H. Ramdohr, „Studiengruppe Tieflagerung radioaktiver Abfaelle: Jahresbericht 1964“, Studiengruppe Tieflagerung Karlsruhe, KfK 357, 1965.
- [10] Wikipedia. (2016). *Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (HMGU)*. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Helmholtz-Zentrum_M%C3%BCnchen#Forschungsbergwerk_Asse
- [11] H. Ramdohr, „Untersuchungen zur Standortwahl einer Versuchskaverne zur Einlagerung radioaktiver Ruckstaende“, Forschungsberichte des BMWF-FBK, 1965.
- [12] D. Ipsen, S. Kost und H. Weichler, „Analyse der Nutzungsgeschichte und der Planungs- und Beteiligungsformen der Schachanlage Asse II: Endbericht“, Arbeitsgruppe Empirische Planungsforschung (AEP), Universität Kassel, 2010.
- [13] H. Böhm, „F+E für das Entsorgungskonzept der Bundesregierung“, *Atomwirtschaft-Atomtechnik*, Vol. 22, pp. 186-190, 1977.
- [14] M. Hagen, „Stand der Verwirklichung des Entsorgungskonzeptes aus der Sicht der Bundesregierung“, in Sammlung der Vorträge anlässlich des 2. Statusberichtes des Projektes Wiederaufbereitung und Abfallbehandlung, Karlsruhe am 18.11.1977, KfK 2615, 1978.
- [15] IAEA, „Disposal of radioactive wastes“, in *Disposal of radioactive waste*, Monaco, F, 16 to 21 November 1959, 1960.
- [16] H. Ramdohr, „Schriftumsuebersicht ueber Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe in Salzformationen“, Studiengruppe Tieflagerung, Karlsruhe KfK 205, 1964.
- [17] S. Krawczynski, „Die Verdampfung als Methode zur Entaktivierung von radioaktiven Abwaessern“ *Kerntechnik*, Vol. 1, pp. 15-21, 60-66, 145-149, 1959.

- [18] S. Krawczynski, „Behandlung radioaktiver Abwaesser“, *Das Gas- und Wasserfach (GWF)*, Vol. 100, pp. 1-8, 1959.
- [19] S. Krawczynski, „Die Behandlung der Abwässer auf dem Gelände des Atomforschungszentrums Karlsruhe“, Kernforschungszentrum, Karlsruhe, KfK 36, 1960.
- [20] H. Krause, S. Drobnik, R. Geisel, W. Guber, W. Hempelmann, M. Kienhoefer, W. Kluger, O. Nentwich, G. Rudolph, G. Schulte und E. Zimmer, „Abteilung Dekontaminationsbetriebe – Jahresbericht 1968“, Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe, KfK 1030, 1970.
- [21] E. Merz, K. Kühn, M. Bloser, and A. Matting, „Implementation of the Federal Republic of Germany's strategy of radioactive waste disposal“, in *Siting, design and construction of underground repositories for radioactive wastes*, Hannover, 3-7 March 1986, pp. 77-86.
- [22] H. Krause, „Abteilung Dekontaminationsbetriebe. Jahresbericht 1969“, Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe, KfK 1346, 1971.
- [23] W. Hild, „Disposal of Radioactive Wastes into the Underground in the Federal Republic of Germany. A Survey on Practical Experience and R + D-Work“, Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. , Karlsruhe, KfK 1820, 1973.
- [24] H. Nickel, „The spent fuel and waste management concept of German nuclear power plants“, *Atomwirtsch.-Atomtech.*, Vol. 37, p. 368, 1992.
- [25] W. Bechthold, W. Diefenbacher, „Untersuchungen zur langfristigen Sicherheit bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle“, in H. Krause and G. Rudolph (Eds.), *Abteilung Behandlung radioaktiver Abfälle: Jahresbericht 1974*. Karlsruhe: Kernforschungszentrum, KfK 2212, 1975.
- [26] W. Diefenbacher, H. Heil, H. Krause, M. C. Schuchardt, H. Borchert, K. Duerr, K. Klarr, K. Kuehn, B. Lamby, G. Staupendahl, E. Albrecht, H. Kolditz, K. Schneckenberger, K. Thielemann und H. E. Trabant, „Endlagerung radioaktiver Abfaelle. Jahresbericht 1969“, in KfK 1212, GSF-T 27, 1971.
- [27] H. Krause and G. Rudolph, „Abteilung Behandlung radioaktiver Abfälle: Jahresbericht 1974“, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Abteilung Behandlung radioaktiver Abfälle, KfK 2212, 1975.
- [28] A. Tiggemann, „Die Achillesferse der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland : zur Kernenergiekontroverse und Geschichte der nuklearen Entsorgung von den Anfängen bis Gorleben 1955 bis 1985“, *Subsidia academica : Reihe A, Neuere und neueste Geschichte*; Bd. 5, Europaforum-Verl., Lauf an der Pegnitz, 2004.
- [29] Wikipedia. (2016). *Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf*. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Wiederaufarbeitungsanlage_Wackersdorf
- [30] Generallandesarchiv Karlsruhe. *Findbuch 69 KfK GF-1: Überlieferungsgeschichte*. Available: <https://www2.landesarchiv-bw.de/ofs21/olf/einfueh.php?bestand=50257>
- [31] H. Krause, „Konzept für die künftigen Arbeiten des Insituts für Nukleare Entsorgungstechnik (INE)“, INE, Karlsruhe, 1990.
- [32] R. Kroebel, „Ziele und Stand des Projekts Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung (PWA)“, in *Kernforschungszentrum Karlsruhe / Sammlung der Vorträge anlässlich des Statusberichtes des Projektes Wiederaufbereitung und Abfallbehandlung*, Karlsruhe, 17. 11. 1975 pp. 3/1 -3/40, 1975.
- [33] Projektträger Karlsruhe (PTKA) and Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), „Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2002-2006)“, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Referat III B3 und Projektträger Karlsruhe – Wassertechnologie und Entsorgung (PtWT+E), Forschungszentrum Karlsruhe, 2001.
- [34] Projektträger Karlsruhe (PTKA) and Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle: Förderkonzept des BMWi (2015-2018)“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Referat IIA5 „Reaktorsicherheits- und

- Endlagerforschung, Uranbergbausanierung“ und Projektträger Karlsruhe – Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE), Karlsruher Institut für Technologie, 2015.
- [35] Projektträger Karlsruhe (PTKA). (2015). *Endlagerforschung*. Available: <http://www.entsorgungsforschung.de/128.php>
- [36] H. Ramdohr, „Wohin mit dem Atommuell? Endgueltige Unterbringung radioaktiver Abfaelle und Rueckstaende in der Bundesrepublik Deutschland“, *Umschau in Wissenschaft und Technik*, Vol. 67 (1967), pp. 219-24, 1967.
- [37] G. Grison, H. Krause, P. C. Lévêque und F. Pantanetti, „Sitologie du stockage des dechets radio-actifs dans la communaute europeenne“, European Commission, Brussels, EUR 3664 F, 1968.
- [38] Bundesamt für Stahlschutz (BfS), „Endlagerung radioaktiver Abfälle als nationale Aufgabe“, Salzgitter, 2005.
- [39] E. Albrecht, H. Krause, K. Kühn und H. Ramdohr, „Sicherheitsstudien zu den Forschungsarbeiten und der Versuchslagerung niedrig aktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse II“, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH. , München, 1966.
- [40] H. Ramdohr, H. Krause, E. Albrecht und K. Kühn, „Memorandum über die sichere Lagerung niedrig- und mittelaktiver Rückstände (außer Kernbrennstoffen) im Salzbergwerk Asse“, 1967.
- [41] E. Albrecht, H. Kleimann, H. Kolditz, F. Schwägermann, K. Thielemann, K. Dürr, K. Klarr, K. Kühn, B. Lamby, G. Staupendahl, W. Diefenbacher, J. Heil, H. Krause und M. C. Schuchardt, „Sicherheitsstudien für die Einlagerung radioaktiver Rückstände im Salzbergwerk Asse II“, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH. , München, 1970.
- [42] E. Albrecht, K. Kuehn, F. Perzl, W. Diefenbacher, J. Heil, H. Krause und M. C. Schuchardt, „Disposal of radioactive wastes by storage in a salt mine in the Federal Republic of Germany“, in *Management of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes. Proceedings. Aix-en-Provence, 7-11 Sept.1970. Vienna: IAEA*, pp. 753-71, 1970.
- [43] H. Hepp, H. Krause, M. C. Schuchardt, H. Borchert, K. Duerr, K. Klarr, K. Kuehn, G. Staupendahl, E. Albrecht, H. Kolditz, K. Thielemann und H. Trabandt, „Tieflagerung radioaktiver Abfaelle. Jahresbericht 1968“, Studiengruppe Tieflagerung, Karlsruhe, KfK 1138, 1969.
- [44] W. Dreyer, „Gcomechanische Untersuchungen an Kavernen in Steinsalz und Schlußfolgerungen für die unterirdische Gasspeicherung“, *Bergakademie*, Vol. 2, pp. 404-412, 1969.
- [45] Aurand, H. Krause, Moser und Perzl, „Vergraben von Flockungsschlämmen mit radioaktiver Verunreinigungen“, Gesellschaft für Stahlforschung mbH, Neuherberg, 1963.
- [46] *Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (StrlSchV)*, 2001.
- [47] H. Krause, H. Ramdohr und M. C. Schuchardt, „Jahresbericht 1966 der Studiengruppe fuer Tieflagerung radioaktiver Abfaelle“, Studiengruppe Tieflagerung, Karlsruhe, KfK 663, 1967.
- [48] R. Müller and E. Korthaus, „In situ-Untersuchung der Standfestigkeit von Verrohrungen sowie Entwicklung und Erprobung einer Standard-Konvergenzsonde“, European Commission, Brussels, Nuclear Science and Technology, EUR-8668 DE, 1983.
- [49] H. Krause, „Anfall radioaktiver Abfaelle in der Bundesrepublik Deutschland“, *Atomwirtschaft-Atomtechnik*, Vol. 21, pp. 343-46, 1976.
- [50] P. Brennecke and J. Schumacher, „Anfall radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland – Abfallerhebung für das Jahr 1984“, PTB-SE-9, 1986.
- [51] P. Brennecke and A. Hollmann, „Radioaktive Abfälle Anfall, Bestand 1995 und zukünftiges Aufkommen“, *ATW*, Vol. 42, pp. 401-406, 1997.

- [52] P. Brennecke and A. Hollmann, *Anfall radioaktiver Abfaelle in der Bundesrepublik Deutschland : Abfallerhebung fuer das Jahr 1997*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. fuer Neue Wiss., 1999.
- [53] P. Brennecke and A. Hollmann, *Anfall radioaktiver Abfaelle in der Bundesrepublik Deutschland : Abfallerhebung fuer das Jahr 1996*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. fuer Neue Wiss., 1999.
- [54] P. Brennecke and K. Kugel, „Anfall radioaktiver Abfälle in Deutschland, Abfallerhebung für das Jahr 2000“, Fachbereich Sicherheit nuklearer Entsorgung, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, BfS-SE-02/04, 2000.
- [55] P. Brennecke and A. Hollmann, „Anfall radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland : Abfallerhebung für das Jahr 1999“, Wirtschaftsverl., NW, Bremerhaven, 3-89701-753-9, ET-Berichte; 35, 2001.
- [56] K. Kugel and P. Brennecke, „Anfall radioaktiver Abfälle in Deutschland- Abfallerhebung für das Jahr 2004 und Prognose des zukünftigen Abfallanfalls bis zum Jahr 2080“, *ATW*, Vol. 52, 2007.
- [57] Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF), „Salzbergwerk Asse: Sicherheitsbericht für rückholbare Zwischenlagerung von schwachradioaktiven Abfällen“, München, Bericht: SB-4.79, 1979.
- [58] Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF), „Salzbergwerk Asse: Sicherheitsbericht für Endlagerung radioaktiver Abfälle“, München, Bericht: SB-5.79, 1979.
- [59] Abteilung Behandlung radioaktiver Abfälle, Institut für tieflagerung, „*Endlagerung radioaktiver Abfälle: Jahresbericht 1974*“, Karlsruhe, Kernforschungszentrum, KfK 2236, 1975.
- [60] E. Smailos., W. Diefenbacher, E. Korthaus und W. Comper, „Berechnungen zur Radiolysegasbildung und Wärmeentwicklung bei der Einlagerung von radioaktiven Bitumen- und Zementprodukten in unterirdischen Lagerräumen“, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 2076, 1978.
- [61] WTA, „Unterlagen für die WTA-Begutachtung des Programms Nukleare Sicherheitsforschung (NUKLEAR) des Forschungszentrums Karlsruhe“, Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, 2002.
- [62] EGT, „Jahresbericht 1981“, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung GmbH, München und Kernforschungszentrum Karlsruhe, GSF-T 133, KfK-3321, 1982.
- [63] EGT, „Trial storage of high-level waste cylinders in the Asse II salt mine. Final report 1977/78“ European Commission Brussels EUR-8797-EN, 1984.
- [64] EGT, „Trial storage of high-level waste cylinders in the Asse II salt mine. Final report 1980“, European Commission Brussels EUR-8796-EN, 1984.
- [65] W. Levi, G. Memmert, H. Venzlaff und H.-J. Wingender, „Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE): Zusammenfassender Zwischenbericht“, Berlin, 1981.
- [66] B. Kienzler, R. Köster und E. Korthaus, „Berechnungen und Sensitivitätsbetrachtungen zur Aktivitätsfreisetzung aus einem ersoffenen Endlager für radioaktive Abfälle anhand eines einfachen Störfallmodells“, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 3013, 1980.
- [67] W. Bechthold, W. Hauser, P. Johnsen, B. Kienzler, W. Kluger, R. Koester, G. Rudolph, M. Torres, E. Smailos und P. Vejmelka, „Kerntechnische Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens 'Eignungspruefung der Schachtanlage Konrad fuer die Endlagerung radioaktiver Abfälle' “, *Kernforschungszentrum Karlsruhe*, Vol. KfK 3428, 1983.
- [68] Brewitz W. (Hrsg.), „Eignungsprüfung der Schachtanlage Konrad für die Endlagerung radioaktiver Abfälle“, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, Neuherberg, GSF-T136, 1982.
- [69] NMU, „Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit

- vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vom 22. Mai 2002“, ed: Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz, Hannover, 2002.
- [70] B. Kienzler, E. Korthaus und R. Köster, „Untersuchung der Radionuklidausbreitung als Folge eines angenommenen Wasserzutritts zu den Abfällen im Eisenerzberwerk Konrad“, *Kernforschungszentrum Karlsruhe*, KfK 3410, 1982.
- [71] Bergamt Goslar, „Endlagerung schwachradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse“, *Genehmigung 4777/75 II* vom 29.12.1975, 1975.
- [72] R. Köster, „Zusammenstellung der vom Arbeitskreis erarbeiteten Vorschläge zur Charakterisierung, Qualitätssicherung und Datensammlung von LAW/MAW-Produkten“, INE, Karlsruhe, 1982.
- [73] E. R. Merz, D. Dyckerhoff und R. Odoj, „Characterization of radioactive wastes incorporated in a cement matrix“, *Nuclear Journal of Canada*, Vol. 1, pp. 173-178, 1987.
- [74] P. Vejmelka, G. Rudolph, W. Kluger und R. Köster, „Die Konditionierung radioaktiver Abfallösungen durch Zementierung“, *Forschungszentrum Karlsruhe*, KfK 4800, 1990.
- [75] S. Krawczynski. (1960). *Kernbrennstoffaufbereitungsprozesse*.
- [76] S. Krawczynski, „Fragen zur Kernbrennstoffaufbereitung“, *Kerntechnik*, Vol. 2, pp. 157-160, 1960.
- [77] K. Reinhartz. (1961). *Aufloesung und Rueckgewinnung des Kernbrennstoffes bei der Loesungsmittlextraktion*.
- [78] Friedrich Uhde GmbH., *Entwurf für eine Wiederaufbereitungsanlage für bestrahlte Brennstoffe*: Ingenieurgesellschaft Kernverfahrenstechnik (IGK), Leybold Hoch-Vakuum Anlagen, Lurgi Gesellschaft für Chemietechnik, Friedrich Uhde GmbH, 1964.
- [79] BMU, „Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Sylvia Kotting-Uhl, Hans-Josef Fell, Bärbel Höhn, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 16/12532 – : Rolle der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe bei der Herkunft des radioaktiven Inventars im Atommülllager Asse II“, Drucksache 16/13037, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2009.
- [80] „Sammlung der Vorträge anlässlich des 1. Statusberichtes des Projektes Wiederaufbereitung und Abfallbehandlung“, in *Kernforschungszentrum Karlsruhe / Sammlung der Vorträge anlässlich des Statusberichtes des Projektes Wiederaufbereitung und Abfallbehandlung*, Karlsruhe, KfK 2255, 1976.
- [81] W. Kluger, H. Krause und O. Nentwich, „Fixing of radioactive residues in bitumen“ *Gesellschaft für Kernforschung GmbH*, Karlsruhe, KfK 1037, 1969.
- [82] W. Kluger, W. Hild, R. Köster, G. Meier und H. Krause, „Bituminierung radioaktiver Abfallkonzentrate aus Wiederaufarbeitung, Kernforschungseinrichtungen und Kernkraftwerken“, KfK 2975, 1980.
- [83] G. Meier and W. Bähr, „Die Fixierung radioaktiver Abfälle in Bitumen: Teil 1 Die Betriebsanlage zur Fixierung radioaktiver Verdampfungskonzentrate in Bitumen im Kernforschungszentrum Karlsruhe“, in KfK 2104, 1976.
- [84] H. Krause, „Abteilung Dekontaminationsbetriebe. Jahresbericht 1970.“, *Gesellschaft für Kernforschung m.b.H.*, Karlsruhe, KfK 1500, 1972.
- [85] H. Krause, „Abteilung Dekontaminationsbetriebe. Jahresbericht 1972.“, *Gesellschaft für Kernforschung m.b.H.*, Karlsruhe KfK 2000, 1974.

- [86] G. Höhle, S. Weisenburger, E. Tittmann und H. Wiese., „Verglasung hochradioaktiver Spaltproduktlösungen in der Anlage PAMELA mit direkt beheiztem keramischem Schmelzofen“, *KfK-Nachrichten*, Vol. 18, pp. 72-76 1986.
- [87] E. Merz and R. Nowak, „Entsorgung radioaktiver Abfälle: Verwehrform hochaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung“, Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-66, 1987.
- [88] A. E. Ringwood, S. E. Kesson, N. G. Ware, W. O. Hibberson und A. Major, „The SYNROC process: A geochemical approach to nuclear waste immobilization“, *Geochemical Journal*, Vol. 13, pp. 141-165, 1979.
- [89] A. Loida and H. Krause, „Produktentwicklungen zur Verfestigung radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und Fertigung von Kernbrennstoffen in einer aluminiumsilikatischen keramischen Matrix“, Karlsruhe, Kernforschungszentrum Karlsruhe ; 4901, 1991.
- [90] E. D. Hespe, „Leach Testing of Immobilized Radioactive Waste Solids: A Proposal for a Standard Method“, *Atomic Energy Review*, Vol. 9, p. 195, 1971.
- [91] G. Schubert and H. Krause, „Verfahrensentwicklung zur Verfestigung radioaktiver Abfälle aus den Brennstoffkreisläufen von Leichtwasserreaktoren und Schnellen Brütern in keramischer Matrix“, Karlsruhe, Kernforschungszentrum Karlsruhe ; 5278, 1993.
- [92] G. Rudolph, J. Saidl, S. Drobnik, W. Guber, W. Hild, H. Krause und W. Mueller, „Lab-scale R + D work on fission product solidification by vitrification and thermite processes“, in *Symposium on the Management of Radioactive Wastes from Fuel Reprocessing, OECD-NEA and IAEA, Paris, November 27 - December 1, 1972*, ed, 1972.
- [93] G. Rudolph, R. Gebauer und W. Hild, *Verfestigung hochaktiver Spaltprodukte durch Thermitreaktion : Laborversuche*. Karlsruhe: Gesellschaft für Kernforschung mbH, 1976.
- [94] H. Wieczorek and B. Oser, „Entwicklung und aktive Demonstration des Verfahrens der Nassveraschung brennbarer plutoniumhaltiger Festabfälle“, *KfK-Nachrichten*, Vol. 18, pp. 77-82, 1986.
- [95] K. Gompper and H. Krause, „Ein fortgeschrittenes Behandlungskonzept für Abfälle aus den Brennstoffkreisläufen von Leichtwasserreaktoren und Schnellen Brütern“, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, KfK 4900, 1991.
- [96] H. Krause and H. Hepp, „Übersicht über Möglichkeiten zur Beseitigung von tritiumhaltigem Abwasser“, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, 1968.
- [97] Bundesminister des Innern, „Allgemeine Berechnungsgrundlagen für die Strahlenexposition bei radioaktiven Ableitungen mit der Abluft oder in Oberflächengewässer“, *Gemeinsame Ministerialblatt (GMBL)* Vol. 30, p. 371, 1979.
- [98] Hauptabteilung Sicherheit, „Hauptabteilung Sicherheit: Jahresbericht 1985“, Kernforschungszentrum, Karlsruhe, KfK 4067, 1986.
- [99] W. Hild, H. Krause, K. Sauer, W. Kessler und W. Fischak, „Deep-well disposal of tritium containing liquid effluents“, in *Symposium on the Management of Radioactive Wastes from Fuel Reprocessing*, Paris, November 27 - December 1, 1972 1972.
- [100] W. M. Bechthold, W. Diefenbacher, W. Hild, H. Krause, M. C. Schuchardt, E. Albrecht, H. Kolditz, K. Thielemann, H. Borchert, K. Duerr, K. Klarr, K. Kuehn und G. Staupendahl, „Endlagerung radioaktiver Abfälle. Jahresbericht 1972“, Kernforschungszentrum Karlsruhe KfK 1862, 1974.
- [101] H. Gaar, R. Günther, H. J. Nikodem und F. Rischbieter, „Studie über die Auswirkungen der Einlagerung flüssiger mittel – und schwach radioaktiver Abfälle in Salzkavernen 1. Zwischenbericht“, Frankfurt am Main: Battelle-Institut e.V., 1975.
- [102] K. Ebel and R. Storch, „Rückblick auf 20 Jahre Forschung und Entwicklung zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in der DDR sowie auf 10 Jahre Betrieb des Endlagers Morsleben“, 1990.

