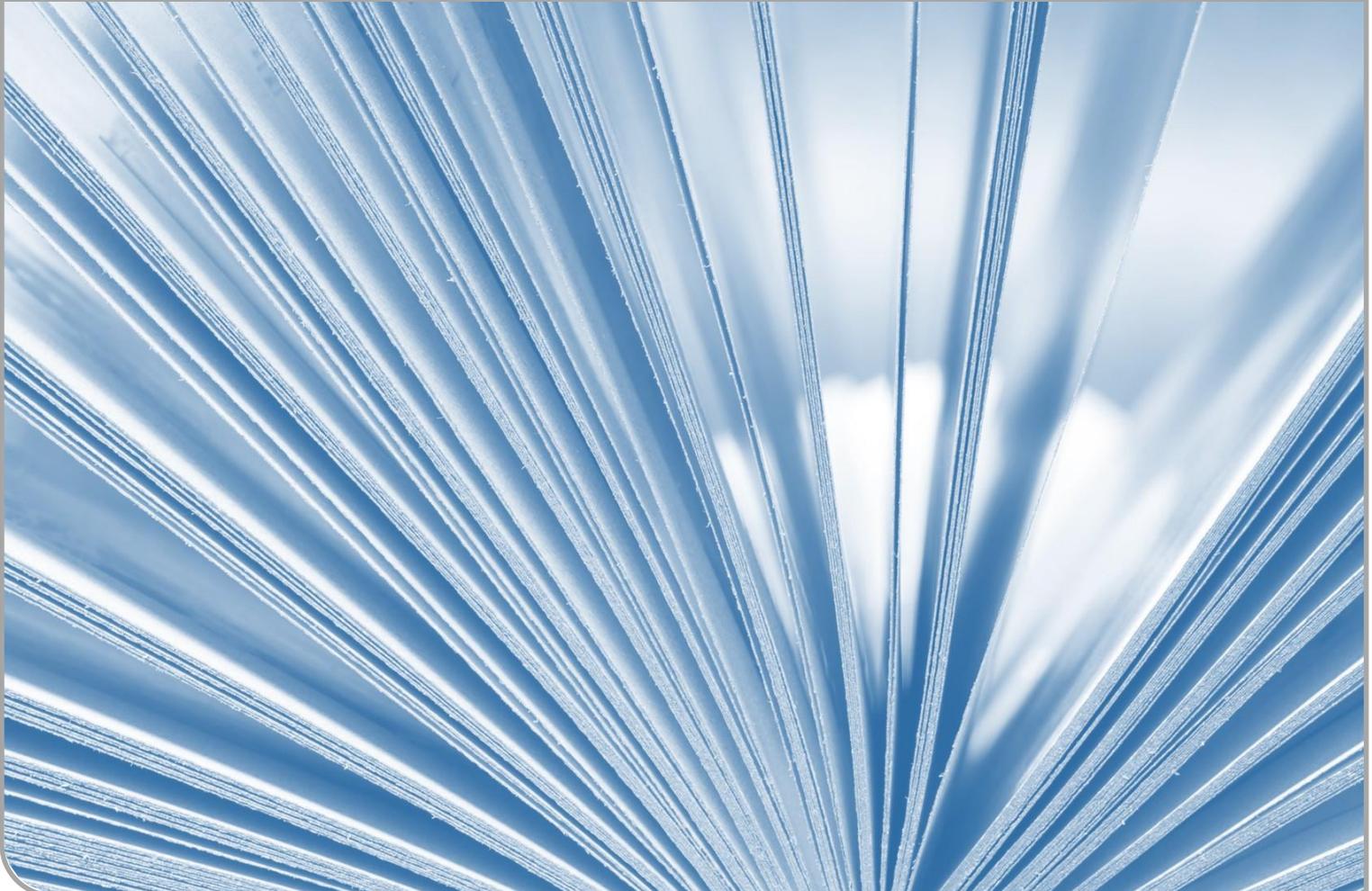


Thermomechanische Modellrechnungen zur Endlagerung im KIT-INE

B. Kienzler

INE SCIENTIFIC WORKING DOCUMENTS

02



Institut für Nukleare Entsorgung (INE)

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
www.ine.kit.edu

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
www.kit.edu



This document is licensed under the Creative Commons Attribution – Share Alike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>

2021

URL: <http://www.ine.kit.edu/53.php>

ISSN: 2701-262X

DOI: 10.5445/IR/1000130258

Kurzfassung

Zwischen 1974 und 2016 existierte im Institut für Nukleare Entsorgung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT, früher Kernforschungszentrum Karlsruhe) eine kleine Arbeitsgruppe, die Modellentwicklungen und Modellrechnungen zum thermischen und thermomechanischen Verhalten des potentiellen Wirtsgesteins Steinsalz durchführte. Trotz geringer Personalstärke war die Gruppe sehr effektiv und trug zu vielen Themen im Zusammenhang mit der Endlagerung hochradioaktiver, wärmeproduzierender Abfälle bei. Diese F&E-Arbeiten umfassten die Modellierung von Temperaturfeldern und die damit verbundenen thermomechanischen Prozesse, wie Bohrloch- und Streckenkonvergenz, Salzgruskompaktierung und die Einflüsse der Auflockerungszonen um die Endlagerholräume. Da diese F&E-Arbeiten im INE nicht mehr bearbeitet werden, soll der vorliegende Bericht die Arbeiten für Nichtspezialisten/innen zusammenfassen und Hinweise auf die verfügbare Literatur geben.

Abstract

Between 1974 and 2016, a small working group existed in the Institute for Nuclear Waste Disposal of the Karlsruhe Institute of Technology (KIT, formerly Nuclear Research Center Karlsruhe), which carried out model developments and model calculations for the thermal and thermomechanical behavior of the potential host rock rock salt. Despite the small number of staff, the group was very effective and contributed to many issues related to the disposal of highly radioactive, heat-producing waste. This R&D work included modeling of the temperature fields and the associated thermomechanical processes such as borehole and gallery convergence, crushed salt compaction and the effects of the excavation damage zones around the repository cavities. As this R&D work is no longer proceeded at INE, the report intends to summarize the work for non-specialists and to provide information on the available literature.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	1
Abstract	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis.....	6
Vorwort.....	7
1 Einleitung.....	8
2 Hintergrund	10
3 Entwicklung von Modellvorstellungen und Stoffgesetze	12
3.1 Temperaturentwicklung im Steinsalz	12
3.2 Thermomechanische Beschreibung	13
3.3 Salzgruskompaktierung	16
3.4 Permeabilität von kompaktiertem Salzgrus	17
4 Experimente im Steinsalz unter Beteiligung von INE.....	18
4.1 In-Situ Experimente	18
4.2 Standardsonde	19
4.3 Triaxiales Kompaktierungsverhalten von Salzgrus	21
5 Rechencodes.....	23
5.1 Temperaturprogramme.....	23
5.2 Thermomechanische Rechenverfahren	25
5.2.1 MAUS.....	26
5.2.2 ADINA	26
5.2.3 TRANSAL.....	26
6 Verifikation und Validierung von Rechenprogrammen	28
6.1 Modellierung von Temperaturfeldern.....	28
6.2 Modellierung der Bohrlochkonvergenz.....	29
6.3 Projekte zu Entsorgungsalternativen	30
6.4 Thermische und thermomechanische Simulation der Streckenlagerung (TSS Versuch).....	32
6.5 EU Projekte NFPPro und THERESA	32
6.6 PTKA Projekte	33
7 Abschließende Anmerkungen	36
Literaturverzeichnis.....	37
Anhang.....	42

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Vereinfachtes rheologisches Modell zur Erfassung des viskoelastischplastischen Stoffverhaltens von Steinsalz nach.	13
Abb. 2	Rheologisches Stoffmodell von Steinsalz nach (Kiehl, Döring et al. 1998).	15
Abb. 3	Anordnung von Messstellen im Temperaturtestfeld 4.	19
Abb. 4	Schematischer Aufbau der Standard in-situ konvergenz Meßsonde.....	20
Abb. 5	Ansicht der triaxialen Meßeinrichtung	22
Abb. 6	Finites Element Modell und Randbedingungen für Rechnungen zur Streckenlagerung.31	
Abb. 7	Veränderung der berechneten volumetrischen Deformation um eine Strecke in Steinsalz nach dem Einbau einer starren Wand zu den Zeitpunkten 0,5 und 85 Jahren (Geckeis, Altmaier et al. 2014).	34
Abb. 8	Qualitativer Vergleich der berechneten Brüche in einem Pfeiler im Steinsalz (rechts) mit Beobachtungen in der Waste Isolation Plant (WIPP) in den USA (Geckeis, Altmaier et al. 2015).	35

Tabellenverzeichnis

Tab. I	Thermoelastische Eigenschaften von Steinsalz: Materialmodel und Parameter	14
Tab. II	Überblick über die von RWTH Aachen erstellten Rechenprogramme (Ploumen, Strickmann et al. 1979)	24

Abkürzungsverzeichnis

ABRA	Abteilung Behandlung Radioaktiver Abfälle im Kernforschungszentrum Karlsruhe
ADB	Abteilung Dekontaminationsbetriebe im Kernforschungszentrum Karlsruhe
ATW	Zeitschrift „International Journal for Nuclear Power“
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Bq	Bequerel, Einheit für radioaktive Zerfälle (Zerfälle pro Sekunde)
Ci	Curie, frühere Einheit für radioaktive Zerfälle $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
ECN	niederländische Energie-Forschungs-Stiftung, Petten
EDZ	excavation disturbed zone
EGT	Entwicklungsgemeinschaft Tief Lagerung
FD	finite Differenzen Verfahren
FEM	finite Elemente Verfahren
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
GSF	Gesellschaft für Strahlenforschung, heute HMGU München
HAW	hoch radioaktive Abfälle (<u>h</u> ighly <u>r</u> adio <u>a</u> ctive <u>w</u> aste), heute: Wärme produzierender Abfall
Ift	Institut für Tief Lagerung (ursprünglich bei GSF, später bei GRS)
INE	Institut für Nukleare Entsorgung
KfK	Kernforschungszentrum Karlsruhe
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
L	Liter
LAW	schwach radioaktiver Abfall, heute: nicht Wärme produzierender Abfall
MAW	mittelaktiver Abfall
PWA	Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung beim Kernforschungszentrum Karlsruhe
PtKA	Projektträger Karlsruhe
RWTH	Rheinisch-Westfälische Hochschule Aachen
TMHC	Thermisch-Mechanisch-Hydraulisch-Chemische Modellierung
TSS	Thermische Simulation der Streckenlagerung
TTF	Temperatur Versuchsfeld
T	Temperatur, Einheit Kelvin
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant, New Mexico, USA

Vorwort

Im Sommer 2016 veröffentlichte die vom deutschen Bundestag eingesetzte Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ ihren Abschlussbericht, der dazu dienen soll, in einem vergleichenden Auswahlverfahren den bestmöglichen Standort für radioaktive Abfälle zu finden¹. Der Bericht erstreckt sich über die Auswahl- und Abwägungskriterien sowie über eine umfassende Bürgerbeteiligung. Die Kommission priorisierte die Endlagerung in einem Bergwerk. Hiermit verbundene Unwägbarkeiten sollen durch die Berücksichtigung von zeitlich begrenzten Möglichkeiten zur Rückholung, beziehungsweise Bergung der Behälter, minimiert werden. Mittlerweile wurden wesentliche Forderungen der Kommission gesetzlich festgeschrieben². Da der Prozess der Standortauswahl, der Erkundung mehrerer Standorte, der Festlegung auf einen bestmöglichen Standort, sowie die Errichtung und Genehmigung und der Betrieb viele Jahrzehnte in Anspruch nehmen wird, ist es notwendig, Knowhow-Erhalt zu betreiben.

Auch zum Knowhow-Erhalt machte sich die Kommission Gedanken. Im Kapitel 6.7.2 „Welche Daten müssen wie lange gespeichert werden?“ führt der Abschlussbericht der Kommission aus: „... *Vielmehr müssen die Daten und Dokumente in einer aktiven Weise immer wieder hinsichtlich ihrer Qualität und Verwertbarkeit überprüft und weitergegeben werden. Dies setzt voraus, dass eine direkt damit befasste Organisation diese Daten bewahrt und ein institutionelles „Bewusstsein“ für die sicherheitstechnische Bedeutung dieser Daten und Dokumente hat. Deshalb sind normale Archivorganisationen, bei denen diese Daten ein Papierbündel unter vielen anderen sind, für diese Aufgabe grundsätzlich nicht geeignet.*“

Zahlreiche Forschungsarbeiten wurden in der Vergangenheit durch öffentliche Mittel gefördert und die gewonnenen Daten und Informationen meist publiziert. Allerdings sind diese Publikationen häufig auf unterschiedliche Berichte, Zeitschriften, Konferenzen und teilweise in der gauen Literatur verteilt, so dass es nicht leicht fällt, sich einen Überblick über die Datenlage zu verschaffen. Der vorliegende Bericht steht in einer Reihe von Zusammenfassungen zu verschiedenen Forschungsthemen³, die im KIT-INE bearbeitet wurden und soll helfen, besonders neuen Mitarbeitern/innen von deutschen Implementor-, Technical Support- und Genehmigungsorganisationen schnell einen Überblick über die früheren Forschungsarbeiten, Kompetenzen und Erfahrungen zu gewinnen.

¹ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, "ABSCHLUSSBERICHT: Verantwortung für die Zukunft: Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes," Geschäftsstelle der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs 268, 2016.

² Gesetz zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, 2017.

³ B. Kienzler, C. Borke, V. Metz, and M. Schlieker, "Long-Term Interactions of Full-Scale Cemented Waste Simulates with Salt Brines," Karlsruhe Institute of Technology, KIT SR 7721, 2016.

B. Kienzler, "50 Jahre Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung im KIT," Karlsruhe Institute of Technology, KIT SR 7723, 2017.

B. Kienzler, "Flüssige hochradioaktiver Abfälle: Verglasung und andere Optionen," KIT SR 7730, 2017.

B. Kienzler, "F&E-Arbeiten zur Korrosion von Endlager-Behälterwerkstoffen im INE," KIT SR 7729, 2017.

B. Kienzler and J. S. Swanson, "Microbial Effects in the Context of Past German Safety Cases," KIT SR 7744, 2017.

1 Einleitung

Im Zeitraum zwischen 1968 und 2016 wurden im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK), dem heutigen Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Institut für Nukleare Entsorgung (INE, vormals Abteilung Behandlung Radioaktiver Abfälle, ABRA) zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung von hochradioaktiven, wärmeproduzierenden Abfällen durchgeführt. Diese betrafen sowohl die Verglasung von flüssigen Abfällen aus der Wiederaufarbeitung, das Korrosionsverhalten von Verpackungsmaterialien für diese Abfälle in einem Endlager sowie die durch die Wärmeentwicklung der Abfälle verursachten thermischen und thermomechanischen Prozesse in einem Endlager. Bis in die 1990er Jahre war allgemeiner Konsens in Deutschland, dass diese Abfälle in einem Bergwerk in einer Steinsalzformation endgelagert werden sollten. Der vorliegende Bericht stellt die im Institut für Nukleare Entsorgung durchgeführten F&E-Arbeiten zusammen. Für Details zu den Methoden und Ergebnissen wird auf die angegebene Literatur verwiesen.

Zu Beginn der systematischen thermischen und thermomechanischen F&E-Arbeiten im Zusammenhang mit der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in einem Endlager im Steinsalz waren folgende Organisationen involviert. Dies waren die

- Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München, mit dem Institut für Tieflagerung (IfT), welches zusammen mit der
- Abteilung Behandlung radioaktiver Abfälle (ABRA), heute Institut für Nukleare Entsorgung (INE) des Kernforschungszentrums Karlsruhe die Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung (EGT) bildete, die
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover und die
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft.

Das Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der RWTH Aachen erhielt Aufträge von KfK bzw. GSF zur Entwicklung von Stoffmodellen und der Programmierung von entsprechenden Codes. Modellrechnungen wurden von der BGR und der EGT durchgeführt, darüber hinaus erfolgten insbesondere im Salzbergwerk Asse in-situ Experimente mit dem Ziel, die thermo- und thermomechanischen Phänomene im Steinsalz bei der Endlagerung wärmeproduzierender Abfälle zu quantifizieren. Die Feldversuche im Salzbergwerk Asse zur Messung des Wärmefeldes und die Bestimmung der thermomechanischen Einflüsse durch das Aufheizen des Steinsalzes wurden hauptsächlich von der BGR und der EGT durchgeführt. Die Laborversuche befassten sich mit der Untersuchung des rheologischen Verhaltens von Steinsalz unter erhöhten Drücken und Temperaturen und wurden von der BGR und der EGT durchgeführt. Wärmeleitmessungen unter in-situ und unter Laborbedingungen waren Thema der BGR. Mit den gewonnenen Messdaten konnten die Rechenmodelle weiterentwickelt und verbessert werden.

