

practicable for radiation protection and safety analysis. In addition, ACPs evaluation of more PWRs and the fusion reactor CFETR will be performed using CATE in next step.

Acknowledgments

The authors would like to express their gratitude for the support: Project 11605058 supported by *National Natural Science Foundation of China* and Project 2014GB119000 supported by *National Special Project for Magnetic Confined Nuclear Fusion Energy of China*.

References

- [1] A. Rocher, J. L. Bretelle, M. Berger: *Impact of main radiological pollutants on contamination risks (ALARA) optimization of physico chemical environment and retention technics during operation and shutdown*, in Proceedings of the European Workshop on Occupational Exposure Management at NPPs (ISOE 04), Session 2, EDF, Lyon, France, March 2004.
- [2] S. Kang, J. Sejvar, R. A. Shaw: *The CORA-II model of PWR corrosion-product transport*, EPRI NP-4246, 1985.
- [3] P. Beslu: *PACTOLE: a calculational code for predicting corrosion product behaviour and activation in PWR primary coolant systems*, CEA Cadarache Report, SCOC/LCC/90-096, 1990.
- [4] C. A. Bergmann, D. E. Durkosh, W. T. Lindsay, J. Roesmer: *The role of coolant chemistry in PWR radiation-field buildup*, EPRI NP-4247, 1985.
- [5] T. Nishimura, K. Kasahara: *Improvement of crud behaviour evaluation code (ACE)*, JAIF International Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants, Kashiwakazi, Japan, October 1998.
- [6] K. Dinov: *A model of crud particle/wall interaction and deposition in a pressurized water reactor primary system*, Nuclear Technology, vol. 94, no. 3, pp. 281-285, 1991.
- [7] L. D. Pace, D. Carloni, L. Perna, S. Paci, *Application of PACTITER V3.3 code to the ACPs assessment of ITER neutral beam injectors primary heat transfer system*, Fusion Science and Technology, vol. 60, no. 2, pp. 835-839, 2011.
- [8] P. J. Karditsas: *Activation product transport using TRACT: ORE estimation of an ITER cooling loop*, Fusion Engineering and Design, vol. 45, no. 2, pp. 169-185, 1999.
- [9] J. Zhang, L. Li, W. Song, Y. Fu, Y. Chen: *Program development for source term analysis of activated corrosion product in water-cooled fusion reactor*, Atomic Energy Science and Technology, vol. 49, pp. 6-12, 2015.
- [10] L. Li, J. Zhang, W. Song, Y. Fu, X. Xu, Y. Chen: *CATE: a code for activated corrosion products evaluation of water-cooled fusion reactor*, Fusion Engineering and Design, vol. 100, pp. 340-344, 2015.
- [11] C. B. Bahn, I. H. Rhee, I. S. Hwang, B. G. Park: *Chemical equilibrium modeling for magnetite-packed crevice chemistry in a nuclear steam generator*. Bulletin - Korean Chemical Society, vol. 26, no. 11, pp. 1783-1789, 2005.
- [12] R. A. Forrest: *The European Activation File: EAF-2007 decay data library*. UKAEA FUS 537, 2007.
- [13] R. A. Forrest, J. Kopecky, J.-Ch. Sublet. *The European Activation File: EAF-2007 neutron-induced cross section library*. UKAEA FUS 535, 2007.
- [14] C. B. Lee: *Modeling of corrosion product transport in PWR primary coolant*. Doctoral dissertation, MIT, 1990.
- [15] A. M. Morillon: *Modelling of radio-nuclide transport in a simulated PWR environment*. Master dissertation, MIT, 1987.

Authors

Jingyu Zhang
Lecturer

Lu Li
Ph.D. candidate

Yixue Chen
Professor

School of Nuclear Science and Engineering
North China Electric Power University
No.2, Beinong Road,
Changping District, Beijing, China

Auf dem langen Weg zu einem Endlager für hochradioaktive, Wärme entwickelnde Abfälle

Ein neuer konzeptionell-konfigurativer Ansatz und ein neues Simulationswerkzeug zur Erarbeitung eines verbesserten Prozess- und Systemverständnisses für HAW-Entsorgungsanlagen – ohne und mit direktem längerfristigem Monitoring

Teil 1

Karl-Heinz Lux, Ralf Wolters und Juan Zhao

Im Hinblick auf die Endlagerplanung werden bereits nach *BMU (2010)* eine Rückholbarkeit der Wärme entwickelnden hoch radioaktiven Abfälle während der Einlagerung in der Betriebsphase und eine grundsätzliche Bergbarkeit während der ersten 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers in der Nachverschlussphase gefordert. Da die Einlagerungskammern des Endlagerbergwerkes bereits begleitend während der rückbauartig verlaufenden Einlagerungsphase und die Infrastrukturbereiche dann anschließend im Rahmen der Stilllegungsphase versetzt werden, ist der Schritt nicht mehr weit, für diese insgesamt mehrere Jahrzehnte andauernde Betriebsphase auch eine Überwachung der schon frühzeitig in der Einlagerungsphase versetzten Endlagerbereiche vorzusehen und bei Bedarf auch darüber hinaus fortzusetzen, um erste Erkenntnisse zur auch tatsächlichen Funktionalität der verschiedenen Endlagersystemkomponenten zu erhalten. Sowohl für die Überwachung des Endlagers während der Einlagerungsphase wie auch danach könnte alternativ zu einem bzw. neben einem indirekten Monitoring auch ein direktes Monitoring der versetzten

Einlagerungssohle in das Endlagerkonzept implementiert werden. Dieses direkte Monitoring könnte z.B. durch Anordnung einer längerfristig nach Versatz und Verschluss der Einlagerungssohle offen zu haltenden Überwachungssohle erfolgen, die mit der Einlagerungssohle über Beobachtungs- bzw. Messbohrlöcher verbunden ist. Damit resultiert ein zweisöhliges Entsorgungsbergwerk. Allerdings besteht die Sorge, dass durch die zusätzliche Infrastruktur für eine direkte Überwachungsmaßnahme die geologische Barriere noch zusätzlich perforiert und dadurch weiter geschwächt wird. Dieser Besorgnis ist durch entsprechende Analysen zum Endlagersystemverhalten nachzugehen. Der potentielle Gewinn aus der Kontrollierbarkeit des Endlagerverhaltens und damit an Vertrauen in die Zuverlässigkeit der Endlagerkonzeption und der Endlagerausführung, aber auch an zuverlässig belegter Fehlerkorrekturmöglichkeit überwiegt bei weitem den zusätzlichen Aufwand an vorlaufenden generischen Untersuchungen zum Endlagersystemverhalten bei einer auf den ersten Blick grundsätzlich gegenüber den bisherigen konzeptionellen Planungen veränderten Konfiguration. Allerdings ist dabei vorausgesetzt, dass für diese Untersuchungen auch ein entsprechendes Analysewerkzeug zur Verfügung steht.

Die Publikation besteht aus insgesamt drei Teilen.

Nachfolgend wird in einem Teil I zunächst ein subjektiv geprägter Überblick gegeben über einige wesentliche Meilensteine auf dem nun schon einige Jahrzehnte andauernden Weg hin zu einem Endlager für hochradioaktive Wärme entwickelnde Abfälle in Deutschland. Insbesondere werden die im Lauf der Zeit eingetretenen Veränderungen in den sicherheitstechnischen und in den gesellschaftlichen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Wärme entwickelnder Abfälle und daraus resultierende Konsequenzen für die konzeptionell-konfigurative Ausgestaltung skizziert.

Vor diesem Hintergrund wird eine Modifikation des derzeitigen Endlagerkonzeptes vorgeschlagen, die eine grundsätzliche direkte Überwachbarkeit des Endlagerverhaltens auch noch in der ersten Zeit nach Stilllegung vorsieht. Wesentliche Gründe hierfür sind die Möglichkeit zur zumindest anfänglichen Dokumentation des planmäßigen Endlagerverhaltens und damit der Beleg der Zuverlässigkeit der Planung sowie die Hoffnung auf eine Verbesserung der Akzeptabilität für das für die nächsten Jahre geplante Standortauswahlverfahren durch die von vornherein in die Endlagerkonzeption implementierte längerfristige Überwachungsmöglichkeit für nachfolgende Generationen.

Angesichts der grundsätzlichen konzeptionellen Erweiterung wird auch vorgeschlagen, das Endlager nunmehr übergeordnet als HAW-Entsorgungsanlage zu bezeichnen. Diese Entsorgungsanlage wird dann funktional zeitlich getrennt in ein zunächst direkt auch noch nach Beendigung der Einlagerung von Abfällen überwacht Tiefenlager, das erst nachfolgend nach entsprechender finaler Entscheidung mit dem Verschluss der Beobachtungssohle und der Zugangsschächte in ein nachsorgefreies Endlager überführt wird. Allerdings wird das Tiefenlager auf

der Einlagerungssohle bereits mit der Abfalleinlagerung versetzt und einschließlich der Schächte bis zur Monitoringsohle verschlossen, sodass eine unmittelbare Zugänglichkeit zu den Abfällen auch bei dieser Konzeption nicht gegeben ist und trotz der Möglichkeit eines direkten Monitorings zeitnah zum Ende der Abfalleinlagerung größtmögliche passive Sicherheit gewährleistet ist.

Nach diesen mehr auf grundsätzliche sicherheitstechnische und gesellschaftspolitische Aspekte ausgerichteten Ausführungen und der Vorstellung eines konzeptionell-konfigurativen Vorschlags für die Ausgestaltung der HAW-Entsorgungsanlage folgt dann in Teil II die Vorstellung eines neuen Instrumentariums zur Simulation des Endlagersystemverhaltens, insbesondere im Hinblick auf die spätere Analyse der Auswirkungen der neuen Konzeption eines zweisöhligen Entsorgungsbergwerks mit Einlagerungssohle und Überwachungssohle zur längerfristigen Überwachung auch nach Verschluss. Der in den letzten Jahren an der TU Clausthal neu entwickelte FTK-Simulator besteht aus einer Kopplung der bekannten und etablierten Simulatoren FLAC^{3D} zur Abbildung thermomechanischer Prozesse (TM-Prozesse) und TOUGH2 zur Abbildung thermohydraulischer Prozesse (TH-Prozesse). Damit ist es nunmehr möglich, auch großräumige 3D-Strukturen im Hinblick auf ihr THM-Verhalten unter endlagerrelevanten Einwirkungen wie Hohlraumausbruch, Abfalleinlagerung und Resthohlraumversatz, Wärmeentwicklung und Gasentwicklung sowohl im Salinar- wie auch im Tonsteingebirge zu studieren und insbesondere Aussagen zu den fluid-dynamischen Prozessen im verschlossenen Endlager bzw. in der HAW-Entsorgungsanlage sowohl in der Tiefenlager- wie auch in der Endlagerphase bei planmäßiger (wahrscheinlicher) bzw. unplanmäßiger (weniger wahrscheinlicher) Entwicklung zu erarbeiten.

Erste grundlegende Simulationsergebnisse zum fluiddynamischen Endlagerverhalten im Kompartiment Nahfeld eines Referenz-Endlagers jeweils im Salinar- und Tonsteingebirge werden vorgestellt. Dabei stehen die Validierung der physikalischen Modelle und Einblicknahme in die im verschlossenen Endlager ablaufenden fluiddynamischen Prozesse im Vordergrund. Die fluiddynamischen Prozesse sind als Träger der radio- und chemotoxischen Schadstoffmigration von zentraler Bedeutung für die Sicherheitsanalysen.

In Teil III schließlich folgt die Vorstellung eines neuen Konzepts zur Entsorgung hochradioaktiver Wärme entwickelnder Abfälle. Dieses neue Entsorgungskonzept für insbesondere Wärme entwickelnde hochradioaktive Reststoffe ist in den Grundzügen im Rahmen der Forschungsplattform ENTRIA entwickelt worden. Von der in ENTRIA entwickelten konzeptionellen Grundlage eines Endlagerbergwerks mit längerfristigem direktem Monitoring bei gleichzeitiger Gewährleistung größtmöglicher passiver Sicherheit ausgehend erfolgt hier eine konfigurative Spezialisierung des Monitoringkonzeptes.

Dieses neue Konzept ist in Übereinstimmung mit den Empfehlungen der Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe bezüglich Reversibilität und auch längerfristigem Monitoring des Anlagenverhaltens über das Ende des Einlagerungsbetriebes hinaus. Erste Ergebnisse aus der Analyse dieser neuen konzeptionellen Anforderung und einer daraus abgeleiteten konfigurativen Umsetzung mit Einlagerungssohle, Überwachungssohle und Monitoringbohrlöchern zur direkten Tiefenlagerüberwachung werden vorgestellt.

