

ENTRIA

ENTSORGUNGSOPTIONEN FÜR RADIOAKTIVE RESTSTOFFE:
INTERDISZIPLINÄRE ANALYSEN UND
ENTWICKLUNG VON BEWERTUNGSGRUNDLAGEN

ENTRIA-Arbeitsbericht-07

**„TH2M-basierte multiphysikalische Modellierung und
Simulation von Referenz-Endlagersystemen
im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit
Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes
Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch
noch nach Verschluss der Einlagerungssohle**

**Ein Beitrag zur Verbesserung der Robustheit von
Sicherheitsfunktionen mit sehr hoher Relevanz im Hinblick auf die
Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich
von Entsorgungsoptionen“**

ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod

Karl-Heinz Lux

Ralf Wolters

Juan Zhao

Michael Rutenberg

Jörg Feierabend

Tianjie Pan

Kontakt

Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik (LfdG)
Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (IFAD)
Technische Universität Clausthal (TUC)
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Karl-Heinz Lux
Erzstraße 20
38678 Clausthal-Zellerfeld
www2.ifa.tu-clausthal.de/deponie/
lux@tu-clausthal.de

ENTRIA ist ein in der Forschung zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe in Deutschland neuartiges Verbundprojekt von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus unterschiedlichen Disziplinen, die bisher nur sporadisch kooperierten. Um seine neuen Arbeitsweisen und die Vielfalt integrierter disziplinärer Perspektiven transparent zu machen, werden in den Arbeitsberichten wichtige Zwischenergebnisse vorgestellt. Dies dient einerseits der projektinternen Information. Andererseits werden diese Zwischenergebnisse auch der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Letzteres geschieht, um Einblicke in die ENTRIA-Forschungspraxis zu gewähren und Ausgangsmaterial für spätere Veröffentlichungen offen zu legen. ENTRIA lebt vom pluralen Austausch. Die Beiträge geben allein die Meinung der Autorin oder des Autors wieder.

ENTRIA wird vom BMBF unter dem Kennzeichen **02S9082 A bis E** gefördert (Zeitraum 2013 bis 2017).

Zitierweise

Lux, K.-H., Wolters, R., Zhao, J., Rutenberg, M., Feierabend, J. & Pan, T. (2017): TH2M-basierte multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle. Ein Beitrag zur Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen mit sehr hoher Relevanz im Hinblick auf die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen. Hannover / Clausthal-Zellerfeld, ENTRIA-Arbeitsbericht-07
ISSN (Print): 2367-3532, ISSN (Online): 2367-3540

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Vorwort

Der vorliegende Arbeitsbericht hat das Ziel, einer interdisziplinär interessierten Leserschaft einen Überblick zu verschaffen über die bisher in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod durchgeführten Forschungsarbeiten. Dabei werden zu einem großen Teil disziplinäre Arbeitsergebnisse vorgestellt, aber auch interdisziplinäre Verbindungen zu weiteren ENTRIA-Teilprojekten erläutert.

Der Titel dieses Arbeitsberichtes gibt in einer stark komprimierten Form bereits einen ersten groben Hinweis darauf, dass in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod für die Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge bzw. Tonsteingebirge das langzeitige Systemverhalten

- von Referenz-Endlagersystemen¹ ohne Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle (VP 5.1 und VP 5.2) und
- von Referenz-Tiefenlager-/Endlagersystemen² mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle (VP 6.7mod)

analysiert werden soll. Als Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle wird die im Rahmen der ENTRIA-Arbeiten entwickelte Anordnung einer Überwachungssohle und aus dieser heraus abgeteufte Monitoringbohrlöchern bis in die Einlagerungsstrecken hinein vorgeschlagen und untersucht. Diese Monitoringbohrlöcher ermöglichen den Austausch defekter Messinstrumente sowie einfache Energieversorgung und Datenübertragung und tragen damit zu einer Verbesserung der Zuverlässigkeit der Messdatengrundlage bei. Auf dieser Messdatengrundlage ist dann während und auch nach der Einlagerungsphase über Rückholung oder endgültigen Verbleib der abgelagerten Abfälle zu entscheiden.

Sowohl im Konzept ohne wie auch im Konzept mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle werden die Einlagerungsstrecken zeitgleich mit der im Rückbau erfolgenden Abfalleinlagerung versetzt und nach ihrer vollständigen Bestückung mit Abfallbehältern abschließend mit einem Verschlussbauwerk versehen. Im Referenz-Tiefenlager-/Endlagersystem könnten diese Verschlussbauwerke mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle über speziell abgeteufte Bohrlöcher einem längerfristigen Funktionalitätstest unterzogen werden.

Nach Ende der Einlagerungsphase ist die Einlagerungssohle in beiden Konzepten vollständig versetzt und mit Verschlussbauwerken versehen. Beim Konzept ohne Implementierung ei-

¹ Als Endlager wird nachfolgend eine untertägige Entsorgungsanlage für radioaktive Abfälle bezeichnet, die zeitnah nach Ende der Einlagerungsphase verschlossen wird. Eine Nachsorge ist grundsätzlich nicht vorgesehen. Als Endlagersystem wird nachfolgend das Gesamtsystem einer untertägigen Entsorgungsanlage für radioaktive Abfälle verstanden, das aus dem Endlagerbergwerk, dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG), der geologischen Barriere (Nahfeld), dem Fernfeld und der Biosphäre besteht.

² Als Tiefenlager / Endlager wird nachfolgend eine untertägige Entsorgungsanlage für radioaktive Abfälle bezeichnet, die zunächst als Tiefenlager auch nach Ende der Einlagerungsphase noch einige Zeit in ihrem Verhalten messtechnisch beobachtet wird, um eine planmäßige Entwicklung festzustellen. In diesem Fall wird das Tiefenlager in ein dann nachsorgefreies Endlager überführt; andernfalls werden die Abfälle rückgeholt. Analog zum Endlagersystem wird als Tiefenlager-/Endlagersystem nachfolgend das Gesamtsystem einer untertägigen Entsorgungsanlage für radioaktive Abfälle verstanden, das aus dem Tiefenlager-/Endlagerbergwerk, dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG), der geologischen Barriere (Nahfeld), dem Fernfeld und der Biosphäre besteht.

ner Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle werden im Anschluss auch die Zugangsschächte mit geeigneten Schachtverschlussbauwerken versehen, während der Schacht beim Konzept mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring nur bis auf das Teufenniveau der Überwachungssohle verschlossen wird, um einen längerfristigen Zugang zu dieser Sohle zu ermöglichen. Die Monitoringbohrlöcher, die Überwachungssohle und der restliche Schacht werden erst dann verfüllt und verschlossen, wenn eine Entscheidung zur Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager getroffen und die Monitoringphase beendet worden ist.

Im Rahmen der Analysen zum langzeitigen Systemverhalten der Referenz-Endlagersysteme bzw. der Referenz-Tiefenlager-/Endlagersysteme sind umfangreiche TH2M-gekoppelte numerische Simulationen durchgeführt worden unter Verwendung von Ansätzen zur physikalischen Modellierung der im Endlagerbergwerk bzw. Tiefenlager-/Endlagerbergwerk sowie in der umgebenden Wirtsgesteinsformation auftretenden thermischen, mechanischen und hydraulischen Prozesse unter besonderer Berücksichtigung von 2-Phasenflussprozessen (→ TH2M-gekoppelte Analyse). Eine zentrale Bedeutung kommt im Rahmen der Analysen zur Langzeitentwicklung von Endlagersystemen bzw. Tiefenlager-/Endlagersystemen der Berücksichtigung von zeitlich-räumlichen Wechselwirkungen der vorstehend genannten physikalischen Prozesse zu.

Zur Erläuterung des Untertitels des vorliegenden Arbeitsberichtes muss erwähnt werden, dass im Rahmen der ENTRIA-Forschungsarbeiten zur Entwicklung von Bewertungsgrundlagen für den Vergleich von Entsorgungsoptionen den so genannten Sicherheitsfunktionen eine zentrale Bedeutung zukommt. Das Konzept der Sicherheitsfunktionen ist bereits im Rahmen des Forschungsprojektes VerSi vorgeschlagen worden für den Vergleich von Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge, *VerSi (2010)*. Auch in den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle nach *BMU (2010)* werden Sicherheitsfunktionen erwähnt. Nach *BMU (2010)* ist eine Sicherheitsfunktion eine Eigenschaft oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die bzw. der in einem sicherheitsbezogenen System oder Teilsystem oder bei einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleistet. Durch das Zusammenwirken dieser Funktionen wird die Erfüllung aller sicherheitstechnischen Anforderungen sowohl in der Betriebsphase als auch in der Nachverschlussphase des Endlagers gewährleistet. Verschiedene Sicherheitsfunktionen können eine unterschiedliche Relevanz für das Endlagersystemverhalten haben, wobei die Relevanz von Sicherheitsfunktionen sich auch über den Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren verändern kann. Ebenso können verschiedene Sicherheitsfunktionen eine unterschiedliche Robustheit haben, wobei der Begriff Robustheit in diesem Zusammenhang nach *BMU (2010)* die Zuverlässigkeit und Qualität und somit die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktion gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen bezeichnet. Auch die Robustheit von Sicherheitsfunktionen ist im Grundsatz zeitlich veränderlich. Es ist anzustreben, dass zu jedem Zeitpunkt Sicherheitsfunktionen mit hoher oder sehr hoher Relevanz auch eine hohe oder sehr hohe Robustheit aufweisen. Dem Untertitel dieses Arbeitsberichtes ist zu entnehmen, dass die in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod durchgeführten Arbeiten zur Entwicklung von Bewertungsgrundlagen für den Vergleich von Entsorgungsoptionen beitragen, insbesondere im Hinblick auf die Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen mit sehr hoher Relevanz.

Darüber hinaus sollen durch diese Arbeiten insbesondere die fluiddynamischen Prozesse in ihrer zeitlichen Entwicklung analysiert und visualisiert³ werden, einerseits um das Verständnis der ablaufenden Prozesse anschaulich zu dokumentieren, andererseits um über die quantitative Ausweisung von Zustandsgrößenentwicklungen in unterschiedlichen Szenarien eine zunächst generische Grundlage zu schaffen, von der ausgehend Messprogramme konzipiert und später dann zu erhebende Messdaten bewertet werden können. Damit ist für einen konkreten Standort auch der Weg für die Implementierung einer Fehlerkorrekturmöglichkeit in den Endlagerprozess und für die Erarbeitung einer partizipativ ausgerichteten Entscheidungsgrundlage aufgezeigt – Rückholung der Abfälle bei nicht planmäßiger Entwicklung des Tiefenlagers bzw. Verbleib der Abfälle und Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager bei planmäßiger Entwicklung.

Im Hinblick auf die Erarbeitung von Beiträgen zur Entwicklung von Bewertungsgrundlagen sind die beiden im Rahmen von ENTRIA betrachteten untertägigen Entsorgungsoptionen durch so genannte Referenzmodelle exemplarisch konfigurativ ausgestaltet worden. U. a. wurde für die Option *Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrung zur Überwachung und Rückholbarkeit* im Rahmen des ENTRIA-Teilprojekts VP 6 die Idee einer Überfahrungssohle zur Gewährleistung des Monitoring entwickelt⁴ und im Rahmen des Teilprojektes VP 6.7mod weiter spezialisiert und vertieft analysiert. Erste Ergebnisse dieser Analyse sind im vorliegenden Arbeitsbericht enthalten.

Ob eine konfigurative Ausgestaltung einer Option (diese oder jede andere) auch sicherheitstechnisch vertretbar ist, muss in umfassenden Sicherheitsanalysen untersucht werden. Grundsätzlich stellt sich dabei die Frage, ob bestehende Sicherheitskonzepte übernommen werden können, ob diese modifiziert oder neu entwickelt werden müssen oder ob die konfigurative Ausgestaltung sicherheitstechnisch nicht vertretbar ist und verworfen werden muss. Grundsätzlich gelten als Leitgedanken für die untertägigen Entsorgungsoptionen die Sicherheitsprinzipien des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und einer möglichst frühzeitigen Gewährleistung passiver Sicherheit durch geologische und geotechnische Barrieren.

In der Forschungsplattform ENTRIA sind entsprechend der Vorhabensbeschreibung keine umfassenden Sicherheitsanalysen durchgeführt worden. Es werden vielmehr der Vorhabensbeschreibung entsprechend ausgewählte sicherheitstechnische Aspekte untersucht.

Hinweis zu den diesem Arbeitsbericht auf CD beigefügten Anhängen

Im vorliegenden Arbeitsbericht konnten aus Platz- sowie aus Lesbarkeitsgründen nicht alle Ergebnisse der durchgeführten Globalmodell-Simulationen dargestellt werden. Daher werden im Rahmen der in Abschnitt 5 erfolgenden Diskussion der Globalmodell-Simulationsergebnisse die in diesem Kontext als relevant angesehenen Ergebnisse sehr detailliert vorge-

³ Es ist ausdrücklich hervorzuheben, dass die Darstellungen der Fluidströmungen unter dem Aspekt der Visualisierung in unterschiedlichen Maßstäben erfolgt sind. Maßgebend für die Quantität und damit für die Intensität und die sicherheitstechnische Relevanz der Prozesse sind die Zahlenwerte, nicht die graphischen Elemente.

⁴ *Stahlmann, J., Leon-Vargas, R. & Mintzloff, V. (2015):* Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung. ENTRIA-Arbeitsbericht-03, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig.

stellt. Eine umfassende Darstellung der Globalmodell-Simulationsergebnisse ist auf der diesem Arbeitsbericht beigefügten Anhang-CD zu finden. Mitunter wird im Text auch auf Darstellungen verwiesen, die auf der Anhang-CD zu finden sind.

Danksagung

Ein erster Dank der Autoren dieses Arbeitsberichtes 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 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern 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 im Hinblick auf die Entsorgung radioaktiver Reststoffe geliefert haben. Ein letzter Dank schließlich gilt Herrn Dr. Peter Hocke vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) am Karlsruher Institut für Technologie für das interne Review dieses Arbeitsberichtes und seine wertvollen Hinweise insbesondere im Hinblick auf gesellschaftspolitische Aspekte und eine interdisziplinäre Leserschaft.

Clausthal, im März 2017

Karl-Heinz Lux

Inhaltsverzeichnis

1	Entsorgungsoptionen in einem Bergwerk in einer tiefen geologischen Formation ohne und mit Vorkehrungen zu einem direkten Monitoring	1
1.1	Vorbemerkung und Rahmenbedingungen	1
1.2	Sicherheitsfunktionen als zentraler Bestandteil der Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen ohne bzw. mit implementierter Möglichkeit zum direkten Monitoring	10
1.2.1	Einführung in das Konzept von Sicherheitsfunktionen am Beispiel der Entsorgungsoption Wartungsfreie Tiefenlagerung (Endlagerung)	10
1.2.2	Bewertung der Relevanz von Sicherheitsfunktionen anhand von Relevanzklassen	13
1.2.3	Bewertung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen anhand von Robustheitsklassen	14
1.2.4	Möglichkeiten zur Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen	15
1.3	ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 einschließlich VP 5.3 sowie VP 6.7mod	18
1.3.1	Aufgabenstellung / Bearbeitungsfelder	18
1.3.2	Bearbeitungsstrategie für die Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2	23
1.3.3	Bearbeitungsstrategie für das Teilprojekt VP 6.7mod	28
1.3.4	Stellung der Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 sowie des Teilprojekts VP 6.7mod innerhalb des ENTRIA-Forschungsprojekts	30
2	Grundlagen zur Modellierung und Simulation von TH2M-gekoppelten Prozessen in Tiefenlager-/Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge	32
3	Verifikation und Validation des FTK-Simulationsinstrumentariums (= FTK-Simulator inkl. implementierten Stoffmodellen) zur Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen durch Prozessanalyse	37
3.1	Vorbemerkung	37
3.2	Retrospektive Analyse des TSDE-Experiments / Salinargebirge	40
3.2.1	Simulationsmodell und angesetzte Materialkennwerte	40
3.2.2	Vergleichende Gegenüberstellung der Feldmessdaten des TSDE-Experiments mit den Simulationsergebnissen der Benchmark-Simulationen	46

4	Konzeptionelle Ansätze zur Simulation von Fluidströmungen im Tiefenlager-/Endlagerbergwerk und seiner Nahfeld-Umgebung unter Einbindung von Funktionalmodellen zur Prozessabstraktion	55
4.1	Grundlegende bisherige Vorgehensweise zur Dokumentation der Langzeitsicherheit	55
4.2	Prozessabstraktion durch Funktionalmodelle	56
5	TH2M-gekoppeltes Verhalten von Tiefenlager-/Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge	62
5.1	Wirtsgesteinsspezifische fluiddynamische Prozesse im Endlagersystem	62
5.2	Visualisierung der fluiddynamischen Prozesse als Beitrag zur Verbesserung des Endlagersystemverständnisses	65
5.2.1	Globalmodelle (Basismodelle / Modelle mit Überfahrungssohle / Modelle mit Störungszone / Modelle mit reduzierter Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation)	65
5.2.2	Darstellung und Diskussion ausgewählter Simulationsergebnisse aus den durchgeführten rechnerischen Analysen zum Systemverhalten der Referenz-Endlagersysteme in den unterschiedlichen Globalmodellen	81
5.2.2.1	Vorbemerkung	81
5.2.2.2	Simulationsergebnisse der Basis-Simulationen	82
5.2.2.3	Ausgewählte Simulationsergebnisse der Sensitivitätsanalyse	99
5.3	Einige Anmerkungen zu den bisherigen Arbeiten mit Blick auf die Bewertung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen	132
6	Zusammenfassung und Ausblick	135
7	Literaturverzeichnis	140
Anhang A	Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Salinargebirge (→ Basis-Simulation Salinargebirge)	
Anhang B	Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge (→ Basis-Simulation Tonsteingebirge)	
Anhang C	Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme einer ausbleibenden Behälterkorrosion	
Anhang D	Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme einer gegenüber der Basis-Simulation 100-fach erhöhten Behälterkorrosionsrate	
Anhang E	Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme einer gegenüber der Basis-Simulation 100-fach er-	

höhten Permeabilität des Bentonitversatzes und der Verschlussbauwerke

- Anhang F** Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme einer Permeabilität von $K = 10^{-15} \text{ m}^2$ im Bentonitversatz und in den Verschlussbauwerken
- Anhang G** Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme einer gegenüber der Basis-Simulation 100-fach geringeren Permeabilität des Tonsteingebirges
- Anhang H** Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme eines vertikal (von unten nach oben) gerichteten primären hydraulischen Gradienten von $i = 0,15$
- Anhang I** Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme eines horizontal (von den Einlagerungsfeldern zum Schacht) gerichteten primären hydraulischen Gradienten von $i = 0,15$
- Anhang J** Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme einer geogen angelegten, aber durch die Vorerkundung nicht entdeckten Störungszone mit mäßig erhöhter Permeabilität
- Anhang K** Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme einer im Rahmen der Vorerkundung nicht entdeckten Störungszone mit stark erhöhter Permeabilität
- Anhang L** Referenz-Endlagersystem mit Überfahrungssohle und Monitoringbohrlöchern im Tonsteingebirge
- Anhang M** Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge bei einer Mächtigkeit der Tonsteinformation von $M = 100 \text{ m}$
- Anhang N** Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Salinargebirge unter Annahme einer ausbleibenden Behälterkorrosion
- Anhang O** Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Salinargebirge unter Annahme einer gegenüber der Basis-Simulation 100-fach erhöhten Behälterkorrosionsrate
- Anhang P** Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Salinargebirge unter Annahme einer Wärmeleistung der eingelagerten Abfallbehälter entsprechend einer POLLUX-3-Behälterbeladung
- Anhang Q** Referenz-Endlagersystem mit Überfahrungssohle und Monitoringbohrlöchern im Salinargebirge

1 Entsorgungsoptionen in einem Bergwerk in einer tiefen geologischen Formation ohne und mit Vorkehrungen zu einem direkten Monitoring

1.1 Vorbemerkung und Rahmenbedingungen

Bislang sind in Deutschland vornehmlich aus Sicherheitsgründen (geotechnisch, sozial, ökonomisch) Endlagerkonzeptionen favorisiert und wissenschaftlich-technisch erforscht und beplant worden, die einen nachsorgefreien sofortigen Verschluss des Endlagers nach Einstellung des Einlagerungsbetriebes vorsehen. Die Implementierung von vorsorglich in das Endlagerkonzept integrierten zusätzlichen Maßnahmen, die auf die Ausgestaltung einer Entsorgungsoption mit der Möglichkeit einer auch längerfristigen Rückholbarkeit der Abfälle auch noch nach Abschluss der Einlagerungsphase abzielen und daher auch eine längerfristige Monitoringphase nach Ende der Abfalleinlagerung vorsehen, fand dabei keine Beachtung. Hauptgrund für die bislang präferierte Entsorgungsoption sind neben der möglichst frühzeitigen Gewährleistung passiver Sicherheit durch geologische und geotechnische Barrieren auch die Erschwerung eines widerrechtlichen Zugriffs auf die abgelagerten Abfälle sowie die Freistellung nachfolgender Generationen von der Verpflichtung zu Aufsicht und Nachsorge, aber auch die Ungewissheiten über die zukünftige Entwicklung sozioökonomischer Systeme. 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 vornehmlich in dem für den hier vorgelegten Arbeitsbericht relevanten Teilprojekt VP 5 untersucht. Bild 1.1 zeigt die zeitliche Entwicklung eines Endlagersystems bei sofortigem Verschluss des Endlagers nach Einstellung des Einlagerungsbetriebs.

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 Sicherheit vor ionisierender Strahlung geforderten Zeiten von bis zu 1 Million Jahren eher skeptischen Öffentlichkeit auch in Deutschland zunehmend Überlegungen angestellt, die zwar an dem Entsorgungskonzept in tiefen geologischen Formationen festhalten, aber statt des sofortigen Verschlusses nach Einlagerungsende ohne spezifische Vorsorgemaßnahmen zu einer eventuellen Rückholung der Abfälle konzeptionell eine Reversibilität des Endlagerungsprozesses vor dem endgültigen Verschluss des Endlagerbergwerkes und dadurch eine Erweiterung der Handlungsmöglichkeiten zukünftiger Generationen bevorzugen. Erste Ansätze zur Implementierung dieser Überlegungen in das Endlagerkonzept laufen darauf hinaus, die Einlagerung der Wärme entwickelnden hochradioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und zur verein-

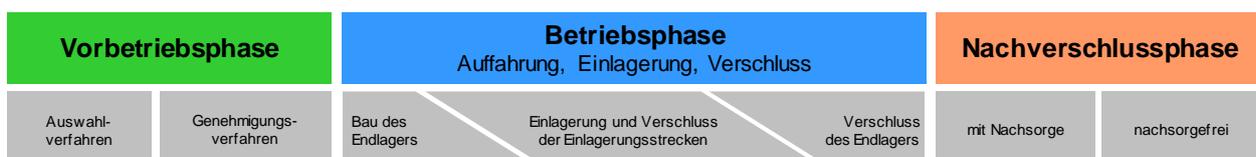


Bild 1.1 Zeitliche Entwicklung eines Endlagersystems bei sofortigem Verschluss des Endlagers nach Einstellung des Einlagerungsbetriebs

fachten Rückholbarkeit der Abfälle zu versehen – und zwar einerseits um belegen zu können, dass sich das Endlagersystem zumindest über eine vorab definierte Beobachtungszeit vor dem endgültigen Verschluss tatsächlich auch so wie prognostiziert verhält und um andererseits nachfolgenden Generationen Handlungsräume im Umgang mit den radioaktiven Abfällen zu eröffnen. Eine derartige Endlagerkonzeption erfordert die Implementierung eines Monitoringsystems, mit dessen Hilfe das Endlagerverhalten überwacht wird und das Messdaten liefert, die eine Bewertung des Endlagerverhaltens erlauben und die Grundlage schaffen für die weiteren Entscheidungen im Hinblick auf Rückholung oder endgültigen Verbleib der Abfälle. 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 Modern2020 (Development & Demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal). Allerdings geht das Monitoring im Rahmen der Forschungsplattform ENTRIA im Gegensatz zu den bisherigen Ansätzen von einer direkten und auch längerfristig über Wartungsmaßnahmen aufrechterhaltbaren Beobachtung des Nahfeldverhaltens der untertägigen Entsorgungsanlage aus. Dieses direkte und auch unterhaltungsfähige Monitoring erfolgt über die zu der Einlagerungssohle zusätzliche Anordnung einer Überwachungssohle mit Messbohrlöchern und liefert während der Betriebs- und Beobachtungsetappe überprüfbare Messdaten zur tatsächlichen Nahfeldentwicklung, die den planerischen Simulationsdaten zum Anlagenverhalten gegenübergestellt und aus sicherheitstechnischer Sicht bewertet werden können. Entscheidungen bezüglich einer Rückholung oder aber eines Verschlusses des Tiefenlagers zur Gewährleistung einer nachsorgefreien Endlagerung können während der Etappe zur Beobachtung datenbasiert getroffen werden. Damit besteht die Möglichkeit, die Kommunikations- und Partizipationsgrundlage im Endlagerprozess entscheidend zu verbessern und über transdisziplinäre Zusammenarbeit Wissenschaft, Technik und Gesellschaft in den Gesamtprozess angemessen zu integrieren.

Zur Differenzierung der Entsorgungsoptionen in tiefen geologischen Formationen sollen im Folgenden nachstehende Begriffe verwendet werden:

- (1) Tiefenlager = Entsorgungsanlage für radioaktive Abfälle in Form eines Bergwerks in einer tiefen geologischen Formation mit Überwachung des Anlagenverhaltens auch nach Ende des Einlagerungsbetriebes (Nachsorgephase),
- (2) Endlager = Entsorgungsanlage für radioaktive Abfälle in Form eines Bergwerks in einer tiefen geologischen Formation ohne weitere Überwachungsmaßnahmen nach Ende des Einlagerungsbetriebes und der Stilllegung.

Grundsätzlich ergeben sich damit zwei Varianten für die Entsorgungsanlage:

- (i) das klassische Endlagerbergwerk mit der Bezeichnung Endlager,
- (ii) das um ein vorgeschaltetes Tiefenlagerbergwerk erweiterte Endlagerbergwerk mit der Bezeichnung Tiefenlager / Endlager.

Bei einer Endlagerkonzeption mit Implementierung eines Monitoringsystems bestünde für zukünftige Generationen grundsätzlich die Möglichkeit zu entscheiden, die Abfälle auf standortbezogen durch Messdaten zum tatsächlichen Anlagenverhalten belegter Grundlage nach einer zeitlich befristeten Monitoringphase endgültig im Tiefenlager zu entsorgen und dieses in ein dann nachsorgefreies Endlager zu überführen. Sollte sich während der Monitoringphase eine Tiefenlagerentwicklung zeigen, die nicht den gestellten sicherheitstechnischen An-

forderungen entspricht und daher die Gewährleistung der langfristigen Sicherheit nicht mehr erwarten lässt, dann könnte vor Überführen des Tiefenlagers in ein Endlager die Rückholung der Abfälle angeordnet werden. Grundsätzlich besteht bis zum Ende dieser Monitoringphase auch noch die Möglichkeit, die Abfälle mit einem dann allerdings doch erheblichem technischem und finanziellem Aufwand rückzuholen und hinsichtlich des noch verbliebenen Energiepotentials zu nutzen oder mit dem Ziel der Verminderung der Strahlungsintensität zu behandeln. Bild 1.2 zeigt die zeitliche Entwicklung eines Tiefenlagersystems mit Berücksichtigung einer Monitoringphase vor dem endgültigen Verschluss des Tiefenlagers und seiner Überführung in ein Endlager.

Vor diesem Hintergrund wird die Einlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit der Abfälle im Rahmen von ENTRIA als eine eigenständige Entsorgungsoption im ENTRIA-Teilprojekt VP 6 untersucht. Als Grundlage für diese Untersuchungen ist eine spezifische Tiefenlager-/Endlagerkonzeption mit direktem Monitoring über Beobachtungsbohrlöcher entwickelt worden. Für diese Konzeption werden für die Monitoringphase und für die nachfolgende Nachverschlussphase nach Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager dann in enger Verbindung mit Teilprojekt VP 5, formal aber ebenfalls in Teilprojekt VP 6, die fluiddynamischen Prozesse simuliert und analysiert. Die aus derartigen Simulationen resultierenden fluiddynamischen Zustandsgrößen könnten im Zusammenhang mit den Monitoringdaten eine Rückholungsentscheidung begründen.

Als dritte Option wird im Rahmen von ENTRIA im Teilprojekt VP 7 schließlich auch eine langzeitige oberflächennahe Zwischenlagerung betrachtet und in den Optionenvergleich einbezogen.

Bild 1.3 zeigt in einer schematischen Darstellung die im Rahmen 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 Endlageroption bzw. der Tiefenlager-/Endlageroption schon aus heutiger Sicht erfordern, auch integraler Bestandteil dieser Optionen ist.

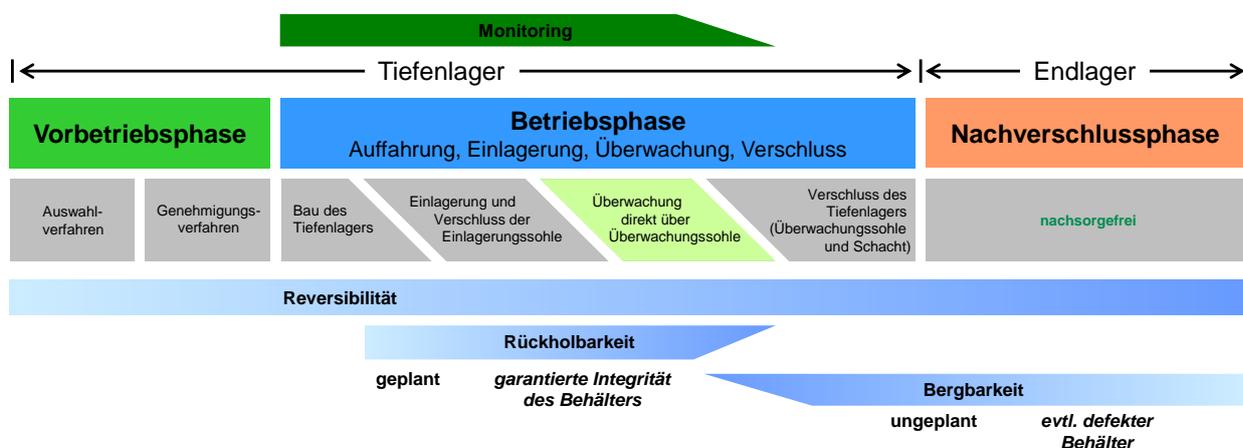


Bild 1.2 Zeitliche Entwicklung eines Tiefenlagersystems mit Berücksichtigung einer Monitoringphase vor dem endgültigen Verschluss des Tiefenlagers

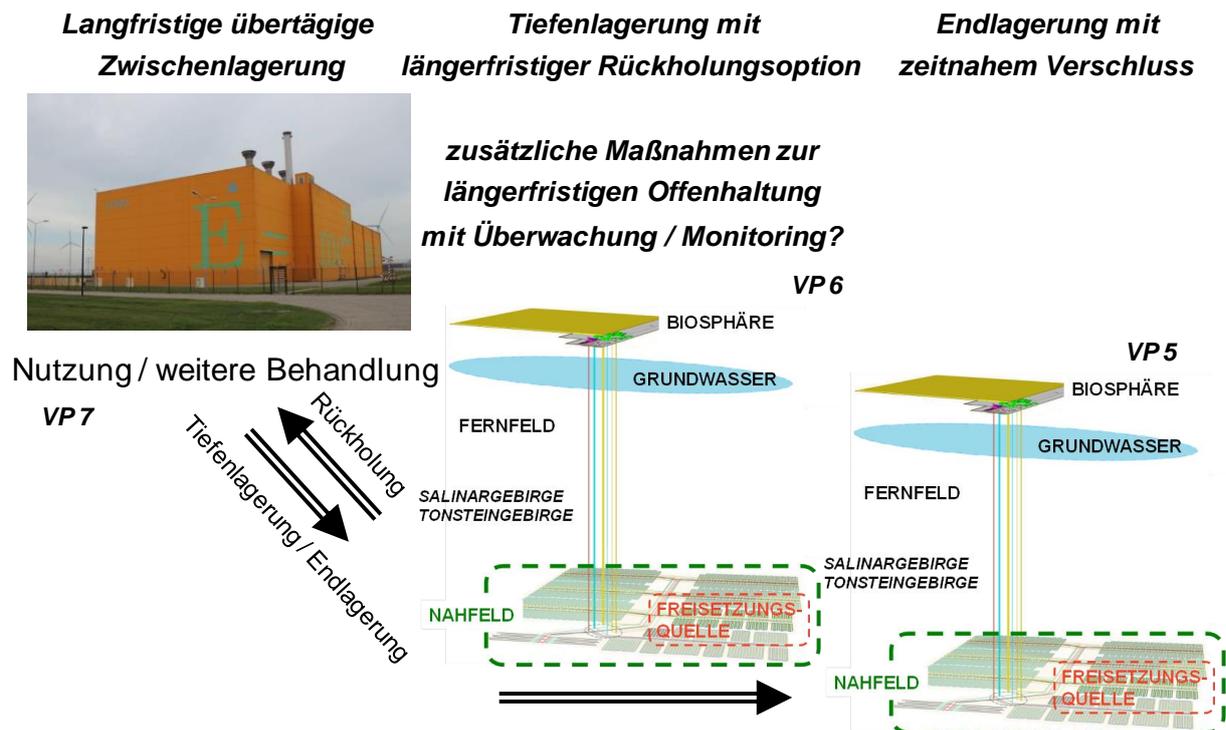


Bild 1.3 Überblick über die in ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen

Nach der Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes (StandAG) im Jahr 2013, seiner Überarbeitung durch die Kommission „Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe“ (Endlagerkommission), der Übergabe des Berichts der Kommission im Juli 2016, der im Juli 2016 beschlossenen Neustrukturierung der für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle zuständigen Organisationen und schließlich der endgültigen Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes vielleicht im Jahr 2017 nach einer die Kommissionsempfehlungen bedenkenden Überarbeitung zeichnet sich für Deutschland eine erneute Standortsuche für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle ab, *StandAG (2013)*, *Endlagerkommission (2016)*. Dabei sind, wie schon vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) seinerzeit gefordert, das Auswahlverfahren und die Auswahlkriterien sowie die Form der Öffentlichkeitsbeteiligung im Vorfeld des Standortauswahlprozesses gesetzlich festgelegt, *AkEnd (2002)*. Im Rahmen dieses legislativen Prozesses sind unter heutigem Blickwinkel auch weitere Entsorgungsoptionen im Vergleich zur bislang favorisierten Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit, die auch als wartungsfreie Tiefenlagerung bezeichnet wird, betrachtet worden. Die Kommission hat in ihrem Bericht empfohlen

- die Entsorgung hochaktiver Wärme entwickelnder Abfälle in tief gelegenen geologischen Formationen vorzunehmen,
- mögliche Standortgebiete insbesondere im Bereich von Formationen des Salinargebirges, des Tonsteingebirges und des Kristallingebirges in Deutschland zu identifizieren und auf ihre Eignung zur Errichtung eines Endlagers hin zu untersuchen und prioritär zu bewerten,
- zur Standortsuche ein gestuftes, kriteriengesteuertes Verfahren heranzuziehen,

- sowohl das Standortauswahlverfahren wie auch die spätere Errichtung und den nachfolgenden Betrieb des Endlagers reversibel auszugestalten und damit Möglichkeiten zur Fehlerkorrektur und zur Rückholbarkeit vorzusehen und darum
 - begleitende Sicherheitsüberprüfungen vorzunehmen und
 - das Endlager sowohl während der Betriebszeit wie auch noch einige Zeit nach Ende der Betriebszeit in seinem Verhalten zu überwachen.

Die von der Endlagerkommission bevorzugte Entsorgungsoption wird als „Endlagerung mit Reversibilität“ bezeichnet. Zentrale Argumente für die Empfehlung dieser Entsorgungsoption sind nach *Endlagerkommission (2016)*

- die Aussicht auf eine dauerhafte und sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle für den Nachweiszeitraum von 1 Million Jahren in tiefen geologischen Formationen,
- die Wartungsfreiheit aufgrund der ab einem bestimmten Zeitpunkt gegebenen geologisch bedingten passiven Sicherheit,
- die fehlende Prognostizierbarkeit der langfristigen gesellschaftlichen Entwicklung,
- die Realisierbarkeit in absehbarer Zeit,
- die Befreiung zukünftiger Generationen von den radioaktiven Abfällen,
- die hohe Flexibilität für den Fall wissenschaftlichen Fortschritts,
- die Möglichkeit des Lernens aus bisherigen Prozessschritten sowie der Korrektur von Fehlern und
- die bereits verfügbaren wissenschaftlichen Kenntnisse zu den geologischen Voraussetzungen.

Vor dem vorstehend skizzierten Hintergrund des derzeitigen Standes von Standortauswahlgesetz und Kommissionsbericht wird deutlich, dass die im Rahmen des ENTRIA-Forschungsprojektes bereits im Jahr 2013 aufgenommenen und transdisziplinär angelegten Forschungsarbeiten den von Gesetzgeber und Kommission für die zukünftige Entwicklung der Entsorgung hochradioaktiver Wärme entwickelnder Abfälle bis zur finalen Entscheidung durch zukünftige Generationen vorgesehenen Weg in den grundsätzlichen Komponenten vorausschauend abbilden:

- längerfristige übertägige Zwischenlagerung mit Monitoring und Wartung / Ertüchtigung der standortnahen bzw. zentralen Zwischenlager,
- Ablagerung der hochaktiven Wärme entwickelnden Abfälle in einem neu aufzufahrenden Bergwerk in einer dafür geeigneten tiefen geologischen Formation und Monitoring des Anlagenverhaltens insbesondere auch im Einlagerungsbereich sowohl während des Einlagerungsbetriebes wie auch eine Zeit lang nach Ende des Einlagerungsbetriebes, Entscheidung zur Rückholung oder zur Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager auf der Grundlage der Monitoringbefunde,
- finale Entsorgung der hochradioaktiven Wärme entwickelnden Abfälle nachsorgefrei in einem Endlager in einer tiefen geologischen Formation,

- Kommunikation und Diskussion des Entsorgungsprozesses für die hochradioaktiven Wärme entwickelnden Abfälle in der Öffentlichkeit insbesondere im Hinblick auf die Erlangung von Beteiligungsbereitschaft am Standortauswahlprozess und von Akzeptanz für seine Ergebnisse.

Die Erlangung von Beteiligungsbereitschaft insbesondere bei der von möglichen Standorten zur Erkundung im Rahmen des Standortauswahlverfahrens betroffenen Bevölkerung setzt ein hohes Maß an Vertrauen in die staatlichen Akteure auf Betreiber- und Genehmigungsseite voraus. Dabei sind ein sicherheitsbasiertes Verfahren sowie Transparenz und Gerechtigkeit zentrale Elemente. Sicherheit sollte dabei sowohl langzeitige wie auch betriebliche Sicherheitsaspekte einschließen.

Damit wird deutlich, dass das weitere Vorgehen im Entsorgungsprozess auf der einen Seite von vornherein transdisziplinär angelegt sein muss und damit eine enge Zusammenarbeit zwischen Gesellschaftswissenschaften und Natur-/Technikwissenschaften erfordert, um frühzeitig schon zu Beginn des Verfahrens einerseits Besorgnisse und Bedenken der Öffentlichkeit aufzugreifen und in den technischen Prozess zu integrieren und um andererseits naturwissenschaftlich-technische Rahmenbedingungen und Sachverhalte verständlich und überzeugend in die Öffentlichkeit zu kommunizieren. Auf der anderen Seite muss das weitere Vorgehen im Entsorgungsprozess von vornherein auch interdisziplinär angelegt sein, sowohl auf der Seite der Gesellschaftswissenschaften wie auch auf der Seite der Natur- und Technikwissenschaften.

Ausgehend von den vorstehenden Ausführungen besteht ein wesentliches Ziel des ENTRIA-Forschungsprojekts auf der Seite der Natur- und Technikwissenschaften damit in der interdisziplinären Analyse der drei vorstehend genannten Entsorgungsoptionen hinsichtlich ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile sowie darauf aufbauend in der Entwicklung von Bewertungsgrundlagen für einen umfassenden Vergleich dieser Entsorgungsoptionen. Dieses Bewertungskonzept ist im Teilprojekt TP 4.3 zu entwickeln. Im Rahmen der von Teilprojekt TP 4.3 durchgeführten Arbeiten ist der Begriff der Risikolandschaft eingeführt worden, um die Risiken der unterschiedlichen Entsorgungsoptionen während der Betriebszeit sowie auch nach Ende der Betriebszeit gegenüberzustellen. Auf einer gemeinsamen Sitzung der Teilprojekte TP 4.3, VP 5, VP 6 und VP 7 am 29.07.2014 ist dieser Begriff der Risikolandschaft diskutiert worden. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Diskussion ist ein Positionspapier mit ersten Gedanken zu einer Operationalisierung des Begriffs der Risikolandschaft in Bezug auf den Vergleich der Entsorgungsoptionen erarbeitet worden, welches zur weiteren Diskussion innerhalb des ENTRIA-Forschungsprojektes zur Verfügung gestellt worden ist, *Lux et al. (2014b)*.

Ein weiterer Vorschlag zur Konkretisierung des Bewertungskonzeptes ist von *Kreusch & Neumann (2015)* in das ENTRIA-Forschungsprojekt eingeführt worden. Demnach könnte ein Vergleich der Entsorgungsoptionen auf Basis von so genannten Sicherheitsfunktionen durchgeführt werden, die somit dann zentraler Bestandteil der Bewertungsgrundlagen werden. Unter einer Sicherheitsfunktion ist nach *BMU (2010)* zu verstehen eine Eigenschaft im Endlagersystem oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die bzw. der in einem Teilsystem oder in einer Einzelkomponente des Endlagersystems dazu beiträgt, die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen zu gewährleisten. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass durch das Zusammenwirken mehrerer und verschiedenartiger Sicherheitsfunktionen die Erfüllung aller sicherheitstechnischen Anforderungen sowohl in der mehrere Jahrzehnte andauernden Betriebsphase wie auch dann insbesondere nach Verschluss des Tiefenlagers und Überführung in ein Endlager langfristig in der Nachverschluss-

phase des Endlagers entsprechend dem Multibarrierenprinzip sowohl redundant (durch Anordnung mehrerer unabhängiger Barrieren) wie auch diversitär (durch Ausnutzung unterschiedlicher unabhängiger Wirkmechanismen für die verschiedenen Barrieren) realisiert werden kann.

Im Rahmen der Entwicklung eines Konzeptes zur Bewertung von unterschiedlichen Entsorgungsoptionen kann die Vorgabe von sicherheitstechnischen Anforderungen somit als ein Schlüsselkonzept angesehen werden, über das dann die leitende Strukturierung bei der Entwicklung der Bewertungsgrundlagen erfolgt. Ein wesentlicher Teil der sicherheitstechnischen Anforderungen umfasst damit die Ermittlung und Dokumentation der Langzeitsicherheit des Endlagersystems. Dieses Endlagersystem besteht aus mehreren Komponenten und zwar

- dem Endlagerbergwerk mit den Einlagerungs- und Infrastrukturbereichen sowie den Zugangsschächten,
- den geotechnischen Barrieren zum Verschluss der Zugangsrubengebäude zu den Einlagerungsbereichen und der Zugangsschächte,
- dem Nahfeld des Endlagerbergwerks mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich als geologischer Barriere im engeren Sinn,
- weiteren geologischen Formationen mit Abdicht- und Rückhaltungsfunktion als geologischen Barrieren im weiteren Sinn sowie
- dem Fernfeld mit der geohydraulischen Situation außerhalb der geologischen Barrieren in Oberflächennähe und schließlich
- der Biosphäre.

Voraussetzung für die Ermittlung und Dokumentation der Langzeitsicherheit des Endlagersystems, die auch als Langzeitsicherheitsnachweis bezeichnet wird, ist die prognostische Ermittlung des zu erwartenden Endlagersystemverhaltens unter den relevanten Einwirkungen, die vornehmlich aus den eher kurz- bis mittelfristig wirksam werdenden technogen bedingten Eingriffen in das Gebirge wie zum Beispiel Hohlraumauffahrungen und Abfallablagung mit Wärmeentwicklung und Gasbildung sowie den eher langfristig zu erwartenden geogen bedingten Einflüssen wie zum Beispiel Erdbeben oder eiszeitlichen Überdeckungen resultieren. Die Vorgehensweise zur Erarbeitung des Langzeitsicherheitsnachweises mit den Anforderungen an die methodischen Ansätze ist aus *BMU (2010)* zu entnehmen. Dort heißt es in Abschnitt 7.3:

Für die numerische Analyse⁵ des Langzeitverhaltens des Endlagers im Hinblick auf

- *Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs,*
- *radiologische Konsequenzen,*
- *Mobilisierung natürlicher Radionuklide,*
- *Eigenschaften von Behälter und Versatz sowie*
- *Eigenschaften der Verschlussbauwerke*

⁵ Analyse anhand von Computersimulationen

sind deterministische Rechnungen⁶ auf der Basis einer möglichst realitätsnahen Modellierung (z.B. Medianwerte als Eingangsparameter) durchzuführen. Zielsetzungen dieser Rechnungen sind:

- Demonstration des erwarteten Systemverhaltens,
- Ableitung von gegebenenfalls zeitabhängigen Anforderungen an die Komponenten des Endlagersystems sowie
- Optimierung des Endlagersystems.

Zusätzlich sind Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen⁷ durchzuführen, um den möglichen Lösungsraum aufzuzeigen sowie den Einfluss der Unsicherheiten einschätzen zu können. Dabei sind auch Modellunsicherheiten zu berücksichtigen. Die Einhaltung von numerischen Kriterien, die sich aus diesen Sicherheitsanalysen ergeben oder daraus abgeleitet wurden, muss unter Berücksichtigung der Unsicherheiten mit ausreichender Zuverlässigkeit gegeben sein. Bei den Analysen gegebenenfalls resultierende numerische Verletzungen dieser Kriterien sind in ihrer Relevanz zu bewerten.

Weiter sind gegebenenfalls Referenzmodelle⁸ (z.B. Referenzbiosphäre) für den Zeitraum zu verwenden, für den die Unsicherheit der Eingangsdaten und Rechenmodelle hoch ist. Für diesen Zeitraum sind ergänzend auch qualitative Argumente heranzuziehen.

Diesem methodischen Ansatz mit einer Kombination aus deterministisch geprägten, möglichst realitätsnahen Simulationen zum zukünftigen Verhalten des Endlagersystems und hier insbesondere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sowie ergänzenden, eher probabilistisch orientierten Untersuchungen zu den sicherheitsbezogenen Auswirkungen von Parameterstrebereiten und Systemungewissheiten insbesondere im Hinblick auf die Ermittlung von potentiellen Schadstofffreisetzungen aus dem Endlager wird hier im Grundsatz auch mit Blick auf die Erarbeitung von Grundlagen für den angestrebten Optionenvergleich gefolgt, wengleich im Rahmen von ENTRIA keine systematischen Sicherheitsanalysen durchgeführt werden.

Die am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal im Rahmen der ENTRIA-Teilprojekte VP 5 und auch VP 6 durchgeführten Arbeiten befassen sich zentral mit dem langzeitigen Verhalten eines Endlagers im Nahfeldbereich und haben vor diesem Hintergrund die folgenden wesentlichen Zielsetzungen:

- Verbesserung von Prozess- und Systemverständnis zum Verhalten eines Endlagers im Salinar- und Tonsteingebirge nach Verschluss ohne und mit Vorkehrungen zu Monitoring und Rückholbarkeit im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Sicherheitsfunktionen (Reduzierung von Defiziten, Stärkung der Robustheit der Nachweisführung),
- Mitwirkung bei der Entwicklung eines grundsätzlichen Endlagerkonzeptes mit der Möglichkeit zur Fehlerkorrektur auch noch nach Einlagerung vor einem endgültigen Verschluss,

⁶ Identische Eingabedaten (z.B. Materialparameter, Szenarien) führen in unterschiedlichen Berechnungsläufen zu identischen Ausgabedaten

⁷ Analyse zum Einfluss von Schwankungen in den Eingabedaten (z.B. Streuung der Materialparameter in einer vorgegebenen Bandbreite) auf die Ausgabedaten

⁸ Stark abstrahiertes Modell in Anbetracht vielfältiger Ungewissheiten im Vergleich zu realitätsnäheren Modellen

- exemplarische Bereitstellung von Zustandsgrößenverläufen im Tiefenlager und seinem Umfeld als potentiellen Messgrößen zur Überwachung des Anlagenverhaltens,
- Bereitstellung von Erkenntnissen und Daten zur Unterstützung der Entwicklung von Bewertungsgrundlagen für einen Vergleich des Endlagersystemverhaltens nach endgültigem Verschluss auf der Basis von Sicherheitsfunktionen sowohl für den Fall ohne wie auch für den Fall mit Vorkehrungen zu Monitoring und Rückholbarkeit.

Dieses Aufgabenfeld schließt ein, dass im Fall der Entsorgungsoption Tiefenlagerung mit Monitoring und nachfolgender Endlagerung in die Untersuchung des Endlagerverhaltens auch die vorlaufende Phase des Tiefenlagers mit Betriebs- und Monitoringphase in angemessener Abstraktion zu integrieren ist.

Die Entwicklung eines grundsätzlichen Endlagerkonzepts mit der Möglichkeit zur Fehlerkorrektur auch noch nach Abfalleinlagerung vor endgültigem Verschluss als alternative Endlagerungsoption, die hier unter der Bezeichnung Tiefenlager / Endlager geführt wird, hat im Hinblick auf die Durchführung eines Standortauswahlverfahrens auch das Ziel, die grundsätzliche Akzeptabilität bzw. Akzeptanz⁹ des Konzepts der Entsorgung hochradioaktiver Wärme entwickelnder Abfälle in tiefen geologischen Formationen bei der von Erkundungsmaßnahmen betroffenen Bevölkerung zu verbessern – so eine zentrale These in ENTRIA – und weist damit auch eine stark transdisziplinär geprägte Komponente auf. Ein derartiges Konzept muss daher aber auch gleichzeitig schon heute in seinen zentralen Komponenten technisch realisierbar sein ohne sicherheitlich signifikante Nachteile, z.B. im Hinblick auf den sicherheitstechnisch hinreichenden Erhalt der geogen vorliegenden Qualität der geologischen Barriere bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Daraus resultieren signifikant interdisziplinär geprägte Aspekte, z.B. hinsichtlich Endlagerkonfiguration, Behälterkonstruktion, Rückholungstechnik und prognostischer Sicherheitsanalyse – nicht nur bezogen auf die Einlagerungsphase, sondern auch auf die Monitoringphase nach Beendigung der Einlagerungsphase. Numerische Modellierungen, wie sie exemplarisch im vorliegenden Arbeitsbericht vorgestellt werden, könnten wichtige Erkenntnisse zum Erhalt der Barrierenintegrität liefern.

Mit Blick auf die Ausgestaltung des Standortauswahlverfahrens ist auch zu bedenken, dass die Möglichkeit zur Reversibilität des Entsorgungsprozesses in tiefen geologischen Formationen nach Ende der Einlagerungsphase und vor dem endgültigen Verschluss 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 Endlagerbergwerk. Ein zusätzlicher untertägiger Raumbedarf bei einer Endlageroption mit implementierter Reversibilität auch noch nach Ende der Einlagerungsphase kann sich z.B. ergeben aus Temperaturbegrenzungen, aus der Rückholungstechnik und aus dem Monitoringverfahren.

Der Vergleich der Entsorgungsoptionen in einem Bergwerk in einer tiefen geologischen Formation ohne und mit Vorkehrungen zu einem direkten Monitoring beruht damit auf der standort- bzw. referenzmodellbezogenen Identifizierung von sicherheitstechnischen Anforderungen, die seit einigen Jahren international in so genannten Sicherheitsfunktionen (safety functions) systematisiert und operationalisiert werden.

⁹ siehe *Grunwald (2005)*

1.2 Sicherheitsfunktionen als zentraler Bestandteil der Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen ohne bzw. mit implementierter Möglichkeit zum direkten Monitoring

1.2.1 Einführung in das Konzept von Sicherheitsfunktionen am Beispiel der Entsorgungsoption Wartungsfreie Tiefenlagerung (Endlagerung)

Grundsätzlich muss für die Endlagerung radioaktiver Abfälle im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises die langfristige Funktionalität eines einen Schadstoffaustritt verhindernden Multibarrierensystems dokumentiert werden. Dabei werden geologische, geotechnische und technische Barrieren unterschieden. Welche Barrieren die langfristige Sicherheit des Endlagers vornehmlich gewährleisten, hängt entscheidend von den Barriereigenschaften der für die Endlagerung vorgesehenen geologischen Formation ab. Dabei besteht grundsätzlich die Möglichkeit, ein Endlager in salinaren, sedimentären oder kristallinen Formationen zu errichten. Die geogenen Barriereigenschaften dieser geologischen Formationen unterscheiden sich dabei beträchtlich. Während bei Salinar- und Tonsteinformationen aufgrund ihrer bei geeigneter Standortauswahl grundsätzlich günstigen geohydraulischen Eigenschaften das Gebirge die zentrale Funktion zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit übernimmt, muss diese Funktion bei kristallinem Gebirge entsprechend den deutlich weniger günstigen geohydraulischen Formationseigenschaften infolge eines hydraulisch wirksamen Trennflächengefüges den technischen und geotechnischen Barrieren zugewiesen werden. Dieser bezüglich der Barriereigenschaften relevanter geologischer Formationen differenzierte Ansatz in der Einschätzung der geohydraulischen Formationseigenschaften beruht auf Aussagen geologischer Experten, die für Deutschland die Identifizierung eines hinreichend großen, nicht durch ein Trennflächengefüge geohydraulisch nachhaltig nachteilig beeinflussten Kristallinbereichs nicht erwarten lassen.

Sicherheitsbezogen zentrale Komponenten eines Endlagers im Salinar- und im Tonsteingebirge sind damit

- (1) Existenz und Erhalt einer sicherheitstechnisch in hinreichendem Maß qualifizierten geologischen Barriere,
- (2) Konstruktion und Ausführung sicherheitstechnisch hinreichend qualifizierter geotechnischer Barrieren in Form von Abdichtungs- bzw. Verschlussystemen im Hinblick auf eine dem Wirtsgesteinstypus adäquate Kompensation der bergbautechnisch bedingten Perforationen der geologischen Barriere sowie
- (3) Konstruktion und Ausführung hinreichend qualifizierter Behälter mit der Funktion einer technischen Barriere, die sowohl den Arbeits- und Gesundheitsschutz während Transport und Einlagerung gewährleisten wie auch Rückholbarkeit und Bergbarkeit in dem jeweilig geforderten Zeitrahmen ermöglichen.

Nach vorstehenden Ausführungen wird zurzeit für die deutschen Untergrundverhältnisse davon ausgegangen, dass sowohl im Salinargebirge wie auch im Tonsteingebirge Standorte mit einem geeigneten geologischen Barrierensystem vorhanden sind, während für das Kristallinegebirge in Deutschland aufgrund der geotektonischen Verhältnisse hinreichend räumlich ausgedehnte intakte und auch von über Tage aus detektierbare Bereiche eher ausgeschlossen werden. Das Defizit bei der Leistungsfähigkeit der geologischen Barriere muss im Fall eines nicht in hinreichendem Maße intakten Kristallinegebirges durch technische Barrieren (Behälter und behälternahe Versatz) ausgeglichen werden. Damit geht in diesem Fall

die zentrale Bedeutung der geologischen Barriere für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit auf die technische Barrieren Behälter und behälternahe Versatz sowie die geotechnische Barriere Bohrloch- bzw. Streckenversatz über. Das Kristallingebirge übernimmt nunmehr lediglich eine mechanische Schutzfunktion.

Eine intensive wissenschaftliche Auseinandersetzung zum Vergleich von Endlagersystemen in den beiden Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge ist erfolgt im Rahmen des Forschungsprojekts VerSi – Durchführung vergleichender Langzeitsicherheitsanalysen für verschiedene geologische Situationen zur Evaluierung der Methodik und Instrumentarien, *VerSi (2010)*. In diesem Forschungsprojekt ist ein Verfahren zur vergleichenden Bewertung von Standorten für die Endlagerung Wärme entwickelnder (hochradioaktiver und langlebiger mittelradioaktiver) Abfälle auf sicherheitsanalytischer Basis entwickelt worden. Das in VerSi entwickelte Verfahren basiert im Wesentlichen zunächst auf der Ableitung von Sicherheitsfunktionen sowie dann nachfolgend auf der Bewertung ihrer Relevanz und Robustheit anhand von Abwägungskriterien. Unter Relevanz ist dabei zu verstehen die Bedeutung einer Sicherheitsfunktion für den langfristigen Einschluss der eingelagerten Abfälle und insbesondere der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Robustheit meint die Zuverlässigkeit und Qualität und somit die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen.

Eine ausführliche Dokumentation dieses Verfahrens ist *VerSi (2010)* zu entnehmen. Demnach besteht das Verfahren aus den folgenden 7 Verfahrensschritten:

- (1) Erstellung eines synoptischen Sachstandberichts,
- (2) Ableitung der Sicherheitsfunktionen und Aufbereitung für den Endlagersystemvergleich,
- (3) Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen hinsichtlich ihrer Bedeutung bei der Erfüllung der Globalanforderung des Radionuklideinschlusses im einschlusswirksamen Gebirgsbereich,
- (4) globale Standortcharakterisierung (systematische Zusammenstellung geometrischer, geologischer, hydraulischer, hydrogeologischer, geomechanischer und erdgeschichtlicher Eigenschaften der zu vergleichenden Standorte),
- (5) Ermittlung der Robustheit der schadstoffrückhaltenden Sicherheitsfunktionen (RSF) durch
 - (a) Identifizierung der die relevanten rückhaltenden Sicherheitsfunktionen charakterisierenden Parameter,
 - (b) Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der die RSF charakterisierenden materiellen Eigenschaften (Parameter) bzgl. der Teilaspekte
 - (i) Charakterisierbarkeit der Parametergröße in Abhängigkeit von der Untersuchungsmethode,
 - (ii) räumliche Charakterisierbarkeit der Parametergröße,

- (iii) Aussagesicherheit aufgrund des Untersuchungsaufwandes unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus (ii)
- und anschließende Aggregation der Bewertungen aus (i)-(iii),
- (c) Ermittlung der Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter und der einwirkungsbedingten Auswirkungen auf den RSF-Parameter,
 - (d) Ermittlung des Vertrauens in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die RSF-Parameter über den Nachweiszeitraum (Gesamtrobustheit des RSF-Parameters) und
 - (e) Ermittlung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktion (RSF),
- (6) Gegenüberstellung der Bewertungen zu Relevanz und Robustheit der Sicherheitsfunktionen (Korrelation Relevanz-Robustheit) und
- (7) Ergebnisanalyse insbesondere mit der Bewertung von Robustheitsdefiziten.

In *Kreusch & Neumann (2015)* ist das in *VerSi (2010)* vorgeschlagene Verfahren in stark vereinfachter Form am Beispiel einer exemplarisch ausgewählten Sicherheitsfunktion in das Forschungsprojekt ENTRIA eingeführt worden. Des Weiteren sind in *Kreusch & Neumann (2015)* auch erste Überlegungen zur Anwendbarkeit dieses Verfahrens im Rahmen der im Forschungsprojekt ENTRIA angestrebten Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich der in ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen vorgestellt worden, insbesondere auch zu seiner Übertragbarkeit auf die Entsorgungsoption *Oberflächennahe Langzeitzwischenlagerung*.

Daher sollen im Hinblick auf die später in Teilprojekt TP 4.3 vorzunehmende Entwicklung von Bewertungsgrundlagen für einen Optionenvergleich nachfolgend erste Ergebnisse der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 / VP 5.2 für die Entsorgungsoption *Wartungsfreie Tiefenlagerung mit sofortigem Verschluss ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit* vorgestellt werden. Darüber hinaus werden erste Ergebnisse vorgestellt insbesondere für die fluiddynamische Entwicklung des Tiefenlagers der Entsorgungsoption *Tiefenlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit vor endgültigem Verschluss*. Die diesen Untersuchungen zugrundeliegende konfigurative Konzeption des Tiefenlagers ist in ihren Grundzügen in Zusammenarbeit mit dem ENTRIA-Teilprojekt VP 6 entwickelt worden. Die Konzeption baut auf der schon bestehenden Konzeption eines Endlagers zur wartungsfreien Tiefenlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit auf und erweitert das Endlagerbergwerk um eine zweite Sohle, die zur längerfristigen Überwachung der Einlagerungsbereiche auch nach Abfalleinlagerung offen gehalten wird und über Bohrlöcher mit der Einlagerungssohle verbunden ist. Über diese Bohrlöcher erfolgen dann Datentransfer und Energieversorgung sowie gegebenenfalls Maßnahmen zum Austausch / Ersatz der Messgeber. Bei Bedarf ist das Abteufen zusätzlicher Messbohrlöcher nicht ausgeschlossen. Diese neuartige zweisöhlige Endlagerkonfiguration mit Einlagerungs- und Monitoringsohle wird beginnend in der Auffahrungs- und Einlagerungsphase über die Monitoringphase dann insbesondere in der anschließenden Nachverschlussphase bezüglich des Langzeitverhaltens analysiert (Fluiddynamik, Erhalt Barrierenintegrität).

In *VerSi (2010)* werden zur Konkretisierung des vorgeschlagenen Bewertungsverfahrens eine Vielzahl von Sicherheitsfunktionen sowie ihre Bewertung hinsichtlich Relevanz und Robustheit für Endlagersysteme im Salinar- und Tonsteingebirge dokumentiert. Im Hinblick auf

die Ausrichtung der Forschungsarbeiten in den Teilprojekten VP 5 und VP 6 entsprechend diesem konzeptionellen Bewertungsansatz erfolgt daher nachstehend zunächst eine vertiefte und zugleich fokussierte Darstellung zum Vergleich von Entsorgungsoptionen anhand von Sicherheitsfunktionen.

1.2.2 Bewertung der Relevanz von Sicherheitsfunktionen anhand von Relevanzklassen

Nach *VerSi (2010)* besteht kein quantitativer Maßstab für die Bewertung der Relevanz von Sicherheitsfunktionen, so dass die Wichtung der Relevanz einer Sicherheitsfunktion nur anhand von Ordinalskalen vorgenommen werden kann. Damit ist dann lediglich eine Ordnungsaussage zur Relevanz der Sicherheitsfunktionen in Form von Relevanzklassen möglich (z.B. wichtiger, weniger wichtig etc.).

In *VerSi (2010)* werden Sicherheitsfunktionen entsprechend ihrer Relevanz in eine von fünf Relevanzklassen eingeteilt. Dabei haben die Sicherheitsfunktionen, die der Klasse 1 zugeordnet wurden, die geringste Relevanz, während die Sicherheitsfunktionen in Klasse 5 die höchste Relevanz für die Gewährleistung der Betriebs- und Langzeitsicherheit haben. Anhand der Einteilung in Relevanzklassen können Sicherheitsfunktionen bzgl. ihrer Relevanz geordnet werden, wobei allerdings die Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Relevanzklassen (Abstände, Spannweite) nicht bekannt sind. Zur Erläuterung dieses Sachverhalts ist in *VerSi (2010)* ausgeführt, dass die Zuordnung einer Sicherheitsfunktion in die Relevanzklasse 4 nicht bedeutet, dass diese doppelt so bedeutsam ist wie Sicherheitsfunktionen der Relevanzklasse 2; vielmehr sind Sicherheitsfunktionen der Relevanzklasse 4 wichtiger als Sicherheitsfunktionen der Relevanzklasse 3 und deutlich wichtiger als Sicherheitsfunktionen der Relevanzklasse 2.

Des Weiteren werden Sicherheitsfunktionen, die im Hinblick auf die übergeordnete Anforderung der Radionuklidrückhaltung im Endlagersystem bzw. präziser innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unverzichtbar sind, grundsätzlich der höchsten Relevanzklasse 5 zugeordnet. Unverzichtbar bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der (vollständige) Ausfall dieser Sicherheitsfunktion die geforderte Radionuklidrückhaltung des gesamten Endlagersystems in Frage stellen könnte. Der Relevanzklasse 1 werden nach *VerSi (2010)* dagegen solche Sicherheitsfunktionen zugeordnet, die konzeptionell für den jeweiligen Betrachtungszeitraum oder für das jeweilige Endlagerkonzept irrelevant sind, z.B. im Fall eines Endlagers im Salinargebirge die Radionuklidrückhaltung im Salzgrusversatz oder im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch Sorptionsvorgänge.

Die Einordnung der Sicherheitsfunktionen in Relevanzklassen erfolgt im Wesentlichen auf Grundlage von Expertenmeinung(en), denn die Voraussetzungen für eine objektive Quantifizierung der Relevanz werden nach *VerSi (2010)* bei der weit überwiegenderen Zahl von Sicherheitsfunktionen aufgrund eines nur begrenzten Systemverständnisses sowie der nichtlinearen komplexen Verknüpfung von Eigenschaften und Sicherheitsfunktionen im Detail nicht gegeben sein. Da mit der Bestimmung der Relevanz weitreichende Konsequenzen für die spätere Einstufung der Gesamtrobustheit der zu vergleichenden Endlagersysteme verbunden sind, bedürfen die Einteilungen der einzelnen Sicherheitsfunktionen in Relevanzklassen einer sorgfältigen Begründung. Dabei sollte der subjektive Einfluss der Expertenmeinung(en) minimiert werden durch eine neutrale externe Expertengruppe, die ansonsten mit dem Vergleich der Endlagersysteme nicht beauftragt ist.

Nach *VerSi (2010)* muss bei der Einteilung der Sicherheitsfunktionen in Relevanzklassen hinterfragt werden, wie wichtig die Bedeutung der jeweiligen Sicherheitsfunktion für die Erfüllung der übergeordneten Globalanforderung des Radionuklideinschlusses im Endlagersystem bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist. Beurteilt wird also der relative Beitrag jeder Sicherheitsfunktion zur Sicherheit der Endlagersysteme, und zwar differenziert nach dem Endlagersystemtyp und den Wirkungszeiträumen, in *VerSi (2010)* für die Wirtsgesteinsformationen Salinar- und Tonsteingebirge. Eine alleinige Beschränkung der Relevanzklasseneinteilung auf die Bedeutung einer Sicherheitsfunktion innerhalb einer Komponente ist dagegen nach *VerSi (2010)* nicht zulässig, da so am Ende der Vergleichsmethodik kein globaler Gesamtvergleich durchgeführt werden kann.

Bei der Einteilung von Sicherheitsfunktionen in Relevanzklassen ist zu bedenken, dass die Relevanz einer Sicherheitsfunktion zu unterschiedlichen Zeitpunkten nicht zwingend gleich bewertet werden muss. In *Kreusch & Neumann (2015)* wird zu diesem Sachverhalt exemplarisch die zum Salzgrusversatz in einem Endlagersystem im Salinargebirge gehörende Sicherheitsfunktion „Begrenzung / Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport über mit Salzgrus versetzten Strecken im Endlager“ betrachtet. Diese Sicherheitsfunktion wird aufgrund eines anfänglich noch nicht abgeschlossenen Kompaktionsprozesses zunächst in die mittlere Relevanzklasse 3 eingruppiert, da die Lösungsbewegung und der damit gegebenenfalls einhergehende Radionuklidtransport bei noch relativ hoher Salzgrusporosität nicht wesentlich begrenzt und insbesondere nicht verhindert werden. Im Lauf der Zeit erhöht sich allerdings die Relevanz dieser Sicherheitsfunktion aufgrund der zunehmenden Salzgruskompaktion, so dass diese Sicherheitsfunktion schließlich in die höchste Relevanzklasse 5 eingruppiert wird.

1.2.3 Bewertung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen anhand von Robustheitsklassen

Die Ermittlung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen stellt nach *VerSi (2010)* den zentralen und gleichzeitig den aufwändigsten Verfahrensschritt der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik zum Endlagersystemvergleich dar. Entsprechend Abschnitt 1.2.1 setzt sich die Bewertung der Robustheit aus mehreren heterogenen Bewertungsaspekten zusammen, die einer systematischen Abfolge von Prüfungs- und Bewertungsschritten unterzogen werden. Die Robustheitsbewertung erfolgt somit schrittweise.

Bei der Bewertung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen werden in *VerSi (2010)* nur die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen (RSF), d.h. jene Sicherheitsfunktionen, die primär zur Erfüllung der übergeordneten Anforderung des Radionuklideinschlusses im Endlagersystem dienen, anhand ihrer charakteristischen Parameter bewertet. Die integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktionen (ISF) tragen zwar nach *VerSi (2010)* ebenfalls zur Robustheit eines Endlagersystems bei, jedoch in der Weise, dass durch sie die jeweils korrespondierende rückhaltende Sicherheitsfunktion gegenüber äußeren Einwirkungen geschützt wird, also in ihrer Wirkung weitgehend unbeeinträchtigt und damit für den relevanten Zeitraum erhalten bleibt. Der Robustheitsbeitrag, den die jeweiligen ISF durch die Schutzwirkung gegenüber der korrespondierenden RSF liefert, wird infolgedessen bei der Bewertung der Robustheit der RSF im Verfahrensschritt (5c) mit berücksichtigt. Eine separate Bewertung der ISF findet daher nicht statt.

In Analogie zur Vorgehensweise bei der Einteilung der Sicherheitsfunktionen in Relevanzklassen erfolgt die Robustheitseinstufung der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen in *Ver-*

Si (2010) durch Einteilung in eine von fünf Robustheitsklassen (von 5 = sehr hohe Robustheit bis 1 = sehr geringe Robustheit), da quantitative Maßstäbe, nach denen die Robustheit gemessen werden könnte, nicht durchgängig vorhanden sind. Die Zuordnung der Sicherheitsfunktionen zu den Robustheitsklassen erfolgt ebenfalls im Wesentlichen auf Grundlage von Expertenmeinung(en), wobei auch hier eine sorgfältige Begründung erfolgen sollte. Zur Minimierung des subjektiven Einflusses der Expertenmeinung(en) sollte auch die Zuordnung der Sicherheitsfunktionen zu den Robustheitsklassen durch eine neutrale externe Experten-Gruppe erfolgen, die ansonsten mit dem Vergleich der Endlagersysteme nicht beauftragt ist.

1.2.4 Möglichkeiten zur Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen

Wesentliche Aspekte bei der Bewertung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen sind einerseits die Ermittlung der eine Sicherheitsfunktion charakterisierenden materiellen Eigenschaften im Ist-Zustand, andererseits aber auch die Ermittlung der Prognostizierbarkeit dieser Eigenschaften in ihrem zeitlichen Verlauf bis zum Ende des Betrachtungszeitraums, der heutigen Anforderungen entsprechend 1 Million Jahre umfasst, *BMU (2010)*. Im Rahmen der Gesamtbewertung von Endlagersystemen sind dabei insbesondere auch Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Sicherheitsfunktionen innerhalb eines Endlagersystems zu analysieren.