Die Verantwortlichkeiten und die Forschungsprogramme von EGT, BGR und RWTH Aachen sollten sich ergänzen. Die BGR unterstützte die Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB), die seit 1976 die Verantwortung für die Endlagerung hatte. Später erhielt die Bundesanstalt für Strahlenschutz (BfS) diese Verantwortung übertragen und war somit zuständig für die Planung, den Bau und den Betrieb der Abfallentsorgung am Standort in Gorleben, aber auch in für die Untersuchung und Interpretation von geologischen und geophysikalischen Daten, die während der Planung gewonnen wurden. Nach der Neuorganisation der Zuständigkeiten für die Endlagerung im Jahr 1976 und der Gründung der DBE wurden auch dort thermomechanische Modellrechnungen in großem Umfang durchgeführt. Verantwortlich dort war Enrique Biurrún, der von dem Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der RWTH Aachen zur DBE bzw. DBE Technology wechselte.

Seit 1976 förderte das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) Hochschulen zu verschiedenen Themen zum Kernbrennstoffkreislauf. Allerdings fand in diesem Rahmen keine Förderung von thermomechanischen Methoden bzw. Anwendungen statt. Zu dieser Zeit war Prof. Dr.-Ing. Otfried Natau

Ordinarius für Felsmechanik und Institutsleiter an der Universität Karlsruhe (1976 bis 2003). In seinem Institut kombinierte er großvolumige Triaxial-Tests mit Modellrechnungen um mechanische Gesteinseigenschaften zu ermitteln.

Im Folgenden werden die F&E-Arbeiten des KIT-INE zu thermischen und thermomechanischen Modellrechnungen zusammengefasst. Die Modellrechnungen waren mit experimentellen Arbeiten eng verknüpft, da diese einerseits Daten lieferten, die die Grundlage der Stoffmodelle darstellten, andererseits lieferten insbesondere die in-situ Tests eine Datenbasis, die zur Überprüfung der Rechencodes bzw. der Modellergebnisse willkommen war.

2 Hintergrund

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, welche 1980 zum Institut für Nukleare Entsorgungstechnik und später zum Institut für Nukleare Entsorgung (INE) erhoben wurde.

Das jährliche Aufkommen von radioaktiven Abfällen, die bei ASD konditioniert wurden, belief sich im Jahr 1967 auf über 700 m³ (Krause, Drobnik et al. 1970). Diese Menge entsprach mehr als 3500 Stück 200-Liter Fässer pro Jahr. Aus diesem Grunde bemühte sich das Kernforschungszentrum (KfK) um die Endlagerung. 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 ((Möller 2009), S. 101). Die „Projektgruppe Endlagerung radioaktiver Abfälle“ wurde im April 1964 in „Studiengruppe Tieflagerung (SGT)“ umbenannt. Die SGT entwickelte eine Reihe von Anforderungen an ein Endlager für radioaktive Abfallstoffe (Ramdohr 1967). Die Studiengruppe war auch im Rahmen eines EURATOM-Vertrags zur Bewertung verschiedener Zonen in Europa hinsichtlich ihrer Eignung zur Endlagerung radioaktiver Abfälle beteiligt (Grison, Krause et al. 1968). Die SGT war auch beteiligt an den Vorarbeiten für den Erwerb des Salzbergwerks Asse. Neben der beabsichtigten Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen, war ein umfangreiches Versuchsprogramm im Salzbergwerk Asse 2 vorgesehen. Das Versuchsprogramm erstreckte sich u. a. auf Arbeiten im Zusammenhang mit der geplanten Endlagerung von wärmeproduzierenden Abfällen, wobei

- Versuche zur Ermittlung der Wärmeausbreitung und des thermomechanischen Verhaltens von Salzgestein und der
- 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 (Krause, Ramdohr et al. 1967).

Die Forschungsarbeiten zur „Versuchseinlagerung hochaktiver Glasblöcke im Salzbergwerk Asse“ umfassten folgende Themen:

- Simulationsversuche im älteren Steinsalz (unverrohrte und verrohrte Bohrlöcher).
- Entwicklung einer Standardsonde zur Erfassung der thermomechanischen Veränderung und der Druckbelastung in Bohrlöchern (Konvergenz) (Müller and Korthaus 1983).
- Ermittlung von Absolut-Spannungen im Bergwerk Asse, rheologischen Eigenschaften des Salzes.
- Korrosionsverhalten von Werkstoffen für die Bohrlochauskleidung und Abfallverpackung unter erhöhter Temperatur.
- 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).

Die Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des indirekten Aktionsprogramms von EURATOM „Bewirtschaftung und Lagerung von radioaktiven Abfällen, Aktion Nr.7: Lagerung von hochaktiven Abfällen in geologischen Formationen“ gefördert. Direkte Beiträge des Kernforschungszentrums 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. Die Experimente waren jeweils von Modellrechnungen zu Temperaturfeldern und der Thermomechanik begleitet.

Nach der Trennung der ABRA von der ADB (1974), verblieb die „Projektgruppe Endlagerung“ bei der ABRA. Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der ABRA lag auf den Gebieten der Behandlung radioaktiver Abfälle, des Transports und der Endlagerung radioaktiver Abfälle sowie der Dekontamination von Oberflächen. Zentrale F&E-Arbeiten waren die Verfestigung hochaktiver Spaltproduktlösungen zu Borosilikatgläsern, die Entwicklung von Verfahren zur Verarbeitung mittelradioaktiver Abfalllösungen und zum Transport und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle (Krause and Rudolph 1975). Die Arbeiten der ABRA waren zum großen Teil in das Projekt „Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung (PWA)“ eingebunden. Dieses Projekt zielte auf die Errichtung eines Nuklearen Entsorgungszentrums in Gorleben ab, dessen Kernstück eine Wiederaufarbeitungsanlage mit einem Durchsatz von 1400 Tonnen abgebranntem Kernbrennstoff pro Jahr war.

Die F&E-Arbeiten der ABRA zur Endlagerung wurden im Jahr 1978 in die Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung (EGT) integriert, die die Arbeiten auf dem Gebiet der sicheren Lagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Schichten zwischen dem Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) und dem Institut für Tieflagerung (IfT) der Gesellschaft für Strahlenforschung (GSF) intensivieren sollte. Die GSF war der Betreiber der Schachanlage Asse 2. Im Rahmen dieser Kooperation implementierte man thermische und thermomechanische Modellrechenmethoden beim IfT der GSF und bei ABRA im KfK.

3 Entwicklung von Modellvorstellungen und Stoffgesetzen

3.1 Temperaturentwicklung im Steinsalz

Seit den ersten Überlegungen zur Einlagerung von hochradioaktiven wärmeproduzierenden Abfällen im Salzgestein, standen die Ausbreitung des Temperaturfeldes und die maximalen Temperaturen in und an den Abfällen im Vordergrund. Hierzu wurde die allgemeine Wärmeleitungsgleichung verwendet:

$$c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) + \dot{q} \quad (1)$$

- T Temperatur
- T Zeit
- Cp Spezifische Wärme
- λ Wärmeleitfähigkeit
- \dot{q} Eingetragene Wärmeleistung

Das erste Stoffgesetz, das für die Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Steinsalz unabdingbar war, war die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit λ . Eine Formel für die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärme c_p sowie die jeweils zugehörigen Koeffizienten finden sich bei (Ploumen, Strickmann et al. 1979):

$$\text{Wärmeleitfähigkeit in Watt m}^{-1} \text{ K}^{-1}: \lambda = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 \quad (2)$$

	a_0	a_1	a_2	a_3
Steinsalz	5,734	$-1,838 \times 10^{-2}$	$2,86 \times 10^{-5}$	$-1,51 \times 10^{-8}$
Salzgrus	0,3022	$1,568 \times 10^{-3}$	$-2,37 \times 10^{-6}$	0

$$\text{Spezifische Wärmekapazität in J m}^{-3} \text{ K}^{-1}: c_p = a_0 + a_1 \cdot T \quad (3)$$

	a_0	a_1
Steinsalz	$1,87049 \times 10^6$	$1,9386 \times 10^2$
Salzgrus	$1,0968 \times 10^6$	$1,35014 \times 10^2$

3.2 Thermomechanische Beschreibung

Im unverritzten Salzgebirge liegt normalerweise ein isotroper Primärspannungszustand⁴ vor, d.h. der durch die überlagerten Gesteine erzeugte lithostatische Spannungszustand, der sich aus der Dichte ρ der Gesteine und der Tiefe h ergibt ($g \cdot \rho \cdot h$). Dieser wird durch die Auffahrung der Grubenbaue und die Aufheizung gestört. Es stellt sich in der Umgebung der Hohlraumkontur ein deviatorischer Spannungszustand⁵ ein. Durch das visko-elastisch-plastische Materialverhalten des Steinsalzes wird sich der deviatorische Spannungszustand an der Hohlraumkontur abbauen. In Abhängigkeit vom Betrag des Spannungsdeviators und den Festigkeitseigenschaften des Salinars können sich die Spannungen entweder bruchlos, d. h. ohne Überschreiten der Dilatanzgrenze, ausschließlich durch Konvergenz abbauen. In diesem Fall verlaufen die Deformationen volumentreu und rissfrei.

Seit 1978 wurden verstärkt die mechanischen Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf das umgebende Steinsalz modellmäßig bearbeitet. Die Rechenprogramme für thermomechanische und gebirgsmechanische Analysen wurde gemeinsam mit der BGR und der RWTH Aachen entwickelt. Ein komplexes rheologisches Modell für Steinsalz, das primäres und sekundäres Kriechen enthält und die Temperaturabhängigkeit berücksichtigt, wurde entwickelt und in Rechenprogramme eingebaut. Als Ergebnis lag ein Stoffmodell vor, das das thermoelastische, viskoelastische, elastisch-plastische Verhalten sowie das primäre und sekundäre plastische Kriechen des Steinsalzes berücksichtigte. Ein vereinfachtes rheologisches Stoffmodell zur Beschreibung des visko-elastisch-plastischen Stoffverhaltens von Steinsalz ist in Abb. 1 gezeigt, wie es im Rahmen des EU-Forschungsprogramms EG-Vertrag Nr. 058-78-1 WAS D von RWTH Aachen entwickelt wurde (EGT 1978).

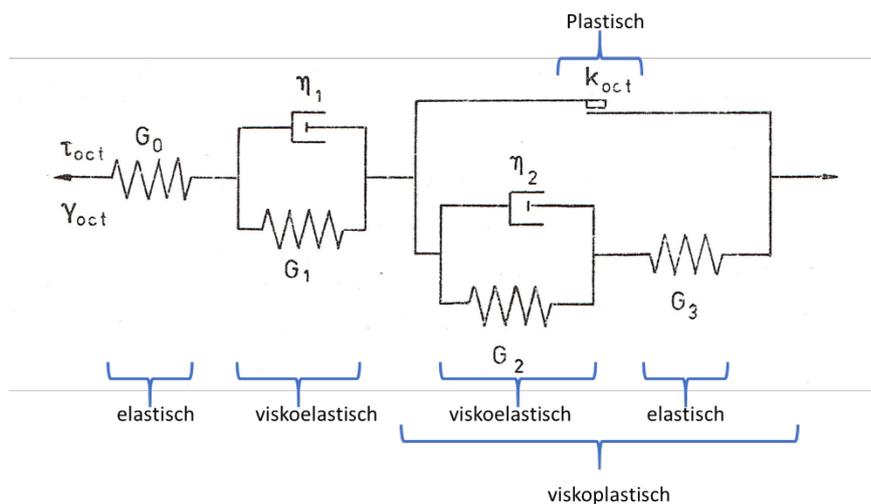


Abb. 1 Vereinfachtes rheologisches Modell zur Erfassung des viskoelastischplastischen Stoffverhaltens von Steinsalz nach.

G_i : Schubmodul, η_i : Viskositätsparameter, k_{oct} : Oktader-Fließspannung

τ_{oct} : Oktaderspannung, Y_{oct} : Oktaederverzerrung

Aus Beobachtungen war das primäre Kriechen des Salzgesteins direkt nach dem Auffahren von Hohlräumen bekannt, da der Effekt jedoch schnell abklang, wurde dieses Phänomen in der Modellierung nicht weiter berücksichtigt. Die thermomechanische Modellierung des Steinsalzes erfolgte über die Kombination aus einem elastischen Anteil und dem sekundären Kriechen (Langer and Wallner 1979, Pudewills, Korthaus et al. 1988).

⁴ Die mechanische Spannung ist ein Maß für die innere Beanspruchung eines Körpers infolge dessen Belastung von außen.

⁵ Die deviatorische Spannung ist ein Maß für die Verformung eines Körpers und beschreibt wie weit der Spannungszustand vom isotropen Zustand entfernt ist.

Tab. I Thermoelastische Eigenschaften von Steinsalz: Materialmodel und Parameter

E Modul	E	12000 -24000	MPa
Querdehnungszahl Poisson' ratio	ν	0,3	-
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	α	4×10^{-5}	K^{-1}

$$\dot{\epsilon}_c = A \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^5 \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \quad (4)$$

$\dot{\epsilon}_c$	Effektive sekundäre Kriechdehnungsrate	s^{-1}
σ	Effektive Spannung	MPa
A	Konstante	$2,08 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-5} \text{ s}^{-1}$
σ_0	Referenz-Spannung	1 MPa
Q	Aktivierungsenergie	$54,2 \text{ kJ mol}^{-1}$
T	Temperatur	K
R	Universelle Gaskonstante	$8,314 \times 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Im Rahmen der Beschreibung der orts- und zeitabhängigen Spannungen und Dehnungen im Gestein wird der Begriff des Spannungstensors verwendet. Ein Spannungstensor ist eine wesentliche Größe der Kontinuumsmechanik. Ein Spannungstensor ist ein Tensor zweiter Stufe, der den Spannungszustand in einem bestimmten Punkt innerhalb des Modellgebiets beschreibt. Der Spannungstensor fasst die Normalspannungen in Normalenrichtung, sowie tangential wirkende (transversale) Scherspannungen zu einem mathematischen Objekt zusammen. Auf den in folgender Liste aufgeführten Definitionen beruhte der von Albers et al. 1984 weiterentwickelte Finite Element Code MAUS (Albers, Biurrun et al. 1984), der eine Erweiterung des Codes VISCOPLAST von Owen&Hinton darstellte (Owen and Hinton 1980).

$\dot{\epsilon}_{ij}^{el}$	$= \frac{1 + \nu}{E} \cdot \dot{\sigma}_{ij} - 3 \frac{\nu}{E} \cdot \delta_{ij} \cdot \dot{\sigma}_m$	Tensor der elastischen Dehnungsrate
$\dot{\epsilon}_{ij}^{th}$	$= \alpha \cdot \delta_{ij} \cdot \dot{T}$	Tensor der thermischen Dehnungsrate
$\dot{\epsilon}_{ij}^{vpl}$	$= A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \cdot \sigma_{eff}^n$	Tensor der viskoplastischen Dehnungsrate
$\dot{\epsilon}_{ij}^{tot}$	$= \dot{\epsilon}_{ij}^{el} + \dot{\epsilon}_{ij}^{th} + \dot{\epsilon}_{ij}^{vpl}$	Tensor der totale Dehnungsrate
$\dot{\sigma}_{ij}$		Tensor der Spannungsänderungsgeschwindigkeit
$\dot{\sigma}_m$		Änderungsgeschwindigkeit der mittleren Spannung
σ_{eff}		effektive Spannung
ν		Querdehnungszahl

E		Elastizitätsmodul
α		linearer Wärmeausdehnungskoeffizient
A		Konstante
Q		Aktivierungsenergie
R		allgemeine Gaskonstante
N		Spannungsexponent
T		Temperatur
δ_{ij}		Kronecker Symbol

Mit zunehmender Konkretisierung der Endlagerkonzepte für hochradioaktive Abfälle wurde die Berücksichtigung von lockerem Salzgrus als Versatzstoff in den Lagerstrecken erforderlich. Die Verformbarkeit und Kompaktierbarkeit dieses Stoffes stellte eine wesentliche Herausforderung an die thermomechanische Beschreibung dar.

Zur Vervollständigung der rheologischen Beschreibung von Steinsalz sei angemerkt:

Ende der 1990er-Jahre wurde ein Stoffgesetz für Steinsalz entwickelt, welches neben dem primären, sekundären und tertiären Kriechen auch die Dilatanz⁶, den Kriech- und Zugbruch sowie das Nachbruchverhalten simulieren kann (Kiehl, Döring et al. 1998). Das zugrunde liegende rheologische Modell ist zusammen gesetzt aus in Reihe und parallel geschalteten Federn, viskosen Dämpfern und Reibungselementen. Mit diesem Modell ist es möglich, das Dehnungs-Zeit-Verhalten und Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Steinsalz phänomenologisch zu beschreiben.

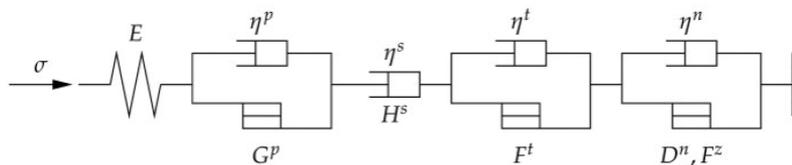


Abb. 2 Rheologisches Stoffmodell von Steinsalz nach (Kiehl, Döring et al. 1998).