Die in diesem Zusammenhang exemplarisch in ihrem zeitlichen Verlauf dargestellten und das Entsorgungsanlagenverhalten charakterisierenden Zustandsgrößen könnten grundsätzlich auch als potentielle Messwerte angesehen werden und

bei verfügbarer Messtechnik für die Beobachtung des Tiefenlagerverhaltens herangezogen werden. Anhand der Messbefunde könnte dann das Verhalten des Tiefenlagers bewertet und unter Beteiligung auch von Vertretern der Zivilgesellschaft die Grundlage für die Entscheidung zur Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager bzw. zur Rückholung der Abfälle erarbeitet werden.

Darüber hinaus erscheint es möglich, von der Überwachungssohle ausgehend die zeitliche Entwicklung geotechnischer Barrieren hinsichtlich ihrer hydraulischen Leistungsfähigkeit zu überprüfen. Damit könnte bei entsprechender konstruktiver Ausgestaltung ein direkter Beleg auch für den hydraulische wirksamen Verschluss des Tiefenlagers vor seiner Überführung in ein Endlager zur Stärkung des Vertrauens der Zivilgesellschaft in die Zuverlässigkeit der Planungs- und Ausführungsarbeiten der dafür verantwortlichen Institutionen geschaffen werden.

Hervorzuheben ist abschließend, dass mit der hier vorgelegten Publikation Möglichkeiten aufgezeigt werden sollen, wie der schwierige Kompromiss zwischen der Gewährleistung einer möglichst frühzeitigen und umfassenden passiven Sicherheit auf der einen Seite und der Schaffung von reversibilitätsgerichteten Handlungsoptionen und Vertrauen in die Zuverlässigkeit der technischen Planung und Ausführung auf der anderen Seite konzeptionell und konfigurativ ausgestaltet werden könnte. Letztendlich haben hierüber nachfolgende Generationen zu entscheiden. Allerdings sollten die grundsätzlichen Möglichkeiten bedacht und analysiert sowie über ein entsprechend ausgestaltetes Standortauswahlverfahren auch vorgehalten werden.

Teil I: Endlagerforschung zwischen den Anforderungen nach technischer Sicherheit und sozialer Gerechtigkeit

1 Es ist so wie es ist – muss es auch so bleiben?

Seit mehr als 50 Jahren wird in Deutschland Endlagerforschung betrieben. Vor nunmehr schon 39 Jahren ist der Salzstock *Gorleben* von der *Niedersächsischen Landesregierung* als Standort für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle benannt und daraufhin erkundet worden – zunächst von Übertage und dann nachfolgend durch Auffahrung eines Erkundungsbergwerkes oberhalb des für später

vorgesehenen Ablagerungsbereichs auch von Untertage erkundet worden. Die Erkundungsarbeiten sind seit dem Jahr 2012 eingestellt worden. Das Erkundungsbergwerk wird derzeit rückgebaut und ohne weitere Aktivitäten in einem rudimentären Umfang offengehalten. Unabhängig von Standpunkten einzelner Akteure im Endlagerdiskurs sind im Lauf der vergangenen Jahrzehnte Fakten geschaffen worden, die die heutige Situation charakterisieren: keine umfassende Standorterkundung unter Beteiligung der Öffentlichkeit, umfangreiche theoretisch orientierte Forschungsarbeiten, kein Untertagelabor in Deutschland, Planung einer wirtschafts-unabhängigen Standortauswahl, Überprüfung von Optionen zum weiteren Umgang mit den radioaktiven Abfällen neben der Endlagerung mit sofortigen Verschluss des Endlagers, Hinausschieben von Entscheidungen, reduziertes Vertrauen in die Kompetenz verantwortlicher staatlicher Institutionen, geringe Akzeptanz für ein Endlager in der jeweilig eigenen Region und damit eigentlich nirgendwo in Deutschland, *BMU (2010)*.

Damit stellt sich die Frage nach den Bedingungen, unter denen ein gesellschaftlicher konsensualer Neubeginn im Hinblick auf die Entsorgung radioaktiver Abfälle gelingen kann. Erste Schritte sind mittlerweile erfolgt mit der Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes im Jahr 2013, der nachfolgenden Überprüfung durch die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (auch verkürzt Endlagerkommission genannt), der im Juni 2016 beschlossenen Neustrukturierung der für die Endlagerung zuständigen Institutionen mit einer Trennung von Zuständigkeiten (Regulator, Operator, Genehmigungsbehörde) sowie der Vorlage des Kommissionsberichtes im Juli 2016. Die Überarbeitung des Standortauswahlgesetzes vor dem Hintergrund der Kommissionsempfehlungen ist bis Frühjahr 2017 vorgesehen. Ob diese Rahmenbedingungen dann hinreichend sind oder ob noch weitere Voraussetzungen vorliegen sollten, um ein Standortauswahlverfahren in Deutschland in den nächsten Jahren einvernehmlich beginnen zu können, und welche Möglichkeiten bestehen, die Akzeptabilität zu verbessern, soll Gegenstand der nachstehenden Ausführungen sein.

Eines scheint allerdings weitgehend Konsens zu sein: es ist nicht mehr hinreichend wie vielleicht früher, in einem einfachen Verfahren

einen als geeignet eingeschätzten Standort zu identifizieren und diesen dann im Hinblick auf seine Eignung detailliert zu untersuchen. Vielmehr soll nunmehr im Grundsatz dem Ansatz des *AkEnd (2002)* folgend und heutigen Anforderungen gemäß Standortauswahlgesetz und Kommissionsbericht entsprechend in einem transparenten und fairen sowie mit aktiver Beteiligung der Öffentlichkeit ausgestatteten, vor Beginn hinsichtlich Methodik, Kriterien und Bewertungsmaßstäben festgelegten und primär an der Gewährleistung der angesetzten Sicherheitskriterien orientierten Verfahren der die bestmögliche Sicherheit bietende Standort innerhalb der deutschen Staatsgrenzen identifiziert werden – ohne wie auch immer begründete räumliche Vorfestlegung. Verfahren, Kriterien und Bewertungsmaßstäbe sollen von Experten vorgeschlagen, öffentlich diskutiert und vom Gesetzgeber verbindlich beschlossen werden. Standortauswahlgesetz und Kommissionsbericht in Verbindung mit dem noch anstehenden Parlamentsbeschluss sind hierzu grundlegend. Sicherheit, Gerechtigkeit und Reversibilität sind die zentralen Fundamente des neuen Verfahrens zur Standortauswahl.

2 Von den Anfängen zu einem Neubeginn

2.1 Einige historische Wegmarken

Untersuchungen zur Endlagerung radioaktiver Wärme entwickelnder Abfälle erfolgen in Deutschland seit Jahren, zunächst auf das Salzgebirge als Wirtsgestein fokussiert und mehr theoretisch und laborativ orientiert, später dann auch in einem Untertagelabor in der Schachanlage *Asse II* im Salzgebirge in Form von großmaßstäblichen Felduntersuchungen. Diese Feldversuche in der Schachanlage *Asse II* sind allerdings 1978 bzw. Mitte der neunziger Jahre beendet worden. Parallel dazu ist relativ frühzeitig der Salzstock *Gorleben* als möglicher Standort für ein Endlager festgelegt und seit 1986 auf seine Eignung hin untersucht worden. Aufgrund erheblicher zivilgesellschaftlicher Widerstände gegen die Errichtung eines Endlagers am Standort *Gorleben* und gravierender gesellschaftspolitischer Veränderungen wurden vom seinerzeitigen Bundesumweltminister im Jahr 1998 der *Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)* gegründet und mit der Aufgabe

betrachtet, ein wirtsgesteinsunabhängiges Standortauswahlverfahren für ein Endlager für hochaktive Wärme entwickelnde Abfälle zu entwickeln. Dieser Auftrag wurde dann später noch dahingehend erweitert, das Verfahren so auszugestalten, das ein Standort für die Endlagerung aller Arten von radioaktiven Abfällen identifiziert werden kann (Ein-Endlager-Konzept). Zentrale Grundlagen für die Verfahrensentwicklung waren die Gewährleistung der Sicherheit gegenüber ionisierender Strahlung für Mensch und Umwelt über einen Zeitraum von 1 Million Jahren und die angemessene Beteiligung der Zivilgesellschaft an diesem Prozess schon während der Verfahrensentwicklung und dann später bei der Verfahrensanwendung. Stichworte waren hier wissenschaftsbasiertes und sicherheitsgerichtetes gestuftes Verfahren, weiße Deutschlandkarte, passiv ausgestaltete Gewährleistung der Sicherheit des Endlagers durch eine für den vorgegebenen Zeitraum wirksame geologische Barriere in Verbindung mit geotechnischen Barrieren zum dauerhaft wirksamen Verschluss der Zugangsstrecken und Zugangsschächte zum Endlager.

Aufgrund der politischen Entwicklung wurde der vom *AkEnd* erarbeitete und im Jahr 2002 vorgelegte Verfahrensvorschlag trotz der breiten Anerkennung in Fachkreisen und bei Stakeholdern legislativ jedoch nicht umgesetzt.

Stattdessen sind in den Jahren von 2000 bis 2010 während eines zehnjährigen Moratoriums Zweifelsfragen an der Eignung des in dieser Zeit mit einem Erkundungsstopp belegten Standortes Gorleben bearbeitet worden. Danach sind die Erkundungsarbeiten bis zum Jahr 2012 fortgeführt worden. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang vielleicht mit Blick auf spätere Ausführungen zur konfigurativen Ausgestaltung einer Entsorgungsanlage, dass diese Erkundungsarbeiten in einem speziell angelegten Erkundungsbergwerk in Teufe 840 m erfolgten, während für das eigentliche Endlager eine Teufe von 880 m geplant war, also grundsätzlich das geplante Entsorgungsbergwerk aus zwei Sohlen mit Erkundungs- und Einlagerungssohle besteht.

2.2 Gegenwärtige Aktionen

Ein weiterer Meilenstein auf dem Weg zu einem Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in Deutschland sind die vom *BMU* im Jahr 2010 veröffentlichten Sicherheitsanforderungen an

die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle, *BMU* (2010).

Mit diesem gesetzlichen Regelwerk werden bezüglich der Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle die im Jahr 1983 im Bundesanzeiger bekannt gemachten Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk ersetzt. Im Vordergrund steht dabei dem Ansatz des *AkEnd* folgend der wirtsgesteinsunabhängig formulierte Nachweis der Sicherheit eines Endlagers, das an einem nach einem Standortauswahlverfahren identifizierten Standort geplant wird. Dabei ist anzumerken, dass sich diese Sicherheitsanforderungen indirekt auch auf die Standortauswahl auswirken, da nur solche Standorte grundsätzlich in Betracht kommen, die erwarten lassen, dass sie bei Implementierung eines Endlagers den gesetzlich vorgegebenen Sicherheitsanforderungen genügen werden. Überprüft wird die Einhaltung dieser Vorgabe durch die in ein gestuftes Standortauswahlverfahren grundsätzlich integrierten und entsprechend dem Verfahrensfortschritt mit zunehmend vertieften Kenntnissen durchgeführten Sicherheitsanalysen. Zentrale sicherheitliche Elemente der grundlegenden Konzeption sind geologische und geotechnische Barrieren in Verbindung mit einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Neu ist bei den *BMU*-Sicherheitsanforderungen in Fortsetzung des *AkEnd*-Gedankens auf jeden Fall die Einführung dieses einschlusswirksamen Gebirgsbereiches, der das Endlagerbergwerk und einen Teil der geologischen Barriere umfasst und durch den der nunmehr geforderte explizite Nachweis des Einschlusses der radioaktiven Abfälle im geologischen Milieu operationalisiert wird. Damit wird erstmals über einen Sicherheitsnachweis ein expliziter Beleg für die langfristig sichere Funktionalität eines Endlagers gefordert (Erhalt der Integrität der geologischen Barriere auch unter Endlagereinwirkungen, hinreichende hydraulische Leistungsfähigkeit der geotechnischen Barrieren). Zuvor war in den Richtlinien des *BMI* aus dem Jahr 1983 gefordert worden darzulegen, dass bei Freisetzung von Radionukliden aus einem Endlager im Salzgebirge auf der Grundlage der Strahlenschutzverordnung keine unzulässige Freisetzung erfolgt, festgelegte Grenzwerte in der Biosphäre also eingehalten werden. Diese unterschiedliche Fokussierung in der Führung des Langzeitsicherheitsnachweises mag sicherheitsbezogen

minimal erscheinen. Fachlich bedeutet sie jedoch einen gravierenden Paradigmenwechsel: war zuvor jahrzehntelang der Forschungsschwerpunkt auf die Identifizierung von potentiellen Freisetzungspfaden und die Modellierung/Simulation von Freisetzungsprozessen ausgerichtet (Stichwort: Laugenszenario und Anhydritszenario), so hat sich seither der Blickwinkel auch auf das thermomechanische und fluiddynamische Verhalten des verschlossenen und funktionstüchtigen Endlagers im Wirtsgestein Salinargebirge und im Wirtsgestein Tonsteingebirge ausgerichtet. Damit wird ein expliziter Beleg der über den Einschluss realisierten Endlagersystemsicherheit gefordert und nicht primär der Beleg einer nur begrenzten und tolerierbaren Radionuklidfreisetzung. Hier wird nunmehr in neuerer Zeit zur auch verbalen Differenzierung beider Ansätze von einem vollständigen Einschluss und von einem sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle im tiefen geologischen Untergrund gesprochen.