Die Ermittlung der das jeweilige Endlagersystem charakterisierenden materiellen Eigenschaften im gegenwärtigen Zustand beruht auf hinreichend qualifizierten Untersuchungsmethoden (laborativ sowie in situ), während zur hinreichend zuverlässigen Ermittlung der Prognostizierbarkeit dieser Eigenschaften in eine längerfristige Zukunft eine stetige Verbesserung des Prozess- und Systemverständnisses sowie damit einhergehend bzw. darauf aufbauend auch die stetige Verbesserung des Simulationsinstrumentariums (Stoffmodelle und Simulatoren) anzustreben ist. Dabei sind insbesondere diejenigen Prozesse von Bedeutung, die im Lauf der Zeit zu einer Verschlechterung der materiellen Eigenschaften insbesondere der verschiedenartigen Barrieren führen können, z.B. auffahrungs- und offenhaltungsbedingte Entfestigung des konturnahen Gebirges, druckgetriebene Fluidinfiltration, lösungsbedingte Korrosion von Abdichtungsmaterialien.

Diesen zentralen Aspekten der Robustheitsanforderungen entsprechend sind in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1 und VP 5.2 sowohl laborative Untersuchungen zur Analyse ausgewählter Materialeigenschaften vorgesehen wie auch retrospektive Analysen ausgewählter Labor- und Feldversuche zur Verifizierung und Validierung des Simulationsinstrumentariums sowie zur Verbesserung des Prozessverständnisses anhand von so genannten Lokal- bzw. Prozessmodellen. Zusätzlich wird durch rechnerische Simulationen anhand von großräumigen so genannten Global- bzw. Systemmodellen eine Verbesserung des Verständnisses vom langfristigen Endlagersystemverhalten angestrebt, insbesondere im Hinblick auf die im Endlagersystem ablaufenden fluiddynamischen Prozesse, die letztendlich der Träger der Mensch und Umwelt gefährdenden Radionuklidmigration aus den Einlagerungsbereichen des Endlagerbergwerks über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und das Fernfeld in die oberflächennahen Grundwasserhorizonte und dann weiter in die Biosphäre sind.

Vor diesem Hintergrund der Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen auf der Basis des Konzepts von Sicherheitsfunktionen liegt der Fokus der in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod durchgeführten Arbeiten schwerpunktmäßig auf der Verbesserung der Robustheit der in *VerSi (2010)* angegebenen radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktion „Begrenzung / Verhinderung von Lösungsbe-

wegung und Radionuklidtransport“ – und zwar sowohl für die Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge selbst wie auch für die in einem Endlager, welches in einer dieser beiden Wirtsgesteinsformationen errichtet werden soll, eingesetzten Versatzmaterialien (Salzgrus bzw. Bentonit) und Abdichtungsbauwerke. Daher sind zunächst die hier relevanten Sicherheitsfunktionen näher zu betrachten.

Für die beiden Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge ist der Sicherheitsfunktion „Begrenzung / Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ im einschlusswirksamen Gebirgsbereich entsprechend Bild 1.4 in *VerSi (2010)* die höchste Relevanzstufe zugeordnet worden. Die Robustheit dieser Sicherheitsfunktion ist für die Wirtsgesteinsformation Salinargebirge in *VerSi (2010)* als sehr hoch eingestuft worden. Für die Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge sind dieser Sicherheitsfunktion dagegen Robustheitsdefizite attestiert worden, insbesondere im Hinblick auf das Langzeitverhalten des Tonsteingebirges.

Für die beiden Versatzmaterialien Salzgrus und Bentonit wird die Sicherheitsfunktion „Begrenzung / Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ für die ersten 10.000 Jahre entsprechend Bild 1.5 in die Relevanzklasse 3 eingruppiert, und zwar sowohl im abfallbedingt erwärmten Einlagerungsbereich des Endlagerbergwerks wie auch im restlichen nicht wesentlich erwärmten Bereich des Endlagerbergwerks. Für den langzeitigen Einschluss der Radionuklide innerhalb des Endlagersystems wird dieser Sicherheitsfunktion für beide Versatzmaterialien allerdings mit der Zuordnung zu Relevanzklasse 5 eine sehr hohe Relevanz zugesprochen. Insbesondere mit Blick auf das Langzeitverhalten des Salzgrusmaterials wird dieser Sicherheitsfunktion allerdings auch ein Robustheitsdefizit attestiert (derzeit noch nur begrenzte Kompaktion belegbar → konvergenzbedingt erreichbare finale Porosität / Permeabilität noch nicht belegt).

Für die Abdichtungsbauwerke wird der Sicherheitsfunktion „Begrenzung / Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ in den ersten 10.000 Jahren entsprechend Bild 1.6 über die Zuordnung in Relevanzklasse 5 eine sehr hohe Relevanz zugeschrieben. Danach nimmt ihre Relevanz allerdings deutlich ab, da die Radionuklidrückhaltung dann vornehmlich durch die Versatzmaterialien übernommen werden sollte. Ein Robustheitsdefizit

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Radionuklidrückhaltende Si- cherheitsfunktion (RSF)	Relevanz der Sicherheits- funktion Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("un- verzichtbar")				Robustheit der Sicherheits- funktion Ordinale Rangzahlen: 1: sehr geringe Robustheit (bzw. konzeptionell nicht rele- vant=grau) bis 5: sehr hohe Robustheit				Auswertung Differenz der ordinalen Rang- zahlen: Robustheit - Relevanz Ergebnisse < -1 sind ein Hin- weis auf wenig robuste Kompo- nenten			
		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka	
		Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz
49	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuk- lidtransport	5	5	5	5	4	5	2	5	-1	0	-3	0

Bild 1.4 Relevanz, Robustheit und Robustheitsdefizit der Sicherheitsfunktion „Begrenzung / Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ für die beiden Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge, VerSi (2010)

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Radionuklidrückhaltende Si- cherheitsfunktion (RSF)	Relevanz der Sicherheits- funktion Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("un- verzichtbar")				Robustheit der Sicherheits- funktion Ordinale Rangzahlen: 1: sehr geringe Robustheit (bzw. konzeptionell nicht rele- vant=grau) bis 5: sehr hohe Robustheit				Auswertung Differenz der ordinalen Rang- zahlen: Robustheit - Relevanz Ergebnisse < -1 sind ein Hin- weis auf wenig robuste Kompo- nenten			
		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka	
		Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz
ELB													
Versatz- material													
19	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuk- lidtransport	3	3	5	5	4	3	4	3	1	0	-1	-2
Endlager- bergwerk													
Streckenver- satz													
31	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuk- lidtransport	3	3	5	5	4	3	4	3	1	0	-1	-2

Bild 1.5 Relevanz, Robustheit und Robustheitsdefizit der Sicherheitsfunktion „Begrenzung / Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ für die beiden Versatzmaterialien Salzgrus und Bentonit, VerSi (2010)

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Radionuklidrückhaltende Si- cherheitsfunktion (RSF)	Relevanz der Sicherheits- funktion Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("un- verzichtbar")				Robustheit der Sicherheits- funktion Ordinale Rangzahlen: 1: sehr geringe Robustheit (bzw. konzeptionell nicht rele- vant=grau) bis 5: sehr hohe Robustheit				Auswertung Differenz der ordinalen Rang- zahlen: Robustheit - Relevanz Ergebnisse < -1 sind ein Hin- weis auf wenig robuste Kompo- nenten			
		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka	
		Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz
ELB													
Abdich- tung/Damm													
26	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuk- lidtransport	5	5	3	1	4	3	4	1	-1	-2	1	0

Bild 1.6 Relevanz, Robustheit und Robustheitsdefizit der Sicherheitsfunktion „Begrenzung / Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ für Verschlussbauwerke in den beiden Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge, VerSi (2010)

wird für diese Sicherheitsfunktion deshalb nur in den ersten 10.000 Jahren attestiert, insbesondere für die Abdichtungsbauwerke in der Wirtsgesteinsformation Salinargebirge (Permeabilitätserhöhung durch Umlösungsprozesse bei Angriff korrosiver Lösungen).

In den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod werden neben Arbeiten zu der in VerSi (2010) angegebenen radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktion „Begrenzung / Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ auch Arbeiten zu der in VerSi (2010) angegebenen radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktion „Begrenzung / Verzögerung des Lösungszutritts in das bzw. Lösungsaustritts aus dem Endlagerbergwerk durch Verheilung der Auflockerungszonen“ durchgeführt. Diese Sicherheitsfunktion wird in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1 und VP 5.2 analog zur Vorgehensweise in VerSi (2010) in ihrer Wirkung allerdings der Sicherheitsfunktion „Begrenzung / Verhinderung von Lösungsbewe-

gung und Radionuklidtransport“ zugeschlagen und somit nicht explizit in die weiteren Betrachtungen einbezogen.

Neben Arbeiten zu den radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen werden in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod auch Arbeiten zu integritätserhaltenden Sicherheitsfunktionen durchgeführt. Die integritätserhaltenden Sicherheitsfunktionen werden in *VerSi (2010)* nur in Relevanzklassen eingeteilt, nicht aber auch in Robustheitsklassen, da die integritätserhaltenden Sicherheitsfunktionen implizit in den radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen enthalten sind und damit auch in deren Robustheit. In den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod werden die folgenden integritätserhaltenden Sicherheitsfunktionen betrachtet:

- „Geomechanische Stabilisierung: Begrenzung der Auflockerung des konturnahen Wirtsgesteins“ für die Versatzmaterialien (Salzgrus, Bentonit) sowie für die Abdichtungsbauwerke,
- „Temperaturbegrenzung / Integritätserhalt: Ableitung der Zerfallswärme in das Wirtsgestein“ für die Versatzmaterialien (Salzgrus, Bentonit),
- „Geomechanische Stabilisierung: Schutz der hangenden Schichten vor der Bildung von sekundären Wegsamkeiten“ für die Versatzmaterialien (Salzgrus, Bentonit),
- „Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gas- und Flüssigkeitsdrücken bzw. des Bentonitquelldruckes (Tonstein)“ für die beiden Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge,
- „Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen“ für die beiden Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge und
- „Temperaturbegrenzung / Integritätserhalt: Schadloose Aufnahme der Zerfallswärme“ für die beiden Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge.

Die vorstehend zusammengestellten Robustheitsdefizite werden im Folgenden aufgegriffen und in die vorliegende Aufgabenstellung mit Bearbeitungsfeldern und Bearbeitungsstrategien integriert.

1.3 ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 einschließlich VP 5.3 sowie VP 6.7mod

1.3.1 Aufgabenstellung / Bearbeitungsfelder

Vorstehend ist das im Forschungsprojekt VerSi entwickelte Konzept des Vergleichs von Entsorgungsoptionen auf Basis von Sicherheitsfunktionen vorgestellt sowie in einer ersten, noch recht grundsätzlich gehaltenen Form über die radionuklidrückhaltenden sowie die integritätserhaltenden Sicherheitsfunktionen in einen Bezug zu den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod gesetzt worden. Vor diesem für den ENTRIA-Optionenvergleich den Bewertungsrahmen aufspannenden Hintergrund werden im Folgenden nun die Aufgabenstellung bzw. die Bearbeitungsfelder der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 einschließlich VP 5.3 sowie VP 6.7mod detaillierter ausgeführt.

Das ENTRIA-Teilprojekt VP 5 umfasst in insgesamt 3 Arbeitspaketen Forschungsarbeiten zu Einzelaspekten der Entsorgungsoption *Wartungsfreie Tiefenlagerung*. Diese Arbeitspakete werden hier im Sinne einer weiteren Untergliederung des ENTRIA-Teilprojekts VP 5 ebenfalls als Teilprojekte bezeichnet, die im Rahmen einer einheitlichen Nomenklatur in diesem Bericht dann durch die Kurzform VP x.y angesprochen werden. Damit folgt:

- VP 5.1: „THM-gekoppelte Nahfeld-Prozesssimulation im Salinargebirge“: Weiterentwicklung des Instrumentariums zur THM-gekoppelten Nahfeld-Prozesssimulation im Salinargebirge unter besonderer Berücksichtigung der Ausbildung von technogen induzierten sekundären Wegsamkeiten mit den Arbeitspaketen
 - Grundlegende Arbeiten und Verifikation sowie
 - Validierung der erweiterten Nahfeld-Prozesssimulation für das Salinargebirge und Erarbeitung von Schnittstellen zum Simulator für die Sicherheits- bzw. Risikoanalyse (Fernfeld, Biosphäre);
- VP 5.2: „THM-gekoppelte Nahfeld-Prozesssimulation im Tonsteingebirge“: Weiterentwicklung des Instrumentariums zur THM-gekoppelten Nahfeld-Prozesssimulation im Tonsteingebirge unter besonderer Berücksichtigung des 2-Phasenflusses mit den Arbeitspaketen
 - Grundlegende Arbeiten und Verifikation sowie
 - Validierung der erweiterten Nahfeld-Prozesssimulation für das Tonsteingebirge und Erarbeitung von Schnittstellen zum Simulator für die Sicherheits- bzw. Risikoanalyse (Fernfeld, Biosphäre);
- VP 5.3: „Numerische Modellierung von THMC-Prozessen“: Numerische Modellierung thermischer, hydraulischer, mechanischer und chemischer Prozesse (THMC-Prozesse) auf der Basis einer Softwareplattform zur Langzeitsicherheitsanalyse (Simulator für die Sicherheits- und Risikoanalyse mit den Kompartimenten Nahfeld, Fernfeld, Biosphäre).

Die ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 werden am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal bearbeitet, das ENTRIA-Teilprojekt VP 5.3 am Lehrstuhl für Endlagerforschung der TU Clausthal.

Neben den Teilprojekten VP 5.1 und VP 5.2 wird am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal im Vertikalprojekt 6 auch das Teilprojekt VP 6.7 bzw. nach Modifikation der Thematik das Teilprojekt VP 6.7mod bearbeitet:

- VP 6.7 bzw. VP 6.7mod: „Entwicklung eines Konzeptes zur in-situ-Datenerhebung und Demonstration sicherheitsrelevanter Phänomene in der Überwachungsphase eines Tiefenlagers“.

Im ENTRIA-Teilprojekt VP 6.7 waren ursprünglich Arbeiten zur in situ-Datenerhebung und zur Demonstration sicherheitsrelevanter Phänomene in der Überwachungsphase eines Tiefenlagers vorgesehen. Während der Bearbeitung der Vertikalprojekte VP 5 und VP 6 hat sich allerdings insofern Änderungsbedarf ergeben als in den Vertikalprojekten VP 6 und VP 5 für das Tiefenlager mit Überwachung und Rückholbarkeit eine Endlagerkonzeption entwickelt worden ist, die von einer zweisöhligen Konfiguration ausgeht mit der Einlagerungssohle und einer zusätzlichen Überfahrungssohle sowie Verbindungsbohrlöchern zum längerfristigen unmittelbaren Monitoring auch noch nach Ende des Einlagerungsbetriebes, für eine grund-

sätzlich erweiterte Konfiguration des Endlagerbergwerks aber keine langzeitsicherheitsbezogenen Analysen vorgesehen waren. Gegenstand von Teilprojekt VP 6.7mod ist nunmehr die neue zweisöhlige Endlagerbergwerkskonfiguration mit der Analyse der Entwicklung des neu konfigurierten Endlagerbergwerks nach dem Verschluss von zunächst der Einlagerungssohle und später nach Ende der Monitoringphase dann auch der Überwachungssohle. Zentrale Arbeitspakete sind

- grundlegende Arbeiten zur numerischen Analyse der erweiterten Konfiguration und Verifikation sowie
- Durchführung vergleichender Analysen zu endlagerrelevanten Nahfeldprozessen im Salinar- und Tonsteingebirge nach Verschluss der Einlagerungssohle und somit ab Beginn der Überwachungsphase im Hinblick auf den Optionenvergleich.

Die zunächst auch im Fokus des Teilprojekts VP 6.7 stehende Entwicklung eines Konzeptes zu Monitoringaspekten mit in situ-Datenerhebung und Funktionalitätsdemonstration wird in anderen Arbeitspaketen des Teilprojekts VP 6 bearbeitet bzw. in der Bearbeitung zunächst zurückgestellt.

Der hier vorgelegte Arbeitsbericht bezieht sich vornehmlich auf die Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2, dokumentiert aber auch schon einen ersten Arbeitsstand zu Teilprojekt VP 6.7mod.

Im ENTRIA-Teilprojekt VP 5.1 sind nach *ENTRIA (2012)* zur Verbesserung des Prozessverständnisses in Hinsicht auf die physikalische Modellierung (z.B. mit dem in *Wolters (2014)* dokumentierten Stoffmodell *Lux/Wolters*) sowie des verfügbaren Instrumentariums zur Prozesssimulation und zur Langzeitprognose sowohl laborative Untersuchungen wie auch simulationstechnische Weiterentwicklungen vorgesehen. Im Rahmen der laborativen Untersuchungen sind das Infiltrationsverhalten von Gas in Salzgestein unter möglichst realitätsnahen Druckgradienten durch Messung des Volumenstromes sowohl an der Gaseintritts- wie auch an der Gasaustrittsseite sowie die Gasdruckentwicklung im Porenraum von trockenem / feuchtem Versatzmaterial (Salzgrus) im Hinblick auf den Einfluss von Konvergenz- und Gasbildungsprozessen zu betrachten. Die simulationstechnischen Weiterentwicklungen haben zum Ziel, die Analyse des Einflusses thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse auf die langfristige Integrität bzw. Funktionstüchtigkeit der geologischen Barriere(n) sowie der geotechnischen Barrieren zu verbessern. Die zahlenmäßige Charakterisierung sowie die rechnerische Simulation von Fluidströmungsprozessen innerhalb des Endlagernahfeldes und aus dem Endlagernahfeld hinaus sind in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung. Wichtige Einflussfaktoren sind dabei die zeitabhängige Konvergenz der versetzten Endlagerhohlräume und die daraus folgende Reaktion des umgebenden Barrieregebirges mit den induzierten Spannungsumlagerungen und Deformationen, die zeitlich veränderliche hydraulische Leitfähigkeit der geotechnischen Barrieren sowie Existenz und Ausprägung geogen vorgezeichneter geotektonischer Schwachstellen und technogen induzierte sekundäre Wegsamkeiten (Dilatanz, Infiltration) zwischen Endlagerbergwerk und Biosphäre. Ergebnisse der rechnerischen Simulationen zu den Fluidströmungsprozessen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sind über geeignete Schnittstellen weiteren ENTRIA-Teilprojekten zur Sicherheits- bzw. Risikoanalyse zu übergeben, insbesondere unmittelbar dem ENTRIA-Teilprojekt VP 5.3.

Aus den vorstehenden Erläuterungen lassen sich für das ENTRIA-Teilprojekt VP 5.1 folgende Bearbeitungsfelder ableiten:

- Auswertung nationaler und internationaler Literatur,

- Umbau einer bestehenden Versuchsanlage zur Messung der Gasdruckentwicklung im Porenraum von trockenem bzw. feuchtem Versatzmaterial im Hinblick auf die fluidmechanischen Wirkungen sowie Durchführung und Auswertung der entsprechenden laborativen Untersuchungen,
- Umbau einer bestehenden Versuchsanlage zur Messung des Gasinfiltrationsprozesses in ein primär impermeables Salinargestein sowie Durchführung und Auswertung der entsprechenden laborativen Untersuchungen,
- Verifizierung und Validierung der Simulationssoftware,
- Erarbeitung eines Referenzendlagers für das Salinargebirge,
- Definition von Entwicklungsszenarien,
- Durchführung rechnerischer Analysen zum Infiltrationsverhalten von Gas in das Barrieregebirge und in den Streckenversatz im Hinblick auf räumliche Ausbreitung, Zeitverlauf und Gasaufnahme in sekundären Wegsamkeiten mit dem FLAC^{3D}-TOUGH2-Simulator,
- Erarbeitung von Schnittstellen zum Simulator für die Sicherheits- bzw. Risikoanalyse im ENTRIA-Teilprojekt VP 5.3,
- Erstellung eines Abschlussberichts.

Im ENTRIA-Teilprojekt VP 5.2 sind nach *ENTRIA (2012)* ebenfalls laborative Untersuchungen sowie Weiterentwicklungen des Simulationsinstrumentariums vorgesehen. Während die laborativen Untersuchungen der Verbesserung des Prozessverständnisses von 2-Phasenfluss-Prozessen im Tonsteingebirge dienen, sollen Weiterentwicklungen am Simulationsinstrumentarium analog zum ENTRIA-Teilprojekt VP 5.1 ebenfalls die Analyse des Einflusses thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse auf die langfristige Integrität bzw. Funktionstüchtigkeit der geologischen Barriere(n) Tonsteingebirge sowie der geotechnischen Barrieren aus dem Baustoff Bentonit verbessern. Ebenfalls analog zum ENTRIA-Teilprojekt VP 5.1 sind auch im ENTRIA-Teilprojekt VP 5.2 Ergebnisse der rechnerischen Simulationen zu den Fluidströmungsprozessen im Nahbereich des Endlagers über geeignete Schnittstellen weiteren ENTRIA-Teilprojekten zur Sicherheits- bzw. Risikoanalyse zu übergeben, insbesondere unmittelbar dem ENTRIA-Teilprojekt VP 5.3. Daher lassen sich für das ENTRIA-Teilprojekt VP 5.2 folgende Bearbeitungsfelder ableiten:

- Auswertung nationaler und internationaler Literatur,
- Planung einer Versuchsanlage zur Messung von 2-Phasenfluss-Prozessen im Tongestein,
- Konstruktion und Bau einer Versuchsanlage zur Messung von 2-Phasenfluss-Prozessen im Tongestein einschließlich Inbetriebnahme,
- Durchführung und Auswertung laborativer Untersuchungen zu 2-Phasenfluss-Prozessen im Tongestein,
- Verifizierung und Validierung der Simulationssoftware,
- Erarbeitung eines Referenzendlagers für das Tonsteingebirge,
- Definition von Entwicklungsszenarien,

- Durchführung rechnerischer Analysen zu 2-Phasenfluss-Prozessen im Nahfeld eines Endlagers im Wirtsgestein Tonstein mit dem FLAC^{3D}-TOUGH2-Simulator,
- Erarbeitung von Schnittstellen zum Simulator für die Sicherheits- bzw. Risikoanalyse im ENTRIA-Teilprojekt VP 5.3,
- Erstellung eines Abschlussberichts.

Das ENTRIA-Teilprojekt VP 6.7mod befasst sich entsprechend *ENTRIA (2016)* mit der Analyse von Tragverhalten und Fluidodynamik in der Nachverschlussphase eines Tiefenlagers mit Vorkehrungen zu längerfristiger Überwachung auch nach dem Ende der Einlagerung und dann Überführung in ein Endlager. Dabei ist konzeptionell zur längerfristigen Überwachung des Endlagerbergwerksverhaltens auf der Einlagerungssohle eine Überfahrungssohle in das Endlagerbergwerk integriert, die durch Bohrlöcher zum direkten Monitoring der Einlagerungsbereiche mit der Einlagerungssohle verbunden ist. Für eine Entsorgungsoption mit einer derartigen deutlich komplexeren Endlagerbergwerkskonfiguration sind im Rahmen von ENTRIA bislang keine Untersuchungen zu den Auswirkungen der zusätzlichen und längerfristig auch offen zu haltenden Hohlräume mit Blick auf die Barrierenschädigung bzw. den Erhalt einer hinreichenden Barrierenintegrität und damit auf die Langzeitsicherheit vorgesehen gewesen. Das Teilprojekt VP 6.7 ist daher schwerpunktmäßig entsprechend umgewidmet worden zu einem nunmehr modifizierten Teilprojekt VP 6.7mod, dass sich vornehmlich mit TH2M-gekoppelten rechnerischen Simulationen zum Verhalten des Tiefenlagers mit Überfahrungssohle nach Verschluss und im Hinblick auf den Entsorgungsoptionenvergleich mit den möglichen langfristigen Nachteilen bezüglich Langzeitsicherheit befasst. Die geotechnischen Aspekte dieses Tiefenlager-/Endlagerkonzeptes sind nicht Gegenstand der Forschungsarbeiten der dem Lehrstuhl zugeordneten Teilprojekte.

Aus den vorstehenden Erläuterungen lassen sich für das ENTRIA-Teilprojekt VP 6.7mod folgende zentrale Bearbeitungsfelder ableiten:

- Entwicklung einer Endlagerkonzeption mit Überwachungssohle,
- Definition von Entwicklungsszenarien,
- Durchführung rechnerischer Analysen für die Referenzendlager mit Überwachungssohle im Salinar- und Tonsteingebirge,
- Vergleich der Endlagerentwicklungen ohne und mit Überwachungssohle im Hinblick auf Tragverhalten und Fluidodynamik, insbesondere bezüglich langzeitsicherheitsbezogen relevanter Eigenschaften und Parameter,
- Erstellung eines Abschlussberichts.

Zur systematischen Bearbeitung der vorstehend genannten Bearbeitungsfelder in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod ist von diesen Bearbeitungsfeldern ausgehend eine Bearbeitungsstrategie entwickelt worden, die in den folgenden Abschnitten 1.3.2 und 1.3.3 näher erläutert wird. An dieser Bearbeitungsstrategie orientiert sich auch der Aufbau des vorliegenden Lehrstuhlberichtes.

1.3.2 Bearbeitungsstrategie für die Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2

Im Hinblick auf die Langzeitsicherheitsanalyse für ein Endlager in einer tiefen geologischen Gebirgsformation ist das Endlagersystemverhalten für einen Zeitraum von einer Million Jahren und darüber hinaus rechnerisch zu simulieren. Dabei müssen die relevanten, im Endlager ablaufenden physikalischen Prozesse insbesondere im Hinblick auf mechanische, hydraulische und thermische Prozesse sowie deren Wechselwirkung angemessen berücksichtigt werden.

Die in den vorstehenden Abschnitten skizzierten und miteinander gekoppelten TH2M-Prozesse und ihre Wechselwirkungen können im Rahmen einer physikalischen Modellierung durch eine Kombination von physikalisch-mathematischen Beziehungen modelliert werden, wobei diese physikalisch-mathematischen Beziehungen je nach spezifischem Einzelprozess unterschiedlich abstrahiert ausgestaltet sein können und darüber hinaus auch eine mehr oder weniger große Anzahl von Materialparametern enthalten. Diese Materialparameter können entweder durch geeignete Laborexperimente oder auf der Basis von in situ-Untersuchungen unter Berücksichtigung der natürlichen Streuung der Materialeigenschaften von Wirtsgestein und Versatzmaterial sowie den eingesetzten Baustoffen nur im Rahmen einer parameterspezifischen Bandbreite abgeleitet werden. Um den Einfluss der unterschiedlichen Modellierungsansätze und der Materialparameterbandbreiten auf das zu prognostizierende Langzeitverhalten eines Endlagersystems zu analysieren, ist die Durchführung einer probabilistisch basierten Variationsanalyse unerlässlich. Wird diese probabilistisch basierte Variationsanalyse und werden die Materialparametersätze für jede einzelne Simulation im Vorfeld aus der jeweils als realistisch eingeschätzten Bandbreite der einzelnen Materialparameter entsprechend einer geeigneten Zufallsverteilung festgelegt, wird diese Variationsanalyse auch als Monte-Carlo-Simulation bezeichnet. Monte-Carlo-Simulationen umfassen üblicherweise eine sehr große Anzahl unterschiedlicher Variationen.

Aufgrund des enormen Berechnungsaufwands bei TH2M-gekoppelten Simulationen zum langzeitigen Verhalten von Endlagersystemen kann eine auf einer Monte-Carlo-Simulation aufbauende Sicherheitsanalyse nur auf der Basis von geeigneten Vereinfachungen erfolgen. Diese Vereinfachungen erfolgen einerseits durch Abstraktionen in der Übertragung von geometrischen Daten in das Berechnungsmodell, andererseits aber auch durch geeignete Vereinfachungen bei der Modellierung ausgewählter physikalischer Prozesse.

Aus den vorstehenden Erläuterungen zu den im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse notwendigen Vereinfachungen lässt sich die Bearbeitungsstrategie in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1 und VP 5.2 ableiten. Im Rahmen des übergeordneten ENTRIA-Projektziels der Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe werden in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1 und VP 5.2 zum einen Arbeiten zur Verbesserung des Systemverständnisses im Hinblick auf das langfristige Verhalten des Endlagernahfeldsystems mit dem versetzten Endlagerbergwerk und dem jeweils umgebenden Wirtsgestein in den Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge bzw. Tonsteingebirge durchgeführt, zum anderen aber auch Arbeiten zur Verbesserung des Prozessverständnisses im Hinblick auf die im Nahfeld eines verschlossenen Endlagers ablaufenden physikalischen Prozesse. Während bei den Arbeiten zur Verbesserung des Systemverständnisses im Kompartiment Endlagernahfeld vornehmlich die angemessene geometrische Abstraktion des räumlich eine relativ große Ausdehnung aufweisenden Endlagers im Vordergrund steht, ist zur Verbesserung des Prozessverständnisses die angemessene Abbildung der miteinander gekoppelten mechanischen, thermischen und hydraulischen Prozesse von zentraler Bedeutung, wobei die hydraulischen Prozesse auch noch durch die gleichzeitige

Existenz mehrerer fluider Phasen im Porenraum des Wirtsgesteins sowie des Versatzmaterials charakterisiert sein können.

Zur Durchführung der erforderlichen systematisierten geometrischen und physikalischen Abstraktionen werden nachfolgend Berechnungsmodelle auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus eingeführt, die als

- Globalmodelle,
- Funktionalmodelle und
- Lokalmodelle

bezeichnet werden und mit deren Hilfe jeweils unterschiedliche Aufgabenstellungen zur Analyse des Endlagersystemverhaltens und damit zur Dokumentation der Endlagersicherheit bearbeitet werden. Dabei steht im Rahmen der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 das Kompartiment Endlagernahfeld im Fokus. Bild 1.7 zeigt zur Illustration exemplarisch ein Endlagersystem mit insbesondere dem Kompartiment Nahfeld und den durch das Endlagerbergwerk im Wirts- und Barrierengebirge grundsätzlich induzierten und miteinander in Wechselwirkung stehenden physikochemischen Prozessen.

Allein physikalische Modellierung und numerische Simulation der im Salinar- und Tonsteingebirge relevanten Prozesse setzen ein tiefgehendes Prozessverständnis und leistungsfähige sowie prozessbezogen validierte Simulatoren voraus.

Zur Verbesserung des Endlagersystemverständnisses im Kompartiment Nahfeld wird als

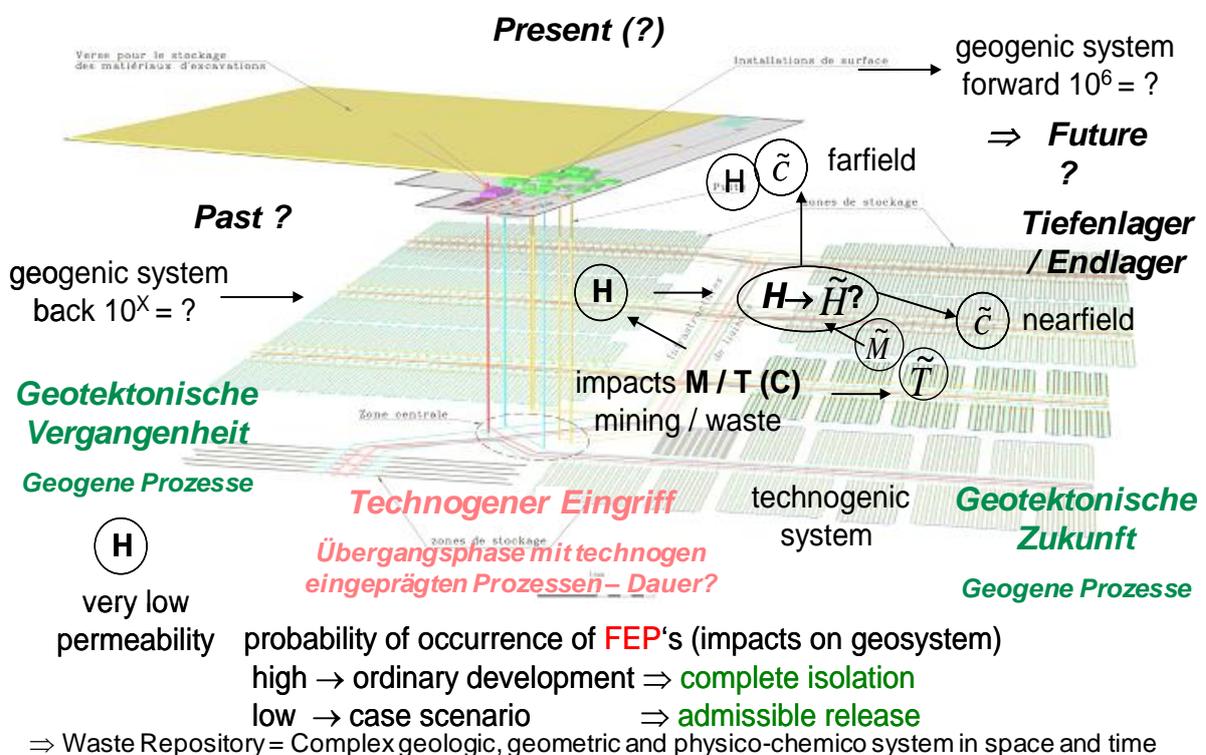


Bild 1.7 THMC-gekoppelte Analyse von physikochemischen Prozessen im Nahfeldbereich auf Prozessebene

Grundlage für die rechnerischen Simulationen ein stilisiertes Endlager mit Endlagerbergwerk und umgebendem Gebirge, insbesondere geologischer Barriere definiert, das dann in ein Berechnungsmodell überführt wird. Dieser Typus eines räumlich weit ausgedehnten Berechnungsmodells wird im Folgenden als *Globalmodell* bezeichnet. Das in das Globalmodell abgebildete stilisierte Endlager umfasst das Endlagerbergwerk, bestehend aus mehreren Einlagerungsteilfeldern, die aus jeweils 6 Einlagerungskammern einschließlich explizit abstrahierten Abfallbehältern sowie den Infrastrukturstrecken und Tagesschächten, den Kammer-, Strecken- und Schachtverschlussbauwerken und schließlich dem Versatzmaterial und den umgebenden Wirtsgesteins- und Barrierenformationen. Damit sind die wesentlichen Komponenten des Nahfelds eines Endlagersystems in das Globalmodell implementiert.

Ausdrücklich ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass im Forschungsprojekt ENTRIA keine unmittelbar umsetzbare Endlagerplanung vorzunehmen ist; vielmehr soll das Globalmodell als Grundlage zur Erarbeitung von sicherheitsbezogenen Aspekten, Argumenten und Bewertungsgrundlagen für den Vergleich der Entsorgungsoptionen übertage – untertage dienen und gleichzeitig auch als Grundlage zur Erarbeitung von Aspekten, Argumenten und Bewertungsgrundlagen für den sicherheitsbezogenen Vergleich der Optionen Entsorgung untertage in verschiedenen Wirtsgesteinsformationen sowohl ohne wie auch mit Monitoring bzw. Rückholbarkeit herangezogen werden können.

Als geowissenschaftlich-geotechnische Grundlage für die Erarbeitung eines Globalmodells für ein stilisiertes Endlagersystem werden die Standortauswahlkriterien des AkEnd herangezogen, die anhand von Ausschluss-, Mindestanforderungs- und Abwägungskriterien letztendlich wirtsgesteinsunabhängig eine besonders günstige geologische Gesamtsituation definieren, *AkEnd (2002)*. Dabei wird gleichzeitig der Anspruch erhoben, dass diese als besonders günstig charakterisierten geologischen Gesamtsituationen die Sicherheitsanforderungen des BMU aus dem Jahr 2010 erfüllen, die derzeit an die Endlagerung Wärme entwickelnder Abfälle gestellt werden, *BMU (2010)*. Die aktuell von der Endlagerkommission vorgeschlagenen Kriterien konnten aufgrund der zeitlichen Abfolge nicht in das ENTRIA-Projekt integriert werden. Da allerdings abgesehen von einem zusätzlich eingeführten Temperaturkriterium für das Salinargebirge weitgehend die wirtsgesteinsunabhängig formulierten AkEnd-Kriterien von der Endlagerkommission übernommen wurden, sind keine gravierenden konzeptionellen und konfigurativen Auswirkungen zu erwarten. Konzeptionelle und konfigurative Auswirkungen ergeben sich allerdings aus der geforderten Reversibilität. Diese Anforderung ist bereits von Anfang an in das ENTRIA-Projekt aufgenommen worden, so dass hier der zentrale Aspekt des Kommissionsvorschlages bereits berücksichtigt ist.

Mit Blick auf den mit den umfangreichen und komplexen rechnerischen Simulationen verbundenen Berechnungsaufwand ist hier die räumliche Ausdehnung des Globalmodells allerdings angemessen repräsentativ zu begrenzen, so dass in das entwickelte Globalmodell nicht die gesamte vom Bundesamt für Strahlenschutz für Deutschland prognostizierte zu entsorgende Menge an hochaktiven Abfällen implementiert werden kann. Durch eine Variation der geometrischen Konfiguration der Globalmodelle und damit der jeweils abgelagerten Abfallmenge wird die Möglichkeit einer Extrapolation der Simulationsergebnisse auf größere Abfallmengen analysiert.

Zur weiteren Reduzierung des Berechnungsaufwandes ist das Globalmodell auch charakterisiert durch einen einheitlichen, vom jeweiligen Wirtsgestein abhängigen geometrisch einfachen Zuschnitt des Endlagers, der mit seiner regelmäßigen Anordnung eher auf großräumig homogene Gebirgsverhältnisse fokussiert ist, wie sie z.B. im Tonsteingebirge oder in Schichtensalzlagerstätten zu erwarten sind. Komplexere geotektonische Verhältnisse, wie

sie z.B. für den Standort Gorleben in einer Salzstock-Lagerstätte erwartet werden, werden hier nicht betrachtet.

Zudem finden im Rahmen der rechnerischen Simulationen mit dem Globalmodell neben relativ komplexen funktionalen Beziehungen zur physikalischen Modellierung von in einem Endlager ablaufenden, insbesondere fluiddynamischen und thermischen Prozessen für die Modellierung einiger ausgewählter, insbesondere mechanischer Prozesse auch vereinfachende und auf die generalisierte Modellierung fundamentaler Prozessabläufe fokussierte, funktional ausgerichtete Modelle Verwendung. Diese vereinfachenden funktional ausgerichteten physikalischen Prozessmodelle werden im Folgenden als *Funktionalmodelle* bezeichnet.

Funktionalmodelle werden im Rahmen der rechnerischen Simulationen in Verbindung mit den Globalmodellen vordringlich verwendet zur vereinfachten Modellierung der Strecken- bzw. Kammerkonvergenz im Salinargebirge und der damit verbundenen Salzgruskompaktion sowie zur vereinfachten Modellierung von zeitlichen Veränderungen der Gebirgs- bzw. Versatzpermeabilität und/oder der Gebirgs- bzw. Versatzwärmeleitfähigkeit, aber auch der Abdichtungswirkung von geotechnischen Barrieren. Dabei müssen die Funktionalmodelle so aufgebaut sein, dass sie eine Beziehung herstellen zwischen dem relevanten physikalischen oder auch chemischen Prozess und einer in den Globalmodellen enthaltenen, im Grundsatz fluiddynamisch ausgerichteten physikalischen Zustandsgröße. Beispielhaft sind hier zu nennen die Versatzporosität sowie der Porendruck im Salzgrusversatz.

Die physikalische und auch chemische Prozesse mit Blick auf eine Implementierung in ein Globalmodell vereinfachend abbildenden Funktionalmodelle müssen grundsätzlich situativ bzw. konfiguratativ validiert werden – entweder anhand von laborativen Untersuchungen oder durch den Vergleich mit realitätsnäheren Modellierungsansätzen, hier in Verbindung mit der Simulation des TH2M-Verhaltens ausgewählter Endlagersystemteilmole. Dadurch ist sicherzustellen, dass die Funktionalmodelle die im Endlager tatsächlich ablaufenden Prozesse sowohl qualitativ wie auch quantitativ in hinreichender Qualität abbilden können. Die im Rahmen des Vergleichs der Funktionalmodelle mit realitätsnäheren Modellierungsansätzen verwendeten Berechnungsmodelle, die typische Endlagersystem-Teilmodelle abbilden, werden im Folgenden als *Lokalmodelle* bezeichnet.

Lokalmodelle sind damit auch Berechnungsmodelle, mit denen das Prozessverständnis zu den in unterschiedlichen Endlagerkompartimenten und Endlagerkomponenten ablaufenden physikalischen Prozessen verbessert werden soll. Zu diesem Zweck sind die Lokalmodelle im Vergleich zu den Globalmodellen räumlich begrenzt, weisen aber zur Ermittlung von charakteristischen mechanischen, hydraulischen oder thermischen Zustandsgrößen und Prozessabläufen eine erheblich feinere Diskretisierung auf als die Globalmodelle. Durch die feinere Modelldiskretisierung kann einerseits tatsächlich die Geometrie der relevanten Grubenbaue (Ablagerungskammern, Infrastrukturstrecken, Abdichtungsbereiche) mit gegebenenfalls Abfallbehältern, Versatz und/oder geotechnischen Barrieren realitätsnäher abgebildet werden, um so die ablaufenden physikalischen Prozesse genauer analysieren zu können, andererseits finden aber auch lokal größere Spannungs-, Temperatur- oder Fluidruckgradienten durch die feinere Modelldiskretisierung stärkere Berücksichtigung in der numerischen Simulation. Weiterhin berücksichtigen die in den rechnerischen Simulationen mit Lokalmodellen eingesetzten physikalisch-mathematischen Beziehungen zur Modellierung der im Endlager ablaufenden Prozesse deutlich mehr Eigenschaften und Einflussfaktoren und sind daher grundsätzlich realitätsnäher, aber in der numerischen Simulation auch signifikant komplexer als die in den Globalmodellen eingesetzten und mitunter stark abstrahierten Funktionalmo-

delle. Besonders deutlich wird dieser Qualitätsunterschied beim Vergleich des Stoffmodells *Lux/Wolters* für Steinsalz mit dem Funktionalmodell zur Abbildung der Streckenkonvergenz. So kann mit dem Stoffmodell *Lux/Wolters* das Verformungs- und das Schädigungsverhalten in jedem beliebigen Ort des Wirtsgesteins mit seinem Einfluss auf die Verschiebungen an der Streckenkontur beschrieben werden, während durch das Funktionalmodell nur ein integraler Wert zur Streckenkonvergenz ermittelt wird ohne Information darüber, welche Gebirgsbereiche sich in welchem Maße und in welchem mechanischem Zustand dabei deformieren. Allerdings steht bei Simulationen auf Globalmodellebene mit dem implementierten Funktionalmodell Konvergenz nicht das mechanische Verhalten des Gebirges in Strecken- oder Kammerumgebung z.B. in Bezug auf den Nachweis der Standsicherheit oder den Nachweis des Erhalts der Barrierenintegrität mit Anwendung des Dilatanz- oder Fluidruckkriteriums entsprechend *BMU (2010)* im Vordergrund, sondern vielmehr die Fluidynamik als Träger des Radionuklidtransports im Kompartiment Nahfeld.

Das den komplexeren Modellierungsansätzen zugrunde liegende Prozessverständnis beruht auf Erkenntnissen zum Materialverhalten, die vornehmlich zunächst aus laborativen Untersuchungen erhalten werden. Validiert werden diese Modellierungsansätze häufig dann durch retrospektive Analysen von Laborversuchen und Feldbeobachtungen bzw. -experimenten.

Aus den vorstehenden Ausführungen zu Zielsetzungen und Rahmenbedingungen ergibt sich die im Laufe der interdisziplinären Vorhabensbearbeitung modifizierte Bearbeitungsstrategie in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1 und VP 5.2 nunmehr wie folgt:

- Verbesserung des Prozessverständnisses zu den in den Teilprojekten relevanten physikalischen Prozessen, d.h. in VP 5.1 insbesondere zur Gasinfiltration in ein primär impermeables Salinargebirge sowie zur Salzgruskompaktion und ihrem Einfluss auf die Porendruckentwicklung im Porenraum des Salzgruses, in VP 5.2 insbesondere zu 2-Phasenfluss-Prozessen im Tonsteingebirge und gegebenenfalls auch im Bentonit. Zur Verbesserung des Prozessverständnisses werden in beiden Teilprojekten auf Basis von 2- und 3-dimensionalen Lokalmodellen retrospektive Analysen von in der nationalen und internationalen Literatur beschriebenen ausgewählten Feldversuchen durchgeführt. Auch geeignete laborative Untersuchungen werden in die retrospektive Analyse einbezogen.
- Ableitung von Funktionalmodellen aus umfangreichen Variationsanalysen mit Lokalmodellen zu ausgewählten Endlagerteilbereichen mit anschließender Implementierung der Funktionalmodelle in das Simulationsinstrumentarium, hier den FTK-Simulator, *Lux et al. (2015b)*.
- Verbesserung des Systemverständnisses zu generischen Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge anhand von Globalmodellen unter Berücksichtigung der Funktionalmodelle.
- Durchführung eigener laborativer Untersuchungen zum Materialverhalten der beiden untersuchten Wirtsgesteine und des jeweiligen Versatzmaterials, da im Rahmen der vorstehenden theoretisch-numerischen Untersuchungen aufgrund von zu Projektbeginn noch fehlenden eigenen Laborergebnissen vornehmlich aus der Literatur entnommene oder eingeschätzte Materialparameter verwendet werden. Bedingt durch die langen Versuchszeiten sowie die ebenfalls langen Simulationszeiten können die laborativen Untersuchungen allerdings nicht vorlaufend zu den numerischen Untersuchungen durchgeführt werden, sondern nur parallel.

- Auswertung und Darstellung von im Globalmodell berechneten Fluidströmungen im Grubengebäude des stilisierten Endlagersystems sowie in dem das Endlagerbergwerk im Nahfeld umgebenden Wirtsgestein und Übergabe ausgewählter Ergebnisdaten und Erkenntnisse an die Projektpartner zur weiteren Verwendung im Rahmen des ENTRIA-Teilprojekts VP 5.3 und im Hinblick auf die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen in Teilprojekt TP 4.3.

1.3.3 Bearbeitungsstrategie für das Teilprojekt VP 6.7mod

In den Vergleich von Entsorgungsoptionen sind neben der Option einer längerfristigen über-tägigen Zwischenlagerung die Option *Tiefenlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit* und die Option *Tiefenlagerung mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit* einbezogen. Die Um-setzung der Option *Tiefenlagerung mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit* führt entsprechend den gemeinsam mit Teilprojekt VP 6 vereinbarten und in *Stahlmann et al. (2015)* dokumen-tierten Vorgaben zur Endlagerkonzeption mit einem zweisöhligen Endlagerbergwerk beste-hend aus Einlagerungs- und Monitoringsohle sowie den gegenüber Teilprojekt VP 5.1 und VP 5.2 hinzugefügten Verbindungsbohrlöchern zum direkten Monitoring endlagerentwick-lungsrelevanter Zustandsgrößen im Einlagerungsbereich auf zwei charakteristische Zeitab-schnitte nach Beendigung des Einlagerungsbetriebes:

- Zeitabschnitt 1 → Beginn Monitoringphase bis Ende Monitoringphase:

Verfüllung bzw. Verschluss des Tiefenlagerbergwerkes auf der Einlagerungsohle bei gleichzeitiger Offenhaltung des Tiefenlagerbergwerkes auf der Monitoringsohle über ei-nen noch unbestimmten, aber längerfristigen Zeitraum von bis zu einigen hundert Jah-ren,

- Zeitabschnitt 2 → Beginn Nachverschlussphase bis Ende Betrachtungszeitraum:

Überführung des Tiefenlagerbergwerkes in ein Endlager durch Verfüllung und Verschluss des Tiefenlagerbergwerkes auch auf der Monitoringsohle und in den noch offenen Berei-chen der Zugangsschächte.

Aufgrund der nach Projektbeginn vereinbarten Teilprojektgestaltung im Rahmen von ENTRIA ist die Bearbeitung der geotechnischen und messtechnischen Ausgestaltung der Monitoringphase auf der Monitoringsohle dem Vertikalprojekt 6 zugeordnet, während die Bearbeitung des Endlagerverhaltens im Nahbereich in der Nachverschlussphase auch für die Option *Tiefenlagerung mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit* aufgrund der thematischen Nä-he sehr eng mit dem Vertikalprojekt 5 verbunden ist, aber formal in Teilprojekt VP 6.7mod erfolgt.

Die Bearbeitungsstrategie für das Teilprojekt VP 6.7mod orientiert sich damit grundsätzlich an der Bearbeitungsstrategie für die Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2. Den Untersuchungen zum Tragverhalten einzelner relevanter Komponenten des Endlagerbergwerkes und zum fluiddynamischen Verhalten des Endlagersystems im Kompartiment Nahfeld anhand von Lokal-, Funktional- und Globalmodellen wird nunmehr allerdings ein konfigurativ modifizier-tes 2-söhliges Endlagerbergwerk mit Einlagerungs- und Monitoringsohle zugrunde gelegt, das durch folgende Charakteristika geprägt ist:

- Beibehaltung der Endlagerbergwerkskonfigurationen auf der Einlagerungsohle wie in Teilprojekt VP 5.1 (Salinargebirge) und Teilprojekt VP 5.2 (Tonsteingebirge),

- Implementierung eines zusätzlichen Monitoring-Bergwerks auf einer Überfahrungssohle in Verbindung mit der Anordnung von Monitoring-Bohrlöchern zur längerfristigen Überwachung des Bergwerks auf der Einlagerungssohle.

Dabei wird zeitbezogen so vorgegangen, dass nach Ende der Einlagerungsphase der Teilbereich des Tiefenlagerbergwerks auf der Einlagerungssohle verfüllt und verschlossen wird, während der Teilbereich des Tiefenlagerbergwerks auf der Monitoringsohle für einen noch unbestimmten, aber eher längerfristigen Zeitraum von vielleicht einem bis zu mehreren hundert Jahren offen gehalten wird, um von hier aus das mechanische, thermische und hydraulische sowie radiotoxische Verhalten der Einlagerungsfelder zu überwachen. Die Überwachung erfolgt dabei direkt über die Beobachtungsbohrlöcher, die von der Monitoringsohle auf die Einlagerungssohle geteuft sind und die damit beide Sohlen verbinden. In diese Bohrlöcher sind dann Messinstrumente installiert, die endlagerentwicklungsrelevante Parameter aufzeichnen und diese Daten zur Monitoringsohle weitermelden. Bei Fehlfunktion könnten einzelne Messgeber ausgetauscht werden.

Nach der Entscheidung zum Verbleib der Abfälle im Tiefenlager und dem endgültigen Verschluss des Tiefenlagerbergwerks ohne Rückholung der Abfälle und damit auch dem Abschluss der Monitoringphase werden die Verbindungsbohrlöcher und die Strecken auf der Monitoringsohle sowie die noch offenen Schachtbereiche von der Monitoringsohle bis zur Tagesoberfläche endgültig verschlossen bzw. verfüllt. Damit geht das Tiefenlagerbergwerk insgesamt als Endlagerbergwerk bzw. Endlager in die Nachverschlussphase über und bleibt dann sich selbst ohne zusätzliche Nachsorgemaßnahmen und damit nachsorgefrei in seiner geotektonischen Umgebung in seiner weiteren Entwicklung überlassen.

Bei Implementierung dieser Entsorgungsoption in das Standortauswahlverfahren kann aus heutiger Sicht zumindest in dem durch transiente thermische und mechanische Prozesse gekennzeichneten anfänglichen Teil der Übergangsphase nach Verschluss der Einlagerungsbereiche des Tiefenlagers belegt werden, dass sich das Tiefenlager im Nahfeld der Einlagerungssohle sicherheitsbezogen wie geplant oder besser, vielleicht aber auch schlechter als geplant verhält. In beiden Fällen können nachfolgende Generationen ihnen angemessen erscheinende Entscheidungen zum weiteren Umgang mit den abgelagerten Abfällen treffen.

Die Festlegung für die Rahmenbedingungen und den Zeitpunkt des endgültigen Verschlusses des Tiefenlagers und damit seiner Überführung in ein Endlager und damit die finale Entscheidung obliegt den nachfolgenden Generationen dann nach ihren Kriterien, allerdings wird ihnen von dieser Generation auch die Verpflichtung zur Wahrnehmung dieser Aufgabe auferlegt. Inwieweit hieraus weitere Verpflichtungen auch für diese Generation in Bezug auf Kompetenzerhalt, Dokumentation und Finanzvorsorge erwachsen, ist im Rahmen des Standortauswahlgesetzes festzulegen.

Die heute schon vorzunehmende Entwicklung und Implementierung der Entsorgungsoption *Tiefenlagerung mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit* soll damit zukünftigen Generationen grundsätzlich die Möglichkeit der Reversibilität schaffen und bei wider Erwarten sicherheitlich bedenklicher Anlagenentwicklung die Rückholung der Abfälle generell ermöglichen bzw. erleichtern, ohne dabei allerdings das derzeit für erforderlich erachtete Sicherheitsniveau nachhaltig und unangemessen zu reduzieren.

Für das Teilprojekt VP 6.7mod stellt sich vor diesem Hintergrund ausgehend von der Option *Tiefenlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit* die Frage, ob überhaupt und inwieweit die langzeitige Sicherheit des Endlagersystems durch die zusätzliche Anordnung der

Monitoringsohle mit Auffahrung, Offenhaltung und Verschluss zusätzlicher Strecken innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs grundsätzlich und nicht nur graduell nachteilig beeinflusst wird. Damit ergibt sich für das Teilprojekt VP 6.7mod folgende grundsätzliche Bearbeitungsstrategie:

- Erweiterung der Lokal- und Globalmodelle um eine Monitoringsohle mit Anordnung von Bohrlöchern zur Verbindung der Monitoringsohle mit der Einlagerungssohle und Analyse der gegenseitigen thermomechanisch geprägten Beeinflussungen, auch unter dem Aspekt des Erhalts einer hinreichenden Barrierenintegrität → direktes Monitoring,
- Ermittlung der fluiddynamischen Prozesse im Tiefenlager-/Endlagerbergwerk und seinem Nahfeld bei zusätzlicher Anordnung einer Monitoringsohle mit Verbindungsbohrlöchern zur Einlagerungssohle,
- Vergleich der langfristig fluiddynamisch relevanten Parameter für die beiden grundsätzlichen Endlagerbergwerkskonfigurationen,
- Darstellung und Bewertung nachteiliger Folgen für die Langzeitsicherheit aus der Anordnung einer Monitoringsohle mit Verbindungsbohrlöchern zur Einlagerungssohle, insbesondere im Hinblick auf nachteilige Folgewirkungen in Bezug auf die Funktionalität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und die erforderliche räumliche Ausdehnung.

Anzumerken ist in diesem Rahmen abschließend, dass bei der derzeitigen Konzeption für ein *wartungsfreies Tiefenlager ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit* im Salzstock Gorleben über der Einlagerungssohle bereits vorlaufend ein Erkundungsbergwerk und damit eine zweite Sohle aufgefahren wird, die aufgrund des heterogenen Gebirgsbaus in diesem geologischen Strukturtyp zur Erkundung der Gebirgsverhältnisse im Bereich der Einlagerungssohle und einer darauf dann aufbauenden konfigurativen Ausgestaltung der Einlagerungssohle erforderlich ist. Der geplante Abstand beider Sohlen beträgt im Fall des inzwischen stillgelegten Erkundungsbergwerkes Gorleben 40 m. Über zusätzliche, von der Erkundungssohle geteufte Erkundungsbohrlöcher könnten beide Sohlen im Grundsatz miteinander verbunden werden, so dass auch hier ohne großen zusätzlichen Aufwand das Tiefenlager-/Endlagerkonzept mit direktem Monitoring realisierbar gewesen wäre bzw. mit Blick auf das Standortauswahlverfahren im Grundsatz auch noch ist.

Abgesehen von der vielleicht aufgabenbestimmt unterschiedlichen konfigurativen Ausgestaltung einer Erkundungssohle im Vergleich zu einer Monitoringsohle liegen damit im Grundsatz bereits auch heute schon in der derzeitig bevorzugten und ausgearbeiteten Referenz-Endlagerkonzeption für ein Endlager in einer Salzformation Typ Salzstock die wesentlichen Elemente auch für ein zweisöhliges Endlagerbergwerk mit Monitoringfunktion vor. Der wesentliche Unterschied besteht dann lediglich in der längerfristigen Offenhaltung der Monitoringsohle auch nach Beendigung des Einlagerungsbetriebes und Verschluss der Einlagerungssohle sowie den systematisch geteufte Beobachtungsbohrlöchern zwischen den beiden Sohlen.

1.3.4 Stellung der Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 sowie des Teilprojekts VP 6.7mod innerhalb des ENTRIA-Forschungsprojekts

Für die in *ENTRIA (2012)* als Vertikalprojekt definierte Entsorgungsoption eines geologischen Endlagers mit sofortigem Verschluss muss nach *BMU (2010)* die langfristige Wirk-

samkeit der geologischen Barriere und der geotechnischen Barrieren für die relevanten Einwirkungen belegt werden. Dieses Postulat gilt für die Entsorgungsoption Tiefenlager-/Endlagerbergwerk mit längerfristigem Monitoring nach Verschluss gleichermaßen. Der Beleg des dauerhaft sicheren und nachsorgefreien Einschlusses der Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) in der wahrscheinlichen Endlagersystementwicklung (wE) und die Analyse potentieller großräumiger Fluidströme mit Schadstoffaustrag aus dem Endlager in weniger wahrscheinlichen Endlagersystementwicklungen (wwE) mit dem Nachweis eines immer noch sicheren Einschlusses gegenüber der Biosphäre sind zentrale Aspekte der Langzeitsicherheitsanalyse und im Hinblick auf den Vergleich von Entsorgungsoptionen damit auch Teil des ENTRIA-Teilprojektes TP 4.3 „Interdisziplinäre Risikoforschung“. Grundlagen für diese Bewertung werden unter anderem auch in den Teilprojekten VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod erarbeitet.

Im Rahmen der rechnerischen Simulation des langfristigen Tiefenlager-/Endlagersystemverhaltens kommt der Wärmeleistung und dem Gasbildungspotential der Einlagerungsbehälter eine signifikante Bedeutung zu, so dass eine unmittelbare Schnittstelle zum ENTRIA-Teilprojekt VP 6.5 besteht, in dem die Entwicklung eines generischen Endlagerbehälters unter Berücksichtigung u.a. seiner thermischen Eigenschaften (Wärmeleistung) und seiner chemischen Eigenschaften (korrosionsbedingtes Gasbildungspotential) angestrebt wird.

2 Grundlagen zur Modellierung und Simulation von TH2M-gekoppelten Prozessen in Tiefenlager-/Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge

Während der Betriebs- und insbesondere auch während der Nachbetriebsphase treten innerhalb einer untertägigen Entsorgungsanlage in tiefen geologischen Formationen sowie im umgebenden Wirtsgestein sehr komplexe thermisch-hydraulisch-mechanisch (THM-)gekoppelte physikalische Prozesse auf. Aus geohydraulischer Sicht werden diese Prozesse durch das gleichzeitige Vorhandensein einer Gas- und einer Flüssigphase zusätzlich verkompliziert, da die Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Phasen im Rahmen rechnerischer Simulationen der somit ablaufenden TH2M-gekoppelten physikalischen Prozesse zu berücksichtigen sind.

Die rechnerische Modellierung der thermischen Prozesse (Wärmeleitung = konduktiver Wärmetransport) in unterschiedlichen Wirtsgesteinen und Versatzmaterialien erfolgt für alle Materialien üblicherweise mit Hilfe des Modellierungsansatzes nach *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)* als Funktion der Flüssigkeitssättigung anzusehen ist.

Zusätzlich zu den Wärmetransportprozessen müssen im Rahmen der physikalischen Modellierung der thermischen Prozesse, die in einem Tiefenlager-/Endlagersystem für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle ablaufen können, auch diskrete Wärmequellen berücksichtigt werden. Über diese diskreten Wärmequellen wird die Wärmeentwicklung in den Abfallbehältern in das Simulationsmodell eingetragen.

Analog zur rechnerischen Modellierung der thermischen Prozesse verhält es sich auch bei der rechnerischen Modellierung von Flüssigkeits- und Gasströmungsprozessen. Diese erfolgt üblicherweise mit Hilfe des Strömungsmodells nach *Darcy (1856)*, wobei die Strömungsgleichungen bei gleichzeitigem Vorhandensein von zwei fluiden Phasen für jede Fluidphase einzeln angewendet werden. Allerdings sind auch die dabei relevanten Materialparameter nicht konstant, sondern z.B. im Salzgrus abhängig von der Porosität und im Steinsalzgebirge abhängig von der schädigungsbedingten Gefügeauflockerung sowie vom Spannungszustand.

Während zur rechnerischen 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 Modellierungsansätzen zur Verfügung, die sich nicht nur bezogen auf die verschiedenen Wirtsgesteine und Versatzmaterialien gravierend unterscheiden, sondern auch für spezifische Materialarten eine große Bandbreite an Modellierungsansätzen aufweisen. Exemplarisch ist an dieser Stelle auf die unterschiedlichen 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 sowie thermomechanisch bzw. hydromechanisch induzierte Gefügeschädigung und 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).

Im Rahmen der Bearbeitung des ENTRIA-Teilprojekts VP 5.1 wird für Steinsalz das am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal entwickelte und in *Wolters (2014)* 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) und bildet damit im Rahmen der Bearbeitung des ENTRIA-Teilprojekts VP 5.1 die Grundlage für die durchgeführten numerischen Simulationen zu den im Umfeld eines im Salinargebirge errichteten Tiefenlager-/Endlagerbergwerks ablaufenden komplexen thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Prozessen. Das Stoffmodell *Lux/Wolters* ist modular aufgebaut mit einem (thermo)mechanischem Modul und einem Kopplungsmodul zu hydraulischen und thermischen Modulen. Die unmittelbar die mechanischen Eigenschaften beeinflussenden thermischen und hydraulischen Einwirkungen sind in den mechanischen Modul integriert. Bild 2.1 gibt einen schematischen Überblick zum Stoffmodell *Lux/Wolters*, fokussiert auf die Modellierung mechanischer Prozesse.

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, das auf einer Weiterentwicklung der Stoffmodelle *Lubby2* und *Hou/Lux* beruht, *Lux (1984)*, *Hou (2002)*. Bei den viskosen Deformationsprozessen werden transiente, stationäre und akzelerierte Kriechprozesse modelliert, wobei die akzelerierten Deformationsprozesse auf die Entstehung bzw. auch nachfolgend auf die Rückbildung von Gefügeschädigungen zurückzuführen sind. 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 Dilatanzentwicklung und der damit einhergehenden schädigungs- bzw. verheilungsinduzierten Deformationen möglich.

Aus Bild 2.1 ist zu ersehen, dass die Gesamtverzerrungsrate $\dot{\epsilon}_{ij}$, die sich bei einem vorgegebenen Belastungszustand einstellt, im Stoffmodell *Lux/Wolters* entsprechend der *Boltzmannschen* Hypothese von der Additivität der Verzerrungsratenanteile beschrieben wird durch eine additive Überlagerung der einzelnen Verzerrungsratenanteile:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^v + \dot{\epsilon}_{ij}^d + \dot{\epsilon}_{ij}^h \quad (2.1)$$

mit

$\dot{\epsilon}_{ij}^e$ - elastische Verzerrungsrate in d^{-1} ,

$\dot{\epsilon}_{ij}^v$ - viskose Verzerrungsrate in d^{-1} ,

$\dot{\epsilon}_{ij}^d$ - schädigungsinduzierte Verzerrungsrate in d^{-1} und

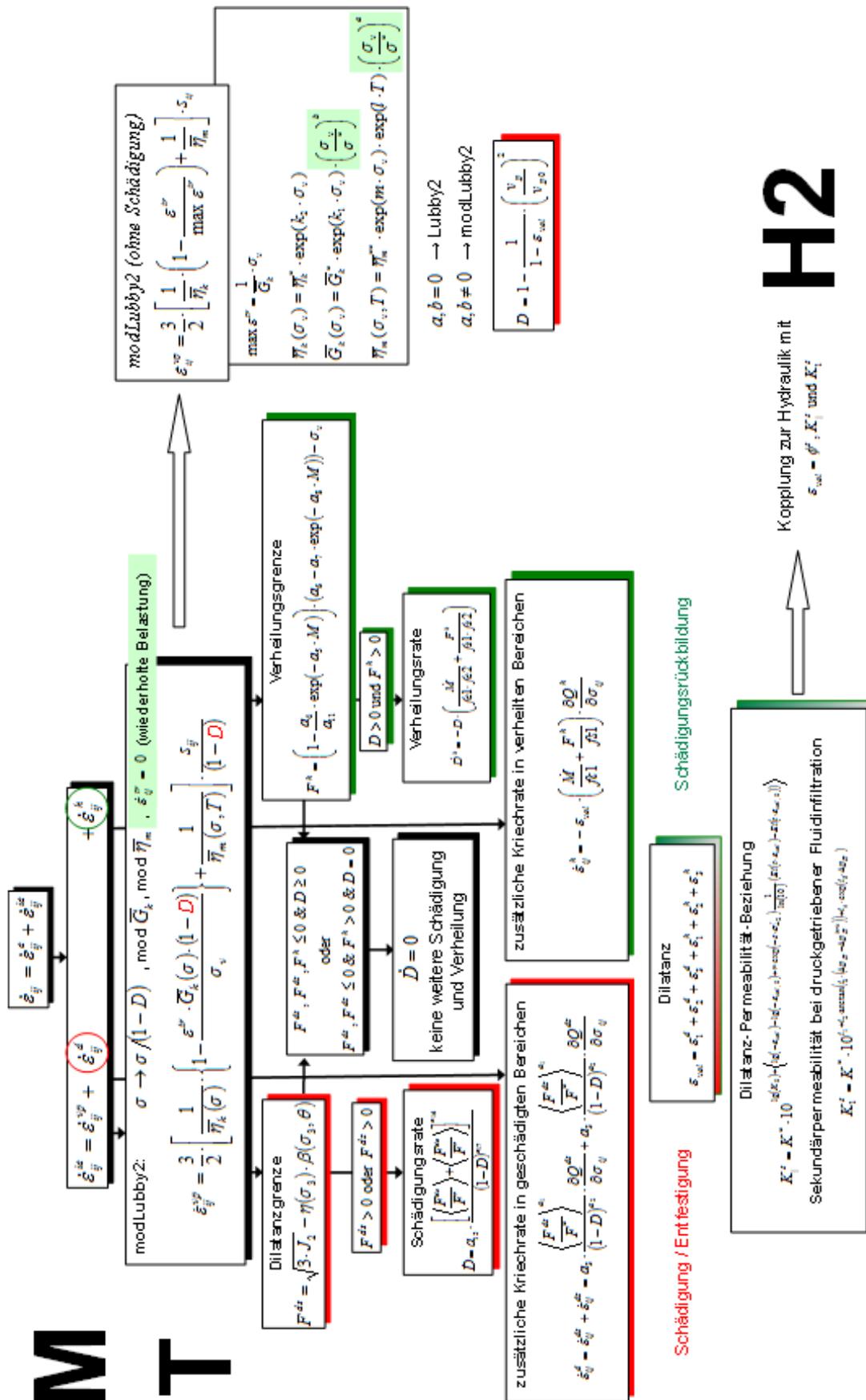


Bild 2.1 Überblick über das Stoffmodell Lux/Wolters, Lux et al. (2015a)

$\dot{\varepsilon}_{ij}^h$ - verheilungsinduzierte Verzerrungsrate in d^{-1} .

Die einzelnen Verzerrungsratenanteile des Stoffmodells *Lux/Wolters* lassen sich anhand geeigneter Sub-Stoffmodelle unter Berücksichtigung darauf abgestimmter Materialkennwerte bestimmen, die z.B. auf der Grundlage laborativer Untersuchungen an Steinsalzprüfkörpern ermittelt worden sind.

Zur rechnerischen Modellierung des mechanischen Verhaltens von Salzgrusversatzmaterial hinsichtlich seiner Kriech- und Kompaktionseigenschaften wird im Rahmen der Bearbeitung des ENTRIA-Teilprojekts VP 5.1 das im Simulator FLAC^{3D} bereits von der Herstellerfirma ITASCA implementierte und in *Itasca (2013)* dokumentierte Stoffmodell *CWIPP* verwendet. Das Stoffmodell *CWIPP* stellt eine Variation des Stoffmodells *WIPP* dar, welches seinerseits ein Stoffmodell zur physikalischen Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz ist. Die im Stoffmodell *CWIPP* benötigten Materialkennwerte sind im Rahmen des ENTRIA-Teilprojekts VP 5.1 nicht ausgehend von laborativen Untersuchungen an Versatzmaterial, sondern im Rahmen der in *Blanco Martín et al. (2016)* dokumentierten retrospektiven Analyse des im Salzbergwerk Asse durchgeführten TSDE-Experiments abgeleitet worden.

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. Im Rahmen der bisherigen Arbeiten des ENTRIA-Teilprojekts VP 5.2 lag der Fokus der durchgeführten Simulationen allerdings auf den im Tonsteingebirge im Nahbereich des Endlagerbergwerks ablaufenden thermohydraulischen Prozessen unter besonderer Berücksichtigung von 2-Phasenfluss-Effekten, deren rechnerische Simulation 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 einem Endlager im Tonsteingebirge ist zum Versatz der verbleibenden Resthohlräume in den Ablagerungskammern und der weiteren Grubenbaue Bentonit vorgesehen. Bentonit ist ein spezifisches Tongestein und reagiert auf einen Wasserzutritt mit einem ausgeprägten Quellverhalten, das bei entsprechender Querdehnungsbehinderung in versetzten Grubenträumen 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 Hohlraumkonturen wieder rückgebildet und verschlossen werden können. Als Modellierungsansatz zur Berücksichtigung der im Bentonit auftretenden Quellprozesse wird im Rahmen des ENTRIA-Teilprojekts VP 5.2 das *Barcelona Basic Model (BBM)* verwendet.

Mit Blick auf die Robustheit von Sicherheitsfunktionen, die im Rahmen der Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen eine herausragende Bedeutung haben, ist darauf hinzuweisen, dass die vorstehend genannten Stoffmodelle jeweils eine relativ große Anzahl an Materialparametern enthalten, deren hinreichend zuverlässige Messbarkeit im Rahmen von laborativen Untersuchungen mit Blick auf die Prognosezuver-

lässigkeit des Materialverhaltens teilweise noch grundlegend zu analysieren und zu bewerten ist.

3 Verifikation und Validation des FTK-Simulationsinstrumentariums (= FTK-Simulator inkl. implementierten Stoffmodellen) zur Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen durch Prozessanalyse

3.1 Vorbemerkung

Die rechnerische Modellierung der in Abschnitt 2 skizzierten TH2M-gekoppelten physikalischen Prozesse erfolgt im Rahmen der Bearbeitung der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod mit Hilfe des so genannten FTK-Simulators, der im Rahmen des in *Lux et al. (2015b)* dokumentierten Forschungsprojektes „Kopplung der Softwarecodes FLAC^{3D} und TOUGH2 in Verbindung mit in situ-, laborativen und numerischen Untersuchungen zum thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten von Tongestein unter Endlagerbedingungen“ am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal durch die Implementierung einer Schnittstelle zur Kommunikation der beiden Simulatoren FLAC^{3D} und TOUGH2 zunächst grundsätzlich entwickelt sowie verifiziert und in ersten Schritten auch validiert worden ist. Im Rahmen der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod wird dieser FTK-Simulator nun weiterentwickelt sowohl hinsichtlich der verfügbaren Modellierungsansätze wie auch hinsichtlich der Leistungsfähigkeit bei großen Berechnungsmodellen.