In diesem Modell werden hierbei fünf Verformungsanteile unterschieden, welche durch Superposition überlagert werden. Der elastische Verformungsanteil E wird durch eine Feder (*Hooke-Körper*) beschrieben. Die Bestimmung des Verformungsanteils des primären Kriechens P erfolgt durch ein verfestigendes Reibungselement, welches mit einem viskosen Dämpfer parallelgeschaltet ist. Das sekundäre Kriechen S wird durch ein viskoses Dämpferelement berücksichtigt. Der viskoplastische Verformungsanteil des tertiären Kriechens T wird durch ein entfestigendes Reibungselement und einen parallel geschalteten, viskosen Dämpfer simuliert. Zusätzlich erfolgt die Bestimmung des Verformungsanteils N des Nachbruchverhaltens durch einen viskosen Dämpfer, parallel geschaltet mit einem entfestigenden Reibungselement, welches zur Beschreibung des Schubbruchs (Kriechbruch) oder eines Zugbruchs herangezogen wird. Dieses Modell wurde im INE jedoch nicht in dieser Form verwendet.

⁶ Dilatanz ist eine Eigenschaft eines granularen Materials, wie z.B. Salzgrus, sein Volumen unter der Einwirkung von Scherkräften durch Auflockerung zu vergrößern.

3.3 Salzgruskompaktierung

Für die Kompaktierung von Salzgrus wurde auf ein Modell zurückgegriffen, welches an der RWTH Aachen entwickelt wurde (Hein 1991) und von Korthaus adaptiert wurde (Korthaus 1996, Korthaus 1998).

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \cdot (h_1 \cdot p^2 + h_2 \cdot q^2)^2 \cdot \left(h_1 \cdot \frac{p}{3} \cdot [\mathbf{1}] + h_2 \cdot [\mathbf{S}]\right) \quad (5)$$

$$h_1(\eta) = \frac{a}{\left(\left(\frac{(\eta_0)^c}{\eta} - 1\right) + d\right)^m}$$

$$h_2(\eta) = b \cdot h_1(\eta) + 1$$

Hierbei bedeutet

$\dot{\epsilon}$	Tensor der inelastischen Dehnungsrate
P	Mittlere Normalspannung
Q	Deviatorische Spannungsinvariante
T	Absolute Temperatur
η	Porosität
η_0	Anfangsporosität
[1]	Einheitstensor
[S]	Tensor der deviatorischen Spannung
R	Allgemeine Gaskonstante
Q	Aktivierungsenergie

Gegenüber Hein 1991 wurde die Funktion h1 sowie einige Parameter anhand von Messungen im INE mit der triaxial Presse angepasst. Folgende Zahlenwerte der Konstanten wurden publiziert (Korthaus 1998):

A	$1,09 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-5}$
Q/R	6520 K^{-1}
A	0,01648
B	0,9
c	0,1
m	2,25
d	0,0003

3.4 Permeabilität von kompaktiertem Salzgrus

Im ungestörten Steinsalz liegen Permeabilitäten mit Werten von üblicherweise weniger als 10^{-21} m² vor. Diese geringe Permeabilität hängt mit der Struktur der Korngrenzen zusammen, bei denen mikroskopische Fluideinschlüsse entlang verheilter Korngrenzen vorhanden sind. Solche mikroskopischen Fluideinschlüsse können ihren Druck (in einzelnen Mikro-Einschlüssen) auch dann halten, wenn Salzproben erst nach einiger Zeit ausgewertet werden. Eine höhere Permeabilität kann entstehen,

- wenn das Steinsalz sich durch Mikrorisse auf den Korngrenzen weitet und ein verbundenes Mikroriss-Netzwerk bildet. Bei einem solchen Prozess ist der Schlüsselparameter eine Kombination aus Effektiv- und deviatorischer Spannung.
- Wenn die Korngrenzen im Steinsalz durch die Rekristallisation und Drucklösungsprozesse mobilisiert werden und sich ein verbundenes Netzwerk von Fluid-Filmen bildet, welches die physikalischen Eigenschaften wie die Kriechfestigkeit und die elektrische Leitfähigkeit ändert. Die wesentlichen Randparameter sind die deviatorische Spannung und die Temperatur.
- Wenn die Druck-Temperatur-Bedingungen ausreichen, um thermodynamisch stabile Korngrenzen mit einer assoziierten Fluidbenetzung in einem isotropen Spannungsfeld zu bilden.

Die Aufarbeitung der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung von Salzgrus wurde bei der GRS und BGR bearbeitet (Müller-Lyda, BIRTHLER et al. 1999) und eine exponentielle Beziehung zwischen der Permeabilität und der Porosität (Exponent ca. 4) abgeleitet. Ebenfalls zusammengestellt wurde der Permeabilitätsverlauf von aufgelockertem Steinsalz als Funktion des Drucks (Müller-Lyda 1999).

4 Experimente im Steinsalz unter Beteiligung von INE

Wesentliche Grundlagen für die Modellentwicklung stellten thermische und thermomechanische Versuche an Steinsalz und die verschiedenen in-situ Versuche im Salzbergwerk Asse dar. Steinsalz zeigt ein thermoelastisches, viskoelastisches, elastisch-plastisches Verhalten, das durch das primäre und sekundäre plastische Kriechen zusätzlich verkompliziert wird. Aus diesem Grund wurden Laborexperimente beim IfT und der BGR initiiert. Die in-situ Versuche im Salzbergwerk Asse umfassten zunächst Versuche mit elektrischen Erhitzern, später wurde auch die Konvergenz von Bohrlöchern direkt ermittelt.

4.1 In-Situ Experimente

Seit 1968 wurden Temperaturversuche in den Jahresberichten beschrieben. In der Schachtanlage Asse wurden die Temperatur-Test-Felder (TTF) 1a und b Ende der sechziger Jahre betrieben, um Erfahrung im Design der Erhitzer und in den Methoden zur Messung der Temperaturen in Salz zu gewinnen. Die Vorversuche fanden in der Kammer 4 der 490 m Sohle in der Asse statt.

Im Oktober 1979 fand der erste deutsch-amerikanische Workshop zum Thema „WASTE ISOLATION PERFORMANCE ASSESSMENT AND IN – SITU TESTING“ in Berlin statt. Der Workshop wurde vom Bundesminister für Forschung und Technologie veranstaltet und durch das IfT und das Projekt SICHERHEITSSTUDIEN ENTSORGUNG (PSE) im Hahn-Meitner-Institut für Kernforschung Berlin organisiert. Eine Zusammenfassung zu den in-situ Temperaturversuchen wurde von K. Kühn bei dem ersten deutsch-amerikanischen Workshop 1979 in Berlin vorgestellt (Kühn 1979).

Von 1968 bis 1974 sind die Temperaturversuche und ihre Ergebnisse in den Jahresberichten der ABRA bzw. des IfT beschrieben (Hepp, Krause et al. 1969, Diefenbacher, Heil et al. 1971, Diefenbacher, Heil et al. 1971, Diefenbacher, Krause et al. 1972, Bechthold, Diefenbacher et al. 1974, Albrecht, Kolditz et al. 1975). Lediglich im Jahresbericht 1969 wird eine „enge Zusammenarbeit mit dem Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Lehrauftrag Leistungsreaktoren, der RWTH Aachen“ erwähnt.

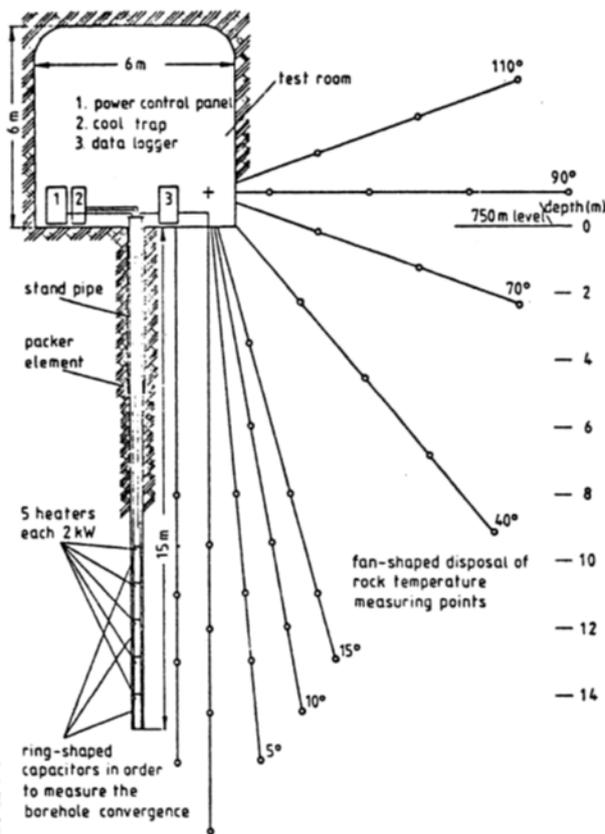
Erst seit 1974 wurden Modellrechnungen und Vergleiche der Messwerte mit den Rechenergebnissen in Berichten und Publikationen dargestellt (Krause and G. Rudolph (Eds.) 1975). Zwei Publikationen wurden in der Zeitschrift ATW unter dem Titel „Untersuchungen zur Temperaturentwicklung bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle“, Teil I: Berechnung der zeit- und ortsabhängigen Temperaturfelder (Ploumen, Strickmann et al. 1979) und Teil II: Experimentelle Überprüfung der Rechenverfahren anhand von Simulationsversuchen (Duerr, Korthaus et al. 1979) im Jahr 1979 veröffentlicht.

Das Temperaturversuchsfeld TTF 2 auf der 490 m-Sohle der Schachtanlage Asse war von 1968 - 1971 in Betrieb. Es wurden drei zylindrische Erhitzer mit einer elektrischen Leistung von 2,75 kW in 5 m Tiefe in einer dreieckigen Anordnung installiert.

Die Erhitzer-Leistung wurde mit der Zeit verringert, um den Zerfall der Spaltprodukte zu simulieren. In Zusammenarbeit mit BGR wurden Temperaturen von 70 Widerstandsthermometern aufgezeichnet sowie von weiteren 40 Thermoelementen direkt an den Erhitzern und in deren Nahfeld. Die maximalen Temperaturen lagen bei ca. 350°C an der Oberfläche der Erhitzer und bei ca. 225°C an der Bohrlochwand.

Diese Temperaturen wurden mit Modellrechnungen simuliert. Es ergaben sich Abweichungen zwischen Rechnungen und Messungen von ca. 10%. Parallel zu Temperaturmessungen traten thermomechanische Spannungen und Konvergenzen auf, die in TTF 2 gemessen wurden.

Das Temperaturtestfeld 3 sollte die thermisch induzierte Konvergenz in einer Bohrung erfassen. Auf der 750 m-Sohle der Schachanlage Asse wurde das TTF 3 bis zu einer Tiefe von ursprünglich 50 m mit einem Durchmesser von 320 mm gebohrt und der untere Teil bis 27,3 m mit Salzgrus verfüllt. Fünf Erhitzer mit je 1 m Länge und 230 mm Durchmesser wurden in die Bohrung eingesetzt. Die elektrische Leistung betrug insgesamt 9 kW, die Heizperiode 90 Tage. Die Gesamtkonvergenz des Bohrlochs betrug 99 mm innerhalb von 90 Tagen, d. h. 31%. Der Test wurde nach dieser Zeit beendet. Die Konvergenz wurde mit einem Messschieber ermittelt. Die Konvergenz eines zweiten Bohrlochs in einem horizontalen Abstand von 7,5 m zum beheizten mit einer Tiefe von 43 m und einem Durchmesser von 320 mm wurde von der Erwärmung nicht beeinflusst.

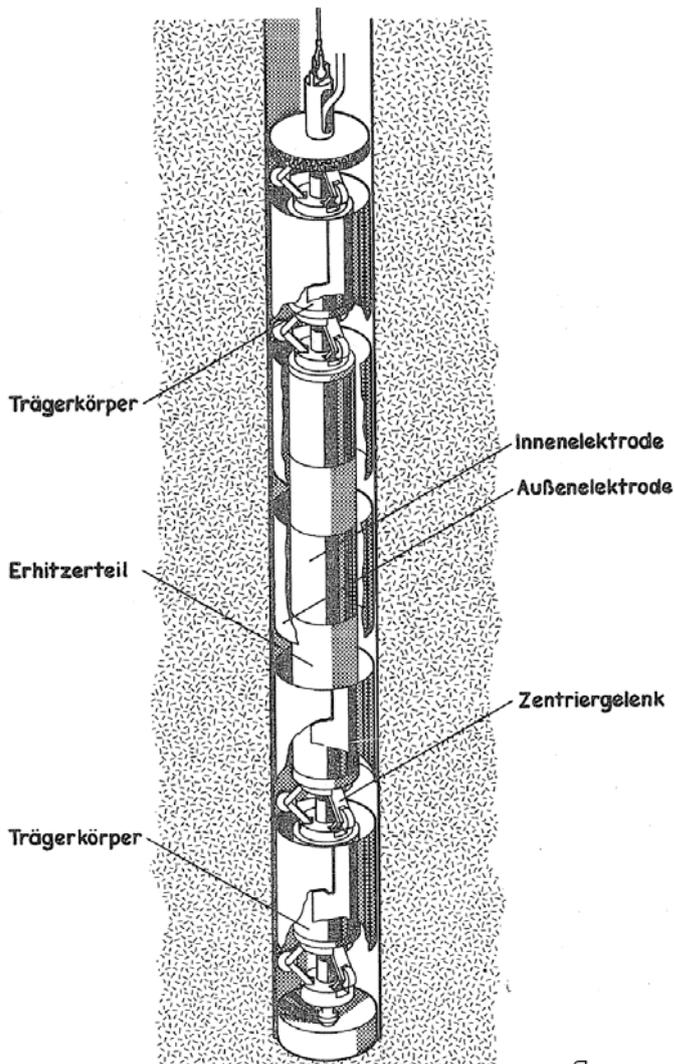


Das Temperaturtestfeld 4 wurde auch mit dem Ziel installiert, die Laugenmigration in ein beheiztes Bohrloch zu ermitteln (Rothfuchs 1979). Das TTF 4 wurde auf der 750 m Sohle im Älteren Steinsalz angelegt. Es bestand aus drei Erhitzer-Bohrlöchern von 25 bzw. 15 m Tiefe und 300 mm Durchmesser sowie 20 Bohrlöchern zur Aufnahme von Extensometern und für Spannungsmessungen. Im zentralen Bohrloch (Nr. 2) wurden fünf 2KW-Erhitzer platziert. Die Temperatur auf der Oberfläche der Erhitzer betrug im Durchschnitt 360°C, der Temperaturanstieg im Gestein war nach ca. 45 Tagen abgeschlossen. Die höchste erreichte Temperatur an der Bohrlochwand betrug 156°C nach ca. 160 Tagen, die durchschnittliche Gesteinstemperatur in der unmittelbaren Umgebung (~ 20 cm) des Bohrloches lag bei 120°C.

Abb. 3 Anordnung von Messstellen im Temperaturtestfeld 4.

4.2 Standardsonde

Es stellte sich schnell heraus, dass mit dem Aufheizen eines Bohrlochs sich dessen Durchmesser verminderte (Konvergenz). Seit 1976 wurde deshalb in der ABRA begonnen eine Bohrlochkonvergenzmesssonde (Standardsonde) zu entwickeln, um die wärmeinduzierte Bohrlochkonvergenz bei einem konstanten Wärmeeintrag ohne Unterbrechung des Heizvorganges kontinuierlich an definierten Stellen des Bohrloches mit hoher Genauigkeit und über einen langen Zeitraum zu messen.



Die Sonde bestand aus einem sich selbst zentrierenden Erhitzer und einem Messkondensator, der aus der ringförmigen Innenelektrode mit festem Durchmesser und einer zweiten ringförmigen, an der Wand des Bohrloches anliegenden Elektrode (Außenelektrode) mit veränderbarem Durchmesser bestand. Die Außenelektrode wurde als vorgespannter offener Ring mit einander überlappenden Enden ausgebildet und in der Höhe der Innenelektrode und des Erhitzers in das zu untersuchende vertikale Bohrloch abgesenkt. Die Kapazität des Messkondensators (Innen- und Außenelektrode) hängt vom Abstand zwischen den beiden Elektroden ab und veränderte sich bei der Konvergenz des Bohrlochs. Wichtig dabei ist, dass sich die Enden der Außenelektrode überlappen und sich bei Verkleinern des Bohrlochdurchmessers der Elektrodenring verkleinern kann ohne in Kontakt mit der Innenelektrode zu kommen.

Abb. 4 Schematischer Aufbau der Standard in-situ Konvergenz Meßsonde

Die Messung erfolgte durch Anlegen einer Sinusspannung mit einer vorgegebenen Frequenz, die Signalspannung war abhängig von der Kapazität des Messkondensators und somit vom Abstand der Innen- und Außenelektroden.