Ursprung für diesen Paradigmenwechsel ist übrigens ein vom *BMU* initiiertes Fachgespräch, das Mitte der neunziger Jahre in Bad Dürkheim stattgefunden hat und bei dem es auch um die Frage ging, warum in Deutschland mehrere Untertagedeponien für chemotoxische Abfälle im Salzgebirge genehmigt sind und offensichtlich öffentliche Akzeptanz finden, während die Frage der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Salzgebirge auf erhebliche Bedenken bis hin zu nachhaltigen Widerständen in der Öffentlichkeit stieß. Als ein Grund wurde gesehen, dass für die Untertagedeponien in der damals gültigen Technischen Anleitung Abfall aus dem Jahr 1991 für die Beseitigung chemotoxischer Abfälle schon der vollständige Einschluss im Salinargebirge gefordert war und damit einem geomechanisch fokussierten Sicherheitsnachweis Priorität gegeben wurde, während sich die Sicherheitsanalysen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle vor dem Hintergrund der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk des *BMI* aus dem Jahr 1983 auf Freisetzungsszenarien konzentriert hatten, *BMI* (1983).

Ein zentrales Element eines Langzeitsicherheitsnachweises ist damit heute nunmehr der explizit geführte Nachweis von Existenz und Erhalt einer intakten geologischen Barriere, räumlich fokussiert auf einen

sogenannten einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) innerhalb des geologischen Barrieregebirges, der das Endlagerbergwerk in angemessener Ausdehnung umgibt. Das Endlagerbergwerk selbst ist in seiner konfigurativen Ausgestaltung nicht präjudiziert. Für den Barrierenintegritätsnachweis zentrale Komponenten sind in Konsequenz zu diesem Ansatz entsprechend der Verordnung des *BMU (2010)* zwei Kriterien: das Dilatanzkriterium und das Fluiddruckkriterium, wobei beide Kriterien unabhängig voneinander erfüllt sein müssen. Damit ist tatsächlich heute der thermomechanisch basierte, die fluiddynamischen Prozesse im verschlossenen Endlager einschließende Sicherheitsnachweis in der Nachweishierarchie mindestens auf Augenhöhe mit dem fluiddynamisch basierten, aber auf potentielle Freisetzungen fokussierten Sicherheitsnachweis gelangt. Primär explizit zu belegen ist somit die Funktionstüchtigkeit und damit die Sicherheit des Endlagers hinsichtlich Einschluss der Radionuklide im geologischen Untergrund, nicht das tolerable Versagen geologischer Formationen mit begrenzter Freisetzung.

Parallel zur Erarbeitung der *BMU-Sicherheitsanforderungen (2010)* ist bereits im Sommer 2010 eine großräumig angelegte Forschungsarbeit unter dem Titel „Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben“ begonnen worden, die nach *GRS (2016)* in ihrer ursprünglichen Konzeption im Wesentlichen die folgenden drei Ziele hatte:

- Erarbeitung einer systematischen Zusammenfassung des Kenntnisstands zu Gorleben,
- Erarbeitung einer vorläufigen Eignungsprognose basierend auf dem zusammengefassten Kenntnisstand, wobei diese Prognose die Frage beantworten sollte, ob und ggf. unter welchen Voraussetzungen am Standort Gorleben ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle betrieben werden könnte unter Berücksichtigung der Tatsache, dass eine endgültige Eignungsaussage nur nach einer vollständigen untertägigen Erkundung möglich ist, die in Gorleben nicht gegeben ist, und
- Identifizierung des noch bestehenden Bedarfs an Forschung und Entwicklung, also der standortspezifischen und standortunabhängigen Fragestellungen, die noch geklärt werden müssen.

Aufgrund politischer Veränderungen mit der Chance, ein neues Gesetz für ein Standortauswahlverfahren auf breiter parlamentarischer Ebene zu verabschieden, sind die Bearbeitungsziele dann später modifiziert worden, da nach *GRS (2016)* nunmehr der Standort eines zukünftigen Endlagers für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle durch einen Vergleich verschiedener Standorte im Rahmen eines mehrstufigen Auswahlverfahrens gefunden werden soll. Zwar blieben die systematische Zusammenfassung des bisherigen Kenntnisstands zu Gorleben und die Identifizierung des zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs weiterhin Ziele der VSG. Da allerdings die Kriterien für den Vergleich verschiedener Standorte derzeit noch erarbeitet werden, konnte eine vorläufige Prognose einer vergleichsbasierten Eignung für den Standort Gorleben im Rahmen der VSG nicht erarbeitet werden. Es ist stattdessen geprüft worden, ob die im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte im Verbund mit der geologischen Barriere am Standort Gorleben oder einem hinsichtlich der geologischen Situation vergleichbaren Salzstandort aus heutiger Sicht geeignet erscheinen, die Sicherheitsanforderungen nach *BMU (2010)* zu erfüllen. Ergänzt wurden die bisherigen Projektziele um eine Untersuchung der Frage, welche methodischen Ansätze der VSG in einem zukünftigen Standortauswahlverfahren sinnvoll zum Vergleich von Endlagerstandorten eingesetzt werden können. Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung des zukünftigen Standortauswahlverfahrens ist nach *GRS (2016)* bereits heute absehbar, dass es im Verlauf eines solchen Verfahrens immer wieder erforderlich sein wird, den bis zu einem bestimmten Verfahrensschritt erreichten Wissensstand zu den einzelnen Standorten systematisch zusammenzufassen und zu bewerten. Außerdem sollte nach *GRS (2016)* über die ursprünglichen Zielsetzungen hinaus untersucht werden, welche der in der VSG entwickelten technischen Konzepte zur Einlagerung der radioaktiven Abfälle und zum Verschluss des Endlagerbergwerks übertragbar auf Endlager-systeme an Standorten mit anderen geologischen Gegebenheiten sind.

Im Zusammenhang mit dieser Veränderung der politischen Schwerpunktsetzung begann auch das finale Kapitel zum Ende der Erkundungsarbeiten am Standort Gorleben

außerhalb des neuen Standortauswahlverfahrens.

Angesichts der Notwendigkeit, auch praktische Fortschritte auf dem Weg zu einem Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle zu erzielen, hat sich die Mehrheit der im Bundestag vertretenen politischen Parteien darauf verständigt, einen zweiten Anlauf zur Standortsuche für ein Endlager zu unternehmen und im Jahr 2013 den Entwurf für ein Standortauswahlgesetz vorgelegt, *StandAG (2013)*. Dieser Entwurf geht wie schon beim *AkEnd* wieder von einer sogenannten „weißen Deutschlandkarte“ aus und regelt in groben Umrissen das fachtechnisch geprägte, grundsätzlich sicherheitsorientierte Auswahlverfahren und die zugehörige Öffentlichkeitsbeteiligung. Da mit diesem Neuanfang eine Vertiefung von weiteren Erkenntnissen am Standort Gorleben durch Fortführung der Erkundungsarbeiten als nicht unbedingt widerspruchsfrei angesehen wurde, ist die Erkundung im Jahr 2012 eingestellt worden – es sei denn, der Standort *Gorleben* erweist sich in dem zukünftigen Standortauswahlverfahren, das als gestuftes, kriteriengesteuertes und raumbegrenztes Verfahren konzipiert ist, als ein für eine vergleichende untertägige Erkundung auch prädestinierter Standort in Deutschland.

Bis vor kurzem ist als Vorphase des Standortauswahlverfahrens das Standortauswahlgesetz aus dem Jahr 2013 durch die Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ unter Mitwirkung von Experten und Politikern einer Überprüfung unterzogen worden, sowohl bezüglich sicherheitstechnischer wie auch gesellschaftspolitischer Aspekte. Darüber hinaus sind aber auch Empfehlungen hinsichtlich Auswahlkriterien und Bewertungsmaßstäben erarbeitet worden. Grundlage hierzu war das vom *AkEnd* entwickelten Verfahren aus dem Jahr 2002. Mitte 2016 ist das Überprüfungsverfahren mit Übergabe eines Kommissionsberichtes abgeschlossen worden. In Folge soll dann das Standortauswahlgesetz überarbeitet werden und der Deutsche Bundestag endgültig entscheiden. Weiterhin festgelegt ist inzwischen, wie die zukünftige institutionelle Struktur aussehen wird (Regulator *Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit BfE*, Operator *Bundesgesellschaft für Endlagerung BGE*, Genehmigungsbehörde auf Bundesebene *BfE* bzw. bestehende Projekte noch fortführend auf jeweiliger

Landesebene). Offen ist noch, wann und nach welchen vorbereitenden Aktivitäten der Standortauswahlprozess nach dem Bundestagsbeschluss mit der Phase 1 fortgeführt werden soll.

Eine Übersicht zum derzeitigen Stand der gesellschaftspolitischen Diskussionen zum Abwägungsprozess zwischen Sicherheit und Gerechtigkeit und der derzeitigen Überlegungen zu den technischen Möglichkeiten sowie den Ansätzen zur Demonstration der Langzeitsicherheit für die Entsorgung Wärme entwickelnder hochradioaktiver Abfälle ist bei Röhlig (2016) und Röhlig (2010) zu finden.

2.3 Ein wagemutiger Blick in die Zukunft – Akzeptabilität als Voraussetzung für Akzeptanz – Weiterentwicklung der Endlagerkonzeption in eine HAW-Entsorgungsanlagenkonzeption

In der auf die Vorphase folgenden Phase 1 des Standortauswahlverfahrens sind auf der Grundlage von vorhandenen Kenntnissen die potentiell geeigneten Standortgebiete zu identifizieren. Hierzu sind schon umfangreiche und auch publizierte Vorarbeiten geleistet worden. Die entsprechend *StandAG (2013)* danach dann in Phase 2 und Phase 3 des Auswahlverfahrens zur Erarbeitung weiterer standortgebietspezifischer Erkenntnisse durchzuführenden Felduntersuchungen zur Datenbeschaffung werden aus Sicht der Autoren ohne die Erfüllung von zwei als wesentlich erachteten Voraussetzungen vor Ort eher nicht auf Akzeptanz, vielleicht nicht einmal auf Tolerierung stoßen:

- (1) Längerfristige Vorbereitung der breiten Öffentlichkeit und insbesondere der jeweilig betroffenen Standortgebietsöffentlichkeit auf diese Erkundungsmaßnahmen mit zunächst dem Ziel, zumindest die Erkundung zu tolerieren und dann weiter mit dem Ziel, die Sorge zu nehmen, bei Tolerierung im Verlauf des weiteren Verfahrens Gefahr zu laufen, final den als bestmöglich identifizierten Standort hinnehmen zu müssen und somit in eine Verliererposition zu fallen.
- (2) Implementierung einer Möglichkeit zur längerfristigen zuverlässigen Überwachung der Entsorgungsanlage auch noch nach Verschluss und auch unter Beteiligung von Vertretern der Zivilgesellschaft, um zumindest für die Anfangszeit nach Ende der Einlagerungsphase eine Überprüfung des Anlagenverhaltens vorsehen zu

können und bei nicht erwartetem und langzeitsicherheitsbedenklichem Verhalten Maßnahmen zur Rückholung der Abfälle einleiten zu können. Zu prüfen ist, ob und in welchem Maße diese vertrauensbildende und akzeptabilitätsfördernde Maßnahme Auswirkungen auf den untertägigen Raumbedarf und damit das Standortauswahlverfahren hat.