Bild 3.1 zeigt eine schematische Übersicht zur Kopplung der beiden Simulatoren FLAC^{3D} und TOUGH2. Es ist darauf hinzuweisen, dass im Rahmen der alternierenden inkrementellen Simulation von mechanischen und thermischen sowie hydraulischen Prozessen zunächst immer die mechanischen Prozesse für ein bestimmtes Zeitintervall mit dem Simulator

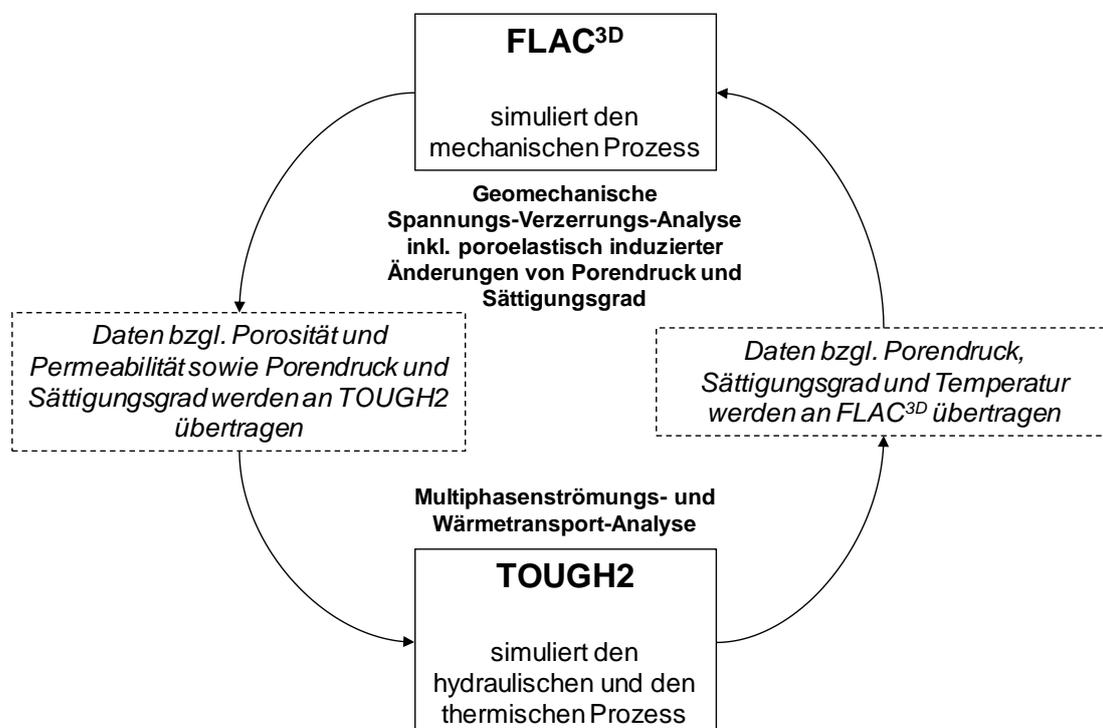


Bild 3.1 Schematische Übersicht zur Kopplung der beiden Simulatoren FLAC^{3D} und TOUGH2

FLAC^{3D} simuliert werden, bevor anschließend die thermischen und hydraulischen Prozesse mit dem Simulator TOUGH2 simuliert werden. Dieser Sachverhalt ist in Bild 3.2 dargestellt.

Der weiterentwickelte FTK-Simulator mit den darin implementierten physikalischen Zusammenhängen wird bei der Bearbeitung der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod verwendet

- zur Verbesserung des Prozessverständnisses zu den innerhalb eines Tiefenlager-/Endlagerbergwerks sowie im umgebenden Wirtsgestein ablaufenden TH2M-gekoppelten physikalischen Prozessen und
- zur Verbesserung des Systemverständnisses zum langfristigen Verhalten eines Tiefenlager-/Endlagersystems im Salinargebirge bzw. im Tonsteingebirge unter Berücksichtigung der ablaufenden insbesondere fluiddynamischen Prozesse, die sich in verschiedenen Teilbereichen des Tiefenlager-/Endlagersystems aus den ablaufenden TH2M-gekoppelten physikalischen Prozessen ergeben und die in diesen Teilbereichen in ihrer zeitlichen Entwicklung auch beeinflusst werden durch in anderen Tiefenlager-/Endlagersystembereichen ablaufenden Prozessen.

Damit resultiert die Weiterentwicklung des FTK-Simulators mit der verstärkten Validierung auch unmittelbar in der angestrebten Verbesserung der Robustheit der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen.

Die fluiddynamischen Prozesse werden hier deshalb in den Vordergrund gestellt, weil die langfristige Tiefenlager-/Endlagersystemsicherheit durch den Transport radio- und chemotoxischer Schadstoffe im dann final verschlossenen Endlagersystem bestimmt wird und dieser Schadstofftransport durch advective und diffusive Transportprozesse getragen wird. Fluid-

Mechanical problem is solved first (undrained split method)

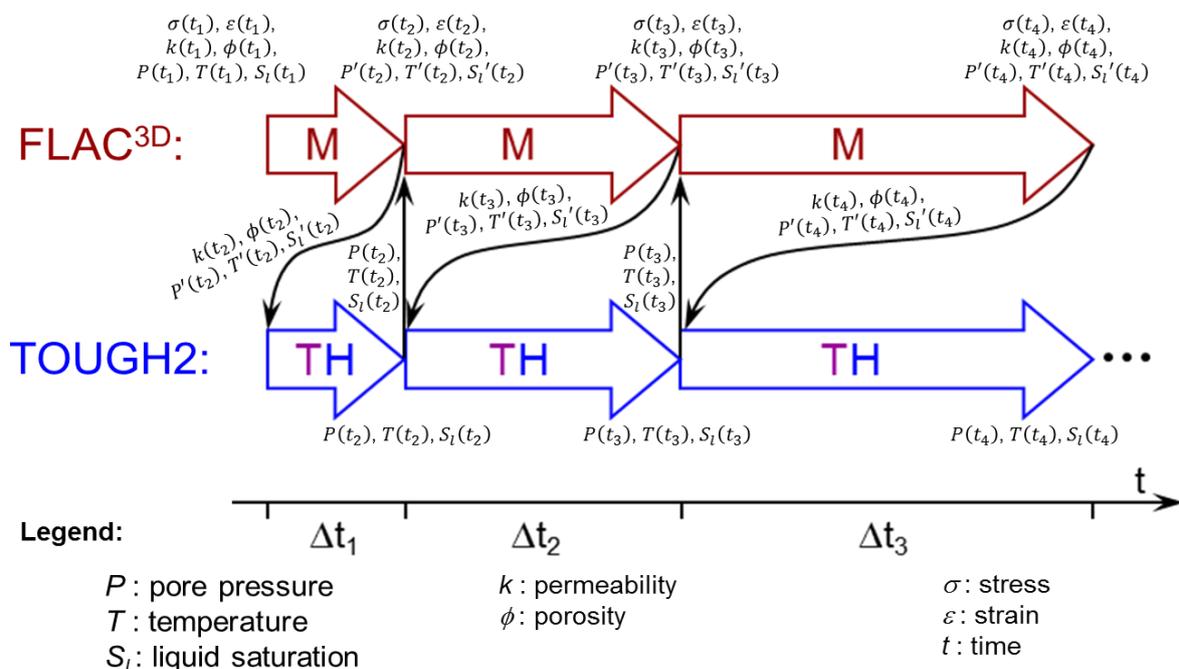


Bild 3.2 Simulationssequenz des FTK-Simulators

dynamische Prozesse sind der Ausgang für advective Stofftransportprozesse. Sowohl advective wie auch diffusive Transportprozesse sind allerdings nicht Gegenstand der hier relevanten ENTRIA-Teilprojekte.

Grundsätzlich sind die fluiddynamischen Prozesse eng verbunden mit mechanischen und thermischen sowie auch geochemischen Prozessen, so dass auch diese Prozesse entsprechend ihrer Bedeutung für die langfristige Endlagersystemsicherheit in die Analysen einbezogen werden. Nicht näher betrachtet wird hier entsprechend der Schwerpunktsetzung allerdings die bautechnische Sicherheit. Dementsprechend erfolgt keine explizite Analyse zur bautechnischen Sicherheit von Tragwerksstrukturen. Hierzu wird auf das Vertikalprojekt 6 verwiesen.

Vor der Verwendung des weiterentwickelten FTK-Simulators für die vorstehend genannten Bearbeitungsaufgaben muss der Simulator zunächst erneut einer Qualitätssicherungsprozedur unterzogen werden, d.h. verifiziert und validiert werden. Dabei sind unter Verifikation der Beleg der zahlenmäßigen Korrektheit der numerischen Simulationen und unter Validation der Beleg der grundsätzlichen geotechnischen Realitätsnähe der physikalischen Modellierung zu verstehen. Verifikation und Validation erfolgen für verschiedene Teilkomponenten des Simulators auf unterschiedliche Weise, sowohl für das Salinargebirge wie auch für das Tonsteingebirge. Dabei wird erfasst das Gebirgsverhalten in Kombination mit dem Versatzverhalten – im Fall des Salinargebirges Salzgrusversatz, im Fall des Tonsteingebirges Bentonitversatz – unter mechanischen, hydraulischen und thermischen Einwirkungen. In die Validation werden die relevanten TH2M-gekoppelten Prozesse einbezogen. Die zur Validation des FTK-Simulators bisher durchgeführten bzw. noch geplanten Arbeiten in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1 und VP 5.2 sind:

- Durchführung eines Benchmarks in Kooperation mit dem Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) in den USA zur retrospektiven Analyse des TSDE-Experiments (Thermal Simulation for Drift Emplacement), das im Rahmen der Forschungsprojekte BAMBUS I & BAMBUS II durchgeführt worden ist. Der Vergleich der am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal mit dem FTK-Simulator erhaltenen Simulationsergebnisse mit den Simulationsergebnissen des LBNL, wo der Simulator TOUGH-FLAC eingesetzt wird, trägt zu einer Erhöhung des Vertrauens in die Implementierung des FTK-Simulators bei und ist somit als Teil seiner Verifizierung anzusehen, wohingegen der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Feldmessdaten des TSDE-Experiments beiträgt zur Validation des FTK-Simulators bzw. der darin implementierten Stoffmodelle *Lux/Wolters* für die Wirtsgesteinsformation Salinargebirge und *CWIPP* für das Salzgrusversatzmaterial. Im Rahmen des Benchmarks ist zudem ein neuer Salzgrus-Parametersatz für das Stoffmodell *CWIPP* abgeleitet worden. Zwischen- und Endergebnisse des Benchmarks zur retrospektiven Analyse des TSDE-Experiments sind dokumentiert in *Lux et al. (2014a)* sowie in *Blanco Martín et al. (2015b,c & 2016)*.
- Durchführung eines Benchmarks in Kooperation mit dem Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) in den USA zur Prognose des Langzeitverhaltens einer verschlossenen Einlagerungskammer im Salinargebirge. Dabei erfolgt eine Verifizierung des FTK-Simulators durch den Vergleich der mit dem FTK-Simulator erhaltenen Simulationsergebnisse mit den Simulationsergebnissen des LBNL. Erste Simulationsergebnisse dieses Benchmarks sind dokumentiert in *Blanco Martín et al. (2014, 2015a)*. Die dort dokumentierten Benchmarkergebnisse berücksichtigen allerdings noch nicht den neuen Salzgrus-Parametersatz, der im Rahmen der retrospektiven Analyse des TSDE-Experiments abgeleitet worden ist.

- Durchführung retrospektiver Analysen des im Felslabor in Mont Terri im Opalinustongebirge durchgeführten HE-D-Experiments sowie des FE-Experiments. Die mit dem FTK-Simulator erhaltenen Simulationsergebnisse werden zur Validation mit den Feldmessdaten dieser Experimente verglichen.
- Durchführung eines Benchmarks in Kooperation mit dem Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) in den USA zur Verifikation der Implementierung des *Barcelona Basic Model* in den FTK-Simulator sowie zur Validation dieses Stoffmodells anhand einer Simulation eines in *Rutqvist et al. (2010)* grob beschriebenen Laborversuchs, der an einem würfelförmigen Prüfkörper aus Bentonit durchgeführt worden ist.
- Durchführung eines Benchmarks in Kooperation mit dem Beijing Research Institute of Uranium Geology (BRIUG) in China zur retrospektiven Analyse eines laborativen Großversuchs an Bentonit. Die Validation erfolgt durch Vergleich der mit dem FTK-Simulator erhaltenen Simulationsergebnisse mit den Messdaten des Laborversuchs sowie mit Simulationsergebnissen des BRIUG.

Aus Platzgründen können hier nur die Ergebnisse des Benchmarks zum TSDE-Experiment vorgestellt werden. Es ist geplant, ausführliche Dokumentationen zu den weiteren Simulationen zur Verifikation und Validation des FTK-Simulators nachfolgend zu veröffentlichen, z.B. in der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal.

3.2 Retrospektive Analyse des TSDE-Experiments / Salinargebirge

3.2.1 Simulationsmodell und angesetzte Materialkennwerte

Das so genannte TSDE-Experiment ist ein Erhitzer-Versuch, der in den 1990er-Jahren im ehemaligen Salzbergwerk Asse durchgeführt worden ist, um die Entwicklung des Streckenlagerungskonzeptes mit Mehrbarrierensystem im Salinargebirge zu unterstützen. Bei diesem Konzept der Streckenlagerung werden die Abfallbehälter mit den hochaktiven Abfällen horizontal auf der Sohle der Einlagerungskammern abgelegt und der verbleibende Resthohlraum in der Ablagerungskammer wird mit Salzgrus versetzt. Das die Einlagerungskammern umgebende Salinargebirge stellt dabei als geologische Barriere die wichtigste Barriere des Multibarrierensystems dar, zunächst in zeitlich begrenztem Maße unterstützt durch Abdichtungs- und Verschlussbauwerke als geotechnischen Barrieren sowie Abfallbehältern als technischer Barriere, mit im Lauf der Zeit fortschreitender Konvergenz der mit Salzgrus versetzten Einlagerungs- und Zugangsstrecken dann aber auch zunehmend unterstützt und schließlich ersetzt von dem allmählich kompaktierenden Salzgrusversatz als langfristig wirksamer geotechnischer Barriere. Ergänzt werden könnte dieses Barrierensystem durch zusätzliche Verschlusselemente aus Salzschnittblöcken mit spezifisch verfüllten Fugen. Diese Verschlusselemente weisen den Vorteil auf, dass sie aus arteigenem Material bestehen und barrierenbezogen kurzfristig hydraulisch wirksam werden. An einem entsprechenden, vom BMWi geförderten Forschungsprojekt wird derzeit am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal gearbeitet, *Düsterloh (2014)*.

Das im Hinblick auf die Verifikation und Validation des FTK-Simulators relevante Ziel des TSDE-Experiments bestand darin, das Kompaktionsverhalten des Salzgrusversatzes in dem für die Streckenlagerung relevanten Temperaturbereich zu untersuchen, um somit das Verständnis zu den ablaufenden und in dem hier relevanten Untersuchungszeitraum vornehm-

lich TM-gekoppelten Prozessen im Salzgrusversatz zu verbessern. Daraus resultiert eine verbesserte Prognostizierbarkeit des Salzgrusverhaltens in Raum und Zeit und somit im Hinblick auf die radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion „Begrenzung / Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ des Salzgrusversatzes eine erhöhte Robustheit.

Nach *Bechthold et al. (1999)* sind im TSDE-Experiment in zwei parallele Versuchsstrecken in einer Tiefe von 800 m insgesamt 6 elektrische Erhitzer mit den äußeren Abmessungen und der (je nach Beladung ungefähren) Wärmeleistung eines POLLUX-Behälters gelegt worden, je Strecke damit jeweils 3 Erhitzer. Bild 3.3 zeigt den Versuchsstandort innerhalb des Asse-

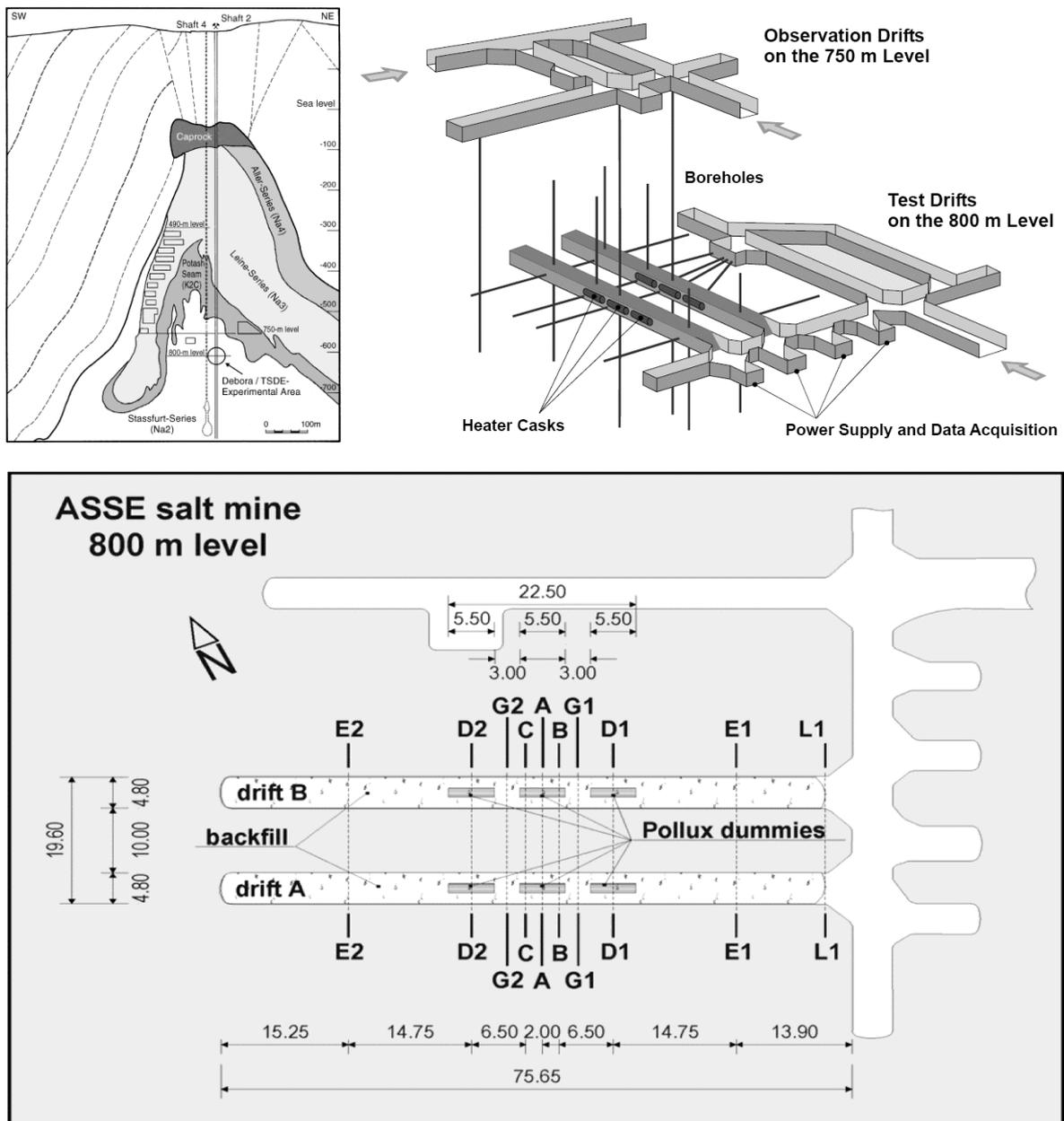


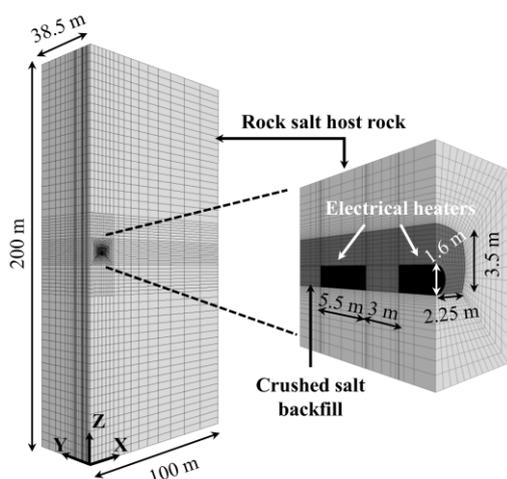
Bild 3.3 Schnittdarstellung des ehemaligen Salzbergwerks Asse mit Markierung des Versuchsstandortes sowie schematische Übersicht über die Versuchsanordnung mit Positionierung der Messquerschnitte sowie der Messbohrlöcher, *Bechthold et al. (1999)*

Bergwerks sowie eine schematische Übersicht über die Versuchsanordnung mit Positionierung der Messquerschnitte sowie der Messbohrlöcher.

Die Versuchsstrecken sind sowohl in den erhitzten Streckenbereichen wie auch in den nicht erhitzten Streckenbereichen in insgesamt 20 Messquerschnitten mit Messinstrumenten ausgestattet worden, um eine Erfassung der Temperaturentwicklung, der Streckenkonvergenz sowie der Versatzdruckentwicklung im Salzgrus in Zeit und Raum zu ermöglichen. Bild 3.3 zeigt neben einer Übersicht zur Positionierung des Versuchsortes im Zentralbereich des Salzsattels Asse und einer isometrischen Darstellung der Versuchsanordnung eine schematische Draufsicht zur Positionierung der Messquerschnitte. Neben den Messinstallationen in den Strecken sind auch Messinstrumente in Bohrlöchern, die von der Versuchssohle, aber auch von einer höheren Sohle in das umgebende Gebirge geteuft worden sind und die ebenfalls in Bild 3.3 dargestellt sind, angeordnet worden, um auch die zeitliche Entwicklung der Temperatur im nahen Umfeld der Versuchsstrecken zu erfassen. Die über einen Zeitraum von über 8 Jahren sich erstreckende Versuchsdurchführung und die anschließende Analyse der Messdaten haben zu einer erheblichen Verbesserung des Prozessverständnisses zu den im Salzgrusversatz unter Gebirgskonvergenz und Temperaturerhöhung ablaufenden Prozessen beigetragen.

Basierend auf den geometrischen Abmessungen des TSDE-Experiments sowie den in der Versuchskonfiguration enthaltenen Symmetrieebenen ist zur retrospektiven Analyse des Experiments im Rahmen des Benchmarks zwischen dem FTK-Simulator des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal und dem Simulator TOUGH-FLAC des LBNL zunächst in FLAC^{3D} ein gemeinsam genutztes dreidimensionales Berechnungsmodell erstellt worden, das in Bild 3.4 dargestellt ist. Eine Symmetrieebene des Berechnungsmodells ergibt sich daraus, dass der mittlere der jeweils 3 Erhitzer pro Versuchsstrecke nahezu mittig in der Versuchsstrecke positioniert worden ist. Das Berechnungsmodell besteht daher in Richtung der Versuchsstreckenlängsachsen aus nur einer halben Strecke und enthält somit 1 ½ Erhitzer. Die zweite Symmetrieebene des Berechnungsmodells verläuft achsparallel

FLAC^{3D}-Berechnungsmodell



Voronoi-Diskretisierung für TOUGH2

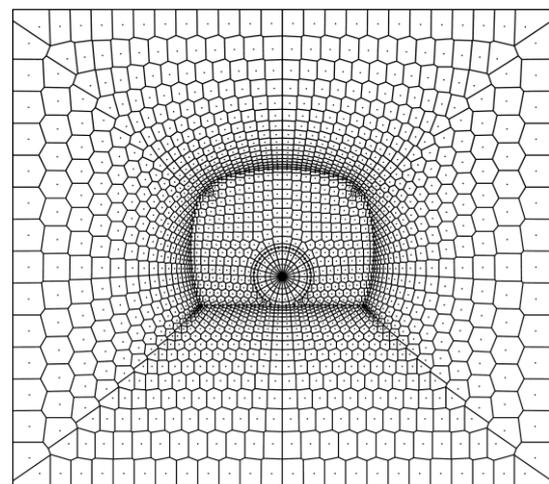


Bild 3.4 *FLAC^{3D}-Berechnungsmodell mit Angabe der wesentlichen Abmessungen und Detailansicht der für TOUGH2 transformierten Voronoi-Diskretisierung, Blanco Martín et al. (2016)*

zu den Versuchsstrecken in der Mitte des 10 m breiten Pfeilers zwischen den beiden Versuchsstrecken. Unter Einbeziehung dieser Symmetrieebenen betragen die Gesamtabmessungen des Berechnungsmodells in x -Richtung 100 m, in y -Richtung bzw. Streckenachsenrichtung 38,5 m und in z -Richtung 200 m von Teufe $z = -700$ m bis Teufe $z = -900$ m. Alle äußeren Randflächen des Berechnungsmodells werden als hydraulisch und thermisch dicht sowie als mechanisch unverschieblich in Normalenrichtung der randlichen Begrenzungsflächen angenommen. Insgesamt enthält das Berechnungsmodell 85.870 Berechnungszonen, wobei in der Strecke mit Erhitzern und Salzgrusversatz und im Streckennahbereich eine erheblich feinere Diskretisierung vorgegeben wird als in streckenferneren Gebirgsbereichen.

Da der Simulator TOUGH2 Berechnungsmodelle mit *Voronoi*-Diskretisierung benötigt, das FLAC^{3D}-Berechnungsmodell aber aufgrund der dem Simulator FLAC^{3D} zugrundeliegenden mathematischen Theorie keine *Voronoi*-Diskretisierung aufweist, muss die Diskretisierung des FLAC^{3D}-Berechnungsmodells im Rahmen der Kommunikation zwischen den Simulatoren FLAC^{3D} und TOUGH2 in eine *Voronoi*-Diskretisierung transformiert werden. Bild 3.4 zeigt eine Detailansicht dieser *Voronoi*-Diskretisierung innerhalb der Versuchsstrecke und in ihrem nahen Umfeld.

Entsprechend den in *Bechthold et al. (1999)* dokumentierten Informationen wird das Berechnungsmodell mit einer konstanten isotropen Primärspannung von $P_G = 12$ MPa sowie einer primären Gebirgstemperatur von $T_p = 36,4$ °C beaufschlagt. Nach der Initialisierung des primären Gebirgszustandes wird die Versuchsstrecke zunächst aufgefahren und für einen Zeitraum von 1,4 Jahren offen gehalten. In diesem Zeitraum sind die Messinstrumente installiert worden. Nach 1,4 Jahren sind dann die Erhitzer und der Salzgrusversatz eingebracht und im Anschluss die Erhitzer mit einer zeitlich nahezu konstanten Wärmeleistung von 6.400 W pro Erhitzer aktiviert worden. Die Erhitzer sind über einen Zeitraum von 8 Jahren und damit auch den Zeitraum des Experiments betrieben worden. Im Berechnungsmodell wird die Wärmequelle entsprechend der in Bild 3.5 gezeigten Darstellung in

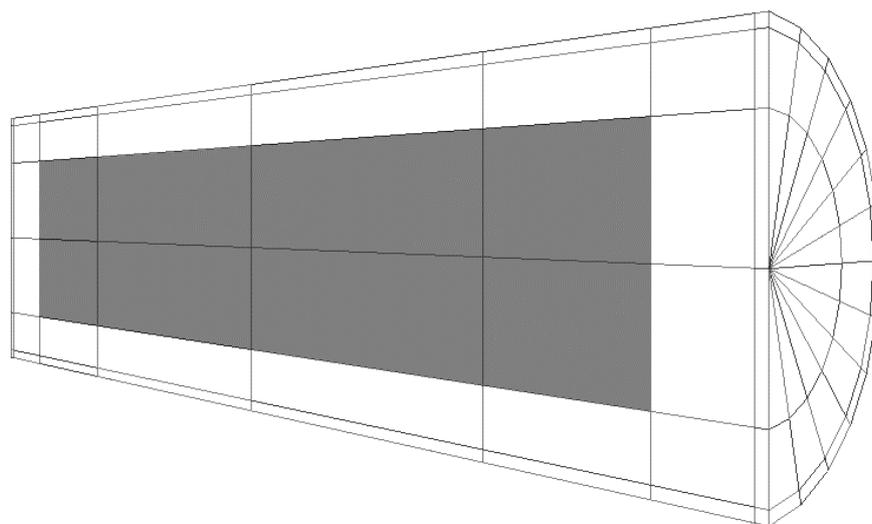


Bild 3.5 TSDE-Experiment / FLAC^{3D}-Diskretisierung der elektrischen Erhitzer mit eingepprägten Wärmequellen in den grauen Berechnungszonen, Blanco Martín et al. (2016)

den inneren Berechnungszonen der auch diskretisierten Erhitzer eingepreßt und dabei proportional zu den jeweiligen Berechnungszonenvolumina aufgeteilt. Von diesen inneren Berechnungszonen ausgehend wird dann die Wärmeenergie entsprechend der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität des Erhitzermaterials an die Erhitzeroberfläche transportiert.

Der Zielsetzung des Benchmarks nach zunächst einer Verifikation des FTK-Simulators durch einen Simulatoren-Vergleich folgend werden über die Verwendung eines identisch diskretisierten Berechnungsmodells hinaus auch die THM-gekoppelten Prozesse von beiden Benchmark-Partnern einheitlich modelliert, um auf diese Weise Einflüsse auf die Simulator-Ergebnisse durch unterschiedliche Modellierungsansätze auszuschließen. Zur Modellierung der mechanischen Prozesse ist von beiden Benchmark-Partnern für das Salinargebirge das Stoffmodell *Lux/Wolters* verwendet worden, für den Salzgrus ein modifiziertes Stoffmodell *CWIPP* und für den Erhitzer das linear-elastische Stoffmodell nach *Hooke*, jeweils auch mit den gleichen Materialkennwerten, die im Rahmen einer umfangreichen Variationsanalyse auch unter Zuhilfenahme des am Lawrence Berkeley National Laboratory entwickelten Simulators *iTOUGH* ermittelt worden sind, *Blanco Martín et al. (2015)*. Die angesetzten Materialkennwerte sind der nachfolgenden Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Bei der Modellierung der thermischen Prozesse sind von beiden Benchmark-Partnern für das Salinargebirge sowie für den Salzgrusversatz die in *Bechthold et al. (2004)* dokumentierten funktionalen Zusammenhänge zwischen Porosität, Temperatur, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität angesetzt worden. Obwohl hydraulische Prozesse im Rahmen des TSDE-Experiments nur von marginaler Bedeutung sind, sind die hydraulischen Prozesse bei beiden Benchmark-Partnern dennoch in die Modellierung und Simulation einbezogen worden, und zwar unter Berücksichtigung von 2-Phasenfluss-Effekten. Im folgenden Abschnitt werden die Feldmessdaten des TSDE-Experiments zusammen mit den Simulationsergebnissen beider Benchmark-Partner vergleichend gegenübergestellt. Dadurch werden eine Verifikation des FTK-Simulators sowie eine Validation der implementierten und hier verwendeten Stoffmodelle ermöglicht.

Materialkennwerte für das Salinargebirge (Stoffmodell Lasx/Walters)		Materialkennwerte für den Salzgrusversatz (Stoffmodell CWIPP)		Materialkennwerte für die elektrischen Erhitzer (linear-elastisches Stoffmodell nach Hooke)	
Dichte ρ	2.150 kg/m ³	Elastizitätsmodul E	24.000 MPa	Dichte ρ	7.800 kg/m ³
Poisson-Zahl ν	0,27	\bar{G}_k^{**}	2,8 · 10 ⁵ MPa	Elastizitätsmodul E	210.000 MPa
$\bar{\eta}_k^*$	3,46 · 10 ¹⁰ MPa · s	k_1	-0,23 MPa ⁻¹	Poisson-Zahl ν	0,29
k_2	-0,2 MPa ⁻¹	l_1	0 K ⁻¹	Porosität ϕ	0,0001
b	0	$\bar{\eta}_m^{**}$	4,32 · 10 ²¹ MPa · s	Permeabilität K	0 m ²
m	-0,155 MPa ⁻¹	l	-0,049 K ⁻¹	Flüssigkeitssättigungsgrad S_l	0
a	-3	a_0	0,284	Biot-Koeffizient α	1
a_1	3,1	a_2	1	Wärmeausdehnungskoeffizient α_T	10 ⁷ K ⁻¹
a_3	8,33 · 10 ⁻¹³ s ⁻¹	a_4	0,885	Wärmeleitfähigkeit λ	50 W/(m · K)
a_5	0,04 MPa ⁻¹	a_6	53,5 MPa	spezifische Wärmekapazität c_p	450 J/(kg · K)
a_7	26 MPa	a_7'	73 MPa		
a_8	0,25 MPa ⁻¹	a_8'	0,018 MPa ⁻¹		
a_9	1	a_9'	0,17		
a_{10}	0,25	a_{10}'	0,001		
a_{11}	1	a_{15}	1,97 · 10 ⁻¹² s ⁻¹		
a_{16}	3,1	a_{17}	1		
f_{c1}	10 MPa	f_{c2}	5,5		
f_{s1}	6,6528 · 10 ⁷ MPa · s	f_{s2}	5,5		
n	1,2	initiale Porosität ϕ_0	0,002		
initiale Permeabilität K_0	0 m ²	initiale Flüssigkeitssättigungsgrad $S_{l,0}$	0,5		
initialer Biot-Koeffizient α_0	0,002997	$\epsilon_{vol,0}$	-3,16 · 10 ⁻⁶		
r	2	s	0,17 MPa ⁻¹		
t	300	λ	0		
i_1	-22	i_2	1,4		
i_3	25 MPa ⁻¹	i_4	0,05		
i_5	0 MPa ⁻¹	$\frac{K_{FH}}{\Delta p_{FH}}$	0 MPa		
Wärmeausdehnungskoeffizient α_T	4,2 · 10 ⁻⁵ K ⁻¹	initiale Wärmeleitfähigkeit λ_0	5,37 W/(m · K)		
initiale spezifische Wärmekapazität $c_{p,0}$	862 J/(kg · K)				

Tabelle 3.1 Kennwerte für das Materialverhalten des Salinargebirges, des Salzgrusversatzes sowie der elektrischen Erhitzer

3.2.2 Vergleichende Gegenüberstellung der Feldmessdaten des TSDE-Experiments mit den Simulationsergebnissen der Benchmark-Simulationen

Im Rahmen des TSDE-Experiments sind sowohl Temperaturmessungen wie auch Messungen von Gebirgsverformungen und von Versatzdrücken im Salzgrus durchgeführt worden. Damit können im Rahmen des Benchmarks einerseits Implementierungen hinsichtlich thermischer wie auch mechanischer Prozesse verifiziert werden, andererseits aber auch die hier relevanten implementierten Stoffmodelle validiert werden. Nachstehend werden zunächst die ablaufenden thermischen Prozesse, anschließend dann die mechanischen Prozesse diskutiert.

(a) Thermische Prozesse

Bild 3.6 zeigt zunächst eine Gegenüberstellung der mit dem FTK-Simulator bzw. mit dem Simulator TOUGH-FLAC erhaltenen Simulationsergebnisse und der während der ca. 8-jährigen Versuchsphase erhaltenen Messdaten für die Temperaturen an der Erhitzeroberfläche sowie im Salzgrusversatz direkt neben dem Erhitzer, am pfeilerseitigen Streckenstoß und an der Streckenfirste. Es ist zu ersehen, dass die gemessenen Temperaturen an der Oberfläche der Erhitzer rasch zunehmen bis zu Maximalwerten von etwa 200–210 °C, die nach etwa einem halben Jahr erreicht werden. Anschließend nehmen die gemessenen Temperaturen trotz weiterhin aktiver Erhitzer langsam wieder ab. Grund hierfür ist die zunehmende Salzgruskompaktion, die dazu führt, dass die Wärmeleitfähigkeit im Salzgrusversatz ebenfalls allmählich ansteigt und somit die Wärmeenergie besser in das umgebende Salinargebirge abgeführt werden kann. Für die weiteren in Bild 3.6 dargestellten Beobachtungspunkte ist zu ersehen, dass die gemessenen Temperaturen während der gesamten Versuchszeit an-

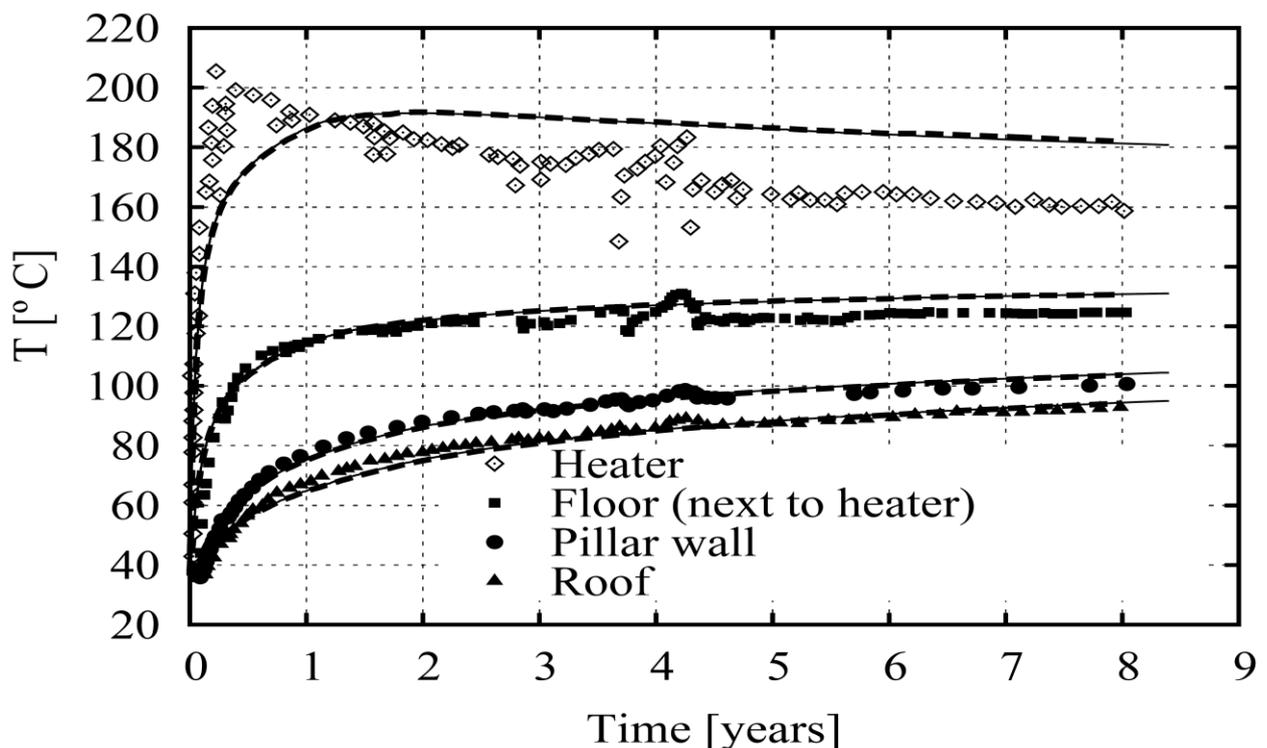


Bild 3.6 Messdaten sowie Simulationsergebnisse (gestrichelt: FTK-Simulator / durchgezogen: TOUGH-FLAC) zur Temperaturentwicklung an der Erhitzeroberfläche und im Salzgrusversatz um den Erhitzer, Blanco Martín et al. (2016)

steigen, neben dem Erhitzer am intensivsten, in den weiter entfernten Messpunkten langsamer. Deutlich ist auch der Unterschied in der Temperaturentwicklung an den beiden Stößen zu erkennen, der sich daraus ergibt, dass der Pfeiler von beiden Seiten durch die parallel angeordneten Versuchsstrecken erhitzt wird, so dass die Temperatur im Streckenstoß auf der Pfeilerseite höher ist als auf der vom Pfeiler abgewandten Stoßseite. Hinsichtlich der Simulationsergebnisse ist aus Bild 3.6 deutlich zu ersehen, dass die mit dem Simulator TOUGH-FLAC und die mit dem FTK-Simulator erhaltenen Simulationsergebnisse nahezu identisch sind und zumindest für die Messpunkte im Salzgrus auch sehr gut mit den Messdaten übereinstimmen. Einzig die Temperaturentwicklung an der Erhitzeroberfläche konnte mit beiden Simulatoren nicht so gut nachvollzogen werden. Mögliche Ursachen dafür könnten sein eine zu grobe Modelldiskretisierung in axialer Richtung der Versuchsstrecke im Bereich der Erhitzer oder eine damit einhergehende zu unpräzise Verteilung der Wärmequellen innerhalb der modellierten Erhitzer. Da sich die Wärmeenergie mit zunehmender Entfernung von der Wärmequelle räumlich immer stärker verteilt, nimmt der Unterschied zwischen Messdaten und Simulationsergebnissen mit zunehmender Entfernung von den Erhitzern immer weiter ab – zumindest sofern die physikalischen Prozesse im Salzgrus und im umgebenden Salinargebirge in hinreichender Qualität in der Modellierung erfasst werden.

Weitere Messbefunde zur Temperaturentwicklung und zum Vergleich herangezogene Ergebnisse der numerischen Simulationen zur Temperaturentwicklung sind den Bildern 3.7 bis 3.17 zu entnehmen.

Bild 3.7 zeigt in einer Gegenüberstellung die mit dem FTK-Simulator bzw. die mit dem Si-

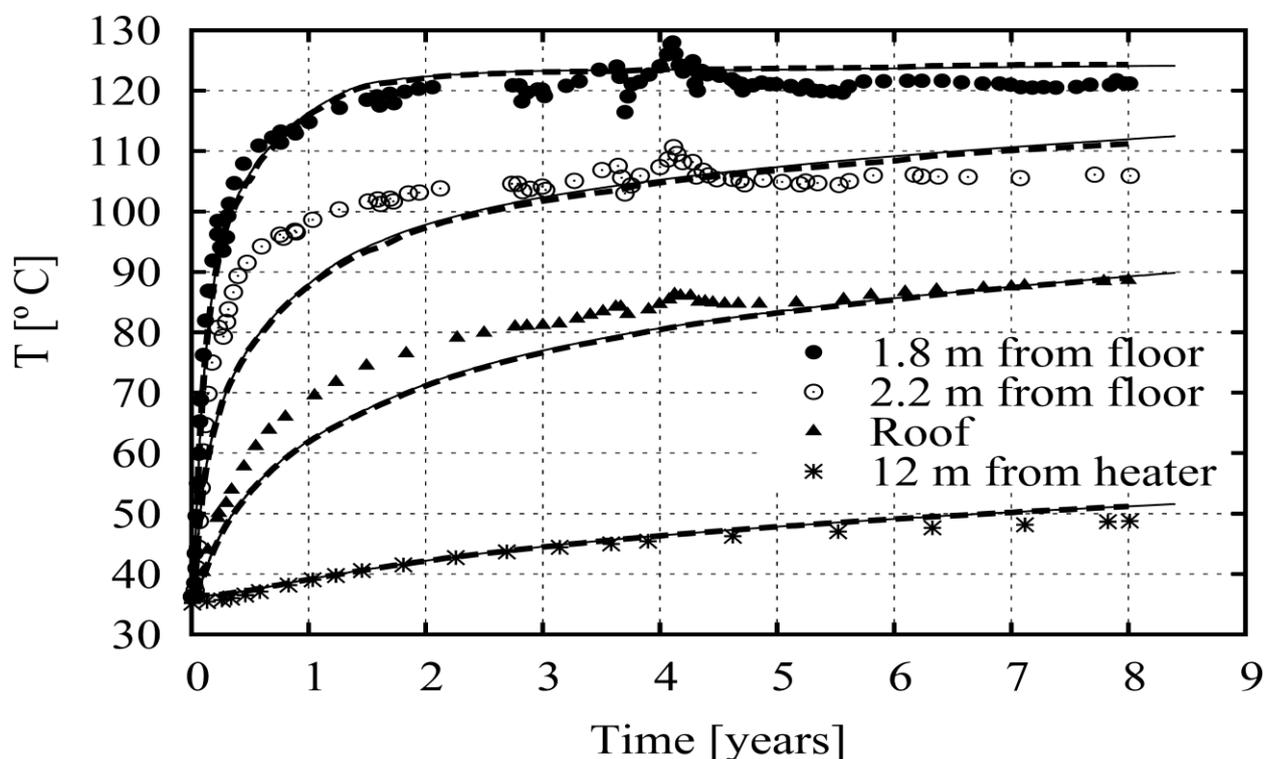


Bild 3.7 Messdaten sowie Simulationsergebnisse (gestrichelt: FTK-Simulator / durchgezogen: TOUGH-FLAC) zur Temperaturentwicklung im Salzgrusversatz zwischen zwei benachbarten Erhitzern und in einer Entfernung von 12 m zum nächsten Erhitzer, Blanco Martín et al. (2016)

mulator TOUGH-FLAC erhaltenen Simulationsergebnisse und die Messdaten für die Temperaturen im Salzgrusversatz 1,8 m bzw. 2,2 m über der Streckensohle sowie unmittelbar an der Streckenfirste zwischen zwei benachbarten Erhitzern und in einer Entfernung von 12 m vom nächsten Erhitzer im Bereich der Streckensohle. Nicht überraschend ist aus Bild 3.7 zu ersehen, dass die Temperatur in den unteren Streckenbereichen deutlich schneller ansteigt als in den oberen Streckenbereichen, da die Entfernung der unteren Messpunkte zu den Erhitzern deutlich kleiner ist als die Entfernung der oberen Messpunkte. Mit zunehmender Entfernung von den Erhitzern nimmt der Einfluss der Erhitzer auf die Wärmeentwicklung erheblich ab. Während zwischen den benachbarten Erhitzern entsprechend Bild 3.7 maximale gemessene Temperaturen von 90–130 °C erreicht werden, beträgt die maximale gemessene Temperatur bei einer Entfernung von 12 m vom nächsten Erhitzer nur noch ca. 48 °C. Aus Bild 3.7 ist zu ersehen, dass die mit beiden Simulatoren erhaltenen Simulationsergebnisse nahezu identisch sind und auch relativ gut mit den Messdaten übereinstimmen. Kleinere Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den Messdaten sind darauf zurückzuführen, dass die präzise Positionierung der eingebauten Messinstrumente anhand der Versuchsdokumentation in *Bechthold et al. (1999)* nicht immer im Detail nachvollziehbar war.

Bild 3.8 zeigt in einer Gegenüberstellung die mit dem FTK-Simulator bzw. die mit dem Simulator TOUGH-FLAC erhaltenen Simulationsergebnisse und der Messdaten für die Temperaturen im Salinargebirge an verschiedenen Positionen unterhalb des mittleren Erhitzers. Es fällt auf, dass die Temperaturmessdaten direkt unter dem Erhitzer nahezu identisch sind mit den in Bild 3.6 dargestellten Temperaturmessdaten an der Erhitzeroberfläche am höchsten

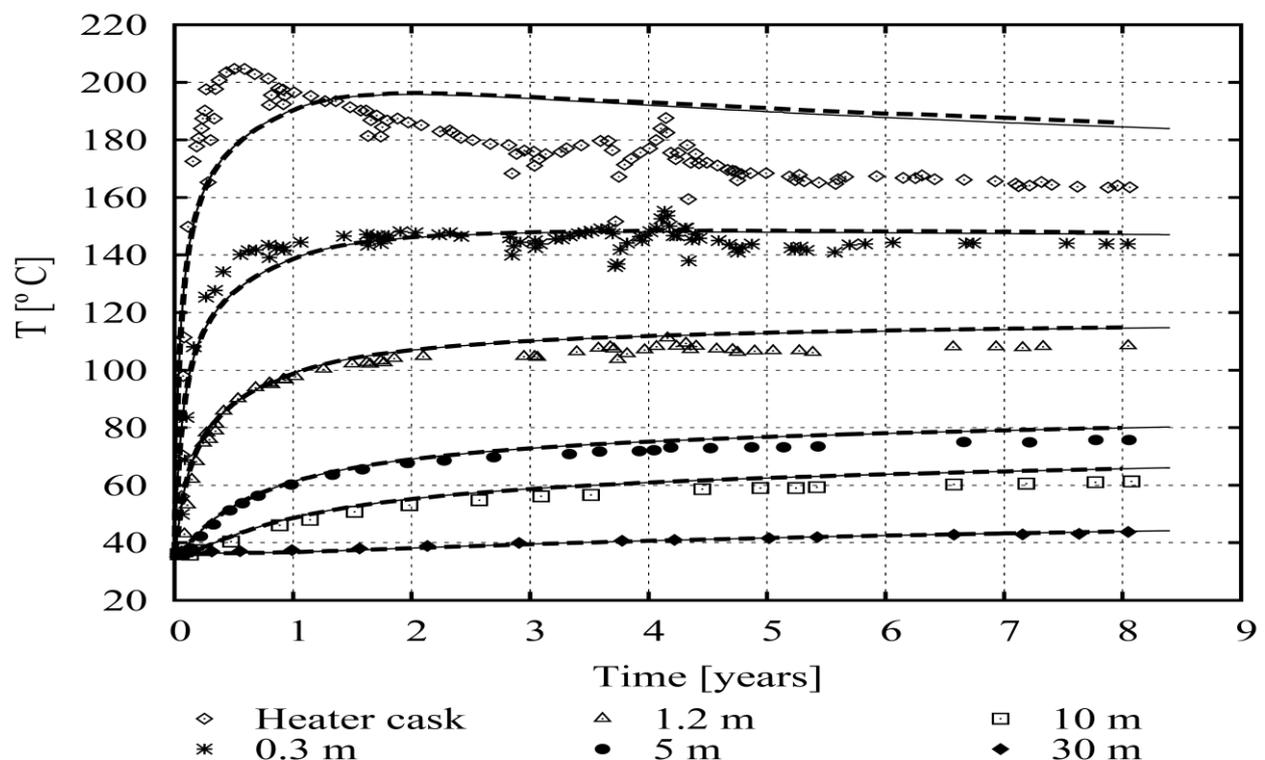


Bild 3.8 Messdaten sowie Simulationsergebnisse (gestrichelt: FTK-Simulator / durchgezogen: TOUGH-FLAC) zur Temperaturentwicklung im Salinargebirge unterhalb des mittleren Erhitzers, *Blanco Martín et al. (2016)*

Punkt des Erhitzers. Daraus wird deutlich, dass die Wärmeabgabe des Erhitzers zunächst in alle Richtungen gleichmäßig erfolgt. Erst in größerer Entfernung zum Erhitzer entwickeln sich die Temperaturen unterschiedlich, da hier die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten des Salinargebirges sowie des Salzgrusversatzes einen signifikanten Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der Temperaturen an verschiedenen Positionen haben. Bild 3.8 ist zu entnehmen, dass die Temperatur in einer Entfernung von 30 m unterhalb des Erhitzers nur noch marginal vom Erhitzer beeinflusst wird. Bild 3.8 zeigt, dass die mit beiden Simulatoren erhaltenen Simulationsergebnisse ebenfalls wieder nahezu identisch sind und auch sehr gut mit den Messdaten übereinstimmen, mit Ausnahme von der unmittelbaren Erhitzeroberfläche.

Auch die in Bild 3.9 dargestellten Temperaturmesswerte im Salinargebirge unterhalb der Versuchsstrecke im nicht erhitzten Streckenbereich konnten durch beide Simulatoren in sehr guter Übereinstimmung nachvollzogen werden. Analog gilt dieser Befund auch für den Pfeilerstoßbereich zwischen den jeweils mittleren Erhitzern, für den die Temperaturmessdaten und die Simulationsergebnisse der beiden Benchmark-Partner in Bild 3.10 gegenübergestellt sind.

Zusammenfassend lässt sich damit für den Vergleich der beiden Simulatoren untereinander und mit den Temperaturmesswerten sagen, dass beide Simulatoren unter Verwendung der gleichen physikalischen Modellierungsansätze mit den gleichen Materialkennwerten die Temperaturmesswerte in ihrer zeitlichen Entwicklung sehr gut nachvollziehen konnten und dabei untereinander nur marginale Unterschiede aufweisen. Verifikation und Validation des

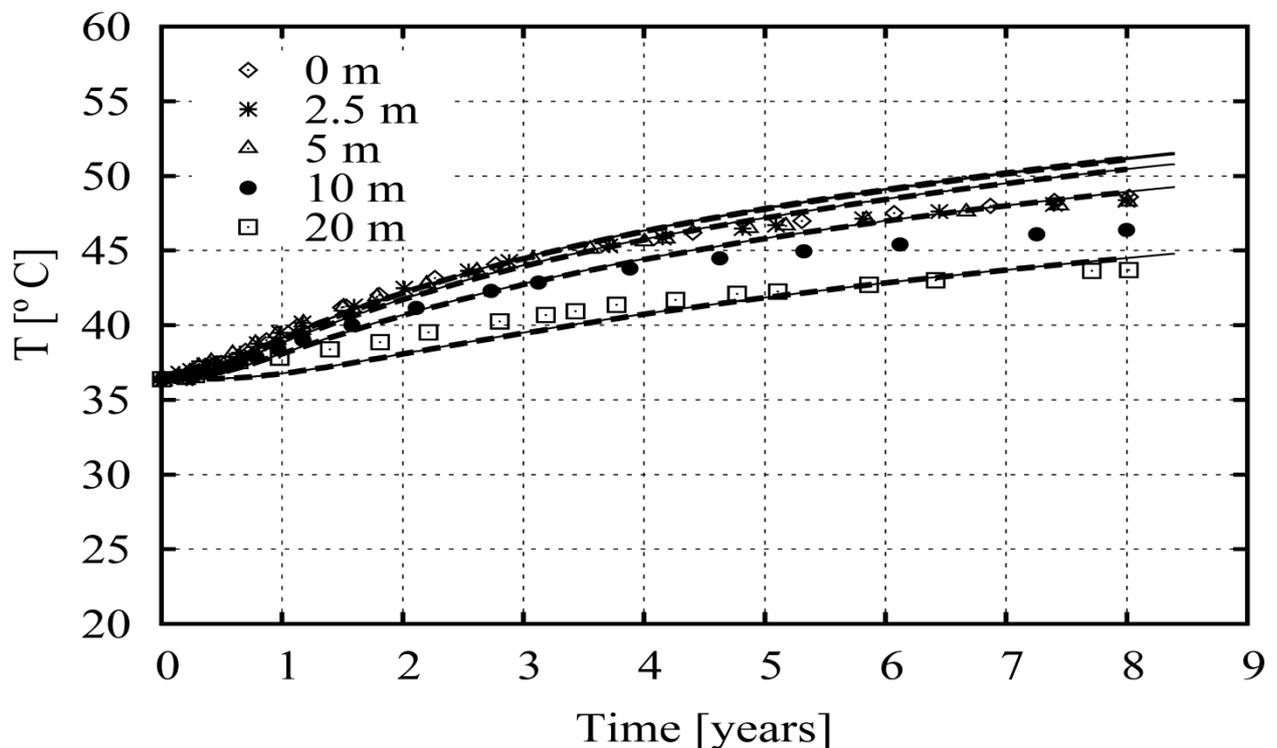


Bild 3.9 Messdaten sowie Simulationsergebnisse (gestrichelt: FTK-Simulator / durchgezogen: TOUGH-FLAC) zur Temperaturentwicklung im Salinargebirge unterhalb der Versuchsstrecke im nicht erhitzten Streckenbereich, Blanco Martín et al. (2016)

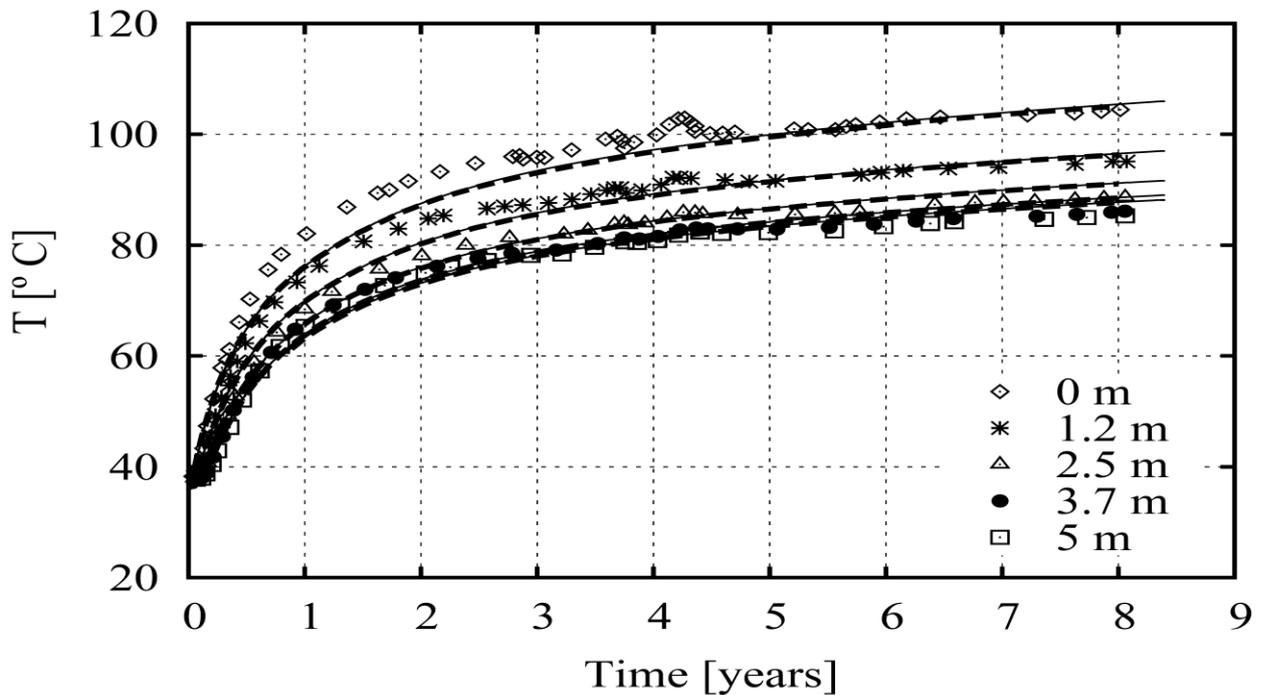


Bild 3.10 Messdaten sowie Simulationsergebnisse (gestrichelt: FTK-Simulator / durchgezogen: TOUGH-FLAC) zur Temperaturentwicklung im Pfeilerstoß zwischen den jeweils mittleren Erhitzern, Blanco Martín et al. (2016)

FTK-Simulators können damit im Hinblick auf die Temperaturmessdaten und generalisiert im Hinblick auf die physikalische Modellierung thermischer Prozesse im Salinargebirge als grundsätzlich erfolgreich angesehen werden.

(b) Mechanische Prozesse

Neben Temperaturmessdaten sind im TSDE-Experiment auch Messdaten zur Streckenkonvergenz sowie zum Versatzdruckaufbau erhoben worden. Diese Messdaten werden im Folgenden den Simulationsergebnissen der beiden Benchmark-Partner gegenübergestellt, um neben einer erweiterten Verifikation auch eine erweiterte Validation des FTK-Simulators zu ermöglichen.

Bild 3.11 zeigt die Messdaten zur zeitlichen Entwicklung der Streckenkonvergenz in zwei verschiedenen Messquerschnitten, zum einen im nicht erhitzten Streckenbereich und zum anderen zwischen zwei benachbarten Erhitzern. Wie aus Bild 3.11 zu ersehen ist, sind die Konvergenzmessdaten bereits vor der Aktivierung der Erhitzer erhoben worden, die Nullkonvergenz ist allerdings auf den Zeitpunkt der Erhitzeraktivierung festgelegt worden. Es fällt auf, dass die Vertikalkonvergenz im gesamten Messzeitraum sowohl für den erhitzten Streckenbereich wie auch für den nicht erhitzten Streckenbereich etwas größer ist als die Horizontalkonvergenz. Mit Aktivierung der Erhitzer ist im erhitzten Streckenbereich eine erhebliche Intensivierung der Streckenkonvergenz zu verzeichnen, während die Konvergenzrate im nicht erhitzten Streckenbereich über den gesamten Messzeitraum nahezu konstant ist. Vor der Aktivierung der Erhitzer ist in den Konvergenzmessdaten kein Unterschied zwischen den beiden Messquerschnitten zu erkennen.

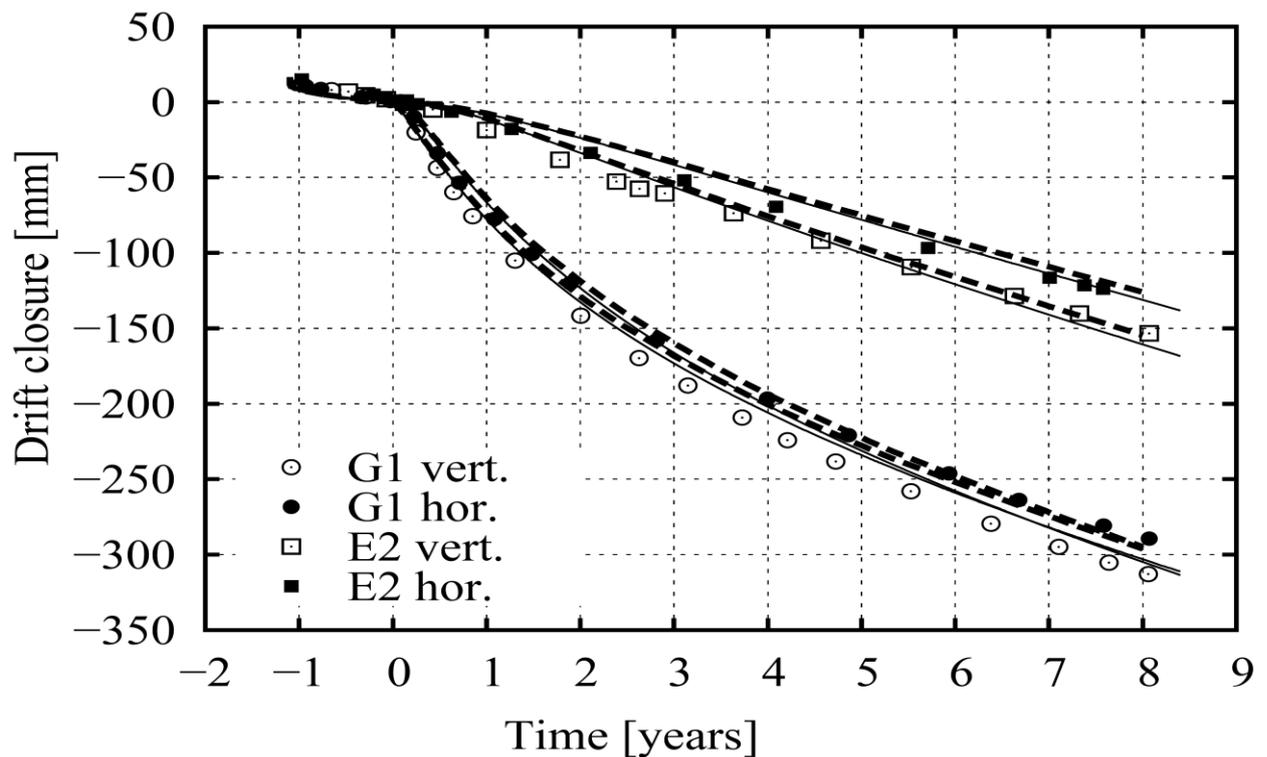


Bild 3.11 Messdaten sowie Simulationsergebnisse (gestrichelt: FTK-Simulator / durchgezogen: TOUGH-FLAC) zur Streckenkonvergenz im nicht erhitzten Streckenbereich sowie zwischen zwei benachbarten Erhitzern, Blanco Martín et al. (2016)

Den Konvergenzmessdaten gegenübergestellt sind in Bild 3.11 die entsprechenden Simulationsergebnisse der beiden Benchmark-Partner. Die Simulationsergebnisse beider Benchmark-Partner zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messdaten, allerdings ist der Unterschied zwischen der Vertikal- und der Horizontalkonvergenz für den erhitzten Streckenbereich in den Simulationen nicht so groß wie in den Messwerten, obwohl eben dieser Unterschied für den nicht erhitzten Streckenbereich gut nachvollzogen werden konnte. Mögliche Ursache dafür könnte eine nicht erkannte und entsprechend im Simulationsmodell nicht berücksichtigte Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit im Salinargebirge sein.

Aus den Streckenkonvergenzmessdaten ist im Rahmen des Forschungsprojekts BAMBUS I die zeitliche Entwicklung einer mittleren Salzgrusporosität abgeleitet worden, die in Bild 3.12 dargestellt und den entsprechenden Simulationsergebnissen der beiden Benchmark-Partner gegenübergestellt ist. Da in den Konvergenzmessdaten je eine Vertikal- und eine Horizontalkonvergenz für den erhitzten und den nicht erhitzten Streckenbereich ermittelt worden ist, werden entsprechend Bild 3.12 für jeden Messquerschnitt auch jeweils zwei unterschiedliche zeitliche Entwicklungen der Salzgrusporosität abgeleitet. Die initiale Salzgrusporosität wird dabei mit $\phi_0 \approx 35\%$ angesetzt. Die zeitliche Entwicklung der mittleren Salzgrusporosität konnte in den Simulationen beider Benchmark-Partner sehr gut nachvollzogen werden.

Die in Bild 3.11 dargestellten Streckenkonvergenzen sind durch Messung der Verschiebungen bzw. Deformationen an der Streckenkontur ermittelt worden. Deformationen treten zusätzlich allerdings auch innerhalb des Salinargebirges auf. Diese Gebirgsdeformationen können messtechnisch erfasst werden durch die Installation von Extensometern in einem

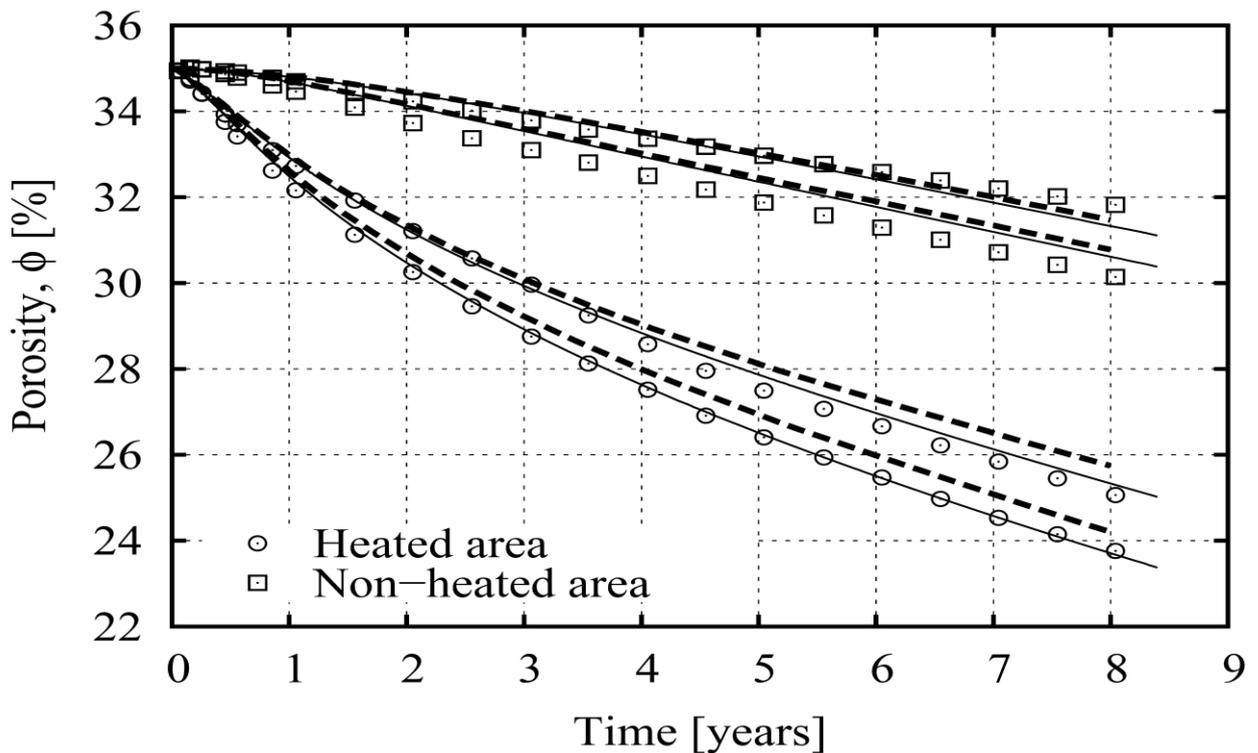


Bild 3.12 Messdaten sowie Simulationsergebnisse (gestrichelt: FTK-Simulator / durchgezogen: TOUGH-FLAC) zur abgeleiteten zeitlichen Entwicklung der Salzgrusporosität im nicht erhitzten Streckenbereich sowie zwischen zwei benachbarten Erhitzern, Blanco Martín et al. (2016)

Bohrloch. Ein solches Extensometerbohrloch ist in horizontaler Richtung in einer der beiden Versuchsstrecken im Bereich des mittleren Erhitzers im pfeilerabgewandten Streckenstoß installiert worden. Bild 3.13 zeigt die Deformationsmessdaten im Extensometerbohrloch sowie in die zugehörigen Simulationsergebnisse der beiden Benchmark-Partner. Es wird deutlich, dass zwar die Simulationsergebnisse untereinander eine sehr gute Übereinstimmung zeigen, die Messdaten allerdings in der Tendenz unterschätzt werden, möglicherweise dadurch begründet, dass die Kriechparameter des Salinargebirges für geringe deviatorische Beanspruchungen noch nicht in hinreichender Qualität abgeleitet worden sind.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Verifikation des FTK-Simulators im Hinblick auf mechanische Prozesse und die Validation des FTK-Simulators im Hinblick auf die Konvergenz- und Deformationsmessungen grundsätzlich als erfolgreich angesehen werden können, da die Berechnungsdaten untereinander sehr gut übereinstimmen und die Messdaten mit den beiden Simulatoren zumindest größtenteils sehr gut nachvollzogen werden.