Im Jahr 1980 wurden die Laborversuche zur Messung der Konvergenz des Salzes mit der Standardsonde erfolgreich abgeschlossen. Dabei wurden die Messsignale der Kapazitätsmessstellen über einen längeren Zeitraum unter Betriebstemperatur (ca. 200°C) beobachtet. Nach Abschluss der Messung wurde die Sonde mechanisch überarbeitet und mit zwei komplett montierten Positioniervorrichtungen zur Asse transportiert und in drei in situ-Versuchen auf der 775 m Sohle im Salzbergwerk Asse eingesetzt. Das Bohrloch wurde über einen Zeitraum von 104 Tagen beheizt. Drei Tests wurden mit Heizungsleistungen von 1,2, 1,3 und 1,4 kW durchgeführt. Dies führte zu maximalen Salztemperaturen von 140-170°C an der Bohrlochwand. Die Testbedingungen waren nicht optimal, da Experimente mit einem Abstand von 5 m relativ nahe beieinander lagen und an einer seitlich verlaufenden Fahrstrecke lagen, die eine Störung der Ausgangsspannungsverhältnisse im Salz verursachte, die von den verwendeten Rechenmodellen nicht berücksichtigt werden konnte.

Im Jahr 1978 wurde die Messsonde zum Patent angemeldet (Müller, Hofmann et al. 1978).

4.3 Triaxiales Kompaktierungsverhalten von Salzgrus

Seit realistische Endlagersysteme modelliert wurden, in denen zur Verbesserung der Wärmeabfuhr die Lagerstrecken mit Salzgrus verfüllt werden sollten, gewannen Untersuchungen zum Kompaktierungsverhalten und die damit verbundene Wärmeleitfähigkeit verstärkte Aufmerksamkeit. Dies fand nicht nur im Rahmen der thermomechanischen Modellrechnungen zur Konvergenz versetzter Lagerstrecken seinen Niederschlag, sondern auch im Aufbau und Betrieb einer geeigneten experimentellen Einrichtung. Für die Formulierung eines Stoffgesetzes für Salzgrus unter Temperaturbelastung waren umfangreiche Messungen des zeitabhängigen Verformungsverhaltens unter hydrostatischer und deviatorischer Belastung bei Temperaturen bis 200°C erforderlich. Zu diesem Zweck wurde eine neuartige triaxiale Prüfeinrichtung entwickelt und in Betrieb genommen. Sie zeichnete sich durch folgende Hauptmerkmale aus:

- Echt dreidimensionale Geometrie (würfelförmiges Prüfvolumen),
- triaxiale Lastaufbringung symmetrisch in den drei Raumrichtungen,
- große Prüfkammer (Kantenlänge 250 mm) und
- Messung der Verformungsraten in den drei Raumrichtungen mit hoher Genauigkeit.

Damit konnten Messungen an relativ grobkörnigem Material und bei sehr geringen Kompaktierungsraten, wie sie im Endlager zu erwarten sind, ermöglicht werden. Der Aufbau der Anlage wurde publiziert (Korthaus und Schwarzkopf 1993). Die Prüfkammer dieser Anlage wies einen würfelförmigen Innenraum mit einer Kantenlänge von 250 mm auf. Sie war für eine maximale Druckbelastung von 35 MPa ausgelegt. In Abb. 5 findet sich die Ansicht des Versuchsaufbaus mit der Prüfkammer links und den Pumpen, der Elektronik sowie den Vorratsbehältern für die Beaufschlagung der Druckkissen in der Mitte. Die Druckbelastung des Prüfmaterials und die Messung der Verformung erfolgte unabhängig in den 3 Raumrichtungen über 6 an den Innenwänden der Prüfkammer angeordnete hydraulische Druckkissen aus Edelstahlblech, die für jede Messung erneuert werden mussten. Der Hydraulikteil für die Beaufschlagung der Druckkissen war primär für druckgeregelte Versuche (Kriechversuche) ausgelegt. Die Bestimmung der den Druckkissen zugeführten Mengen an Hydraulikflüssigkeit erfolgt mit hoher Genauigkeit, so dass damit die Messung sehr kleiner Verformungsraten, wie sie in einem Endlager in einer Steinsalzformation zu erwarten sind (ca. $10^{-9}/s$), möglich waren. Eine zusätzliche Messung der Verformungsraten mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern, die die zentrale Auslenkung der Druckkissen erfassten, wurde zusätzlich eingebaut.

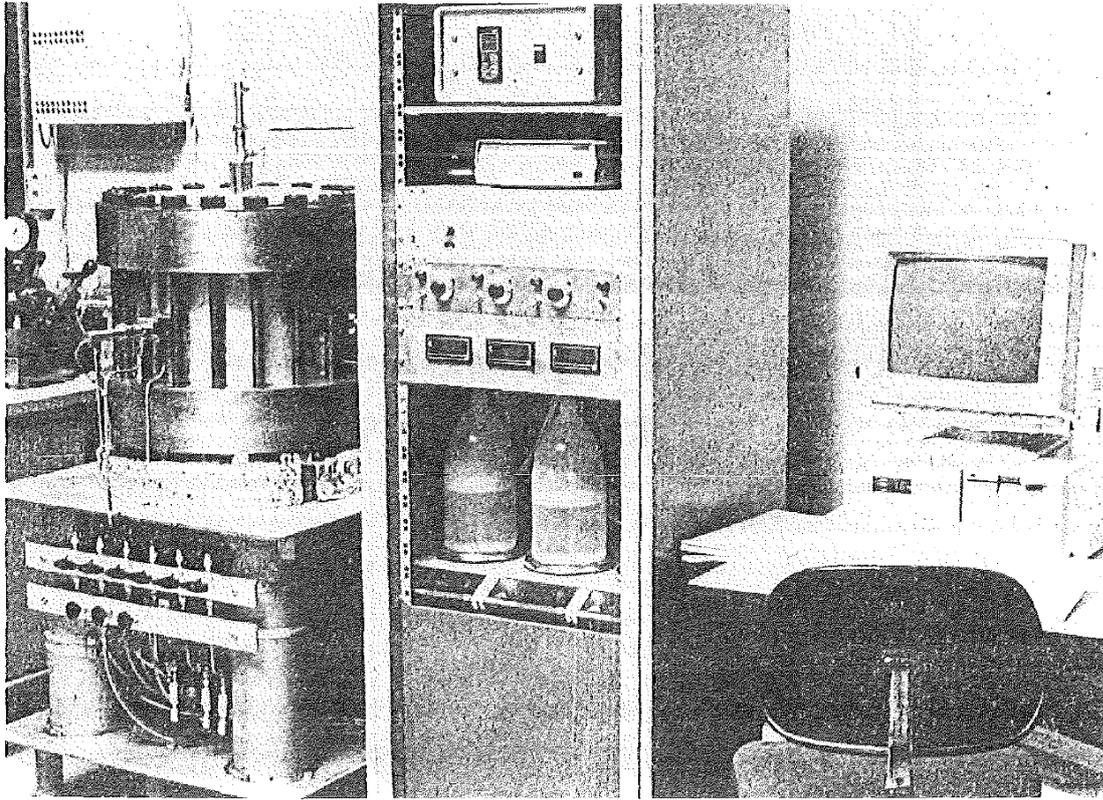


Abb. 5 Ansicht der triaxialen Meßeinrichtung

5 Rechencodes

Seit den 1950er Jahren entwickelten sich Differenzenverfahren und Finite-Elemente-Methoden (FEM) als numerische Verfahren zur Berechnung von Temperatur-, Festigkeits- und Verformungsverhalten von physikalischen Körpern, insbesondere auch in der Geomechanik. Gleichzeitig erhöhte sich die Computerleistung bezüglich des Speicherplatzes und der Rechengeschwindigkeit drastisch. Somit war es möglich auch aufwendige Rechenverfahren im Rechenzentrum des Forschungszentrums durchzuführen. Allerdings waren geeignete Rechencodes Ende der 1960er Jahre noch nicht allgemein verfügbar. Daher wurden in den ersten Modellierungsstudien auf analytische Verfahren zurückgegriffen.

In der 2. Hälfte der 1970er Jahre standen im Kernforschungszentrum Karlsruhe für die Modellrechnungen ein Mainframe IBM System/370 bestehend aus 2 Rechnern Modell 158 und 168 mit 3 MB Speicher zur Verfügung (Bachmann and Koopmann 1979). Auf diesen Anlagen war das Betriebssystem IBM MVS/JES 3 implementiert. Als Speichermedien gelangten Magnetbänder und Festplatten zum Einsatz, wobei die verbreitetsten zunächst Wechselfestplatten waren. Ab 1974 wurde auch das Massenspeichersubsystem IBM 3850 unterstützt. Die Eingabe erfolgte in den 1970er Jahren weitgehend mittels Lochkarten, die durch Operateure eingelesen wurden. Allerdings setzen sich seit Mitte der 1970er Jahre dann auch Bildschirmarbeitsplätze (zentral im Rechenzentrum) mit dem TSO Betriebssystem durch. Die Ausgaben wurden über Schnelldrucker auf Endlospapier gedruckt, Graphische Ausgaben waren auch möglich, wobei lediglich rudimentäre Unterprogramme verfügbar waren. Die Rechengeschwindigkeit des Großrechners lag um mehrere Größenordnungen niedriger als diejenige heutiger Notebooks (Super User 2018).

5.1 Temperaturprogramme

Im Jahresbericht 1974 (Krause and G. Rudolph (Eds.) 1975) wurden im Beitrag „Berechnung der bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Steinsalzlagerstätten zu erwartenden Temperaturen“ von E. Korthaus, P. Donath und W. Diefenbacher die bis dahin verwendeten Rechencodes dargestellt. Im Folgendem sind die Ausführungen wiedergegeben:

Die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Form von HAW-haltigen Glaszylindern, die in Salzlagerstätten in tiefen Bohrungen gestapelt werden, bringt gewisse Probleme durch die starke Wärmeentwicklung des Abfalls mit sich. Trotz der guten Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz treten beträchtliche Temperaturerhöhungen in den HAW-Kokillen und dem umgebenden Salz auf. Zur Gewährleistung der Sicherheit des Lagers müssen die folgenden beiden Forderungen erfüllt werden:

- 1. Die Erwärmung der eingelagerten HAW-Kokillen muss auf Werte beschränkt bleiben, die eine Formbeständigkeit von Kokillen und Lagerbohrungen gewährleisten. Die maximal auftretenden Temperaturen dürfen nicht zu einem Schmelzen der Glaszylinder oder des angrenzenden Salzes führen.*
- 2. Durch die Erwärmung und die damit verbundenen mechanischen Effekte darf die Standfestigkeit des Salzstockes bzw. des Endlagers nicht gefährdet werden. Insbesondere dürfen während der Betriebszeit des Endlagers keine noch benötigten Strecken oder Kammern durch Konvergenz oder Pfeilereinsturz in Mitleidenschaft gezogen werden. Derartige Vorgänge wären möglich aufgrund der auftretenden Wärmespannungen und durch die Fähigkeit des Salzes, unter hohem Druck plastisch zu fließen, insbesondere bei hohen Temperaturen.*

Für die Berechnung der Temperaturen, die bei möglichen Lagerkonfigurationen zu erwarten sind, wurden am Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der RWTH Aachen (H. Schmidt, P. Ploumen) verschiedene Rechenprogramme entwickelt.

Tab. II Überblick über die von RWTH Aachen erstellten Rechenprogramme (Ploumen, Strickmann et al. 1979)

Verfahren		analytisch $\lambda = \text{const.}$	numerisch $\lambda = f(\text{Temperatur}).$
Einlagerungsfall			
Kleinräumig			
Berechnungszeit- raum ca. 100 Jahre	Gleichzeitige Einlagerung der Quellen	LINSCHI LINFELD	TEFELD 2D ASYTE 2D
	Zeitlich gestufte Einlagerung	LINFELD1	
Großräumig			
Berechnungszeit- raum ca. 1000 Jahre	Gleichzeitige Einlagerung	VOLFELD	ASTEFE 2D CUBSIT 3D
	Zeitlich gestufte Einlagerung		ASTEFE1 2D COB3DG 3D

Die Programme VOLFELD, LINFELD und LINSCHI basieren auf einer analytischen Lösung der Wärmeleitungsgleichung für das homogene unendliche Medium, das Programm TEFELD (bzw. ASYTE, eine erweiterte Version) löst die zeitabhängige Wärmeleitungsgleichung in 2-dimensionaler Geometrie durch ein spezielles Differenzenverfahren numerisch.

Mit TEFELD kann die Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte, insbesondere der Wärmeleitfähigkeit, berücksichtigt werden. Aufgrund der Begrenzung durch Kernspeicherkapazität und Rechenzeit kann allerdings nur eine einzelne Lagerbohrung mit einem gewissen Bereich des umgebenden Salzes erfasst werden, nicht jedoch ein Lagerfeld mit mehreren Lagerbohrungen. Die restlichen Lagerbohrungen werden durch geeignete Wahl der Randbedingungen berücksichtigt, wobei angenommen wird, dass die Lagerbohrungen in einer regelmäßigen hexagonalen Struktur angeordnet sind und alle gleichzeitig mit HAW-Kokillen beschickt wurden. Mit Hilfe der analytischen Programme können beliebige Lagerkonfigurationen und Einlagerungsfolgen untersucht werden. Diese Programme setzen allerdings konstante Stoffwerte voraus, was bei den auftretenden großen Temperaturunterschieden zu merklichen Ungenauigkeiten führen kann. Außerdem können mit diesen Programmen nur die Temperaturen im Salz, nicht jedoch innerhalb der Lagerbohrungen berechnet werden, und es können nur relativ einfache Randbedingungen für das betrachtete Gebiet vorgegeben werden.

Inzwischen wurde bei ABRA das Programm WAERMLEIT erstellt, das im Wesentlichen einer Zusammenfassung der Programme VOLFELD, LINFELD und LINSCHI entspricht. Darüber hinaus bietet es

zusätzliche Möglichkeiten hinsichtlich der Vorgabe von Randbedingungen. Durch geeignete Kombination der Ergebnisse, die mit den genannten Programmen gewonnen werden können, lassen sich die Temperaturen innerhalb und außerhalb eines HAW-Lagerfeldes in recht guter Näherung berechnen.

In diesem Jahresbericht (Krause and G. Rudolph (Eds.) 1975) wird auch erwähnt, dass an der RWTH Aachen mit der Entwicklung eines neuen Programms auf der Grundlage eines nodalen Verfahrens begonnen wurde, das mit weniger Speicherplatz und Rechenzeit auskommt und auch 3-dimensionale Rechnungen ermöglichen sollte.

Die Weiterentwicklung der Codes wurde seit dem EGT Jahresbericht 1979 (GSF-Ift and KfK-ABRA 1980) aufgezeigt und im Jahresbericht 1981 (Institut für Nukleare Entsorgungstechnik 1982) detailliert:

Die bisher verfügbaren zweidimensionalen Rechenprogramme in RZ-Geometrie, TEFELD, ASYTE und ASTEFE, sind hinsichtlich der Modellgeometrie, d. h. der Einteilung des betrachteten Volumens in Zonen und unterschiedliche Materialeigenschaften, relativ unflexibel und schwer zu erweitern. Es wurde daher ein neues zweidimensionales Grundprogramm in RZ Geometrie erstellt, ausgehend von dem 3D-Programm CUBSIT. Aufgrund des bisher verwendeten modalen Verfahrens werden damit weitgehend Möglichkeiten zur Vorgabe vieler unterschiedlicher Materialzonen sowie eine wesentlich bessere Rechenökonomie erreicht. Für dieses Programm FAST-RZ wurde ein Rechenalgorithmus zur Überprüfung der Rechengenauigkeit entwickelt, der die Grundlage für eine optimale Zeitschrittsteuerung bilden soll. Dieser Algorithmus kann auch für die übrigen verfügbaren Rechenprogramme verwendet werden. Für die verfügbaren 2- und 3-dimensionalen Rechenprogramme CUBSIT, FASTBEST, DUB3DG, GERA und ASYTEIKA wurden zusätzlich Unterprogramme erstellt, die eine graphische Darstellung der verwendeten räumlichen Diskretisierung und Zonenaufteilung ermöglichen. Dies ist von großem Nutzen sowohl für die optimale Gestaltung der Diskretisierung wie auch für das Aufdecken von Eingabefehlern.

Da man im KfK Zugang zum Quellcode von ADINA-T hatte (siehe Kap. ADINA), konnte das in diesem Code implementierte Stoffmodell bezüglich zeitlicher Abhängigkeiten und der Temperatur erweitert werden.