Im Rahmen des transdisziplinär angelegten und in *ENTRIA (2012)* näher beschriebenen Forschungsprojektes *ENTRIA* wird gemeinsam von den Teilprojekten VP 6.1-6.4 und VP 6.7mod die Möglichkeit eines auch über die Einlagerungsphase hinausreichenden Monitorings untersucht – einerseits aus geotechnischer Sicht, andererseits aus Sicht der Gewährleistung der Langzeitsicherheit. Vorgeschlagen wird zum längerfristigen Monitoring die zusätzliche Implementierung einer Überwachungssohle in das Entsorgungsbergwerk zusätzlich zu der Einlagerungssohle. Die Teilprojekte VP 6.1-6.4 befassen sich mit der konfigurativen, geotechnischen und messtechnischen Ausgestaltung des nunmehr als Tiefenlager bezeichneten Endlagers während der um die Monitoringphase erweiterten Betriebsphase, wohingegen das Teilprojekt VP 6.7mod eine eigene konfigurative Ausgestaltung des Tiefenlagers vorzieht und auf die Analyse des längerfristigen, insbesondere fluiddynamisch fokussierten Systemverhaltens des nunmehr zweisöchigen Entsorgungsbergwerks nach Verschluss der Einlagerungssohle bei noch weiter offen gehaltener Überwachungssohle ausgerichtet ist. Dabei stehen die thermisch-hydraulisch-mechanisch geprägten Wechselwirkungen zwischen Einlagerungssohle und Überwachungssohle im Vordergrund. Um eine direkte Überwachung der schon mit der Abfalleinlagerung versetzten und anschließend verschlossenen Einlagerungssohle zu ermöglichen, werden hier Bohrlöcher vorgesehen, die von der Überwachungssohle aus bis auf die Einlagerungssohle geteuft sind und in denen die Messgeräte zur Beobachtung des Tiefenlagerverhaltens installiert sind. Dadurch ist die Funktionalität der Messgeräte überprüfbar, Fehlfunktionen sind detektierbar und die Messgeräte sind bei Bedarf erneuerbar. Im Forschungsprojekt BAMBUS, in dem in einem Feldversuch im Forschungsbergwerk Schacht Asse 2 das Tragverhalten versetzter Einlagerungsstrecken untersucht worden ist, ist eine derartige Konzeption im Grundsatz

bereits realisiert worden – hier allerdings nur, um den Versuchsablauf von außerhalb der Versuchsebene zu überwachen, *Bechtold et al. (1999)*.

Da die Implementierung von Monitoringmaßnahmen in die Entsorgungsanlage auch nach Verschluss der Einlagerungssohle je nach konfigurativer Ausgestaltung auch Auswirkungen haben kann auf den Platzbedarf für das Entsorgungsbergwerk (Lagerperimeter) und über den davon abhängigen einschlusswirksamen Gebirgsbereich dann auch auf die Mächtigkeit und laterale Ausdehnung der geologischen Barriere, sind entsprechende Untersuchungen zur konfigurativen Ausgestaltung eines HAW-Entsorgungsbergwerkes mit Monitoringmöglichkeit nach Verschluss der Einlagerungssohle zumindest orientierend bzw. generisch vor Beginn des Standortauswahlverfahrens vorzunehmen. Kritische Anmerkungen zu einem derartigen konzeptionell und konfigurativ erweiterten Ansatz könnten aus der Besorgnis resultieren, dass durch zusätzliche Auffahrungen im Barrierengebirge bzw. innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches die Wirksamkeit der geologischen Barriere zusätzlich und mehr als unbedingt erforderlich geschädigt wird. Dem ist entgegenzuhalten, dass die räumliche Ausdehnung eines HAW-Entsorgungsbergwerkes im Ablagerungs- und Infrastrukturbereich durch Abfallmenge, Wärmeerzeugung und Sicherheitskonzept dominiert wird und somit ebenso wenig wie die räumliche Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches von vornherein determiniert ist, sondern Planungsrahmenbedingungen unterliegt.

Es besteht damit die Anforderung und somit auch die Aufgabe, für die jeweilig von Politik und Gesellschaft vorgegebenen Rahmenbedingungen einen sicherheitsbasiert bestmöglichen Standort zu identifizieren. Rahmenbedingungen sind hier unter dem Stichwort Fehlerkorrektur Reversibilität, Rückholung und Bergbarkeit. Sollte in diesem Rahmen zur Dokumentation des planmäßigen Anlagenverhaltens ein längerfristiges und aussagekräftiges Monitoring der HAW-Entsorgungsanlage auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle entsprechend Kommissionsbericht auch gesetzlich gefordert werden als vertrauensbildende Maßnahme, dann ist auch diese gesellschaftlich begründete Anforderung zunächst in die konfigurative Ausgestaltung der Entsorgungsanlage und entsprechend dem erforderlichen untertägigen Raumbedarf in die

Ausgestaltung des Standortauswahlverfahrens zu implementieren – es sei denn, Untersuchungen zeigen bereits heute, dass durch die zusätzlichen Eingriffe unangemessen große Nachteile für die Gewährleistung der Betriebs- oder Langzeitsicherheit erwachsen. Ob zukünftige Generationen von dieser Möglichkeit eines erweiterten Monitorings über die Einlagerungsphase hinaus dann tatsächlich auch Gebrauch machen werden, bleibt den Entscheidungen zukünftiger Generationen überlassen. Die heutige Generation sollte allerdings Handlungsmöglichkeiten zukünftiger Generationen in sicherheitsrelevanten Fragen nicht ohne stichhaltige Begründung hinten anstellen, sondern ihnen ohne signifikanten Verlust an technischer und ökologischer Sicherheit einen möglichst großen Entscheidungsrahmen ermöglichen. Durch eine Monitoringspekte nicht beachtende Standortauswahl könnten Entscheidungsräume schon frühzeitig und später nicht mehr revidierbar reduziert werden. Damit wird deutlich, dass im Rahmen des Standortauswahlverfahrens durch seine prozedurale Ausgestaltung ein Kompromiss zwischen der Gewährleistung bestmöglicher technischer Sicherheit und der Gewährleistung größtmöglicher gesellschaftlicher Gerechtigkeit gefunden werden muss. Gerade bei der generationenübergreifenden Gewährleistung gesellschaftlicher Gerechtigkeit sind vielfältige Aspekte zu bedenken und abzuwägen. Reversibilität des Prozesses und zeitnahe passive Sicherheit, Handlungsfreiheit und Sorgenfreiheit, sozioökonomische Prognosefähigkeit, langfristiger Kompetenzerhalt und stetige Beteiligungsbereitschaft sind angesichts einer mehrere Generationen überspannenden Aufgabe nur einige Aspekte in diesem Zusammenhang.

Abbildung 1 zeigt exemplarisch anhand eines stilisierten Simulationsmodells die hier vorgeschlagene Konzeption für eine HAW-Entsorgungsanlage mit Einlagerungs- und Überwachungssohle sowie den Monitoring-Bohrlöchern in Form einer Gesamtansicht einschließlich Schacht in **Abb. 1a** und in Form einer Detailansicht der Einlagerungssohle in **Abb. 1b**. Aufgrund von in das Simulationsmodell implementieren Symmetriebedingungen umfasst der dargestellte Gebirgsraum ein Viertel der Entsorgungsanlage. Infrastrukturbereiche sind derzeit nicht in das Simulationsmodell integriert.

Ergänzend hinzuweisen ist in diesem Zusammenhang auch darauf, dass für das am Standort Gorleben geplante Endlager in einem Salzstock aus Gründen der Vorerkundung und auch der Betriebstechnik eine Erkundungssohle 40 m oberhalb der Einlagerungssohle vorgesehen worden und im Rahmen der bisherigen Erkundung auch zum Teil schon aufgeföhren worden ist (Erkundungsbergwerk mit Erkundungssohle in Teufe 840 m, geplante Einlagerungssohle in Teufe 880 m). Damit ist der mitunter geäußerte Vorhalt der mit Blick auf die Langzeitsicherheit eigentlich schädlichen zusätzlichen Barrierenperforation und damit Barrierenschwächung durch die Anordnung einer zusätzlichen Monitoringsohle im Grundsatz bereits hinfällig, da sowohl das Erfordernis einer hinreichenden Erkundung der Lagerstätte wie auch das Bedürfnis nach einer hinreichenden Überwachung des Anlagenverhaltens als gleichwertig anzusehen sind. Allerdings wird bei der bestehenden Konzeption die Erkundungssohle spätestens mit der Einstellung des Endlagerbetriebes verfüllt und verschlossen und nicht darüber hinaus noch offengehalten.

Zudem werden auch keine Bohr- löcher von der Erkundungssohle in die Einlagerungssohle geteuft. An der Tatsache der grundsätzlichen zusätzlichen Barrierenperforation durch die Aufföhrung und Offenhaltung einer Erkundungssohle ändern diese Sach- verhalte allerdings nichts. Anzu- merken ist, dass in der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben diese Erkundungssohle zwar angesprochen, in ihrer Wechselwirkung mit der Einlagerungssohle und in ihren Aus- wirkungen auf die Langzeitsicherheit aber dann zumindest hinsichtlich des fluiddynamischen Systemverhaltens nicht näher betrachtet worden ist, VSG (2012).

3 Das transdisziplinäre Forschungsprojekt ENTRIA

Im Rahmen des zuvor schon angesprochenen transdisziplinären Forschungsprojektes ENTRIA werden unterschiedliche Entsorgungsoptionen in einem engen Verbund verschiedener Wissenschaftsdisziplinen sowohl aus wissenschaftlich-technischer wie auch aus gesellschafts- wissenschaftlicher Sicht analysiert. Gewährleistung von technischer und ökologischer Sicherheit, aber auch Schaffung von Akzeptabilität und Vertrauen sind dabei zentrale Aspekte. Damit ist dieses schon vor der Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes begonnene Forschungs- projekt genau auf die in diesem Rahmen zukünftig bedeutsamen Sachverhalte fokussiert – Sicherheit einerseits, Gerechtigkeit andererseits. In einem von den ENTRIA-Beteiligten schon zu Beginn der Vorhabensbearbeitung verfassten Memorandum sind die mit der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle verbundenen fachlichen und zivilgesellschaftlichen

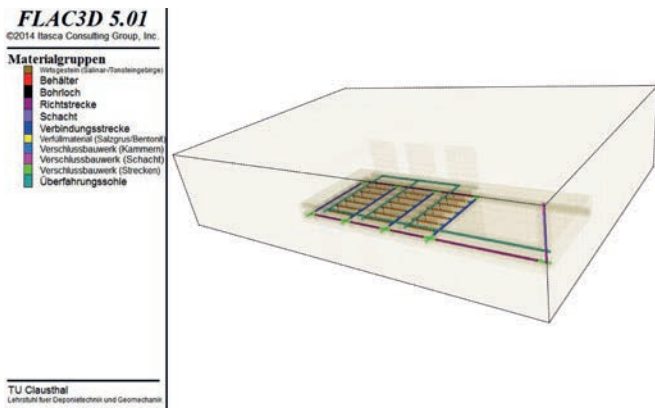


Abb. 1a. HAW-Entsorgungsanlagenkonzeption mit Einlagerungs- und Überwachungssohle sowie Monitoringbohrlöchern zur direkten Überwachung / Gesamtansicht.

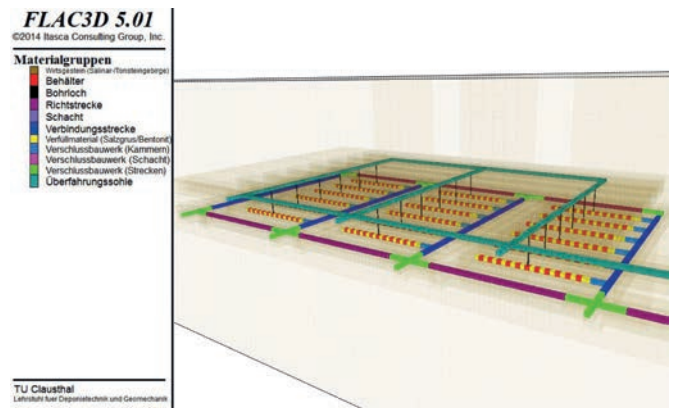


Abb. 1b. HAW-Entsorgungsanlagenkonzeption mit Einlagerungs- und Überwachungssohle sowie Monitoringbohrlöchern zur direkten Überwachung / Detailansicht.