- [103] R. Köster, R. Kraemer und R. Kroebel, „1. Zwischenbericht über das Projekt „Lagerung und Verfestigung von MAW/LAW in untertägigen Hohlräumen“, KfK-PWA, PWA 89/78, 1978.
- [104] R. Kraemer and R. Kroebel, „Das in-situ Projekt - Eine Alternative zur Entsorgung von schwach- und mittelaktiven Abfaellen“, *KfK-Nachrichten*, Vol. 15, pp. 39-44, 1983.
- [105] E. Smailos, W. Stichel und R. Köster, „Korrosionsuntersuchungen und mechanische Prüfungen an metallischen Werkstoffen zur Auslegung von Behältern für verglaste hochradioaktive Abfälle als Barriere im Endlager“, Forschungszentrum Karlsruhe, KfK 3230, 1981.
- [106] E. Smailos, W. Schwarzkopf, R. Köster und W. Storch, „Untersuchungen zur Eignung keramischer Behälter als Korrosionsschutz für hochradioaktive Abfallprodukte bei der Endlagerung in Steinsalzformationen“, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 4244, 1987.
- [107] R. Bachmann, H. Dyroff, F. K. Fleischmann und H. Witte (Eds.), „SRA 6: Die Entsorgung von radioaktiven Abfaellen in der Bundesrepublik Deutschland“, Systemstudie 'Radioaktive Abfaelle in der Bundesrepublik Deutschland', KWA-1214, 1977.
- [108] H.J. Wingender (Ed.), „SRA 5: Methodik und Anwendung der probabilistischen Risikoanalyse“, Systemstudie 'Radioaktive Abfaelle in der Bundesrepublik Deutschland', KWA-1214, 1976.
- [109] NEA, „Post-closure safety case for geological repositories. Nature and purpose“, OECD/NEA, Paris, NEA No. 3679, Radioactive Wastemanagement, 2004.
- [110] Institut für Nukleare Entsorgungstechnik, „Ergebnisbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten 1993“, Kernforschungszentrum, Karlsruhe, KfK 5333, 1994.
- [111] R. Czolk, „ANKA GmbH – Neue Wege mit Synchrotronstrahlung“, *NACHRICHTEN – Forschungszentrum Karlsruhe*, Vol. 32, pp. 261-263, 2000.
- [112] A. Denecke, J. Rothe, K. Dardenne, H. Blank und J. Hormes, „The INE-beamline for actinide research at ANKA“, *Physika Scripta*, Vol. T115, pp. 1001-1003, 2005.
- [113] J. Rothe, S. Butorin, K. Dardenne, M. A. Denecke, B. Kienzler, M. Löble, V. Metz, A. Seibert, M. Steppert, T. Vitova, C. Walther und H. Geckes, „The INE-Beamline for actinide science at ANKA“, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 83, 2012.
- [114] C. D. Bowman, E. D. Arthur, P. W. Lisowski, G. P. Lawrence, R. J. Jensen, J. L. Anderson, B. Blind, M. Cappiello, J. W. Davidson, T. R. England, L. N. Engel, R. C. Haight, H. G. Hughes, J. R. Ireland, R. A. Krakowski, R. J. LaBauve, B. C. Letellier, R. T. Perry, G. J. Russell, K. P. Staudhammer, G. Versamis und W. B. Wilson, „Nuclear energy generation and waste transmutation using an accelerator-driven intense thermal neutron source“, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 320, pp. 336-367, 1992.
- [115] B. Kienzler and A. Loida, „Endlagerrelevante Eigenschaften von hochradioaktiven Abfallprodukten. Charakterisierung und Bewertung. Empfehlung des Arbeitskreises HAW-Produkte“, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 6651, 2001.
- [116] European Commission. (1999). *The R&D shared-cost programmes on the management and storage of radioactive waste from 1975 to 1994: List of publications*. Available: <http://docplayer.net/6059383-The-r-d-shared-cost-programmes-on-the-management-and-storage-of-radioactive-waste-from-1975-to-1994.html>
- [117] Europäische Kommission. (2016). *FP1-RADWASTOM 3C - Forschungs- und Entwicklungsprogramm (EURATOM) zur Bewirtschaftung und Lagerung radioaktiver Abfälle, 1985-1989*. Available: http://cordis.europa.eu/programme/rcn/43_de.html
- [118] S. Altmann, C. Tournassat, F. Goutelard, J.-C. Parneix, T. Gimmi und N. Maes, „Diffusion-driven transport in clayrock formations“, *Applied Geochemistry*, Vol. 27, pp. 463-478, 2012.

- [119] T. Behrends, E. Krawczyk-Bärsch und T. Arnold, „Implementation of microbial processes in the performance assessment of spent nuclear fuel repositories“, *Applied Geochemistry*, Vol. 27, pp. 453-462, 2012.
- [120] C. Bruggeman, N. Maes, B. C. Christiansen, S. L. S. Stipp, E. Breynaert, A. Maes, S. Regenspurg, M. E. Malström, X. Liu, B. Grambow und T. Schäfer, „Redox-active phases and radionuclide equilibrium valence state in subsurface environments – New insights from 6th EC FP IP FUNMIG“, *Applied Geochemistry*, Vol. 27, pp. 404-413, 2012.
- [121] J. Bruno and V. Montoya, „From aqueous solution to solid solutions: A process oriented review of the work performed within the FUNMIG project“, *Applied Geochemistry*, Vol. 27, pp. 444-452, 2012.
- [122] N. D. Bryan, L. Abrahamsen, N. Evans, P. Warwick, G. Buckau, L. Weng und W. H. Van Riemsdijk, „The effects of humic substances on the transport of radionuclides: Recent improvements in the prediction of behaviour and the understanding of mechanisms“, *Applied Geochemistry*, Vol. 27, pp. 378-389, 2012.
- [123] L. Duro, „Preface“, *Applied Geochemistry*, Vol. 27, p. 377, 2012.
- [124] J. Lützenkirchen, „Summary of studies on (ad)sorption as a „well-established“ process within FUNMIG activities“, *Applied Geochemistry*, Vol. 27, pp. 427-443, 2012.
- [125] L. Martinez-Landa, J. Carrera, M. Dentz, D. Fernández-García, A. Nardí und M. W. Saaltink, „Mixing induced reactive transport in fractured crystalline rocks“, *Applied Geochemistry*, Vol. 27, pp. 479-489, 2012.
- [126] U. Noseck, E.-L. Tullborg, J. Suksi, M. Laaksoharju, V. Havlová, M. A. Denecke und G. Buckau, „Real system analyses/natural analogues“, *Applied Geochemistry*, Vol. 27, pp. 490-500, 2012.
- [127] P. E. Reiller, T. Vercoeur, L. Duro und C. Ekberg, „Thermodynamic data provided through the FUNMIG project: Analyses and prospective“, *Applied Geochemistry*, Vol. 27, pp. 414-426, 2012.
- [128] T. Schäfer, F. Huber, H. Seher, T. Missana, U. Alonso, M. Kumke, S. Eidner, F. Claret und F. Enzmann, „Nanoparticles and their influence on radionuclide mobility in deep geological formations“, *Applied Geochemistry*, Vol. 27, pp. 390-403, 2012.
- [129] B. Schwyn, P. Wersin, J. Rüedi, J. Schneider, S. Altmann, T. Missana und U. Noseck, „FUNMIG Integrated Project results and conclusions from a safety case perspective“, *Applied Geochemistry*, Vol. 27, pp. 501-515, 2012.
- [130] L. Duro, J. Bruno, M. Grivé, V. Montoya, B. Kienzler, M. Altmaier und G. Buckau, „Redox processes in the safety case of deep geological repositories of radioactive wastes. Contribution of the European RECOSE Collaborative Project“, *Applied Geochemistry*, Vol. 49, pp. 206–217, 2014.
- [131] J. I. Kim, T. Fanghänel, L. Regan, H. Nitsche, V. Brendler, I. Grenthe, F. Glaser, J. Bruno und S. S. Saxena, „Joint European Thermodynamic Database for Environmental Modelling (JETDEM), Final Report“, European Commission Luxembourg, EUR 19131 EN, 2000.
- [132] R. Klenze, T. Fanghänel, J. I. Kim, V. Brendler, J. Hadermann, I. Grenthe, J. Bruno, S. L. S. Stipp, D. Read und T. Missana, „Aquatic Chemistry and Thermodynamics of Actinides and Fission Products Relevant to Nuclear Waste Disposal (ACTAF)“, presented at the EURADWASTE 2004, Luxembourg, 2004.
- [133] CORDIS (2005). *Establishment of a Network for Actinides Sciences (ACTINET-5)*.
- [134] CORDIS (2008). *Network for Actinides Sciences (ACTINET-6)*. Available: http://cordis.europa.eu/project/rcn/107620_en.html
- [135] CORDIS (2013). *ACTINET-13 (ACTINET Integrated infrastructure initiative)*. Available: http://cordis.europa.eu/result/rcn/53269_en.html

- [136] CORDIS (2015). *Transnational Access to Large Infrastructure for a Safe Management of Actinide (TALISMAN)*. Available: http://cordis.europa.eu/project/rcn/107657_en.html
- [137] „Rede-Gegenrede“, Deutsches Atomforum e.V. (1979)“, in *Symposium der Niedersächsischen Landesregierung zur grundsätzlichen sicherheitstechnischen Realisierbarkeit eines integrierten nuklearen Entsorgungszentrums*, Hannover, 1979.
- [138] K.D. Closs (Ed.), „Vergleich der verschiedenen Entsorgungsalternativen und Beurteilung ihrer Realisierbarkeit: Studie Entsorgungsalternativen“, Kernforschungszentrum, Karlsruhe, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-3000, 1980.
- [139] R. Papp, „GEISHA Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein“, ed: Kernforschungszentrum Karlsruhe PTE, 1997, FZKA-PTE Nr. 3.
- [140] B. Kienzler, P. Vejmelka, J. Römer, D. Schild und M. Jansson, „Actinide migration in fractures of granite host rock: Laboratory and in situ investigations“, *Nuclear Technology*, Vol. 165, pp. 223-240, 2009.
- [141] W. Hauser, H. Geckeis, J. I. Kim und T. Fierz, „A mobile laser-induced breakdown detection system and its application for the in situ-monitoring of colloid migration“, *Colloids and Surfaces (A)*, Vol. 203, pp. 37-45, 2002.
- [142] C. Walther, W. Hauser, H. Geckeis und T. Fanghänel, „Die Laser Induzierte Breakdown Detektion zur Analytik von aquatischen Kolloiden im Ultraspurenbereich“, *FZK Nachrichten*, Vol. 35, pp. 179-184, 2003.
- [143] T. Rothfuchs, J. Droste, H. K. Feddersen, S. Heusermann, J. U. Schneefuss und A. Pudewills, „Special safety aspects of drift disposal – The thermal simulation of the drift storage experiment“, *Nuclear Technology*, Vol. 121, pp. 189-198, 1998.
- [144] A. Pudewills, „Numerische Simulation zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz: BMBF – Verbundprojekt 02C1597, Einzelbericht zum Teilprojekt 3“, Karlsruhe Institute of Technology, KIT SR 7579, 2011.
- [145] Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). (2000). *Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000*.
- [146] AkEnd, „Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte“, 2002.
- [147] B. Kienzler, W. Schüßler und V. Metz, „Ermittlung von Eignungskriterien von geologischen Formationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mittels geochemischer Analysen“, FZK-INE, Karlsruhe, FZK-INE 03/01, Günstige hydrochemische Verhältnisse, 2001.
- [148] V. Metz, B. Kienzler und W. Schüßler, „Geochemical evaluation of different groundwater-host rock systems for radioactive waste disposal“, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 61, pp. 265-279, 2003.
- [149] B. Kienzler, V. Metz, J. Lützenkirchen, E. Korthaus und T. Fanghänel, „Geochemically based safety assessment“, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 44, pp. 470-476, 2007.
- [150] K. Gompper and P. Vejmelka, „Nuklidmigration im Deckgebirge des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM). Teil 1: Sorption im Grubengebäude“, FZK-INE 20/98, 1998.
- [151] P. Vejmelka, J. Lützenkirchen, M. Kelm, E. Bohnert, K. Gompper, C. Nebelung und L. Baraniak, „Nuklidmigration im Deckgebirge des ERAM (DGL)“, FZK-INE, Karlsruhe, FZK-INE 004/02, 2002.
- [152] K. Gompper, „Nuklidmigration im Deckgebirge des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) Teil 2: Sorption im Deckgebirge“, 1998.
- [153] H. Geckeis, „Bestimmung von in-situ Kd-Werten im Deckgebirge des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM)“, FZK-INE, Karlsruhe, FZK-INE 007/98, 1998.

- [154] BFS, „Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle: Wirtsgesteine im Vergleich. Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz“, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 2005.
- [155] M. Altmaier, V. Brendler, D. Bosbach, B. Kienzler, C. Marquardt, V. Neck und A. Richter, „Sichtung, Zusammenstellung und Bewertung von Daten zur geochemischen Modellierung“, Forschungszentrum Karlsruhe, INE-FZK 002/04, SICHERHEITSTECHNISCHE EINZELFRAGEN, Geochemische Prozesse bei der Ausbreitung von Schadstoffen aus einem Endlager für radioaktive Abfälle, 2004.
- [156] B. Kienzler und D. Bosbach, „Randbedingungen für die Wirtsgesteine Salz, Ton/Tonstein, sonstige Gesteine mit Tonbedeckung, kristalline Gesteine“, FZK-INE, Karlsruhe, FZK-INE 004/03, SICHERHEITSTECHNISCHE EINZELFRAGEN Geochemische Prozesse bei der Ausbreitung von Schadstoffen aus einem Endlager für radioaktive Abfälle., 2003.
- [157] M. Altmaier, V. Brendler, S. Hagemann, H.-J. Herbert, B. Kienzler, C. M. Marquardt, H. C. Moog, V. Neck, A. Richter, W. Voigt und S. Wilhelm, „THEREDA – Ein Beitrag zur Langzeitsicherheit von Endlagern nuklearer und nichtnuklearer Abfälle“, *ATW* Vol. 53, pp. 249-253, 2008.
- [158] K. S. Pitzer, *Activity coefficients in electrolyte solutions*, 2. Edition, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 1991.
- [159] European Nuclear Energy Agency (ENEA), „Radioactive waste disposal operation into the atlantic 1967“, *O.E.C.D. Publication*, 1968.
- [160] A. B. Kersting, D. W. Efurud, D. L. Finnegan, D. J. Rokop, D. K. Smith und J. L. Thompson, „Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site“, *Nature*, Vol. 397, pp. 56-59, 1999.
- [161] A. Pudewills, „Simulation of thermo-mechanical behavior of rock salt in the vicinity of a disposal drift and interaction with technical barriers“, in *47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*, San Francisco, 23-26 June 2013, 2013.
- [162] BMU, „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“, Berlin: Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2010.
- [163] B. Grambow. et al., „Long-term Safety of Radioactive Waste Disposal: Chemical Reaction of Fabricated and High Burnup Spent UO₂ Fuel with Saline Brines Final report“, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 5702, 1996.
- [164] B. Grambow, A. Loida, A. Martinez-Esparza, P. Dias-Arocas, J. de Pablo, J. L. Paul, G. Marx, J. P. Glatz, K. Lemmens, K. Ollilia und H. Christensen, „Long-term safety of radioactive waste disposal: Source term for performance assessment of spent fuel as a waste form. Final Report“, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 6420, 2000.
- [165] Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK), „Aquatic Chemistry and Thermodynamics of Actinides and Fission Products Relevant to Nuclear Waste Disposal“, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK) ACTAF 2000-2003, 2004.
- [166] Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK), „Establishment of a network of excellence for actinide sciences“, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK) ACTINET, 2002-2004, 2009.
- [167] W. Bechthold, T. Rothfuchs, A. Poley, M. Ghoreychi, S. Heusermann, A. Gens und S. Olivella, „Backfilling and sealing of underground repositories for radioactive waste in salt (BAMBUS project)“, European Commission, EUR-19124-EN, 1999.
- [168] W. Bechthold, E. Smailos, S. Heusermann, W. Bollingfehr, B. B. Sabet, T. Rothfuchs, P. Kamlot, J. G. Olivella und F. D. Hansen, „Backfilling and sealing of underground repositories for radioactive waste in salt (Bambus II project). Final report.“, European Commission, EUR-20621-EN, 2004.