Die allmähliche Konvergenz der Versuchsstrecken führt zu einer Kompaktion des Salzgrusversatzes, wodurch einerseits die Porosität des Salzgrusversatzes kontinuierlich reduziert wird, gleichzeitig aber auch ein Versatzdruck im Salzgrusversatz aufgebaut wird. Die Intensität des Versatzdruckaufbaus hängt allerdings ganz erheblich von der Kompaktion des Salzgruses und damit von der Konvergenz bzw. Konvergenzrate der Strecke ab. Bild 3.14 zeigt die Messdaten zur zeitlichen Versatzdruckentwicklung im Salzgrusversatz sowohl für den nicht erhitzten Streckenbereich wie auch für den erhitzten Streckenbereich. Zudem zeigt Bild 3.14 die entsprechenden Simulationsergebnisse beider Benchmark-Partner. Aus

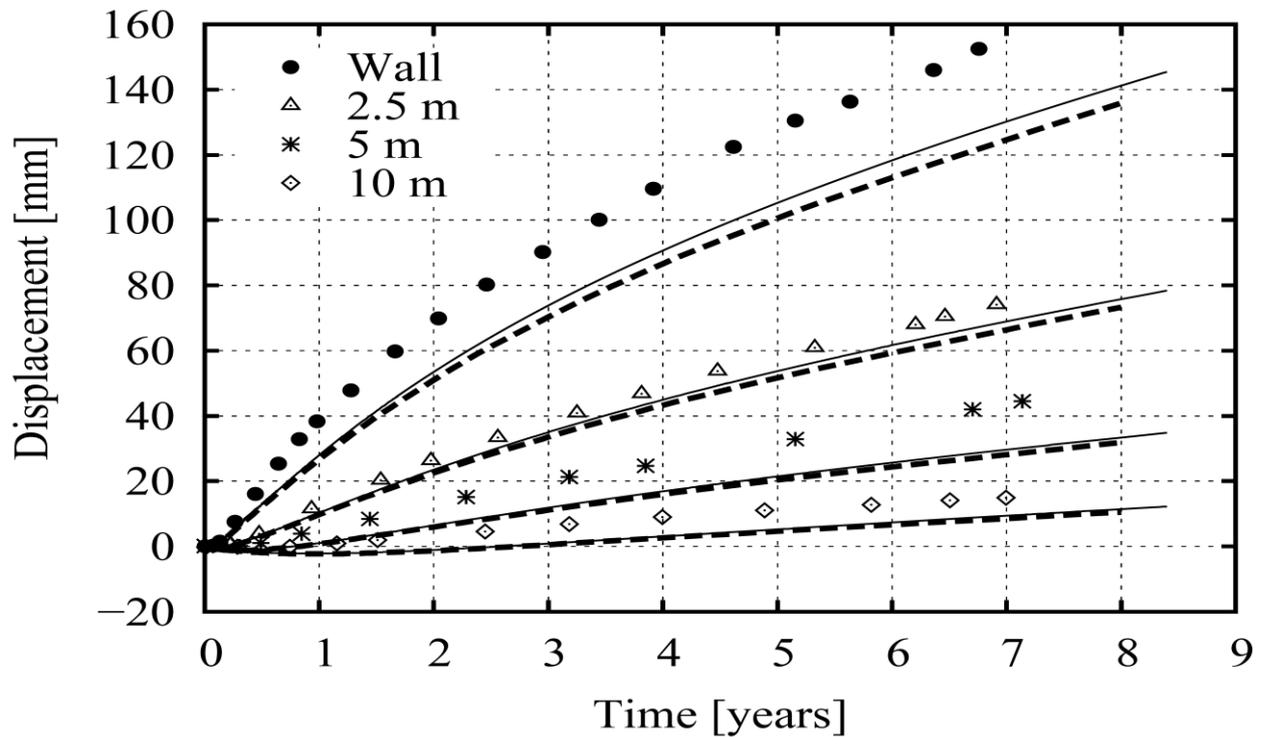


Bild 3.13 Messdaten sowie Simulationsergebnisse (gestrichelt: FTK-Simulator / durchgezogen: TOUGH-FLAC) zu den Verschiebungen des pfeilerabgewandten Streckenstoßes sowie des dahinter liegenden Salinargebirges neben dem mittleren Erhitzer, Blanco Martín et al. (2016)

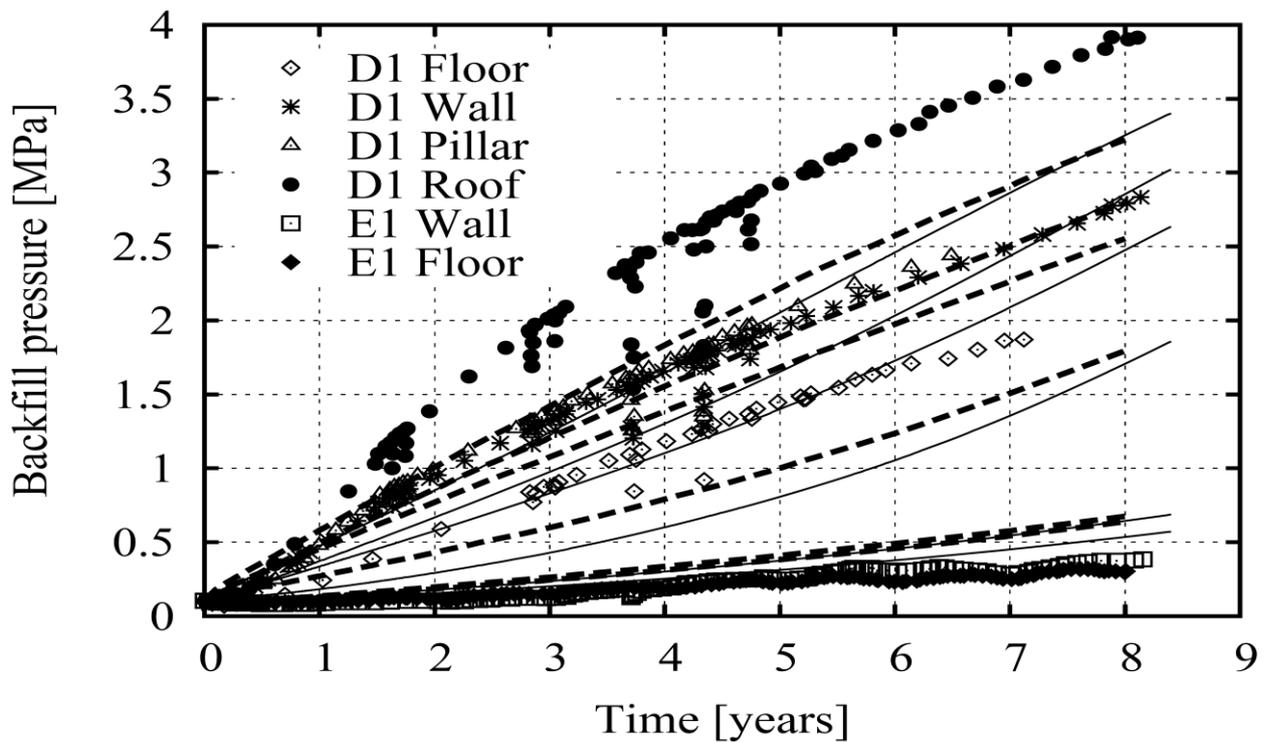


Bild 3.14 Messdaten sowie Simulationsergebnisse (gestrichelt: FTK-Simulator / durchgezogen: TOUGH-FLAC) zur Versatzdruckentwicklung im Salzgrusversatz im nicht erhitzten Streckenbereich sowie um den mittleren Erhitzer, Blanco Martín et al. (2016)

Bild 3.14 ist zu ersehen, dass gegen Ende des Messzeitraums im Salzgrusversatz des nicht erhitzten Streckenbereichs ein maximaler Versatzdruck von etwa $0,4 \text{ MPa}$ gemessen worden ist, während im Salzgrusversatz um den mittleren Erhitzer für den gleichen Zeitpunkt ein etwa 10-fach höherer maximaler Versatzdruck von fast 4 MPa gemessen worden ist, korrespondierend mit der dort signifikant höheren Streckenkonvergenzrate und der daraus resultierenden höheren absoluten Streckenkonvergenz.

Mit Blick auf die retrospektive Analyse des Versatzdruckaufbaus im Salzgrusversatz muss festgestellt werden, dass zwar die Simulationsergebnisse untereinander eine gute Übereinstimmung zeigen, die Messwerte aber mit beiden Simulatoren nicht in guter Qualität nachvollzogen werden konnten, nicht einmal in ihrer zeitlichen Tendenz. Einzig die unterschiedlichen Versatzdruckentwicklungen im erhitzten und nicht erhitzten Streckenbereich konnten qualitativ nachvollzogen werden. Als Ursache für die Diskrepanz zwischen den Messdaten und den Simulationsergebnissen für die Versatzdruckentwicklung wird eine fehlende Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf das Kompaktionsverhalten des Salzgruses im Stoffmodell *CWIPP* vermutet. Möglicherweise können die im ENTRIA-Teilprojekt VP 5.1 geplanten Laboruntersuchungen an Salzgrus in diesem Kontext zu einer Verbesserung des Prozessverständnisses führen.

4 Konzeptionelle Ansätze zur Simulation von Fluidströmungen im Tiefenlager-/Endlagerbergwerk und seiner Nahfeld-Umgebung unter Einbindung von Funktionalmodellen zur Prozessabstraktion

4.1 Grundlegende bisherige Vorgehensweise zur Dokumentation der Langzeitsicherheit

Im Rahmen von Forschungsprojekten mit generischen Endlagerkonfigurationen und standortbezogenen Endlagerprojekten sind in den vergangenen Jahren Langzeitsicherheitsanalysen durchgeführt worden. Dabei sind vornehmlich die fluiddynamischen Prozesse im verschlossenen Endlager betrachtet worden, da hieraus in Verbindung mit der potentiellen Freisetzung von Schadstoffen die langzeitbezogene zentrale Verletzung der Schutzziele resultiert (zusätzliche Strahlenbelastung, Grundwasserkontamination). Da eine realitätsnahe Überführung der zumeist geotektonisch und geometrisch komplexen Rahmenbedingungen eines Endlagersystems mit dem Endlagerbergwerk und dem zugehörigen Geosystem in einem dann auch z.B. im Rahmen der Kontinuumsmechanik rechentechnisch mit den verfügbaren Simulationswerkzeugen handhabbares Berechnungsmodell nicht möglich ist, sind standortbezogen je nach geotektonischer und konfigurativer Komplexität mehr oder weniger umfangreiche Abstraktionen vorgenommen worden (so genannte Kompartimentmodelle). Der Abstraktionsgrad ist dabei allerdings dem Fortschritt wissenschaftlicher Erkenntnisse und simulationstechnischer Möglichkeiten folgend von zunächst relativ groben Abbildungen hin zu stetig verfeinerten Abbildungen sowohl bezüglich der Modellierung physikalischer Prozesse wie auch der Generalisierung geometrischer Strukturen reduziert worden.

Grundsätzlich beruht die Langzeitsicherheitsanalyse (performance assessment, PA) auf folgender Methodik:

- Abbildung des Endlagersystems mit Endlagerbergwerk und umgebenden Geosystem in eine fluiddynamisch analysierbare Struktur mit Untergliederung in Kompartimente,
- Analyse von potentiellen Schadstofffreisetzungspfaden im Endlager- und Geosystem (Identifizierung von standortbezogenen FEPs und Konstruktion von migrationsrelevanten Szenarien),
- Entwicklung von Funktionalmodellen zur vereinfachten Modellierung von freisetzungsrelevanten physikalischen Prozessen (Konvergenz, Porosität und Permeabilität in Raum und Zeit),
- Ermittlung von Bandbreiten für fluiddynamisch und schadstofftransportrelevante Parameter,
- Zufallsgesteuerte Definition von Parameterkombinationen im Rahmen der identifizierten Bandbreiten und rechnerische Ermittlung von Fluidströmen und zugehörigem Schadstofftransport im abstrahierten Endlagersystem entsprechend dem jeweiligen Szenario (Realisationen),
- Bewertung der in die Biosphäre remigrierten Schadstoffe entsprechend den jeweiligen Schutzzielen und Bewertungsmaßstäben.

Das zu analysierende Endlagersystem wird aus fluiddynamischer Sicht abstrahiert und in Kompartimente unterteilt. Zentrale Kompartimente sind die Kammern mit den endgelagerten Abfällen (Quelle), das Endlager-Nahfeld (Endlagerbergwerk mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich (ewG) und geologischer Barriere), das Endlager-Fernfeld (Deck- und Nebengebirgsformationen außerhalb des ewG) und die Biosphäre mit den Schutzgütern (z.B. oberflächennahes Grundwasser, menschlicher Lebensraum). Dabei unterteilt sich das Endlagerbergwerk in separat abgedichtete Einlagerungsbereiche und die gegen die Biosphäre abgedichtete Restgrube mit den Infrastrukturgrubenbauen und den Zugangsschächten.

Damit kann die Analysenmethodik zum Beleg der Langzeitsicherheit weiter konkretisiert werden:

- Abstraktion des Grubengebäudes in fluiddynamisch relevante Kompartimente (grob- oder feingliedrig),
- Identifizierung fluiddynamisch relevanter Mechanismen,
- Formulierung von Funktionalmodellen zur Abbildung / Generalisierung lokaler TH2MC-Prozesse (z.B. Konvergenzfunktion, Porositäts- und Permeabilitätsfunktion),
- Integration von Funktionalmodellen in den jeweiligen PA-Simulator,
- Szenarienentwicklung und darauf bezogene Sensitivitätsanalyse bezüglich Fluiddynamik in dem verschlossenen, barrierebezogen intakten Endlager-Nahfeld (Referenzszenario / wE, Alternativszenarien / wwE) bzw. in dem und dann auch aus dem nicht intakten Endlager-Nahfeld (Alternativszenarien / wwE). Bezüglich Schadstofffreisetzungsverhalten und Dokumentation der Langzeitsicherheit erfolgt nachfolgende Differenzierung:
 - Szenarien ohne Schadstofffreisetzung außerhalb des ewG (wE, wwE) → vollständiger Einschluss (→ zulässige Endlagerentwicklung),
 - Szenarien mit Schadstofffreisetzung außerhalb des ewG (wwE) bis in die Biosphäre →
 - Einhaltung der Grenzwerte: sicherer Einschluss (→ zulässige Endlagerentwicklung),
 - keine Einhaltung der Grenzwerte: kein sicherer Einschluss (→ nicht zulässige Endlagerentwicklung).

Im Fall einer als nicht zulässig bewerteten Schadstofffreisetzung sind entweder Modifikationen / Optimierungen der Endlagerkonzeption bzw. der Endlagerauslegung vorzunehmen oder der Standort ist für die Errichtung eines Endlagers ungeeignet.

Diese generelle Vorgehensweise zur Dokumentation der Langzeitsicherheit eines Endlagers wird auch für die neue Konzeption des Tiefen-/Endlagers beibehalten.

4.2 Prozessabstraktion durch Funktionalmodelle

Mit den in die PA-Simulatoren integrierten Funktionalmodellen werden mit stärkerer oder weniger starker Abstraktion tiefenlager-/endlagerrelevante Prozesse beschrieben, die die Schadstoffremigration aus dem Tiefenlager / Endlager in die Biosphäre durch die geologi-

schen und/oder geotechnischen Barrieren bedingen. Dazu gehören als sicherheitstechnisch relevante Prozesse

- Konvergenz,
- Strömung von Gas und wässrigen Lösungen im Endlagerbergwerk und gegebenenfalls auch in der umgebenden Wirtsgesteinsformation,
- Quelldruckentwicklung,
- Sekundärporositätsentwicklung und
- Sekundärpermeabilitätsentwicklung.

Im Hinblick auf Sekundärporositäts- und Sekundärpermeabilitätsentwicklung sind sowohl die geologische Barriere wie auch die geotechnischen Barrieren zu betrachten.

Die Berücksichtigung von Wärmeentwicklung und Gasbildung erfolgt in den PA-Simulatoren dagegen nicht in Form eines abstrahierenden Funktionalmodells, sondern als zeitlich-räumliche Einwirkung, die in den PA-Simulatoren unmittelbar vom Anwender vorgegeben werden kann, so dass keine abstrahierenden Funktionalmodelle benötigt werden.

Im Rahmen des vorliegenden Arbeitsberichtes kann aus Platzgründen nicht auf alle vorstehend genannten Prozesse und deren Abstraktion durch Funktionalmodelle eingegangen werden. Daher wird das Konzept der Funktionalmodelle im Folgenden exemplarisch erläutert am Beispiel eines als Konvergenzformel bezeichneten Funktionalmodells, in dem dann die relevanten Prozesse integrativ zusammengefasst und notwendigerweise auch abstrahiert werden und das zur Modellierung der konvergenzbedingten Salzgruskompaktion einschließlich Kompaktionsdruckaufbau und der damit dann auch einhergehenden Fluidruckentwicklung im Porenraum des Salzgruses in einer mit Salzgrus versetzten Strecke im Salinargebirge herangezogen wird. Der Kompaktionsdruck wirkt gleichzeitig vice versa als Stützdruck und damit stabilisierend und konvergenzreduzierend auf das Salinargebirge.

Der Konvergenzprozess führt insbesondere im Salinargebirge aufgrund seiner Kriechfähigkeit zu einer allmählichen Reduzierung der Hohlraumvolumina im Endlagerbergwerk. In deutlich geringerem Maße und mit Blick auf das Prozessverständnis auch noch nicht vollständig gesichert kann eine zeitabhängige Hohlraumkonvergenz auch im Tonsteingebirge auftreten, wobei dort allerdings anstatt eines viskosen Materialverhaltens auch zeitliche Veränderungen des Porendrucks im primär vorhandenen vernetzten Porenraum als Ursache für die Hohlraumkonvergenz in Betracht zu ziehen sind.

Durch die Hohlraumkonvergenz baut sich in verschlossenen Grubenräumen in schon vor dem Verschluss des Endlagers vorhandenen und dann durch den Verschluss eingeschlossenen oder auch erst zu einem späteren Zeitpunkt in das verschlossene Endlager zugetretenen Fluiden oder im Rahmen von Korrosionsprozessen im verschlossenen Endlager entstehenden Gasen ein Fluidruck auf, der als mechanischer Stützdruck wirksam wird und damit der weiteren Hohlraumkonvergenz entgegenwirkt und diese in Folge verlangsamt. Eine ebenfalls die Hohlraumkonvergenz verzögernde Eigenschaft hat das in den verschlossenen Grubenräumen vorhandene Versatzmaterial (z.B. Salzgrus oder Bentonit), da dieses im Lauf der Zeit infolge Kompaktion auch einen mechanischen Stützdruck ausbildet. Grundsätzlich wird die Hohlraumkonvergenz entsprechend Gl. (4.1) beschrieben durch

$$\frac{d}{dt} V(t) = -\dot{K}(t) \cdot V(t) \quad (4.1)$$

mit

$V(t)$ - Hohlraumvolumen zum Zeitpunkt t in m^3 und

$\dot{K}(t)$ - Hohlraumkonvergenzrate zum Zeitpunkt t in d^{-1} .

Wie bereits vorstehend skizziert, hängt die Hohlraumkonvergenzrate $\dot{K}(t)$ von verschiedenen Einflussgrößen ab, z.B. vom Fluiddruck sowie vom Stützdruck innerhalb des Hohlraums, aber auch von der Temperaturverteilung, von der Sättigungsverteilung und von der Poren-druckverteilung sowie vom Sekundärspannungszustand im umgebenden Gebirge.

Zur Berücksichtigung des in mit Salzgrus versetzten Strecken im Salinargebirge stattfindenden Kompaktionsprozesses sind nach *Storck et al. (2002)* und *Niemeyer et al. (2002)* bereits in den PA-Simulatoren EMOS und PROSA Konvergenzformeln verwendet worden. Auch im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) ist nach *Kock et al. (2012)* eine Konvergenzformel zur Modellierung des Kompaktionsprozesses von Salzgrus verwendet worden.

Die drei vorstehend genannten Dokumentationen zur Verwendung einer Konvergenzformel haben gemeinsam, dass in ihnen Informationen zur Validation der jeweiligen Konvergenzformel bestenfalls nur kurz angedeutet werden, allerdings nicht in einem zur Gewährleistung der Nachvollziehbarkeit hinreichenden Umfang dokumentiert sind. Aus diesem Grund ist im Rahmen des ENTRIA-Teilprojekts VP 5.1 zunächst exemplarisch die in VSG angesetzte Konvergenzformel mit Hilfe eines speziellen Lokal-/Prozessmodells analysiert worden.

Die in VSG angesetzte Konvergenzformel, bei der es sich um einen auf *Stelte (1985)* basierenden erweiterten *Stelte*-Ansatz handelt, ergibt sich entsprechend Gl. (4.2) durch

$$\dot{K}(x, t, p(t), \phi(t), T(t)) = \dot{K}_0 \cdot f_{loc}(x) \cdot f_p(p(t)) \cdot f_\phi(\phi(t)) \cdot f_T(T(t)) \cdot f_t(t) \quad (4.2)$$

mit

\dot{K}_0 - stationäre Konvergenzrate des unversetzten Hohlraums bei einem konstanten Innendruck (= Referenzdruck p_{ref}), einer konstanten Temperatur (= Referenztemperatur T_{ref}) und einer isotropen primären Gebirgsspannung p_G am Referenzort in a^{-1} ,

$f_{loc}(x)$ - zeitlich konstanter ortsabhängiger Faktor zur Berücksichtigung der Ortsabhängigkeit der stationären Konvergenzrate bei Referenzbedingungen in -,

- $f_p(p(t))$ - Faktor zur Berücksichtigung der Abhängigkeit der stationären Konvergenzrate vom im Porenraum wirkenden Fluiddruck $p(t)$ zum Zeitpunkt t in -,
- $f_\phi(\phi(t))$ - Faktor zur Berücksichtigung der Abhängigkeit der stationären Konvergenzrate von der Salzgrusporosität $\phi(t)$ zum Zeitpunkt t in -,
- $f_T(T(t))$ - Faktor zur Berücksichtigung der Abhängigkeit der stationären Konvergenzrate von der Temperatur $T(t)$ zum Zeitpunkt t in - und
- $f_i(t)$ - Faktor zur Berücksichtigung von transienten Effekten auf die stationäre Konvergenzrate zum Zeitpunkt t in -.

In *Navarro (2013)* werden einige Schwachstellen der Konvergenzformel nach Gl. (4.2) diskutiert. Diese diskutierten Schwachstellen werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt:

- Für den Faktor $f_T(T(t))$ wird eine repräsentative Temperatur $T(t)$ zum Zeitpunkt t benötigt. Es ist bisher nicht klar, wie diese repräsentative Temperatur zu ermitteln ist. $T(t)$ könnte beispielsweise die durchschnittliche Temperatur an der Streckenkantur sein, alternativ wäre aber auch die Temperatur an besonders charakteristischen Positionen im umgebenden Salinargebirge möglich. Aus diesem Grund ist die Konvergenzformel nach Gl. (4.2) in VSG nur in vereinfachter Form mit $f_T(T(t)) \equiv 1$ eingesetzt worden, da davon ausgegangen worden ist, dass dieser Faktor für ein sich zeitlich und räumlich veränderndes Temperaturfeld nicht ausreichend genau bestimmbar sei. Um dennoch eine Abhängigkeit der Konvergenzrate von der Temperatur berücksichtigen zu können, sind nach *Navarro (2013)* die drei unterschiedlichen Temperaturklassen „heiß“, „warm“ und „kalt“ eingeführt worden, für die dann das Salzgruskompaktionsverhalten mit Hilfe des Simulators Code_Bright analysiert worden ist. Im Anschluss daran ist der Faktor $f_{loc}(x)$ zu einem Kalibrierungsparameter umgedeutet worden, der für die drei Temperaturklassen derart eingestellt worden ist, dass im Rahmen der zeitabhängigen Salzgruskompaktion eine Porosität von nur noch $\phi = 5\%$ mit der Konvergenzformel zum gleichen Zeitpunkt erreicht wird wie mit dem Simulator Code_Bright, allerdings ohne Berücksichtigung des genauen zeitlichen Verlaufs der Salzgruskompaktion.
- Es ist nicht möglich, experimentell bestätigte Stoffmodelle für die Kompaktion des Salzgrusversatzes direkt zur Parametrisierung des Konvergenzansatzes zu verwenden. Vielmehr wird das Versatzverhalten aus dem Gebirgsverhalten abgeleitet.
- Die Ableitung des Konvergenzansatzes beruht auf verschiedenen Homogenitätsannahmen in Bezug auf Temperatur, Spannung und Porosität. Zudem werden einige Spannungen als isotrop angenommen. Dies stellt eine Vereinfachung der realen Verhältnisse dar, so dass sich die Frage stellt, wie gut die mit dem Konvergenzansatz beschriebenen physikalischen Vorgänge und Zustände die tatsächlichen widerspiegeln. Eine inhomogene Kompaktion des Versatzes konnte beispielsweise im Rahmen des TSDE-Experiments festgestellt werden, vermutlich bedingt durch die Inhomogenität der Versatztemperatur. Eine räumlich variable Porosität bedeutet allerdings, dass die im Konvergenzansatz

verwendete repräsentative Porosität zumindest nicht unmittelbar zur Bestimmung der Permeabilität des Salzgruses verwendet werden kann.

- Wegen der fehlenden funktionalen Erfassung kann der Einfluss einer sich zeitlich ändernden Feuchte im Porenraum des Salzgrusversatzes auf die Konvergenzrate nicht gut berücksichtigt werden. Eine veränderliche Feuchte könnte resultieren zum Beispiel durch den Transport von Wasserdampf im Endlager.
- Die im erweiterten *Stelte*-Ansatz gewählte Methode, zusätzliche Einflussfaktoren wie z.B. die Instationarität des Kriechens durch weitere Faktoren zu berücksichtigen, entspricht nicht dem originären Ansatz von *Stelte*, dessen Produktansatz sich aus physikalischen Überlegungen ableitete. Der Produktansatz beruht auf der Annahme, dass die Wirkung einer physikalischen Einflussgröße unabhängig von den Wirkungen der anderen Einflussgrößen beschrieben werden kann. Es wird also zum Beispiel behauptet, dass die Zeitabhängigkeit des Kriechens immer durch den gleichen Faktor $f_i(t)$ erfasst werden kann, unabhängig davon, welches Temperaturfeld gerade vorliegt. In der Realität dürfte die Komplexität der physikalischen Wechselwirkungen so hoch sein, dass die postulierte Unabhängigkeit der Einflüsse wahrscheinlich nur eine grobe Approximation darstellt.

Obwohl der Ansatz einer Konvergenzformel nach Gl. (4.2) entsprechend *Navarro (2013)* also einige Schwachstellen aufweist, scheint die Verwendung eines solchen abstrahierenden Funktionalmodells zur Analyse des Langzeitsystemverhaltens eines Endlagersystems im Salinargebirge derzeit aufgrund des mit realitätsnäheren Modellierungsansätzen verbundenen enormen Berechnungsaufwandes unverzichtbar. Daher ist im Rahmen des ENTRIA-Teilprojekts VP 5.1 die Konvergenzformel nach Gl. (4.2) mit dem Simulator $FLAC^{3D}$ analysiert worden. Dazu ist das in Bild 4.1 dargestellte Berechnungsmodell (Lokalmodell) einer mit Salzgrus versetzten Einlagerungsstrecke im umgebenden Salinargebirge diskretisiert worden. Mit diesem Berechnungsmodell sind unter Ansatz des Stoffmodells *Lux/Wolters* zur physikalischen Modellierung des Materialverhaltens des die Einlagerungsstrecke umgebenden Salinargebirges unterschiedliche Szenarien analysiert worden. Ergebnis dieser Analyse ist, dass insbesondere bei Szenarien mit erhöhter Temperatur in der Einlagerungsstrecke größere Abweichungen zwischen der mit dem Lokalmodell ermittelten Streckenkonvergenz und der mit Gl. (4.2) berechneten Streckenkonvergenz zu verzeichnen waren. Aus diesem Grund ist im Rahmen der im ENTRIA-Teilprojekt VP 5.1 durchgeführten Arbeiten ein an das Stoffmodell *Lux/Wolters* angepasstes Funktionalmodell zur Streckenkonvergenz entwickelt worden. Dieses Funktionalmodell wird in der Folge als TUC-Konvergenzformel bezeichnet. Die TUC-Konvergenzformel ergibt sich entsprechend Gl. (4.3) durch

$$\dot{K}(x, t, p(t), T(t)) = \dot{K}_0 \cdot f_{loc}(x) \cdot f_p(p_i(t)) \cdot f_T(T(t)) \cdot f_i(t) \quad (4.3)$$

mit

- \dot{K}_0 - stationäre Konvergenzrate des unversetzten Hohlraums bei einem konstanten Innendruck (= Referenzdruck p_{ref}), einer konstanten Temperatur (= Referenztemperatur T_{ref}) und einer isotropen primären Gebirgsspannung p_G am Referenzort in a^{-1} ,

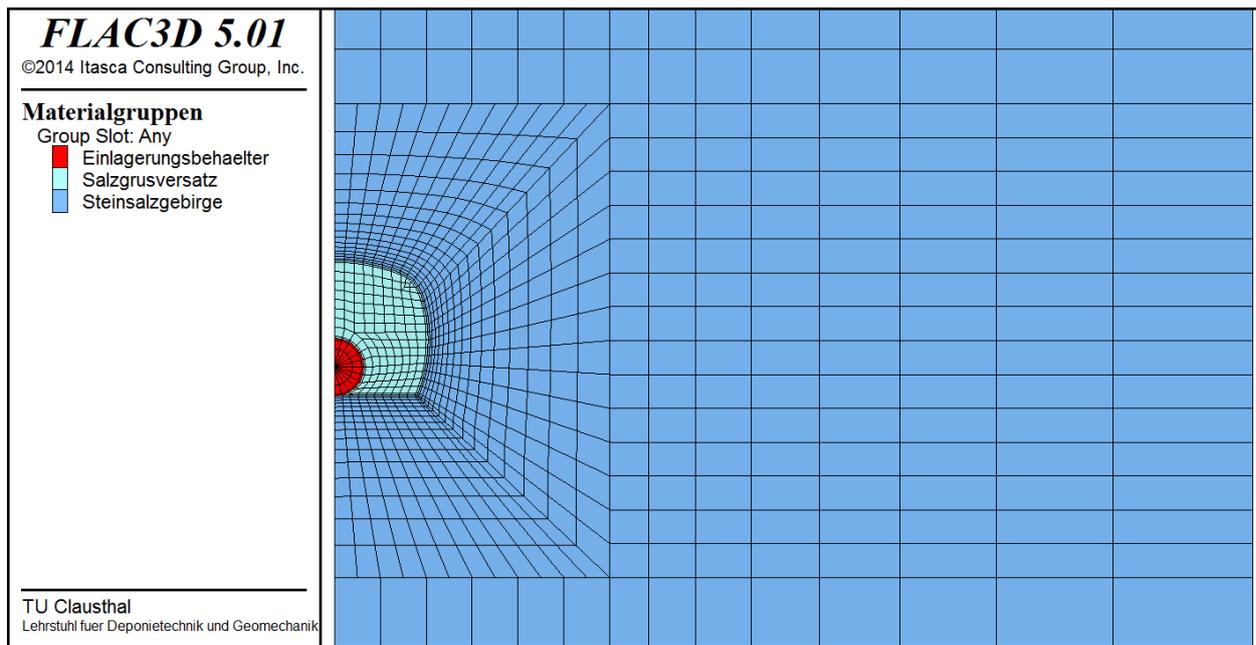


Bild 4.1 Lokalmmodell einer mit Salzgrus versetzten Einlagerungsstrecke im umgebenden Salinargebirge

$f_{loc}(x)$ - zeitlich konstanter ortsabhängiger Faktor zur Berücksichtigung der Ortsabhängigkeit der stationären Konvergenzrate bei Referenzbedingungen in -,

$$f_p(p_i(t)) = \left(1 - \left(\frac{p_i(t) - p_{ref}}{p_G - p_{ref}} \right)^n \right)$$

- Faktor zur Berücksichtigung der Abhängigkeit der stationären Konvergenzrate vom in der Strecke wirkenden Innendruck $p_i(t) = \alpha(t) \cdot p_{FI}(t) + p_\phi(t)$ zum Zeitpunkt t in -,

$$f_T(T(t)) = \exp(a \cdot (T(t) - T_{ref})^b)$$

- Faktor zur Berücksichtigung der Abhängigkeit der stationären Konvergenzrate von der Temperatur $T(t)$ zum Zeitpunkt t in - und

$f_i(t)$ - Faktor zur Berücksichtigung von transienten Effekten auf die stationäre Konvergenzrate zum Zeitpunkt t in -.

5 TH2M-gekoppeltes Verhalten von Tiefenlager-/Endlager-systemen im Salinar- und Tonsteingebirge

5.1 Wirtsgesteinsspezifische fluiddynamische Prozesse im Endlager-system

Im Rahmen der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod werden fluiddynamische Prozesse untersucht, die innerhalb von Tiefenlager-/Endlagerbergwerken¹⁰ sowie in der umgebenden Wirtsgesteinsformation auftreten, und zwar für die beiden Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge. Die durchgeführten Untersuchungen leisten einen Beitrag zur Verbesserung des Systemverständnisses hinsichtlich des langfristigen Endlagersystemverhaltens und damit auch zur Verbesserung der Prognosezuverlässigkeit dieser Endlagersysteme bzw. zur Erhöhung der Robustheit von zur Bewertung von Endlagersystemen eingesetzten Sicherheitsfunktionen.

Die fluiddynamischen Prozesse in Endlagersystemen 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),
- 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 Gefügebrauchungen 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 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 Endlagersystemen ablaufenden fluiddynamischen Prozesse ist von besonderer Bedeutung bei der Bewertung von unterschiedlichen Endlagersystemen, da nach einem Versagen der Abfallbehälter in Verbindung mit einer Mobilisierung von Radionukliden neben einem diffusiv getragenen Radionuklidtransport auch durch Fluidströmungen inner-

¹⁰ Nachfolgend wird weitgehend nur noch der Begriff Endlager verwendet, da sich die hier betrachteten fluiddynamischen Prozesse abgesehen von der Temperaturentwicklung signifikant erst nach Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager auswirken

halb des Endlagerbergwerks sowie im umgebenden Wirtsgestein ein advektiver Transport von Radionukliden bewirkt werden kann. Als Grundlage für die Ermittlung der im Endlager-nahfeld ablaufenden fluiddynamischen Prozesse ist daher im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse die langzeitige Endlagersystementwicklung 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, *BMU (2010)*. 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 aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in die Biosphäre ist dort die Einhaltung von schadstoffbezogen vorgegebenen Grenzwerten nachzuweisen. Zur Veranschaulichung ist dieser Sachverhalt in Bild 5.1 und Bild 5.2 dargestellt.

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

- In einem Endlager im Salinargebirge steht in der 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

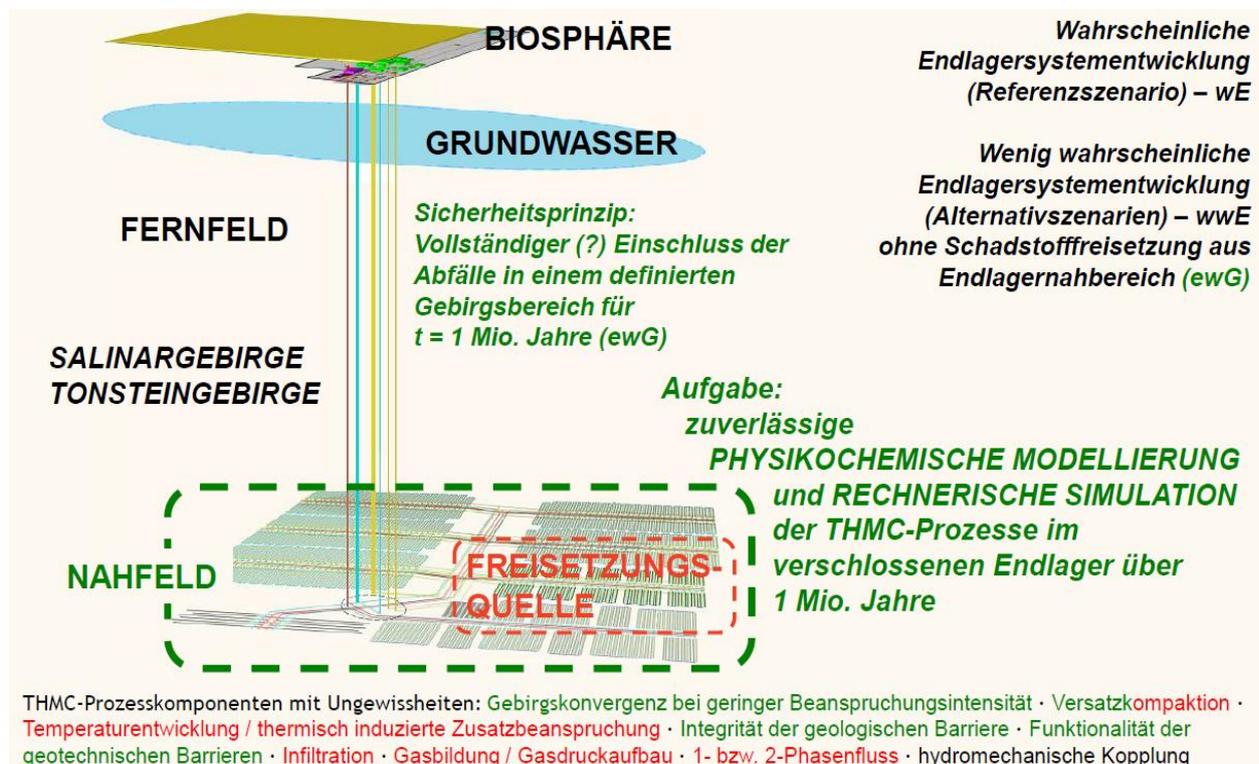


Bild 5.1 Zentrale Aspekte der geologischen Tiefenlagerung für die wahrscheinlichen Endlagersystementwicklungen nach Lux (2013)

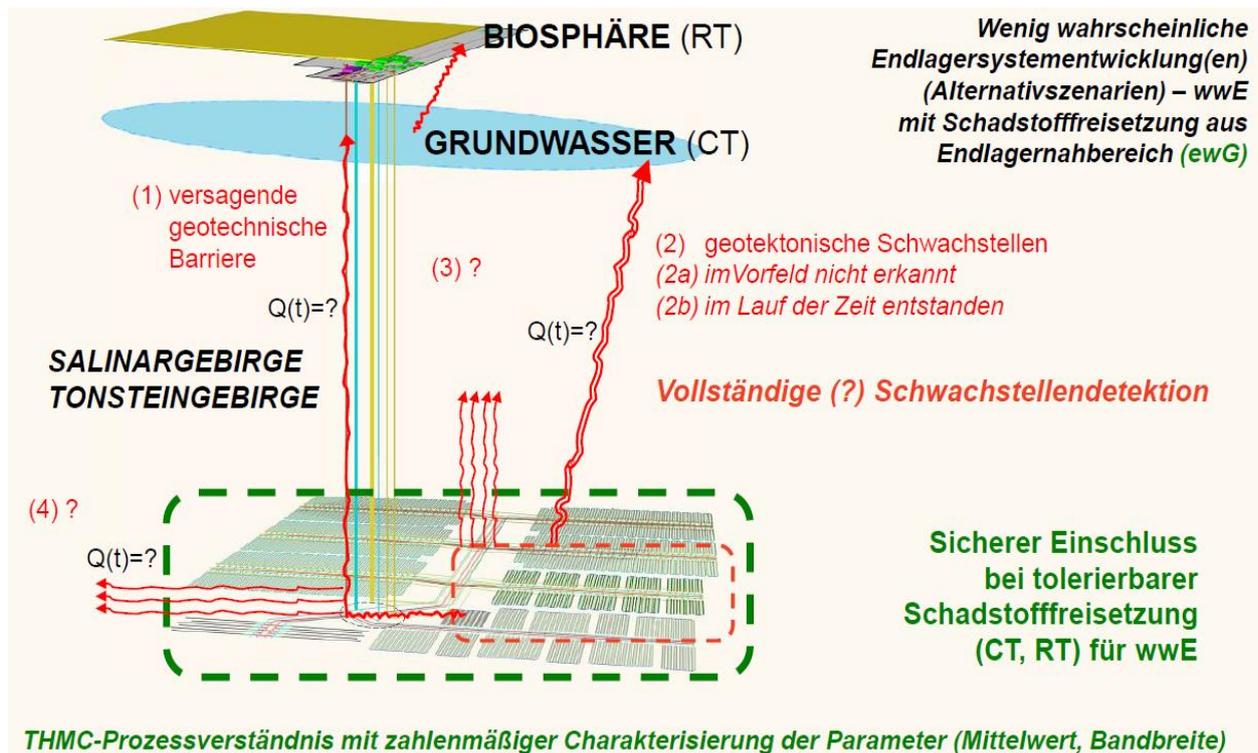


Bild 5.2 Weniger wahrscheinliche Endlagersystementwicklungen (wwE) mit stilisierten Weggamkeiten für eine Schadstofffreisetzung aus dem Endlagernahbereich (ewG) nach Lux (2013)

in einem Endlager im Tonsteingebirge aufgrund des im Tonstein vorhandenen Porenwassers und der schon im primären Zustand vorhandenen vernetzten Weggamkeiten im Porenraum des Gesteins ein im Grundsatz unbegrenztes Flüssigkeitsangebot zur Verfügung.

- Aufgrund der Kriecheigenschaften des Salinargebirges wird das Porenraumvolumen im Salzgrusversatz eines Endlagers im Salinargebirge im Lauf der Zeit fortwährend reduziert. Damit ergibt sich trotz eines begrenzten Gasbildungspotentials ein allmählich ansteigender Gasdruck im Endlager. Da die Kriechfähigkeit des Tonsteingebirges im Vergleich zum Salinargebirge wesentlich geringer ist, ist der Einfluss eines konvergenzbedingten Gasdruckaufbaus auf die fluiddynamischen Prozesse in einem Endlager 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 Weggamkeiten 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.

Da die in einem Endlager sowie im umgebenden Wirtsgestein ablaufenden fluiddynamischen Prozesse signifikant für die Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagersystemen sind, sind im Rahmen der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 mit dem FTK-Simulator diverse numerische Simulationen an großräumigen so genannten Globalmodellen eines generisch-repräsentativen Endlagersystems durchgeführt worden. Dabei ist neben der Wirkung von Parametervariationen auf das berechnete Endlagersystemverhalten hinsichtlich Fluidodynamik in einem ersten Schritt auch der Einfluss einer Überfahrungssohle bzw. Monitoring-Ebene oberhalb der Einlagerungsfelder sowie einer unerkannten Störungszone mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit und Anschluss zum Deckgebirge auf das Endlagersystemverhalten hinsichtlich der Veränderung der fluiddynamischen Prozesse analysiert worden. Sowohl die Überfahrungssohle wie auch insbesondere die generische Störungszone bedeuten Schwächungen in der Integrität der geologischen Barriere, die zu einer Herabsetzung ihrer Funktionalität führen können (→ Reduzierung der Robustheit der zugehörigen Sicherheitsfunktionen).

Es ist darauf hinzuweisen, dass aufgrund der Modellgröße ebenso wie aufgrund der ablaufenden hochgradig TH2M-gekoppelten physikalischen Prozesse der FTK-Simulator gegenüber dem in *Lux et al. (2015b)* dokumentierten Entwicklungsstand des FTK-Simulators an verschiedenen Stellen modifiziert werden musste.

Zur Veranschaulichung der ablaufenden fluiddynamischen Prozesse ist eine Möglichkeit zur Visualisierung der Flüssigkeits- und Gasströmungen in den FTK-Simulator implementiert worden. Des Weiteren ist eine Schnittstelle zur Übergabe dieser Strömungsdaten an den Simulator RESUS implementiert worden, mit dem dann im ENTRIA-Teilprojekt VP 5.3 die weiteren PA-orientierten Analysen zum Radionuklidtransport im und aus dem Endlagernahfeld erfolgen, für weniger wahrscheinliche Entwicklungen des Endlagersystems auch bis in die Biosphäre.

5.2 Visualisierung der fluiddynamischen Prozesse als Beitrag zur Verbesserung des Endlagersystemverständnisses

5.2.1 Globalmodelle (Basismodelle / Modelle mit Überfahrungssohle / Modelle mit Störungszone / Modelle mit reduzierter Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation)

Im Rahmen der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod sind zunächst acht geometrisch unterschiedliche Globalmodelle (i)-(viii) zu generischen Endlagersystemen in der Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge entwickelt worden. Diese sind dann im FTK-Simulator diskretisiert und im Rahmen einer aufgrund der benötigten sehr langen Rechenzeiten explizit nicht als umfassend anzusehenden Sensitivitätsanalyse anhand exemplarisch ausgewählter Parameterkombinationen rechnerisch untersucht worden.

Die Globalmodelle zu generischen Endlagersystemen in der Wirtsgesteinsformation Salinargebirge stimmen entsprechend den gemeinsam mit Teilprojekt VP 6 vereinbarten und in *Stahlmann et al. (2015)* dokumentierten Vorgaben in ihrer geometrischen Konfiguration mit den Tonstein-Globalmodellen überein. Allerdings werden im Salinargebirge weniger geometrische Varianten betrachtet, da die Globalmodelle (i)-(iv) im Hinblick auf die berücksichtigte Wirtsgesteinsmächtigkeit für salinare Lagerstätten vom Typ Schichtensalz (flache Lagerung) und vom Typ Salzstock (steile Lagerung) und für Tongesteinslagerstätten vom Typ Kreidetone (Norddeutschland) stehen, während sich die Globalmodelle (v)-(viii) orientieren an Lagerstätten vom Typ Opalinuston (Süddeutschland). Die Globalmodelle sind wie folgt zu charakterisieren:

(i) Basis-Globalmodell (Tonsteingebirge / Salinargebirge):

1-söhliges Referenz-Endlagerbergwerk mit Schächten, Richtstrecken, Verbindungsstrecken (= Querschlägen) und mehreren Einlagerungsfeldern, in die jeweils mehrere Einlagerungsstrecken implementiert sind, sowie mit umgebender Wirtsgesteinsformation. Die Einlagerungsebene befindet sich in einer Teufe von $z = -600\text{ m}$. Die Wirtsgesteinsformation wird in einem Teufenbereich $-800\text{ m} \leq z \leq -400\text{ m}$ angenommen und ist somit im Hinblick auf ihre Mächtigkeit angelehnt an die geologische Situation zu Tonsteinvorkommen in Norddeutschland nach *Jobmann et al. (2007)*, kann aber auch das Nahfeld eines Endlagers im Salinargebirge sowohl vom Typ Schichtensalz wie auch im Grundsatz vom Typ Salzstock repräsentieren.

Bild 5.3 zeigt eine Gesamtansicht des Basis-Globalmodells zusammen mit den jeweiligen in das Modell implementierten materialbezogenen Homogenbereichen (Gebirge,

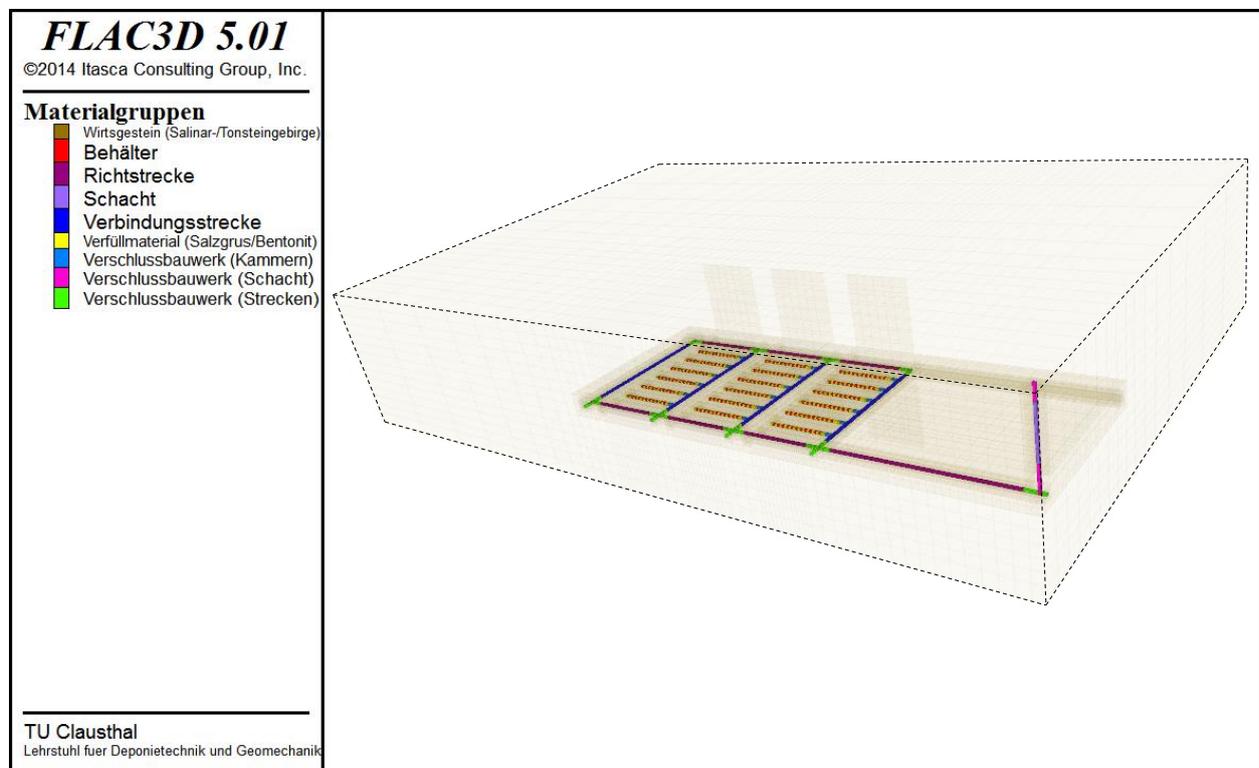


Bild 5.3 Gesamtansicht des Globalmodells (i) für ein Endlagersystem im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge

Versatzbereiche, Abdichtungsbauwerke, Behälter) – hier noch generalisiert für die beiden Geosysteme Salinar- bzw. Tonsteingebirge. Bild 5.4 zeigt eine auf die Einlagerungsfelder fokussierte Detailansicht des Basis-Globalmodells.

Das Wirtsgestein ist in Bild 5.3 sowie in Bild 5.4 als hellbrauner Gebirgsbereich dargestellt. Die Wirtsgesteinsinformation ist hier identisch mit der geologischen Barriere.

Bei der Frage nach der räumlichen Ausdehnung des im Globalmodell abgebildeten Endlagersystems sind die eingeführten Symmetrieebenen zu beachten. Die räumliche Ausdehnung des Referenz-Endlagersystems ist damit tatsächlich 4 mal so groß wie das diskretisierte Globalmodell.

In x -Richtung (= Richtung der Verbindungsstrecken bzw. Querschläge) erstreckt sich das Berechnungsmodell von $x = -1.000\text{ m}$ bis $x = +325\text{ m}$ und hat damit in x -Richtung eine Ausdehnung von 1.325 m . In y -Richtung (= Richtung der Einlagerungskammern und Richtstrecken) erstreckt sich das Berechnungsmodell von $y = -1.000\text{ m}$ bis $y = +1.000\text{ m}$ und weist somit eine Ausdehnung von 2.000 m in y -Richtung auf.

An der vorderen rechten Seite des in Bild 5.3 dargestellten Berechnungsmodells befindet sich einer der Schächte. Das dem Globalmodell zugrundeliegende Referenz-Endlagerbergwerk weist weitere drei Schächte auf, die dem symmetrischen Aufbau des Referenz-Endlagers entsprechend in den nicht im Berechnungsmodell explizit enthaltenen Endlagerbereichen liegen.

Aus der in Bild 5.4 dargestellten Detailansicht der Einlagerungsfelder im Berech-

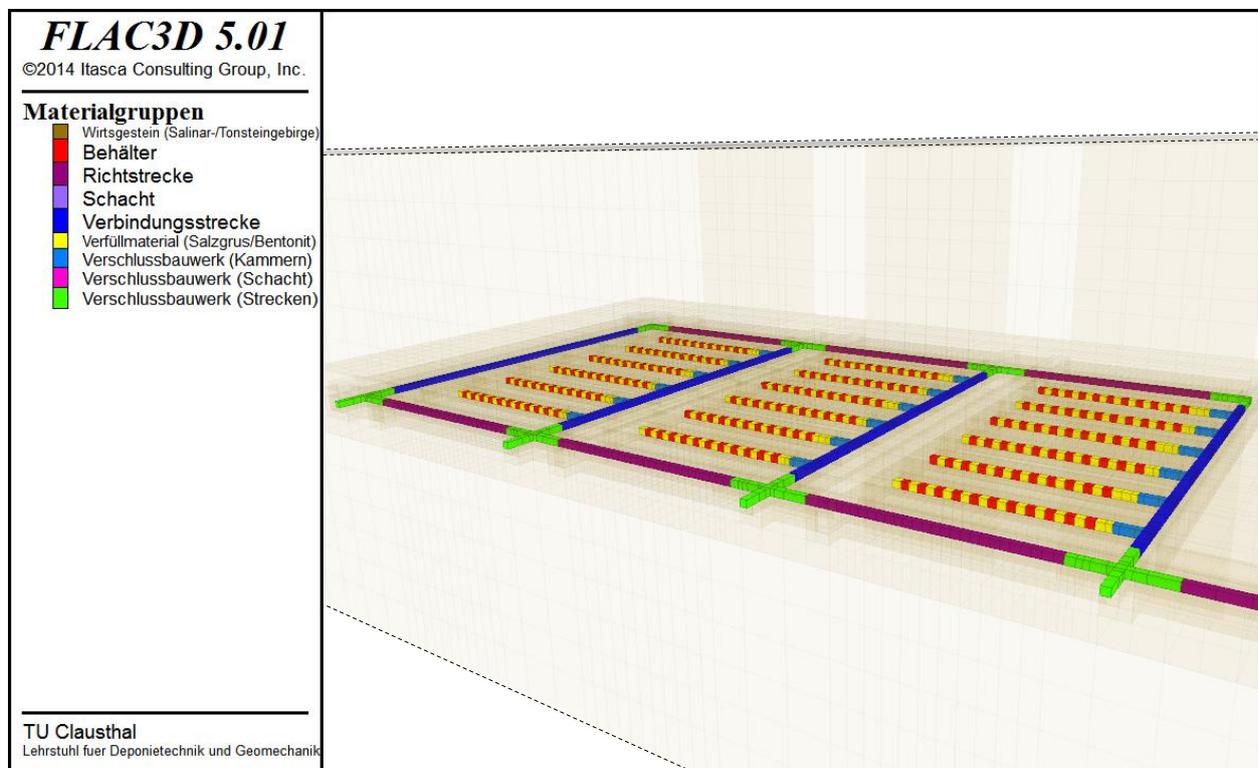


Bild 5.4 Detailansicht des Einlagerungsbereichs im Globalmodell (i) für ein Endlagersystem im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge

nungsmodell ist zu ersehen, dass die Einlagerungsfelder jeweils aus sechs Einlagerungsstrecken bzw. Einlagerungskammern mit einer jeweiligen Gesamtlänge von 145 m bestehen, von denen 15 m auf die Kammerverschlussbauwerke (hellblaue Berechnungszonen) entfallen, 9 m auf den Salzgrus bzw. Bentonit als Streckenversatz vor den Kammerverschlussbauwerken (gelbe Berechnungszonen) sowie schließlich 121 m auf den eigentlichen Einlagerungsbereich mit Abfallbehältern (rote Berechnungszonen) und dem dazwischenliegenden Versatzmaterial aus Salzgrus bzw. Bentonit (gelbe Berechnungszonen) mit jeweils einer Länge von $5,5\text{ m}$. Die Abfallbehälter sind damit räumlich diskret in das Berechnungsmodell abgebildet.

Jede Einlagerungsstrecke enthält 11 Abfallbehälter, die in ihrer geometrischen Abmessung im Globalmodell an einen POLLUX-Behälter bzw. an einen in *Hassel (2015)* vorgestellten ENCON-Behälter angelehnt sind. Im Rahmen der Diskretisierung der Globalmodelle werden allerdings jeweils ein Abfallbehälter und das in radialer Richtung umgebende Versatzmaterial zu einer Berechnungszone zusammengefasst. Die Abfallbehälter unterscheiden sich für die beiden betrachteten Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge lediglich hinsichtlich ihrer Beladung und damit unmittelbar auch hinsichtlich ihrer Wärmeleistung.

Benachbarte Einlagerungsstrecken beginnen bzw. enden entsprechend Bild 5.4 wechselweise mit einem Abfallbehälter oder mit einem Salzgrus-/Bentonit-Abschnitt, um die aus der durch den Zerfall der Radionuklide entstehenden Wärme resultierenden Temperaturänderungen im Gebirge zu reduzieren. Die Streckenachsen der Einlagerungsstrecken haben eine Entfernung von 50 m zueinander. Die Einlagerungsstrecken sind in jedem Einlagerungsfeld über Verbindungsstrecken bzw. Querschläge (dunkelblaue Berechnungszonen) miteinander verbunden. An den Außenrändern der Einlagerungsfelder verlaufen zwei parallele Richtstrecken (dunkelrote Berechnungszonen), wovon eine bis zum Schacht führt. Die Gesamtlänge dieser Richtstrecke beträgt 1.050 m . Eine der Symmetrieebenen des Globalmodells befindet sich in 25 m Entfernung zur Streckenachse dieser Richtstrecke. Alle Strecken weisen eine einheitliche Referenz-Querschnittsfläche von $A = 5\text{ m} \cdot 5\text{ m} = 25\text{ m}^2$ auf, ebenso wie die Schächte.

Innerhalb der Schächte befinden sich zwei Verschlussbauwerke (magentafarbene Berechnungszonen), eines in einer Teufe von $z = -600\text{ m}$ bis $z = -550\text{ m}$ am unteren Ende des Schachts im Bereich der Einlagerungssohle, das andere in einer Teufe von $z = -430\text{ m}$ bis $z = -400\text{ m}$ am Übergang zwischen Wirtsgestein und Deckgebirge. In sämtlichen Kreuzungsbereichen der Richtstrecken mit den Verbindungsstrecken sind weitere Verschlussbauwerke (hellgrüne Berechnungszonen) angeordnet. Diese Verschlussbauwerke reichen jeweils 25 m in die entsprechenden Richt- bzw. Verbindungsstrecken hinein.

(ii) **Globalmodell mit Überfahrungssohle** (Tonsteingebirge / Salinargebirge):

Als Erweiterung des Basis-Globalmodells mit einem 1-söhligen Referenz-Endlagerbergwerk ist ein 2-söhliges Globalmodell entwickelt worden, das in seiner konfigurativen Ausgestaltung auf der unteren Einlagerungssohle dem Basis-

Globalmodell entspricht, aber 40 m oberhalb der Einlagerungssohle zusätzlich noch eine Überfahrungssohle enthält zur Schaffung einer Monitoringmöglichkeit, z.B. für die Überwachung des langfristigen Verhaltens der Einlagerungsbehälter bezüglich Radionuklidfreisetzung, aber auch z.B. des Konvergenzverhaltens der Einlagerungsstrecken sowie der Temperatur- und Fluidphasenentwicklung innerhalb der Einlagerungsstrecken. Zu diesem Zweck soll die Überfahrungssohle auch nach der vollständigen Verfüllung der Einlagerungssohle noch für einen längeren Zeitraum von im Extremfall einigen hundert Jahren offen gehalten werden können. Das Monitoring der Einlagerungssohle könnte erfolgen über vertikale Bohrlöcher, die aus der Überfahrungssohle direkt in die Einlagerungsstrecken abgeteuft werden, um über diese Bohrlöcher die Installation und gegebenenfalls auch die Wartung von verschiedenartigen Messinstrumenten in der Einlagerungssohle und in ihrem Umgebungsbereich zu ermöglichen. Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass der Einsatz von Bohrlöchern zum Monitoring in nicht bzw. nicht mehr zugänglichen Gebirgsbereichen kein grundsätzlich neuartiges Konzept ist, da Monitoringbohrlöcher relativ häufig zur Messung unterschiedlicher Parameter im Gebirge in der Umgebung von in situ-Experimenten eingesetzt werden, z.B. im Rahmen des TSDE-Experiments zur Erfassung der räumlich-zeitlichen Temperaturentwicklung in der Streckensohle unterhalb der elektrischen Erhitzer entsprechend Bild 3.3. Dennoch ist der Einsatz von Monitoringbohrlöchern aus einer Überfahrungssohle bis direkt in die Einlagerungsstrecken hinein als wesentlicher Bestandteil eines Endlagerkonzeptes in der nationalen und internationalen Literatur noch nicht vorgeschlagen worden.

Das Abteufen der Monitoringbohrlöcher sollte vor der Einlagerung der Abfallbehälter erfolgen, um diese nicht unbeabsichtigt zu beschädigen. Alternativ könnte die Beobachtung des Endlagerverhaltens auf der Einlagerungssohle über Bohrlöcher bei modifizierter Positionierung der Bohrlöcher auch bis in den Versatzbereich zwischen den Behältern fortgeführt werden, z.B. durch bereits während der Einlagerung installierte Messstationen in versetzten Streckenbereichen. Die Bohrlöcher sollten derart angelegt werden, dass eine Reparatur bzw. ein Austausch defekter Messinstrumente möglich wäre. Ein Stahlausbau sollte dem konvergenzbedingten Verschluss der Bohrlöcher entgegenwirken. Zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit sowie zur Reduzierung bzw. Vermeidung der Auswirkungen einer besorgten Direktstrahlung sollten bzw. könnten die Bohrlöcher auch mit einem beweglichen Deckel abgedeckt werden.

Die Anordnung der Überfahrungssohle 40 m oberhalb der Einlagerungssohle sowie der von der Überfahrungssohle in die Einlagerungssohle abgeteuften Monitoringbohrlöcher ist zu ersehen aus Bild 5.5 (Gesamtansicht) bzw. aus Bild 5.6 und Bild 5.7 (Detailansicht für den Bereich der Einlagerungsfelder). Es ist zu erkennen, dass die Überfahrungssohle nur aus Richtstrecken und Verbindungsstrecken besteht. Die Verbindungsstrecken werden auch als Monitoringstrecken bezeichnet, da von ihnen ausgehend die Bohrungen in die Einlagerungsstrecken abgeteuft werden sollen. Die Monitoringstrecken sind jeweils im Bereich der halben Streckenlänge der Einlagerungsstrecken orthogonal zu den Einlagerungsstrecken ausgerichtet, um die Perforation der Wirtsgesteinsinformation zu minimieren.

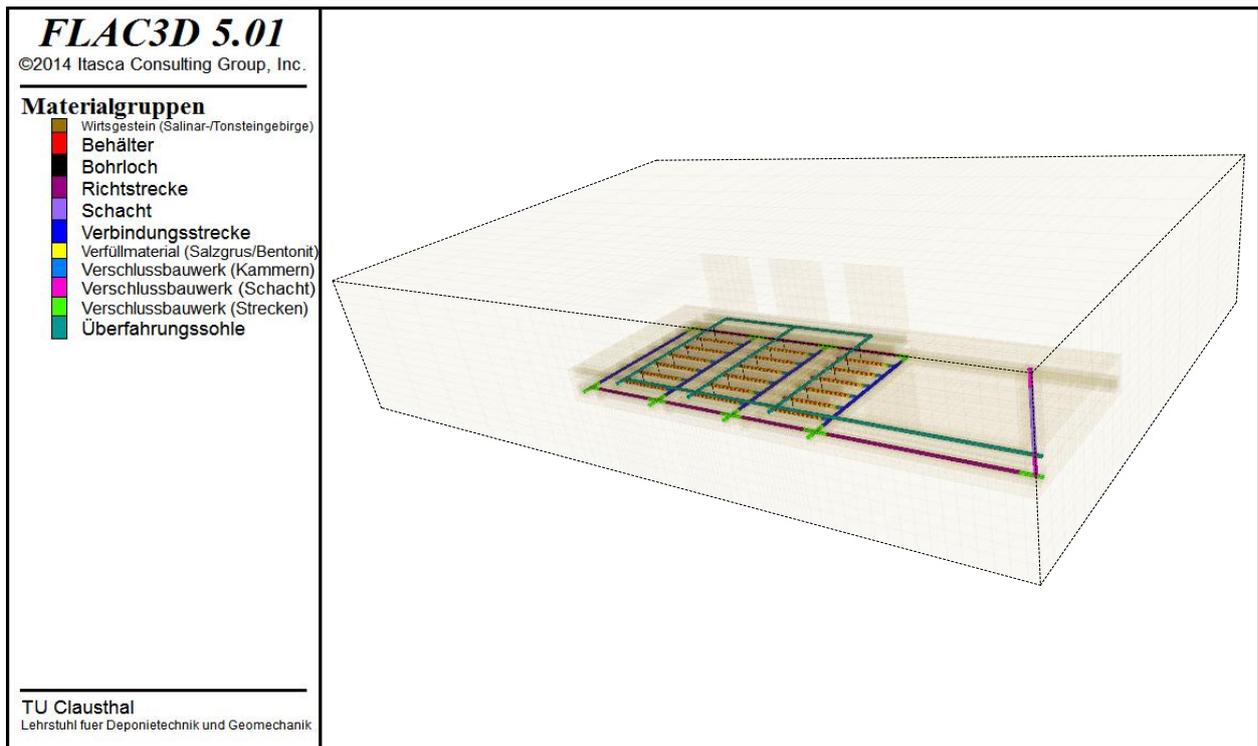


Bild 5.5 Gesamtansicht des Globalmodells (ii) mit Überfahrungssohle und Monitoringbohrlöchern für ein Endlagersystem im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge

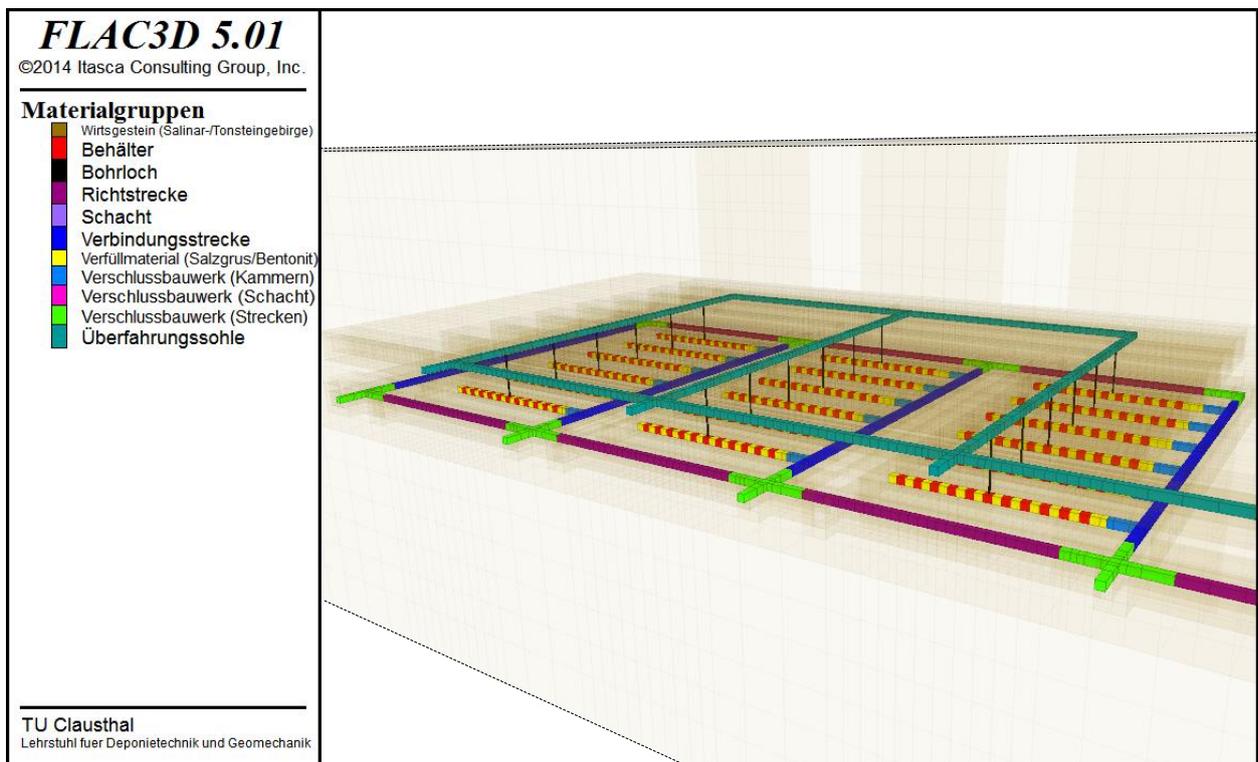


Bild 5.6 Detailansicht des Einlagerungsbereichs im Globalmodell (ii) mit Überfahrungssohle und Monitoringbohrlöchern für ein Endlagersystem im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge (Lage der Monitoringstrecken perspektivisch verzerrt)

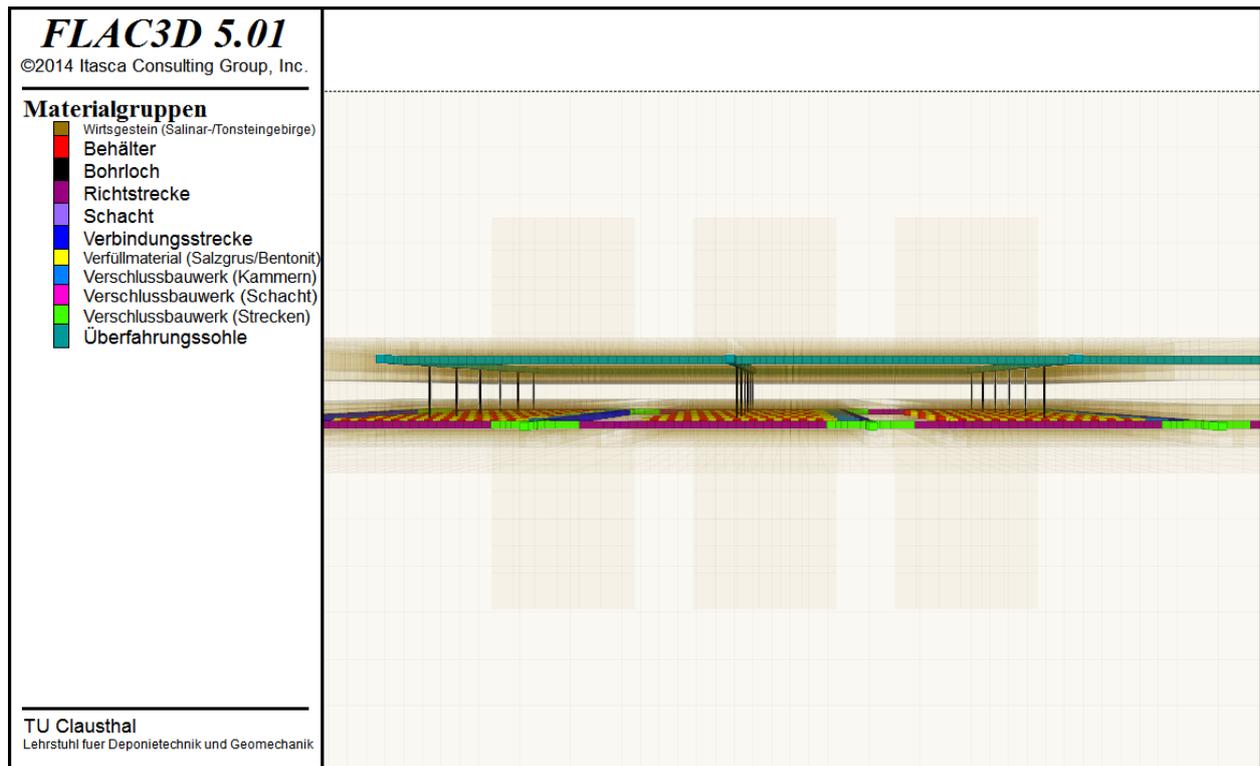


Bild 5.7 *Detailansicht des Einlagerungsbereichs im Globalmodell (ii) mit Überfahrungssohle und Monitoringbohrlöchern für ein Endlagersystem im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge (Lage der Monitoringstrecken perspektivisch verzerrt)*

(iii) Globalmodell mit unerkannter Störungszone mit gegenüber dem Tonsteingebirge eher geringfügig erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit (Tonsteingebirge):

Im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse sind insbesondere für die Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge auch Szenarien zu analysieren, bei denen im Tonsteingebirge Störungszone mit gegenüber dem umgebenden Gestein erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit vorhanden sind. Diese sind zu unterscheiden in Störungszone mit gegenüber dem Tonsteingebirge signifikant erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit und Störungszone mit gegenüber dem Tonsteingebirge eher geringfügig erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit.