Ansprüche, Vorbehalte und insbesondere Spannungsfelder thematisiert worden, ENTRIA (2014).

Abbildung 2 zeigt in einer schematischen Darstellung die von ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen und ihre Interaktion sowie die daraus folgenden Handlungsräume. Dabei zeichnet sich schon jetzt ab, dass die Option der längerfristigen oberflächennahen Zwischenlagerung nicht nur eine eigenständige Entsorgungsoption ist, sondern aufgrund der Zeiträume, die die Implementierung und Umsetzung der Tiefenlager- bzw. der Endlageroption schon aus heutiger Sicht erfordern, auch zu einem integralen Bestandteil dieser Optionen werden wird.

Bislang sind in Deutschland vornehmlich aus Sicherheitsgründen (geotechnisch, ökologisch, sozial, ökonomisch) Endlagerkonzeptionen favorisiert und wissenschaftlich-technisch erforscht und beplant worden, die einer geologischen Barriere die zentrale Sicherheitsfunktion im Hinblick auf die Gewährleistung der Langzeitsicherheit zuweisen und einen nachsorgefreien sofortigen Verschluss des Endlagers nach Einstellung des Einlagerungsbetriebes vorsehen, d.h. ohne die gezielte Implementierung von vorsorglich in das Endlagerkonzept integrieren zusätzlichen Maßnahmen, die die Möglichkeit einer längerfristigen Überwachung und eine Reversibilität des Entsorgungsprozesses durch Rückholbarkeit der Abfälle auch nach

Abschluss der Einlagerungsphase vorzieht. Hauptgrund für die bislang präferierte Entsorgungsoption sind neben der möglichst frühzeitigen Gewährleistung passiver Sicherheit durch geologische und geotechnische Barrieren auch die Erschwerung des Zugriffs auf die abgelagerten Abfälle und die Freistellung nachfolgender Generationen von der Verpflichtung zu Aufsicht und Nachsorge, aber auch die Ungewissheiten über die zukünftige Entwicklung sozioökonomischer Systeme. Abbildung 3 zeigt phasenbezogen die zeitliche Entwicklung eines Endlagersystems bei sofortigem Verschluss des Endlagers nach Einstellung des Einlagerungsbetriebes.

Dieser bislang auch im Standortauswahlverfahren des AkEnd (2002) präferierte Entsorgungsweg wird aufgrund der zwischenzeitlich erfolgten gesellschaftspolitischen Entwicklung im Rahmen des Forschungsprojektes ENTRIA nunmehr allerdings nur noch als eine von mehreren möglichen Entsorgungsoptionen untersucht.

Gegenwärtig werden auf Forderungen einer vor dem Hintergrund der bisherigen Erfahrungen auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle eher kritisch-besorgten und bezüglich der Zuverlässigkeit von Prognosen zum Endlagersystemverhalten über die zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit vor ionisierender Strahlung geforderten Betrachtungszeiten von bis zu 1 Million Jahren eher skeptischen Öffentlichkeit auch in Deutschland zunehmend

Überlegungen angestellt, die zwar an dem Konzept einer Entsorgung der HAW-Abfälle in tiefen geologischen Formationen festhalten, aber statt des sofortigen Verschlusses konzeptionell eine Reversibilität des Entsorgungsprozesses auch noch nach Beendigung des Einlagerungsbetriebes vor dem endgültigen Verschluss des Endlagerbergwerkes sowie die Erweiterung der Handlungsmöglichkeiten zukünftiger Generationen bevorzugen. Im Schlussbericht der Endlagerkommission wird in Abschnitt 3.3/ Etappe 4 noch vorerst nur sehr grundsätzlich auch eine Beobachtung des Endlagerverhaltens nach Ende des Einlagerungsbetriebes angesprochen, Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (2016).

Erste Ansätze zur Implementierung derartiger Überlegungen in ein Endlagerkonzept laufen z.B. in der Schweiz darauf hinaus, das dort als geologisches Tiefenlager bezeichnete Endlager nach Ende der Einlagerungsphase durch ein außerhalb des Tiefenlagers eingerichtetes so genanntes Pilotlager in seinen grundsätzlichen Verhalten längerfristig zu überwachen, z.B. Nagra (2014).

Diese Überwachung ist allerdings als nur mittelbar anzusehen, da im Pilotlager zwar standortbezogen die ablaufenden Prozesse repräsentativ beobachtet werden können, nicht aber die tatsächliche Funktionalität des Tiefenlagerbergwerkes und seiner Barrieren im Einlagerungsbereich. Insofern bleibt das Erfordernis der Übertragung von Erkenntnissen aus dem Pilotlager auf das eigentliche Tiefenlager – mit allen damit verbundenen Ungewissheiten, die aus der räumlichen Trennung von Pilotlager und Tiefenlager resultieren (z.B. Existenz nicht detektierter geotektonisch bedingter Schwachstellen, die erst später wirksam werden, möglicherweise technogen im Lauf der Zeit aktiviert).

Aufgrund dieses Nachteils wird hier vorgeschlagen, die Einlagerung der Wärme entwickelnden hoch radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen mit Vorkehrungen zur direkten Überwachung der Einlagerungssole auch noch nach Ende der Einlagerungsphase zu versehen – und zwar einerseits um belegen zu können, dass sich das Tiefenlagersystem zumindest über eine später noch festzulegende, grundsätzlich aber vorab definierte Beobachtungszeit vor dem endgültigen Verschluss tatsächlich auch so wie prognostiziert verhält und um andererseits nachfolgenden Generationen Handlungsräume im

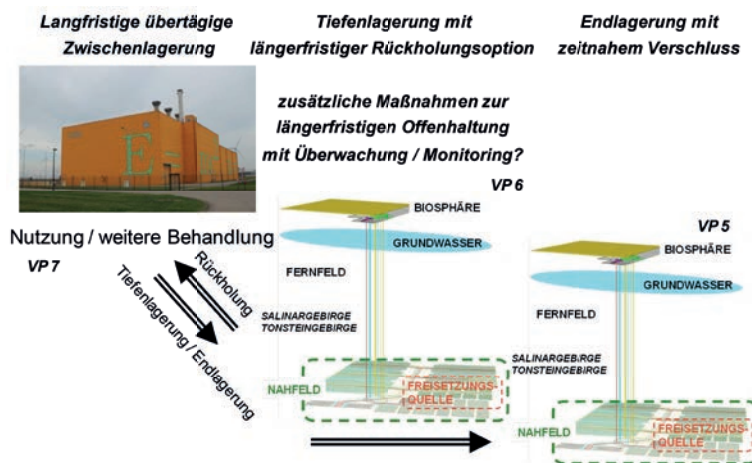


Abb. 2. Überblick über die in ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen.



Abb. 3. Zeitliche Entwicklung eines Endlagersystems bei sofortigem Verschluss des Endlagers nach Einstellung des Einlagerungsbetriebes, in Anlehnung an Blommaert (2010).

Umgang mit den abgelagerten radioaktiven Abfällen zu eröffnen.

Eine derartige Entsorgungsanlagenkonzeption erfordert die Implementierung eines Monitoringsystems, mit dessen Hilfe das Tiefenlagerverhalten unmittelbar und großräumig repräsentativ und geschützt gegen Messfehler und irreparablen Ausfall der Messsensoren überwacht werden kann. Dieses Monitoringsystem muss dann auch die Messdaten liefern, die eine hinreichend zuverlässige Bewertung des Tiefenlagerverhaltens erlauben und die sicherheitsbezogenen die Grundlage schaffen für die weiteren Entscheidungen im Hinblick auf die Notwendigkeit einer Rückholung der Abfälle aus dem Tiefenlager oder auf den endgültigen sicheren Verbleib der Abfälle im Tiefenlager, das mit dieser Entscheidung dann in ein nachsorgefreies Endlager überführt wird. Damit wird die Möglichkeit der Reversibilität auch über die Einlagerungsphase hinaus eröffnet mit gleichzeitiger Überwachung der ersten Jahrzehnte der transienten Phase der Entsorgungsanlage. Wissenschaftliche Arbeiten zur Entwicklung von geeigneten Monitoringsystemen wurden u.a. durchgeführt im international angelegten Verbund-Forschungsprojekt **MoDeRn (Monitoring Development for Safe Repository Operation and Staged Closure)** bzw. werden derzeit durchgeführt in dessen Nachfolgeprojekt **Modern20 (Development & Demonstration of Monitoring Strategies and Technologies for Geological Disposal)**, nicht aber in der hier skizzierten Ausrichtung einer direkten Überwachung, *Mo-DeRn (2016) bzw. MoDeRn20 (2016)*.

Bei einer Entsorgungsanlagenkonzeption mit Implementierung eines direkten Monitoringsystems bestünde für zukünftige Generationen grundsätzlich die Möglichkeit zu entscheiden, die Abfälle auf standortbezogenen validierter Grundlage und mit einem dann auch geringeren Gefährdungspotential doch noch endgültig im Tiefenlager zu entsorgen und dieses dann in ein Endlager zu überführen oder aber die Abfälle mit dem Ziel der Verwertung mit möglicherweise doch erheblichem technischem und finanziellem Aufwand rückzuholen und hinsichtlich des noch verbliebenen Energiepotentials zu nutzen (abgebrannte Brennelemente), mit dem Ziel der Verminderung der Strahlungsintensität zu behandeln (Wiederaufarbeitungsabfälle) oder mit dem Ziel einer Verbesserung der Langzeitsicherheit an

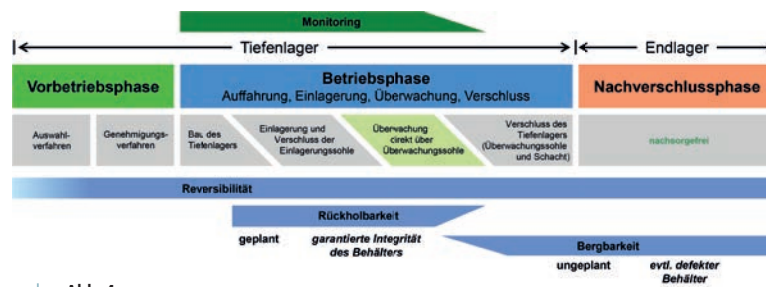


Abb. 4. Zeitliche Entwicklung einer HAW-Entsorgungsanlage mit Berücksichtigung einer langfristigen direkten Monitoringphase vor dem endgültigen Verschluss des Tiefenlagers und der Überführung in ein Endlager, in Anlehnung an *Blommaert (2010)* und *Stahlmann et al. (2015)*.

einem anderen Standort erneut abzulagern. **Abbildung 4** zeigt zentrale Phasen einer HAW-Entsorgungsanlage zunächst während der zeitlichen Entwicklung des Tiefenlagersystems mit Berücksichtigung einer Monitoringphase vor dem endgültigen Verschluss des Tiefenlagers und dann die bei entsprechender Entscheidung finale Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager mit der dann nachsorgefreien Nachverschlussphase.

Vor diesem Hintergrund wird die Einlagerung hoch radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und zur vereinfachten Rückholbarkeit der Abfälle im Rahmen von ENTRIA als eigenständige Entsorgungsoption untersucht – einerseits für die Monitoringphase auch noch nach Ende des Einlagerungsbetriebes und synchroner Rückverfüllung bzw. zeitnahe Verschluss der Einlagerungssohle (erweiterte Rückholbarkeit und damit erweiterte Reversibilität), andererseits für die Nachverschlussphase nach dem endgültigen Verschluss des Tiefenlagerbergwerks und seiner Überführung in ein dann nachsorgefreies Endlager insgesamt durch Versatz der Monitoring-Infrastruktur und Verschluss bzw. Verfüllen der bis dahin auch noch offen gehaltenen Zugangsschachtbereiche. Die nach *BMU (2010)* vorgesehene Bergbarkeit der Abfallbehälter bis 500 Jahre nach Verschluss des Endlagerbergwerks bleibt hiervon unberührt. Als Grundlage für diese Untersuchungen ist im Rahmen des Forschungsvorhabens ENTRIA eine spezifische Entsorgungsanlagenkonzeption angedacht und vertieft worden, *Stahlmann et al. (2015)*, *Lux et al. (2016a)*, *Lux et al. (2016b)* und *Lux et al. (2016c-e)*.