5.2 Thermomechanische Rechenverfahren

Seit 1978 wurden verstärkt die mechanischen Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf das umgebende Steinsalz modellmäßig bearbeitet. Die Rechenprogramme für thermomechanische und gebirgsmechanische Analysen wurde gemeinsam mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen entwickelt. Ein komplexes rheologisches Modell für Steinsalz, das primäres und sekundäres Kriechen enthält und die Temperaturabhängigkeit berücksichtigt, wurde entwickelt und in Rechenprogrammen eingebaut. Als Ergebnis lag ein Stoffmodell vor, das das thermoelastische, viskoelastische, elastisch-plastische Verhalten sowie das primäre und sekundäre plastische Kriechen des Steinsalzes berücksichtigte. Obwohl dieses Modell als vorläufig zu betrachten war, insbesondere was die quantitative Festlegung der verschiedenen Parameter betraf, schien es doch alle wichtigen Eigenschaften des Steinsalzes unter komplexer mechanischer und thermischer Belastung wiederzugeben. Zur Problematik von Inhomogenitäten in Salzstöcken und ihren Konsequenzen für die HAW-Endlagerung wurden anhand einfacher Modellvorstellungen verschiedene typische Fälle untersucht. Es wurden am Beispiel von Anhydrit-Zwischenschichten 1-dimensionale Berechnungen mit elastisch-plastischem Stoffverhalten des Steinsalzes sowie 2-dimensionale Finite Elemente- Rechnungen mit linear elastischem Stoffverhalten und Festigkeitsgrenze im Steinsalz und im Anhydrit durchgeführt. Dabei wurden sowohl die Unterschiede in den mechanischen Gesteinsparametern als auch in der thermischen Ausdehnung der Gesteine berücksichtigt. Als Spannungsrandbedingungen und Temperaturverteilungen wurden Werte verwendet, wie sie in typischen HAW-Endlagerkonfigurationen zu erwarten waren.

Die gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass auf Grund der wesentlich höheren Steifigkeit und der geringeren Wärmeausdehnung des Anhydrits beträchtliche Spannungskonzentrationen auftreten können.

5.2.1 MAUS

Die ersten wesentlichen Arbeitsergebnisse, welche im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen der Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH (KfK) und dem Lehrauftrag Leistungsreaktoren (LL) der RWTH Aachen erzielt wurden, wurden 1984 in der ATW veröffentlicht (Albers, Biurrun et al. 1984). Das speziell für Endlagerprobleme am LL im Auftrag von KfK und der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF) erstellte Finite-Elemente-Programm MAUS (Mechanical Analysis of Underground Storage) und das kommerziell verfügbare Finite-Elemente-Programm ADINA (Automatic Dynamic Nonlinear Analysis) wurden anhand von Vergleichsrechnungen überprüft. Da die Funktionsprüfung beider Programme anhand des von GSF unter Beteiligung von KfK im ehemaligen Salzbergwerk ASSE durchgeführten Temperaturversuchs 3 (TV3) erfolgte, konnten zudem wichtige Schlussfolgerungen über die Aussagefähigkeit der damals verfügbaren numerischen Rechenmodelle sowie für die weitere Vorgehensweise gezogen werden.

5.2.2 ADINA

Die ersten Finite-Elemente-Analysen wurden mittels des Programmpakets SAP 5 (Structural Analysis Package) von Frau Pudewills durchgeführt. Um 1980 wurde dann das kommerzielle Finite-Elemente-Programmsystem ADINA auf der Rechenanlage des KfK implementiert. ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis) ist ein Finite-Element-Programmsystem, das von Klaus-Jürgen Bathe seit 1986 von ADINA Research & Development, Inc. entwickelt wurde. Das Programm bot Möglichkeiten zur Berechnung 3-dimensionaler linearer und nicht-linearer, quasistatischer und dynamischer Fragestellungen aus Strukturmechanik, Strömungsmechanik, Akustik, Thermodynamik, Elektromagnetismus. Das Programm konnte vollständig gekoppelte Probleme behandeln, bei denen die thermische Lösung die strukturelle Lösung und die strukturelle Lösung auch die thermische Lösung beeinflusste (<http://www.adina.com>). Ursprünglich waren separate Finite-Element-Mesh-Generatoren und entsprechende Graphikprogramme erforderlich. Diese wurden im Laufe der fortschreitenden Entwicklung des Programmsystems in ADINA integriert. ADINA wurde zum Arbeitspferd für die thermomechanische Modellierung im INE. Da der Quellcode des Programms verfügbar war, konnten eigene Entwicklungen, wie das visko-plastische Stoffmodell für Salzgrus in ADINA implementiert werden (Pudewills and Krauss 1999).

Dies galt umso mehr, als auch fluiddynamische Probleme mit diesem Programmpaket lösbar waren. Andere Organisationen in Deutschland verwendeten selbst entwickelte Codes bzw. wird heute das „Flex Multi-Physics Finite Element Solution Environment for Partial Differential Equations“ für 1-, 2, und 3-dimensionale Probleme verwendet (<https://www.pdesolutions.com/index.html>).

5.2.3 TRANSAL

Die Entwicklung des reaktiven Transportcodes TRANSAL durch E. Korthaus hatte zum Ziel, die Auswirkungen von Salzlösungen auf Wegsamkeiten im Bereich eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in einer Steinsalzformation zu untersuchen. Dies war im Rahmen von Störfallszenarien mit Lösungszutritt zu den Abfällen von Interesse, da sich die Durchlässigkeiten der anzunehmenden Wegsamkeiten sowohl durch

gebirgsmechanische Konvergenzvorgänge als auch durch Salzlösungen unter dem Einfluss orts- und zeitabhängiger Temperaturverhältnisse signifikant verändern kann. Zu Beginn der 2000er Jahre waren die kommerziell verfügbaren Rechenprogramme nicht in der Lage, diese spezielle Problematik zu behandeln, insbesondere da diese nicht über die Möglichkeit verfügten, Aktivitätskoeffizienten nach dem Pitzer-Formalismus zu berechnen⁷. Dies war im Falle konzentrierter Salzlösungen unabdingbar. TRANSAL bot die Möglichkeit der gekoppelten Berechnung von Fluidtransport und gebirgsmechanischer Konvergenz, wobei Prozesse der Salzauflösung und -ausfällung im Temperaturfeld des Fließpfads neben der Konvergenz berücksichtigt werden konnten. Zusätzlich war in TRANSAL auch die Modellierung von Korrosionsprozessen der Endlagerbehälter implementiert.

Leider wurde der Code nicht publiziert und geriet somit in Vergessenheit.

⁷ Chemische Aktivität ist eine thermodynamische Größe, die in der physikalischen Chemie anstelle der Stoffkonzentration verwendet wird. Diese wird als Produkt der Ionen-Konzentration mit einem Aktivitätskoeffizient berechnet. Die Aktivitätskoeffizienten hängen von der Ionenstärke, d.h. der Summe von allen gelösten Stoffen in der Lösung ab. Für hochkonzentrierte Salzlösungen wurde von K. Pitzer anstelle der Ionen-Dissoziations-Theorie die Ionen-Interaktions-Theorie (Pitzer-Gleichung) entwickelt. Das Pitzer-Modell basiert auf dem Debye-Hückel-Ansatz, integriert aber zusätzlich sogenannte Virialkoeffizienten, die zwischenmolekulare Kräfte beschreiben.

6 Verifikation und Validierung von Rechenprogrammen

6.1 Modellierung von Temperaturfeldern

Die im vorhergehenden Kapitel erwähnten Codes wurden nicht nur zur Auswertung der Temperaturversuche eingesetzt. Die Codes erlaubten Studien zur Optimierung von Lagergeometrien (Bohrloch-Abstände und -Tiefe), Zwischenlagerzeiten und Abfallbeladung der HAW-Behälter. Die Parameterstudien sind im Jahresbericht 1974 ausführlich dargestellt (Krause and G. Rudolph (Eds.) 1975) und hier verkürzt wiedergegeben:

Mit Hilfe dieser Programme, insbesondere mit TEFELD, wurden ausführliche Parameterstudien zur Ermittlung möglicher Lagerkonfigurationen bei unterschiedlichen Kenngrößen des einzulagernden Abfalls durchgeführt. Bei vorgegebenem Durchmesser der HAW-Kokillen von 210 mm und der Lagerbohrung von 260 mm wurden folgende Größen variiert:

- HAW-Konzentration im Glas (Spaltproduktgemisch aus typischem LWR-Abfall),
- Alter der Spaltprodukte (Abkühlzeit nach Reaktorentnahme),
- Tiefe der Lagerbohrungen,
- Abstand der Lagerbohrungen (in regelmäßiger hexagonaler Anordnung),
- Dicke der Deckschicht (Salz) über den eingelagerten HAW-Kokillen.

Als Kriterium für die zulässige Wärmebelastung wurden Maximaltemperaturen von 400°C im Salz und 800°C in den HAW-Kokillen gewählt.

Die wesentlichen Aussagen, die aus den bisherigen Untersuchungen gewonnen wurden, lassen sich am Beispiel einiger typischer Parameterkombinationen darstellen. Für den Fall von 50 m tiefen Lagerbohrungen, einer Deckschichtdicke von 5 m, Spaltproduktkonzentrationen von 690 g/l bzw. 460 g/l und einem Alter der Spaltprodukte von 5 Jahren ergibt sich ein Mindestabstand von 17,5 m bzw. 13 m zwischen den Bohrungen. Eine weitere Verlängerung der Abkühlzeit z.B. auf 10 Jahre bringt keine wesentliche Verringerung des Mindestabstands mit sich (ca. 2 m). Dagegen kann durch eine Verkürzung der Lagerbohrungen auf 20 m unter Beibehaltung der übrigen Parameter der Bohrungsabstand auf etwa 11 m (690 g/l) bzw. 8 m (460 g/l) verringert werden.

Als kritische Größe erweist sich stets die auf 400°C begrenzte Salztemperatur. Bei Einhaltung dieser Bedingung bleibt die Temperatur in den Kokillen stets unter 700°C.

Die Untersuchungen wurden unter der Annahme durchgeführt, dass die Sohle über den Lagerbohrungen durch eine Bewetterung gekühlt wird, so dass die Sohlentemperatur 50°C nicht übersteigt. Hierfür würde eine Luftströmung von etwa 25 m³/min pro Bohrung benötigt.

(...)

Zur Ermittlung der großräumigen langzeitlichen Temperaturentwicklung in der Umgebung des Lagers wurden erste Berechnungen durchgeführt. (...) Als Beispiel sei ein Lager von 800 m Länge und 600 m Breite betrachtet, dessen 50 m tiefe Bohrungen während 30 Jahren entsprechend obigen Spezifikationen mit dem HAW einer Wiederaufarbeitungsanlage mit 1500 t Jahresdurchsatz beschickt wurden. Hier findet man z.B., dass in einem Abstand von 75 m über dem Lager noch eine maximale Temperatur von 185°C auftritt (nach 150 Jahren). Selbst in 300 m Abstand werden nach 500 Jahren noch etwa 70°C erreicht (38°C Temperaturerhöhung). (...)

Für die Weiterführung dieser Studien wird das Programm TEFELD (bzw. ASYTE) auf der Rechanlage des KFZ eingesetzt werden. Dies wird wesentliche Vorteile hinsichtlich Rechenzeit und verfügbarer Speicherkapazität mit sich bringen, so dass eine ausführlichere Erfassung der wirklichen Geometrie oder größerer räumlicher Bereiche möglich sein wird.

Es liegt auf der Hand, dass diesen Modellrechnungen sehr vorläufige Daten zu Grunde lagen.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Endlagerung von mittelradioaktiven Bitumenprodukten mit bis zu 50 Gew.% Abfallbeladung in der Prototyp-Kaverne wurden die Wärmeentwicklung berechnet und der Grenzwert für die maximale spezifische Aktivität in Bitumenprodukten bestimmt. Die spezifische Aktivität der Abfälle wurde zwischen 0,1 bis 1 Ci/L, das Alter der Spaltprodukte von 0,5 bis 2 Jahre variiert. Der Durchmesser der Kaverne betrug 22,8 m, die Höhe 36 m. Die Einlagerung wurde sowohl als instantan sowie stufenweise in konstanten Einzelschritten über einen Zeitraum von 10 Jahren simuliert.

Bis 1976 waren die meistgenutzten Rechencodes in der ABRA FAST-RZ und TEFELD.

Ende der 1970er Jahre wurden auch erste Rechnungen zur thermomechanischen Belastung von ganzen Salzstöcken mit inhomogener Struktur durch die eingelagerten hochradioaktiven Abfälle durchgeführt (Bock 1978, Bock 1979). Hierbei spielten insbesondere die Anhydrit-Schichten eine wesentliche Rolle, da deren thermomechanische Eigenschaften sich erheblich von denjenigen des Steinsalzes unterscheiden. So hat das E-Modul von Anhydrit etwa den fünffachen Wert und der thermische Ausdehnungskoeffizient beträgt nur ein Drittel gegenüber Steinsalz.

6.2 Modellierung der Bohrlochkonvergenz

Die Experimente mit der Standardkonvergenz Messsonde in der Schachanlage Asse wurden mit Hilfe des zweidimensionalen achsensymmetrischen Temperaturcodes ASYTE/KA modelliert. Der jeweilige Testabschnitt wurde durch einen zylindrischen Raum angenähert. Die thermomechanischen Berechnungen erfolgten mit dem kommerziellen Finite-Elemente-Programm ADINA. Für die thermomechanischen Berechnungen wurde ein Bereich von 10 m Radius und 25 m Höhe durch finite Elemente dargestellt, wobei radial eine engere Diskretisierung verwendet wurde, um die großen Temperaturgradienten in unmittelbarer Nähe des Erhitzers korrekt berechnen zu können.

Das komplexe thermomechanische Materialverhalten des Steinsalzes wurde als thermoelastisch-plastisches Materialmodell mit Sekundärkriechen beschrieben. Das elastisch-plastische Kurzzeitverhalten wurde durch eine einfache bilineare Beziehung modelliert, die sich jedoch gut dem im Labor beobachteten Dehnungsverhalten von Steinsalz einschließlich der Temperaturabhängigkeit annäherte. Das zeitabhängige Kriechen wurde entsprechend dem in Gleichung 4 angegebenen Kriechgesetz berechnet.

Der auf die Außenflächen des Modells einwirkende Gebirgsdruck wurde als Randbedingung für die Berechnungen benötigt. Während auf der oberen Begrenzungsfläche eine vertikale Spannungskomponente von 16 MPa definiert wurde, die dem lithostatischen Druck der 775 m Sohle in der Schachanlage Asse entsprach, wurde angenommen, dass die horizontale Komponente, die auf die Außenflächen einwirkte 13 MPa betrug. Die Berechnungen wurden in zwei Schritten durchgeführt, wobei im ersten Schritt der Spannungszustand im Salz zu Beginn der Aufheizphase bestimmt wurde, der sich durch die Verlagerung von Spannungen aus den Hohlräumen ergab. Anschließend wurden die thermomechanischen Effekte berechnet, die in der Umgebung der Sonde unter dem Einfluss der räumlichen und zeitlichen Aufheizung des Salzes auftraten.

Am Beispiel von Test 2 mit der Wärmeleistung von 1,3 kW zeigte sich an verschiedenen Messpositionen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen Befunden und den Rechenergebnissen für die angenommene horizontale Spannungskomponente von 13 MPa. Allerdings konnten nicht alle Versuche modellmäßig ausgewertet werden, da z.T. Salzausblühungen an der Bohrlochwand auftraten, die eine zu hohe Konvergenz vortäuschten.

Die EGT verfolgte das Ziel, Anfang bis Mitte der 1980er Jahre einen ersten aktiven Versuch mit Gläsern durchzuführen, um auch für diese Abfälle dem Endlagerbergwerk im Entsorgungszentrum eine Modelllösung anbieten zu können (Perzl 1977). Zu diesem Zweck war vorgesehen 30 Stück stahlummantelter, hochradioaktiver Gläser in verrohrten Lagerbohrungen in rückholbarer Form während eines längeren Zeitraumes (ca. 10 Jahre) zu lagern. Technische Geräte und Einrichtungen für Transport und Einlagerung, Kontroll- und Überwachungsgeräte mussten erprobt und später im aktiven Betrieb demonstriert werden. Außerdem sollte der Nachweis erbracht werden, dass sich das Gesamtsystem (Abfälle, Bohrlochausstattung und umgebendes Salz) entsprechend der Vorhersage verhält.

Eine Reihe von Fragestellungen sollten bearbeitet werden:

- Folgeerscheinungen von Strahlung und Wärmefreisetzung im Salz.
- Erprobung aller technischen Geräte und Anlagen.
- Projektierung eines Versuchsfeldes.
- Sicherheitsstudien für eine Genehmigung.

Aus genehmigungsrechtlichen Gründen musste gezeigt werden, dass die hochradioaktiven Glasblöcke zurückgeholt werden können: Dazu musste die Verrohrung intakt bleiben und nicht durch die Konvergenz des Salzes beschädigt werden. Hierzu wurden eine Reihe von Modelrechnungen durchgeführt, um die Bedingungen des Einlagerungsversuchs zu simulieren. Die Ergebnisse finden sich in mehreren Primärberichten.