- [169] B. Kursten, „State-of-the-art document on the COrrOsion BEhaviour of CONTAINER MAterials (COBECOMA 2001-2003)“, 5th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME 1998-2002, 2004.
- [170] E. Smailos, „LONG-TERM PERFORMANCE OF CANDIDATE MATERIALS FOR HLW/SPENT FUEL DISPOSAL CONTAINERS (CONTAINER CORROSION 2000-2004)“, 5th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME 1998-2002, 2004.
- [171] I. Ribet, S. Gin, N. Godon, P. Jollivet und Y. Minet, „Long-term behaviour of glass: Improving the glass source term and substantiating the basic hypotheses (GLASTAB)“, 5th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME 1998-2002, 2007.
- [172] G. Buckau, „Humic Substances in Performance Assessment of NuclearWaste Disposal: Actinide and Iodine Migration in the Far-field (HUPA)“, 5th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME 1998-2002, EUR 21928, 2006.
- [173] C. Poinssot and C. Ferry, „SPENT FUEL STABILITY UNDER REPOSITORY CONDITIONS – FINAL REPORT OF THE EUROPEAN PROJECT (SFS, 2001-2004)“, 5th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME 1998-2002, 2006.
- [174] H. A. Abderrahim, „Thematic Network on Advanced Options for Partitioning and Transmutation (ADOPT)“, 5th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME 1998-2002, 2005.
- [175] C. Madic, „Partitioning: New Solvent Extraction Processes for Minor Actinides (PARTNEW)“, 6th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME 2002-2006, 2007.
- [176] G. Buckau, „Final Scientific and Technical Report of the Integrated Project „Fundamental Processes of Radionuclide Migration“ (6th EC FP IP FUNMIG)“, 6th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME 2005-2008, 2006.
- [177] B. Grambow, „MICADO: Model Uncertainty for the Mechanism of Dissolution of Spent Fuel in Nuclear Waste Repository“, 6th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME 2002-2006, EUR 24597, 2010.
- [178] A. Sneyers, „Understanding and Physical and Numerical Modelling of the Key Processes in the Near Field and their Coupling for Different Host Rocks and Repository Strategies (NF-PRO)“, 6th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME 2002-2006, EUR 23730, 2008.
- [179] D. A. Galson and P. J. Richardson, „PAMINA: Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case“, 6th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME 2002-2006, 2011.
- [180] P. Chaix, „Establishment of a network of excellence for actinide sciences“, European Commission Brussels ACTINET-6, 2004-2009, 2005.
- [181] L. Jing, „THERESA: Coupled Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical Processes for Application in Repository Safety Assessment“, CORDIS: Community Research and Development Information System 6th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME 2002-2006, 2009.
- [182] M. Altmaier, „Redox Phenomena Controlling Systems (RECOSY)“, CORDIS: Community Research and Development Information System, 2013.
- [183] T. Rabung, „CROCK (CRYSTALLINE ROCK RETENTION PROCESSES): Final Report Summary “ CORDIS: Community Research and Development Information System, 2013.
- [184] B. Kienzler, „Fast / Instant Release of Safety Relevant Radionuclides from Spent Nuclear Fuel (FIRST-Nuclides)“, CORDIS: Community Research and Development Information System 2012-2014, 2015.

Index

A

ABRA	15
ACTINET	63
ADB	15
Äspö	66
Asse.....	15, 25, 29, 30, 31, 67
Atomgesetz	8, 31, 55

B

BfS.....	21, 31, 70, 71
BMBF.....	20
BMU	9, 21, 69, 72, 80
BMWi	20
BTP	59

C

CHEMVAL.....	62
COCO Club.....	62

D

DBE	20, 30, 31, 62
DBETech.....	20
DWK	8, 19, 35, 44

E

ERAM	48, 71
EURATOM	23, 25, 30, 33, 61, 62

F

Forschungsnetzwerk	62
Framework Programm	61

G

Geckeis.....	19
Gefährdungspotential	13
Gorleben	35, 69
Grimsel.....	67
GRS	20

K

Kim.....	17, 53, 62
Klassifizierung	11, 12
Konditionierung	18, 42
Konrad	37
Konvergenz	26, 30, 31
Krause	4, 17
Kühn.....	29

L

Laserspektroskopie	55
Lh2	47

M

Meeresversenkung	26, 79
MIGRATION	74
MIRAGE.....	62

N

Natau	22
NEZ.....	8, 35, 48, 65

P

P&T	58
PAMELA	44
POLLUX-Behälters.....	50
PSI	73

S

safety case	53
Synchrotronstrahlungsquelle.....	57

T

TDB	73
THEREDA.....	73

U

Umgangsgenehmigung.....55
Urnerz..... 13

V

VERA.....43
Versuchslagerung.....25

W

WAK.....41, 43
Wiederaufarbeitung.....19, 35, 39, 41, 47, 51, 53

Z

Zweifelsfragen.....72

Anhang

A. Zeittafel der Entwicklung der Kerntechnik in Deutschland und der Endlagerforschung.

Jahr	Kerntechnik in Deutschland (DAtF Daten [6])	Endlagerforschung
1955	Nach dem Erlangen der Souveränität der Bundesrepublik Deutschland ist es möglich, auf dem Gebiet der friedlichen Kernenergienutzung tätig zu werden. Die damalige Bundesregierung etabliert das Bundesministerium für Atomfragen und ernennt Franz-Josef Strauß zum ersten Atomminister.	
1958	Bildung der Reaktorsicherheitskommission (RSK).	
1960	Atomgesetz (AtG) und Strahlenschutzverordnung (SSVO) treten in Kraft. Beginn der Arbeiten am Schnellbrüterprojekt in Karlsruhe.	
1961	Inbetriebnahme des FR2. Versuchatomkraftwerk Kahl (VAK) in Betrieb. VAK: SWR amerikanischer Bauart mit 16 MW.	
1964		Einrichtung der Studiengruppe Tieflagerung.
1966	Inbetriebnahme der Wiederaufarbeitungsanlage Eurochemic in Mol (Belgien). Inbetriebnahme des Kernkraftwerks Rheinsberg (70 MW) in der DDR.	
1967	Versuchsprogramm zur Einlagerung von radioaktiven Abfällen im Salzbergwerk Asse. Inbetriebnahme des ersten Hochtemperatur-Reaktors AVR in Jülich mit 15 MW.	
1968	Inbetriebnahme des Druckwasserreaktors Obrigheim. Inbetriebnahme des Atomschiff „Otto Hahn“.	Kooperation zwischen KfK und GSF zu Endlagerfragen.
1971	Beginn der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM). Inbetriebnahme der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK).	

Jahr	Kerntechnik in Deutschland (DAtF Daten [6])	Endlagerforschung
1974		Abtrennung der wissenschaftlichen Abteilung Behandlung radioaktiver Abfälle (ABRA) von der Abteilung Dekontaminationsbetriebe (ADB) des KfK
1975	Gründung der Projektgesellschaft Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen (PWK). Beginn der Untersuchung der Schachanlage Konrad auf die Eignung zur Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe.	
1977	Inbetriebnahme KNK II. Ausstieg der USA aus der Technologie der Schnellen Brüter unter Präsident Jimmy Carter. Gründung der Deutschen Gesellschaft zur Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen mbH (DWK).	
1978		Gründung der Entwicklungsgemeinschaft Tief Lagerung.
1979	Unfall im US-amerikanischen Kernkraftwerk Three Mile Island bei Harrisburg. Internationales Gorleben-Hearing zur Sicherheit von nuklearen Entsorgungsanlagen. Erkundungsbeginn des Salzstocks Gorleben als Endlager für hochradioaktive Abfälle.	
1980		Gründung des Instituts für Nukleare Entsorgungstechnik (INE) am KfK.
1981	Beginn der Tiefbohrungen im Erkundungsbergwerk Gorleben.	
1982	Planfeststellungsantrag für "Schacht Konrad".	
1983	PTB erteilt der BLG die Aufbewahrungsgenehmigung gemäß § 6 AtG für das Brennelementzwischenlager Gorleben.	
1985	1. Atomrechtliche Teilgenehmigung zur Errichtung der Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf.	
1986	Unfall im sowjetischen Kernkraftwerks Tschernobyl. Gründung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). SPD-Parteitag beschließt den Ausstieg aus der Kernenergie.	

Jahr	Kerntechnik in Deutschland (DAtF Daten [6])	Endlagerforschung
1987	Die PTB erteilt der Brennelement-Zwischenlager GmbH (BZA) die Genehmigung zur Aufbewahrung von abgebrannten Leichtwasser-Brennelementen.	
1988	Beginn des prototypischen Rückbaus des Kernkraftwerkes Niederaichbach.	Lösungszutritt in das Salzbergwerk Asse.
1989	Eine vertraglich dauerhaft abgesicherte Wiederaufarbeitung in den Staaten der Europäischen Gemeinschaften als Teil des integrierten Entsorgungskonzepts anerkannt. Die Bauarbeiten an der Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf werden eingestellt. Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) nimmt die Arbeit auf. Neufassung der Strahlenschutzverordnung tritt in Kraft.	
1990	Erste atomrechtliche Teilgenehmigung zur Errichtung der Pilot-Konditionierungsanlage (PKA) Gorleben	Strukturkommission INE.
1991		Prof. Jae-Il Kim als Institutsleiter des INE berufen.
1993	75 Verhandlungstage für die Erörterung im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens "Schacht Konrad".	
1994	Einstellung der MOX-Verarbeitung in Hanau. Gesetzgeber erlaubt die "Direkte Endlagerung" abgebrannter Brennelemente. Fertigstellung des Schachtinnenausbaus im Salzstock Gorleben.	
1995	Einlagerungsbeginn im Brennelementlager Gorleben (Erster Castor-Transport).	Gründung der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF). Ausgliederung der Endlagerforschung aus der GSf und Zuordnung zur GRS
1998	Stilllegungsverfahren des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) wird eingeleitet. Koalitionsvertrag zum Kernenergie-Ausstieg.	
2000	Moratorium für das Erkundungsbergwerk Gorleben für mindestens drei bis höchstens zehn Jahre.	Strukturkommission INE

Jahr	Kerntechnik in Deutschland (DAtF Daten [6])	Endlagerforschung
2001		Gründung des Helmholtz-Gemeinschaft e.V. Etablierung der Programmorientierte Förderung (PoF).
2002	Neufassung des Atomgesetzes (AtG) mit dem Zweck, die Nutzung der Kernenergie geordnet zu beenden Planfeststellungsbeschluss ohne Sofortvollzug für "Schacht Konrad".	Prof. Thomas Fanghänel als Institutsleiter des INE berufen.
2003		Begutachtung des HGF-Programms Nukleare Sicherheitsforschung des FZK und FZJ (PoF I).
2005	Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz zum Salzstock Gorleben.	
		Prof. Thomas Fanghänel wechselt als Institutsleiter zum ITU. Dr. K. Gompper kommissarischer Leiter des INE.
2007	Genehmigung für "Schacht Konrad" mit Beschlussfassung des Bundesverwaltungsgerichts in Leipzig am 3. April Rechtskraft.	Mid-term Review 'Nuclear Safety Research (NUKLEAR)'. Prof. Horst Geckeis als Institutsleiter des INE berufen mit Professur für „Radiochemie“.
2008		
2009	Bundesamt für Strahlenschutz wird Betreiber der Schachanlage Asse II. Zehntes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes vom 17. März 2009.	PoF II. Verglasung des HAWC der WAK abgeschlossen.
2010	Laufzeit-Verlängerung der Kernkraftwerke um durchschnittlich 12 Jahre . Wiederaufnahme der Erkundung in Gorleben. BMU publiziert Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle.	
2011	Seebeben in Japan nachfolgende Katastrophe im Kernkraftwerk Fukushima-Daiichi.	
2012		Zwischenbegutachtung des Programms „Nuclear Waste Disposal and Safety“.