Während Störungszone mit sehr hoher hydraulischer Leitfähigkeit wenn schon nicht im Rahmen der Erkundung, dann doch spätestens beim Durchfahren einer derartigen Störungszone während der Auffahrung einer Strecke erkannt werden können sollten, gilt diese Einschätzung vermutlich für Störungszone mit eher geringfügig bis mäßig erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit nicht. Aus diesem Grund ist das Globalmodell (iii) mit Implementierung einer stilisierten und als während der Auffahrung unerkannt geblieben angenommenen Störungszone entwickelt worden.

Wie aus Bild 5.8 und Bild 5.9 zu ersehen ist, hat die hier stilisierte Störungszone Anschluss zum Deck- und Liegendgebirge. Sie ist vertikal orientiert, um entsprechend eines konservativen Ansatzes die Fließweglängen zur äußeren Berandung der Wirtsgesteinsformation möglichst gering zu halten. Die Störungszone verläuft mittig durch die

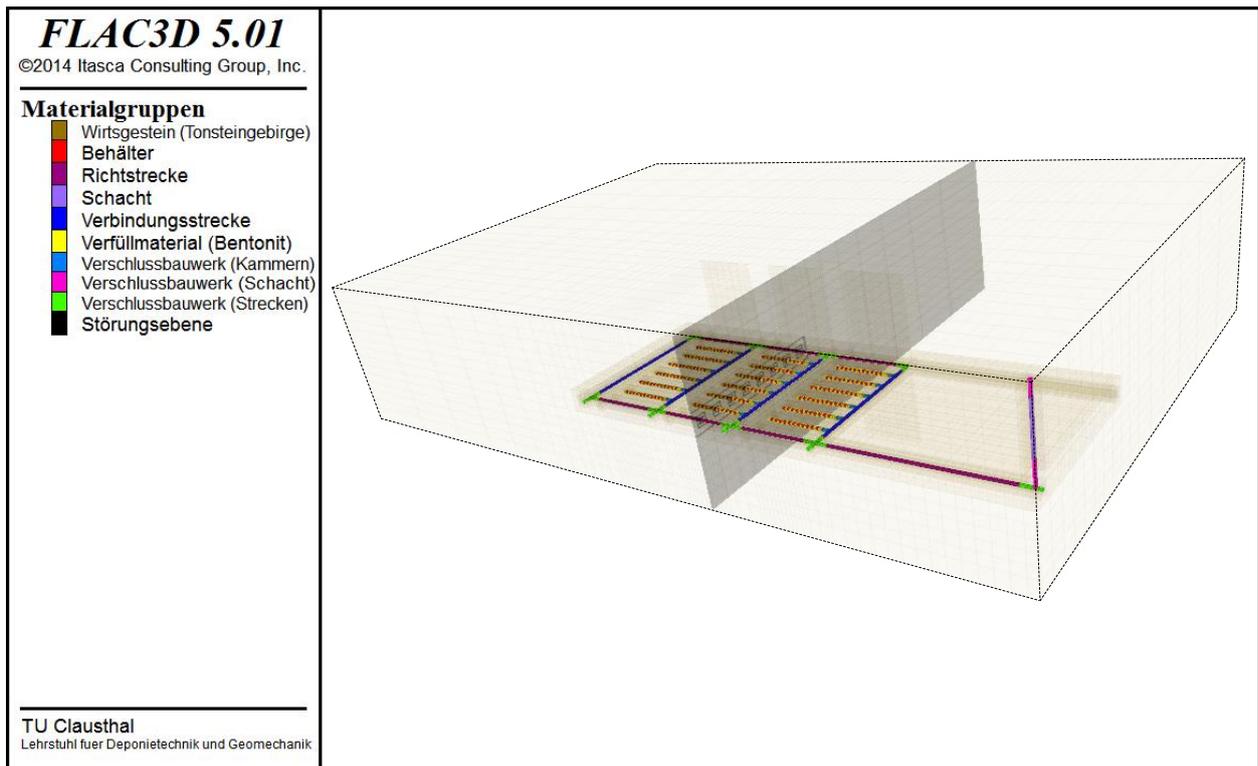


Bild 5.8 Gesamtansicht des Globalmodells (iii) mit Störungszone für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

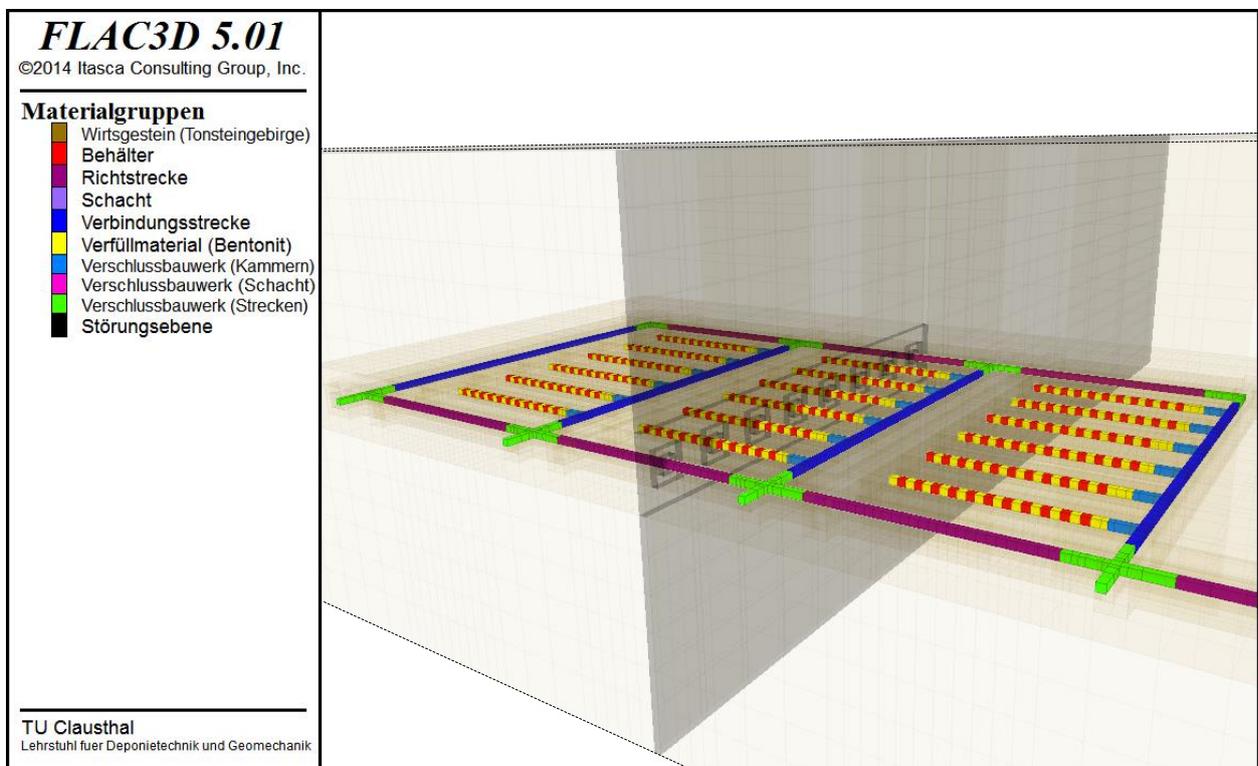


Bild 5.9 Detailansicht des Einlagerungsbereichs im Globalmodell (iii) mit Störungszone für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

Einlagerungsstrecken des 2. Einlagerungsfeldes. Aus Gründen einer möglichst einfachen Diskretisierung wird sie mit einer Breite von $5,5\text{ m}$ angenommen. Die hydraulische Leitfähigkeit der Störungszone wird gegenüber der hydraulischen Leitfähigkeit des umliegenden Tonsteingebirges als 100-fach höher angesetzt, d.h. die Permeabilität der Störungszone beträgt $K = 10^{-18}\text{ m}^2$.

(iv) Globalmodell mit unerkannter Störungszone mit gegenüber dem Tonsteingebirge signifikant erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit (Tonsteingebirge):

Wie bereits vorstehend erläutert, sollte eine Störungszone mit gegenüber dem Tonsteingebirge signifikant erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit im Rahmen der untertägigen Vorerkundung bzw. spätestens beim Durchfahren einer solchen Störungszone während der Auffahrung einer Strecke erkannt werden können und dann mit hinreichendem Abstand zu Ablagerungsstrecken ausgehalten werden können. Es ist allerdings fraglich, ob eine solche Störungszone auch mit hinreichender Zuverlässigkeit erkannt werden kann, wenn sie erst einige Meter oberhalb der Firste der Einlagerungssohle beginnt. Aus diesem Grund ist das in Bild 5.10 und Bild 5.11 dargestellte Globalmodell (iv) entwickelt worden, bei dem die als unerkannt geblieben angenommene Störungszone mit Anschluss an das Deckgebirge erst 10 m oberhalb der Firste der Einlagerungssohle beginnt. Ebenso wie in Globalmodell (iii) wird auch in Globalmodell (iv) die Breite der Störungszone mit $5,5\text{ m}$ angesetzt. Allerdings wird der Störungszone in Globalmodell (iv) eine signifikant höhere Permeabilität von $K = 10^{-15}\text{ m}^2$ zugeordnet.

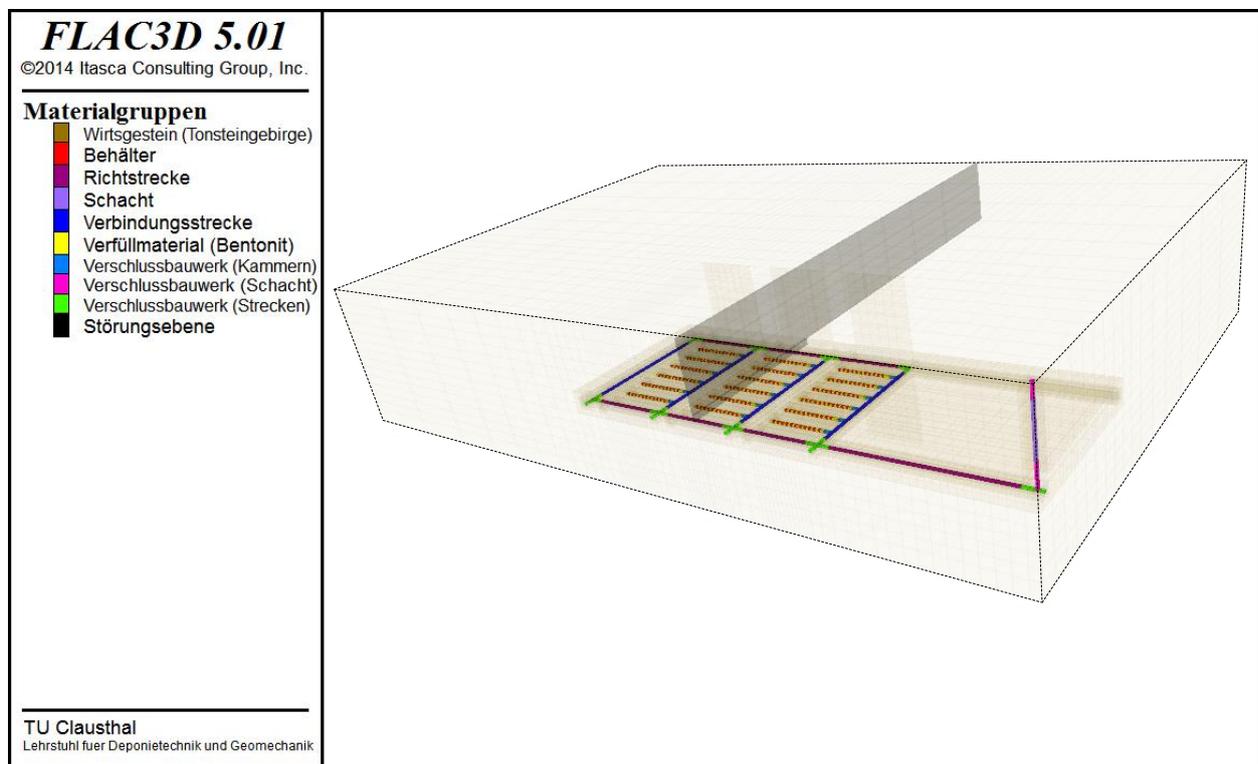


Bild 5.10 Gesamtansicht des Globalmodells (iv) mit oberhalb der Einlagerungssohle beginnender Störungszone für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

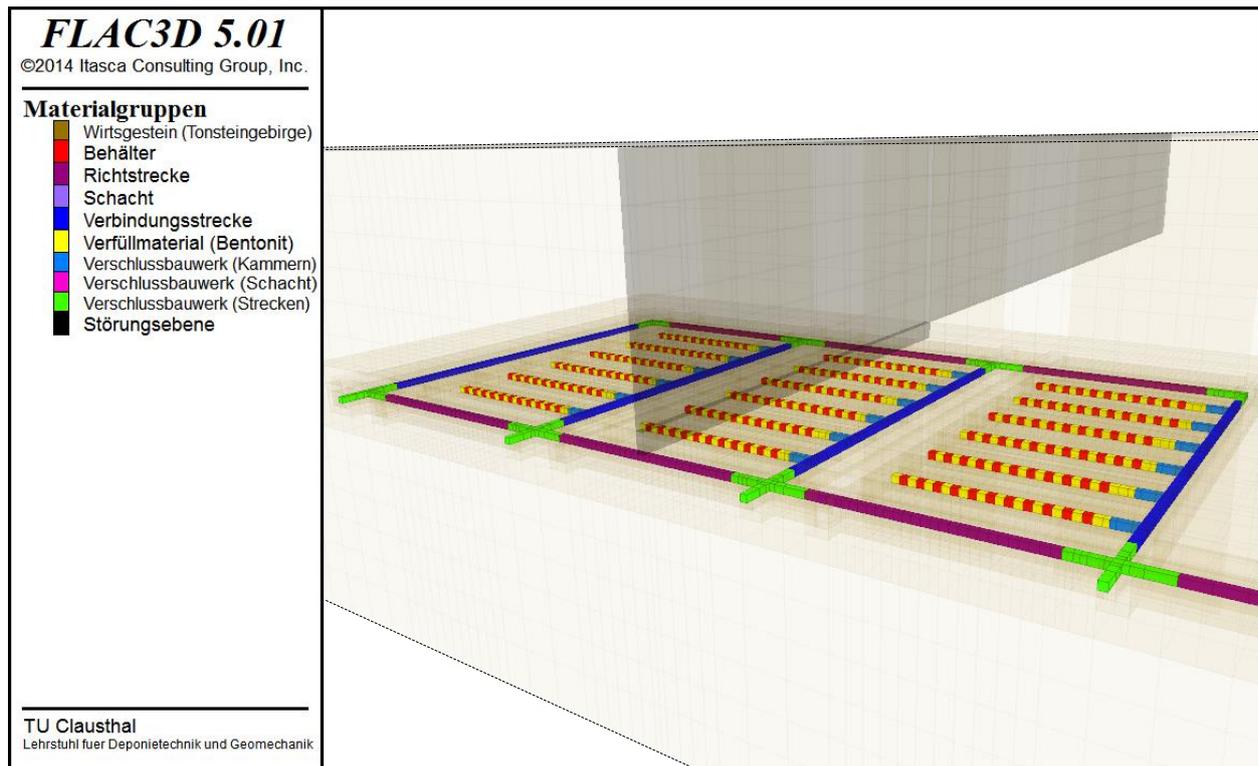


Bild 5.11 Detailansicht des Einlagerungsbereichs im Globalmodell (iv) mit oberhalb der Einlagerungssohle beginnender Störungszone für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

(v) Globalmodell mit reduzierter Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation (Tonsteingebirge):

Das Globalmodell (v) ist eine Adaption des Basis-Globalmodells an die geologische Situation in Süddeutschland, wo Tonsteinformationen nach *Jobmann et al. (2007)* eine deutlich geringere Mächtigkeit aufweisen als Tonsteinformationen in Norddeutschland. Aus diesem Grund ist das Globalmodell (v) mit einer Wirtsgesteinsmächtigkeit von nur 100 m entwickelt worden, wobei das Endlagerbergwerk auch in diesem Globalmodell in einer Tiefe von $z = -600\text{ m}$ liegt. Die Teufenlage der gesamten Tonsteinformation wird in diesem Globalmodell zwischen $z = -640\text{ m}$ und $z = -540\text{ m}$ angenommen.

Bild 5.12 zeigt eine Gesamtansicht des Globalmodells (v). Aufgrund der geringen Distanz zwischen der Teufenlage der Einlagerungsfelder und dem Deckgebirge wird der in der Wirtsgesteinsformation liegende Schachtabschnitt als komplett mit einem Abdichtungsbauwerk verschlossen angenommen.

Bild 5.13 zeigt eine Detailansicht des Einlagerungsbereichs. Die geometrische Anordnung des Einlagerungsbereichs in Globalmodell (v) ist identisch mit derjenigen des Basis-Globalmodells.

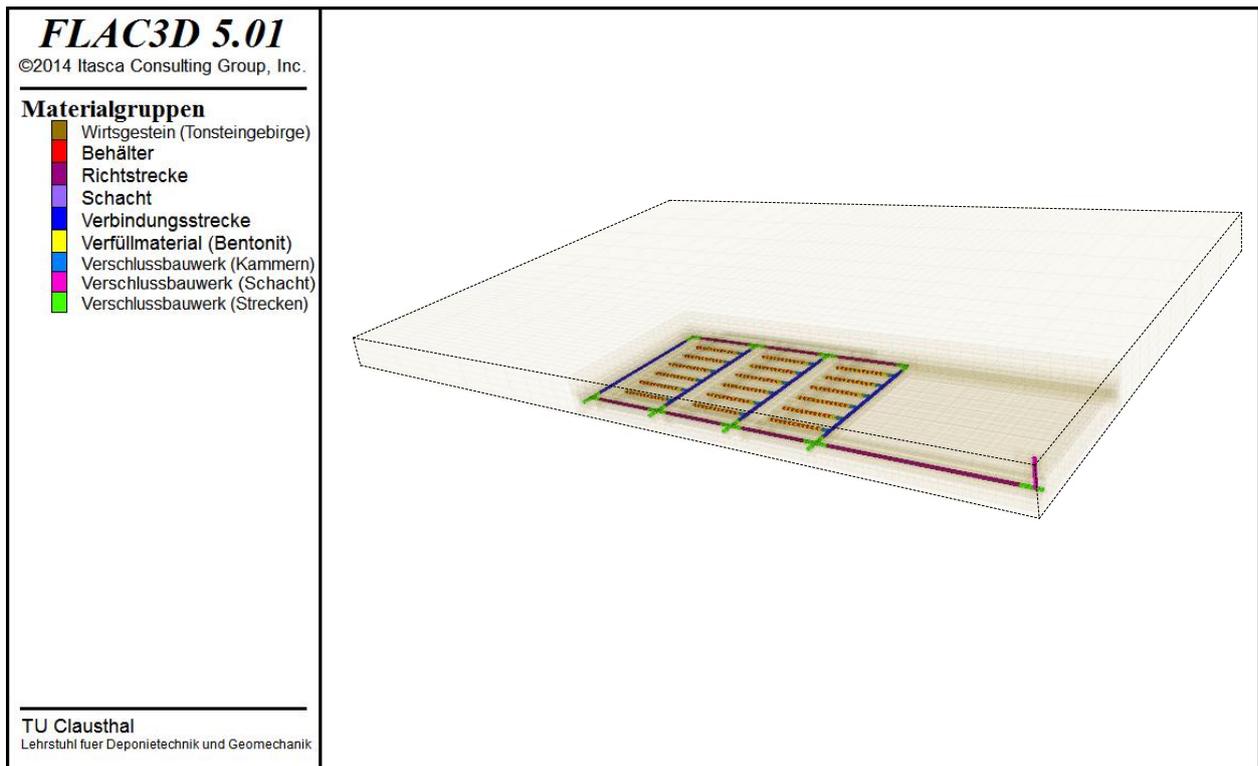


Bild 5.12 Gesamtansicht des Globalmodells (v) mit reduzierter Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

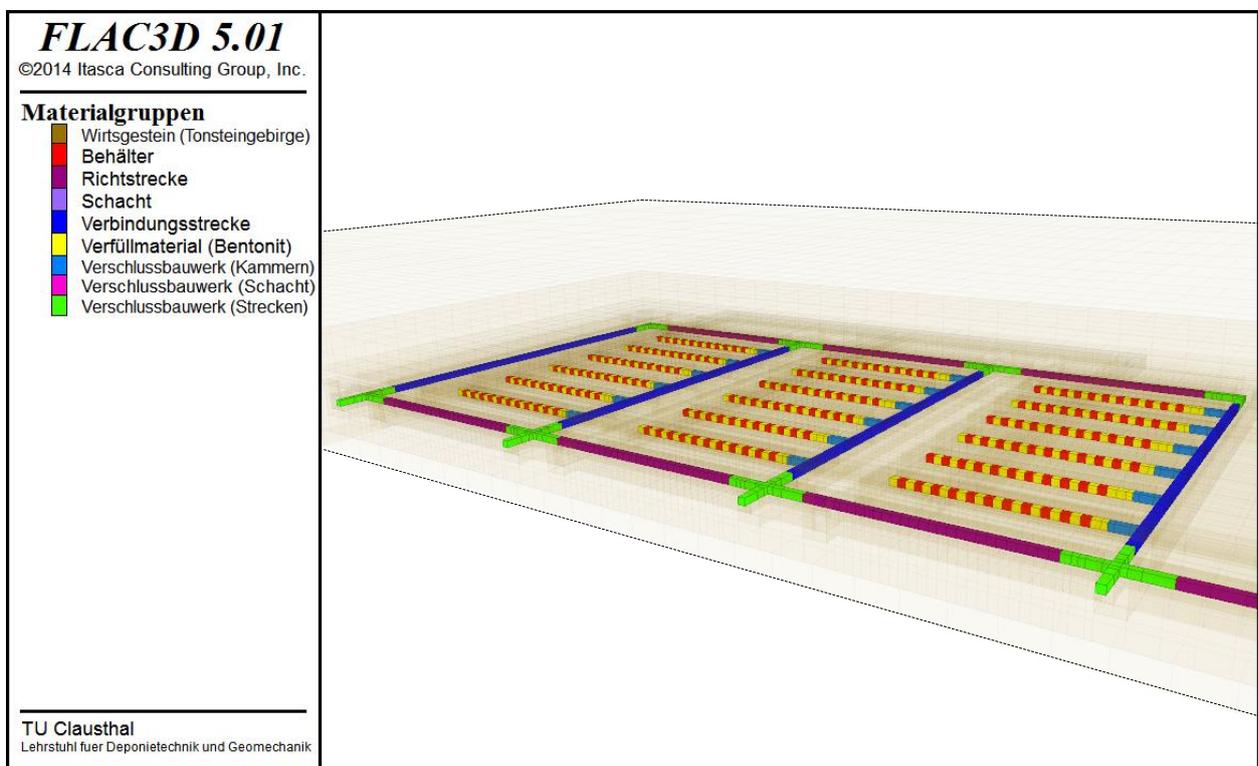


Bild 5.13 Detailansicht des Einlagerungsbereichs im Globalmodell (v) mit reduzierter Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

(vi) Globalmodell mit Überfahrungssohle bei reduzierter Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation (Tonsteingebirge):

Das Globalmodell (vi) ist eine an die geologische Situation in Süddeutschland angepasste Variation des Globalmodells (ii). Da die Wirtsgesteinsmächtigkeit in diesem Globalmodell nur 100 m beträgt und der spezifische Wärmeeintrag im Tonsteingebirge durch die Endlagerkonzeption deutlich geringer ist als im Salinargebirge, wurde der Abstand zwischen der Einlagerungssohle und der Überfahrungssohle auf 20 m reduziert. Bild 5.14 zeigt eine Gesamtansicht des Globalmodells (vi), während Bild 5.15 und Bild 5.16 Detailansichten des Einlagerungsbereichs zeigen.

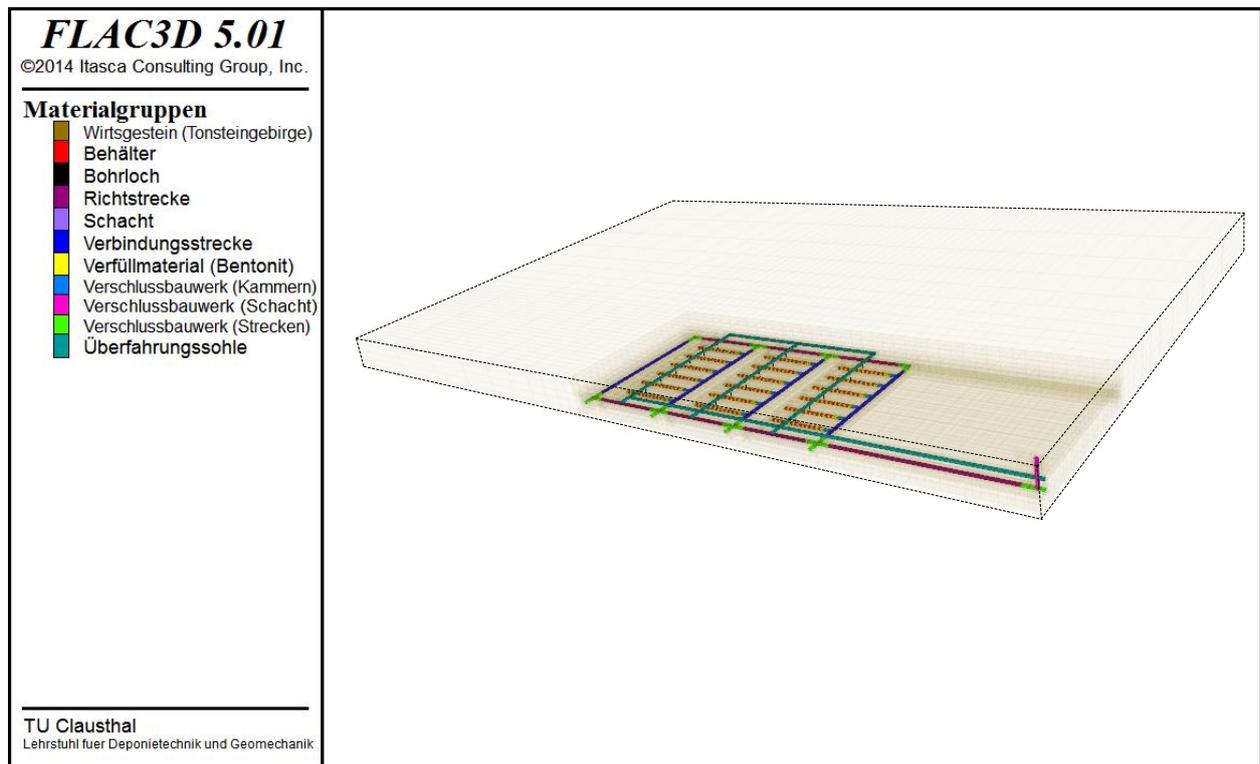


Bild 5.14 Gesamtansicht des Globalmodells (vi) mit Überfahrungssohle und Monitoringbohrlöchern bei reduzierter Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

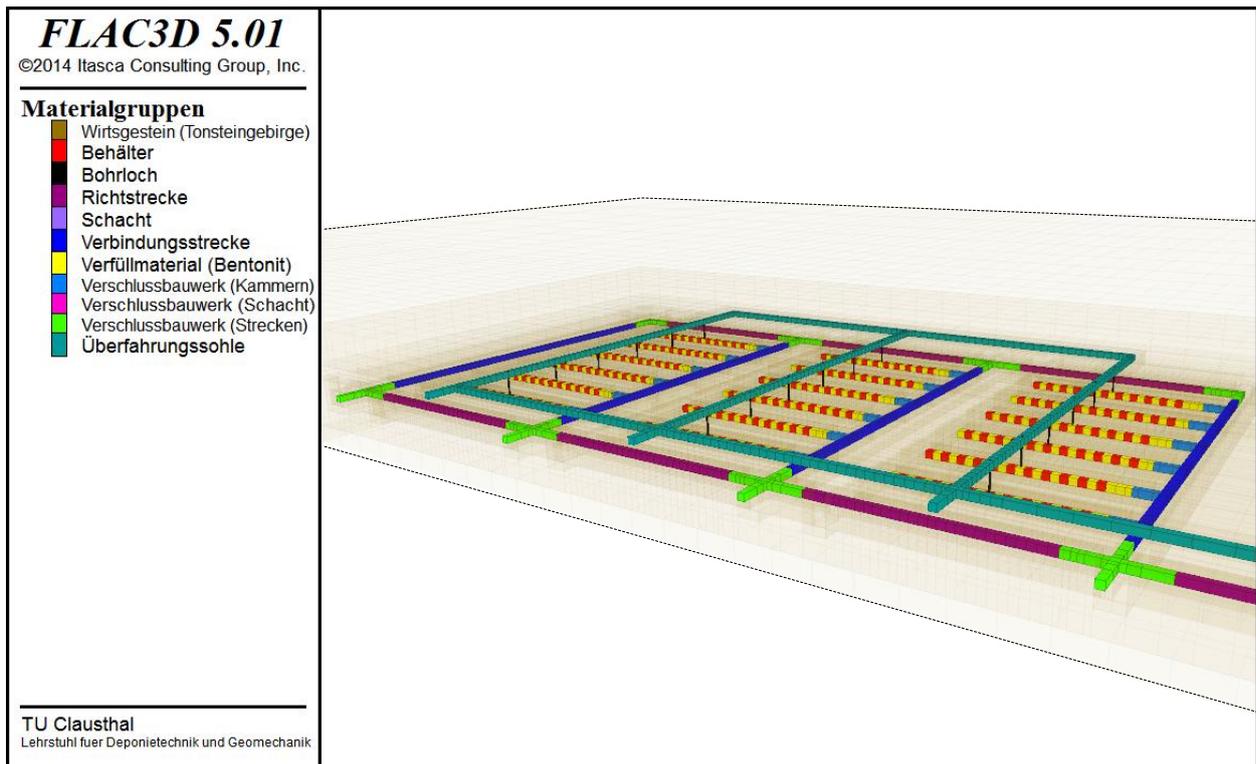


Bild 5.15 Detailansicht des Einlagerungsbereichs im Globalmodell (vi) mit Überfahrungssohle und Monitoringbohrlöchern bei reduzierter Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

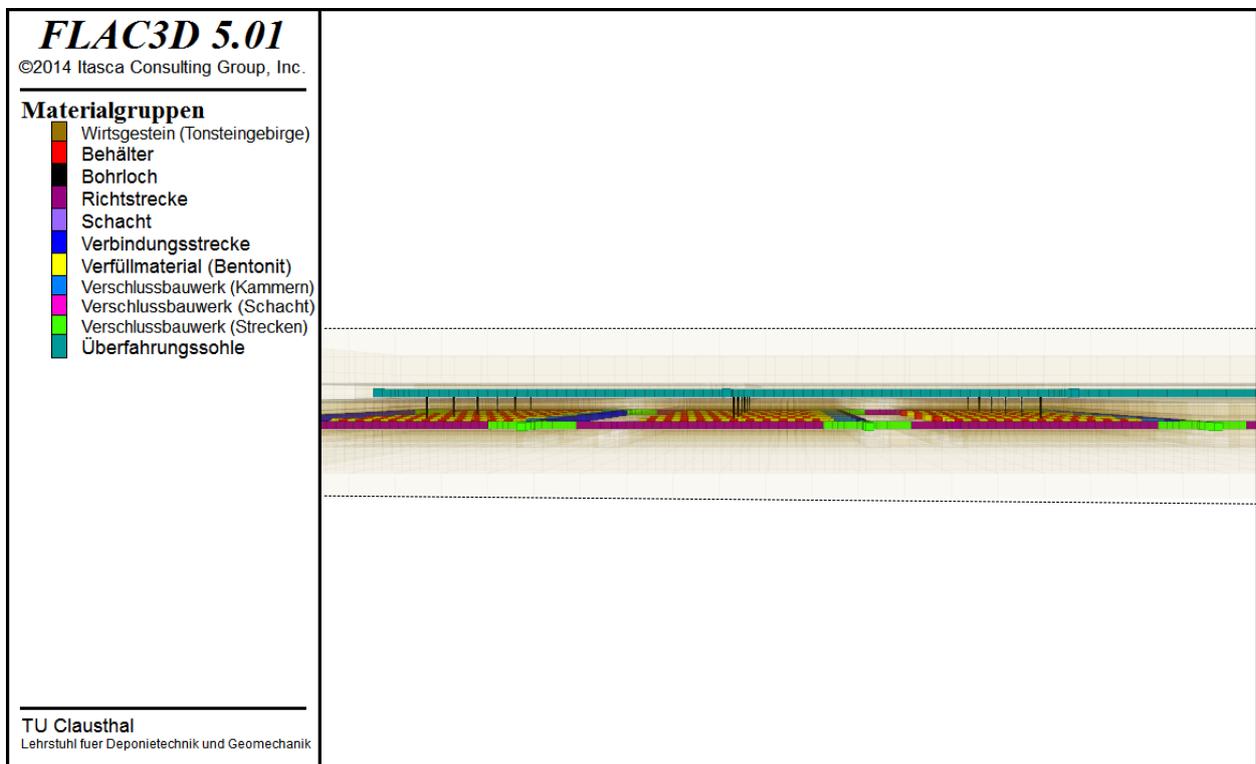


Bild 5.16 Detailansicht des Einlagerungsbereichs im Globalmodell (vi) mit Überfahrungssohle und Monitoringbohrlöchern bei reduzierter Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

(vii) Globalmodell mit unerkannter Störungszone mit gegenüber dem Tonsteingebirge eher geringfügig erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit bei reduzierter Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation (Tonsteingebirge):

Das Globalmodell (vii) ist eine an die geologische Situation in Süddeutschland angepasste Variation des Globalmodells (iii). Bild 5.17 zeigt eine Gesamtansicht des Globalmodells (vii), während Bild 5.18 eine Detailansicht des Einlagerungsbereichs zeigt.

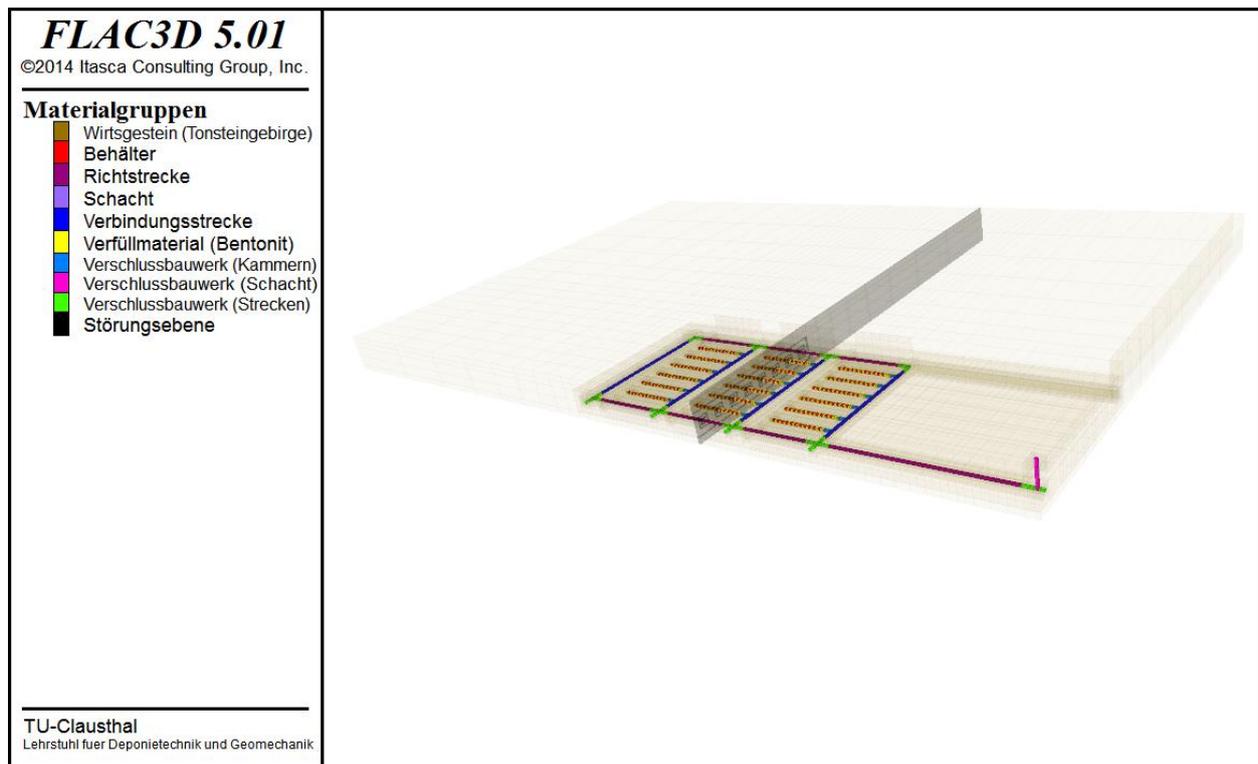


Bild 5.17 Gesamtansicht des Globalmodells (vii) mit Störungszone bei reduzierter Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

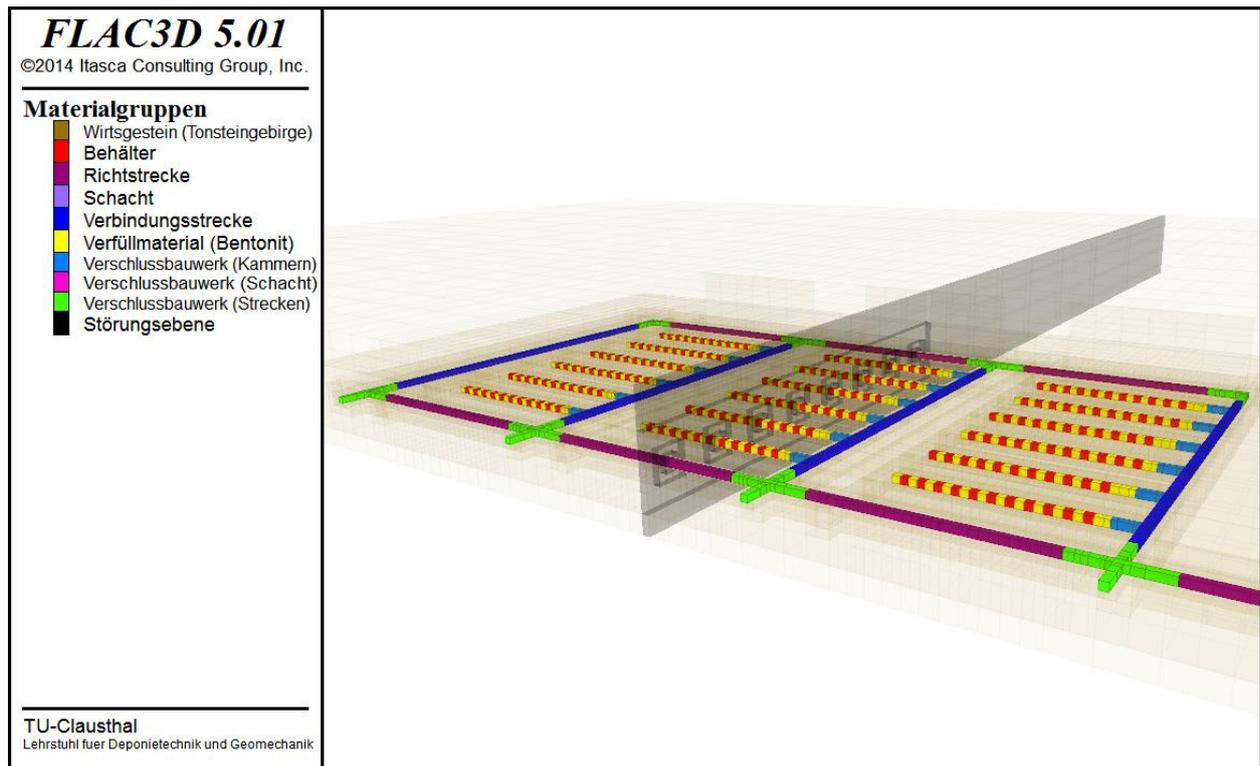


Bild 5.18 Detailansicht des Globalmodells (vii) mit Störungszone bei reduzierter Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

(viii) Globalmodell mit unerkannter Störungszone mit gegenüber dem Tonsteingebirge signifikant erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit bei reduzierter Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation (Tonsteingebirge):

Das Globalmodell (viii) ist eine an die geologische Situation in Süddeutschland angepasste Variation des Globalmodells (iv). Bild 5.19 zeigt eine Gesamtansicht des Globalmodells (viii), während Bild 5.20 eine Detailansicht des Einlagerungsbereichs zeigt.

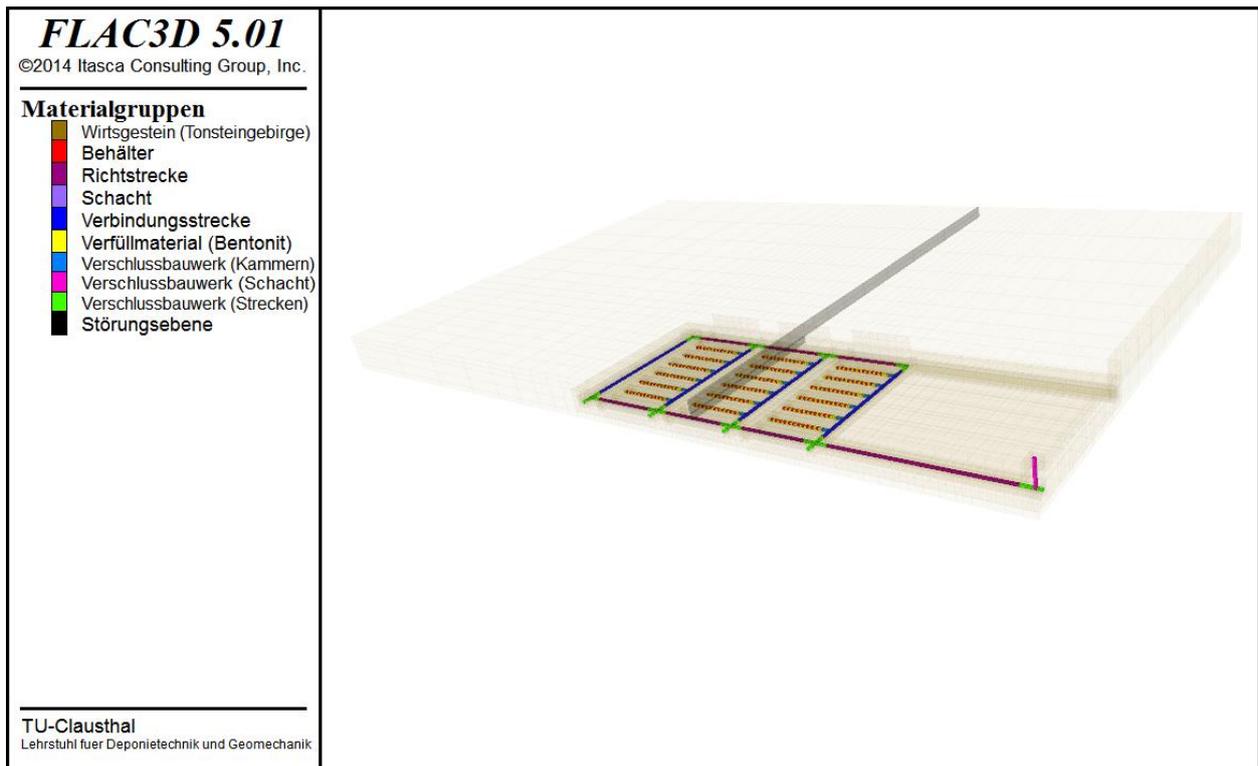


Bild 5.19 Gesamtansicht des Globalmodells (viii) mit oberhalb der Einlagerungssohle beginnender Störungszone bei reduzierter Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

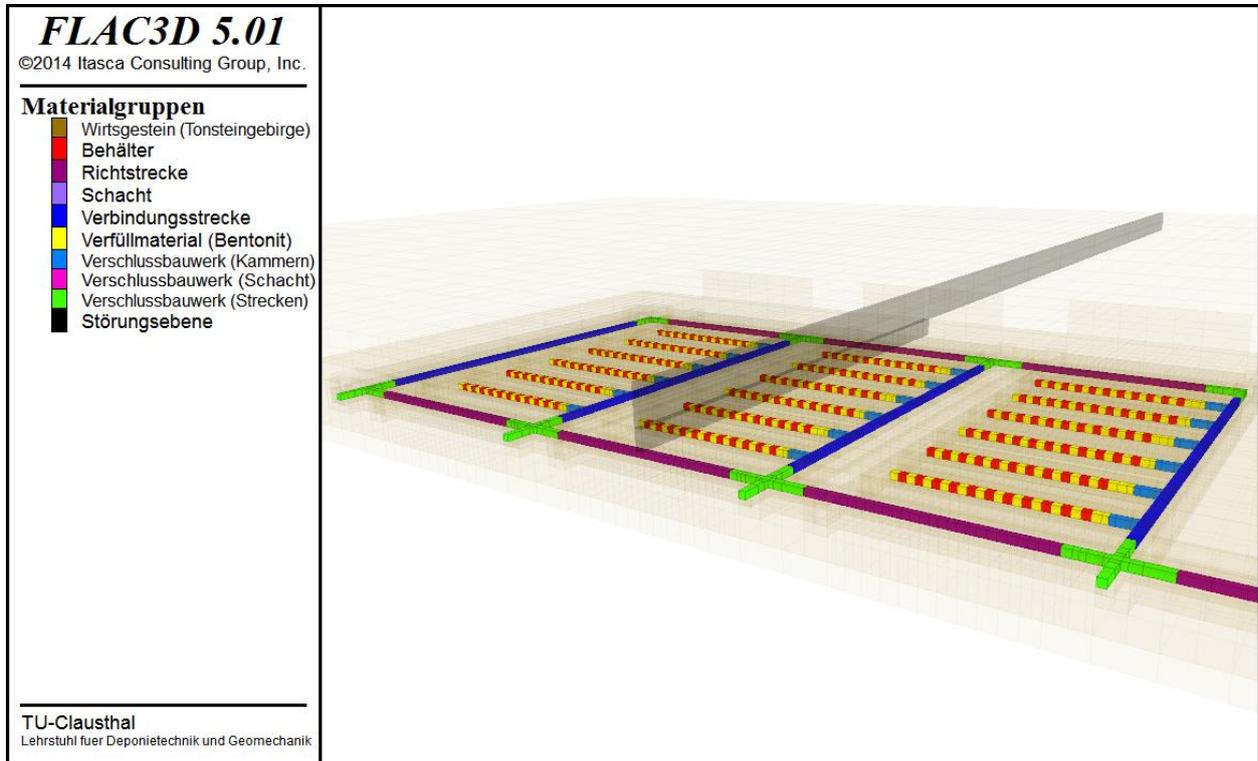


Bild 5.20 Detailansicht des Globalmodells (viii) mit oberhalb der Einlagerungssohle beginnender Störungszone bei reduzierter Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

5.2.2 Darstellung und Diskussion ausgewählter Simulationsergebnisse aus den durchgeführten rechnerischen Analysen zum Systemverhalten der Referenz-Endlagersysteme in den unterschiedlichen Globalmodellen

5.2.2.1 Vorbemerkung

Im Rahmen der bisherigen Arbeiten der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod sind mit den vorstehend vorgestellten Globalmodellen verschiedene Simulationen mit dem FTK-Simulator durchgeführt worden, um einen ersten Eindruck über die insbesondere fluiddynamisch orientierte Sensitivität des Endlagersystemverhaltens auf die Variation der Endlagerkonfiguration, von Materialkennwerten und von geotektonischen Strukturelementen zu erhalten.

Dabei sind zunächst für die beiden Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge mit dem Globalmodell (i) die so genannten Basis-Simulationen durchgeführt worden. Bei den Basis-Simulationen werden die hydraulischen und thermischen Materialkennwerte der Wirtsgesteinsformation, des Versatzmaterials sowie der Abfallbehälter angesetzt entsprechend Tabelle 5.1. Aufbauend auf diesen Basis-Simulationen ist für beide Wirtsgesteinsformationen mit der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse begonnen worden, sowohl hinsichtlich variiertes Materialkennwerte wie auch hinsichtlich der Anordnung einer Überfahrungssohle oder einer nicht erkannten Störungszone. An dieser Stelle kann aus Platzgründen nicht auf alle Ergebnisse der durchgeführten Simulationen eingegangen werden. Eine umfassende Darstellung der Simulationsergebnisse ist dem diesem Arbeitsbericht auf CD beigefügten Anhang zu entnehmen. Im Folgenden werden daher nur einige ausgewählte und als repräsentativ angesehene Simulationsergebnisse vorgestellt, die einen ersten Eindruck von den fluiddynamischen Prozessen und von relevanten Quantitäten sowie

Hydraulische und thermische Materialkennwerte für das Salinargebirge		Hydraulische und thermische Materialkennwerte für das Tonsteingebirge		Hydraulische und thermische Materialkennwerte für die Abfallbehälter	
initiale Porosität ϕ_0	0,002	Porosität ϕ_0	0,12	Porosität ϕ	0,0001
initiale Permeabilität K_0	$0 m^2$	Permeabilität K_0	$10^{-20} m^2$	Permeabilität K	$0 m^2$
initialer Flüssigkeitssättigungsgrad $S_{l,0}$	0,5	initialer Flüssigkeitssättigungsgrad $S_{l,0}$	1	Flüssigkeitssättigungsgrad S_l	0
i_1	-22	initiale Wärmeleitfähigkeit λ_0	$3,2 W/(m \cdot K)$	Wärmeleitfähigkeit λ	$50 W/(m \cdot K)$
i_2	1,4	initiale spezifische Wärmekapazität $c_{p,0}$	$920 J/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität c_p	$450 J/(kg \cdot K)$
i_3	$25 MPa^{-1}$				
i_4	0,05				
i_5	$0 MPa^{-1}$				
Δp_{Fl}^{krit}	$0 MPa$				
initiale Wärmeleitfähigkeit λ_0	$5,54 W/(m \cdot K)$				
initiale spezifische Wärmekapazität $c_{p,0}$	$860 J/(kg \cdot K)$				
Hydraulische und thermische Materialkennwerte für den Salzgrusversatz		Hydraulische und thermische Materialkennwerte für den Bentonitversatz			
initiale Porosität ϕ_0	0,35	Porosität ϕ_0	0,35		
initiale Permeabilität K_0	$5,8 \cdot 10^{-13} m^2$	Permeabilität K_0	$3,83 \cdot 10^{-19} m^2$		
initialer Flüssigkeitssättigungsgrad $S_{l,0}$	0,02	initialer Flüssigkeitssättigungsgrad $S_{l,0}$	0,18		
a	$5,681 \cdot 10^{-11} m^2$	initiale Wärmeleitfähigkeit λ_0	$0,58 W/(m \cdot K)$		
n	4,36	initiale spezifische Wärmekapazität $c_{p,0}$	$771 J/(kg \cdot K)$		
initiale Wärmeleitfähigkeit λ_0	$0,8 W/(m \cdot K)$				
initiale spezifische Wärmekapazität $c_{p,0}$	$860 J/(kg \cdot K)$				

Tabelle 5.1 Kennwerte für das Materialverhalten des Salinar- bzw. Tonsteingebirges, des Salzgrus- bzw. Bentonitversatzes sowie der Abfallbehälter

auch von der grundsätzlichen Leistungsfähigkeit des FTK-Simulators geben sollen. Die Diskussion der Berechnungsbefunde erfolgt auch mit Blick auf einige Aspekte der relevanten Sicherheitsfunktionen.

5.2.2.2 Simulationsergebnisse der Basis-Simulationen

(a) *Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Salinargebirge → Globalmodell (i)*

Im Rahmen der rechnerischen Simulation zum Systemverhalten des Referenz-Endlagersystems ohne Überfahrungssohle im Salinargebirge werden mit Blick auf die fluiddynamischen Prozessabläufe zunächst der Schacht und dann nachfolgend die einzelnen Streckenabschnitte im Infrastrukturbereich und in den Ablagerungsbereichen sukzessive aufgefahren, wobei im Schacht eine durchschnittliche Auffahrungsgeschwindigkeit von 2 m/d und in den Strecken eine durchschnittliche Auffahrungsgeschwindigkeit von 3 m/d angesetzt wird.

In der rechnerischen Simulation beginnt die Auffahrungssequenz mit der Auffahrung des Schachtes, anschließend wird die Richtstrecke zwischen dem Schacht und den Einlagerungsfeldern aufgefahren. Mit Blick auf die Betriebssicherheit bei gleichzeitiger Erkundung der lokalen geologischen Verhältnisse werden im Anschluss dann zunächst die Umfahrestrecken (= außen liegende Richt- und Verbindungsstrecken) und anschließend die inneren Verbindungsstrecken aufgefahren. Erst nach der Auffahrung der letzten Verbindungsstrecke und der Feststellung der grundsätzlichen Eignung des geplanten Ablagerungsfeldes insgesamt für die tatsächliche Einlagerung von Abfällen wird mit der Auffahrung der Einlagerungsstrecken begonnen. Die Auffahrung der Einlagerungsstrecken beginnt zunächst in dem am weitesten vom Schacht entfernten Einlagerungsfeld und dort mit der am weitesten vom Schacht entfernten Einlagerungsstrecke. Anschließend werden im gleichen Einlagerungsfeld die beiden nächsten Einlagerungsstrecken aufgefahren. Um die Offenhaltungszeit der Einlagerungsstrecken gering zu halten, wird anschließend im Rückbauverfahren die zuerst aufgefahrene Einlagerungsstrecke mit insgesamt 11 Abfallbehältern des Typs POLLUX-10 bestückt, die verbleibenden Hohlräume dieser Strecke sukzessive der Einlagerung der Abfallbehälter folgend mit Salzgrus versetzt und zuletzt die Einlagerungsstrecke mit einem Kammerverschlussbauwerk verschlossen. Für die Bestückung und den Versatz der Einlagerungsstrecke sowie die Errichtung des Kammerverschlussbauwerks wird in der rechnerischen Simulation ein Zeitraum von insgesamt 30 Wochen angesetzt.

Nachdem die erste Einlagerungsstrecke verschlossen ist, wird eine weitere Einlagerungsstrecke aufgefahren. Diese Betriebssequenz wiederholt sich in analoger Art und Weise, wobei stets zwei bis drei Einlagerungsstrecken offen gehalten werden. Nachdem die vierte Einlagerungsstrecke im ersten Einlagerungsfeld wieder verschlossen worden ist, wird die erste Strecke im zweiten Einlagerungsfeld aufgefahren. Anschließend wird die vorstehend beschriebene Betriebssequenz fortgesetzt, bis auch die letzte Einlagerungsstrecke im ersten Einlagerungsfeld verschlossen und die dritte Einlagerungsstrecke im zweiten Einlagerungsfeld aufgefahren worden ist. Danach werden zeitlich parallel zu Belegung und anschließendem Verschluss der ersten Einlagerungsstrecke im zweiten Einlagerungsfeld die Umfahrestrecken des ersten Einlagerungsfeldes versetzt und durch Verschlussbauwerke verschlossen, da diese Umfahrestrecken zukünftig nicht mehr benötigt werden. Anschließend setzt sich die Betriebssequenz wie beschrieben fort auch im dritten Einlagerungsfeld, das den geringsten Abstand zum Schacht aufweist. Nachdem auch dieses dritte Einlagerungsfeld

mit Abfallbehältern belegt, versetzt und durch geotechnische Barrieren verschlossen ist, werden zuletzt die Richtstrecke zum Schacht und dann der Schacht selbst versetzt, wobei an den in Bild 5.3 dargestellten Bereichen Verschlussbauwerke angeordnet werden. Diese Betriebsgeschichte erfolgt auch in den aus Symmetriegründen nicht explizit im Berechnungsmodell enthaltenen Bereichen der Einlagerungssohle zeitgleich in entsprechender Weise. Insgesamt ergibt sich aus der vorstehenden Beschreibung für das Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle ein Betriebszeitraum von etwa 19 Jahren.

(a/1) *Temperaturentwicklung*

Als erstes Ergebnis einer rechnerischen TH2M-gekoppelten Simulation zum Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Salinargebirge zeigen die Bilder A.1/1 bis A.1/79 des Anhangs A zu ausgewählten Zeitpunkten eine Übersicht über den zeitlichen Verlauf der Betriebsgeschichte mit Auffahrung, Abfalleinlagerung und Versatz im Bereich der Einlagerungsfelder bei gleichzeitiger Darstellung der Temperaturentwicklung auf der Einlagerungssohle. Es ist zu ersehen, dass im Lauf der Zeit die Temperaturen in den bereits belegten Einlagerungsstrecken zunächst sehr stark ansteigen, während der Temperaturanstieg in den Bereichen der Einlagerungssohle, in denen noch gearbeitet wird, nur relativ moderat ausfällt. Für den ausgewählten Zeitpunkt $t \approx 9,91 a$ nach Beginn der Betriebsphase ist dieser Sachverhalt exemplarisch in Bild 5.21 (= Bild A.1/33) dargestellt.

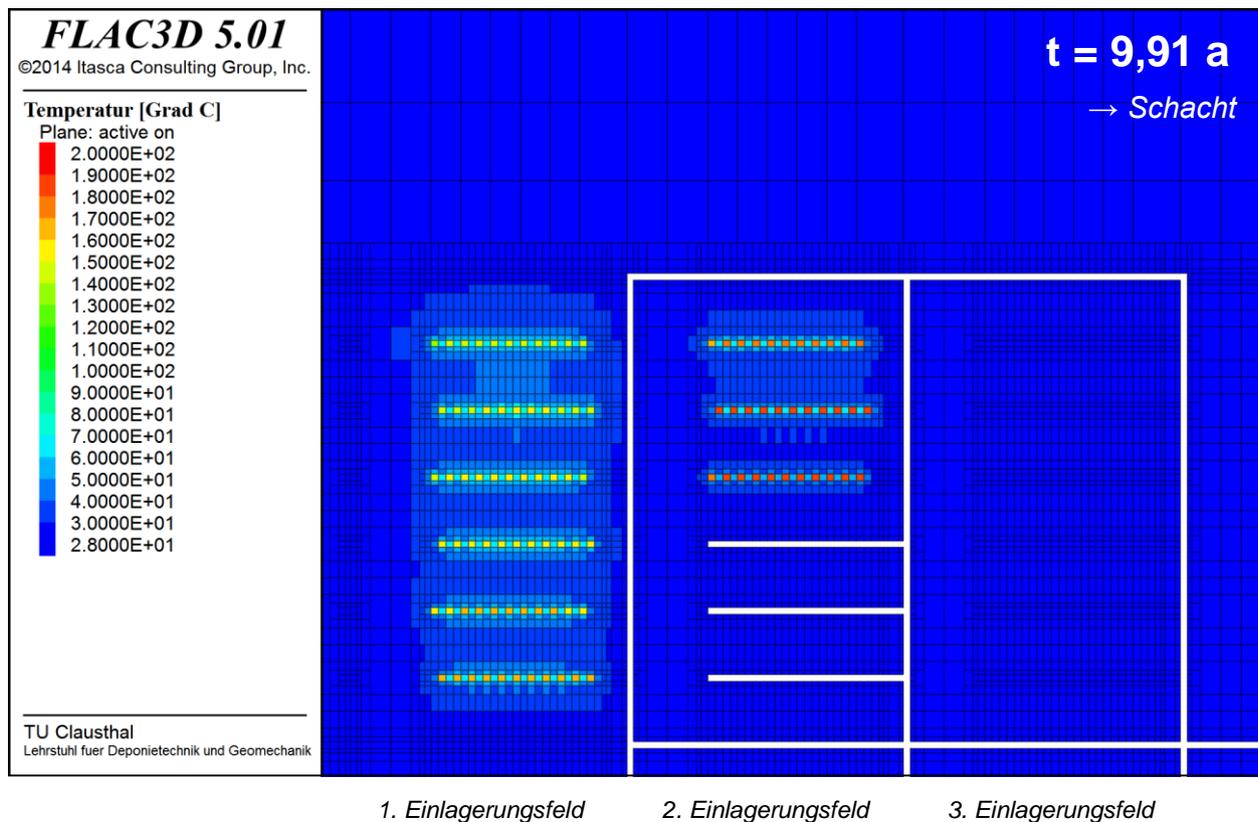


Bild 5.21 *Räumlich-zeitliche Temperaturentwicklung in der Einlagerungssohle des Referenz-Endlagersystems ohne Überfahrungssohle für die Wirtsgesteinsformation Salinargebirge*

Der maximale Temperaturwert auf der Einlagerungssohle wird für das Referenz-Endlager-system im Salinargebirge mit ca. 190°C ausgewiesen und entsprechend der sequentiellen Belegung der Einlagerungsstrecken an verschiedenen Positionen der Einlagerungsfelder zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht. Schon wenige Monate nach Einlagerung der Abfall-behälter reduzieren sich die Temperaturen in den Einlagerungsstrecken und ihrem unmittelbaren Umfeld allerdings wieder, da einerseits die Wärmeenergie entsprechend der Wärmeleitfähigkeit des Gebirges großräumig verteilt wird und andererseits die Wärmeleistung der Abfallbehälter im Lauf der Zeit abnimmt. Dieses Simulationsergebnis wird durch die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Messdaten des TSDE-Experiments bestätigt, da auch dort die gemessenen Temperaturen ihre Maximalwerte bereits wenige Monate nach Aktivierung der elektrischen Erhitzer erreichen und danach eine allmähliche Abkühlung trotz sogar konstanter Wärmeleistung der elektrischen Erhitzer zu verzeichnen war, insbesondere unmittelbar an der Erhitzeroberfläche.

Im Hinblick auf die Referenz-Endlagervariante mit Anordnung einer Überfahrungssohle ist auch die zeitliche Entwicklung der Temperaturen oberhalb der Einlagerungssohle von Bedeutung. In Bild A.2 bzw. Bild A.3 des Anhangs A werden daher exemplarisch die Temperaturentwicklungen in den Teufenhorizonten 20 m bzw. 40 m oberhalb der Einlagerungssohle betrachtet. Etwa 50 Jahre nach Verschluss des Endlagers erreichen die Temperaturen 20 m oberhalb der Einlagerungssohle Maximalwerte von ca. $53,3^{\circ}\text{C}$, wohingegen die Maximaltemperaturen 40 m oberhalb der Einlagerungssohle etwa 90 Jahre nach Verschluss des Endlagers nur ca. $46,4^{\circ}\text{C}$ erreichen.

Etwa 10.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers stellen sich die Temperaturen im gesamten Berechnungsmodell wieder auf dem Niveau der primären Gebirgstemperaturen ein. Damit ist nach diesem Zeitraum temperaturbezogen die transiente Phase des Endlagers beendet. Sind auch die technogen induzierten mechanischen und hydraulischen Prozesse innerhalb dieses Zeitraums abgeschlossen, unterliegt das Endlager in seiner weiteren Entwicklung allein geogenen Einwirkungen und Prozessen.

(a/2) Fluiddynamische Entwicklung / keine primär vernetzten hydraulischen Wegsamkeiten

Neben der Temperaturentwicklung im Gebirge haben auch die im Endlagerbergwerk sowie im umgebenden Salinargebirge ablaufenden fluiddynamischen Prozesse eine signifikante Relevanz bei der Bewertung des langfristigen Endlager-systemverhaltens. Aus diesem Grund werden für ausgewählte Zeitpunkte die diese fluiddynamischen Prozesse charakterisierenden Wasser- bzw. Gasströmungen in den Bildern A.4-A.11 des Anhangs A dargestellt, und zwar innerhalb des Streckensystems (A.4 bzw. A.8: Horizontalschnitt durch die Einlagerungssohle ohne Darstellung des das Endlagerbergwerk umgebenden Wirtsgesteins) sowie in der Wirtsgesteinsformation (A.5 bzw. A.9: Horizontalschnitt durch die Einlagerungssohle, A.6 bzw. A.10: Vertikalschnitt parallel zu den Einlagerungsstrecken des mittleren Einlagerungsfeldes, A.7 bzw. A.11: Vertikalschnitt orthogonal zu den Einlagerungsstrecken). Es ist darauf hinzuweisen, dass der Simulationszeitraum grundsätzlich 1.000.000 Jahre beträgt, hier allerdings nur Simulationsergebnisse für die ersten 400.000 Jahre dargestellt sind, da nach Abschluss der bei Annahme eines unbegrenzten Lösungsangebots 300.000 Jahre andauernden Gasbildung (= Annahme für die vollständige Korrosion der Einlagerungsbehälter) bzw. bei Annahme eines begrenzten Lösungsangebots entsprechend der mit dem Salzgrus-

versatz eingebrachten Flüssigkeitsmenge von ca. 23 m^3 Porenwasser pro Einlagerungsstrecke sogar nur etwa 20.000 Jahre andauernden Gasbildung die fluiddynamischen Prozesse im Endlager und im umgebenden Wirtsgestein allmählich zum Erliegen kommen. Eine Grundwasserströmung erfolgt in diesem Fall des Salinargebirges bei Annahme von keinen geogen existenten vernetzten Wegsamkeiten nicht. Ebenso ist eine Gasströmung aus den Ablagerungsstrecken in das geogen als impermeabel angenommene Salinargebirge zunächst nicht möglich.

Durch die in den Bildern A.4-A.11 gewählte vektorielle Darstellung der Wasser- bzw. Gasströmungen konnte das Verständnis zu den im Endlagerbergwerk sowie im umgebenden Wirtsgestein ablaufenden fluiddynamischen Prozessen für ein Endlagersystem im Salinargebirge erheblich verbessert werden.

Bild 5.22 (= Bild A.4/2) zeigt exemplarisch für den Zeitpunkt $t=10\text{ a}$ nach Verschluss des Endlagers, dass die mit dem Salzgrus eingetragene Feuchtigkeit durch die konvergenzbedingte Salzgruskompaktion, die in den erhitzten Einlagerungsstrecken erheblich schneller abläuft als in den relativ kühlen Verbindungstrecken, aus den Einlagerungsstrecken durch die Kammerverschlussbauwerke in die Verbindungstrecken ausgepresst wird. Aufgrund des nur relativ geringen Lösungsgehalts im Salzgrus, für den eine initiale Flüssigkeitssättigung von 2% angenommen worden ist, sind die Volumenstromraten der Lösung mit

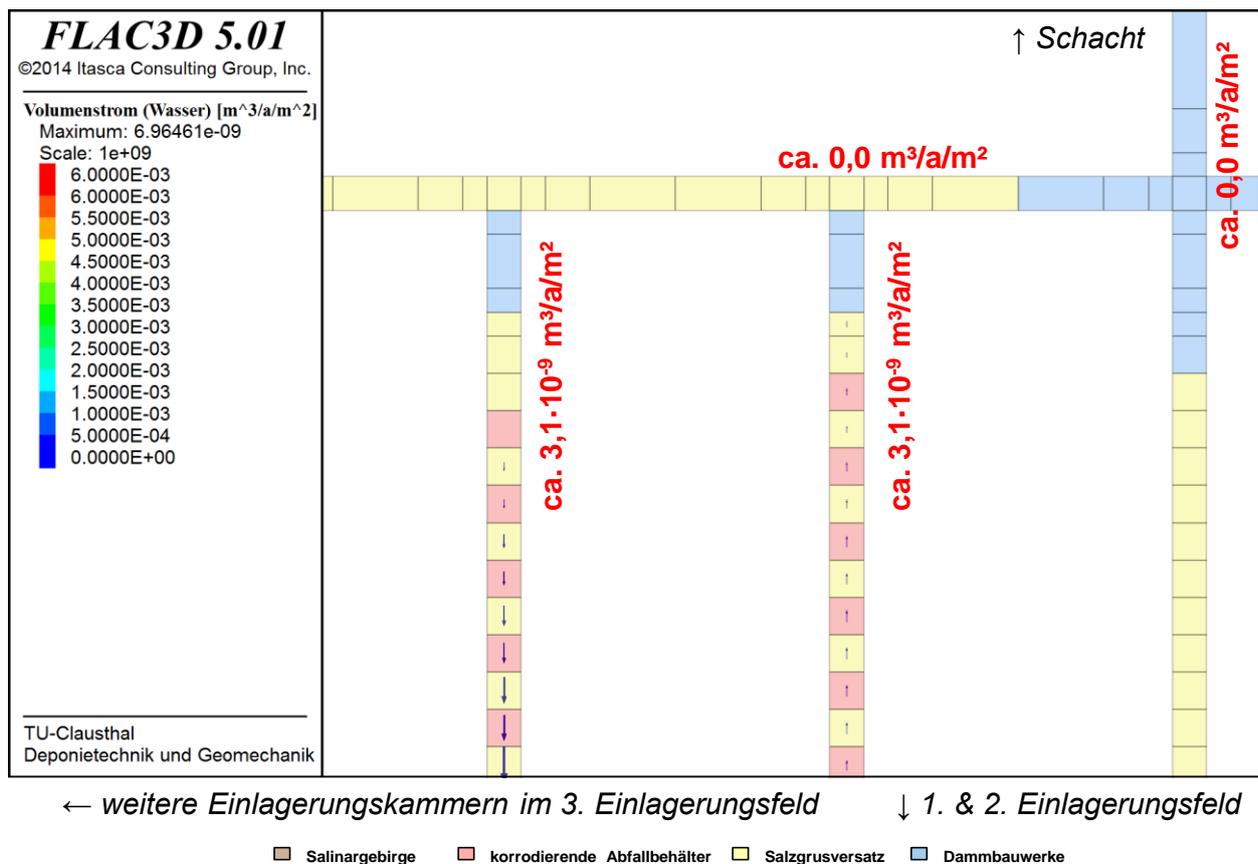


Bild 5.22 Wasserströmung innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t=10\text{ a}$ nach Verschluss des Endlagers

$\dot{Q}_l \approx 3,1 \frac{\mu l}{a \cdot m^2}$ (Mikroliter pro Jahr und Quadratmeter Streckenquerschnittsfläche) allerdings extrem gering, so dass sie für diese Basis-Simulation nicht weiter berücksichtigt zu werden brauchen. Es ist nochmals darauf hinzuweisen, dass die Volumenströme nur innerhalb des versetzten Endlagerbergwerkes erfolgen, da das umgebende Salinargebirge zu diesem Zeitpunkt noch immer impermeabel ist.