Im Rahmen der von EURATOM geförderten Forschung zur Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Steinsalzformationen wurden das Projekt „Comparison of geomechanical computer codes for salt (COSA)“ gefördert (Piper, Lowe et al. 1989), an welchem INE von 1983 bis 1988 beteiligt war. In COSA wurden Vergleiche von geo-/thermomechanischen Computer Codes für Steinsalz erarbeitet. Von INE wurden die Programme ASYTE und eine von INE modifizierte Version des Programmsystems ADINA eingesetzt (Pudewills 1991). Die RWTH Aachen beteiligte sich mit den Code MAUS. Im nachfolgenden Projekt wurden dann realistische aber relativ kurzzeitige, standortspezifische Prozesse simuliert. In diesen Benchmark-Projekten wurden mit Erfolg die in-situ Versuche des ECN (niederländische Energie Forschungs-Stiftung, Petten) nachgerechnet. Die drei Versuche wurden in dem Asse Salzbergwerk in einer 300 m tiefen Bohrung durchgeführt und waren Teil des HAW-Projekts (Rothfuchs, Mueller-Lyda et al. 1993). Die allgemeine Bewertung des COSA-Projekts ist ausführlich im Abschlussbericht dargestellt (Lowe and Knowles 1989).

6.3 Projekte zu Entsorgungsalternativen

Im Zuge der Diskussionen um das Entsorgungszentrum Gorleben (1979) war die Untersuchung alternativer Entsorgungsstrategien gefordert. Am Kernforschungszentrum Karlsruhe wurde unter Beteiligung einer Reihe anderer Forschungseinrichtungen und Firmen im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie eine entsprechende Studie durchgeführt, die auf die "direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente" zielte (K.D. Closs (Ed.) 1980). Im Rahmen dieser Studie wurden Modellrechnungen zum Vergleich der thermischen und thermomechanischen Aspekte der beiden Alternativen durchgeführt.

Im Rahmen dieser Studien wurde das Konzept der Streckenlagerung entwickelt, bei der dickwandige Brennelementbehälter (POLLUX) in horizontale Stecken im Bergwerk gelagert werden sollten. Da die Einlagerung

dieser Behälter relativ große Streckendurchmesser erfordert, musste zur Verbesserung der Wärmeabfuhr die verbliebenen Hohlräume um und zwischen den Behältern mit Salzgrus verfüllt werden.

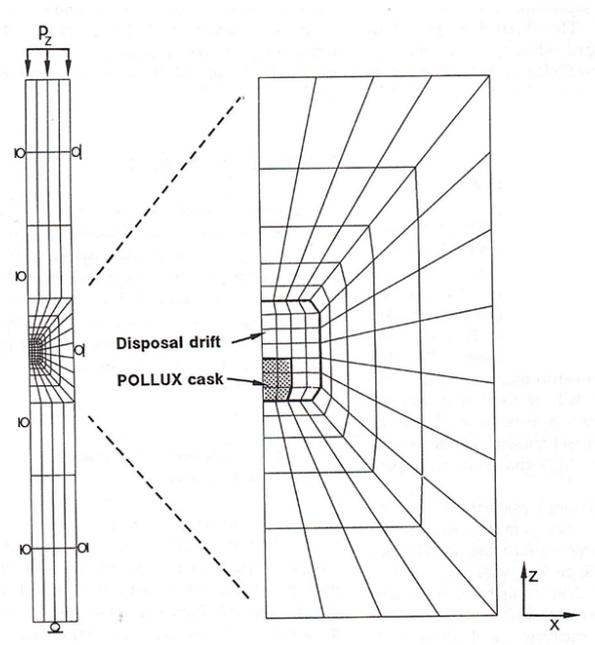


Abb. 6 Finites Element Modell und Randbedingungen für Rechnungen zur Streckenlagerung.

Die Modellrechnungen und Ergebnisse wurden publiziert (Pudewills and Korthaus 1993, Pudewills, Müller-Hoeppel et al. 1995). Für diese Simulationen wurde das Modell der Kompaktierung von Salzgrus benötigt, welches in das Programm ADINA eingebaut worden war (Pudewills and Krauss 1999).

Nach Beendigung der Studie „Entsorgungsalternativen“ wurde ein neues Projekt initiiert, das die kombinierte Einlagerung von abgebrannten Kernbrennstoffen und hochradioaktiven Glasprodukten zum Inhalt hatte (Bechthold, Braun et al. 1989). Schwerpunkte der Endlagerplanung waren neben dem Grubengebäude und den Tagesanlagen die Handhabung und der Transport unter Tage, sowie die Erarbeitung von Daten als Grundlage der Systembewertung aus radiologischer und betriebswirtschaftlicher Sicht. Die Auswahl der geeignetsten Varianten mittels Bewertungsverfahren erfolgte an Hand von Kriterien: Sicherheit während der Betriebsphase, technische Realisierung und Genehmigungsfähigkeit, betriebliche Aspekte, Ausnutzung des Salzstocks, Langzeitsicherheit, Wirtschaftlichkeit, Kernmaterialüberwachung. Dabei erwies sich das Endlagerkonzept A, eine Kombination aus Bohrloch- und Streckenlagerungsfeldern, als erfolgversprechend für eine weitere Detailbearbeitung; ebenso das Konzept der reinen, mehrsöhligen Streckenlagerung, allerdings unter der Bedingung der wasserfreien Konditionierung des wärmeerzeugenden, mittelaktiven Abfalls. Die Fortführung der Arbeiten zum Konzept der reinen Bohrlochlagerung ist u.a. deshalb erforderlich, um für den Fall des Auftretens unvorhergesehener Schwierigkeiten beim Transport der großen und schweren Streckenlagerungsgebäude im Schacht eine Ersatzlösung anbieten zu können. Neben der Auswahl geeignetster Konzepte ermöglichte das angewandte Bewertungsverfahren, noch zu lösende Sachfragen und somit weiteren F&E-Bedarf festzustellen, beispielsweise auf den Gebieten des benötigten Endlagervolumens für Hochabbrand- und MOX-Brennstoff, der thermomechanischen Analyse der mehrsöhligen Streckenlagerung, der Änderung der Nahbereichsauslegungstemperatur, der radiologischen Sicherheit im Endlager usw.

Im Zeitraum 1994 - 1996 wurde auf Anregung von FZK-PTE eine weitere Studie initiiert, in der eine Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und im Hartgestein erfolgte. Diese Arbeiten wurden 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 unter der Bezeichnung GEISHA wurden publiziert (Papp 1997). 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 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, Endlagergebänden und Verfüllmaterialien, insbesondere bei deren Rolle im Rahmen einer Gesamtdarstellung. Beim INE wurde besonders die Rolle der Geochemie, des Mehrbarrierensystems, der Temperaturentwicklung und Fragen der Behälterwerkstoffe bearbeitet.

6.4 Thermische und thermomechanische Simulation der Streckenlagerung (TSS-Versuch)

In den 1990er Jahren wurde der sogenannte TSS-Versuch (Thermische Simulation der Streckenlagerung) in der Schachanlage Asse durchgeführt, mit dem Ziel, die direkte Endlagerung von abgebrannten Brennelementen in Pollux-Behältern zu simulieren (Bechthold 1994).

Das wichtigste Teilziel war die Eigenschaften und das Verhalten der Stoffe zu untersuchen, die den Behälter mit den ausgedienten Brennelementen im Endlager umgeben. Dies betraf vor allem den Salzgrus, mit dem die Strecken verfüllt wurden, und das umgebende Steinsalz, in dem die Strecken aufgefahren worden waren (Korthaus 1996). Die Wärme, die aus den Behältern in den Salzgrus und das Salzgebirge abgeleitet wurde, führte zur Beschleunigung der Konvergenz der Strecken und zur Verdichtung des Versatzmaterials. Dadurch wurden die Hohlräume im Salzstock, die für die Einlagerung der Abfälle aufgefahren worden waren, wieder geschlossen, und der ursprüngliche Zustand des Salzstocks sollte sich wiederherstellen.

Die Modellrechengruppe lieferte im Rahmen dieses Versuchs Rechnungen zum zeitlichen Verlauf der Temperatur am Behälterboden und im Salzgebirge sowie zum Druck im Versatz und die damit prognostizierte Versatzporosität als Funktion der Zeit (Pudewills 2004). Hier zeigte sich jedoch eine deutlich geringere gemessene Kompaktierungsrate im Vergleich zu den Messungen. Als Konsequenz daraus wurde die Anlage zur Ermittlung des triaxialen Kompaktierungsverhaltens von Salzgrus entwickelt und betrieben.

6.5 EU-Projekte NF-Pro und THERESA

Von 2004 bis 2008 wurde von der EU das integrierte Projekt „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)“ gefördert, im welchen aus dem INE auch Arbeiten zur Kompaktierung von Salzgrus beigetragen wurden (Sneyers 2008).

Ein weiteres EU-Projekt, zu dem Modellrechnungen erarbeitet wurden war THERESA „Coupled thermal-hydrological-mechanical-chemical processes for application in repository safety assessment“, welches von 2007 – 2009 gefördert wurde. Das Projekt zielte darauf ab, eine wissenschaftliche Methodik zur Bewertung der Fähigkeiten von mathematischen Modellen und Computercodes für gekoppelte thermohydromechanische und chemische (THMC) Prozesse zu entwickeln, die bei Performance Assessment und Sicherheitsbewertungen geologischer Endlager für nukleare Abfälle Anwendung finden. Das Projekt konzentrierte sich auf die Themen der Schwerpunkte auf Steinsalz, Puffermaterialien und der Puffer-Gesteins-Grenzfläche. Hierzu wurden

numerische Simulationen von Labortests im kleinen bis mittleren Maßstab, speziell definierten generischen Benchmark-Tests (BMT) und groß angelegten in-situ-Experimenten mit gekoppeltem THM-, HMC- oder THMC-Codes durchgeführt.

6.6 PTKA-Projekte

Verschiedene Modelle und Verfahren zur Bestimmung von salzspezifischen Stoffgesetzen und zugehörigen Parametern sowie zur Durchführung numerischer Simulationen wurden von verschiedenen Arbeitsgruppen bei der GRS, BGR und Universitäten entwickelt. Zwischen 2004 und 2010 förderte das Bundesministerium für Bildung und Forschung in Verbundprojekten die Dokumentation und den Vergleich der in verschiedenen Institutionen verfügbaren konstitutiven Modelle für Steinsalz.

Das erste Vorhaben "Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz befasste sich mit dem „Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen“ und wurde zwischen 2004 und 2006 in einer Kooperation der 5 Projektpartner bearbeitet. Dabei wurden die Stoffgesetze der Partner anhand von semianalytischen Nachrechnungen verschiedenartiger Laborversuche und von 2D-Simulationsrechnungen einfacher, aber typischer untertägiger Modellstrukturen überprüft und im Detail miteinander verglichen (Pudewills 2007).

Im Anschlussvorhaben "Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von 3D-Modellberechnungen zum mechanischen Langzeitverhalten von realen Untertagebauwerken im Steinsalz", das von 2007 bis 2010 ebenfalls in einer Kooperation der Projektpartner bearbeitet wurde, sind 3D-Benchmark Modellberechnungen zu einem realen, stärker beanspruchten Untertagebauwerk im Steinsalz der Grube Angersdorf durchgeführt worden. Die beiden BMBF-Verbundprojekte waren auf die untertägige Entsorgung chemo-toxischer Abfälle im Steinsalz ausgerichtet.

Das dritte Verbundprojekt im Zeitraum 2010 bis 2016 mit dem Titel „Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellberechnungen zum thermomechanischen Langzeitverhalten eines möglichen Endlagers in Steinsalz" setzte sich aus mehreren Benchmark-Übungen zusammen und die Durchführung erfolgte in drei Phasen. Die Problemstellung des Benchmarks entwickelte sich von der Verifikation der Rechenprogramme und Stoffmodelle bis zur Bewertung der Prognoserechnungen durch Vergleich mit den Ergebnissen thermomechanischer in-situ Versuche. Die Leistungsfähigkeit des ADINA-Programms und der implementierten Stoffmodelle wurden in diesem Vorhaben demonstriert (Pudewills 2011, Pudewills 2016). Ein Beispiel war die Berechnung der Spannungen im Steinsalz um eine Strecke nach dem Verschluss durch Einbau einer starren Wand (Damm-Joch). Die berechnete volumetrische Deformation ins in Abb. 7 dargestellt.

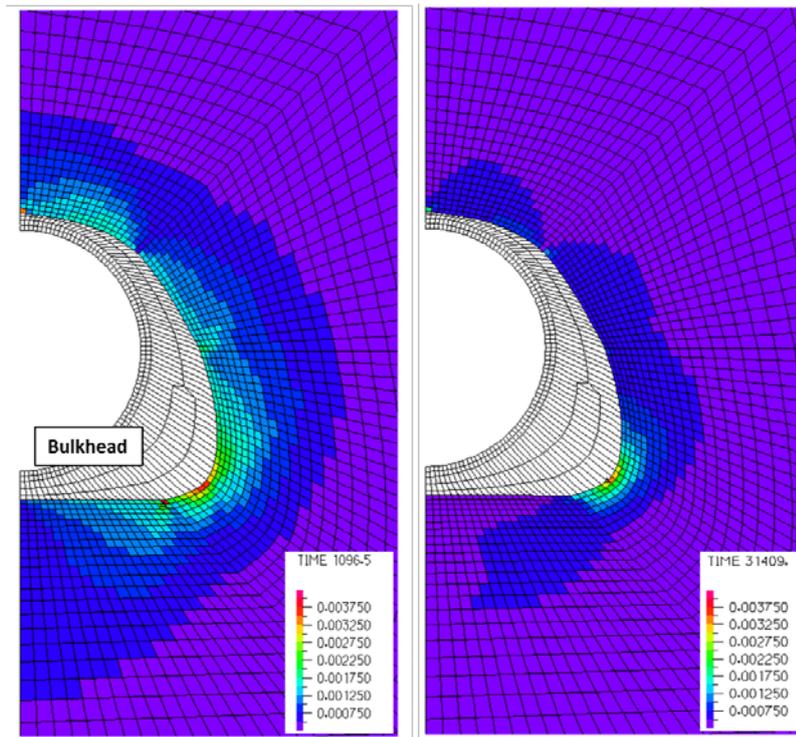


Abb. 7 Veränderung der berechneten volumetrischen Deformation um eine Strecke in Steinsalz nach dem Einbau einer starren Wand zu den Zeitpunkten 0,5 und 85 Jahren (Geckeis, Altmaier et al. 2014).

Die Ergebnisse spezifischer Benchmark-Rechnungen zeigten, dass die Modelle die relevanten Verformungsphänomene in Steinsalz unter verschiedenen Einflüssen korrekt beschreiben (Salzer, Günther et al. 2012). In der 3. Projektphase stand der Temperatureinfluss auf das Verformungsverhalten von Steinsalz im Vordergrund und wurde im Rahmen der deutsch-amerikanischen Kooperation bearbeitet. Diese Projektphase umfasste Labortests, Neuberechnungen von früheren in-situ Versuchen und Benchmark-Rechnungen eines beheizten Bohrlochs (Hampel, Argüello et al. 2013).

Ein weiteres von PTKA gefördertes Verbundprojekt hatte den Titel „Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellberechnungen zum thermomechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz“ und eine Laufzeit von 2010 bis 2016. Das bei verschiedenen Arbeitsgruppen vorhandene umfangreiche experimentelle und theoretische Know-how zur Salzmechanik diente als Grundlage zur Entwicklung fortschrittlicher Stoffgesetze und Verfahrensweisen für die Ermittlung charakteristischer Kennwerte und die numerische Behandlung anspruchsvoller Simulationsaufgaben. Im Rahmen dieses Verbundprojekts wurden mehrere Benchmark-Rechnungen durchgeführt. Die Problemstellungen umfassten die Verifikation der Rechenprogramme und Stoffmodelle bis zur Bewertung der Prognoserechnungen durch Vergleich mit den Ergebnissen thermo-mechanischer in situ Versuche. Hauptziel des Projekts war die Ermittlung des aktuellen Standes der Rechenprogramme zur Modellierung des Verhaltens von Salz bei der Endlagerung von wärmeproduzierenden Abfällen in Salzformationen. In diesem Verbundprojekt führte jeder Projekt-Partner mit seinem eigenen Stoffgesetz und Programmsystem Rechnungen zur Spannungs-, Verformungs-, Dilatanz- und Schädigungsentwicklung sowie zur Schädigungsrückbildung und Verheilung in einer realen Untertagestruktur im Steinsalz durch. Im Vordergrund standen die Simulation des thermomechanischen Verhaltens und die Verheilung von Steinsalz. Das Projekt diente einer realitätsnäheren Einschätzung der Leistungsfähigkeit der Stoffgesetze im Hinblick auf deren Einsatz bei der praktischen Anwendung im Rahmen der Sicherheitsbewertung von Endlagern für wärmeentwickelnde Abfälle im Steinsalz. An den Vergleichsrechnungen nahm das INE mit dem

Programmsystem ADINA teil. Die erzielten Ergebnisse und die dabei gewonnenen Erfahrungen wurden publiziert (Pudewills 2016).