Die Entwicklung eines grundsätzlichen HAW-Entsorgungsanlagenkonzepts mit längerfristiger Überwachung und der Möglichkeit zur Fehlerkorrektur auch noch nach Einlagerung vor endgültigem Verschluss

als alternative Option zu der Entsorgung der radioaktiven Abfälle in einer tiefen geologischen Formation mit sofortigem endgültigem Verschluss des Endlagers nach Ende des Einlagerungsbetriebes bietet im Hinblick auf die Durchführung eines Standortauswahlverfahrens auch die Möglichkeit, die grundsätzliche Akzeptabilität des Konzepts der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen bei der in einigen Jahren in potentiellen Standortregionen von endlagerbezogenen Erkundungsmaßnahmen betroffenen Bevölkerung zu verbessern. Dieses neue Konzept muss daher aber auch gleichzeitig im Grundsatz schon heute in seinen zentralen Komponenten technisch realisierbar sein und zwar ohne bereits anfänglich erkennbare sicherheitstechnisch signifikante Nachteile, z.B. im Hinblick auf den Erhalt der geogen vorliegenden Qualität der geologischen Barriere bzw. der Funktionalität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

Mit Blick auf die weitere Ausgestaltung des Standortauswahlverfahrens ist allerdings auch zu bedenken, dass die erweiterte Möglichkeit zur Reversibilität des Entsorgungsprozesses in tiefen geologischen Formationen auch noch nach Ende der Einlagerungsphase und vor dem endgültigen Verschluss des Tiefenlagers unabhängig von der jeweiligen Motivation wie z.B. Fehlerkorrektur, Offenhaltung von Entscheidungsoptionen für zukünftige Generationen oder Verbesserung der Akzeptabilität für die betroffene Bevölkerung bereits zu Anfang in das Standortauswahlverfahren implementiert sein muss, da das jeweilige Endlagerkonzept Einfluss hat auch auf den untertägigen Raumbedarf für das Entsorgungsanlagenbergwerk. Ein zusätzlicher untertägiger Raumbedarf bei einer Entsorgungsanlagenoption mit implementierter unmittelbarer Überwachung und längerfristiger Reversibilität des Einlagerungsprozesses auch noch über das Ende der Einlagerungsphase und den Verschluss

der Einlagerungsbereiche hinaus kann sich z.B. ergeben aus Temperaturbegrenzungen (Abstände von Grubenbauen), aus der Rückholungstechnik (Auffahrung von zusätzlichen Rückholstrecken) und aus dem Monitoringverfahren (zusätzliche Bergwerkssohle zur Überwachung).

4 Sicherheitsrelevante Prozesse in der HAW-Entsorgungsanlage mit überwachter Tiefenlagerphase und nachsorgefreier Endlagerphase

Während der Betriebs- und insbesondere auch während der Nachbetriebsphase treten innerhalb eines HAW-Entsorgungsbergwerks in tiefen geologischen Formationen sowie im umgebenden Wirtsgestein neben hier nicht weiter betrachteten chemischen und biologischen Prozessen sehr komplexe physikalische Prozesse auf. Die physikalischen Prozesse sind in mechanische (M), thermische (T) und hydraulische (H) Prozesse zu unterscheiden, die miteinander in enger Wechselwirkung stehen und somit aus Sicht der physikalischen Modellierung als zunächst zweiseitig miteinander gekoppelt anzusehen sind. Aus hydraulischer Sicht werden diese Prozesse durch das gleichzeitige Vorhandensein einer Gas- und einer Flüssigphase und damit von zwei Fluidphasen zusätzlich verkompliziert (H2), da die Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Phasen ebenfalls noch im Rahmen der rechnerischen Simulationen der physikalischen Prozesse zu berücksichtigen sind. Damit liegen für die Analyse des Systemverhaltens der HAW-Entsorgungsanlage TH2M-gekoppelte Prozesse vor.

Abbildung 5 zeigt zur Illustration exemplarisch ein Tiefenlager-/Endlagersystem mit insbesondere dem Kompartiment Nahfeld und den durch das Entsorgungsbergwerk im Wirt- und Barrierengebirge induzierten, miteinander in Wechselwirkung stehenden physikochemischen Prozessen. Dabei ist insbesondere die durch die technogenen Eingriffe bedingte Übergangsphase hervorgehoben, die aus den Einwirkungen aus Auffahrung, Wärmeentwicklung, Gasbildung und Versatz resultiert und die geologische Vergangenheit mit der geologischen Zukunft des Standortes verbindet. Diese transiente Phase dauert einige tausend Jahre an und kennzeichnet durch die induzierten Prozesse die Reaktion des Gebirges auf den technogenen Eingriff.

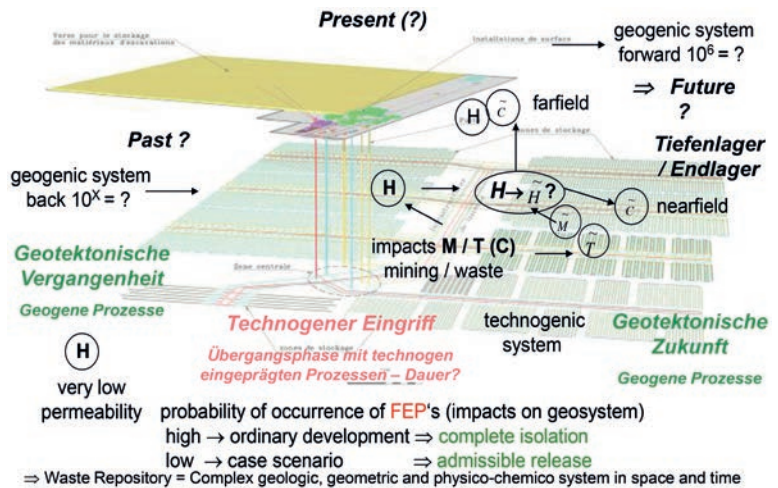


Abb. 5.

TH2M-gekoppelte Prozesse im Nahfeldbereich eines Tiefenlager-/Endlagersystems im Lauf der Zeit mit primärer geogener Phase, transienter technogener Phase und sekundärer geogener Phase.

Die physikalische Modellierung der thermischen Prozesse und damit der Wärmeleitung (= konduktiver Wärmetransport) in unterschiedlichen Wirtsgesteinen und Versatzmaterialien erfolgt mit Hilfe des so genannten *Fourier-Gesetzes*, *Fourier (1822)*. Allerdings sind die dabei relevanten thermischen Materialparameter nicht grundsätzlich als konstant anzusehen, da z.B. die Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus entsprechend *Bechthold et al. (1999)* und *Bechthold et al. (2004)* als eine Funktion der Salzgrusporosität sowie der Temperatur anzusehen ist, während die Wärmeleitfähigkeit von Bentonit nach *Rutqvist & Tsang (2004)* in funktionaler Abhängigkeit von der Flüssigkeitssättigung steht.

Ursache für die Wärmetransportprozesse sind lokale Wärmequellen, die in Form der Abfallbehälter in den dafür vorgesehenen Bergwerkshohlräumen eingelagert werden und die im Rahmen der physikalischen Modellierung der thermischen Prozesse, die in einem Tiefenlager-/Endlagersystem für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle ablaufen, diskret zu berücksichtigen sind.

Analog zur physikalischen Modellierung der Wärmeleitung verhält es sich auch bei der physikalischen Modellierung von Flüssigkeits- und Gasströmungsprozessen. Diese erfolgt üblicherweise mit Hilfe des so genannten *Darcy-Gesetzes* nach *Darcy (1856)*, wobei die Strömungsgleichungen bei gleichzeitigem Vorhandensein von zwei fluiden Phasen für jede Fluidphase einzeln angewendet und über eine Beziehung zwischen Sättigungsgrad und Relativpermeabilitäten sowie eine Beziehung zwischen Sättigungsgrad und Kapillardruck miteinander

verbunden werden. Allerdings sind auch die dabei relevanten Materialparameter nicht konstant, sondern z.B. im Salzgrus abhängig von der Porosität und im Steinsalz abhängig von der schädigungsbedingten Gefügauflockerung sowie vom Spannungszustand.

Während zur physikalischen Modellierung von Wärmeleitungs- sowie Flüssigkeits- und Gasströmungsprozessen abgesehen von den funktionalen Abhängigkeiten der Materialparameter im Grundsatz relativ einheitliche und allgemein anerkannte Modellierungsansätze verwendet werden, stehen zur rechnerischen Modellierung von mechanischen Prozessen eine Vielzahl an physikalischen (thermomechanischen) Modellierungsansätzen zur Verfügung, die sich nicht nur bezogen auf die verschiedenen Wirtsgesteine und Versatzmaterialien gravierend unterscheiden, sondern auch für spezifische Materialien (Salinargestein, Tongestein, Salzgrusversatz, Bentonitversatz) eine große Bandbreite an unterschiedlichen Modellierungsansätzen aufweisen. Exemplarisch ist an dieser Stelle auf die sehr verschiedenartigen Ansätze zur rechnerischen Modellierung des Materialverhaltens von Steinsalz hinzuweisen, von denen einige in *Wolters (2014)* zusammengetragen worden sind. Diese Stoffmodelle für Steinsalz unterscheiden sich einerseits hinsichtlich der Anzahl der berücksichtigten Prozesse (z.B. transiente und stationäre Kriechprozesse oder thermomechanisch bzw. hydromechanisch induzierte Gefügeschädigung sowie deren Rückbildung) und andererseits hinsichtlich der zugrundeliegenden Art des Modellierungsansatzes (z.B.

makroskopisch-rheologische Modellierung, Modellierung auf Basis von Mikrostrukturen oder auf Basis energetischer Überlegungen).

Für Steinsalz wird das am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal entwickelte und in *Wolters (2014)* sowie *Lux et al. (2015)* beschriebene Stoffmodell *Lux/Wolters* verwendet. Das Stoffmodell *Lux/Wolters* ermöglicht von der mechanischen Seite ausgehend die physikalische Modellierung des thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Materialverhaltens von Steinsalz (und bei entsprechender Modifikation auch anderer Gesteine wie Tonstein) und bildet damit die Grundlage für die durchgeführten numerischen Simulationen zu den im Umfeld einer im Salinargebirge errichteten HAW-Entsorgungsanlage ablaufenden komplexen thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Prozessen. Das Stoffmodell *Lux/Wolters* ist modular aufgebaut mit einem (thermo)mechanischem Modul und einem Kopplungsmodul, der die Verbindung herstellt zu dem hydraulischen und dem thermischen Modul. Die unmittelbar mechanische Eigenschaften beeinflussenden thermischen und hydraulischen Einwirkungen sind dabei in den mechanischen Modul integriert.

Im Hinblick auf die mechanischen Prozesse ermöglicht das Stoffmodell *Lux/Wolters* die Modellierung sowohl von zeitunabhängigen linear-elastischen Deformationsprozessen auf der Grundlage des Stoffmodells *Hooke* wie auch von zeitabhängigen viskosen Deformationsprozessen auf der Grundlage eines eigenen Stoffmodells. Bei den viskosen Deformationsprozessen werden transiente, stationäre und akzelerierte Kriechprozesse modelliert, wobei die akzelerierten Deformationsprozesse auf der Entstehung von Gefügeschädigungen beruhen. Nachfolgend kann im versetzten und verschlossenen Tiefen- bzw. Endlager bei entsprechenden geomechanischen Randbedingungen auch eine Rückbildung der Gefügeschädigungen erfolgen (Gebirgskonvergenz, Versatzdruck). Damit ist unter Berücksichtigung von Elementen der Continuum-Damage-Theorie die Modellierung der bei Beanspruchungen oberhalb der Schädigungsgrenze des Steinsalzes auftretenden Ausbildung von Gefügeschädigungen bzw. die Modellierung der bei Beanspruchungen unterhalb der Verheilungsgrenze des Steinsalzes auftretenden Rückbildung von Gefügeschädigungen (plakativ bezeichnet

als Gefügeverheilung), der zugehörigen Dilatanzenwicklung und der damit einhergehenden schädigungs- bzw. verheilungsinduzierten Deformationen möglich. Da diese Schädigungsprozesse auch mit Porositäts- und Permeabilitätsänderungen im konturnahen Barriereengebirge verbunden sind, ergibt sich an dieser Stelle auch die Möglichkeit bzw. Notwendigkeit zur Kopplung thermomechanischer und thermohydraulischer Prozesse.