Die konvergenzbedingte Kompaktion des Salzgrusversatzes führt neben dem Auspressen der initial im Salzgrus vorhandenen Flüssigkeit auf nur marginalem Volumenstromniveau aus den Einlagerungsstrecken auch zu einer Komprimierung des zum Zeitpunkt der Streckenverfüllung im Salzgrus vorhandenen Porengases (= Luft) und zu einer damit einhergehenden lokalen Erhöhung des Porengasdrucks, die dann in einer Auspressung dieses Porengases aus den Einlagerungsstrecken in die angeschlossenen Verbindungsstrecken resultiert. Entsprechend Bild 5.23 (= Bild A.8/1) beträgt die Volumenstromrate der aus den Einlagerungsstrecken ausgepressten Porenluft 10 Jahre nach Verschluss des Endlagers etwa $\dot{Q}_g \approx 50 - 60 \frac{N-l}{a \cdot m^2}$ (Normliter pro Jahr und Quadratmeter Streckenquerschnittsfläche, bezogen auf eine Temperatur von $T = 0^\circ C$ und Atmosphärendruck). In den Verbindungsstrecken selbst findet zu diesem Zeitpunkt nur eine deutlich geringere Gasströmung mit einer Volumenstromrate von etwa $\dot{Q}_g \approx 4 - 5 \frac{N-l}{a \cdot m^2}$ statt, da dort der Kompaktionsprozess

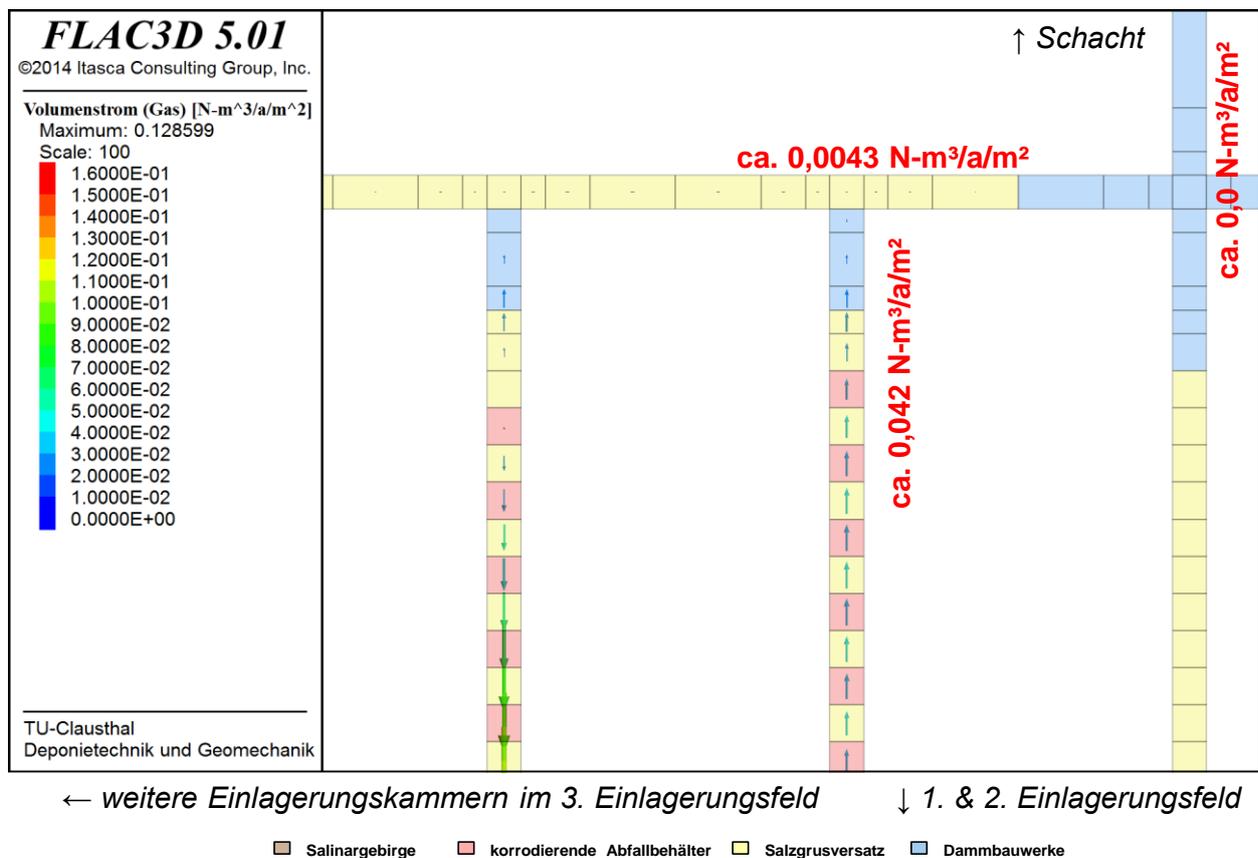


Bild 5.23 Gasströmung innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t = 10 a$ nach Verschluss des Endlagers

wesentlich weniger stark ausgeprägt ist. Da das umgebende Salinargebirge zu diesem Zeitpunkt noch impermeabel ist, findet keine Gasströmung in das Wirtsgestein statt.

Mit fortschreitender Kompaktion des Salzgrusversatzes auch in den Verbindungsstrecken und in den Richtstrecken kommt es später auch dort zu einem allmählichen Auspressen des Porengases. In der in Bild A.8/2 dargestellten Verbindungsstrecke beträgt die Volumenstromrate des Gases zum Zeitpunkt $t=1.000 a$ nach Verschluss des Endlagers etwa

$\dot{Q}_g \approx 130-140 \frac{N-l}{a \cdot m^2}$, wobei das Gas zu diesem Zeitpunkt aufgrund der ablaufenden Korrosionsprozesse ein Gemisch aus der primären Porenluft und dem bei der Korrosion der Abfallbehälter entstehenden Wasserstoff ist. Das Gasgemisch strömt entsprechend Bild A.8/2 teilweise in Richtung Schacht, teilweise aber auch in die entgegengesetzte Richtung, um dort den Porenraum in den Richtstrecken aufzufüllen. Das umgebende Salinargebirge ist zu diesem Zeitpunkt noch immer impermeabel.

Die Volumenstromrate des Gases reduziert sich im Lauf der Zeit im Bereich der Einlagerungs- und Verbindungsstrecken allerdings wieder, so dass sie zum Zeitpunkt $t=10.000 a$

nach Verschluss des Endlagers entsprechend Bild A.8/3 nur noch etwa $\dot{Q}_g \approx 45 \frac{N-l}{a \cdot m^2}$ be-

trägt. Dafür gibt es mehrere Ursachen und zwar die konvergenz- bzw. kompaktionsbedingte Reduzierung der Salzgruspermeabilität, die abnehmenden Porengasdruckgradienten im Salzgrusversatz sowie den zu diesem Zeitpunkt nur noch auf der korrosionsbedingten Gasbildung beruhenden Gasdruckaufbau in den Einlagerungsstrecken, der im Vergleich zu der durch die konvergenzbedingte Verringerung des Porenraums induzierten Erhöhung des Gasdrucks deutlich langsamer erfolgt. Bedingt durch das verlangsamte Abströmen des Porengases bauen sich allerdings auch insgesamt höhere Gasdrücke in den Einlagerungsstrecken auf. Diese Gasdrücke erreichen dabei allmählich im Lauf der fortschreitenden Zeit etwa nach 10.000 Jahren das Niveau des primären Gebirgsdrucks, so dass der Prozess der druckgetriebenen Infiltration des Porengases in das umgebende Salinargebirge einsetzt. Dieser Prozess findet in der Folgezeit bis zum Ende der korrosionsbedingten Gasbildung zum Zeitpunkt $t=20.000 a$ nach Verschluss des Endlagers bei Annahme eines nur begrenzten Lösungsangebots bzw. zum Zeitpunkt $t=300.000 a$ nach Verschluss des Endlagers bei Annahme eines unbegrenzten Lösungsangebots kontinuierlich statt. Nach Ende der korrosionsbedingten Gasbildung reduzieren sich die Gasvolumenströme allmählich wieder.

Bild 5.24 (= Bild A.14/2) zeigt für den Fall des nur begrenzten Lösungsangebots die räumliche Verteilung des Porengasdrucks im Salinargebirge um die Einlagerungsstrecken des 2. Einlagerungsfeldes herum zum Ende der korrosionsbedingten Gasbildung. Die Berechnungszonen, für die ein Porengasdruck oberhalb des in den jeweiligen Berechnungszonen vorherrschenden hydrostatischen Drucks von je nach Teufenlage der betrachteten Berechnungszone bis zu etwa $7,3 MPa$ bzw. sogar auf dem Niveau des in den jeweiligen Berechnungszonen vorherrschenden lithostatischen Drucks von bis zu etwa $13,3 MPa$ ausgewiesen wird, sind mit Gas infiltriert worden. Die Infiltrationszone dringt somit für den Fall des nur begrenzten Lösungsangebots bis zum Ende der korrosionsbedingten Gasbildung etwa $35 m$ in die Firstbereiche der Einlagerungsstrecken ein.

Im Fall des unbegrenzten Lösungsangebots propagiert die Infiltrationsfront des Gases im

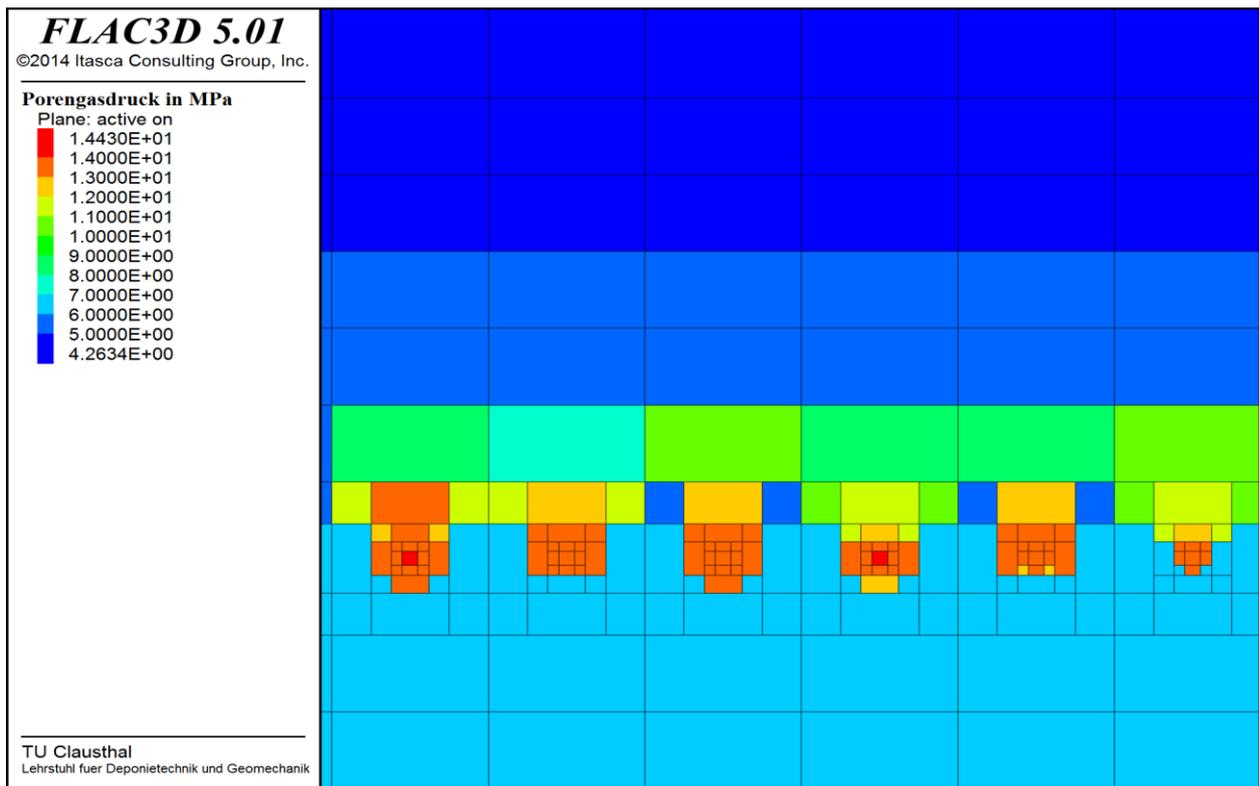


Bild 5.24 Porengasdruck in den Einlagerungsstrecken sowie im Salinargebirge oberhalb des 2. Einlagerungsfeldes zum Zeitpunkt $t = 20.000 a$ nach Verschluss des Endlagers

Salinargebirge dagegen in Richtung der oberen Berandung des Berechnungsmodells fort und erreicht im Rahmen der hier betrachteten Basis-Simulation das Deckgebirge entsprechend Bild 5.25 (= Bild A.14/3) etwa zum Zeitpunkt $t = 80.000 a$ nach Verschluss des Endlagers.

Zur weiteren Erläuterung der ablaufenden fluiddynamischen Prozesse werden im Folgenden für den Fall des unbegrenzten Lösungsangebots zur Gasbildung für ausgewählte Berechnungszonen als Beobachtungspunkte innerhalb des Endlagerbergwerks entsprechend Bild 5.26(links) (= Bild A.12/1) sowie in der Wirtsgesteinsformation oberhalb der Einlagerungssohle entsprechend Bild 5.26(rechts) (= Bild A.13/1) die zeitabhängigen Entwicklungen von Porosität, Sättigungsgrad, Porengasdruck, Temperatur sowie Flüssigkeits- und Gasströmungsraten erläutert. Die Darstellung der zeitabhängigen Entwicklungen umfasst den Zeitraum zwischen 1 Jahr nach Verschluss des Endlagers und 1.000.000 Jahren nach Verschluss des Endlagers.

Aus Bild 5.27 (= Bild A.12/2) ist zu ersehen, dass sich die zeitlichen Entwicklungen der Salzgrusporosität für verschiedene Beobachtungspunkte deutlich voneinander unterscheiden. Während die Salzgrusporosität in der Berechnungszone 1, die einen Abfallbehälter inklusive des umgebenden Salzgrusversatzes repräsentiert, bereits 1 Jahr nach Verschluss des Endlagers von der initialen Salzgrusporosität $\phi_0 = 35\%$ auf $\phi \approx 22\%$ zurückgegangen ist, hat sich die Salzgrusporosität in den anderen Beobachtungszonen bis zu diesem Zeitpunkt nur sehr wenig verändert. Aufgrund der fortschreitenden Salzgruskompaktion wird in der Berechnungszone 1 eine Salzgrusporosität von $\phi \approx 5\%$ bereits etwa 200 Jahre nach

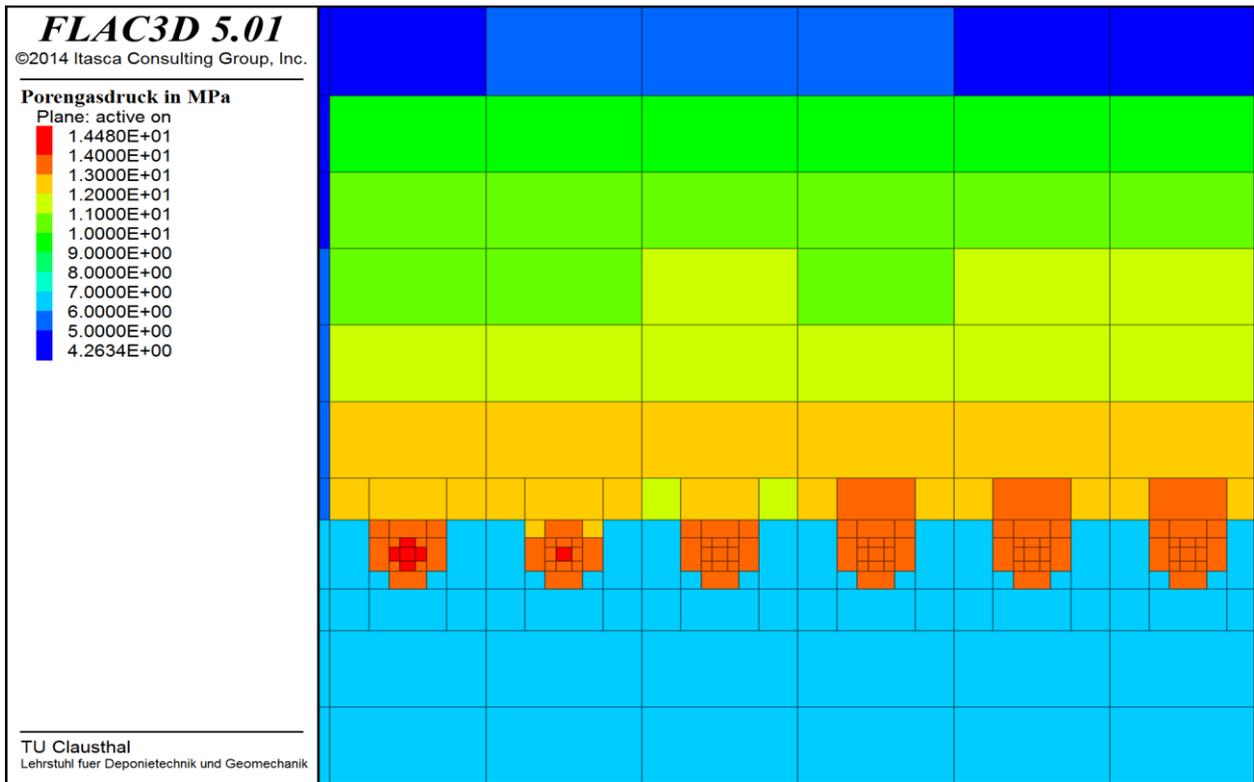


Bild 5.25 Porengasdruck in den Einlagerungsstrecken sowie im Salinargebirge oberhalb des 2. Einlagerungsfeldes zum Zeitpunkt $t = 80.000 a$ nach Verschluss des Endlagers

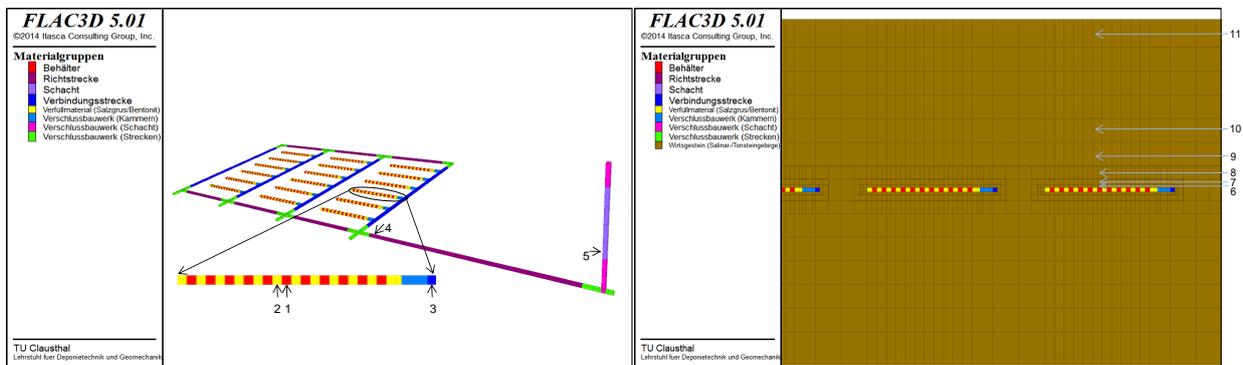


Bild 5.26 Positionierung der ausgewählten Berechnungszonen zur Analyse der zeitabhängigen Entwicklung der Salzgrusporosität, des Flüssigkeitssättigungsgrades, des Gassättigungsgrades, des Porengasdrucks, der Temperatur sowie der Flüssigkeits- und Gasströmungsraten innerhalb des Grubengebäudes (links) bzw. im Salinargebirge oberhalb des Grubengebäudes (rechts)

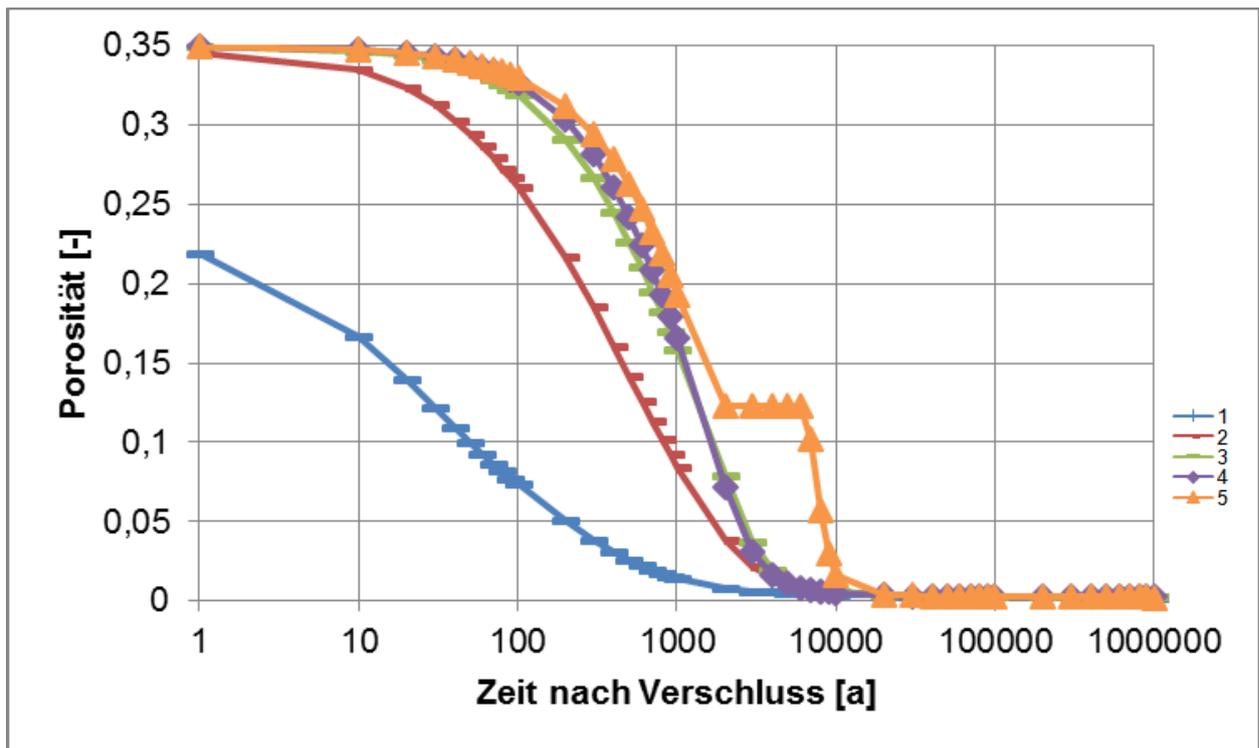


Bild 5.27 Zeitabhängige Entwicklung der Salzgrusporosität in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

Verschluss des Endlagers erreicht, während die Salzgrusporosität in den anderen Beobachtungszonen zu diesem Zeitpunkt noch $\phi > 20\%$ beträgt.

Mit zunehmender Salzgruskompaktion baut sich im Versatzmaterial ein immer größerer Stützdruck auf, der der weiteren Salzgruskompaktion entgegenwirkt. Dieser Effekt ist aufgrund der anfänglich lokal intensiveren Salzgruskompaktion besonders ausgeprägt in der Berechnungszone 1. Aus diesem Grund erreicht die Salzgrusporosität eine dem umgebenden Salinargebirge entsprechende geogene Porosität von $\phi_0 \approx 0,2\%$ in allen Beobachtungszonen erst mehrere 10.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers.

Wie bereits vorstehend im Zusammenhang mit Bild 5.24 und Bild 5.25 erläutert, führt die Salzgruskompaktion nicht nur zu einem ansteigenden Stützdruck im Salzgrusversatz, sondern auch zu einem konvergenzbedingten Fluiddruckaufbau im Porenraum des Salzgrusversatzes, so dass der Porenfluiddruck etwa 10.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers den primären Gebirgsdruck erreicht. Dieser Sachverhalt ist auch aus Bild 5.28 (= Bild A.12/5) zu ersehen.

Entsprechend dem in Abschnitt 4.2 vorgestellten Funktionalmodell nach Gl. (4.3) zur Beschreibung der Streckenkonvergenz und der damit einhergehenden Salzgruskompaktion hat neben dem sich allmählich aufbauenden Stützdruck sowie dem Porenfluiddruck im Versatzmaterial auch die Temperatur einen signifikanten Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der Salzgrusporosität, insbesondere in den ersten Jahrhunderten nach dem Verschluss des Endlagers, in denen der Stützdruck und der Porenfluiddruck im Salzgrusversatz noch relativ niedrig sind, die Temperatur dagegen abhängig von der Entfernung der Abfallbehälter teilweise relativ hoch. Bild 5.29 (= Bild A.12/6) zeigt die Temperaturentwicklung in den 5 aus-

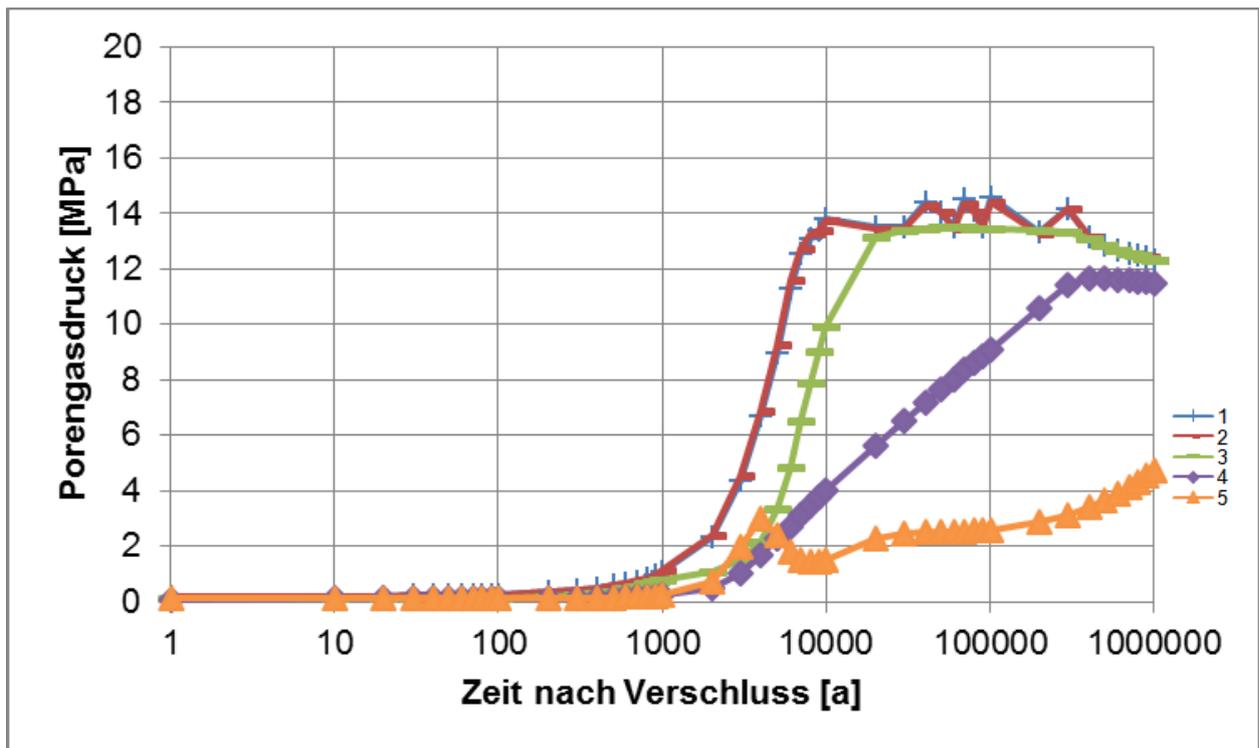


Bild 5.28 Zeitabhängige Entwicklung des Porengasdrucks in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

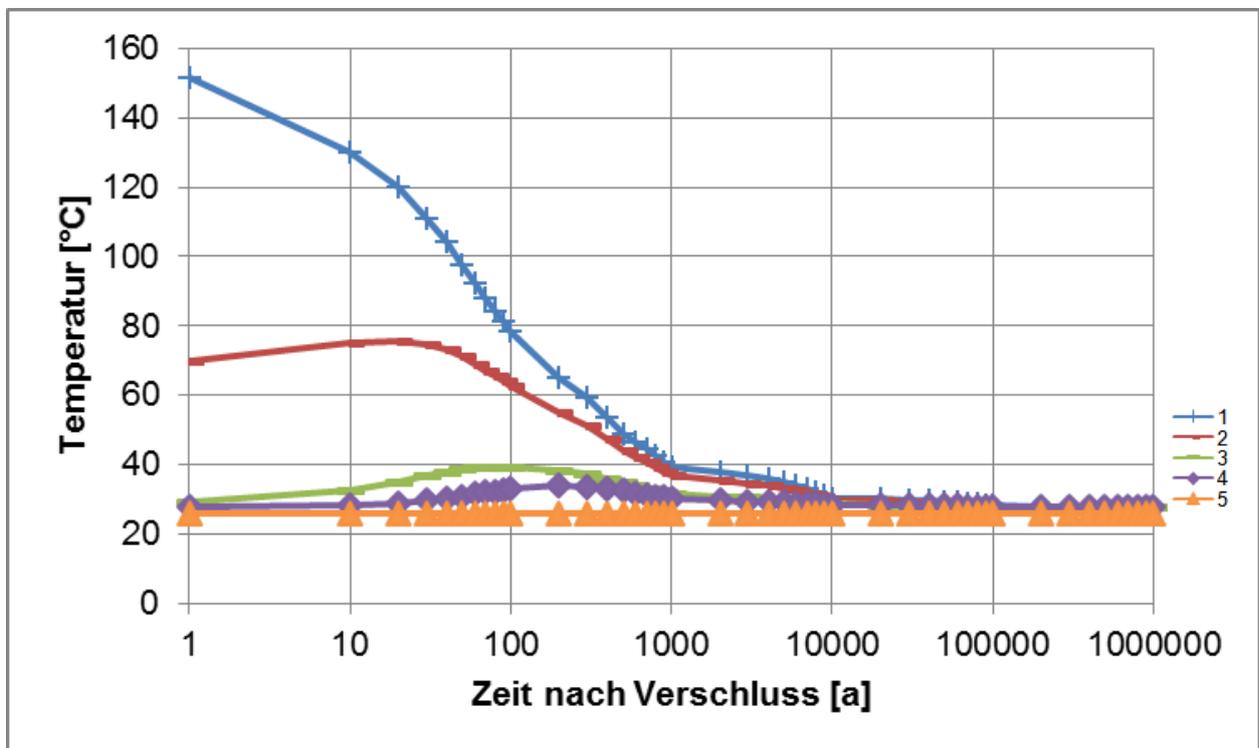


Bild 5.29 Zeitabhängige Entwicklung der Temperatur in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

gewählten Beobachtungszonen innerhalb des Grubengebäudes. Es ist zu ersehen, dass in der Berechnungszone 1 Temperaturen von deutlich über $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht werden, die entsprechend Gl. (4.3) zu einer deutlichen Intensivierung der Salzgruskompaktion führen. In den anderen Beobachtungszonen bleiben die Temperaturen unterhalb von $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die erreichten Maximaltemperaturen hängen wie erwartet von der Entfernung der Beobachtungszone von den Wärme produzierenden Abfallbehältern ab. Nach etwa 10.000 Jahren erreichen die Temperaturen im gesamten Berechnungsmodell wieder nahezu die primäre Gebirgstemperatur.

Die Bilder A.12/3 und A.12/4 zeigen die zeitliche Entwicklung des Flüssigkeits- und Gassättigungsgrades in den 5 Beobachtungszonen im Grubengebäude. Es ist zu ersehen, dass in der stark erhitzten Berechnungszone 1 bereits 1 Jahr nach Verschluss des Endlagers der initial vorhandene Lösungsanteil entsprechend der initialen Flüssigkeitssättigung von $S_{l,0} = 2\%$ bereits vollständig verdampft ist, so dass zu diesem Zeitpunkt eine Flüssigkeitssättigung von $S_l = 0\%$ vorliegt. Die Gassättigung beträgt dementsprechend zu diesem Zeitpunkt $S_g = 100\%$. Bedingt durch die abnehmende Temperatur kommt es im Salzgrusversatz im Bereich der Berechnungszone 1 etwa 1.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers wieder zu einer allmählichen Kondensation des zuvor verdampften Porenwassers, so dass die Flüssigkeitssättigung geringfügig ansteigt bzw. die Gassättigung geringfügig abnimmt. Aufgrund der fortschreitenden korrosionsbedingten Gasbildung steigt die Gassättigung im Anschluss allerdings wieder an.

(b) Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge (Norddeutschland) → Globalmodell (i)

Die Betriebsgeschichte des Referenz-Endlagersystems ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge ist in ihrem zeitlichen Ablauf identisch mit der vorstehend beschriebenen Betriebsgeschichte des Referenz-Endlagersystems ohne Überfahrungssohle im Salinargebirge. Zwei inhaltliche Unterschiede bestehen allerdings und zwar

- bei der Wahl des Versatzmaterials, für das im Tonsteingebirge Bentonit verwendet wird, um den Wasserzutritt aus dem Gebirge hin zu den Abfallbehältern zu verzögern und um gleichzeitig einen Quelldruck zur Reduzierung der entfestigungsbedingten sekundären Wegsamkeiten im Bereich der Streckenkontur aufzubauen, sowie
- bei der Wahl des Abfallbehälters, für den im Tonsteingebirge ein Behälter des Typs POLLUX-3 angesetzt wird, um die maximal zu erwartenden Temperaturen im Bentonitversatz sowie im Tonsteingebirge unter $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu halten.

Eine großräumige horizontale oder vertikale Strömung des Grundwassers im Porenraum des Tonsteingebirges wird hier im Rahmen der Basis-Simulation für die Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge nicht angesetzt. Tatsächlich könnte eine derartige Situation bei Voraussetzung homogener, nicht tektonisch durch ein Trennflächengefüge überprägter Gebirgsverhältnisse dann vorliegen, wenn der durch die hydraulischen Eigenschaften des Tonsteins bedingte Anfangsgradient i_0 größer ist als der regional anstehende hydraulische Gradient im Porengrundwasser.

Die Simulationsergebnisse zum Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge sind in Anhang B zusammengestellt.

(b/1) Temperaturentwicklung

Auch für das Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge wird zuerst eine Übersicht zur Temperaturentwicklung auf der Einlagerungssohle gegeben, da aufgrund der unterschiedlichen Beladung und damit auch der unterschiedlichen Wärmeleistung der Einlagerungsbehälter deutliche Unterschiede in der Temperaturentwicklung zu erwarten sind.

Die Bilder B.1/1 bis B.1/79 zeigen die Temperaturentwicklung auf der Einlagerungssohle im Tonsteingebirge über einen Zeitraum von 10.000 Jahren. Aus den Darstellungen ist zu ersehen, dass im Tonsteingebirge bedingt durch die dortige Verwendung von Behältern des Typs POLLUX-3 die Temperaturen in den bereits mit Abfallbehältern belegten Einlagerungsstrecken wie zu erwarten deutlich weniger stark ansteigen als im Salinargebirge, für das Behälter des Typs POLLUX-10 angesetzt worden sind. Die maximale Temperatur auf der Einlagerungssohle wird für das Referenz-Endlagersystem im Tonsteingebirge mit ca. 100°C ausgewiesen und entsprechend der sequentiellen Belegung der Einlagerungsstrecken an verschiedenen Positionen der Einlagerungsfelder zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht. Anschließend reduzieren sich die Temperaturen in den Einlagerungsstrecken und in ihrem unmittelbaren Umfeld wieder, da einerseits die aus dem radioaktiven Zerfall resultierende Wärmeenergie entsprechend der Wärmeleitfähigkeit des Gebirges großräumig verteilt wird und andererseits die Wärmeleistung der Abfallbehälter im Lauf der Zeit abnimmt.

Im Hinblick auf die Referenz-Endlagervariante mit Anordnung einer Überfahrungssohle ist grundsätzlich auch die zeitliche Entwicklung der Temperaturen oberhalb der Einlagerungssohle von Bedeutung. In Bild B.2 bzw. Bild B.3 werden daher exemplarisch die Temperaturentwicklungen in den Teufenhorizonten 20 m bzw. 40 m oberhalb der Einlagerungssohle betrachtet. Es ist zu ersehen, dass die Temperaturen 20 m oberhalb der Einlagerungssohle ihre Maximalwerte mit Temperaturen von ca. 36°C etwa 80 Jahre nach Verschluss des Endlagers erreichen, wohingegen 40 m oberhalb der Einlagerungssohle etwa 300 Jahre nach Verschluss des Endlagers maximale Temperaturen von ca. 33°C erreicht werden.

Etwa 10.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers sind die Temperaturen im gesamten Berechnungsmodell wieder auf dem Niveau der primären Gebirgstemperaturen.

(b/2) Fluidynamische Entwicklung

Neben den Temperaturentwicklungen im Gebirge und insbesondere den im Bentonitversatz bzw. Tonsteingebirge erreichten Maximaltemperaturen wird ein weiterer signifikanter Unterschied zwischen den beiden Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge ersichtlich, wenn die hydraulische Situation im Umfeld der Einlagerungsstrecken verglichen wird. Während das Salinargebirge um die Einlagerungsstrecken in den ersten Jahrtausenden nach dem Verschluss des Endlagerbergwerks aufgrund der primären Impermeabilität des Salinargebirges weder eine Flüssigkeits- noch eine Gasströmung aufweist, tritt im Tonsteingebirge der in den Bildern B.5 bis B.7 dargestellten Simulationsergebnisse schon unmittel-

bar nach der Auffahrung der Strecken eine Wasserströmung aus dem Tonsteingebirge in das Endlagerbergwerk hinein auf, die induziert wird durch den in die offenen und unter Atmosphärendruck stehenden Strecken gerichteten hydraulischen Gradienten. Aus Bild 5.30 (= Bild B.5/1) ist zu ersehen, dass die Volumenstromrate des Wassers allerdings mit $\dot{Q}_l \approx 0,44 \frac{l}{a \cdot m^2}$ (Liter pro Jahr und Quadratmeter Querschnittsfläche) während der Offenhaltung der Strecken aufgrund der sehr niedrigen hydraulischen Durchlässigkeit des Tonsteingebirges von $K = 10^{-20} m^2$ nur relativ gering ist. Mit dem Versatz der Strecken mit dem zum Einbauzeitpunkt nur zu 18% wassergesättigten Bentonitversatz intensiviert sich die Wasserströmung (entgegen der Erwartung) zunächst erheblich auf eine Volumenstromrate von $\dot{Q}_l \approx 5,5 \frac{l}{a \cdot m^2}$ kurz nach Einbau des Bentonitversatzes. Grund hierfür ist der im nur teilgesättigten Bentonitversatz vorhandene Kapillardruck, durch den der in die versetzten Strecken gerichtete hydraulische Gradient für die Flüssigphase signifikant erhöht wird. Mit der allmählichen Aufsättigung des Bentonitversatzes reduziert sich der Kapillardruck und damit auch der hydraulische Gradient für die Flüssigphase, so dass die Wasserströmung in ihrer Intensität dann wieder abklingt, bis der Zustrom von Wasser in die versetzten Strecken zum Zeitpunkt $t = 1.000 a$ nach Verschluss des Endlagers entsprechend Bild B.5/3 nahezu vollständig zum Erliegen gekommen ist.

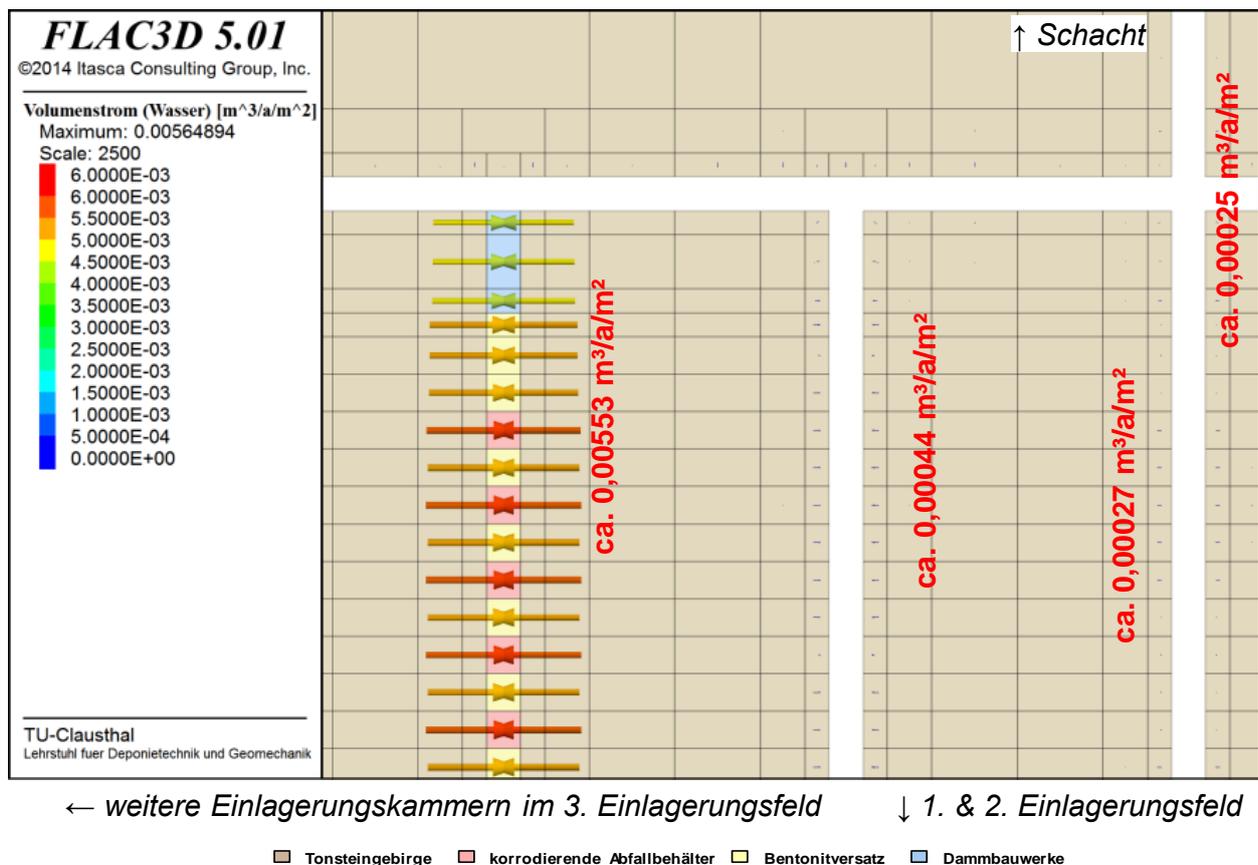


Bild 5.30 Wasserströmung in der Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t = 15,31 a$ nach Beginn der Betriebsphase

Die Bilder B.9 bis B.11 zeigen, dass nach dem Verschluss der Strecken zudem im Tonsteingebirge auch eine aufgrund des Dichteunterschieds zwischen Poren gas und Porenwasser vornehmlich nach oben gerichtete Gasströmung auftritt, wobei zunächst die in dem beim Einbau nur teilgesättigten Bentonitversatz vorhandene Porenluft durch das zu strömende Wasser komprimiert und ausgepresst wird, später dann aber die korrosionsbedingte Gasbildung und der damit verbundene Gasdruckaufbau in den Einlagerungsstrecken im Zeitraum zwischen $t=1.000 a$ und $t=10.000 a$ nach Verschluss des Endlagers zunehmend an Bedeutung für das fluiddynamische Verhalten des Referenz-Endlagersystems gewinnen. Die Gasbildung in den Einlagerungsstrecken resultiert in einer zunehmend intensiveren Verdrängung des in den Porenräumen des Versatzmaterials enthaltenen Porenwassers, so dass die Flüssigkeitssättigung wieder abnimmt, begleitet durch einen geringfügigen Anstieg des Kapillardrucks, so dass es kapillardruckbedingt entsprechend Bild B.5/4 erneut zu einer Wasserströmung aus dem Tonsteingebirge in die versetzten Einlagerungsstrecken kommt. Im Bentonitversatz stellt sich im Lauf der Zeit ein Zustand ein, bei dem gasbildungsinduzierte Wasserverdrängung in das umgebende Tonsteingebirge und kapillardruckbedingter Wasserzustrom aus dem umgebenden Gebirge im Gleichgewicht stehen. Das sich ergebende Strömungsfeld des Porenwassers weist nur sehr geringe Strömungsraten auf, wobei die Orientierung der Strömungsrichtungen gerade aufgrund dieser geringen Strömungsraten relativ diffus erscheint, da kleine numerische Ungenauigkeiten bzw. Rundungsfehler nunmehr einen relativ großen Einfluss haben können. Erst nach Ende der korrosionsbedingten Gasbildung in den Einlagerungsstrecken zum Zeitpunkt $t=300.000 a$ nach Verschluss des Endlagers ergibt sich wieder ein deutlich gerichtetes Strömungsfeld entsprechend Bild B.5/6, da nunmehr keine gasbildungsinduzierte Verdrängung von Porenwasser mehr erfolgt, sondern nur noch eine Wiederaufsättigung des Bentonitversatzes. Dieser Aufsättigungsprozess ist dann zum Zeitpunkt $t=400.000 a$ nach Verschluss des Endlagers bereits nahezu vollständig abgeschlossen, so dass für diesen Zeitpunkt in Bild B.5/7 keine weitere Wasserströmung mehr ausgewiesen wird.

Es ist analog zur vorstehend vorgestellten Basis-Simulation im Salinargebirge darauf hinzuweisen, dass auch in dieser Basis-Simulation im Tonsteingebirge der Simulationszeitraum 1.000.000 Jahre beträgt, allerdings nur Simulationsergebnisse für die ersten 400.000 Jahre dargestellt sind, da nach Abschluss der 300.000 Jahre andauernden Gasbildung (= Annahme für die vollständige Korrosion der Einlagerungsbehälter) die fluiddynamischen Prozesse im Endlager und im umgebenden Wirtsgestein zum Erliegen kommen. Es ist weiterhin darauf hinzuweisen, dass sowohl in der Bildsequenzen B.4 bis B.11 die Skalierung der Fließvektoren mit der Zeit variiert, da die Fließraten tendenziell immer kleiner werden und somit im Rahmen ihrer Visualisierung die Fließvektoren hinsichtlich ihrer Vektorlänge zunehmend überhöht dargestellt werden müssen, um überhaupt dargestellt werden zu können. Durch die in den Bildsequenzen B.4 bis B.11 gewählte vektorielle Darstellung der Wasser- bzw. Gasströmungen konnte das Verständnis zu den im Endlagerbergwerk sowie im umgebenden Wirtsgestein ablaufenden fluiddynamischen Prozessen für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge sowohl qualitativ wie auch quantitativ erheblich verbessert werden.

Ebenso wie bei der Darstellung der Simulationsergebnisse zur Basis-Simulation im Salinargebirge werden im Folgenden auch für die Basis-Simulation im Tonsteingebirge zur weiteren Erläuterung der ablaufenden fluiddynamischen Prozesse für ausgewählte Beobachtungspunkte innerhalb des Endlagerbergwerks entsprechend Bild B.12/1 sowie in der Wirtsgesteinsformation oberhalb der Einlagerungssohle entsprechend Bild B.13/1 die zeitabhängigen Entwicklungen von relevanten physikalischen Größen, hier Wassersättigungsgrad,

Gassättigungsgrad, Porenwasserdruck, Porengasdruck, Kapillardruck, Temperatur sowie Flüssigkeits- und Gasströmungsraten erläutert. Die Darstellung der zeitabhängigen Entwicklungen umfasst den Zeitraum zwischen 1 Jahr nach Verschluss des Endlagers und 400.000 Jahren nach Verschluss des Endlagers.

Aus Bild 5.31 (= Bild B.12/7) ist zu ersehen, dass die Behälter-Berechnungszone im Basis-Modell für die Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge im Gegensatz zur Behälter-Berechnungszone im Basis-Modell für die Wirtsgesteinsformation Salinargebirge, für die zum Zeitpunkt $t=1 a$ nach Verschluss des Endlagers eine Temperatur von etwa $T \approx 150^\circ C$ ausgewiesen worden ist, in der Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge zum gleichen Zeitpunkt nur eine Temperatur von knapp unterhalb von $100^\circ C$ aufweist. Dementsprechend kann aus Bild 5.32 (= Bild B.12/2) ersehen werden, dass das initial im Bentonitversatz enthaltene Porenwasser nicht verdampft, sondern vielmehr die Flüssigkeitssättigung dort im Lauf der Zeit durch das aus dem umgebenden Tonsteingebirge zuströmende Porenwasser sogar ansteigt, bis etwa zum Zeitpunkt $t=1.000 a$ nach Verschluss des Endlagers eine Flüssigkeitssättigung von $S_l \approx 99,9\%$ erreicht wird. Dementsprechend beträgt die Gassättigung entsprechend Bild B.12/3 zu diesem Zeitpunkt $S_g \approx 0,1\%$.

Aufgrund des aus dem umgebenden Tonsteingebirge in das versetzte Grubengebäude zuströmenden Porenwassers sowie der fortschreitenden korrosionsbedingten Gasbildung ist im Bentonitversatz ein allmählicher Anstieg des Porengasdrucks zu verzeichnen. Dieser erreicht entsprechend Bild 5.33 (= Bild B.12/5) etwa 5.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers das Niveau des hydrostatischen Drucks mit $p_g \approx 6 MPa$. Anschließend steigt der Porengasdruck korrosionsbedingt noch etwas weiter an bis zu einem Maximalwert von $p_g \approx 7,1 MPa$,

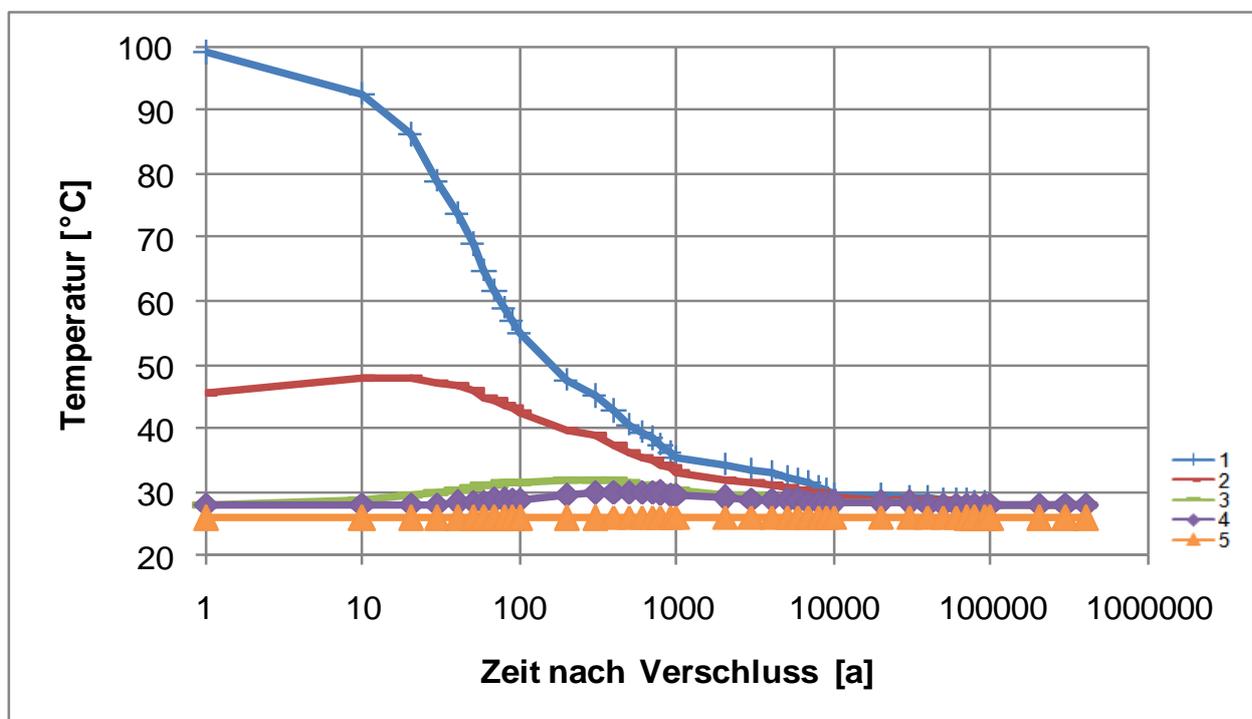


Bild 5.31 Zeitabhängige Entwicklung der Temperatur in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

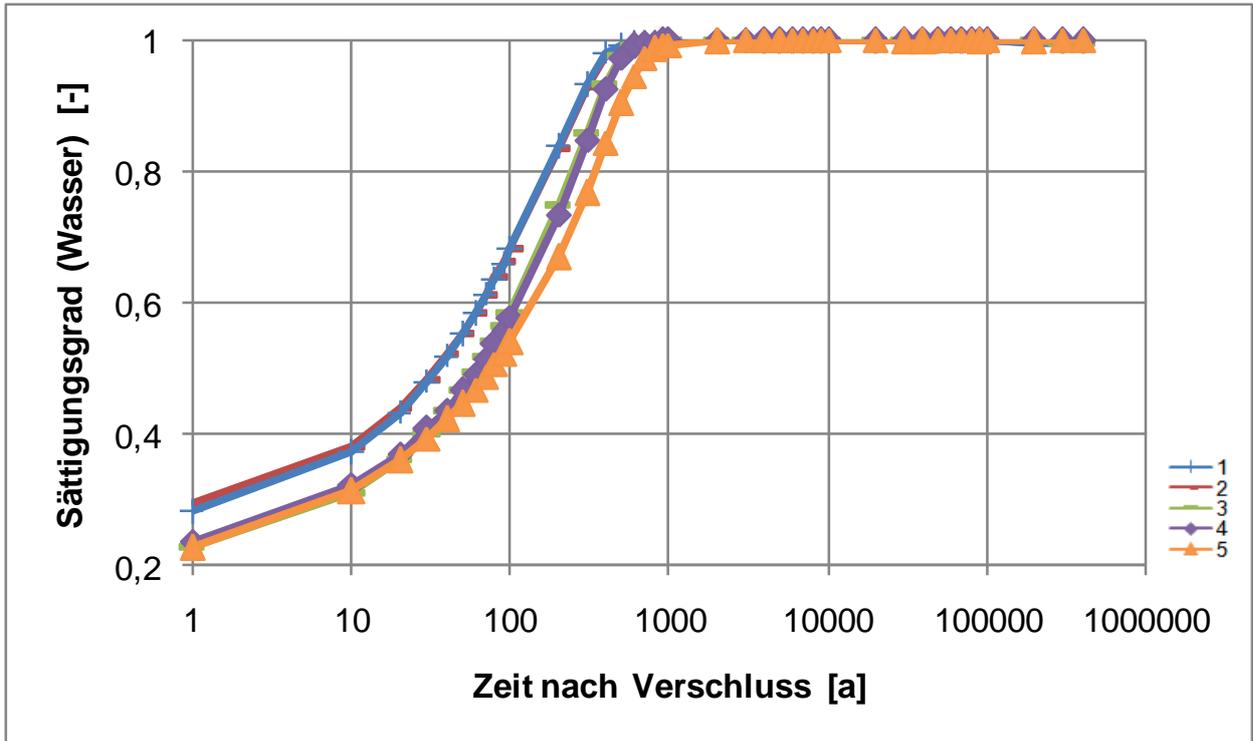


Bild 5.32 Zeitabhängige Entwicklung des Flüssigkeitssättigungsgrades in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

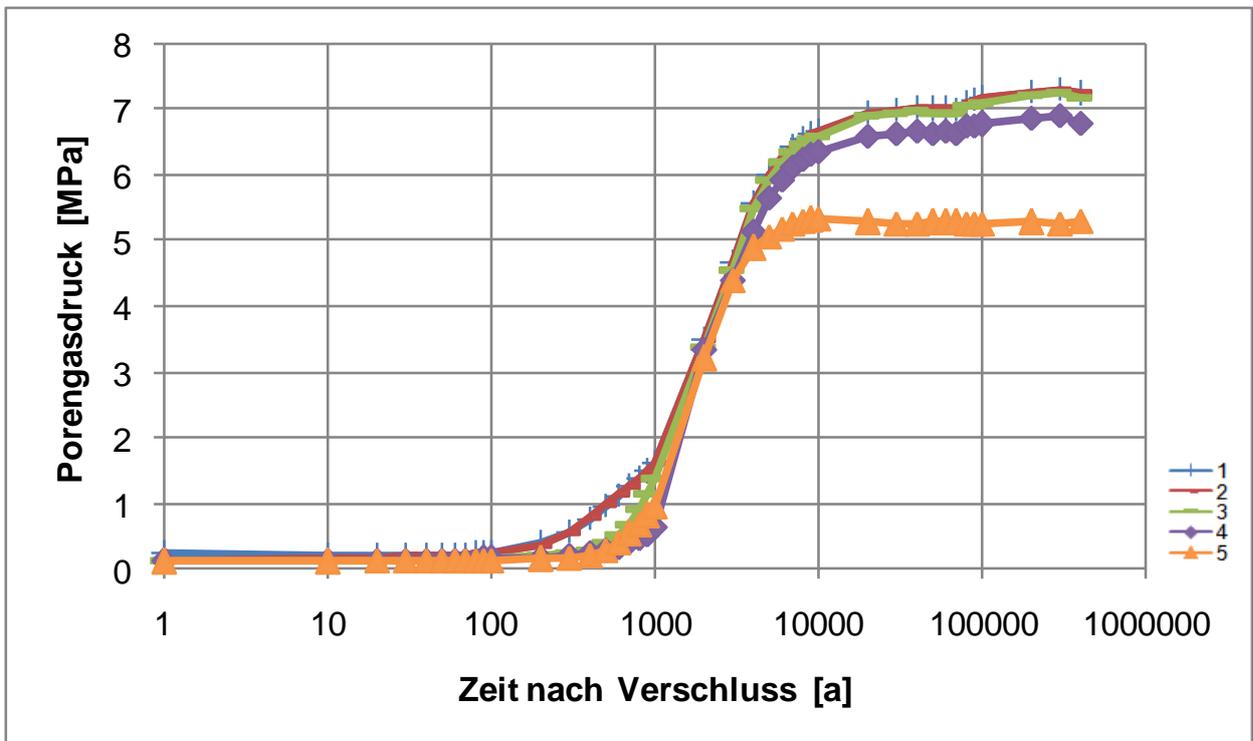


Bild 5.33 Zeitabhängige Entwicklung des Porengasdrucks in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

wodurch sich ein aus den Strecken in das umgebende Tonsteingebirge gerichteter Gasdruckgradient ergibt, der in einem Abströmen des Korrosionsgases in das umgebende Tonsteingebirge resultiert. Der Porenwasserdruck stellt sich entsprechend Bild B.12/4 dagegen innerhalb der Strecken aufgrund des wirkenden Kapillardrucks geringfügig unterhalb des hydrostatischen Drucks ein.

Das in die Wirtsgesteinsformation eindringende Porengas breitet sich aufgrund der im Tonsteingebirge schon im unverritzten Zustand vorhandenen vernetzten Porenräume in der Wirtsgesteinsformation aus, wobei die bevorzugte Ausbreitungsrichtung aufgrund des Dichtunterschieds zwischen Porengas und Porenwasser aufwärts gerichtet ist. Dieser Sachverhalt ist zu ersehen einerseits aus der in Bild B.13/3 dargestellten zeitlich versetzten Erhöhung der Gassättigung in den verschiedenen Beobachtungspunkten der Wirtsgesteinsformation. Es ist allerdings dort auch zu ersehen, dass die sich aufwärts bewegende Gasfront in der hier betrachteten Basis-Simulation den oberen Modellrand und damit das Deckgebirge nicht erreicht, da die Gassättigung dort konstant bei $S_g = 0\%$ verbleibt. Einen weiteren Beleg für diesen Sachverhalt zeigt Bild 5.34 (= Bild B.14/1), in dem für einen Vertikalschnitt durch die Mitte des 2. Einlagerungsfeldes für den Zeitpunkt $t = 300.000 a$ nach Verschluss des Endlagers (= Ende der korrosionsbedingten Gasbildung) der Gebirgsbereich mit einer Flüssigkeitssättigung $S_g < 100\%$ rot eingefärbt ist. In diesen Gebirgsbereich hat sich das bei der Behälterkorrosion entstehende Gas bis zum Ende der korrosionsbedingten Gasbildung ausgebreitet. Der Abstand zwischen der Oberkante dieses Gebirgsbereichs und der Modelloberkante beträgt zu diesem Zeitpunkt noch etwa $60 m$. Obwohl die korrosionsbe-

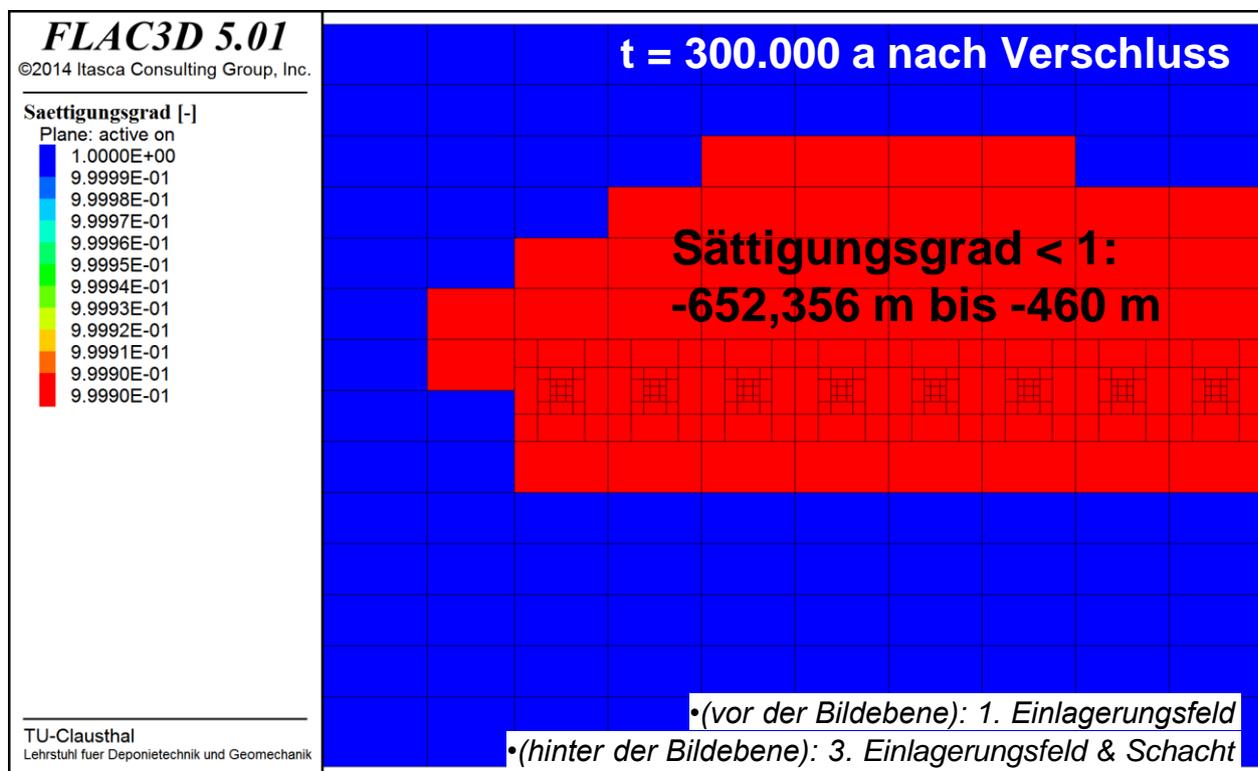


Bild 5.34 Flüssigkeitssättigung in den Einlagerungsstrecken sowie im Tonsteingebirge oberhalb des 2. Einlagerungsfeldes zum Zeitpunkt $t = 300.000 a$ nach Verschluss des Endlagers

dingte Gasbildung zu diesem Zeitpunkt beendet ist, induziert der Dichteunterschied zwischen Porengas und Porenwasser in der Folge eine weitere Propagation der Gasfront, die aus Bild B.14/2 zu ersehen ist.

5.2.2.3 Ausgewählte Simulationsergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod sind diverse Globalmodell-Variationssimulationen für die beiden Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge durchgeführt worden. An dieser Stelle können aus Platzgründen nur einige ausgewählte und besonders prägnante Simulationsergebnisse dieser Variationen grafisch dargestellt und entsprechend diskutiert werden, weitere Simulationsergebnisse sind dem diesem Arbeitsbericht beigefügten Anhang zu entnehmen.

Mit Blick auf die thermischen Prozesse ist zunächst anzumerken, dass bei den meisten Globalmodell-Variationssimulationen die Wärmeleistung der Abfallbehälter analog zu den jeweiligen vorstehend dokumentierten Basis-Simulationen angesetzt worden ist. Obwohl die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität der Versatzmaterialien und umgebenden Wirtsgesteine nicht konstant sind, sondern als Funktionen von Porosität, Temperatur und/oder Flüssigkeitssättigung in Zeit und Raum variieren können, gibt es nur geringe Unterschiede zwischen den Simulationsergebnissen der Basis-Simulationen und der zugehörigen Variationssimulationen hinsichtlich der zeitlich-räumlichen Temperaturentwicklung. Dieser Befund deutet darauf hin, dass das Systemverhalten von Endlagersystemen im Salinar- oder Tonsteingebirge relativ robust gegenüber Änderungen der Wärmeleitfähigkeiten und der spezifischen Wärmekapazitäten ist, zumindest sofern sich diese Änderungen in der Größenordnung bewegen, wie sie sich aus angesetzten den funktionalen Zusammenhängen zwischen Wärmeleitfähigkeit bzw. spezifischer Wärmekapazität und Porosität, Temperatur und/oder Flüssigkeitssättigung ergeben.

Größere Unterschiede zwischen den Simulationen lassen sich mit Blick auf die fluiddynamischen Prozesse erkennen, wenn die in diesem Kontext relevanten Materialeigenschaften variiert werden, insbesondere die Korrosionsrate der Abfallbehälter, aber für das Endlager im Tonsteingebirge auch die Permeabilität des Bentonits oder der geologischen Barriere. Auch der Ansatz einer Störungszone mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit oder der Ansatz eines primären horizontal oder vertikal gerichteten hydraulischen Gradienten im Tonsteingebirge beeinflussen die fluiddynamischen Prozesse im Endlagersystem. Für die fluiddynamischen Prozesse in einem Endlagersystem im Salinargebirge sind die Kriecheigenschaften des Wirtsgesteins besonders relevant. Die Annahme einer Überfahrungssohle hat dagegen in beiden Wirtsgesteinsformationen – zumindest in den bisher noch relativ wenigen durchgeführten Simulationen mit Globalmodell (ii) – nur vergleichsweise geringe Auswirkungen auf das Endlagersystemverhalten gezeigt.

Die in den durchgeführten Globalmodell-Variationssimulationen erhaltenen Unterschiede werden im Folgenden diskutiert.

(1) *Ausgewählte Variationssituationen im Tonsteingebirge*

(1-1) *Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme einer ausbleibenden Behälterkorrosion → Globalmodell (i)*

Diese Simulationsvariation repräsentiert ein Szenario, bei dem die Behälterkorrosion und die damit einhergehende korrosionsbedingte Gasbildung durch eine spezielle Abfallbehälterbehandlung wie etwa das Aufbringen einer korrosionsbeständigen Lackierung auf der Behälteroberfläche unterbunden werden. Bleibt die korrosionsbedingte Gasbildung aus, so sind die in Anhang C dargestellten Simulationsergebnisse dieser Variation in den ersten Jahrzehnten und Jahrhunderten zwar noch ähnlich zu den Simulationsergebnissen der Basis-Simulation, nach Aufsättigung des Bentonits und Einstellung eines Porendrucks auf dem Niveau des primären Porendruckniveaus kommen allerdings alle Fluidströmungen zum Erliegen. Ein advektiv getragener Radionuklidtransport ist somit nicht mehr möglich, ein diffusiv getragener Radionuklidtransport dagegen weiterhin schon.

(1-2) *Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme einer gegenüber der Basis-Simulation 100-fach erhöhten Behälterkorrosionsrate → Globalmodell (i)*

Diese Simulationsvariation repräsentiert ein Szenario, bei dem die Behälterkorrosion und die damit einhergehende korrosionsbedingte Gasbildung erheblich schneller ablaufen als in der Basis-Simulation, z.B. aufgrund der Ausbildung ungünstiger geochemischer Verhältnisse innerhalb der Einlagerungsstrecken. Die Simulationsergebnisse dieser Variation weisen entsprechend Bild 5.35 (= Bild D.12/5) mit bis zu $p_g \approx 15 \text{ MPa}$ signifikant höhere Gasdrücke auf als die Simulationsergebnisse der Basis-Simulation mit bis zu $p_g \approx 7,3 \text{ MPa}$. Diese höheren Gasdrücke resultieren ihrerseits in höheren Gasdruckgradienten und damit auch in höheren Gasströmungsraten. Diese Gasströmungsraten sind für das Streckensystem für den Zeitpunkt $t = 1.000 \text{ a}$ nach Verschluss des Endlagers in Bild 5.36 (= Bild D.8/2) dargestellt. Es ist zu ersehen, dass innerhalb der Endlagerstrecken die Gasströmungsrate in dieser Simulationsvariation $\dot{Q}_g \approx 2.000 \frac{N-l}{a \cdot m^2}$ beträgt, so dass sie somit ungefähr 45 mal größer ist als die für den gleichen Zeitpunkt berechnete Gasströmungsrate in der Basis-Simulation. Die Gasströmungsrate aus den Einlagerungsstrecken in das umgebende Tonsteingebirge beträgt in dieser Simulationsvariation für den gleichen Berechnungszeitpunkt entsprechend Bild D.9/2 dagegen $\dot{Q}_g \approx 40 \frac{N-l}{a \cdot m^2}$, was im Vergleich zur Basis-Simulation sogar einer Erhöhung um den Faktor 100 entspricht. Die Strömungsrate des Porenwassers wird allerdings durch die erhöhte Korrosionsrate nur unwesentlich beeinflusst.

Im Vergleich zur Basis-Simulation kommen die fluiddynamischen Prozesse in dieser Variation deutlich früher zum Erliegen, da die vollständige Behälterkorrosion schon nach 3.000 Jahren als beendet angesehen wird.