Im Rahmen der PTKA-Projekte „Verbesserung von Werkzeugen zur Sicherheitsbewertung von Endlager“ führten die beteiligten Projektpartner 3D-Benchmark-Rechnungen zu verschiedenen Strukturen im Steinsalz durch. Ziel dieser Projekte war die Modelle hinsichtlich relevanter Deformationsphänomene im Steinsalz unter verschiedenen Einflussfaktoren zu beschreiben und die Entwicklung der Dilatanz, des kurzfristigen und des langfristigen Kriechversagens verlässlich zu berechnen. Als Beispiel wurde eine dreidimensionale FE-Analyse des Steinsalzes am Schnittpunkt von Zugangsstrecken modelliert. Als Ergebnis wurden die

- Verformungen und Stabilität des Steinsalzes am Schnittpunkt und die
- dreidimensionale Entwicklung und Ausdehnung der Excavation Disturbed Zone (EDZ) im umgebenden Gestein

ermittelt. Die Analyse berücksichtigte die nichtlinearen Eigenschaften des Salzes und sein Bruchverhalten unter Zugspannung. Die Ergebnisse sowie die notwendigen Materialparameter, wie thermoelastische Eigenschaften, stationäres und transientes Kriechen, viskoplastisches Versagen und Dilatationsgrenze wurden bei der SaltMech 2015 Konferenz vorgestellt und publiziert (Pudewills 2015). Ein Vergleich zwischen Rechenergebnissen und Beobachtungen ist in Abb. 8 gezeigt.

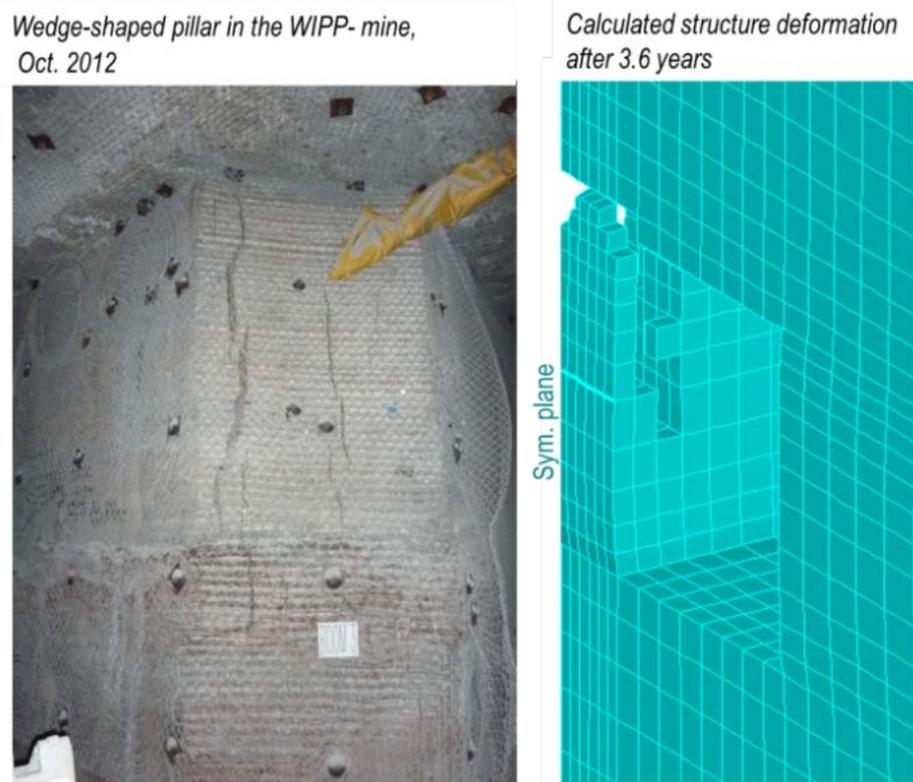


Abb. 8 Qualitativer Vergleich der berechneten Brüche in einem Pfeiler im Steinsalz (rechts) mit Beobachtungen in der Waste Isolation Plant (WIPP) in den USA (Geckeis, Altmaier et al. 2015).

7 Abschließende Anmerkungen

Die Arbeitsgruppe, die im INE mit thermomechanischer Modellierung befasst war, bestand aus Dr. Ekkehard Korthaus und Frau Alexandra Pudewills. In den Jahren vor 1991 waren zeitweise Nachwuchswissenschaftler in der Gruppe tätig. Dies waren u. a. Dr. G. Bock, der sich mit großräumigen thermomechanischen Effekten beschäftigte und B. Wolters, der die Eignung des Codes ABAQUS für die im INE bearbeitete Fragestellungen untersuchte. Der Forschungsschwerpunkt des INE lag jedoch auf den geochemischen Aspekten der Langzeitsicherheit. Mit dieser Ausrichtung einher ging eine strikte Abgrenzung der im Forschungszentrum bearbeiteten Aspekte der Endlagersicherheitsforschung zu den Arbeiten, die beispielsweise bei der GRS oder BGR durchgeführt wurden. Insbesondere die Modellierung im Rahmen der Sicherheitsanalysen war vollständig bei der GRS, Braunschweig angesiedelt. Im INE wurden Modellrechnungen zur Thermomechanik im Wesentlichen für kleinskalige Detailsysteme durchgeführt. Auf Grund der Trennung der Aufgabenstellung des INE von den mehr modellmäßig arbeitenden Organisationen GRS, BGR oder DBE Technology GmbH waren die Mitarbeiter in der Thermomechanik-Gruppe im Institut fachlich isoliert und mussten sich verstärkt nach Außen orientieren. Nichtsdestotrotz waren die F&E-Arbeiten der Gruppe sehr erfolgreich und wurden international anerkannt. Einen Überblick über die verschiedenen Anwendungen der thermischen und thermomechanischen Rechnungen, die im INE durchgeführt wurden, zeigt die Liste der internen Berichte und Publikationen der Gruppe (siehe Anhang).

Das F&E-Vorhaben unter welchem die Modellrechnungen zur Thermomechanik durchgeführt wurden, war mit dem Titel „Entwicklung und Validierung von Rechenverfahren und Modellen für den Langzeitsicherheitsnachweis“ bezeichnet. Seit etwa 2010 waren die Ziele mit dem Oberbegriff „Simulation der thermo-hydromechanischen Vorgänge im Nahbereich eines Endlagers sowie die Simulation von Strömungs- und Transportprozessen in Kristallin-Gestein“ bezeichnet. Die Modellierung von Strömungs- und Transportprozessen fand im Zusammenhang mit den F&E-Arbeiten im Grimsel Untertagelabor statt. Dort wurden in mehreren Projektphasen Tracer-Tests in Klüften in sogenannten Dipolen durchgeführt. Hierbei wurde in einem Scherzonenbereich eine Injektionsbohrung und in gewisser Entfernung eine Extraktionsbohrung installiert. Aufgrund der Genehmigung der Versuche mussten alle radioaktiven Tracer aus dem Versuchsdipol wieder entfernt werden. Daher wurden deutlich höhere Extraktionsraten als Injektionsraten angewandt. Die Grundwasserströmung und die Verteilung der Tracer im Dipol wurden mit dem Code ADINA-F modelliert.

Das Vorhaben zur thermischen und thermomechanischen Modellierung im INE wurde 2016 beendet, als Frau Pudewills in den Ruhestand trat. Herr Korthaus war bereits 2007 in den Ruhestand getreten.

Acknowledgment

Der Autor bedankt sich ausdrücklich für den sorgfältigen und hilfreichen Review des Reports durch Frau Alexandra Pudewills.

Literaturverzeichnis

- Albers, G., et al. (1984). "Zur Abschaetzung der thermomechanischen Auswirkungen von hochradioaktiven Abfaellen." *Atomwirtschaft - Atomtechnik* **29**: 559-561.
- Albrecht, E., et al. (1975). "Endlagerung radioaktiver Abfaelle. Jahresbericht 1973." Kernforschungszentrum Karlsruhe KfK 2015.
- Bachmann, H. and D. Koopmann (1979). "Tuning des Job Entry Subsystems 3 im Rahmen der Einfuehrung des MVS Betriebssystems in der ADI."
- Bechthold, W. (1994). Thermische Simulation der Streckenlagerung: Demonstrationsversuch zur Direkten Endlagerung. GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE) and Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK), Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT).
- Bechthold, W., et al. (1989). Combined concept system analysis Final report Main volume. Germany.
- Bechthold, W., et al. (1974). Endlagerung radioaktiver Abfälle: Jahresbericht 1972. Karlsruhe, Kernforschungszentrum KfK 1862.
- Bechthold, W., et al. (1997). "Thermal simulation of drift emplacement (TSS). Summary of interim results." Projektträger Karlsruhe FZKA-PTE 4
- Bock, D. G. (1978). "Modellrechnungen zur thermomechanischen Belastung in Salzstöcken mit inhomogener Struktur." Primärbericht KfK-ABRA 05 12 05 P07B.
- Bock, G. (1979). "Zur thermomechanischen Belastung in Salzstöcken mit inhomogener Struktur bei elastisch-plastischem Stoffverhalten." Primärbericht KfK-ABRA 05 12 05 P07C.
- Diefenbacher, W., et al. (1971). "Endlagerung radioaktiver Abfaelle. Jahresbericht 1969." Kernforschungszentrum Karlsruhe KfK 1212.
- Diefenbacher, W., et al. (1971). "Endlagerung radioaktiver Abfaelle. Jahresbericht 1970." Kernforschungszentrum Karlsruhe KfK 1454.
- Diefenbacher, W., et al. (1972). "Endlagerung radioaktiver Abfaelle. Jahresbericht 1971." Kernforschungszentrum Karlsruhe KfK 1585.
- Duerr, K., et al. (1979). "Untersuchungen zur Temperaturentwicklung bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfaelle. Teil II: Experimentelle Ueberpruefung der Rechenverfahren anhand von Simulationsversuchen." *Atomwirtschaft - Atomtechnik* **24**: 91-94.
- EGT (1978). "Versuchseinlagerunghochradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse: 2. Halbjahresbericht 1978." Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München und Kernforschungszentrum Karlsruhe GSF-T 133, KfK 3321.
- Geckeis, H., et al. (2014). "Annual Report 2013 / Institute for Nuclear Waste Disposal." KIT Scientific Reports 7664.
- Geckeis, H., et al. (2015). "Annual Report 2014 / Institute for Nuclear Waste Disposal." KIT Scientific Reports 7709.
- Grison, G., et al. (1968). "Sitologie du stockage des dechets radio - actifs dans la communaute europeenne." European Commission, Brussels,
- GSF-Ift and KfK-ABRA (1980). "Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung. Jahresbericht 1979."
- Hahne, K., et al. (1985). Numerical calculation of the time and space dependent temperature distribution in a HLW repository of finite extension and temporal step-by-step disposal procedure, 9th Internat.Symp.on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management, Stockholm, S, September 9-11, 1985.
- Hampel, A., et al. (2013). Benchmark calculations of the thermo-mechanical behavior of rock salt. Results from a US-German joint project. Proceedings of the 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, June 23-26, 2013. Ed.: L. J. Pyrak-Nolte, American Rock Mechanics Association (ARMA), Alexandria, VA: 1030-1042.
- Hampel, A., et al. (2015). Joint project III on the comparison of constitutive models for the thermo-mechanical behavior of rock salt. I. Overview and results from model calculations of healing of rock salt. Roberts, L. [Hrsg.] Mechanical Behavior of Salt VIII : Proceedings of the Conference (SaltMech 2015), Rapid City, S.D., May 26-28, 2015 Leiden : CRC Press/Balkema, 2015: 349-359.
- Hampel, A., et al. (2012). Joint projects on the comparison of constitutive models for the mechanical behavior of rock salt. II. Overview of the models and results of 3-D benchmark calculations. Mechanical Behavior of Salt VII : Proc.of the 7th Conf., Paris, F, April 16-19, 2012. Ed.: P. Berest, CRC Press, Boca Raton: 231-240.
- Hein, H.-J. (1991). Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgranulat : ein Beitrag zur Endlagerung wärme freisetzender radioaktiver Abfälle. Ph.D., RWTH Aachen.

- Hepp, H., et al. (1969). "Tief Lagerung radioaktiver Abfälle. Jahresbericht 1968." Studiengruppe Tief Lagerung, Karlsruhe KfK 1138
- Hou, Z., et al. (2007). Comparison of advanced constitutive models for the mechanical behavior of rock salt - results from a joint research project. II. Numerical modelling of two in situ case studies and comparison. Wallner, M. [Hrsg.] The Mechanical Behavior of Salt : Understanding of THMC Processes in Salt : Proc. of the 6th Conf., Hannover, May 22-25, 2007 London [u.a.] : Taylor and Francis Group, 2007: 89-98.
- Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (1982). "Ergebnisbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten 1981." Kernforschungszentrum, Karlsruhe,
- K.D. Closs (Ed.) (1980). "Vergleich der verschiedenen Entsorgungsalternativen und Beurteilung ihrer Realisierbarkeit : Studie Entsorgungsalternativen." Kernforschungszentrum, Karlsruhe KfK 3000.
- Kiehl, J. R., et al. (1998). "Ein räumliches Stoffgesetz für Steinsalz unter Berücksichtigung von primärem, sekundärem und tertiärem Kriechen, Dilatanz, Kriech- und Zugbruch sowie Nachbruchverhalten." Geotechnik **21** 254-258.
- Korthaus, E. (1983). "Abschließende Verbesserung der vorliegenden Rechenprogramme zur Bestimmung der Temperaturentwicklung." Primärbericht KfK-INE 05 11 01 P07A.
- Korthaus, E. (1996). Consolidation and deviatoric deformation behaviour of dry crushed salt at temperatures up to 150°C, 4th Conf. on the Mechanical Behaviour of Salt, Montreal, CDN, June 17 - 18, 1996.
- Korthaus, E. (1998). "Experiments on crushed salt consolidation with true triaxial testing device as a contribution to an EC benchmark exercise." Forschungszentrum Karlsruhe FZKA-6181.
- Korthaus, E. (1999). Entwicklung und Validierung eines Stoffgesetzes für den Referenzversatz, BfS-Workshop 'Eigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial im Endlager Gorleben' Salzgitter-Lebenstedt, 18.-19. Mai 1999.
- Korthaus, E. (2002). Code development for modeling of coupled effects at corrosion of carbon steel containers under repository conditions. TrePro 2002 : Modelling of Coupled Transport Reaction Processes ; Workshop of the Forschungszentrum Karlsruhe, March 20-21, 2002 Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6721 (Mai 2002): 43-45.
- Korthaus, E., et al. (1990). Systemanalyse Mischkonzept. Thermische und thermomechanische Analysen des Endlager-Nahbereichs und Ermittlung des Flächenbedarfs des Endlagers, Technischer Anhang 5 Karlsruhe, KfK 1990.
- Korthaus, E. and P. Donath (1978). "Berechnungen zur Temperaturentwicklung bei der Endlagerung von hochaktiven Abfällen in Steinsalzformationen." Primärbericht KfK-ABRA 05 12 05 P14A.
- Korthaus, E. and A. Pudewills (1982). "Temperaturentwicklung und thermomechanische Verformung bei verschiedenen Endlagervarianten für abgebrannte Brennelemente." Primärbericht KfK-INE 05 11 01 P03A.
- Korthaus, E. and A. Pudewills (1987). "Modellrechnungen zur Bestimmung der Spannungsverteilung im Salzstock Asse unter dem Einfluß von unversetzten Abbaukammern." Primärbericht KfK-INE 05 01 04 P83A.
- Korthaus, E. and W. Schwarzkopf (1993). "Eine triaxiale Messeinrichtung zur Untersuchung des Kompaktierungsverhaltens von Salzgrus." Forschungszentrum Karlsruhe KfK 5211.
- Krause, H., et al. (1970). "Abteilung Dekontaminationsbetriebe - Jahresbericht 1968." Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe, KfK 1030.
- Krause, H., et al. (1967). "Jahresbericht 1966 der Studiengruppe fuer Tief Lagerung radioaktiver Abfälle." Studiengruppe Tief Lagerung, Kernforschungszentrum Karlsruhe KfK 481.
- Krause, H. and G. Rudolph (1975). "Abteilung Behandlung radioaktiver Abfälle: Jahresbericht 1974." Kernforschungszentrum Karlsruhe, Abteilung Behandlung radioaktiver Abfälle, KfK 2212.
- Kühn, K. (1979). German In-Situ Studies in Salt. U. S. / FRG Bilateral Workshop on Waste Isolation Performance Assessment and In - Situ Testing. Projektstab Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE). Berlin, October 1- 5, 1979, Office of Nuclear Waste Isolation: ONWI-88: 248-268.
- Langer, M. and M. Wallner (1979). Determination of thermomechanical data for Rocksalt. U. S. / FRG Bilateral Workshop on Waste Isolation Performance Assessment and In - Situ Testing. Projektstab Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE). Berlin, October 1- 5, 1979, Office of Nuclear Waste Isolation: ONWI-88: 269-297.
- Lowe, M. J. S. and N. C. Knowles (1989). "COSA II: Further benchmark exercises to compare geomechanical computer codes for salt." European Communities, Brüssel, EUR 12135 EN.
- Möller, D. (2009). Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland. Frankfurt, Peter Lang, Internationaler Verlag der Wissenschaften.
- Müller-Lyda, I. (1999). "Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz." Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, GRS - 157.