Jahr	Kerntechnik in Deutschland (DAtF Daten [6])	Endlagerforschung
2013	Standortauswahlgesetz (StandAG). Erkundung am Standort Gorleben wird beendet.	
2014	Endlagerkommission nimmt ihre Arbeit auf.	PoF III.
2015		

B. Bezeichnungen des Forschungszentrums

1956 - 1963	Kernreaktor Bau- und Betriebsgesellschaft mbH
1959	Kernforschungszentrum Karlsruhe (inoffiziell, bis 1995)
1963 - 1978	Gesellschaft für Kernforschung mbH
1978 - 1995	Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
1995 - 2005	Forschungszentrum Karlsruhe – Technik und Umwelt
2005 - 2009	Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft
seit 2009	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
siehe [4]	

C. Abschrift des ersten Dokuments zur Abfallbehandlung und Endlagerung in KfK (GLA 69/689)

Karlsruhe, den 6. Nov. 1956

DI. Wa/No.

Aktennotiz

Betrifft: Planung und Konstruktion von Abfallbeseitigungsanlagen

Beim Reaktorbetrieb entstehen feste, flüssige und gasförmige radioaktive Anfälle, deren Mengen und Zusammensetzungen beim gegenwärtigen Stand der Planung nicht genau ermittelt werden können. Eine einwandfreie Abfallbeseitigung ist Voraussetzung für einen sicheren Betrieb.

Feste und flüssige, hoch aktive Abfälle sollen in unterirdischen Behältern gelagert werden. Hierfür wird ein Gelände (Friedhof) benötigt, das besonderen geologischen und hydrologischen Anforderungen genügen muss. Es ist notwendig, dass Boden- und Grundwasseruntersuchungen bald durchgeführt werden, damit das benötigte Gelände rechtzeitig bereitgestellt werden kann. Die Größe des Friedhofs kann man im Augenblick nicht abschätzen.

Besonders zu beachten sind die schwach aktiven, flüssigen Abfälle, die nach den Erfahrungen des Auslands aus Wäschereien und Laboratorien als Destillate und bei eventuellen Reaktorunfällen in großen Mengen anfallen. Man lässt diese Abwässer entweder in Gewässer ablaufen oder im Boden versickern, da eine Speicherung zu viel Aufwand erfordern würde. Damit ist aber die Gefahr einer radioaktiven Verseuchung der Umwelt gegeben. Es muss damit gerechnet werden, dass wir in Deutschland eines Tages vor einer ähnlichen Situation stehen.

Bei Betriebsbeginn der Reaktorstation müssen die Abfallbeseitigungsanlagen ebenfalls betriebsbereit sein. Die Unterlagen für Planung und Konstruktion sollten also im Gleichen Maße gesammelt werden, wie die Planung des Reaktors und der Reaktorstation fortschreitet.

Es wird deshalb gebeten, dass folgende Wünsche bei der weiteren Zusammenarbeit berücksichtigt werden:

1. Die Sachbearbeiter der Reaktorplanungsgruppe werden gebeten, in Zukunft Art, Menge und chem. Zusammensetzung der auf ihren Arbeitsgebieten anfallenden Abfälle mitzuteilen. Insbesondere interessieren feste und flüssige Abfälle. Von den übrigen an der Reaktorstation beteiligten Planungsgruppen, insbesondere von der „heißen“ Chemie, müssen solche Angaben ebenfalls gesammelt werden. Die Geschäftsführung wird gebeten den nötigen Kontakt zu vermitteln.
2. Es ist anzunehmen, dass Wasserwirtschaftsämter, Strahlenschutzkommissionen, Gesundheitsämter, Naturschutzämter etc. an unsere Abfallbeseitigungsanlagen eine Menge detaillierter Anforderungen stellen werden. Sachliche Diskussionen mit den infrage kommenden Stellen sind notwendig, damit sich bald zeigt, welche Fragen auf höheren Ebenen entschieden werden müssen. Dafür wird man Zeit benötigen. Andererseits können wir unsere Anlagen nur dann termin-

gerecht planen und bauen, wenn wir rechtzeitig wissen, welche Anforderungen an sie gestellt werden. Die Geschäftsführung wird deshalb gebeten, möglichst bald die entsprechenden Kontakte zu vermitteln, die gleichzeitig einen gewissen Schutz vor unsachlichen Angriffen in Presse und Rundfunk bieten können.

3. Wir benötigen dringend Erfahrungen des Auslands über Abfallbeseitigung. Insbesondere interessieren genaue Angaben über Art, Menge, chem. Zusammensetzung und Aktivitätsniveau anfallender Abfallstoffe, sowie Meinungen über Konzentrierung, Speicherung, Versickerung, Verdünnung in Gewässern, zulässige Isotopenkonzentrationen, Einflüsse auf die Umwelt etc. Wir bitten die Geschäftsführung, den bereits bestehenden Meinungsaustausch mit dem In- und Ausland auch auf diese Gebiete auszudehnen.

Verteiler:

Prof. Haxel
Dr. Ritter
Prof. Wirtz
Herrn Engel
Bibliothek

Der Name des Verfassers DI Wa konnte nicht ermittelt werden.

D. Aufgabenstellung der Studiengruppe Tieflagerung

Der Bundesminister für wissenschaftliche Forschung beauftragte am 29. 08. 1963 die Gesellschaft für Kernforschung mbH Karlsruhe mit der Aufstellung einer Studiengruppe zur Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur endgültigen Unterbringung der in der Bundesrepublik Deutschland anfallenden radioaktiven Abfälle. Es sollten

- a. "in Zusammenarbeit mit anderen wissenschaftlichen Instituten sichere und wirtschaftliche Methoden zur säkularen Beseitigung radioaktiver Abfälle entwickelt" und
- b. „eine Anlage zur Endsammlung und Beseitigung radioaktiver Abfälle errichtet und betrieben werden. Insbesondere sollte unverzüglich mit der Projektierung einer Salzkaverne begonnen werden.“

Im Rahmen dieser Arbeiten hatten zahlreiche Mitarbeiter des Kernforschungszentrums Karlsruhe Einzelaufgaben in der Studiengruppe übernommen. Seit Beginn des Jahres 1965 wurde ein Teil der Arbeiten von der Gesellschaft für Strahlenforschung mbH München weitergeführt. Die Arbeiten in Karlsruhe umfassten dann im Wesentlichen die atomtechnische Seite der Endlagerung.

E. Methoden zur Behandlung und Herkunft der radioaktiver Abfälle in den Anfangsjahren der KfK

Behandlungsmethoden der radioaktiven Abwässer vor Errichtung der WAK:

Die „Entaktivierung“ hatte die Aufgabe, dem Wasser die radioaktiven Stoffe bis unterhalb der zulässigen Toleranzkonzentration zu entziehen. Hierfür wurden folgende Methoden einzeln und kombiniert angewandt.

1. Chemische Fällung (nach erfolgter Entkarbonisierung und elektroionaler Abscheidung).
2. Ionenaustausch (wahlweise nach erfolgter chemischer Entkarbonisation, elektroionaler Abscheidung, partieller Phosphatfällung o. ä.),
3. Verdampfung (Verdampfung von Konzentraten sowie von Regenerier-Abwässern der Ionenaustauscheranlage).

Da in der „Entaktivierung“ Mischwässer aus verschiedenen Instituten, die Umgang mit zahlreichen Radionukliden hatten, verarbeitet werden mussten, kamen folgende Fällungsprozesse zur Anwendung

- Fällung des Radiocäsiums durch Zugabe von Kaliumferrocyanid und einem Überschuss an Kupfersulfat. Das Cäsium wurde als das Mischsalz Cäsiumkupferferrocyanid fast quantitativ ausgefällt. Gleichzeitig fiel Radiojod (Jodid) als schwerlösliches Kupferjodid aus.
- Fällung des als Sulfat vorliegenden Radioschwefels als Bariumsulfat mittels Zugabe von Bariumchlorid.
- Entkarbonisierung im „Steinmüller-Schnellreaktor“ unter Zugabe von Ca(OH)_2 , (bei dieser Entkarbonisierung wurden 93-95 % der Gesamtaktivität der Spaltprodukte abgetrennt und an die ausfallenden Karbonatkörner fixiert).
- Elektroionale Abscheidung an Metallspänen in einem Spezialpercholorator. (Bei Spaltprodukten bis zu 98,5 % Abtrenngrad) und Bindung der Kolloide an die Metallhydroxidflocken, die sich anschließend leicht abfiltrieren ließen. Es trat eine Abscheidung aller edleren Metall-Ionen an unedleren Metallspänen ein. Die Metallspäne zeigten bei Zufuhr von Sauerstoff eine gute Rückhalteeffektivität für Radioruthen.
- Zudosierung von Ca(OH)_2 und Fällung bis auf den Neutralpunkt mittels Phosphorsäure (wahlweise: Zugabe von S^{2-} und Fe(II)-Salzen, Zudosierung von thermisch aufgeschlossenem Vermikulit und Montmorrillonit).
- Filtration unter Zugabe von gemahlener Braunkohle oder Abfällen synthetischer Ionenaustauscher als Filterhilfe. (Als Filterhilfe wurden bei neutralen bis sauren Wässern Holzmehl und Torf verwendet.)

Für den Ionenaustausch wurden mehrere in Reihe geschaltete Ionenaustauschersäulen eingesetzt:

- Kationenaustauscher (sulfurierte Kohle) (stark sauer).
- Kationenaustauscher (sulfurierte Kohle) (stark sauer),
- Anionenaustauscher (schwach basisch),
- Kationenaustauscher (stark sauer),
- Anionenaustauscher (stark basisch),
- Mischbettfilter (Kationenaustauscher, stark sauer und stark basisch, Mischungsverhältnis 1:2).

Zur Verdampfung von Konzentraten sowie von Regenerier-Abwässern wurde ein Dünnschicht-Wischblattverdampfer zur Verdampfung feststoffreicher Abwässer eingesetzt. Die Nachreinigung des Dampfes erfolgte in einem Aerosolwäscher, bestehend aus einer Raschigring gefüllten Rücklaufkolonne sowie Glaswolle-Absolutfiltern. Bei Vorhandensein von elementarem Radiojod wurde dieses in einem Hochtemperatur-Silbernitratfilter abgeschieden. Die radioaktiven Konzentrate wurden dann in einer heißen Zelle in korrosionsgeschützte Fässer abgefüllt und mit von der Verdampfung verbliebenem Restwasser mit Zement zu Beton angerührt.

Zur Herkunft der Abfälle, die bei KfK verarbeitet wurden, gibt folgende Tabelle Aufschluss

Tab. II Herkunft der radioaktiven Abwässer im Kernforschungszentrum Karlsruhe in 1969 [22].