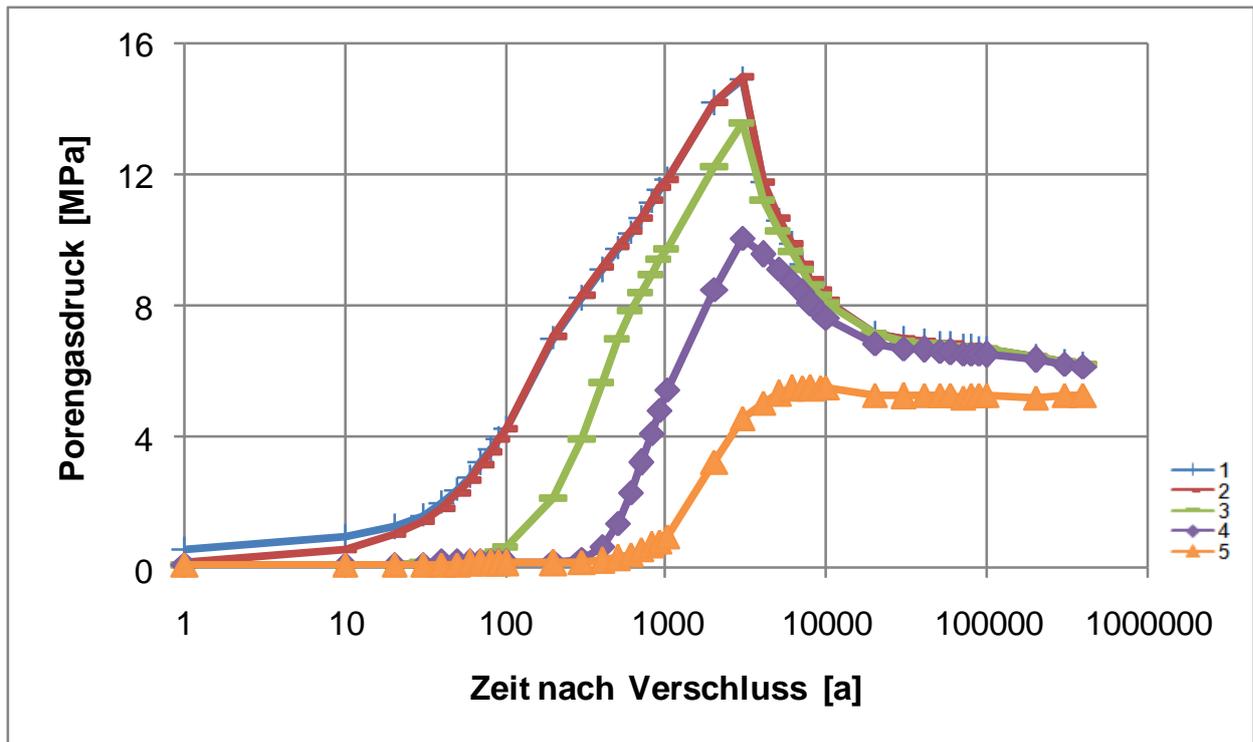


Bild 5.35 Zeitabhängige Entwicklung des Porengasdrucks in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

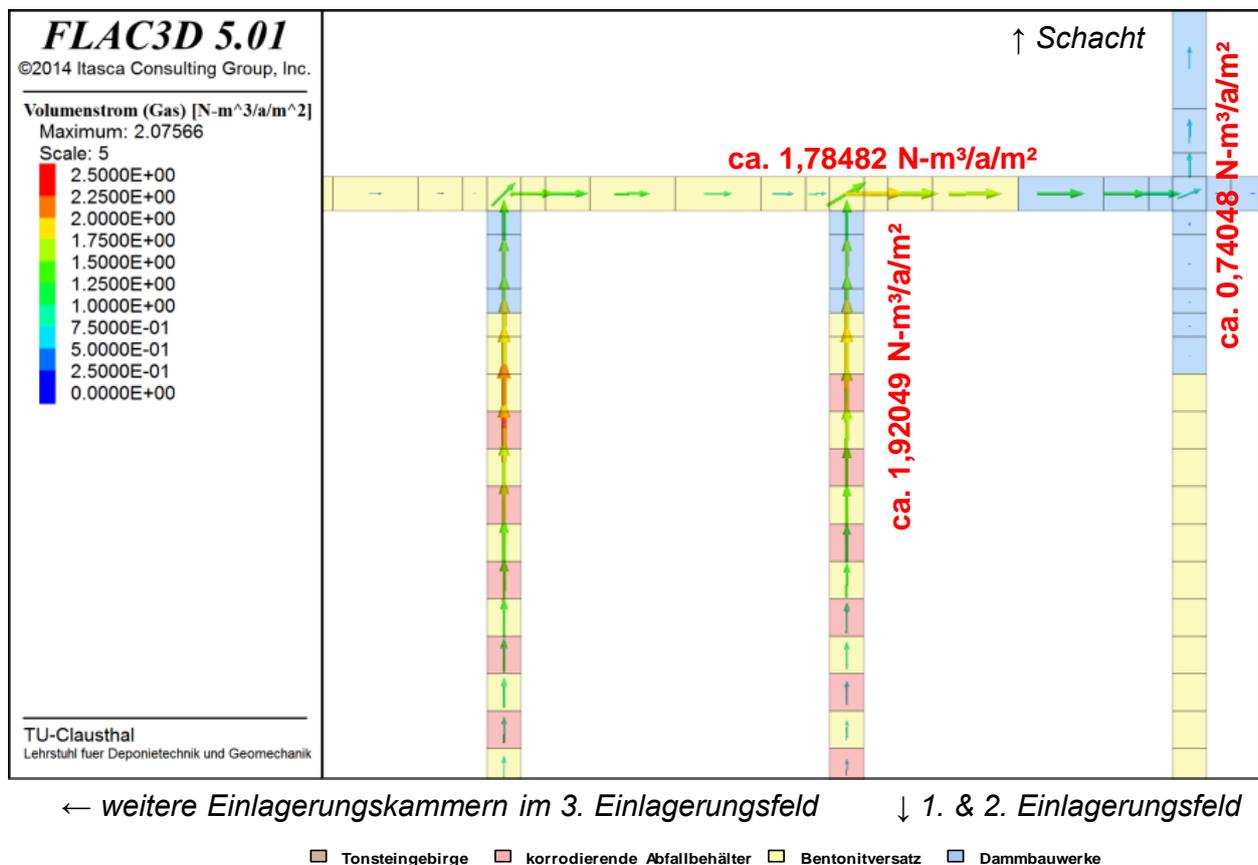


Bild 5.36 Gasströmung innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t = 1.000 a$ nach Verschluss des Endlagers

(1-3) *Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme einer gegenüber der Basis-Simulation 100-fach erhöhten Permeabilität des Bentonitversatzes und der Verschlussbauwerke → Globalmodell (i)*

Diese Simulationsvariation repräsentiert ein Szenario, bei dem die Permeabilitäten des Bentonitversatzes sowie der Verschlussbauwerke aufgrund unzureichender Einbauqualität signifikant erhöht sind. Aufgrund der erhöhten Permeabilitäten sind Änderungen in den ablaufenden fluiddynamischen Prozessen zu erwarten, z.B. hinsichtlich der auftretenden Strömungsraten und daraus resultierend insbesondere hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung des Porenfluiddrucks.

Die gegenüber der Basis-Simulation erhöhte Permeabilität führt in der hier betrachteten Simulationsvariation zu einer deutlichen Reduzierung der numerischen Zeitschrittweite, so dass bis zur Erstellung des vorliegenden Arbeitsberichtes nur ein Zeitraum von 20.000 Jahren nach dem Verschluss des Endlagers simuliert werden konnte. Den in Anhang E dargestellten Ergebnissen dieser Simulationsvariation ist allerdings auch für diesen kürzeren Zeitraum schon zu entnehmen, dass die erhöhte Permeabilität einen signifikanten Einfluss auf die ablaufenden fluiddynamischen Prozesse hat. So ist aus Bild 5.37 (= Bild E.12/5) zu ersehen, dass der Porengasdruck in den Einlagerungsstrecken und den weiteren Strecken der Einlagerungssohle aufgrund der geringeren Strömungswiderstände den primären Gebirgsdruck nicht mehr oder nur noch in geringem Maße überschreitet. Daraus ergibt sich ein gegenüber der Basis-Simulation deutlich verzögertes Eindringen von Gas in die Wirtsgesteinsformation. Vielmehr entweicht das Gas in dieser Simulationsvariation wie aus Bild 5.38 (= Bild E.8/3) zu ersehen entlang des Strecken- und Schachtsystems.

Ein weiterer signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen dieser Simulationsvariation

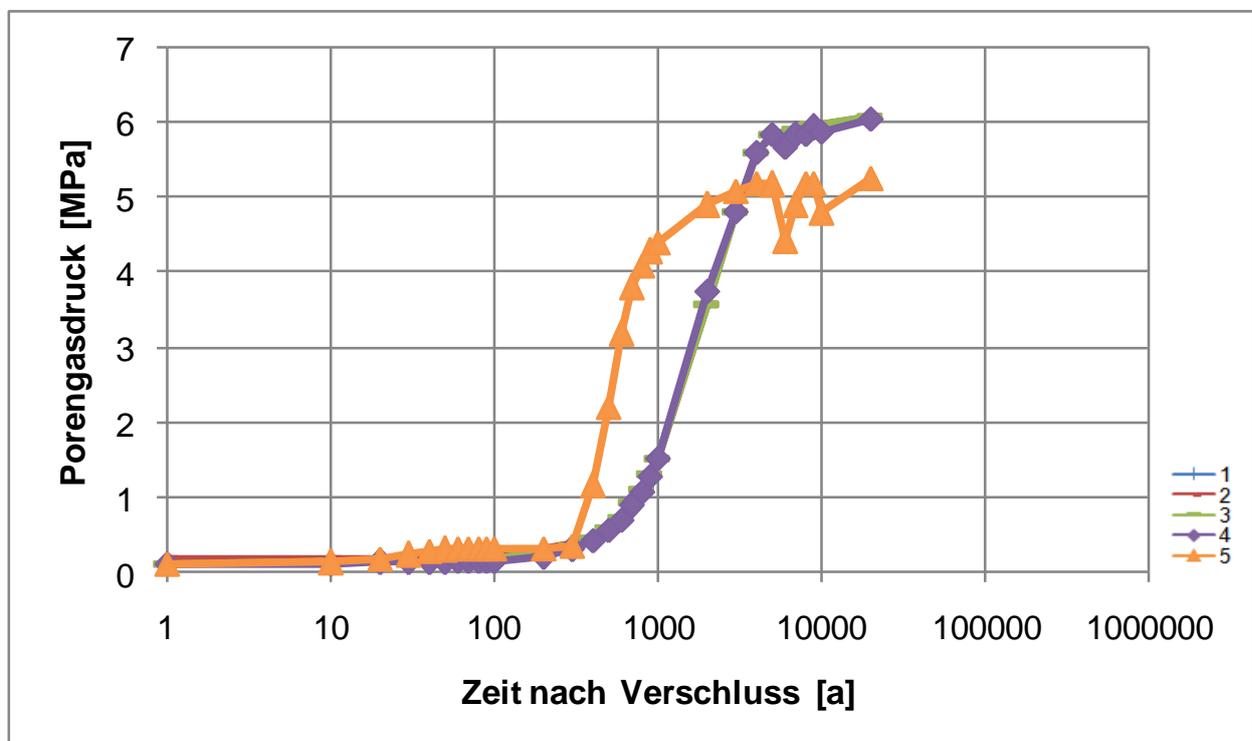


Bild 5.37 *Zeitabhängige Entwicklung des Porengasdrucks in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes*

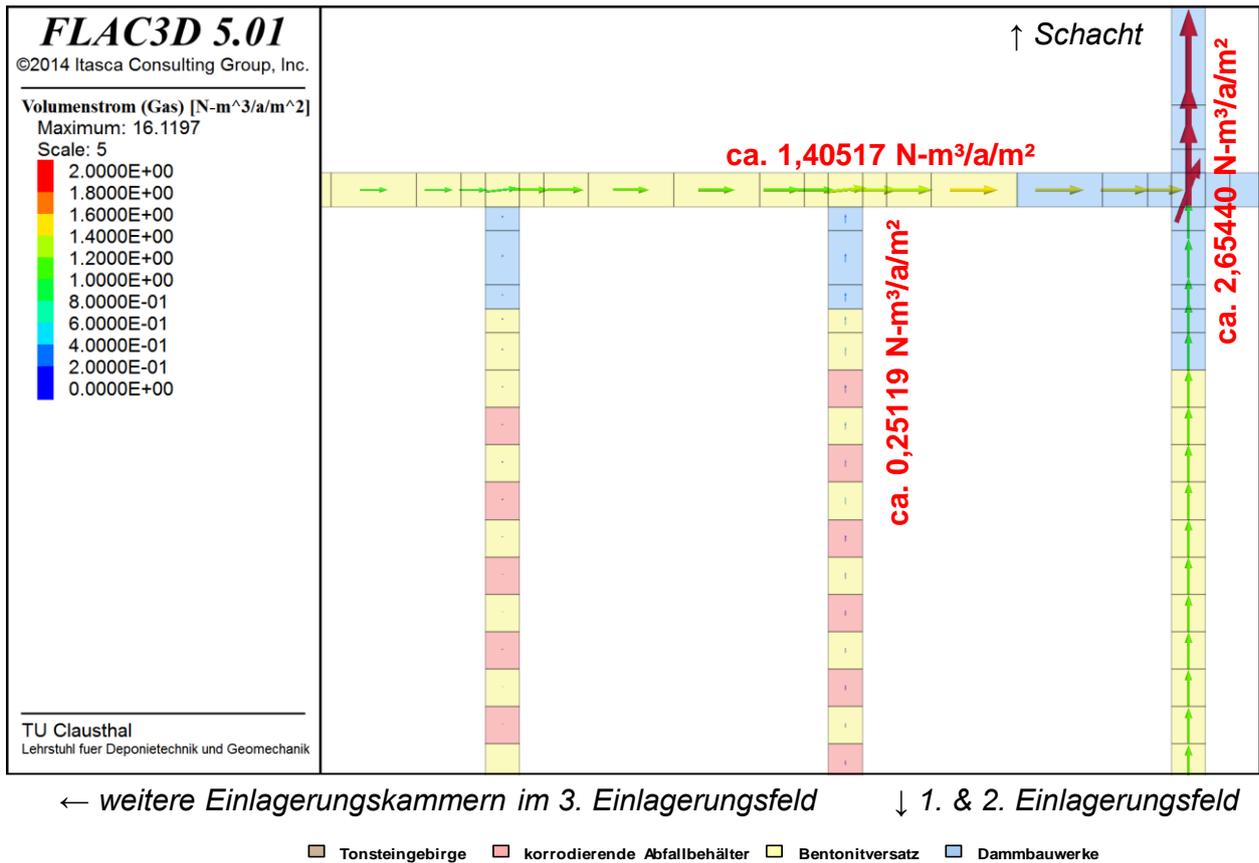


Bild 5.38 Gasströmung innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t = 10.000 a$ nach Verschluss des Endlagers

und der Basis-Simulation ergibt sich daraus, dass die Permeabilität nicht nur in den Streckenverschlussbauwerken 100-fach erhöht ist, sondern auch in den Schachtverschlussbauwerken. Das führt dazu, dass das oberhalb des oberen Schachtverschlussbauwerks unter hydrostatischem Druck anstehende Grundwasser aus dem Deckgebirge schneller durch das obere Schachtverschlussbauwerk hindurchsickern kann und sich somit schneller oberhalb des unteren Schachtverschlussbauwerks ansammelt. Zu ersehen ist dieser Sachverhalt aus der in Bild 5.39 (= Bild E.12/2) dargestellten zeitlichen Entwicklung des Wassersättigungsgrades in der Beobachtungszone 5, die sich unmittelbar oberhalb des unteren Schachtverschlussbauwerks befindet, da in dieser Berechnungszone der Wassersättigungsgrad in dieser Simulationsvariation schneller ansteigt als in der Basis-Simulation.

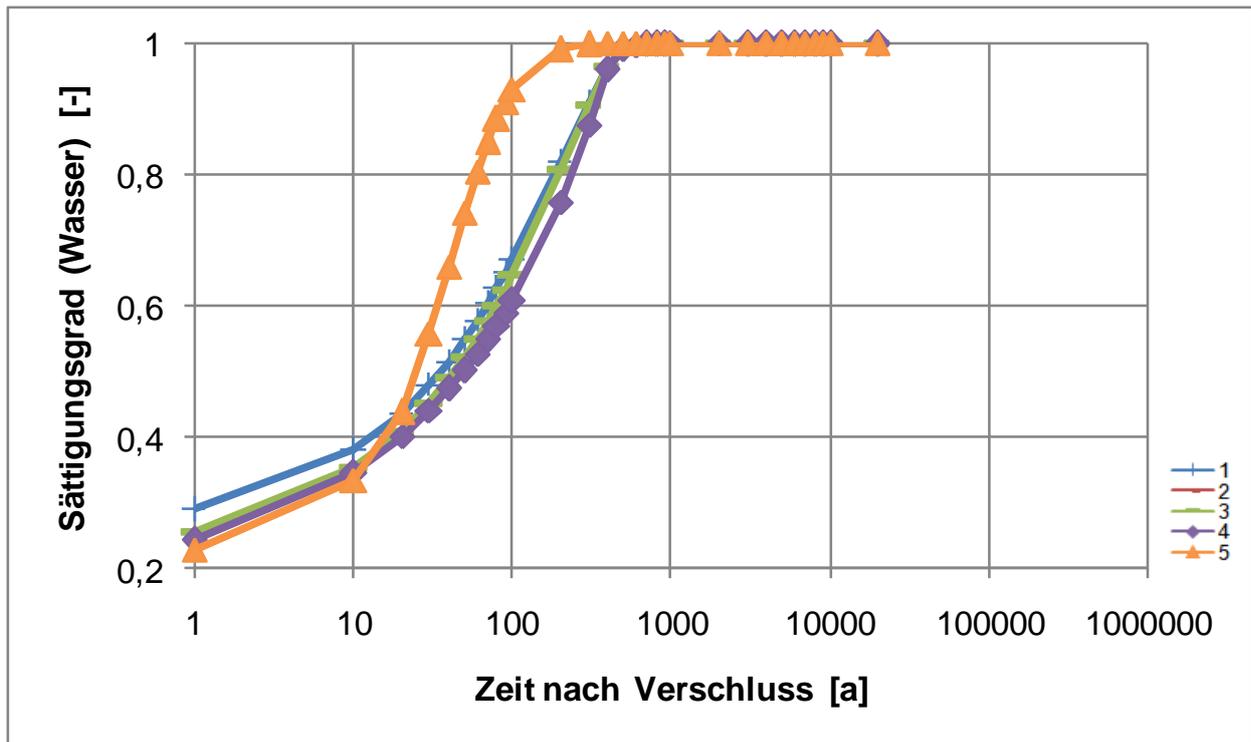


Bild 5.39 Zeitabhängige Entwicklung des Flüssigkeitssättigungsgrades in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

(1-4) Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme einer Permeabilität von $K = 10^{-15} \text{ m}^2$ im Bentonitversatz und in den Verschlussbauwerken → Globalmodell (i)

Diese Simulationsvariation repräsentiert ein ähnliches Szenario wie die Simulationsvariation (1-3), allerdings liegt hier eine extremere Erhöhung der Permeabilität des Bentonitversatzes sowie der Verschlussbauwerke vor. Die in Anhang F dargestellten Simulationsergebnisse dieser Variation sind daher ebenfalls ähnlich wie die Simulationsergebnisse der Variation (1-3), allerdings zunächst bis etwa 1.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers mit einer noch größeren Tendenz, das Gas entlang des Strecken- und Schachtsystems auszutragen. Danach wird für diese Variation eine geringere Gasauspressrate entlang des Strecken- und Schachtsystems ausgewiesen. Als Ursache für diesen Sachverhalt wird der intensivere Wasserzustrom durch den Schacht und die Zugangsstrecke zwischen Schacht und Einlagerungsfeld gesehen, da das intensiver zufließende Wasser wie in Bild 5.40 (= Bild F.12/2) dargestellt zu einer schnelleren Erhöhung des Flüssigkeitssättigungsgrades und damit zu einer schnelleren Reduzierung der Relativpermeabilität für die Gasphase vornehmlich sowohl im Schacht wie auch in der Zugangsstrecke führt, in geringerem Maße aber auch in den Verbindungsstrecken und in den Einlagerungsstrecken.

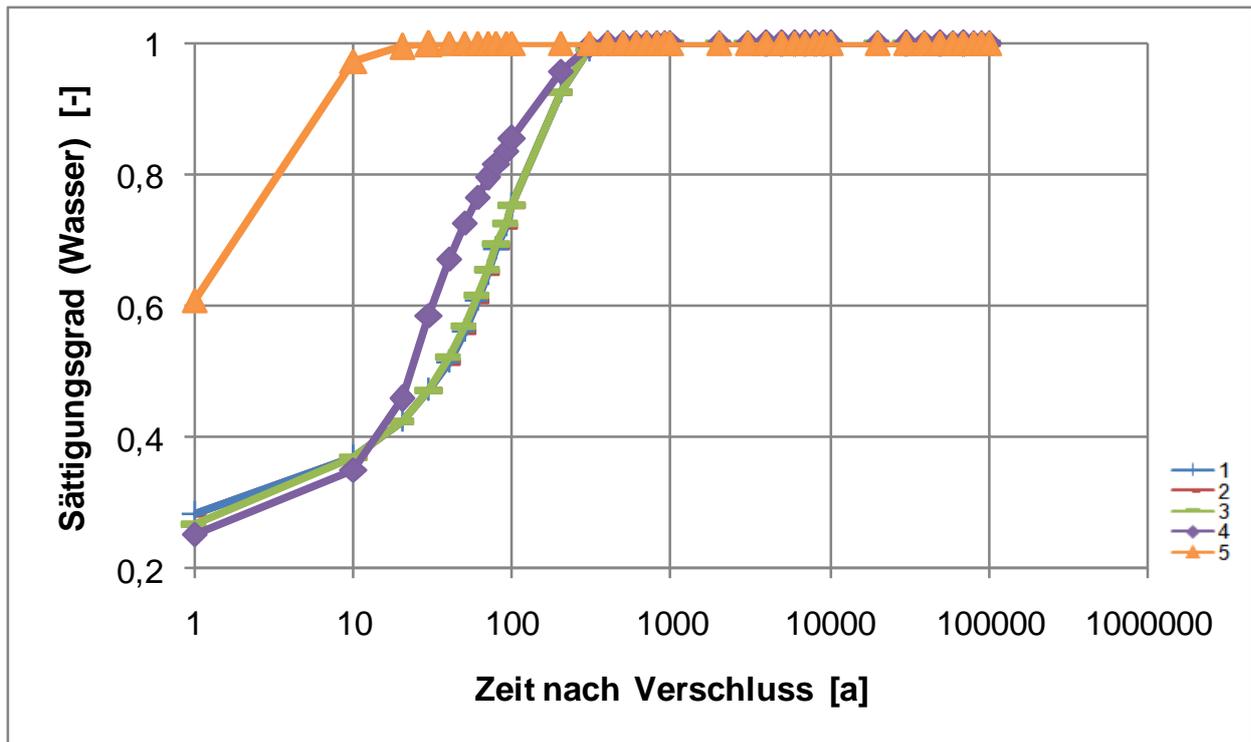


Bild 5.40 Zeitabhängige Entwicklung des Flüssigkeitssättigungsgrades in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

(1-5) Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme einer gegenüber der Basis-Simulation 100-fach geringeren Permeabilität des Tonsteingebirges → Globalmodell (i)

Diese Simulationsvariation repräsentiert ein Szenario, bei dem die Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge eine signifikant geringere hydraulische Durchlässigkeit aufweist als in der Basis-Simulation. Die geringere hydraulische Durchlässigkeit des Tonsteingebirges führt zu einem reduzierten Wasserzutritt aus der Wirtsgesteinsformation in die Einlagerungsstrecken, so dass der Flüssigkeitssättigungsgrad in dieser Simulationsvariation deutlich langsamer ansteigt als in der Basis-Simulation. Eine Vollsättigung wird bei dieser Simulationsvariation in den Einlagerungsstrecken entsprechend Bild 5.41 (= Bild G.12/2) erst etwa 100.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers erreicht.

Da aufgrund des weniger intensiven Wasserzustroms in die versetzten Strecken die im Bentonitversatz initial vorhandene Porenluft langsamer komprimiert wird und zudem das bei der Behälterkorrosion entstehende Gas mehr Porenraum zur Verfügung hat, baut sich in dieser Simulationsvariation der Porengasdruck zunächst deutlich langsamer auf als in der Basis-Simulation. Der Porengasdruck erreicht hier den hydrostatischen Druck entsprechend Bild 5.42 (= Bild G.12/5) erst etwa 50.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers. In der Folge erreicht der Porengasdruck in den Einlagerungsstrecken allerdings ein wesentlich höheres Niveau als in der Basis-Simulation, da das Gas aufgrund der geringeren hydraulischen Durchlässigkeit der Wirtsgesteinsformation nicht so einfach durch die Wirtsgesteinsformation entweichen kann. Dieser Sachverhalt führt dazu, dass am Ende der korrosionsbedingten Gasbildung zum Zeitpunkt $t = 300.000 a$ nach Verschluss des Endlagers ein Porengas-

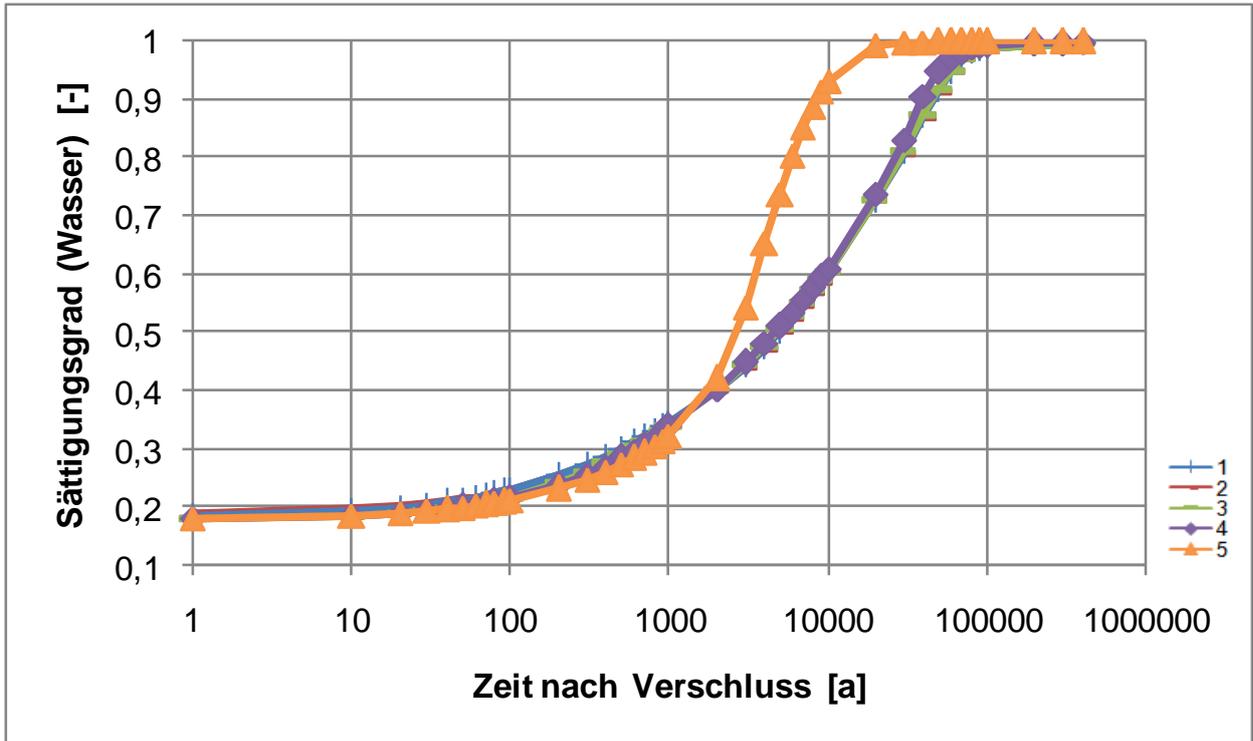


Bild 5.41 Zeitabhängige Entwicklung des Flüssigkeitssättigungsgrades in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

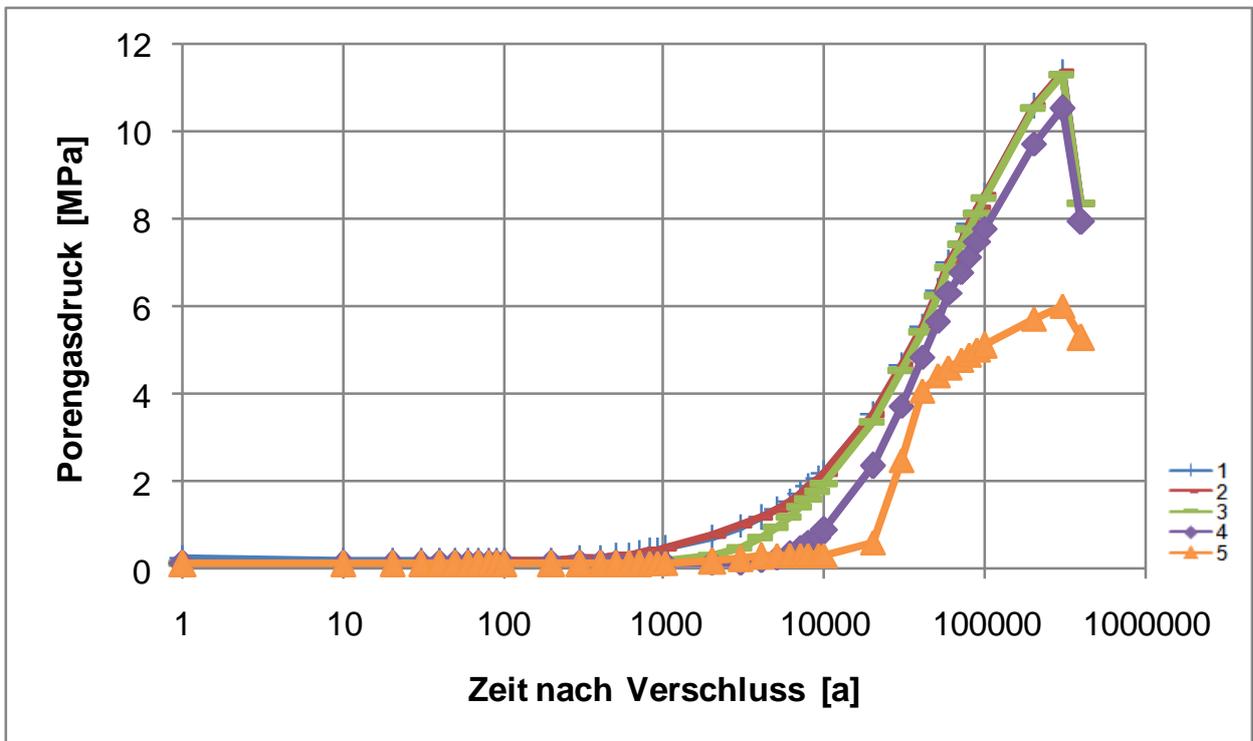


Bild 5.42 Zeitabhängige Entwicklung des Porengasdrucks in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

druck von etwa $p_g \approx 11,7 \text{ MPa}$ ausgewiesen wird. Das Gas ist zu diesem Zeitpunkt entsprechend Bild 5.43 (= Bild G.14/1) etwa 25 Meter um die Strecken herum in die Wirtsgesteinsformation eingedrungen.

Da die Wirtsgesteinsformation eine signifikant kleinere hydraulische Durchlässigkeit aufweist als das Bentonitversatzmaterial und die Verschlussbauwerke, findet der Gasaustrag aus dem Grubengebäude in dieser Simulationsvariation wie schon in den vorstehend dokumentierten Simulationsvariationen (1-3) und (1-4) vornehmlich entlang des Strecken- und Schachtsystems statt. Dieser Sachverhalt wird besonders deutlich, nachdem im Bentonitversatz nahezu Vollsättigung erreicht wird. So werden für diese Simulationsvariation zum Zeitpunkt $t = 200.000 \text{ a}$ nach Verschluss des Endlagers entsprechend Bild 5.44 (= Bild G.8/4) in Richtung des Schachts orientierte Gasströmungsraten von nahezu $\dot{Q}_g \approx 400 \frac{\text{N} \cdot \text{l}}{\text{a} \cdot \text{m}^2}$ ausgewiesen, d.h. etwa 4-fach höhere Gasströmungsraten als zum gleichen Zeitpunkt in der Basis-Simulation.

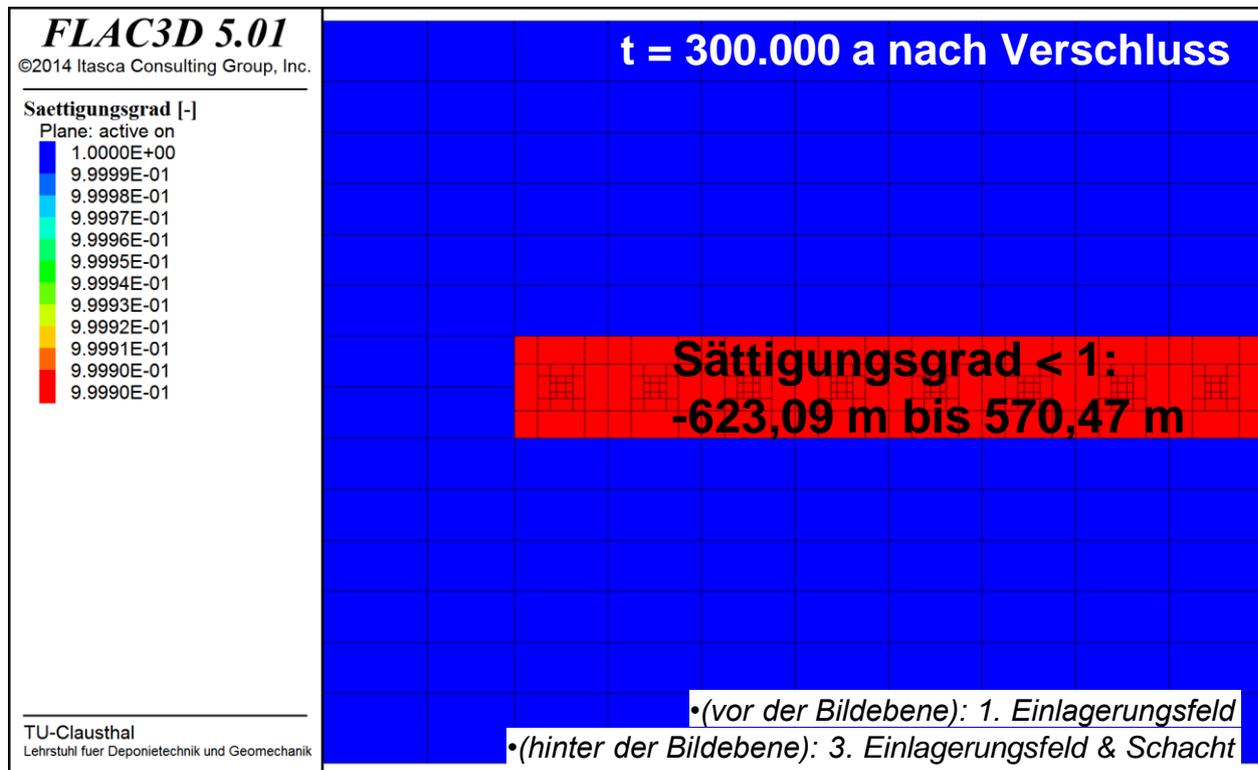


Bild 5.43 Flüssigkeitssättigung in den Einlagerungsstrecken sowie im Tonsteingebirge oberhalb des 2. Einlagerungsfeldes zum Zeitpunkt $t = 300.000 \text{ a}$ nach Verschluss des Endlagers

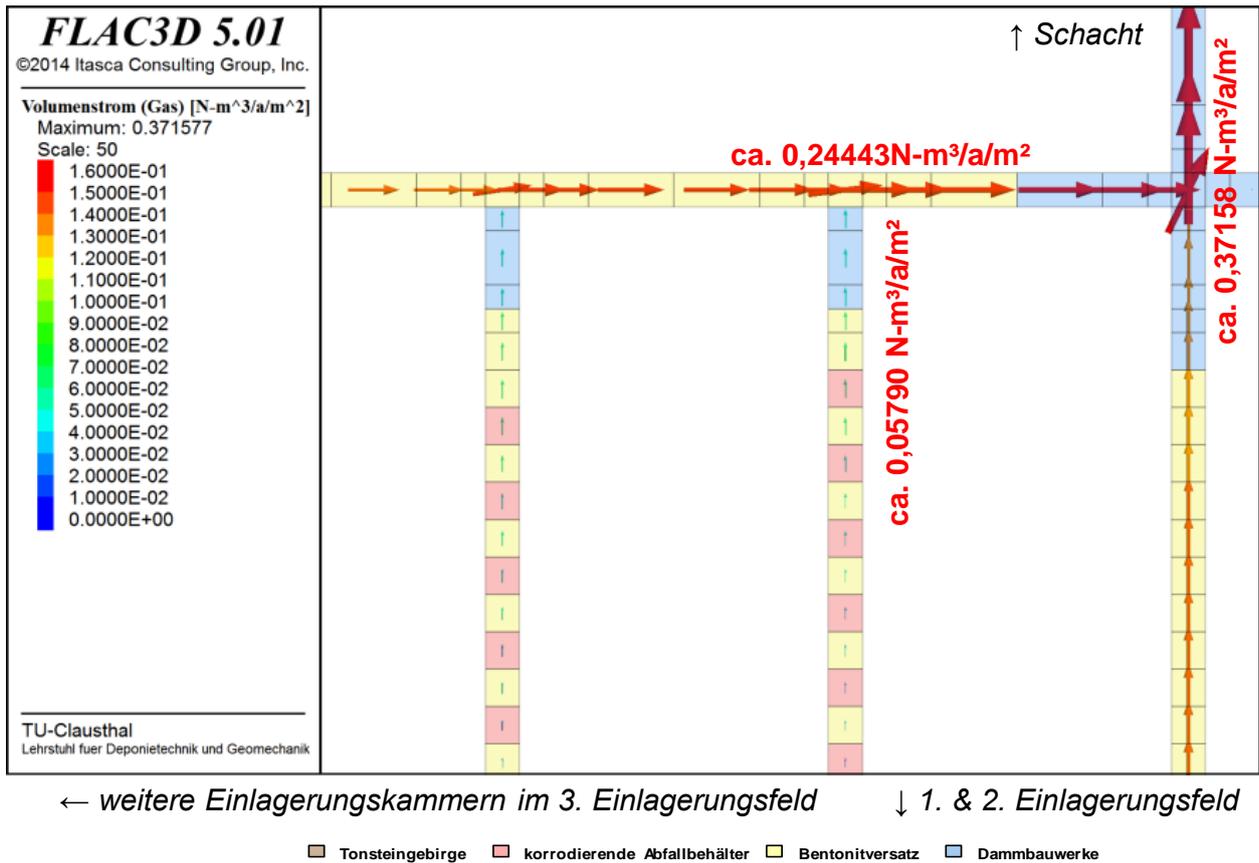


Bild 5.44 Gasströmung innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t = 200.000 a$ nach Verschluss des Endlagers

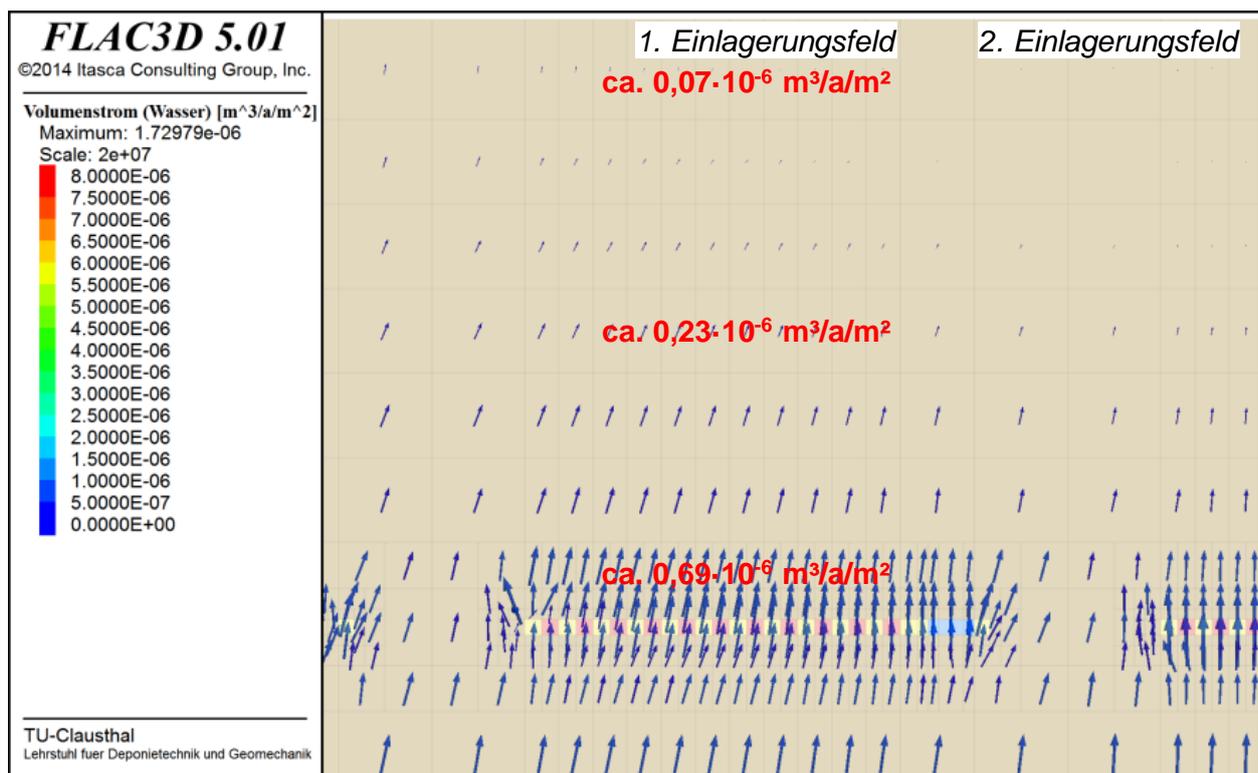
(1-6) Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme eines vertikal (von unten nach oben) gerichteten primären hydraulischen Gradienten von $i = 0,15 \rightarrow$ Globalmodell (i)

Diese Simulationsvariation repräsentiert ein Szenario, bei dem in der Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge bereits im unverritzten Zustand ein vertikal von unten nach oben gerichteter hydraulischer Gradient vorliegt. Diese Situation ist angelehnt an die geohydraulischen Verhältnisse in der Schweiz, die in *Nagra (2002)* dokumentiert sind, allerdings hier mit einem etwa doppelt so hohen primären hydraulischen Gradienten, um den Einfluss eines solchen hydraulischen Gradienten auf die im Endlagerbergwerk sowie im umgebenden einschlusswirksamen Gebirgsbereich ablaufenden fluiddynamischen Prozesse zu intensivieren.

Im Rahmen dieser Simulationsvariation hat sich gezeigt, dass der primäre hydraulische Gradient in den ersten Jahrtausenden nach Verschluss des Endlagers nur einen geringen Einfluss auf die ablaufenden fluiddynamischen Prozesse hat, da die sekundären hydraulischen Gradienten das Systemverhalten des Endlagers dominieren. Sobald allerdings die versetzten Endlagerstrecken vollgesättigt sind und der darin anstehende Porenfluiddruck sich dem primären Porenfluiddruck annähert, gewinnt der primäre hydraulische Gradient an Bedeutung für das Endlagersystemverhalten, allerdings nur im Hinblick auf die auftretenden Wasserströmungsraten, während die Gasströmungsraten nahezu unbeeinflusst bleiben und sich daher kaum von den Gasströmungsraten der Basis-Simulation unterscheiden.

Bild 5.45 zeigt für diese Simulationsvariation als vektorielle Darstellung die Strömungsrate und die Strömungsrichtung des Porenwassers innerhalb der Wirtsgesteinsformation zum Zeitpunkt $t = 10.000 a$ nach Verschluss des Endlagers, wobei deutlich eine bevorzugte Porenwasserströmungsrichtung von unten nach oben entsprechend dem vorgegebenen primären hydraulischen Gradienten zu ersehen ist. Durch diese aufwärts gerichtete Porenwasserströmung können gelöste Radionuklide durch advektiven Transport in der Flüssigphase leichter das Deckgebirge erreichen.

Besonders auffällig ist in Bild 5.45, dass die Porenwasserströmungsraten oberhalb des Endlagerbergwerks geringer sind als unterhalb des Endlagerbergwerks. Dieser Sachverhalt ist dadurch zu erklären, dass bedingt durch die korrosionsbasierte Gasbildung innerhalb des Endlagerbergwerks ein geringer Kapillardruck vorherrscht, der dazu führt, dass Porenwasser aus dem umgebenden Wirtsgestein aus allen Richtungen in Richtung der Endlagerstrecken fließt. Bei Überlagerung dieses Prozesses mit der aufwärts gerichteten Porenwasserströmung aufgrund des primären hydraulischen Gradienten ergeben sich oberhalb des Endlagerbergwerks reduzierte Strömungsraten, während unterhalb des Endlagerbergwerks erhöhte Strömungsraten resultieren.



•(parallel zur Bildebene): weitere Einlagerungskammern in allen 3 Einlagerungsfeldern

■ Tonsteingebirge ■ korrodierende Abfallbehälter ■ Bentonitversatz ■ Dammbauwerke

Bild 5.45 Wasserströmung in der Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t = 10.000 a$ nach Verschluss des Endlagers

(1-7) Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme eines horizontal (von den Einlagerungsfeldern zum Schacht) gerichteten primären hydraulischen Gradienten von $i = 0,15 \rightarrow$ Globalmodell (i)

Diese Simulationsvariation repräsentiert ein Szenario, bei dem in der Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge bereits im unverritzten Zustand ein horizontal von den Einlagerungsfeldern zum Schacht gerichteter hydraulischer Gradient vorliegt. Diese Situation ist angelehnt an die geohydraulischen Verhältnisse im Bereich der Schachanlage Konrad.

Ebenso wie schon in der Simulationsvariation (1-6), in der ein vertikal von unten nach oben gerichteter primärer hydraulischer Gradient angenommen worden ist, hat sich auch im Rahmen dieser Simulationsvariation gezeigt, dass der primäre hydraulische Gradient in den ersten Jahrtausenden nach Verschluss des Endlagers nur einen geringen Einfluss auf die ablaufenden fluiddynamischen Prozesse hat, da die sekundären hydraulischen Gradienten das Systemverhalten des Endlagers dominieren. Sobald allerdings die versetzten Endlagerstrecken vollgesättigt sind und der darin anstehende Porenfluiddruck sich dem primären Porenfluiddruck annähert, gewinnt der primäre hydraulische Gradient auch in dieser Simulationsvariation an Bedeutung für das Endlagersystemverhalten, allerdings ebenfalls wieder nur im Hinblick auf die auftretenden Wasserströmungsraten, während die Gasströmungsraten nahezu unbeeinflusst bleiben und sich daher kaum von den Gasströmungsraten der Basis-Simulation unterscheiden.

Der zunehmende Einfluss auf die Wasserströmungsraten ist zu ersehen aus den in Anhang I vektoriell dargestellten Wasserströmungen im Grubengebäude sowie im umgebenden Tonsteingebirge, da in diesen Darstellungen ab dem Zeitpunkt $t = 10.000 a$ nach Verschluss des Endlagers eine deutlich bevorzugte Wasserströmungsrichtung ausgewiesen wird, die in der Basis-Simulation nicht vorhanden ist. Bild 5.46 (= Bild I.4/4) zeigt, dass zum Zeitpunkt $t = 10.000 a$ nach Verschluss des Endlagers die Wasserströmung im Grubengebäude in Richtung des Schachtes orientiert ist und damit dem angesetzten primären hydraulischen Gradienten folgt. Gleiches gilt für die in Bild 5.47 (= Bild I.5/4) dargestellte Wasserströmungsrichtung im umgebenden Tonsteingebirge. Die Wasserströmungsraten im Tonsteingebirge sind dabei ähnlich wie in der Simulationsvariation (1-6), da die angesetzten primären hydraulischen Gradienten gleich sind.

Durch die in Richtung Schacht orientierte Wasserströmung können gelöste Radionuklide durch advektiven Transport in der Flüssigphase leichter durch den Schacht ausgetragen werden. Es ist allerdings anzumerken, dass dieser advektiv getragene Radionuklidaustrag sicherlich durch geeignete Positionierung der Schächte beeinflusst werden kann. Die vorliegende Simulationsvariation sollte daher nur als ein Einstieg für eine umfassendere numerische Variationsanalyse mit unterschiedlicher Schachtpositionierung angesehen werden.

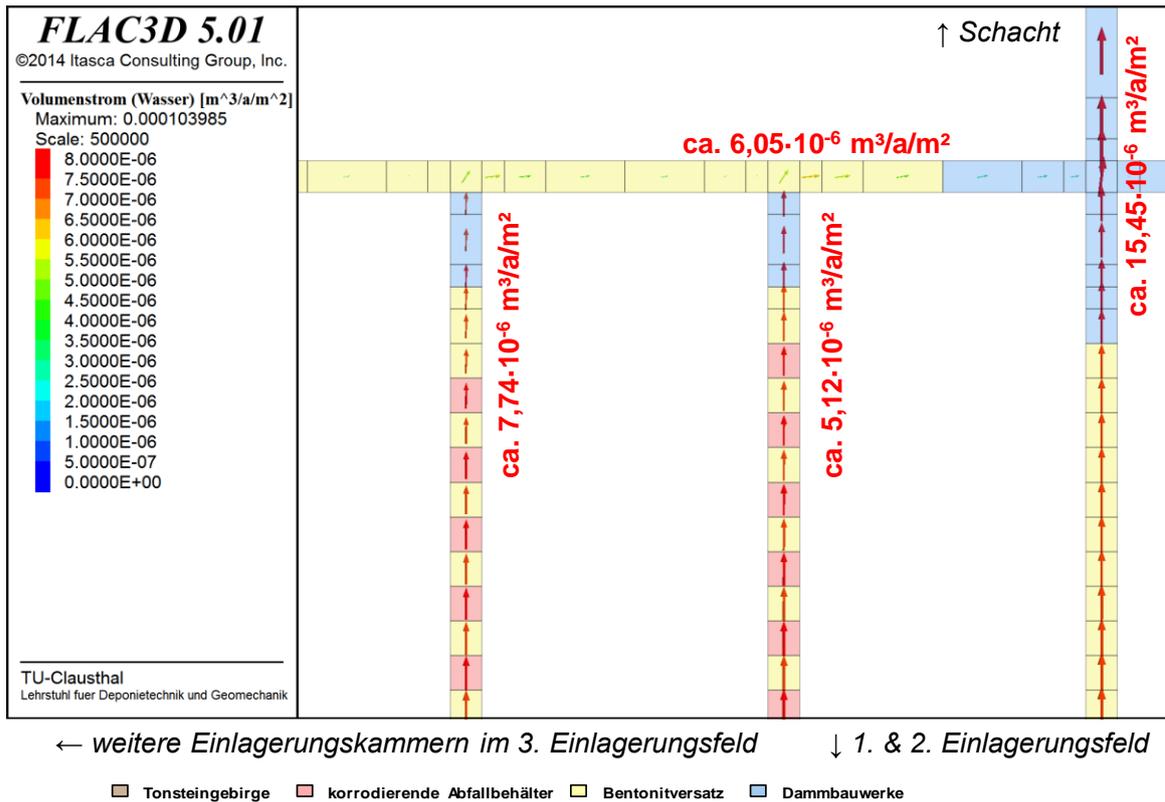


Bild 5.46 Wasserströmung innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t = 10.000 \text{ a}$ nach Verschluss des Endlagers

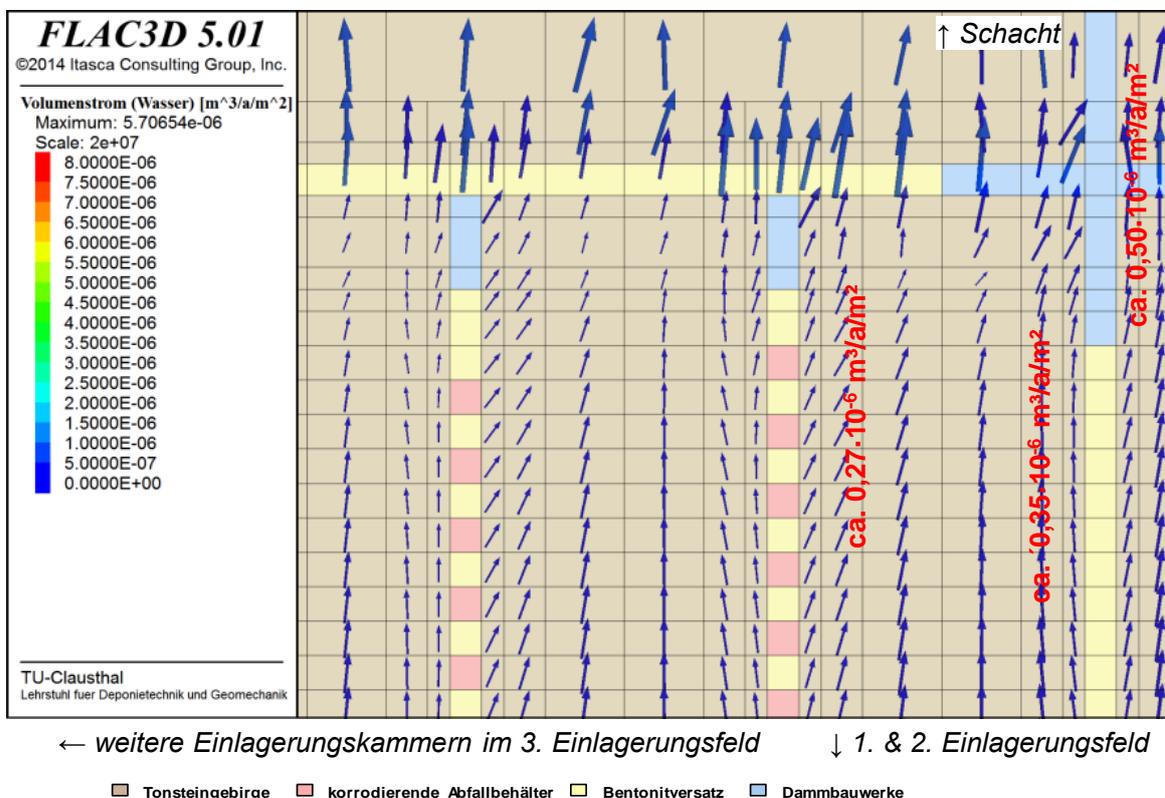


Bild 5.47 Wasserströmung in der Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t = 10.000 \text{ a}$ nach Verschluss des Endlagers

(1-8) *Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme einer geogen angelegten, aber durch die Vorerkundung nicht entdeckten Störungszone mit mäßig erhöhter Permeabilität (ansonsten analog zur Basis-Simulation) → Globalmodell (iii)*

Diese Simulationsvariation repräsentiert ein Szenario, bei dem eine bei Auffahrung und Betrieb des Endlagers nicht entdeckte Störungszone existiert. Diese Störungszone wird stilisiert als vertikal anstehend mit einer gegenüber dem umgebenden Tonsteingebirge 100-fach erhöhten primären Permeabilität angenommen. Sie verläuft mittig durch das 2. Einlagerungsfeld und ist im Rahmen der Vorerkundung sowie bei der Auffahrung des Streckensystems trotz Durchörterung nicht entdeckt worden, da sich ihre strukturellen Eigenschaften im Vergleich zum umgebenden Tonsteingebirge nur in geringem Maße unterscheiden und die hydraulische Wirksamkeit erst später aktiviert wird (latente Schwächezone).

Eine vergleichende Betrachtung der Berechnungsergebnisse dieser Simulationsvariation mit der Basis-Simulation für die Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge ergibt, dass sich die fluiddynamischen Prozesse und die daraus resultierenden physikalischen Größen im Endlagerbergwerk schon in einem Abstand von nur wenigen Metern zur Störungszone kaum noch unterscheiden. Allerdings ergeben sich für diese Simulationsvariation in den Berechnungszonen der Störungszone aufgrund der dort vorliegenden höheren Permeabilität signifikant höhere Gasströmungsraten als in den entsprechenden Tonstein-Berechnungszonen der Basis-Simulation, entsprechend den in Bild 5.48 (= Bild J.16/1) für Zeitpunkt $t = 10.000 a$ nach

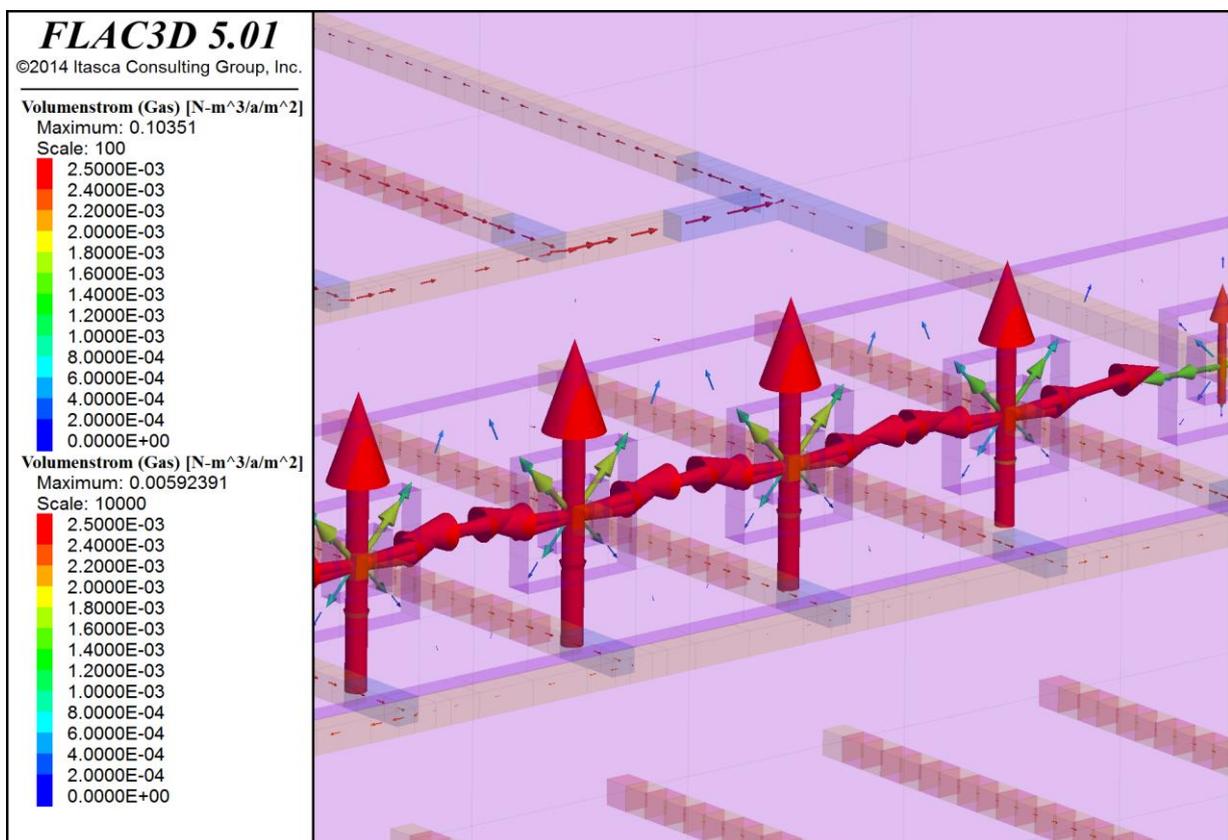


Bild 5.48 *Gasströmung innerhalb des Streckensystems sowie in der Störungszone zum Zeitpunkt $t = 10.000 a$ nach Verschluss des Endlagers*

Verschluss des Endlagers dargestellten Simulationsergebnisse etwa um den Faktor 25. Demzufolge steigt das Porengas in der Störungszone auch schneller in Richtung des Deckgebirges auf als im umgebenden Tonsteingebirge. Entsprechend Bild 5.49 (= Bild J.15/2) hat das Porengas zum Zeitpunkt $t = 20.000 a$ nach Verschluss des Endlagers in der Störungszone schon nahezu die halbe Distanz zwischen Einlagerungssohle und Deckgebirge zurückgelegt. Zum Zeitpunkt $t = 60.000 a$ nach Verschluss des Endlagers erreicht das in der Störungszone aufsteigende Porengas entsprechend Bild 5.50 (= Bild J.15/4) den oberen Modellrand und damit das Deckgebirge, während es im umgebenden Tonsteingebirge mit der nicht vergrößerten Permeabilität das Deckgebirge entsprechend Bild 5.51 (= Bild J.15/5) ebenso wie in der Basis-Simulation für die Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge bis zum Ende der korrosionsbedingten Gasbildung zum Zeitpunkt $t = 300.000 a$ nach Verschluss des Endlagers noch nicht erreicht. Hier zeigt sich sehr plakativ die sicherheitstechnisch grundsätzlich nachteilige Auswirkung von Heterogenitäten im Barrierengebirge.

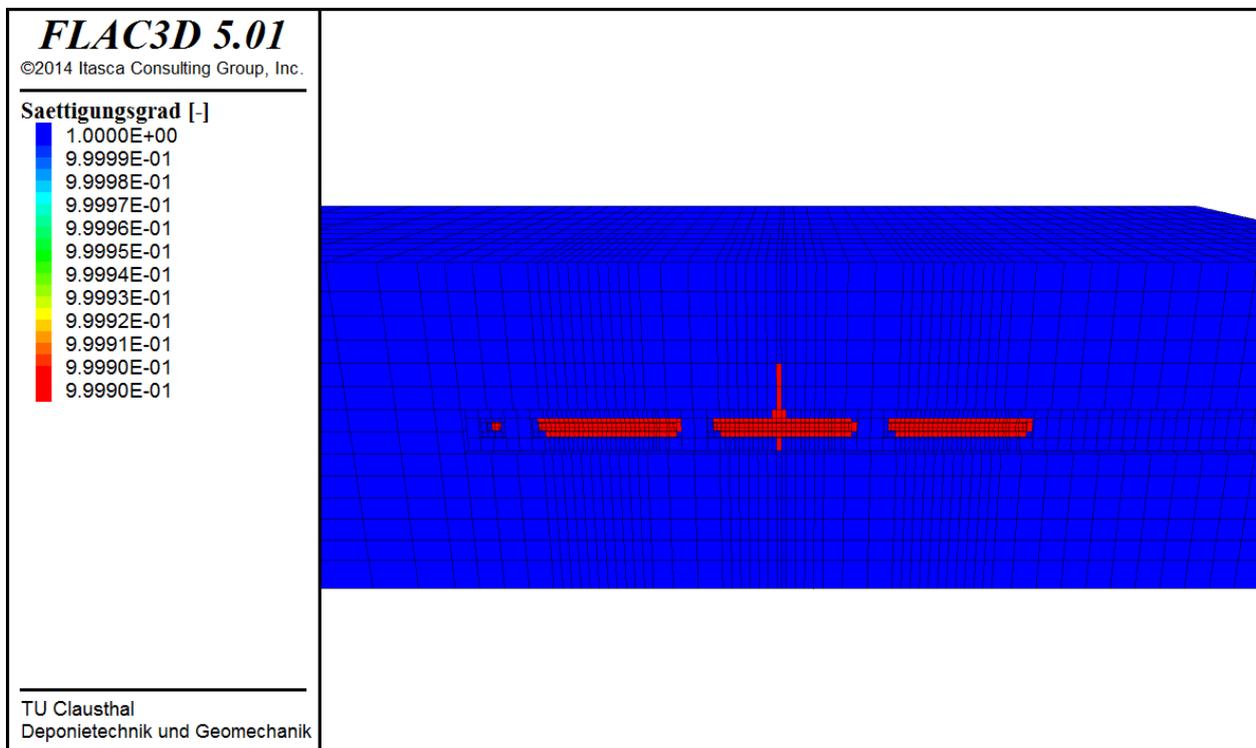


Bild 5.49 Flüssigkeitssättigungsgrad in den Einlagerungsstrecken sowie im umgebenden Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t = 20.000 a$ nach Verschluss des Endlagers (Schnitt senkrecht zur Störungszone)

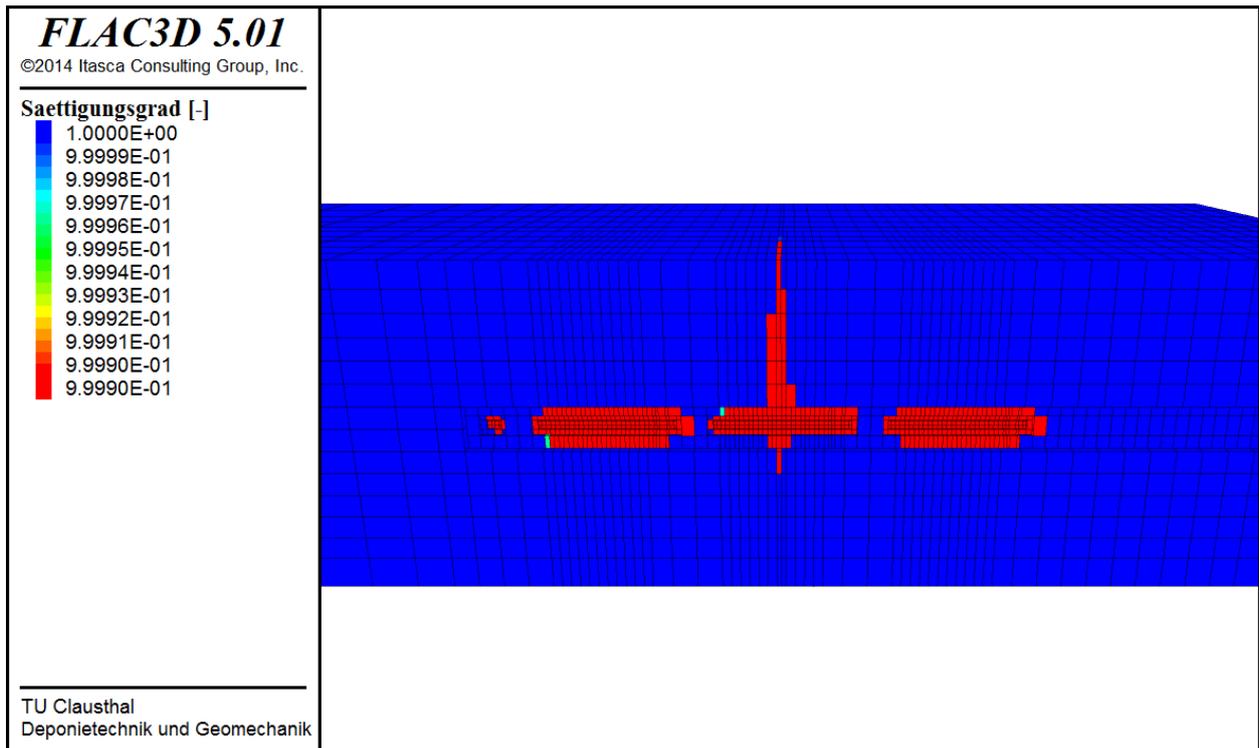


Bild 5.50 Flüssigkeitssättigungsgrad in den Einlagerungsstrecken sowie im umgebenden Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t = 60.000 a$ nach Verschluss des Endlagers (Schnitt senkrecht zur Störungszone)

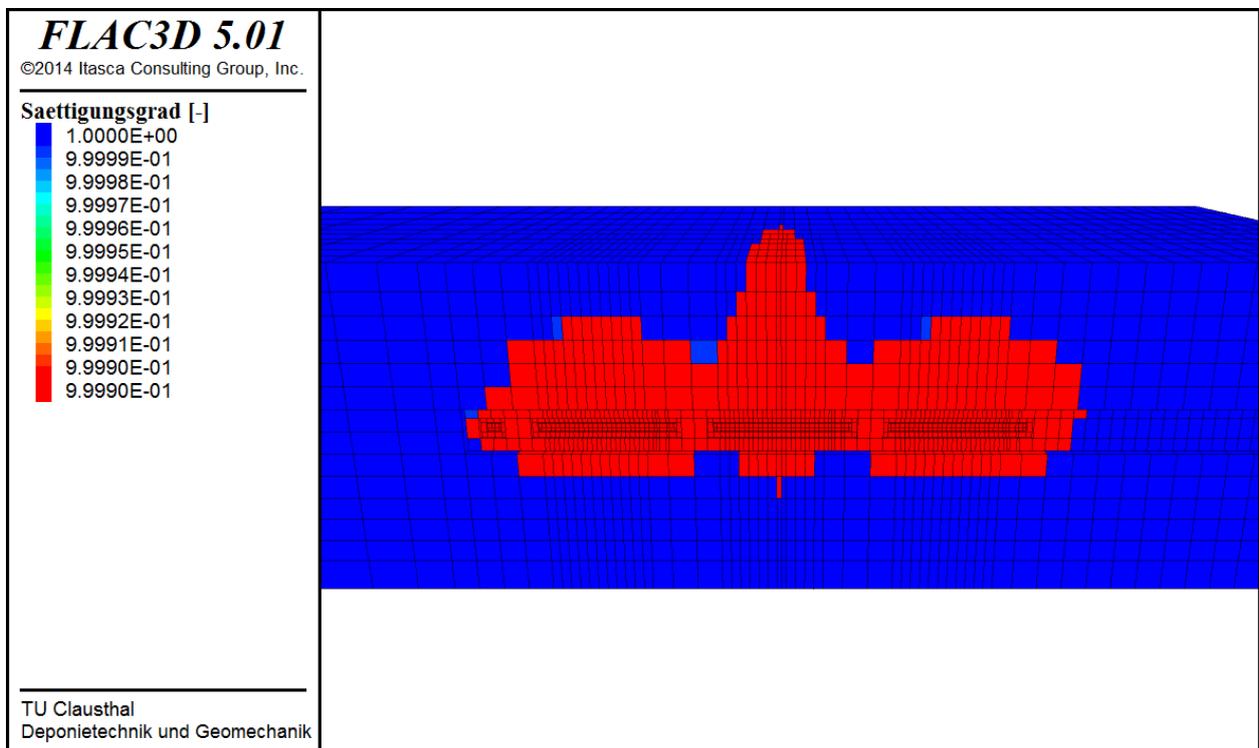


Bild 5.51 Flüssigkeitssättigungsgrad in den Einlagerungsstrecken sowie im umgebenden Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t = 300.000 a$ nach Verschluss des Endlagers (Schnitt senkrecht zur Störungszone)

(1-9) *Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge unter Annahme einer im Rahmen der Vorerkundung nicht entdeckten Störungszone mit stark erhöhter Permeabilität (ansonsten analog zur Basis-Simulation) → Globalmodell (iv)*

Diese Simulationsvariation repräsentiert ebenso wie die Simulationsvariation (1-8) ein Szenario, bei dem eine durch die Vorerkundung und in der Zeit des Endlagerbetriebs nicht entdeckte vertikal ausgerichtete Störungszone im Tonsteingebirge vorhanden ist. Im Gegensatz zur Simulationsvariation (1-8) ist das Gebirge in dieser Störungszone mechanisch stärker tektonisiert und dementsprechend ist die Störungszone in dieser Simulationsvariation in ihrer hydraulischen Wirksamkeit deutlich stärker ausgeprägt. Die Störungszone verläuft in dieser Simulationsvariation allerdings nicht direkt durch ein Einlagerungsfeld, sondern beginnt erst 10 m oberhalb der Firste der Einlagerungssohle, wobei die Permeabilität der Störungszone in dieser Simulationsvariation gegenüber der Simulationsvariation (1-8) nunmehr um den Faktor 1.000 erhöht ist.