- Müller-Lyda, I., et al. (1999). "Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsrelationen für Salzgrus." Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit(GRS) mbH, Braunschweig,
- Müller, R., et al. (1978). Verfahren und Bohrlochsonde zum Messen der wärmeinduzierten Bohrlochkonvergenz Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH. Germany. **Offenlegungsschrift 28 56 896**
- Müller, R. and E. Korthaus (1983). "In situ-Untersuchung der Standfestigkeit von Verrohrungen sowie Entwicklung und Erprobung einer Standard-Konvergenzsonde." European Commission, Brussels,
- Müller, R. and E. Korthaus (1983). "In situ-Untersuchung der Standfestigkeit von Verrohrungen sowie Entwicklung und Erprobung einer Standard-Konvergenzsonde." Primärbericht KfK-INE- 05 11 04 P08A.
- Olivella, S., et al. (2004). Benchmarking the thermo-mechanical modelling of the TSDE in situ test at Asse salt mine, Euradwaste '04 : 6th EC Conf.on the Management and Disposal of Radioactive Waste, Luxembourg, L, March 29 - April 1, 2004 (Poster).
- Owen, D. R. J. and E. Hinton (1980). FINITE ELEMENTS IN PLASTICITY: Theory and Practice Swansea, U.K. , Pineridge Press Limited.
- Papp, R. (1997). GEISHA Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein, Kernforschungszentrum Karlsruhe PTE: FZKA-PTE Nr. 3.
- Perzl, F. (1977). Tief Lagerung radioaktiver Abfälle im Salz: - Erreichtes und Geplantes -. Statusbericht PWA 1977, 18. November 1977. Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- Piper, D., et al. (1989). "Project COSA: Comparison of geomechanical computer codes for salt." European Communities Brüssel, EUR 12134 EN.
- Ploumen, P., et al. (1979). "Untersuchungen zur Temperaturentwicklung bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfaelle. Teil I: Berechnung der zeit- und ortsabhängigen Temperaturfelder." Atomwirtschaft - Atomtechnik **24**: 85-91.
- Pudewills, A. (1980). "Modellrechnungen zur Ermittlung der Spannungs- Verformungsfelder in Steinsalz in der Umgebung von beheizten Bohrlöchern und einer Kaverne." Primärbericht KfK-INE 05 12 05 P19A.
- Pudewills, A. (1981). "Modellrechnungen zur in situ Untersuchung der Standfestigkeit von Bohrlochverrohrungen und zur Erprobung der Standardsonde." Primärbericht KfK-INE 05 11 04 P03A.
- Pudewills, A. (1983). "Thermomechanische Modellrechnungen zur Untersuchung der Spannungs- und Verformungsfelder in Steinsalz im Nahbereich einer MAW-Lagerbohrung." Primärbericht KfK-INE 05 11 01 P11C.
- Pudewills, A. (1986). "Thermomechanische Modellrechnungen zum Demonstrationsversuch "Aktive Bohrlochlagerung mit Brennelement-Kokillen". Primärbericht KfK-INE 05 01 04 P03A.
- Pudewills, A. (1990). "Thermomechanische Rechnungen zur Richtstrecke neben einem BE-Lagerfeld: Parameterstudie." Primärbericht KfK-INE 19 03 04 P02A.
- Pudewills, A. (1991). "Thermomechanische Rechnungen mit dem Programmsystem ADINA im Rahmen des Benchmarkprojekts COSA." Primärbericht KfK-INE 19 03 03 P05A.
- Pudewills, A. (1991). "Thermomechanische Rechnungen zum Konzept SL3* der gemischten Endlagerung von HAW-Kokillen und abgebrannten Brennelementen." Primärbericht KfK-INE 19 03 03 P03B.
- Pudewills, A. (2004). Numerical modelling of a backfilled drift in a waste repository. Topping, B.H.V. [Hrsg.] Proc.of the 4th Internat.Conf.on Engineering Computational Technology, Lisboa, P, September 7-9, 2004 Extended Abstracts Stirling : Civil-Comp Press, 2004 Full-length Papers on CD-ROM Paper 120 ISBN 0-948749-96-2 ISBN 0-948749-97-0 CD-ROM.
- Pudewills, A. (2005). Numerical modelling of the EDZ around a backfill excavation in rock salt. Davies, C. [Hrsg.] Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the Performanc of Radioactive Waste Geological Repositories : Proc.of the European Commission Cluster Conf., Luxembourg, L, November 3-5, 2003 Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 2005 EUR 21028 EN (2005): 263-267.
- Pudewills, A. (2005). "Numerical modelling of the long-term evolution of EDZ. Development of material models, implementation in finite-element codes, and validation." Davies, C. [Hrsg.] Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the Performanc of Radioactive Waste Geological Repositories : Proc.of the European Commission Cluster Conf., Luxembourg, L, November 3-5, 2003 Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, EUR 21028 EN.
- Pudewills, A. (2007). "BMBF-Verbundvorhaben Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen." Forschungszentrum Karlsruhe FZKA-7314.
- Pudewills, A. (2007). Modelling of the hydro-mechanical processes around excavations in rock salt, Van Cotthem, A. [Hrsg.] Eurock 2006 : Multiphysics Coupling and Long Term Behaviour in Rock Mechanics ; Proc.of the Internat.Symp.of the Internat. Soc.for Rock Mechanics, Liege, B, May 9-12, 2006 London [u.a.] : Taylor and Francis Group, 2006.

- Pudewills, A. (2009). Modelling of the laboratory benchmark tests on salt rock, THERESA : Coupled Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical Processes for Application in Repository Safety Assessment WP3, Deliverable D8 European Commission.
- Pudewills, A. (2011). "Coupled processes in salt host-rock repositories." THERESA : Coupled Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical Processes for Application in Repository Safety Assessment Final Report of Work Package 3, Deliverable D9 European Commission,
- Pudewills, A. (2011). Evaluation and improvement of the THM modelling capabilities for rock salt repositories. Papadarakakis, M. [Hrsg.] Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering IV : Proc.of the Internat.Conf., Kos, GR, June 20-22, 2011 CD-ROM Barcelona : CIMNE, 2011.
- Pudewills, A. (2011). "Numerische Simulation zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz (KIT Scientific Reports 7579)."
- Pudewills, A. (2012). Numerical simulation of coupled thermo-hydro-mechanical process in rock salt. Mechanical Behavior of Salt VII : Proc. of the 7th Conf., Paris, F, April 16-19, 2012. Ed.: P. Berest, CRC Press, Boca Raton: 115-122.
- Pudewills, A. (2013). Simulation of thermo-mechanical behavior of rock salt in the vicinity of a disposal drift and the interaction with technical barriers, 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, Calif., June 23-26, 2013.
- Pudewills, A. (2015). Numerical analysis of a drift intersection in a waste repository in rock salt. Roberts, L. [Hrsg.] Mechanical Behavior of Salt VIII : Proceedings of the Conference (SaltMech 2015), Rapid City, S.D., May 26-28, 2015 Leiden : CRC Press/Balkema, 2015: 419-424.
- Pudewills, A. (2016). "Modellrechnungen zum thermomechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz: BMWi - Verbundprojekt Ergebnisbericht zum Teilprojekt 3 - 02E10840 (KIT Scientific Reports ; 7708)."
- Pudewills, A. and E. Korthaus (1982). "Modellrechnungen zur thermomechanischen Wechselwirkung zwischen Salz und Abfallprodukt." Primärbericht KfK-INE, -.
- Pudewills, A. and E. Korthaus (1983). "Development of Methods of Computation and Performance of Model Computations for Thermomechanical Interactions of the Salt and Borehole Casing or Waste Canisters." Primärbericht KfK-INE 05 11 01 P03A.
- Pudewills, A. and E. Korthaus (1993). Thermomechanical analysis of a waste disposal drift in rock salt. Bawden, W.F. [Hrsg.] Innovative Mine Design for the 21st Century : Proc.of the Internat.Congress on Mine Design, Kingston, CDN, August 23-26, 1993 Rotterdam [u.a.] : A.A. Balkema, 1993: 601-607.
- Pudewills, A., et al. (1986). "Entwicklung von Rechenverfahren und Durchführung von Modellrechnungen zur thermomechanischen Wechselwirkung des Steinsalzes mit der Bohrlochauskleidung bzw. mit eingelagerten HAW-Abfallgebänden. Schlussbericht."
- Pudewills, A., et al. (1988). Model calculations of the thermomechanical effects in the near field of a high-level radioactive waste repository. Nuclear Technology, 82(1988) S.71-80 Post, R. G. [Hrsg.] Waste Management : '88 ; Waste Processing, Transportation, Storage and Disposal, Technical Programs and Public Education ; Proc.of the Symp., Tucson, Ariz., February 28 - March 3, 1988 Tucson, Ariz. : Arizona Board of Regents 1988 Vol. 2 S.691-97.
- Pudewills, A. and M. Krauss (1999). "Implementation of a viscoplastic model for crushed salt in the ADINA program." Computers and Structures **72**(1-3): 293-299.
- Pudewills, A., et al. (1995). "Thermal and thermomechanical analyses for disposal in drifts of a repository in rock salt." Nuclear technology **112**(1): 79-88.
- Ramdohr, H. (1967). "Wohin mit dem Atommüll? Endgültige Unterbringung radioaktiver Abfälle und Rückstände in der Bundesrepublik Deutschland." Umschau in Wissenschaft und Technik **67 (1967)**: 219-224.
- Rothfuchs, T. (1979). Asse II In-Situ Brine Migration Tests. U. S. / FRG Bilateral Workshop on Waste Isolation Performance Assessment and In - Situ Testing. Projektstab Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE). Berlin, October 1- 5, 1979, Office of Nuclear Waste Isolation: ONWI-88: 248-268.
- Rothfuchs, T., et al. (1993). "The HAW Project. Test disposal of highly radioactive radiation sources in the Asse salt mine." Commission of the European Communities,
- Salzer, K., et al. (2012). Joint projects on the comparison of constitutive models for the mechanical behavior of rock salt. I.Overview of the projects, reference mine for 3-D benchmark calculations, in-situ measurements and laboratory tests. Mechanical Behavior of Salt VII : Proc. of the 7th Conf., Paris, F, April 16-19, 2012. Ed.: P. Berest, CRC Press, Boca Raton: 221-230.
- Schulze, O., et al. (2007). Comparison of advanced constitutive models for the mechanical behavior of rock salt - results from a joint research project. I. Modeling of deformation processes and benchmark calculations, Wallner, M. [Hrsg.] The Mechanical Behavior of Salt : Understanding of THMC Processes in Salt : Proc.of the 6th Conf., Hannover, May 22-25, 2007 London [u.a.] : Taylor and Francis Group, 2007.

- Sneyers, A. (2008). "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)." SCK•CEN, Brussels, EUR 23730.
- Super User (2018) "Der Computer - die ganze Geschichte."
- Wieczorek, K., et al. (2010). The excavation damaged zone in rock salt: outcome of the EC project. 44th US Rock Mechanics Symp. and 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symp., Salt Lake City, Utah, June 27-30, 2010 Proc. on CD-ROM ARMA 10-384 Alexandria, Va. : American Rock Mechanics Association (ARMA), 2010.
- Wieczorek, K., et al. (2009). Data compilation and lab testing for calibration and improvement of numerical THM models for rock salt repositories in the frame of THERESA, EC-TIMODAZ-THERESA THMC Conf., Luxembourg, L, September 29 - October 1, 2009.

1985	<p>Numerical calculation of the time and space dependent temperature distribution in a HLW repository of finite extension and temporal step-by-step disposal procedure.</p> <p>Entwicklung von Rechenverfahren und Durchführung von Modellrechnungen zur thermomechanischen Wechselwirkung des Salzes mit der Bohrlochauskleidung bzw. mit eingelagerten Abfallblöcken.</p>	<p>(Hahne, Schlich et al. 1985)</p> <p>(Pudewills, Korthaus et al. 1986)</p>
1986	Thermomechanische Modellrechnungen zum Demonstrationsversuch "Aktive Bohrlochlagerung mit Brennelement-Kokillen"	(Pudewills 1986)
1987	Modellrechnungen zur Bestimmung der Spannungsverteilung im Salzstock Asse unter dem Einfluss von unversetzten Abbaukammern.	(Korthaus and Pudewills 1987)
1990	<p>Thermomechanische Rechnungen zur Richtstrecke neben einem BE-Lagerfeld: Parameterstudie.</p> <p>Systemanalyse Mischkonzept. Thermische und thermomechanische Analysen des Endlager-Nahbereichs und Ermittlung des Flächenbedarfs des Endlagers.</p>	<p>(Pudewills 1990)</p> <p>(Korthaus, Bechthold et al. 1990)</p>
1991	<p>Thermomechanische Rechnungen mit dem Programmsystem ADINA im Rahmen des Benchmarkprojekts COSA.</p> <p>Thermomechanische Rechnungen zum Konzept SL3* der gemischten Endlagerung von HAW-Kokillen und abgebrannten Brennelementen.</p>	<p>(Pudewills 1991)</p> <p>(Pudewills 1991)</p>
1993	<p>Eine triaxiale Messeinrichtung zur Untersuchung des Kompaktierungsverhaltens von Salzgrus.</p> <p>In situ-Untersuchung der Standfestigkeit von Verrohrungen sowie Entwicklung und Erprobung einer Standard-Konvergenzsonde.</p>	<p>(Korthaus and Schwarzkopf 1993)</p> <p>(Müller and Korthaus 1983)</p>
1996	Consolidation and deviatoric deformation behaviour of dry crushed salt at temperatures up to 150°C.	(Korthaus 1996)
1997	Thermal simulation of drift emplacement (TSS). Summary of interim results.	(Bechthold, Heusermann et al. 1997)
1998	<p>Special safety aspects of drift disposal - The thermal simulation of the drift storage experiment.</p> <p>Experiments on crushed salt consolidation with true triaxial testing device as a contribution to an EC benchmark exercise.</p>	<p>(Bechthold, Heusermann et al. 1997)</p> <p>(Korthaus 1998)</p>
1999	<p>Implementation of a viscoplastic model for crushed salt in the ADINA program.</p> <p>Entwicklung und Validierung eines Stoffgesetzes für den Referenzversatz.</p>	<p>(Pudewills and Krauss 1999)</p> <p>(Korthaus 1999)</p>
2002	Code development for modeling of coupled effects at corrosion of carbon steel containers under repository conditions.	(Korthaus 2002)
2003	Numerical modeling of the thermomechanical behavior of a large-scale underground experiment.	

2004	Benchmarking the thermo-mechanical modelling of the TSDE in situ test at Asse salt mine, Numerical modelling of a backfilled drift in a waste repository.	(Olivella, Gens et al. 2004) (Pudewills 2004)
2005	Numerical modelling of the EDZ around a backfill excavation in rock salt. Numerical modelling of the long-term evolution of EDZ. Development of material models, implementation in finite-element codes, and validation.	(Pudewills 2005) (Pudewills 2005)
2007	Comparison of advanced constitutive models for the mechanical behavior of rock salt - results from a joint research project. II. Numerical modelling of two in situ case studies and comparison. BMBF-Verbundvorhaben Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen. Modelling of the hydro-mechanical processes around excavations in rock salt, Comparison of advanced constitutive models for the mechanical behavior of rock salt - results from a joint research project. I. Modeling of deformation processes and benchmark calculations.	(Hou, Wolters et al. 2007) (Pudewills 2007) (Pudewills 2007) (Schulze, Heemann et al. 2007)
2009	Modelling of the laboratory benchmark tests on salt rock, THERESA : Coupled Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical Processes for Application in Repository Safety Assessment NFPro WP3. Data compilation and lab testing for calibration and improvement of numerical THM models for rock salt repositories in the frame of THERESA.	(Schulze, Heemann et al. 2007, Pudewills 2009) (Wieczorek, Rothfuchs et al. 2009)
2010	The excavation damaged zone in rock salt: outcome of the EC project.	(Wieczorek, Förster et al. 2010)
2011	Coupled processes in salt host-rock repositories. Evaluation and improvement of the THM modelling capabilities for rock salt repositories.	(Pudewills 2011) (Pudewills 2011)
2012	Joint projects on the comparison of constitutive models for the mechanical behavior of rock salt. II. Overview of the models and results of 3-D benchmark calculations. Numerical simulation of coupled thermo-hydro-mechanical process in rock salt Joint projects on the comparison of constitutive models for the mechanical behavior of rock salt. I. Overview of the projects, reference mine for 3-D benchmark calculations, in-situ measurements and laboratory tests.	(Hampel, Salzer et al. 2012) (Pudewills 2012) (Salzer, Günther et al. 2012)
2013	Benchmark calculations of the thermo-mechanical behavior of rock salt. Results from a US-German joint project.	(Hampel, Argüello et al. 2013)

	Simulation of thermo-mechanical behavior of rock salt in the vicinity of a disposal drift and the interaction with technical barriers.	(Pudewills 2013)
2015	Joint project III on the comparison of constitutive models for the thermo-mechanical behavior of rock salt. I. Overview and results from model calculations of healing of rock salt. Numerical analysis of a drift intersection in a waste depository.	(Hampel, Günther et al. 2015) (Pudewills 2015)
2016	Modellrechnungen zum thermomechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz: BMWi - Verbundprojekt Ergebnisbericht zum Teilprojekt 3	(Pudewills 2016)

INE Scientific Working Documents
ISSN 2701-262X
www.kit.edu