Zur rechnerischen Modellierung des mechanischen Verhaltens von Salzgrusversatzmaterial hinsichtlich seiner Kriech- und Kompaktionseigenschaften wird das im Simulator *FLAC^{3D}* bereits von der Herstellerfirma *ITASCA* implementierte und in *Itasca (2013)* dokumentierte Stoffmodell *CWIPP* verwendet. Die im Stoffmodell *CWIPP* benötigten Materialkennwerte sind hier nicht ausgehend von laborativen Untersuchungen an Versatzmaterial, sondern im Rahmen einer retrospektiven Analyse des im Salzbergwerk *Asse* durchgeführten *TSDE-Experiments* abgeleitet worden, *Blanco Martín et al. (2016)*.

Auch zur rechnerischen Modellierung des mechanischen Verhaltens von Tongestein steht eine Vielzahl von Stoffmodellen zur Verfügung, wobei im Tongestein die Unterscheidung des elastoplastischen Materialverhaltens einerseits der Matrix und andererseits der Schichtung von besonderer Bedeutung ist, aber auch das Quellvermögen bei Wasserzutritt in die Modellierung einzubeziehen ist. Darüber hinaus sind mit Blick auf zeitabhängige mechanische Prozesse das hydromechanisch geprägte Konsolidierungsverhalten sowie das für einige Tongesteinsarten vorhandene Kriechvermögen nicht zu vernachlässigen. In den bisherigen Untersuchungen lag der Fokus der durchgeführten Simulationen allerdings auf den im Tonsteingebirge im Nahbereich des Tiefenlager- bzw. Endlagerbergwerks ablaufenden thermohydraulischen Prozessen unter besonderer Berücksichtigung von 2-Phasenfluss-Effekten, deren rechnerische Modellierung je nach Größe des Berechnungsmodells schon mit einem relativ großen Aufwand verbunden ist. Aus diesem Grund sind zur Modellierung der mechanischen Prozesse auf Basis von Lokalmodellen bisher nur relativ einfache elastoplastische Stoffmodelle verwendet worden. In einer weiteren Entwicklungsstufe werden die entfestigungsbedingten

Permeabilitätszunahmen in der Auflockerungszone und ihre Rückbildung betrachtet.

In einer HAW-Entsorgungsanlage im Tonsteingebirge ist zum Versatz der verbleibenden Resthohlräume in den Einlagerungskammern und der weiteren Infrastrukturgrubenbau Bentonit vorgesehen. Bentonit reagiert auf einen Wasserzutritt mit einem ausgeprägten Quellverhalten, das bei entsprechender Querdehnungsbehinderung in versetzten Grubenräumen bzw. im Bereich geotechnischer Barrieren zu einem Quelldruckaufbau führt. Bei der rechnerischen Modellierung des Materialverhaltens von Bentonit ist die Berücksichtigung seines Quellvermögens bei Wasserzutritt unverzichtbar, da durch den entstehenden Quelldruck zuvor durch Schädigungsprozesse induzierte Wegsamkeiten im Bereich der Hohlräumkonturen wieder rückgebildet und verschlossen werden können. Als Modellierungsansatz zur Berücksichtigung der im Bentonit auftretenden Quellprozesse wird das *Barcelona Basic Model (BBM)* verwendet, *Alonso et al. (1990)*. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass das Stoffmodell *BBM* eine relativ große Anzahl an Materialparametern enthält, deren hinreichend zuverlässige Messbarkeit im Rahmen von laborativen Untersuchungen mit Blick auf die Prognosezuverlässigkeit des Materialverhaltens von Bentonit noch grundlegend zu analysieren und zu bewerten ist.

Vor dem Hintergrund der Gefährdungen, die die Funktionalität des HAW-Entsorgungsanlagensystems beeinträchtigen können und die einerseits durch die Schädigung der Barrierenintegrität, andererseits durch die bei Vorhandensein oder Zutritt von fluiden Phasen ermöglichte Mobilisierung und Migration von Radionukliden und auch chemotoxischen Schadstoffen charakterisiert sind, werden neben den thermodynamischen Prozessen insbesondere die fluiddynamischen Prozesse untersucht, die innerhalb von Tiefenlager-/Endlagerbergwerken sowie in der umgebenden Wirtsgesteinsformation auftreten, und zwar sowohl für die Wirtsgesteinsformation Salinargebirge wie auch für die Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge. Die durchgeführten Untersuchungen leisten einen Beitrag zur Verbesserung des Systemverständnisses hinsichtlich des langfristigen Systemverhaltens einer HAW-Entsorgungsanlage und damit auch zur Verbesserung der Prognosezuverlässigkeit zum Verhalten

dieser Entsorgungsanlage bzw. zur Erhöhung der Robustheit der zur Bewertung von Entsorgungsanlagen-systemen eingesetzten Sicherheitsfunktionen.

Die fluiddynamischen Prozesse in Entsorgungsanlagen-systemen im Salinar- bzw. Tonsteingebirge sind sehr komplex aufgrund der sie beeinflussenden thermischen, hydraulischen und mechanischen Einwirkungen sowie der Wechselwirkungen zwischen diesen Einwirkungen. Diese Wechselwirkungen ergeben sich z.B. aus

- der Hohlraumkonvergenz und der daraus resultierenden Versatzkompaktion bei veränderlicher Temperatur (→ vornehmlich Wirtsgesteinsformation Salinargebirge, aber auch Tonsteingebirge, sofern dieses ein Kriechverhalten aufweist),
- Quelldruckentwicklung bei Aufsättigung von Bentonitversatzmaterial (→ Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge),
- Schrumpfrissbildung / Entfestigung bei Austrocknung (Entsättigung) von Tongestein bzw. Bentonitversatz,
- einer durch chemische Wechselwirkungen zwischen salinaren Lösungen und Baustoffen bedingten Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit der geotechnischen Barrieren bei ihrer längerfristigen Durchströmung (Korrosion),
- thermisch induzierten Zusatzspannungen in der geologischen Barriere,
- thermisch-mechanisch oder hydraulisch-mechanisch induzierten Gefügauflockerungen sowie deren Rückbildung in der geologischen Barriere,
- Gasbildungsprozessen und dem daraus resultierenden Gasdruckaufbau im Endlagersystem und
- dem Prozess der 2-Phasenströmung als fluiddynamischem Prozess innerhalb des Tiefenlager-/Endlagerbergwerks mit versetzten Strecken und geotechnischen Barrieren (Abdichtungsbauwerken) sowie im umgebenden Nahfeldgebirge der geologischen Barriere ohne/mit einem überprägten hydraulischen Potentialfeld (hydraulischer vertikal bzw. horizontal gerichteter Anfangsgradient).

Die Modellierung der in Tiefenlager-/Endlagersystemen ablaufenden fluiddynamischen Prozesse ist von besonderer Bedeutung bei der Bewertung von unterschiedlichen konzeptionellen Ansätzen, da nach einem Versagen der

Abfallbehälter in Verbindung mit einer Mobilisierung von Radionukliden neben einem diffusiv getragenen Radionuklidtransport auch durch Fluidströmungen innerhalb des Tiefenlager-/Endlagerbergwerks sowie im umgebenden Wirtsgestein ein advektiver Transport von Radionukliden bewirkt werden kann. Als Grundlage für die Ermittlung der im Nahfeld des Entsorgungsbergwerks ablaufenden fluiddynamischen Prozesse ist daher im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse die langzeitige Systementwicklung für wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungsszenarien zu prognostizieren. Für wahrscheinliche Systementwicklungen (wE) ist in diesem Zusammenhang für den Untersuchungszeitraum von 1 Million Jahren der vollständige Einschluss der eingelagerten Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) gefordert. Für weniger wahrscheinliche Entwicklungen (wwE) wäre der vollständige Einschluss der eingelagerten

Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ebenfalls wünschenswert, gefordert ist allerdings lediglich mindestens der sichere Einschluss der eingelagerten Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, d.h. für den Fall eines Austritts von Schadstoffen (radiotoxisch, chemotoxisch) aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in die Biosphäre ist die Einhaltung von schadstoffbezogenen vorgegebenen Grenzwerten nachzuweisen. Zur Veranschaulichung ist dieser Sachverhalt schematisiert in **Abbildung 6** und **Abbildung 7** dargestellt.

Nicht alle Einwirkungen auf die fluiddynamischen Prozesse haben in den beiden Wirtsgesteinsformationen die gleiche Relevanz. Einige ausgewählte Beispiele zur Verdeutlichung der wirtsgesteinspezifischen Relevanz von Einwirkungen auf die fluiddynamischen Prozesse im jeweiligen Entsorgungsanlagen-system sind:

- In einer HAW-Entsorgungsanlage im Salinargebirge steht in der

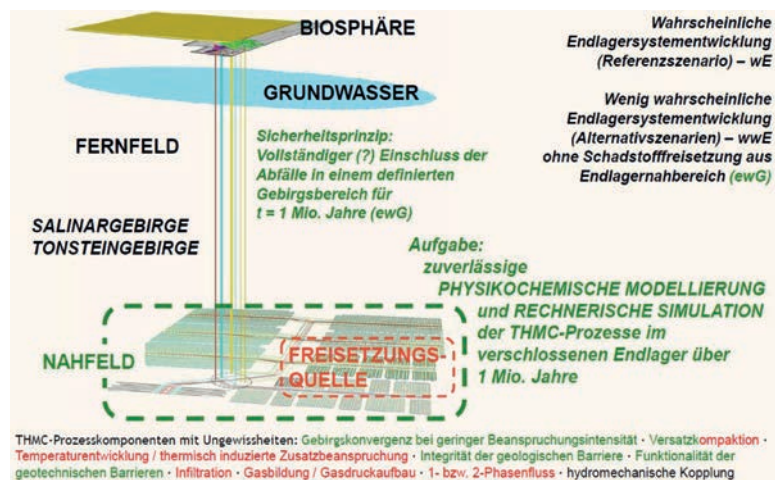


Abb. 6.

Zentrale Aspekte der geologischen Tiefenlagerung / Endlagerung für die wahrscheinlichen Systementwicklungen (wE) nach Lux (2013).

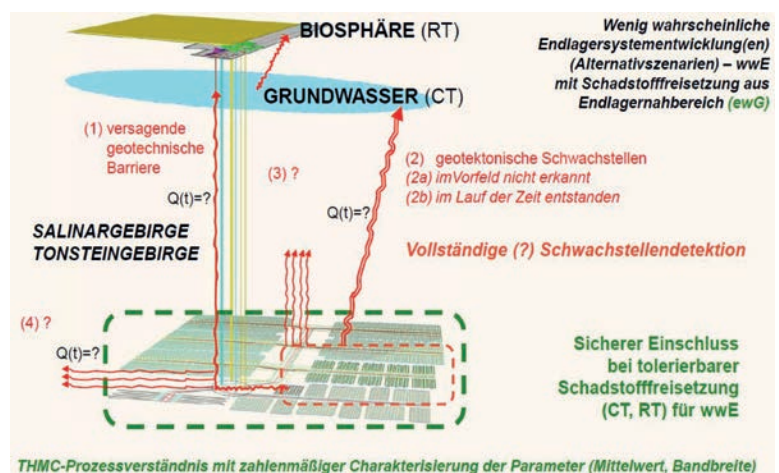


Abb. 7.

Weniger wahrscheinliche Tiefenlager-/Endlagersystementwicklungen (wwE) mit stilisierten Wegsamkeiten für eine Schadstofffreisetzung aus dem Nahbereich der HAW-Entsorgungsanlagen (ewG) nach Lux (2013).

wahrscheinlichen Systementwicklung nur ein begrenztes Flüssigkeitsangebot für den korrosionsbedingten Gasbildungsprozess zur Verfügung, der vornehmlich mit dem Salzgrusversatz in das System gelangt. Dagegen steht für die Behälterkorrosion und den damit einhergehenden Gasbildungsprozess in einer HAW-Entsorgungsanlage im Tonsteingebirge aufgrund des im Tonstein vorhandenen Porenwassers und der schon im primären Zustand vorhandenen vernetzten Wegsamkeiten im Porenraum des Gesteins ein im Grundsatz unbegrenztes Flüssigkeitsangebot zur Verfügung.