	Schwachaktiv / m ³	Mittelaktiv / m ³
Reaktor FR 2	821	6
Reaktor MZFR	1508	30
Institut für Radiochemie	1011	
Institut für Heisse Chemie	701	
Institut für Strahlenbiologie	60	7
Heisse Zellen (RB)	1210	25
Gerätedekontamination	670	3
Veraschung	390	
Aktive Wäscherei	799	
Eigene Spülwässer	559	
Andere Anlieferer	684	

Im Jahresbericht 1969 der Abteilung Dekontaminationsbetriebe der Gesellschaft für Kernforschung m.b.H [22] finden sich folgende Angaben:

„Der Anfall an radioaktiven Abwässern ging im Jahre 1969 auf 8500 m³ zurück, doch ist mit Inbetriebnahme der Wiederaufbereitungsanlage mit einer wesentlichen Steigerung zu rechnen. Allgemein ist festzustellen, dass die Aktivitätskonzentration in den Abwässern ständig zunimmt. Der Anfall an festen schwachaktiven Abfällen ist im Jahre 1969 wiederum stark angestiegen. Mit 1050 m³ war eine Steigerungsrate von über 40 % gegenüber 1968 zu verzeichnen. Der Anstieg an mittelaktiven Abfällen war noch grösser. In der Veraschungsanlage wurden über 400 m³ brennbare Abfälle verbrannt.“

Behandlungsmethoden der radioaktiven Abwässer nach Inbetriebnahme der WAK:

Mit der Inbetriebnahme der WAK war ein neues Behandlungskonzept erforderlich (Krause, persönliche Mitteilung, 2016):

- Alle radioaktive Abwässer wurden verdampft, wobei für schwachaktive Wässer ein Brüdenkompressionsverdampfer¹, für mittelradioaktive Abfälle ein Umlaufverdampfer eingesetzt wurde, dessen Destillat zu den schwachaktiven Wässern zugeschlagen wurde. Diese Technik war damals einmalig (Krause, persönliche Mitteilung, 2016).
- Brennbare Abfälle wurden in einer entsprechenden Anlage verbrannt, eine Technik, die damals noch nicht verbreitet war. Hierdurch wurde ein nichtbrennbares, nichtfaul und nichtgärfähiges Abfallprodukt erzeugt. Die Anlage des KfK wurde mehrfach in Lizenz nachgebaut.
- Feste unbrennbare Abfälle wurden in einer Hochdruckpresse „totgepresst“, so dass keine elastischen Rückverformungen mehr auftraten. Die Presslinge wurden dann einbetoniert.
- Für große Geräte wurde die Dekontamination eingerichtet um diese weiter verwenden zu können, bzw. die Abfallmengen zu reduzieren.

¹ Der Brüden ist die mit Wasserdampf gesättigte Gasphase, die beim Trocknen von Feststoffen entsteht. Die Kondensationswärme des Brüden wird wieder im Prozess genutzt. Im Sumpf des Verdampfers wird Wärme zugeführt, um Wasser zu verdampfen, im Kopf wird Wärme abgeführt, um die Brüden zu kondensieren. Mit Hilfe der Brüdenkompression kann dies auf einem höheren Temperaturniveau geschehen.

F. Zuordnung der Endlagerforschung zu den verschiedenen Arbeitsschwerpunkten und Arbeitsthemen

Im Rahmen der jeweiligen Programmbudgets waren die Arbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle folgenden Arbeitsschwerpunkten zugeordnet:

1973	2.7 Behandlung und Endlagerung radioaktiver Abfälle
1974	2.5 Endlagerung radioaktiver Abfälle und kernchemische Prozessentwicklung / ERAP
1975 - 1977	Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung / PWA
1978 - 1981	Arbeitsschwerpunkt 05 Tieflagerung / TLA mit folgenden Arbeitsthemen 05.11 Betrieb des Salzbergwerks Asse als Versuchsanlage 05.12 Methoden und Verfahren für die EL in Salzformationen 05.13 Endlagerung rad. Abfälle in nicht salinaren Formationen 05.14 Erarbeitung von sicherheitstechnischen Anforderungen
1982 -1984	Arbeitsschwerpunkt 05 Tieflagerung / TLA mit 2 Arbeitsthemen 05.11 Methoden und Verfahren für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in geol. Formationen 05.12 Analytischer Sicherheitsnachweis für Endlager in geologischen Formationen Der Arbeitsschwerpunkt wurde 1984 in Endlagerung / ELA umbenannt.
1985 - 1989	Arbeitsschwerpunkt Endlagerung / ELA mit einem Arbeitsthema 05.01 Analytischer Sicherheitsnachweis für Endlager in geologischen Formationen
1990	Arbeitsschwerpunkt Nukleare Entsorgung (NE) mit folgenden Arbeitsthemen: 19.01 Grundlegende Arbeiten zur Wiederaufarbeitungstechnologie 19.02 Abfallkonditionierung 19.03 Abfallprodukte und Endlagerung
1991	Arbeitsschwerpunkt Nukleare Entsorgung (NE) mit folgenden Arbeitsthemen: 19.01 Abschließende Arbeiten zur Wiederaufarbeitungstechnologie 19.02 Abfallkonditionierung 19.03 Endlagerung
1993	Arbeitsschwerpunkt Nukleare Entsorgung (NE) mit den beiden Arbeitsthemen 33.03 Sicherheitsforschung zur Endlagerung 33.04 Immobilisierung von hochradioaktivem Abfall

Tab. III Personalstärke, Investitionen und Betriebsaufwendungen für Endlagerforschung

Soll-Werte für die Jahre	Personal	Investitionen	Betriebsauf- wendungen	
	Personenjahre	Mio. DM	Mio. DM	
1973	29	Nicht ausge- wiesen	2.6	Behandlung und Endlagerung radioaktiver Abfälle
1974	12	Nicht ausge- wiesen	1.9	
1975	12	Nicht ausge- wiesen	3.2	
1976	18	0.2	3.0	
1977	18	0.8	3.0	
1978	20	1.1	4.0	EGT
1979	29	1.9	5.7	EGT
1980	31	2.2	5.9	EGT
1981	29	0.7	7.4	EGT
1982	21	0.5	9.0	
1983	21	0.5	5.9	
1984	24	0.6	7.0	
1985	23	0.6	6.6	
1986	20	0.6	6.1	
1987	25	0.8	10.3	
1988	26	0.7	10.3	
1989	26	0.8	9.2	
1990	38	1.4	13.5	Verglasung als separates Arbeitsthema
1991	68	2.0	21.1	Wie 1990
1992				
1993	62	2.4	19.3	Wie 1990

G. Beitrag zur Delegierten Versammlung am 1. Juni 1977

Schuchardt, ABRA, 31.5.1977

Stand der Arbeiten auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle

Die deutschen Forschungsarbeiten zur Endlagerung zielten von Anfang an auf Methoden, die eine Isolierung der radioaktiven Abfälle von der unmittelbaren Umwelt des Menschen sicherstellen. Bereits 1959 hatten Geologen der damaligen Bundesanstalt für Bodenforschung, Hannover, der heutigen Bundesanstalt für Geowissenschaften für Rohstoffe angeregt, diese Abfälle in Formationen des tiefen geologischen Untergrundes einzubringen. Als Verfahren wurde vorgeschlagen, in einem der über 200 Salzstöcke Nordwestdeutschlands eine künstliche Kaverne anzulegen. Diese Empfehlung wurde in das zweite deutsche Atomprogramm (1963 - 67) aufgenommen. 1963 erhielt die GfK vom Bundesminister für wissenschaftliche Forschung den Auftrag, Verfahren zur endgültigen Unterbringung von radioaktiven Abfällen aus der BRD zu entwickeln und zu erproben.

Zur Durchführung dieser Aufgaben wurde die GfK-Studiengruppe für Tief Lagerung gegründet; deren erste Aufgaben waren: - die Projektierung und Herstellung einer Prototypkaverne in einem küstennahem Salzstock - die Beteiligung an einer internationalen Aktion zur Versenkung von schwachaktiven Abfällen im Atlantik. Während die erste Meeresversenkung unter deutscher Beteiligung - die GfK stellte hierfür 400 Fässer mit schwachaktiven Abfällen zur Verfügung - erfolgreich durchgeführt wurde, scheiterte die Realisierung des Kavernenvorhabens an den massiven Einsprüchen der Bevölkerung in den betroffenen Regionen (damals vorgesehene Standorte waren Bunde bei Leer und Oldensworth (Eider) bei Husum).

Inzwischen hatte sich 1965 die Möglichkeit ergeben, das Bergwerk Asse bei Wolfenbüttel für die Erforschung und Entwicklung von Verfahren zur Endlagerung von radioaktiven Rückständen in Salzformationen zu erwerben. Die durchgeführten Untersuchungen über die Eignung der verschiedensten Lagermedien in geologischen Formationen führten zum Ergebnis, daß Steinsalzformationen, wie z.B. der Asse-Sattel als günstigste Lokalitäten im Vergleich zu Silikat- oder Karbonatgesteinsformationen sich herauskristallisierten. Die wesentlichsten positiven Eigenschaften eines kompakten Salzgebirges sind u.a.:

- Leichte Herstellbarkeit jeder Art und Form von Hohlräumen
- sehr geringe Permeabilität und daher sicherer Einschluss des Eingelagerten
- relativ gute Wärmeleitfähigkeit
- extreme Verformungs- und Fließigenschaften in festem Zustand, dadurch hohe Standsicherheit der aufgefahrenen Hohlräume
- Im Salzgebirge haben natürliche und künstliche Lösungen normalerweise nur geringe Bewegungstendenzen. Sie sättigen sich durch Lösen des umgebenden Salzes, werden dadurch spezifisch schwerer und sammeln sich daher an den tiefsten Stellen der Hohlräume und Bergwerke.

Für die Sicherheit einer Abfalllagerung in Steinsalzformationen spricht ferner, daß die Entstehung der Salzgebirge vor etwa 220 bis 250 Mio Jahren erfolgte und trotz tektonischer Auffaltungen (vor ca. 100 Mio Jahren) zu Satteln oder Domen durch die überlagernden Schichten ausgezeichnet gegen Einflüsse des Grundwassers abgedichtet sind. Die gesamten Überlegungen im Hinblick auf die langfristige Sicherheit führten dazu, dass, wie bereits gesagt, der Bund das stillgelegte Salzbergwerk käuflich als Demonst-

rations- und Versuchsanlage erwarb. Mit der Betriebsführung dieser Grube wurde die Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF) betraut. In der Grube Asse wurden 130 Abbaukammern im Zuge der Kali- und Steinsalzgewinnung aufgeföhren, und zwar mit einem Gesamtvolumen von 3,5 Mio m³, von dem etwa 1,5 Mio. m³ zur Unterbringung von radioaktiven Abfällen geeignet sind. Die Spitze der Salzlagerstätte, der sogenannte Salzspiegel, liegt bei 270 m Tiefe, die Basis des Salzstockes bei mindestens 1500 m.

Im Jahre 1965 beschlossen die GfK und GSF auf dem Gebiet der Abfallendlagerung eng zusammenzuarbeiten. Zwar wurde diese Zusammenarbeit vertraglich nicht fixiert, jedoch in gemeinsamen Absprachen eine Teilung der Arbeiten vereinbart. Danach waren bzw. sind verantwortlich:

1. das Institut für Tieflagerung der GSF wissenschaftliche Abteilung in Clausthal-Zellerfeld für Geowissenschaftliche Fragen im Einzelnen umfassend:
 - Sicherheitsbetrachtungen für den Schacht Asse und das Grubengebäude.
 - Geologie, Gebirgsmechanik, Hydrologie
 - Stabilität der Grubenräume
 - Geohydrologie der Umgebung
 - Mögliche Folgen der Freisetzung von Aktivität in der Umgebung

sowie nicht an den Salzstock Asse gebundene Untersuchungen zur Endlagerung;

2. das Institut für Tieflagerung der GSF -technische Abteilung in Wolfenbüttel bzw. Asse für Bergtechnische Fragen und den Betrieb Asse, im Einzelnen sind dies:
 - Einlagerung von Abfällen
 - Beschaffung von technischen Ausrüstungen für den Einlagerungsbetrieb, Bau- und Reparaturmaßnahmen im Unter- und Übertagebereich

sowie alle Aufgaben, die sich aus der gesetzlichen Verantwortung als Betreiber des Bergwerkbetriebes ergeben

3. die Abteilung Behandlung radioaktiver Abfälle (ABRA) der GfK, Karlsruhe ist verantwortlich für
 - I. Kerntechnische Entwicklungsarbeiten, wie
 - Transportbehälter und Einlagerungsgeräte für schwach-, mittel- und hochaktive Abfälle, technische Ausrüstungen der Prototypanlage Kaverne
 - Anpassung der kerntechnischen Einrichtungen an Art und Menge der Abfälle
 - II. Kerntechnische Sicherheit
 - Beurteilung von Abfallprodukten und Einlagerungsverfahren (Sicherheitsstudien, Einlagerungsbedingungen)
 - Modellstudien und Sicherheitskonzepte
 - Wärmetechnische und Radiolysegas-Probleme bei der Einlagerung von mittel- und hochaktiven Abfällen.

Die notwendige Koordination mit der GSF erfolgte direkt zwischen der ABRA und dem Institut für Tieflagerung in regelmäßig stattfindenden Arbeitsbesprechungen, wobei sich Aufgabenstellung und Umfang aus der erwähnten Arbeitsteilung mit der GSF nach den aktuellen Erfordernissen ergeben.

Seit Aufnahme der Versuchseinlagerung in der Asse im Jahre 1967 wurden bis heute (31.05.1977) an schwachaktiven Abfällen ca. 75.000 Fässer und ca. 6.000 verlorene Betonabschirmungen, sowie ca. 1.300 Fässer mit mittelaktiven Abfällen eingelagert. Somit liegen jetzt mit der Einlagerung von schwachaktiven Abfällen rund 10, mit den mittelaktiven Abfällen rund 5 Jahre Erfahrungen vor.

Die entwickelten und in der Praxis erprobten Techniken für Transport, Manipulation und Einlagerung haben sich gut bewährt. Der überwiegende Teil der bis jetzt in der Bundesrepublik angefallenen Abfälle konnte im Rahmen der Versuchsprogramme eingelagert werden.

Da die bisherige Einlagerung nur unter Bedingungen erfolgte, bei denen die Sicherheit von vornherein gewährleistet war, ergab sich, dass eine Reihe von Abfällen von der Endlagerung in der Asse ausgeschlossen werden mussten. Dabei handelte es sich speziell um solche Abfälle mit gasförmigen Radionukliden, z.B. mit Tritiumgehalten von über 10 mCi/Faß, mit β/γ -Strahlern über 1000 Ci/Fass, mit Kernbrennstoffgehalten über 15 g/Fass und mit Gehalten an α -Strahlern über 5 Ci/t. Die Gründe für die Nichtannahme liegen vor allem darin, das Bergwerke grundsätzlich nur in äußerst begrenztem Maße zur Einlagerung gasförmiger Radionuklide geeignet sind. Restriktiv für die Asse gilt des Weiteren, dass diese Grube nach Regeln des Salzbergbaus aufgefahren wurde und sich damit zur Einlagerung von Abfällen nur unter Einhaltung besonderer Sicherheitsvorkehrungen eignet.

Da unsere bisherigen Arbeiten sich hauptsächlich auf die bereits in größeren Mengen anfallenden Abfälle konzentrierten, war es aus personellen Gründen nicht möglich, sich in der vergangenen Zeit mit solchen Abfällen zu beschäftigen, die entweder nur in geringen Mengen anfallen o/der erst in Zukunft zu erwarten sind, wie Edelgase, Tritium, Abfälle aus der Stilllegung von kerntechnischen Anlagen usw. Da jede Art dieser Abfälle eine gesonderte Problematik hat, sind hierfür auch gesonderte Lösungen erforderlich. Gleiches gilt ebenfalls für Abfälle von heute noch nicht zur Einlagerung zugelassenen Abfällen, wie die mit höheren Gehalten an β/γ -Strahlern, Aktiniden und Kernbrennstoffen. Hochaktive Abfälle bringen insbesondere wegen der hohen Wärmefreisetzung eine völlig neue und vielschichtige Problematik mit sich. Da bis zur ausreichend gesicherten Demonstration der Einlagerung noch ein sehr langer Zeitraum erforderlich ist, müsste dieses Vorhaben mit größtem Nachdruck vorangetrieben werden. Wegen Personalmangels lief es bisher nur in kleinem Umfang, musste sogar in den letzten Jahren eingeschränkt werden.

Generell kann gesagt werden, dass sich in jüngster Zeit Aufwand und Umfang der zu Genehmigungen notwendigen Sicherheitsuntersuchungen in erheblichem Maße erhöht hat. Dies trifft sowohl auf alle Genehmigungen zu, die zeitlich befristet sind und verlängert werden sollen, als auch in besonderem Maße die bereits sich in Vorbereitung befindlichen Betriebs- und Einlagerungsgenehmigungen (z.B. MAW-Einlagerung bei der z.Zt. auf der Asse im Bau befindlichen Prototyp- Kavernenanlage, bzw. Tritiumversenkungsbohrung im Erdölfeld Leopoldshafen).

Um die Endlagerung radioaktiver Abfälle so abzusichern, wie dies ihrer sicherheitlichen Bedeutung entspricht, wäre es jetzt unumgänglich, die Anstrengungen auf diesem Gebiet erheblich zu verstärken. Die personellen Voraussetzungen sind mit den gegenwärtigen Stellenplänen der GfK und der GSF nicht gegeben, vornehmlich deshalb, weil die Stellenpläne in den letzten Jahren dem gestiegenen Aufgabenumfang nicht angepasst wurden (Beispiel: Für das Genehmigungsverfahren der Tritiumversenkung stehen im Jahre 1977 nur 0,3 Mannjahre zur Verfügung).

Wegen der wachsenden Bedeutung der Abfallbeseitigung wurden im vergangenen Jahr von der GfK Schritte eingeleitet, mit dem Ziel, die F + E-Arbeiten von GfK und GSF besser aufeinander abzustimmen. Beide Gesellschaften erarbeiteten zu diesem Zweck einen Vorschlag für ein gemeinsames F + E-Programm aus, das alle aus der Sicht der Gesellschaften heraus notwendigen Arbeiten enthält. Im November 1976 wurde dann dieses Programm dem BMFT zugeleitet und Vorschläge über die organisatorische Zusammenarbeit unterbreitet. Parallel dazu bemühten sich beide Vorstände um Zustimmung der Aufsichtsräte zur Gründung einer "Arbeitsgemeinschaft Endlagermethoden." Nach Vorliegen der Zustimmungen wurde ein Vertragsentwurf ausgearbeitet, der jetzt unterschriftsreif vorliegt. Erst Ende März 1977 lud das BMFT dann beide Gesellschaften zusammen mit Vertretern der BMI, der PTB, DWK und KEWA zu einer Diskussion über das gemeinsame F + E-Programm ein. Dabei stimmten alle Beteiligten dem Programm zu, jedoch von Seiten der PTB, DWK und KEWA mit dem Hinweis, dass dieses Programm hinsichtlich der Arbeiten für das Entsorgungszentrum erweitert und beschleunigt wird.

Das BMFT erhielt von PTB, BMI und BMWi die Zusagen, die Notwendigkeit der Zuweisung von außeretatmäßigen Mitteln für 1977 und 1978 für Verhandlungen mit dem Bundesfinanzminister zu begründen. Ab 1979 sollen die Mittel dann im Etat des BMFT geführt werden. GSF und GfK wurden aufgefordert, das gemeinsame F + E-Programm entsprechend den Anforderungen von BMI, PTB und DWK zu ergänzen.

H. Genehmigungssituation des Salzbergwerks Asse

Die Beschreibung der Genehmigungssituation für das Salzbergwerks Asse ist dem Sicherheitsbericht für rückholbare Zwischenlagerung von schwachradioaktiven Abfällen SB 4.79 entnommen [57].

Die bis Ende 1978 vom Bergamt Goslar erteilten Genehmigungen beruhten auf dem § 3 der Ersten Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Erste Strahlenschutzverordnung) in der Fassung vom 15. Oktober 1965 (BGBl I S.1654) in Verbindung mit §§ 10 bis 12 des Gesetzes über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) vom 23. Dezember 1959 (BGBl I S. 814), dem Berggesetz für das Herzogtum Braunschweig vom 15. April 1867 (Nieders. GVBl. Sb III S. 310), zuletzt geändert durch Artikel 45 des zweiten Anpassungsgesetzes vom 2. Dezember 1974 (Nieders. GVBl. S. 535), auf der Allgemeinen Bergverordnung für Untertagebetriebe, Tagebaue und Salinen (ABVO) vom 2. Februar 1966 (Nds. MBl Nr. 15/1966 S. 337), zuletzt geändert durch die zweite Verordnung zur Änderung der Allgemeinen Bergverordnung über Untertagebetriebe, Tagebaue und Salinen vom 16. März 1971 (Nds. MBl. Nr. 11/1971 S. 338).

Die Genehmigungen des Bergamtes Goslar wurden durch eine Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig nach § 6 des Atomgesetzes zur Aufbewahrung von kernbrennstoffhaltigen Abfällen ergänzt.

I. Thesen zur Rolle und zu den Beziehungen der EGT im System der Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland

(Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung

15.4.1978

Anlage 1 zum Protokoll der 1. Sitzung des WTB, Vorlage zu Punkt 4 der Tagesordnung)

Zur Intensivierung der Arbeiten auf dem Gebiet der sicheren Lagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Schichten haben KfK und GSF ihre bisherigen Aktivitäten in der EGT zusammengefaßt.

Ziel der EGT ist es, die wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen für die Errichtung und den Betrieb von Endlagern für radioaktive Stoffe zu schaffen.

Der zwischen KfK und GSF abgeschlossene Vertrag über die Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung regelt lediglich das Verhältnis zwischen diesen beiden Partnern bezüglich der Planung, Abstimmung und Durchführung von F+E-Arbeiten auf dem Gebiet der Tieflagerung radioaktiver Abfälle.

Rolle und Stellung der EGT im Gesamtprojekt "Endlagerung radioaktiver Abfälle" und ihr Verhältnis zu den für die Errichtung und den Betrieb von Endlagerung zuständigen Stellen des Bundes (BMI, PTB) sind derzeit noch nicht geklärt. Es ist daher notwendig, aus der Sicht der EGT einige für die Arbeit der Entwicklungsgemeinschaft wichtige Aussagen thesenhaft festzuhalten.

1. Als F+E-Institution sieht die EGT es als ihre Aufgabe an, die für die Methodenentwicklung zur Endlagerung radioaktiver Abfälle erforderlich gehaltenen Vorhaben zu erfassen und hierfür ein flächendeckendes F+E-Programm vorzulegen und regelmäßig zu ergänzen. Sie ist prinzipiell bereit, koordinierende Funktionen für die auf diesem Gebiet durchzuführenden Arbeiten in der Bundesrepublik zu übernehmen, soweit sie hiermit beauftragt wird. Die EGT wird das flächendeckende F+E-Programm insbesondere mit der PTB abstimmen.
2. Die EGT wird nicht in der Lage sein, alle im flächendeckenden F+E-Programm für die Errichtung eines Endlagers erforderlich erachteten F+E-Arbeiten mit eigenen Mitteln und Personal selbst durchzuführen. Die EGT legt ihr jährliches F+E-Programm / einem wissenschaftlich-technischen Beirat vor, in dem die an der Endlagerung radioaktiver Abfälle beteiligten Institutionen vertreten sind.
3. Die Ergebnisse des von der EGT durchgeführten F+E-Programmes stehen der PTB zur Verfügung. Die EGT ist bereit, die PTB bei aktuellen Fragestellungen zu unterstützen und zu beraten, soweit dadurch die Durchführung des vorher mit allen Beteiligten abgestimmten F+E-Programmes der EGT nicht gefährdet wird.
4. Die EGT ist bereit, bauzugehörige F+E-Arbeiten durchzuführen, wenn die Durchführung ihres F+E-Programmes dies gestattet.
5. Über die Weitergabe von Know-how an die Industrie und sonstige Dritte müssen noch Vereinbarungen getroffen werden.
6. Die EGT ist bestrebt, die internationale Zusammenarbeit auf ihrem Arbeitsgebiet auszubauen.

J. Definition des Safety Case und Safety Assessment

Vielfach führten Missverständnisse zu unterschiedlichen Beurteilungen der Relevanz von F&E-Arbeiten. Aus diesem Grund veranstaltete das BMWi am 2. – 3. April 2008 im Forschungszentrum Karlsruhe ein Fachgespräch zum Langzeitsicherheitsnachweis / Safety Case. Der Begriff „Case“ steht hier im Sinn einer juristischen Verhandlungssache. Im Rahmen dieser Veranstaltung definierte das BMWi die Begriffe folgendermaßen:

- **Langzeitsicherheitsnachweis/ Safety Case** wird verwendet, davon zu überzeugen, dass es einen Satz vernünftiger und belegbarer Argumente gibt, der zeigt, dass das Endlager sicher sein wird. Er beinhaltet eine ausführliche und verständliche Erläuterung, wie die Sicherheit erreicht wird, und eine ähnliche Diskussion der Ungewissheiten, die aus dem begrenzten wissenschaftlichen Verständnis des Systemverhaltens resultieren.
- Der Begriff “Safety Case” ist zu unterscheiden von dem ebenfalls gängigen Begriff “**Safety Assessment**” (**Sicherheitsbewertung**). Dieser Begriff wird von IAEA definiert als: “Vorgang der systematischen Analyse der mit der Anlage verbundenen Gefährdungen und der Fähigkeit von Standort und Auslegung, die geforderten Sicherheitsfunktionen zu gewährleisten und die technischen Anforderungen zu erfüllen“.