- Aufgrund der Kriecheigenschaften des Salinargebirges wird das Porenraumvolumen im Salzgrusversatz einer HAW-Entsorgungsanlage im Salinargebirge im Lauf der Zeit fortwährend reduziert. Damit ergibt sich trotz begrenztem Gasbildungspotential ein allmählich ansteigender Gasdruck im Entsorgungsbergwerk. Da die Kriechfähigkeit des Tonsteingebirges im Vergleich zum Salinargebirge wesentlich geringer ist, ist der Einfluss eines konvergenzbedingten Gasdruckaufbaus auf die fluiddynamischen Prozesse in einem Entsorgungsbergwerk im Tonsteingebirge eher als vernachlässigbar anzusehen. Allerdings kann sich im Tonsteingebirge durch den als Versatzmaterial eingesetzten Bentonit eine Reduktion der Porosität aufgrund des Quellvermögens des Bentonits bei Wasserzutritt aus dem umgebenden Tonsteingebirge ergeben, ebenfalls mit der Folge eines Gasdruckaufbaus.
- Die Wärmeleitfähigkeit ebenso wie die hydraulische Leitfähigkeit der Versatzmaterialien Salzgrus bzw. Bentonit sind räumlich und zeitlich nicht konstant. Beide Größen werden im Salzgrus im Wesentlichen von der Porosität bestimmt, die Wärmeleitfähigkeit zusätzlich auch von der Temperatur. Im Bentonit werden beide Größen dagegen von der Flüssigkeitssättigung bestimmt, wobei der Einfluss der Flüssigkeitssättigung auf die hydraulische Leitfähigkeit nicht unmittelbar ist, sondern indirekt über das Quellverhalten des Bentonits bei Aufsättigung und die damit einhergehende Reduzierung der Porosität.
- Im Tonsteingebirge haben Austrocknungs- und Wiederaufsättigungsprozesse und die damit

verbundene Ausbildung von sekundären Wegsamkeiten bzw. ihrer Rückbildung eine große Bedeutung für die zeitlich-räumliche Entwicklung der fluiddynamischen Prozesse. Indirekt ist damit auch die räumlich-zeitliche Entwicklung der Temperatur von Bedeutung. Im Salinargebirge kommt es zwar auch zur Ausbildung von sekundären Wegsamkeiten bzw. zu ihrer Rückbildung, allerdings bedingt durch thermomechanisch oder hydraulisch induzierte Gefügeschädigungsprozesse bzw. Gefügeschädigungsrückbildungsprozesse.

Danksagung

Ein erster Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, das unter dem Vorhabentitel „ENTRIA – Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen“ mit den Projektnummern 02S9082A bis 02S9082E die Finanzmittel für die ENTRIA-Forschungsplattform zur Verfügung gestellt hat. Ein weiterer Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen sowie allen Mitarbeitern/innen aus der ENTRIA-Forschungsplattform, die durch ihre engagierte und kompetente Mitwirkung in Diskussionen und Fachgesprächen sowie durch Präsentationen und Arbeitsberichte wertvolle Beiträge zu sicherheitstechnischen und gesellschaftspolitischen Aspekten in Verbindung mit der Entsorgung radioaktiver Reststoffe geliefert haben.

Literaturverzeichnis

- | Alonso, E. E., Gens, A. & Josa, A. (1990): A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), 405-430.
- | Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte.
- | Bechthold, W., Rothfuchs, T., Poley, A., Ghoreychi, M., Heusermann, S., Gens, A. & Olivella, S. (1999): Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project). Abschlussbericht zum Forschungsprojekt mit der Vertragsnummer F14W-CT95-0009.
- | Bechthold, W., Smailos, E., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan Sabet, B., Rothfuchs, T., Kamlot, P., Grupa, J., Olivella, S. & Hansen, F.D. (2004): Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project). Abschlussbericht zum Forschungsprojekt mit der Vertragsnummer FIKW-CT-2000-00051.
- | Blanco Martín, L., Wolters, R., Rutqvist, J., Lux, K.-H. & Birkholzer, J.T. (2015): Comparison of two simulators to investigate thermal-hydraulic-mechanical processes related to nuclear waste isolation in saliferous formations. *Computers and Geotechnics* 66 (2015), p. 219-229.
- | Blanco Martín, L., Wolters, R., Rutqvist, J., Lux, K.-H. & Birkholzer, J.T. (2016): Thermal-hydraulic-mechanical modeling of a large-scale heater test to investigate rock salt and crushed salt behavior under repository conditions for heat-generating nuclear waste. *Computers and Geotechnics* 77 (2016), p. 120-133.
- | Blommaert, W. (2010): Reflections on Flexibility, Reversibility, Retrieval by the Belgian nuclear safety authority, Vortrag auf der R&R-Tagung der NEA, Reims, 14.-17. Dez. 2010, FANC, Belgien.
- | BMI (1983): Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. Rundschreiben des BMI vom 20.04.1983 – RS-AGK3-515790/2/GMBI. 1983, Nr. 13, S. 220.
- | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle (Stand: 30.09.2010).
- | Darcy, H. (1856): Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris 1856.
- | Delfs, J.-O., Görke, U., Herbert, H.-J., Kalbus, E., Kolditz, O., Lux, K.-H., Moog, H.C., Werunsky, F., Xie, M. & Zhang, C. (2010): Kopplung numerischer Modelle für C:HM-Transportprozesse. Abschlussbericht des BMBF-Verbundforschungsvorhabens mit den Förderkennzeichen 02C1275, 02C1285 und 02C1295, GRS-251.
- | Düsterloh, U. (2014): Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken – Vorprojekt zur Kalkulation und Qualifizierung der Forschungsarbeiten. Abschlussbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben mit dem Förderkennzeichen 02E11223.
- | ENTRIA (2012): Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen. Vorhabensbeschreibung zur Bildung einer Forschungsplattform.
- | ENTRIA (2014): Memorandum zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe.
- | ESK / Entsorgungskommission (EL-Ausschuss) (2011): Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager – ein Diskussionspapier. Bonn.
- | Fourier, J.B.J. (1822): Théorie analytique de la chaleur. Paris 1822.
- | Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) GmbH (2016): Projektbeschreibung zur VSG auf der Homepage der GRS, <https://www.grs.de/vorlaeufige-sicherheitsanalyse-gorleben-vsg>.
- | Hassel, T. (2015): Erstellung von generischen Behältermodellen. Präsentation beim 4. ENTRIA-Jahrestreffen.
- | Itasca (2013): FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. User's Guide.

- | Jobmann, M., Uhlig, L., Amelung, P., Billaux, D., Polster, M. & Schmidt, H. (2007): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland – GENESIS. Abschlussbericht zum BMWa-Forschungsprojekt mit dem Förderkennzeichen 02 E 9733.
- | KlimaBergV (1983): Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (Klima-Bergverordnung – KlimaBergV).
- | Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (2016): Verantwortung für die Zukunft – Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Abschlussbericht.
- | Kudla, W., Schreiter, F., Gruner, M., Jobmann, M., Bollingerfehr, W., Müller-Hoepfer, N., Herold, P., Freyer, D., Wilsnack, T. & Grafe, F. (2013): Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle – ELSA Teil 1 –. Abschlussbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben mit den Förderkennzeichen 02E10921 / 02E10931.
- | Lux, K.-H., Düsterloh, U. & Dyogtyev, O. (2012): Laborative und numerische Untersuchungen zur Salzgrus-Kompaktion im Verbundsystem Steinsalz-Salzgrus unter THM-Einwirkungen – Orientierende Untersuchungen –. Abschlussbericht.
- | Lux, K.-H. (2013): Präsentation zum ENRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 24.-26.04.2013.
- | Lux, K.-H., Wolters, R. & Düsterloh, U. (2015): Konsistente THM-gekoppelte multiphysikalische Simulationen zum Tragverhalten von Speicherkavernen im Steinsalzgebirge während der Aussol-, der Betriebs- und der Stilllegungsphase sowie in der Nachverschlussphase. Erdöl Erdgas Kohle 131, Heft 11.
- | Lux, K.-H., Wolters, R., Zhao, J., Rutenberg, M., Feierabend, J. & Pan, T. (2016a): Geotechnische Analysen zum fluiddynamischen Verhalten von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit längerfristigem direktem Monitoring auch nach Verschluss der Einlagerungssohle. Heft 21 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal (in Vorbereitung).
- | Lux, K.-H., Rutenberg M., Seeska, R., Feierabend, J. & Düsterloh, U. (2016b): Kopplung der Softwarecodes FLAC3D und TOUGH2 in Verbindung mit in situ-, laborativen und numerischen Untersuchungen zum thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten von Tongestein unter Endlagerbedingungen. Abschlussbericht zum BMWi-Forschungsprojekt mit dem Förderkennzeichen 02 E 11041.
- | Lux, K.-H., Wolters, R., Zhao, J., Pan, T. & Feierabend, J. (2016c): Von Lokal- zu Global-modellen – ein Weg von Prozessverständnis zu Systemanalyse. Teil 1 – Konzeptioneller und konfigurativer Ansatz. Vortrag bei der Tagung „Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe“, Braunschweig, 01.-02.11.2016.
- | Lux, K.-H., Wolters, R., Zhao, J., Pan, T. & Feierabend, J. (2016d): Von Lokal- zu Global-modellen – ein Weg von Prozessverständnis zu Systemanalyse. Teil 2 – Bausteine zur fluiddynamischen Analyse im Salinargebirge. Vortrag bei der Tagung „Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe“, Braunschweig, 01.-02.11.2016.
- | Lux, K.-H., Wolters, R., Zhao, J., Pan, T. & Feierabend, J. (2016e): Von Lokal- zu Global-modellen – ein Weg von Prozessverständnis zu Systemanalyse. Teil 3 – Bausteine zur fluiddynamischen Analyse im Tonsteingebirge. Vortrag bei der Tagung „Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe“, Braunschweig, 01.-02.11.2016.
- | MoDeRn (2016): Projekt-Homepage MoDeRn, <http://www.modern-fp7.eu/>.
- | MoDeRn2020 (2016): Projekt-Homepage MoDeRn2020, <http://www.modern2020.eu/>.
- | Nagra (2014): Modelling of Radionuclide Transport along the Underground Access Structures of Deep Geological Repositories. NTB 14-10.
- | Navarro, M. (2013): Die vereinfachte Berechnung der Konvergenzrate salzgrusverfüllter Hohlräume im Steinsalz. GRS-307.
- | Niemeyer, M., Resele, G., Skrzyppek, J., Wilhelm, S., et al. (2002): Endlager Morsleben, Langzeitsicherheitsnachweis für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programm PROSA. Colenco Bericht 4561/150, Auftragsnummer 9M 23220020, Colenco Power Engineering AG. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS).
- | Röhlig, K.-J. (2010): Das Konzept des Safety Case – Internationale Entwicklungen zur Demonstration der Langzeitsicherheit von Endlagern. In P. Hocke / G. Arens (2010): Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Gesellschaftliche Erwartungen und Anforderungen an die Langzeitsicherheit. Tagungsdokumentation zum „Internationalen Endlagersymposium Berlin, 30.10. bis 01.11.2008“, Karlsruhe / Berlin / Bonn.
- | Röhlig, K.-J. (2016): Techniken – Konzepte – Herausforderungen. Zur Endlagerung radioaktiver Reststoffe. In A. Brunnengräber (Hrsg.): Problemfälle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll. Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden, 2016.
- | Rutqvist, J. & Tsang, C.F. (2004): A fully coupled three-dimensional THM analysis of the FEBEX in situ test with the rocma3 code: prediction of THM behaviour in a bentonite barrier. Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical processes in geo-systems, Elsevier.
- | Stahlmann, J., Leon-Vargas, R. & Mintz-laff, V. (2015): Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung. ENRIA-Arbeitsbericht-03.
- | StandAG (2013): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG).
- | Storck, R., Birtthler, H., Buhmann, D., Hirsekorn, R.-P., et al. (2002): Endlagerung Morsleben, Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit mit dem Rechenprogramm EMOS. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3056.
- | VSG – Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K. & Vogel, P. (2012): Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, GRS-286.
- | Wolters, R. (2014): Thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Analysen zum Tragverhalten von Kavernen im Salinargebirge vor dem Hintergrund der Energieträgerspeicherung und der Abfallentsorgung – Ein Beitrag zur Analyse von Gefügeschädigungsprozessen und Abdichtungsfunktion des Salinargebirges im Umfeld untertägiger Hohlräume. Dissertation an der TU Clausthal, Heft 20 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal.
- | Zhao, J. (2017): Multiphysikalische Prozess- und Systemanalyse für geologische Tiefenlager in Tonsteingebirge in der Nachverschlussphase – Ein Beitrag zum Vergleich von Entsorgungsoptionen für radioaktive Abfälle mit passiver bzw. aktiver Gewährleistung der langfristigen Sicherheit. Dissertation an der TU Clausthal, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal (in Vorbereitung).

Authors

Karl-Heinz Lux,
Ralf Wolters,
Juan Zhao
Institut für Aufbereitung,
Deponietechnik und Geomechanik
Technische Universität Clausthal
Erzstraße 20
38678 Clausthal-Zellerfeld,
Germany