Wesentliche Aufgaben des Safety Case sind die:

- Darstellung der umfassenden Sicherheitsnachweise für die Betriebs- und die Nachbetriebsphase des Endlagers,
- Schaffung einer Vertrauensbasis bei den Verfahrensbeteiligten,
- Bereitstellung der Grundlage für Entscheidungen innerhalb des Implementierungsprozesses.

Wesentliche Inhalte des Safety Case sind:

- Darlegung eines Sicherheitskonzeptes.
- Demonstration, dass der Kenntnisstand für einen belastbaren Sicherheitsnachweis ausreicht.
- Beschreibung der Unsicherheiten im Kenntnisstand und Diskussion der Konsequenzen.
- Nachweis, dass die Sicherheitsanforderungen vollständig erfüllt werden.
- Beschreibung des entsprechenden FuE-Bedarfs und Vorschläge für die Optimierung der folgenden Stufe der Endlagerentwicklung.

Nach der Definition der NEA stellt sich der Safety Case als Satz von folgenden Unterlagen dar:

1. Komponente: Darlegung des Zwecks
2. Komponente: Beschreibung der Sicherheitsstrategie
3. Komponente: enthält
 - Informationen und Werkzeuge zur Führung des Sicherheitsnachweises,
 - für den Sicherheitsnachweis relevante Daten,
 - Nachweismethoden und –modelle für die Prognose der Entwicklungen.

4. Komponente: enthält Nachweise, dass die Sicherheitsprinzipien befolgt und die Schutzziele eingehalten werden.
5. Komponente: Feststellung, dass Bau eines sicheren Endlagers möglich und die beantragte Genehmigung gerechtfertigt ist

Die Schwierigkeit der Aufgabe liegt darin, einen Safety Case so anzulegen, dass alle Stakeholder sich und ihre Bedenken ernst genommen sehen. Daher ist bei der Festlegung der Qualität der Wechselbeziehung mit großer Sorgfalt und überzeugendem Einfühlungsvermögen vorzugehen.

K. Konzepte zur Durchführung von Langzeit-Sicherheitsanalysen

Sicherheitsanalysen für ein radioaktives Endlager gehen weit über die Zeiträume hinaus, wie sie in den Ingenieurwissenschaften üblicherweise betrachtet werden. Außerdem erstreckt sich eine wissenschaftlich fundierte Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern auf sehr komplexe Zusammenhänge und Wechselwirkungen. Die Komplexität erstreckt sich auf die Geologie, die langlebigen Radionuklide und ihre Interaktionen, und die Unsicherheiten bei der Extrapolation von Labordaten auf lange Zeiträume. Aus diesem Grund erfordern Langzeitsicherheitsanalysen für ein Endlager eine interdisziplinäre Bearbeitung.

Probabilistische Sicherheitsanalysen untersuchen die Risiken eines Endlagers mittels der Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Systemanalyse. Die Analyse fragen (a) Was kann versagen? (b) Wie wahrscheinlich ist es? Und (c) Was sind die Auswirkungen?. Wesentliche Punkte bei der Durchführung einer probabilistischen Sicherheitsanalyse für ein Endlager sind

- Bestimmung der Störfälle, die zu einer Freisetzung führen können (störfallauslösende Ereignisse, engl. „initiating events“).
- Festlegung des Spektrums der störfallauslösenden Ereignisse.
- Analyse der Störfallabläufe (Ereignis- und Fehlerbäume) als probabilistisches Modell.
- Ermittlung der Eingangsgrößen in das probabilistische Modell (Wahrscheinlichkeitsgrößen).

Danach wird das probabilistische Modell berechnet und das Risiko bewertet.

Während bei technischen Anlage auf Erfahrungswerte zur Abschätzung der Eingangsgrößen (z.B. Versagenswahrscheinlichkeiten) zurück gegriffen werden kann, sind solche Daten für Langzeit-Sicherheitsanalysen kaum verfügbar. Trotzdem wurde/wird dieses Verfahren angewandt, z.B. in den USA als „Total System Performance Assessment“ für das geplante Endlager Yucca Mountain.

In Deutschland wurde das Konzept der deterministischen Sicherheitsanalyse verfolgt. Diese erstreckt sich auf alle Bereiche des Endlagers und beinhaltet die

- Beschreibung des Zustands der Anlage und der allgemeinen und speziellen Schutzziele.
- Potentielle Störfall-/Ereignisablaufanalyse und die daraus abgeleiteten Konsequenzen.

Da auch im Falle der deterministischen Sicherheitsanalysen bestimmte Daten nicht verfügbar sind, werden solche Daten mittels Wahrscheinlichkeitsansätzen simuliert.

Unabhängig von der Art der Sicherheitsanalysen werden Analysen der Störfall- Ereignisabläufe benötigt. Diese werden als „Szenarien“ bezeichnet. Die Entwicklung sinnvoller Szenarien beinhaltet die gesamte Komplexität des Endlagersystems einschließlich Abfall, Temperatur, Barrieren, Geologie, langlebige Radionuklidwechselwirkungen (Löslichkeit und Sorption) und die damit verbundenen Unsicherheiten. Zu Entwicklung von Szenarien bedient man sich der Analyse von „Features“, „Events“ und „Processes“ (FEP). Kataloge der ggf. zu berücksichtigenden FEP wurden von NEA bzw. IAEA entwickelt und für nationale Anwendungen entsprechen angepasst.

In Abb. 16 ist das Vorgehen dargestellt. Aus der Liste der FEP werden die Anzahl relevanter FEP ausgewählt und diese zu einem Szenarium kombiniert. Es liegt auf der Hand, dass sehr unterschiedliche Szenarien aus der Vielzahl von FEP entwickelt werden können. Die Kombinationen der FEP werden in mathematische Modelle umgesetzt und mit bestimmten Parametersätzen berechnet. Diese Parameter werden z.T. mit probabilistischen Methoden variiert. Aus den Ergebnissen für die jeweils verwendeten Parametersätze kann dann die Bedeutung des jeweiligen Szenariums für die Langzeit-Sicherheit bewertet werden.

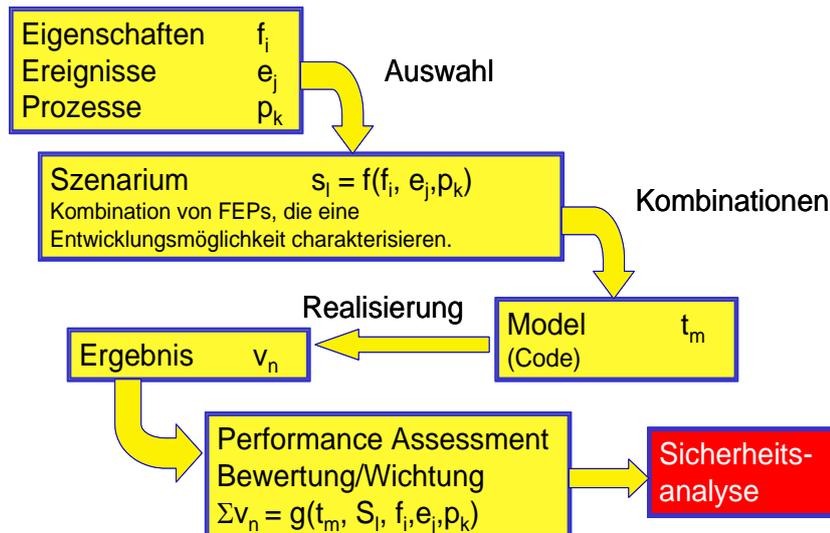


Abb. 16 Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen: Von FEP zu Szenarien, Modellen und Bewertung der Ergebnisse

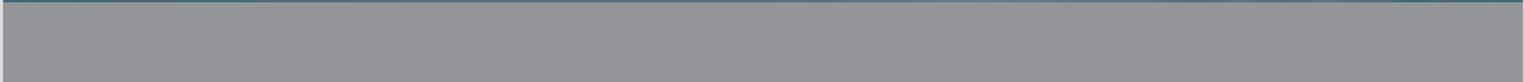
Es muss angemerkt werden, dass die Modelle keine ab-initio Modelle sind, sondern nur Teilaspekte der Realität auf der Basis freier Parameter beschreiben. Die Parameter stammen i.A. aus Experimenten, oder geochemischen, thermodynamischen, etc. Datenbasen. Aus diesem Grund sind keine Extrapolation der Modelle über den zugrunde gelegten und parametrisierten Satz von Zuständen oder Prozessen möglich.

L. Beteiligung des KIT an EURATOM-Projekten zu Endlagerthemen

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten EURATOM-Projekte zu Endlagerfragen zusammengestellt, an denen das KIT/KfK beteiligt war. Projekte zu P&T sind nur teilweise, zu anderen kerntechnischen Themen sind die Projekte nicht aufgeführt.

EU Framework Programm	Titel		Koordinator	Ab-schluss-bericht
	Chemical reaction of fabricated and high burnup spent UO ₂ fuel with saline brines	1996	INE	[163]
	Corrosion evaluation of metallic materials for long-lived HLW/spent fuel disposal containers	1998	INE	
	Source term for performance assessment of spent fuel as a waste form	2000	INE	[164]
5. FP	Aquatic Chemistry and Thermodynamics of Actinides and Fission Products Relevant to Nuclear Waste Disposal (ACTAF)		INE	[165]
	Establishment of a network of excellence for actinide sciences (ACTINET)		INE	[166]
	Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt, Phase II (BAMBUS II)		PTKA	[167, 168]
	Building confidence in deep disposal (BORIS)			
	State-of-the-art document on the corrosion behaviour of container materials (COBECOMA)			[169]
	Long-term Performance of Candidate Materials for HLW/Spent-fuel Disposal Containers (CONTAINER CORROSION)		INE	[170]
	Long-term behaviour of glass: Improving the glass source term and substantiating the basic hypotheses (GLASTAB)			[171]
	Humic Substances in Performance Assessment of Nuclear Waste Disposal: Actinide and Iodine Migration in the Far-field (HUPA)		INE	[172]
	Spent Fuel Stability under Repository Conditions (SFS)			[173]
	Thematic Network on Advanced Options for Partitioning and Transmutation (ADOPT)			[174]
	Partitioning: New Solvent Extraction Processes for Minor Actinides (PARTNEW)			[175]
6.FP	FUNMIG: Fundamental Processes of Radionuclide Migration		INE	[176]

	MICADO: Model Uncertainty for the Mechanism of Dissolution of Spent Fuel in Nuclear Waste Repository			[177]
	NF-PRO: Understanding and Physical and Numerical Modelling of the Key Processes in the Near Field and their Coupling for Different Host Rocks and Repository Strategies			[178]
	PAMINA: Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case			[179]
	Establishment of a network of excellence for actinide sciences (ACTINET-6)	2004-2009		[180]
	THERESA: Coupled Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical Processes for Application in Repository Safety Assessment			[181]
7.FP	RECOSY (REDOX PHENOMENA CONTROLLING SYSTEMS)	2008-2012	INE	[182]
	Crystalline ROCK retention processes (CP CROCK)	2011-2013	INE	[183]
	Slow processes in close-to-equilibrium conditions for radionuclides in water/solid systems of relevance to nuclear waste management (SKIN)	2011-2013		
	Fast / Instant Release of Safety Relevant Radionuclides from Spent Nuclear Fuel (CP FIRST-Nuclides)	2012-2014	INE	[184]
	Network of excellence for actinide sciences (Integrated Infrastructure Initiative = I3) ACTINET-I3			
	Transnational Access to Large Infrastructure for a Safe Management of Actinide (TALISMAN)	2013-2016		
	Carbon-14 Source Term (CAST)	2013-2018		
	Graduate and Executive Nuclear Training and Lifelong Education (GENTLE)			
Horizon 2020	Cement based materials (Cebama)	2015-2019	INE	



ISSN 1869-9669
ISBN 978-3-7315-0586-0