Eine vergleichende Betrachtung der Berechnungsergebnisse dieser Simulationsvariation mit der Basis-Simulation für die Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge sowie mit der Simulationsvariation (1-8) ergibt, dass sich die fluiddynamischen Prozesse und die daraus resultierenden physikalischen Größen im Endlagerbergwerk in dieser Simulationsvariation zunächst für einige 10.000 Jahre ähnlich entwickeln wie in der Basis-Simulation, da die Störungszone aufgrund ihres Abstandes von der Einlagerungssohle zunächst keinen signifikanten Einfluss auf die ablaufenden Prozesse hat. Sobald allerdings etwa 50.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers das aus den Einlagerungsstrecken an den Streckenfirsten in das Tonsteingebirge eindringende Porengas die Unterkante der Störungszone erreicht, wird ebenso wie in der Simulationsvariation (1-8) ein deutlich beschleunigter Aufstieg des Porengases entlang der Störungszone in Richtung des Deckgebirges ausgewiesen.

Wie aus Bild 5.52 (= Bild K.15/5) zu ersehen ist, erreicht das entlang der Störungszone aufsteigende Porengas etwa zum Zeitpunkt $t = 100.000 a$ nach Verschluss des Endlagers das Deckgebirge und damit etwa 40.000 Jahre später als in der Simulationsvariation (1-8), wo für die Störungszone zwar eine 1.000-fach geringere Permeabilität angesetzt worden ist, die Störungszone jedoch im direkten Kontakt mit den Einlagerungsstrecken stand. Dagegen erreicht die sich im intakten Tonsteingebirge ausbreitende Gasfront entsprechend Bild 5.53 (= Bild K.15/6) auch in dieser Simulationsvariation das Deckgebirge bis zum Ende des Korrosionsprozesses zum Zeitpunkt $t = 300.000 a$ nach Verschluss des Endlagers nicht.

Es ist anzumerken, dass bei dieser Simulationsvariation der Flüssigkeitssättigungsgrad innerhalb der Störungszone allerdings nicht so weit absinkt wie in der Simulationsvariation (1-8), da aufgrund des Abstandes zwischen der Störungszone und der Einlagerungssohle der Gaszufluss in die Störungszone verzögert wird.

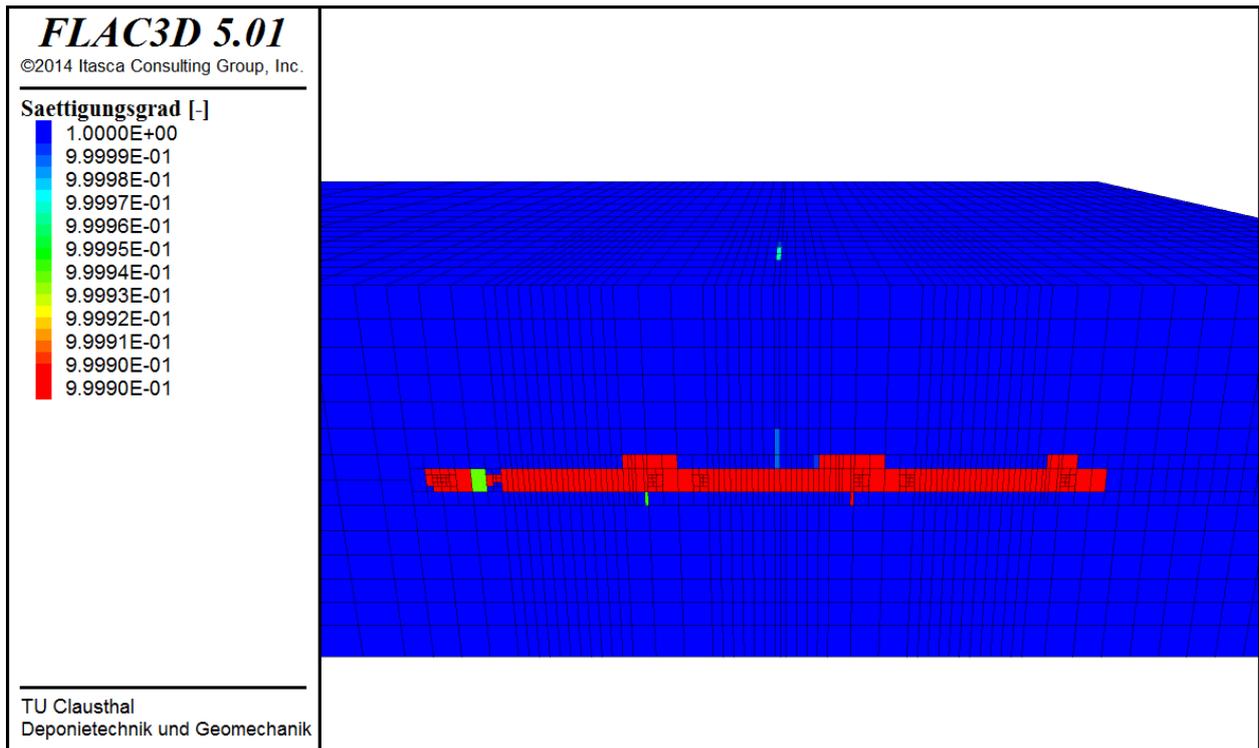


Bild 5.52 Flüssigkeitssättigungsgrad in den Einlagerungsstrecken sowie im umgebenden Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t=100.000 a$ nach Verschluss des Endlagers (Schnitt senkrecht zur Störungszone)

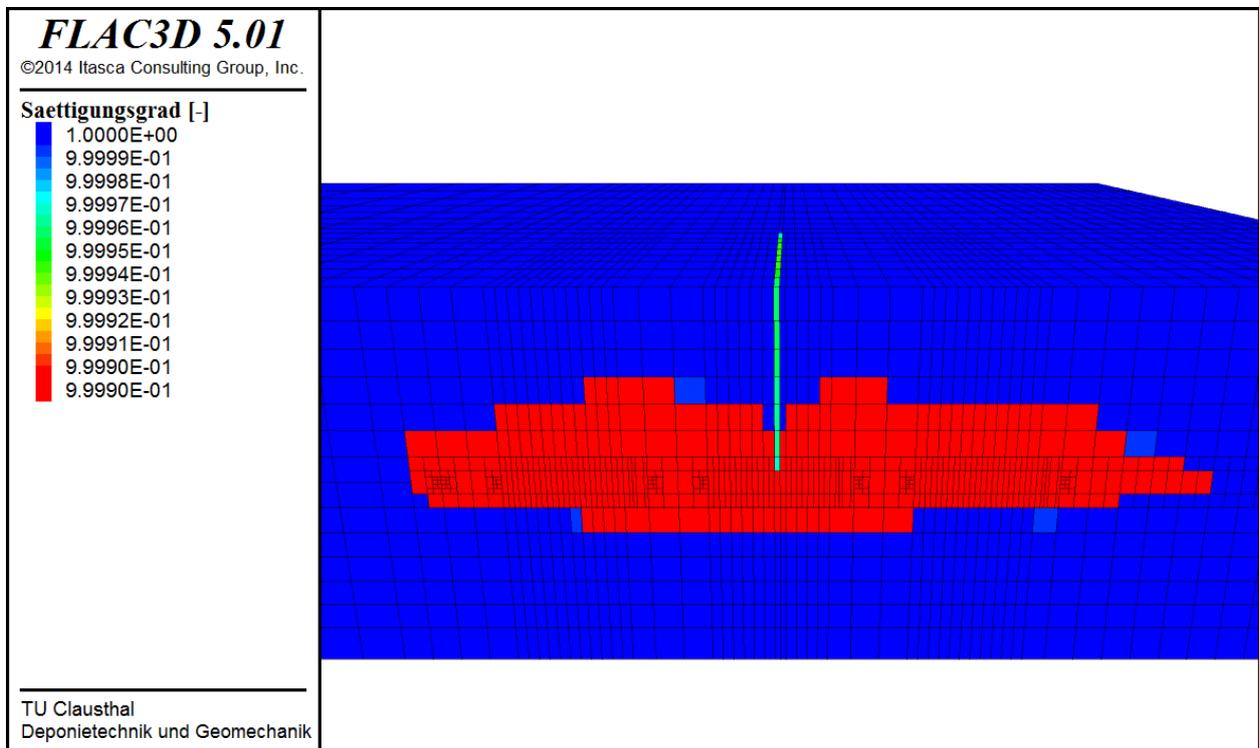


Bild 5.53 Flüssigkeitssättigungsgrad in den Einlagerungsstrecken sowie im umgebenden Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t=300.000 a$ nach Verschluss des Endlagers (Schnitt senkrecht zur Störungszone)

(1-10) Referenz-Endlagersystem mit Überfahrungssohle und Monitoringbohrlöchern im Tonsteingebirge → Globalmodell (ii)

Diese Simulationsvariation repräsentiert ein Szenario, bei dem sich 40 m oberhalb der Einlagerungssohle eine Überfahrungssohle befindet. Die beiden Sohlen sind einerseits über den Schacht miteinander verbunden, andererseits aber auch über Monitoringbohrlöcher, die jeweils vor der Einlagerung der Abfallbehälter aus der Überfahrungssohle in jede einzelne Einlagerungsstrecke abgeteuft werden, um eine unmittelbare Überwachung der Einlagerungssohle zu ermöglichen.

Die Monitoringbohrlöcher, die Überfahrungssohle sowie der Schacht werden während der mit 300 Jahren angesetzten Monitoringphase offen gehalten, während die Einlagerungssohle bereits parallel zum Einlagerungsbetrieb im Rückbauverfahren mit Bentonitversatz verfüllt und mit aus kompaktiertem Bentonit bestehenden Verschlussbauwerken verschlossen wird. Nach Ende der Monitoringphase werden dann zunächst die Monitoringbohrlöcher und die Überfahrungssohle ebenfalls mit Bentonit verfüllt. Abschließend wird dann auch der Schacht verfüllt und mit Verschlussbauwerken verschlossen.

Die in Anhang L dargestellten Simulationsergebnisse dieser Simulationsvariation zeigen, dass die Überfahrungssohle sowie die Monitoringbohrlöcher verschiedenartige Einflüsse haben auf die ablaufenden fluiddynamischen Prozesse im Tiefenlager-/Endlagersystem. So führt beispielsweise die Bewetterung der während der Monitoringphase offengehaltenen Überfahrungssohle dazu, dass die erreichten Maximaltemperaturen in dieser Simulationsvariation etwas geringer ausfallen als in der Basis-Simulation. Einen wesentlich signifikanteren Einfluss haben die Monitoringbohrlöcher allerdings auf die ablaufenden fluiddynamischen Prozesse, da durch diese Bohrlöcher auch nach ihrem Versatz mit Bentonit relativ große Mengen an Porengas aus der Einlagerungssohle in die darüber liegende Überwachungssohle strömen. Exemplarisch dargestellt ist dieser Sachverhalt in Bild 5.54 (= Bild L.9/2) für den Zeitpunkt $t=1.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle, Bild 5.55 (= Bild L.9/3) für den Zeitpunkt $t=10.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle sowie Bild 5.56 (= Bild L.9/4) für den Zeitpunkt $t=90.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle bzw. für die gleichen Zeitpunkte aus einer anderen Perspektive in Bild 5.57 (= Bild L.17/1), Bild 5.58 (= Bild L.17/2) sowie Bild 5.59 (= Bild L.17/3).

Da zum Zeitpunkt $t=1.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle vornehmlich noch nur die primär im Bentonitversatz der Einlagerungssohle vorhandene Porenluft durch das aus dem umgebenden Wirtsgestein zutretende Porenwasser verdrängt wird, ist die ausgewiesene Gasströmungsrate zu diesem Zeitpunkt mit $\dot{Q}_g \approx 250 \frac{N-l}{a \cdot m^2}$ noch deutlich niedriger als zu

den Zeitpunkten $t=10.000 a$ bzw. $t=90.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle, für die aufgrund des zunehmenden Einflusses der korrosionsbedingten Gasbildung dann Gasströmungsraten von $\dot{Q}_g \approx 1.500 - 1.750 \frac{N-l}{a \cdot m^2}$ ausgewiesen werden. Dabei ist zu beachten,

dass in den weiter vom Schacht entfernten Monitoringbohrlöchern mehr Gas aufsteigt als in den näher am Schacht positionierten Monitoringbohrlöchern, da aufgrund der größeren Distanz zwischen den weiter entfernten Einlagerungsstrecken und dem Schacht dort weniger Gas direkt entlang des Streckensystems der Einlagerungssohle in Richtung des Schachts strömt.

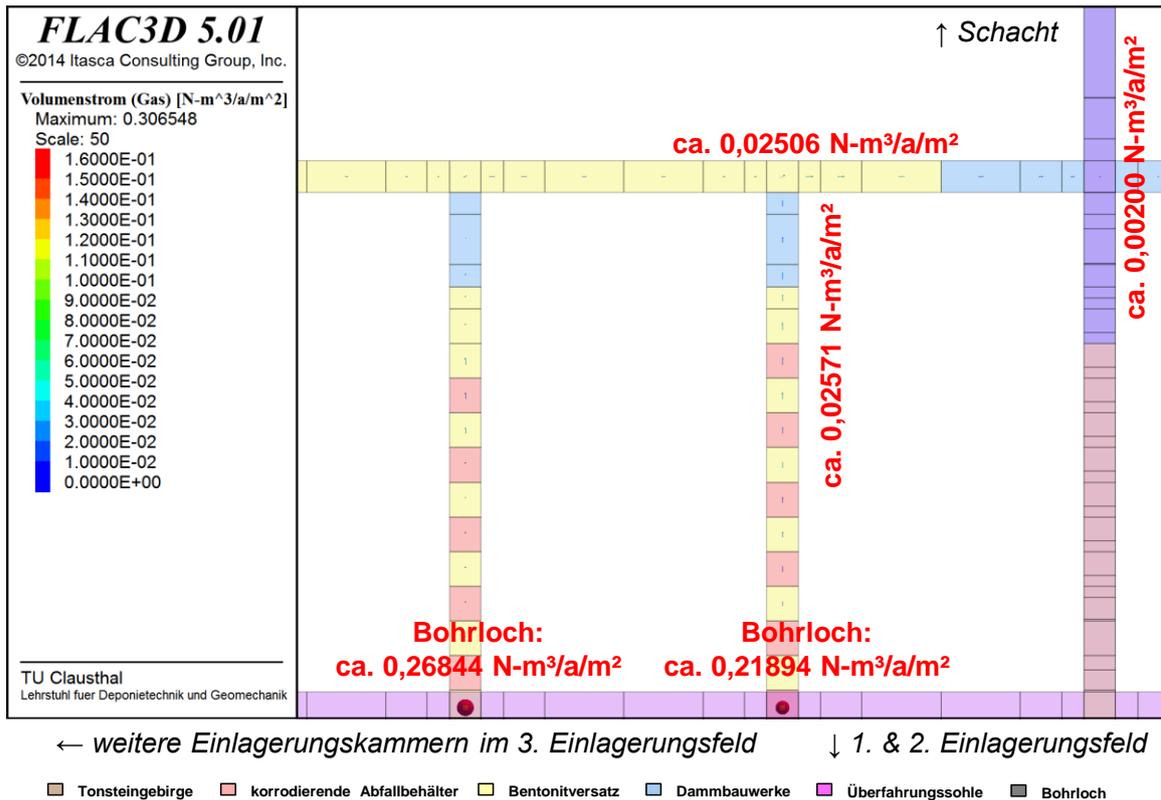


Bild 5.54 Gasströmung innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t=1.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle

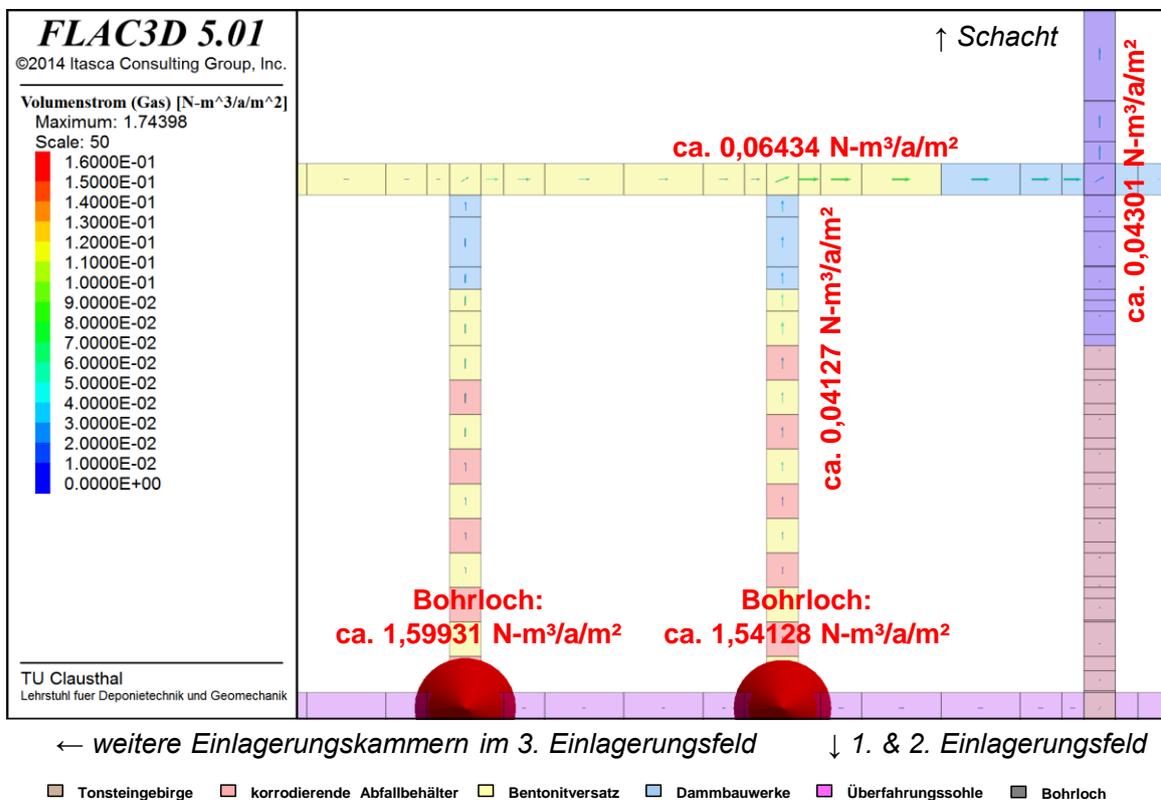


Bild 5.55 Gasströmung innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t=10.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle

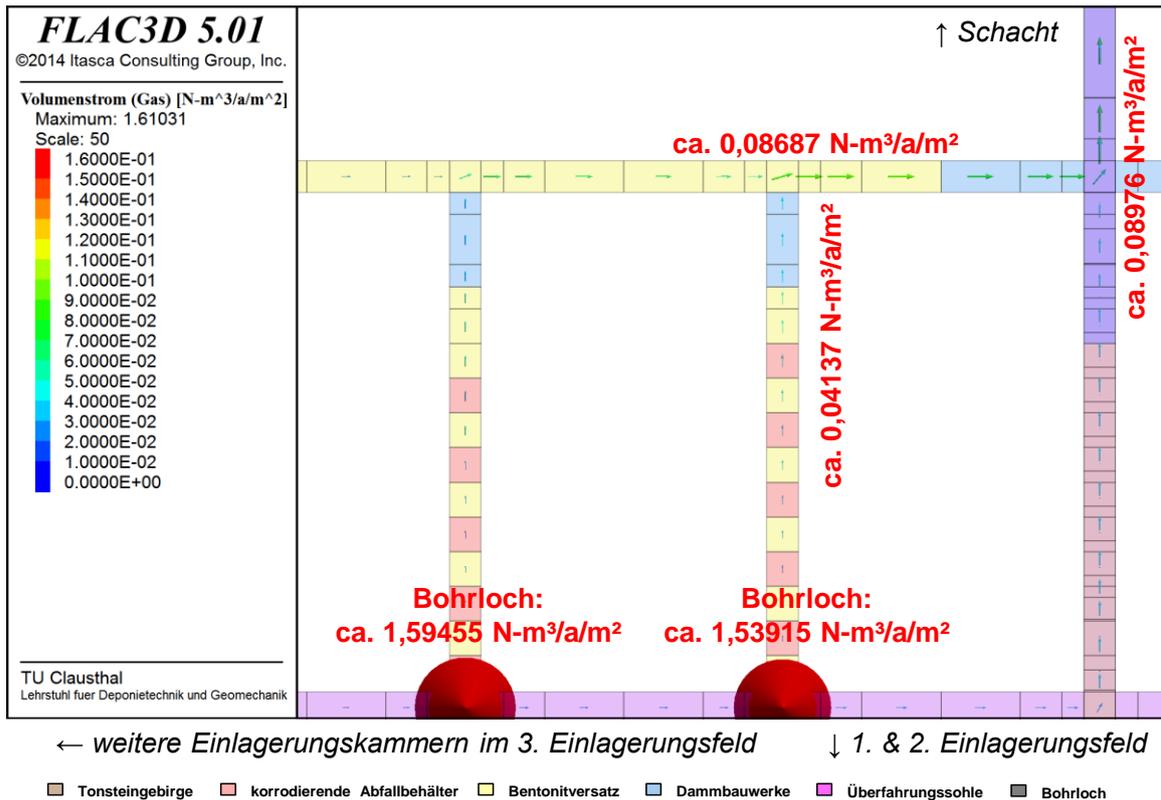


Bild 5.56 Gasströmung innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t = 90.000 \text{ a}$ nach Verschluss der Einlagerungssohle

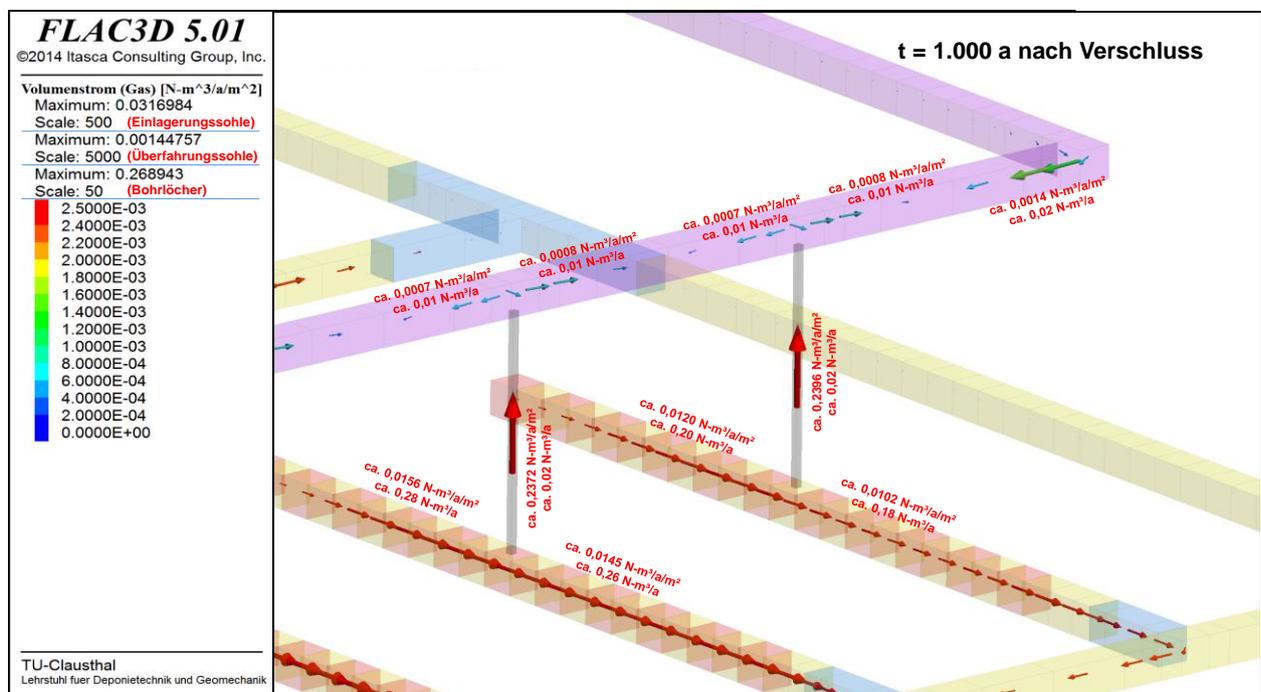


Bild 5.57 Gasströmung in Einlagerungsstrecken, Bohrlochern bzw. Überfahrungssohle zum Zeitpunkt $t = 1.000 \text{ a}$ nach Verschluss der Einlagerungssohle

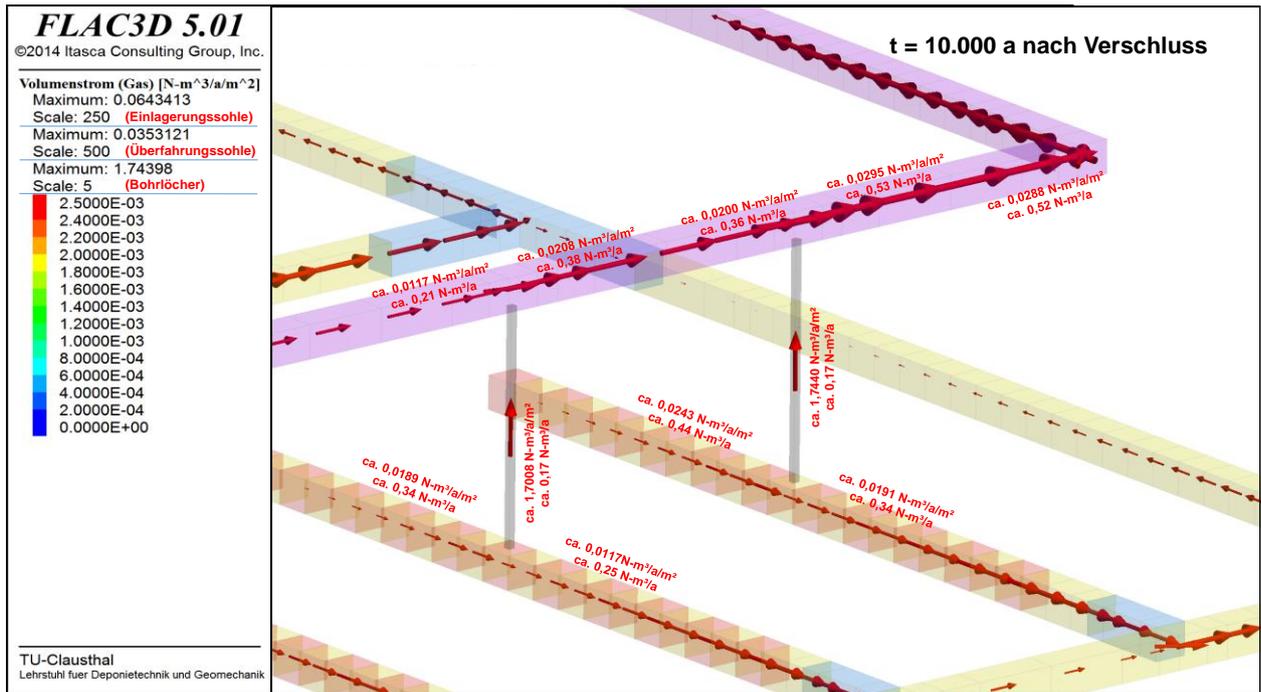


Bild 5.58 Gasströmung in Einlagerungsstrecken, Bohrlochern bzw. Überfahrungssohle zum Zeitpunkt $t = 10.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle

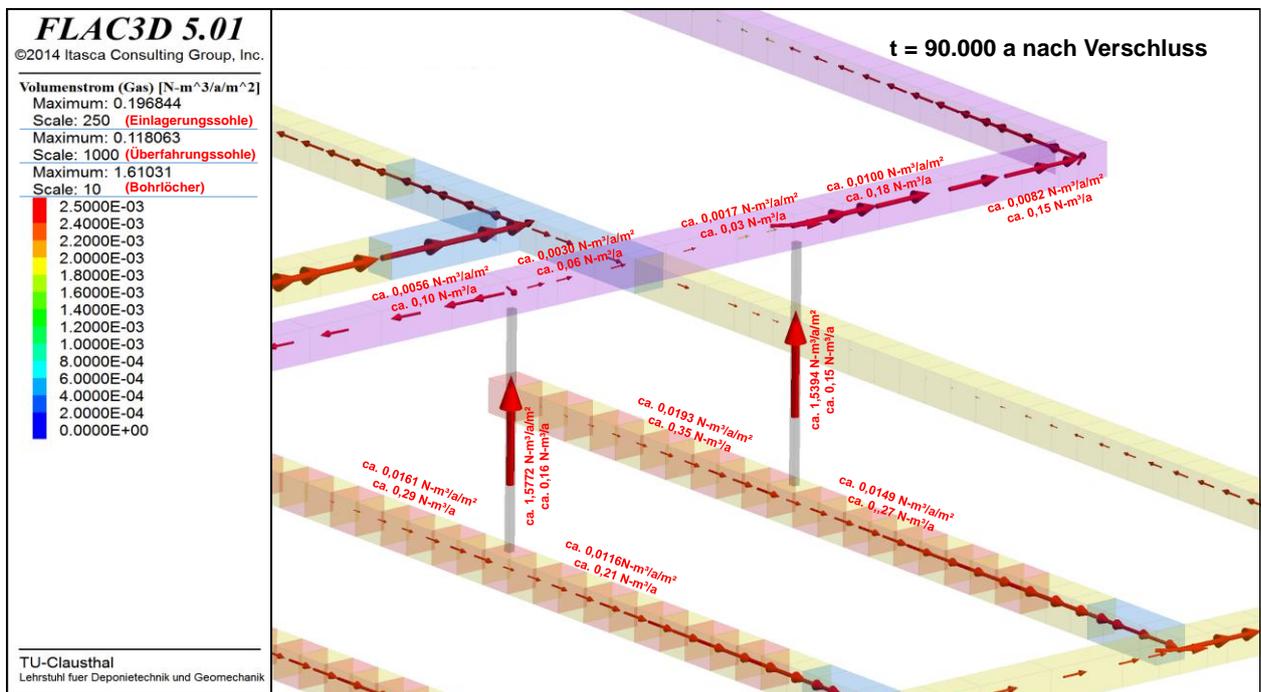


Bild 5.59 Gasströmung in Einlagerungsstrecken, Bohrlochern bzw. Überfahrungssohle zum Zeitpunkt $t = 90.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle

Das aus der Einlagerungssohle entlang der Monitoringbohrlöcher in die Überfahrungssohle aufsteigende Gas verteilt sich zunächst in der Überfahrungssohle und bewegt sich dann von dort einerseits entlang des Streckensystems der Überfahrungssohle in Richtung des Schachts, migriert aber auch in das die Überfahrungssohle umgebende Tonsteingebirge hinein.

Mit Blick auf die ablaufenden fluiddynamischen Prozesse führt der Aufstieg des Porengases entlang der Monitoringbohrlöcher zu einer Verzögerung des Porendruckanstiegs in der Einlagerungssohle. Eine vergleichende Betrachtung von Bild 5.60 (= Bild L.13/5) und Bild B.12/5 ergibt, dass der Porengasdruck in der Einlagerungssohle den hydrostatischen Druck in dieser Simulationsvariation erst einige Jahrhunderte später erreicht als in der Basis-Simulation für die Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge.

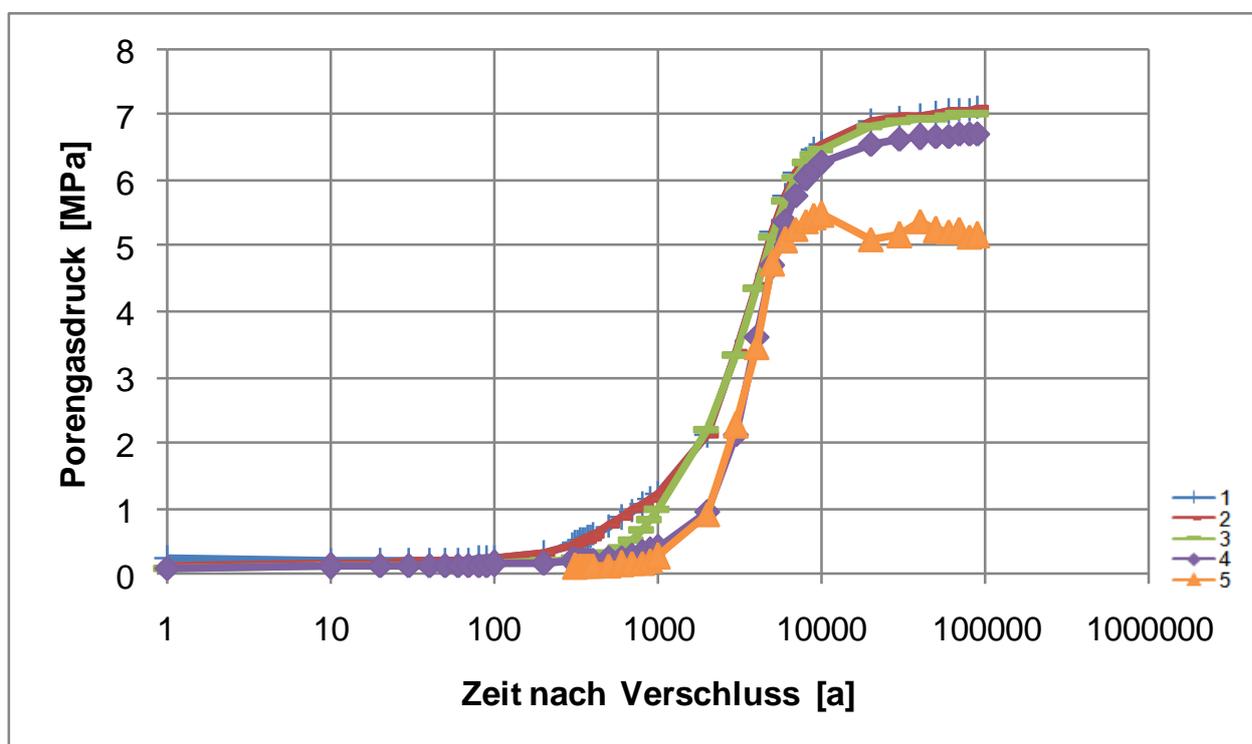


Bild 5.60 Zeitabhängige Entwicklung des Porengasdrucks in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

(1-11) Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Tonsteingebirge bei einer Mächtigkeit der Tonsteinformation von $M = 100 \text{ m}$ (ansonsten analog zur Basis-Simulation) → Globalmodell (v)

Diese Simulationsvariation repräsentiert ein Szenario analog zur Basis-Simulation für die Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge, allerdings bei einer deutlich reduzierten Wirtsgesteinsmächtigkeit von $M = 100 \text{ m}$. Dieses Szenario ist damit angelehnt an die geologische Situation in Süddeutschland, wo Opalinuston-Formationen eine deutlich geringere Mächtigkeit aufweisen als norddeutsche Kreideton-Formationen. Wie bereits in Abschnitt 5.2.1(v) erläutert, wird die Teufenlage der Tonsteinformation in diesem Globalmodell zwischen

$z = -640 \text{ m}$ und $z = -540 \text{ m}$ angenommen. Die Teufenlage des Endlagerbergwerks wird auch in diesem Globalmodell mit $z = -600 \text{ m}$ angenommen. Somit befindet sich das Endlagerbergwerk nicht direkt in der mittleren Teufe der Tonsteinformation, sondern 10 m darunter, um so ein hinreichendes Platzangebot vorzusehen für die Implementierung einer Überfahrungssohle oberhalb der Einlagerungssohle.

Eine vergleichende Betrachtung der in Anhang M dargestellten Simulationsergebnisse dieser Simulationsvariation mit den in Anhang B dargestellten Simulationsergebnissen der Basis-Simulation für die Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge ergibt, dass sich die Simulationsergebnisse beider Simulationen größtenteils relativ ähnlich sind. Es fällt allerdings auf, dass die 20 m und 40 m oberhalb der Einlagerungssohle erreichten Maximaltemperaturen in dieser Simulationsvariation etwas geringer sind als in der Basis-Simulation. Als Grund dafür wird die geringere Distanz zu den thermischen Randbedingungen an den Modellrändern gesehen, so dass Wärmeenergie über die Modellränder abgegeben wird.

Der signifikanteste Unterschied zwischen dieser Simulationsvariation und der Basis-Simulation ist zu ersehen aus der Darstellung der Gasausbreitung in der Wirtsgesteinsformation. Während das Gas in der Basis-Simulation den oberen Modellrand und damit das Deckgebirge bis zum Ende der korrosionsbedingten Gasbildung nicht erreicht, erreicht es den oberen Modellrand in dieser Simulationsvariation aufgrund der geringeren Distanz zwischen Einlagerungssohle und Oberkante der Wirtsgesteinsformation entsprechend Bild 5.61 (= Bild M.14/1) bzw. Bild 5.62 (= Bild M.14/2) bereits etwa 100.000-200.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers. Zudem erreicht das Gas im gleichen Zeitraum auch die Unterkan-

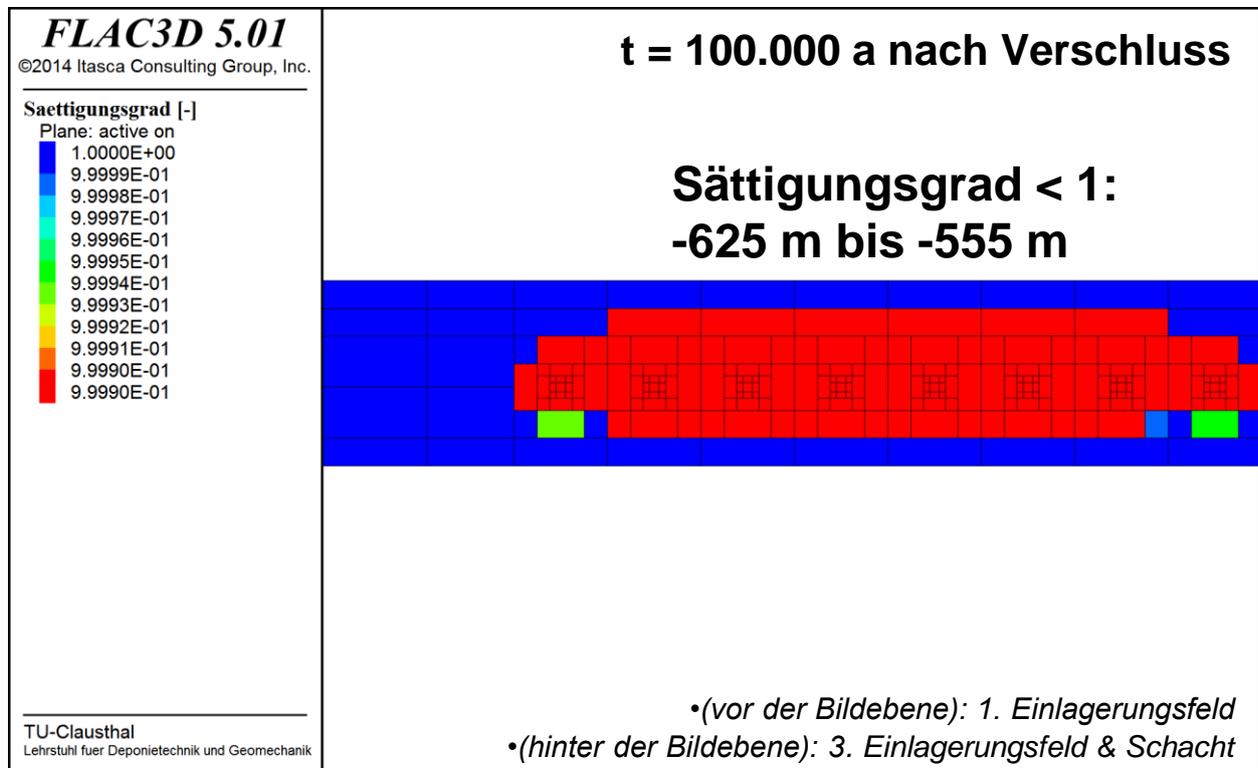


Bild 5.61 Flüssigkeitssättigung in den Einlagerungsstrecken sowie im Tonsteingebirge oberhalb des 2. Einlagerungsfeldes zum Zeitpunkt $t = 100.000 \text{ a}$ nach Verschluss des Endlagers

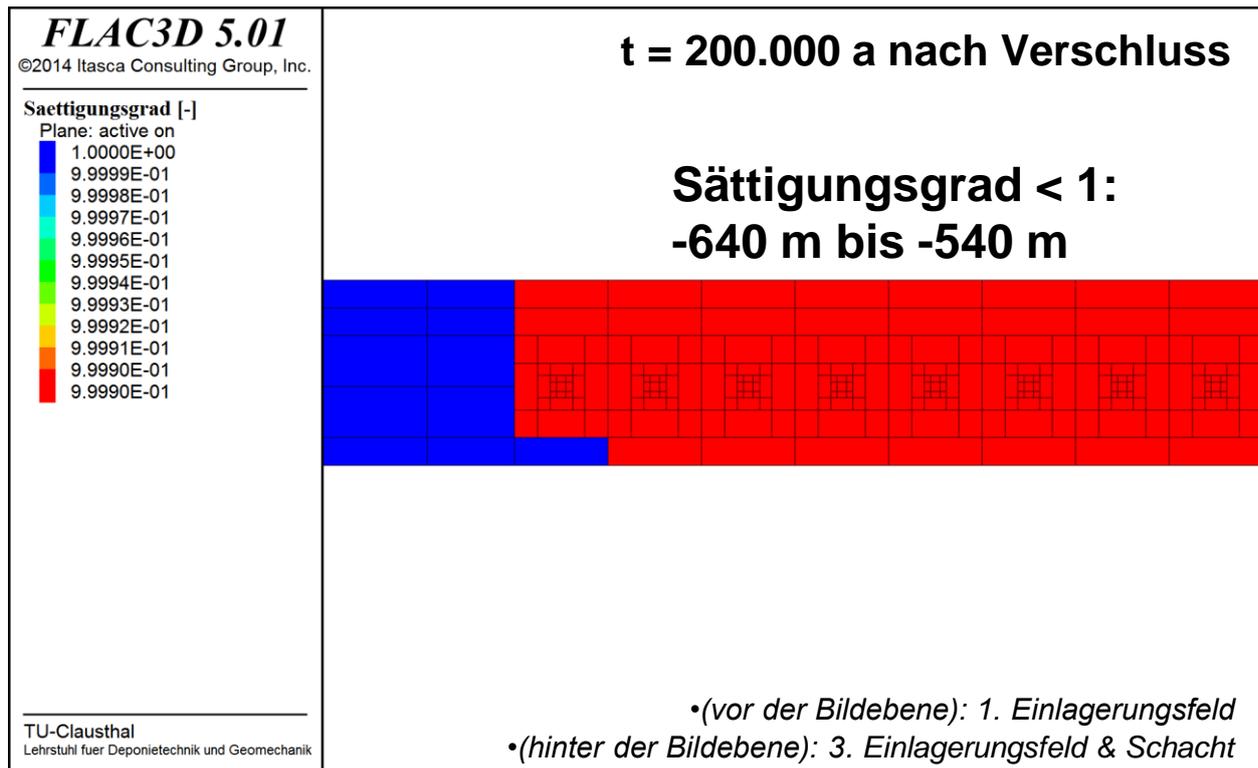


Bild 5.62 Flüssigkeitssättigung in den Einlagerungsstrecken sowie im Tonsteingebirge oberhalb des 2. Einlagerungsfeldes zum Zeitpunkt $t = 200.000 a$ nach Verschluss des Endlagers

te der Wirtsgesteinsformation. Diese Entwicklung ist in der Basis-Simulation nicht beobachtet worden.

(2) Simulationen für ausgewählte Variationssituationen im Salinargebirge

(2-1) Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Salinargebirge unter Annahme einer ausbleibenden Behälterkorrosion → Globalmodell (i)

Diese Simulationsvariation repräsentiert ein Szenario analog zur Simulationsvariation (1-1), allerdings für die Wirtsgesteinsformation Salinargebirge. Da in dieser Simulationsvariation keine korrosionsbedingte Gasbildung erfolgt, kommt es innerhalb des Streckensystems nur zu einem konvergenzbedingten Gasdruckaufbau, der allerdings signifikant langsamer erfolgt als in der Basis-Simulation, bei der der Gasdruckaufbau sowohl aus der Streckenkonvergenz wie auch aus der Behälterkorrosion resultiert. Aufgrund der ausbleibenden korrosionsbedingten Gasbildung werden im Streckensystem entsprechend Bild N.12/5 nur maximale Gasdrücke von $p_g \approx 2,5 MPa$ erreicht, so dass es zu keiner druckgetriebenen Gasinfiltration in das umgebende Salinargebirge kommt, sondern ausschließlich zu Gasbewegungen innerhalb des Streckensystems in Richtung des Schachts.

(2-2) Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Salinargebirge unter Annahme einer gegenüber der Basis-Simulation 100-fach erhöhten Behälterkorrosionsrate → Globalmodell (i)

Diese Simulationsvariation repräsentiert ein Szenario analog zur Simulationsvariation (1-2), allerdings für die Wirtsgesteinsformation Salinargebirge. In dieser Simulationsvariation wird eine gegenüber der Basis-Simulation um den Faktor 100 erhöhte korrosionsbedingte Gasbildungsrate angesetzt. Zudem wird ein unbegrenztes Lösungsangebot für die Behälterkorrosion angenommen. Aufgrund dieser beiden konservativen Annahmen erfolgt der Gasdruckaufbau in dieser Simulationsvariation deutlich schneller als in der Basis-Simulation für die Wirtsgesteinsformation Salinargebirge.

Da das Salzgrusversatzmaterial in den ersten Jahrhunderten nach dem Verschluss des Endlagers noch relativ permeabel ist und auch die Streckenverschlussbauwerke nicht vollkommen impermeabel sind, sondern eine Permeabilität von $K = 10^{-18} m^2$ aufweisen, wird in den ersten Jahrhunderten nach Verschluss des Endlagers in der gesamten Einlagerungssohle ein erheblicher Anstieg des Gasdrucks ausgewiesen, in Bild 5.63 exemplarisch dargestellt für die Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes. Es ist zu ersehen, dass der Poren gasdruck im Salzgrusversatz der Berechnungszonen 1 und 2, die sich innerhalb der Einlagerungskammern befinden, zum Zeitpunkt $t = 1.000 a$ nach Verschluss des Endlagers etwa $p_g \approx 14 MPa$ beträgt und somit den lithostatischen Teufendruck überschreitet, so dass eine druckgetriebene Gasinfiltration in das die Einlagerungskammern umgebende Salinargebirge induziert wird. In den Berechnungszonen 3-5 überschreitet der Poren gasdruck im Salzgrusversatz den lithostatischen Teufendruck dagegen nicht, so dass es dort zu keiner druckgetriebenen Gasinfiltration kommt.

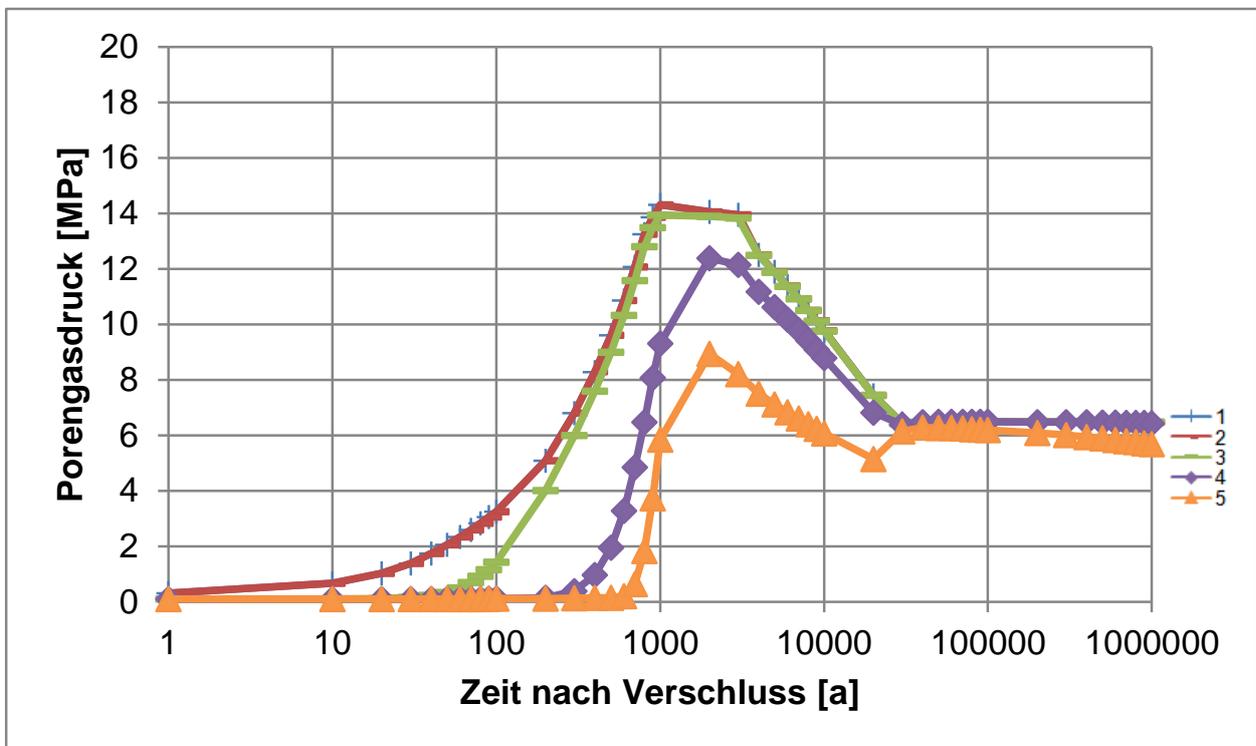


Bild 5.63 Zeitabhängige Entwicklung des Poren gasdrucks in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

Die von den Einlagerungskammern ausgehende Gasinfiltrationsfront erreicht in dieser Simulationsvariation bereits 1.000 Jahre nach Beginn des Infiltrationsprozesses den oberen Modellrand und damit das Deckgebirge, also entsprechend Bild O.14/3 etwa zum Zeitpunkt $t = 2.000 a$ nach Verschluss des Endlagers.

Der schnell ansteigende Gasdruck führt allerdings nicht nur zu einem Austritt von Gas aus dem Endlager über die Infiltrationszone und den Schacht, sondern der schnell ansteigende Gasdruck führt entsprechend Bild 5.64 (= Bild O.12/2) auch zu einem zeitweisen Erliegen der Streckenkonvergenz, so dass sich die Salzgrusporosität und somit auch die Salzgruspermeabilität nicht weiter reduzieren.

Nach Ende der korrosionsbedingten Gasbildung, das in dieser Simulationsvariation zum Zeitpunkt $t = 3.000 a$ nach Verschluss des Endlagers angesetzt wird, reduzieren sich die Gasdrücke in der Einlagerungssohle allmählich wieder und erreichen etwa zum Zeitpunkt $t = 30.000 a$ nach Verschluss des Endlagers das hydrostatische Druckniveau. In Folge des abnehmenden Gasdrucks setzt die Streckenkonvergenz nach Ende der korrosionsbedingten Gasbildung allmählich wieder ein, so dass die Salzgrusporosität und Salzgruspermeabilität weiter reduziert werden.

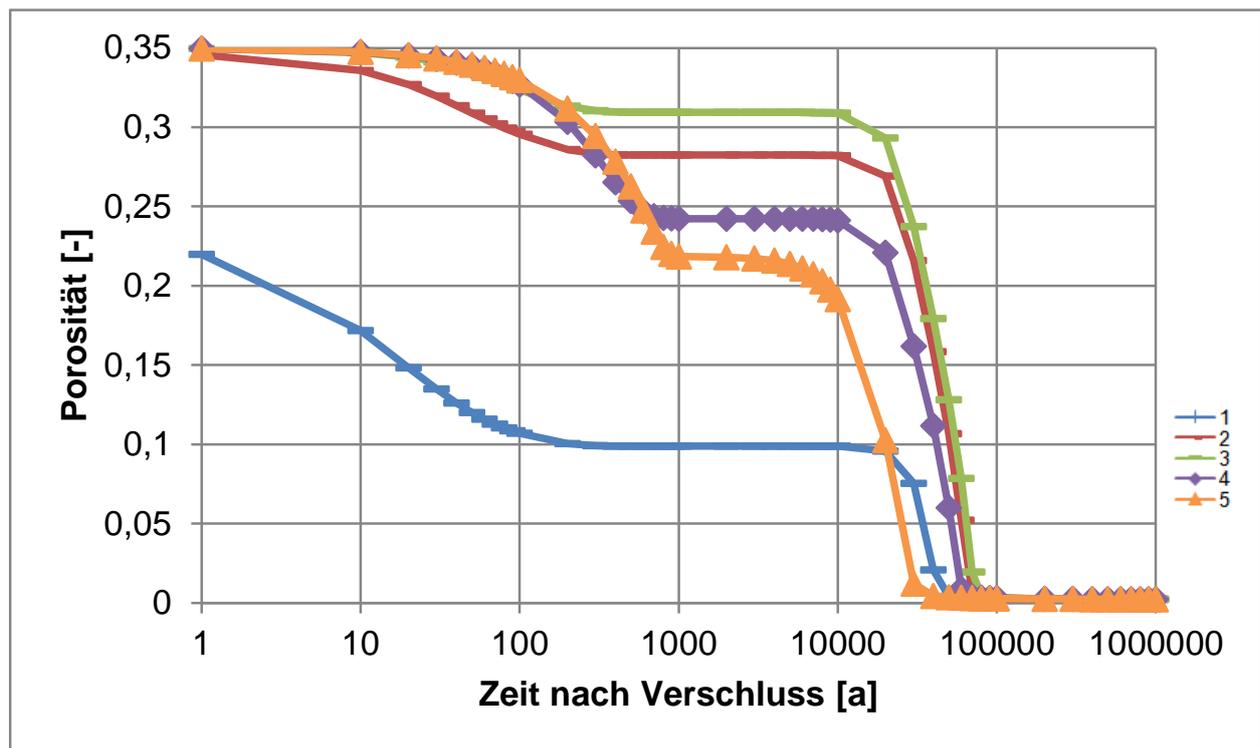


Bild 5.64 Zeitabhängige Entwicklung der Salzgrusporosität in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

(2-3) Referenz-Endlagersystem ohne Überfahrungssohle im Salinargebirge unter Annahme einer Wärmeleistung der eingelagerten Abfallbehälter entsprechend einer POLLUX-3-Behälterbeladung → Globalmodell (i)

Diese Simulationsvariation repräsentiert ein Szenario, bei dem zur Einlagerung der Abfälle Behälter des Typs POLLUX-3 verwendet werden, um mit Blick auf die Möglichkeit einer Rückholung die Maximaltemperaturen an der Behälteroberfläche zu begrenzen. Die reduzierte Wärmeleistung der Abfallbehälter wirkt sich erwartungsgemäß vornehmlich aus in den erreichten Maximaltemperaturen in der Einlagerungssohle und im umgebenden Salinargebirge. Diese liegen für diese Simulationsvariation sogar unterhalb der in der Basis-Simulation für das Tonsteingebirge ausgewiesenen Maximaltemperaturen, da das Salinargebirge ebenso wie der schon nach wenigen Jahren bis Jahrzehnten relativ stark kompaktierte Salzgrusversatz eine höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als das Tonsteingebirge und der Bentonitversatz. Die für die Einlagerungssohle ausgewiesene Maximaltemperatur beträgt etwa $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, während die Maximaltemperatur im Teufenniveau der Überfahrungssohle 40 m oberhalb der Einlagerungssohle entsprechend Bild P.3 sogar nur etwa $32,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht.

Wie aus einer vergleichenden Betrachtung von Bild 5.65 (= P.12/2) und Bild 5.27 (= A.12/2) zu ersehen ist, resultieren die niedrigeren Temperaturen in einer reduzierten Streckenkonvergenzrate und damit in einer langsameren Salzgruskompaktion.

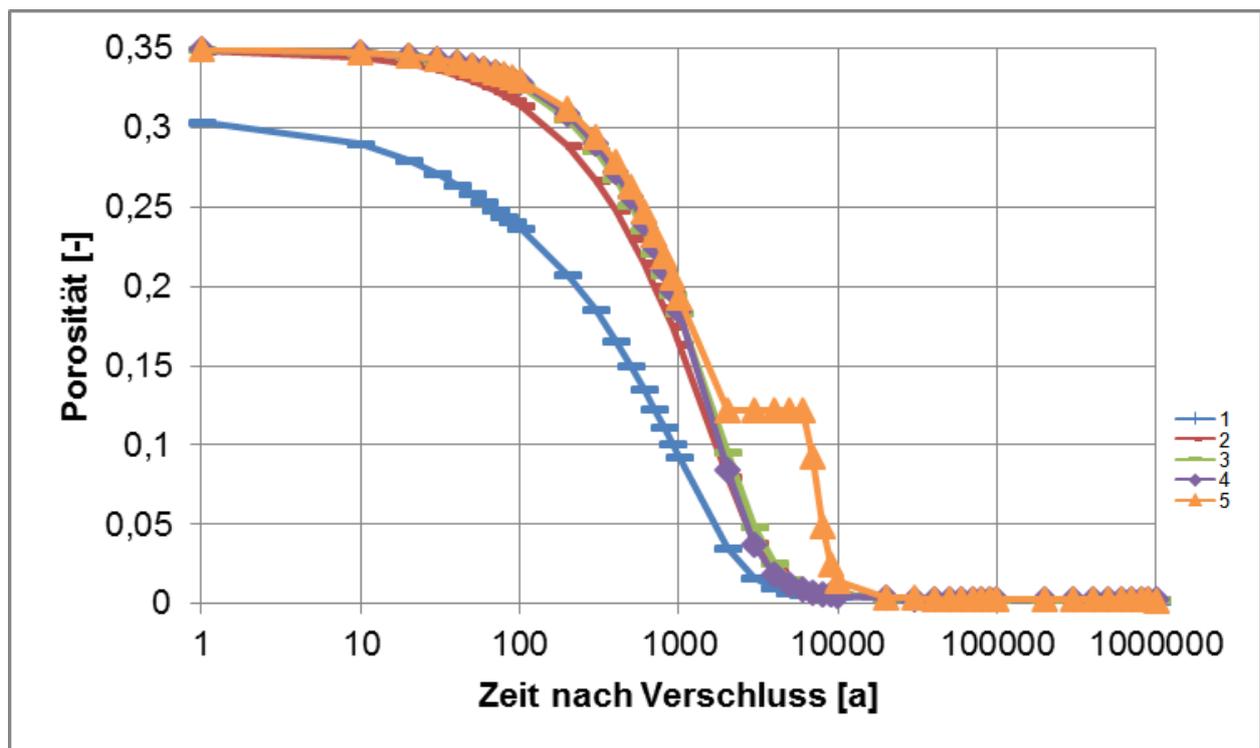


Bild 5.65 Zeitabhängige Entwicklung der Salzgrusporosität in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

(2-4) Referenz-Endlagersystem mit Überfahrungssohle und Monitoringbohrlöchern im Salinargebirge → Globalmodell (ii)

Diese Simulationsvariation repräsentiert ebenso wie die Simulationsvariation (1-10) ein Szenario, bei dem sich 40 m oberhalb der Einlagerungssohle eine Überfahrungssohle befindet, hier allerdings für die Wirtsgesteinsformation Salinargebirge. Die beiden Sohlen sind analog zur Simulationsvariation (1-10) einerseits über den Schacht miteinander verbunden, andererseits aber auch über Monitoringbohrlöcher, die eine unmittelbare Überwachung der Einlagerungssohle bei gleichzeitiger Zugänglichkeit und somit auch Wartbarkeit der Messinstrumente ermöglichen.

In der rechnerischen Simulation werden die Monitoringbohrlöcher, die Überfahrungssohle sowie der Schacht auch in der hier betrachteten Simulationsvariation während der mit 300 Jahren angesetzten Monitoringphase offen gehalten, während die Einlagerungssohle bereits parallel zum Einlagerungsbetrieb im Rückbauverfahren mit Salzgrusversatz verfüllt und mit geeigneten Verschlussbauwerken verschlossen wird. Nach Ende der Monitoringphase werden dann zunächst die Monitoringbohrlöcher und die Überfahrungssohle ebenfalls mit Salzgrus verfüllt. Abschließend wird dann auch der Schacht verfüllt und an den entsprechenden Positionen mit Verschlussbauwerken versehen.

Die in Anhang Q dargestellten Simulationsergebnisse dieser Simulationsvariation zeigen, dass die Überfahrungssohle sowie die Monitoringbohrlöcher auch im Salinargebirge verschiedenartige Einflüsse haben auf die ablaufenden fluiddynamischen Prozesse im Tiefenlager-/Endlagersystem. Auch hier führt die Bewetterung der während der Monitoringphase offengehaltenen Überfahrungssohle dazu, dass die erreichten Maximaltemperaturen in dieser Simulationsvariation geringer ausfallen als in der Basis-Simulation. Einen wesentlich signifikanteren Einfluss haben die Monitoringbohrlöcher allerdings auf die ablaufenden fluiddynamischen Prozesse, da durch diese Bohrlöcher auch nach ihrem Versatz mit Salzgrus relativ große Mengen an Poren gas aus der Einlagerungssohle in die darüber liegende Überwachungssohle strömen. Exemplarisch dargestellt ist dieser Sachverhalt in Bild 5.66 (= Bild Q.9/2) für den Zeitpunkt $t=1.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle, in Bild 5.67 (= Bild Q.9/3) für den Zeitpunkt $t=10.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle sowie in Bild 5.68 (= Bild Q.9/4) für den Zeitpunkt $t=70.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle bzw. für die gleichen Zeitpunkte aus einer anderen Perspektive in Bild 5.69 (= Bild Q.17/1), in Bild 5.70 (= Bild Q.17/2) sowie in Bild 5.71 (= Bild Q.17/3).

Ein Vergleich der Simulationsergebnisse der Simulationsvariation (1-10) und der Simulationsergebnisse der hier betrachteten Simulationsvariation ergibt, dass die im Versatzmaterial primär enthaltene Porenluft zu unterschiedlichen Zeitpunkten aus der Einlagerungssohle durch die versetzten Messbohrlöcher in die Überfahrungssohle gepresst wird. Während sie im Bentonitversatz zunächst eher langsam und durch das aus dem umgebenden Tonstein gebirge zufließende Porenwasser dann mit der Zeit immer schneller ausgepresst wird, wird sie im Salzgrusversatz aufgrund der sich nach Abfalleinlagerung schnell erhöhenden Temperaturen und der daraus resultierenden relativ rasch erfolgenden konvergenzbedingten Versatzkompaktion zunächst relativ schnell ausgepresst mit Gasströmungsraten von nahezu $\dot{Q}_g \approx 10.000 \frac{N-l}{a \cdot m^2}$ zum Zeitpunkt $t=1.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle, mit zunehmender Zeit dann aber vornehmlich aufgrund der kompaktionsbedingt abnehmenden

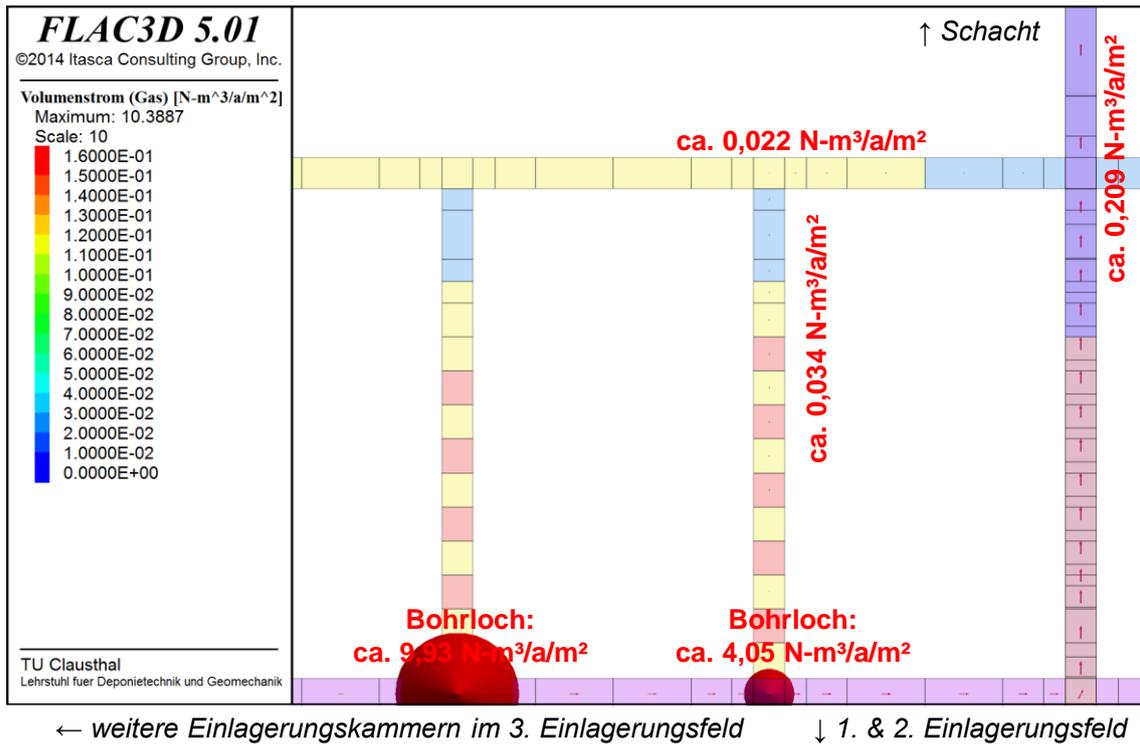


Bild 5.66 Gasströmung innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t = 1.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle

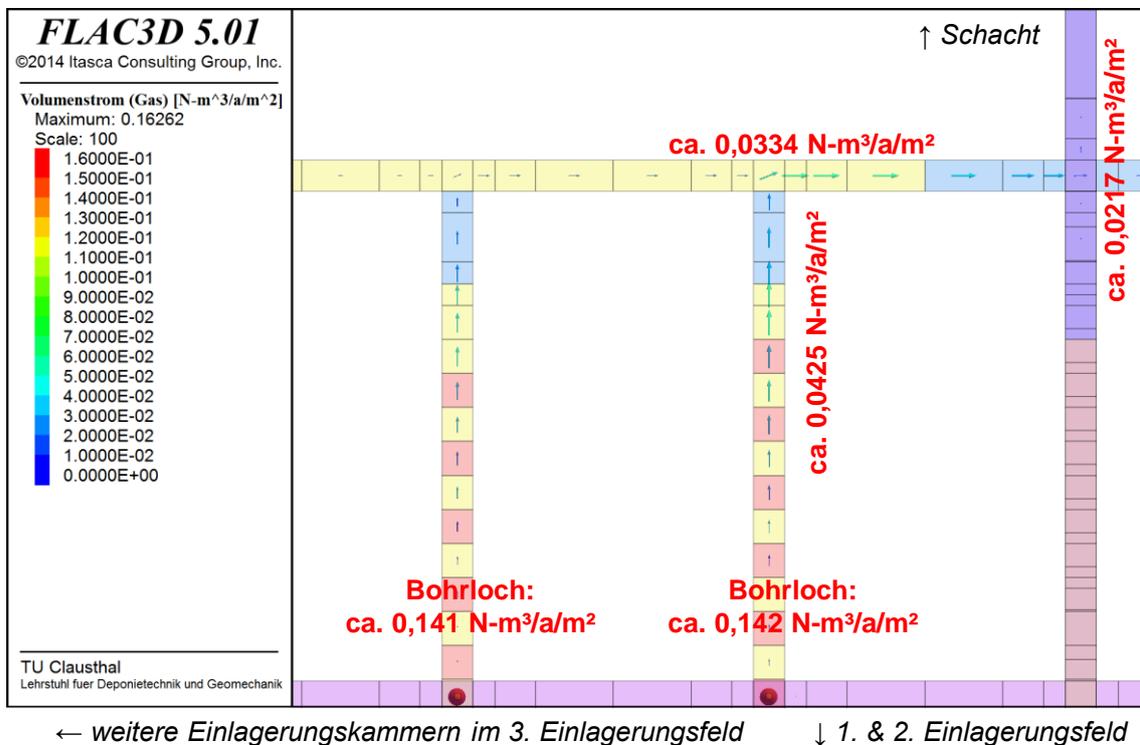


Bild 5.67 Gasströmung innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t = 10.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle

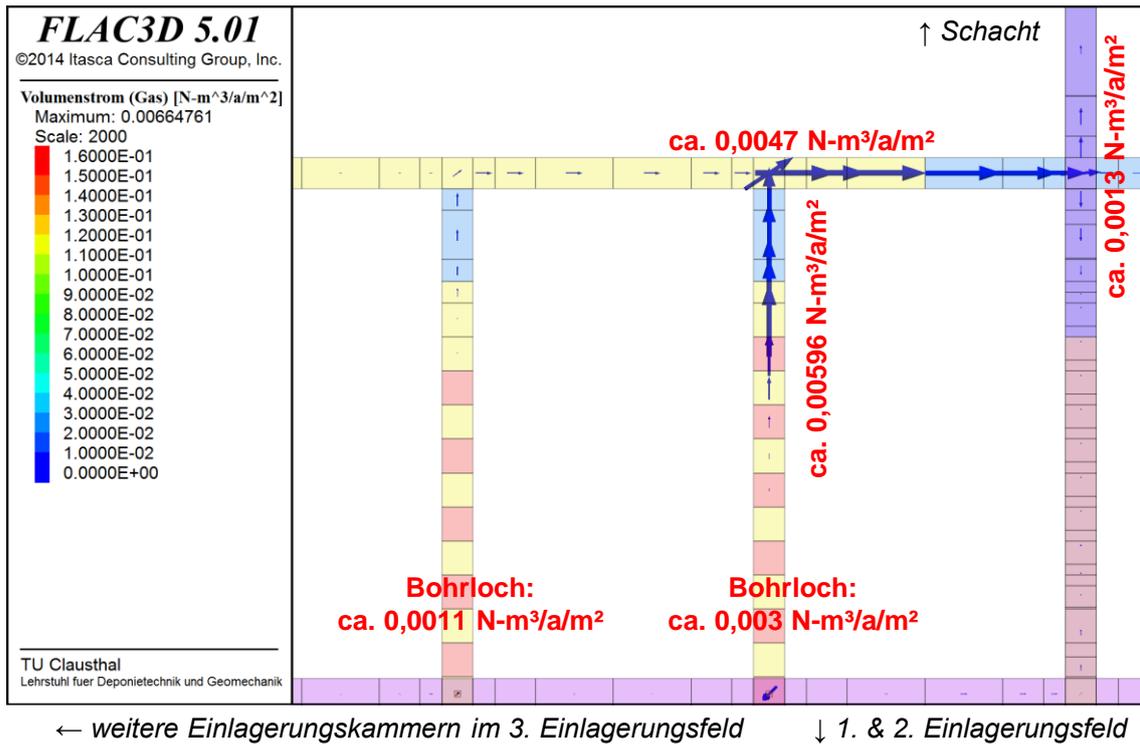


Bild 5.68 Gasströmung innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t = 70.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle

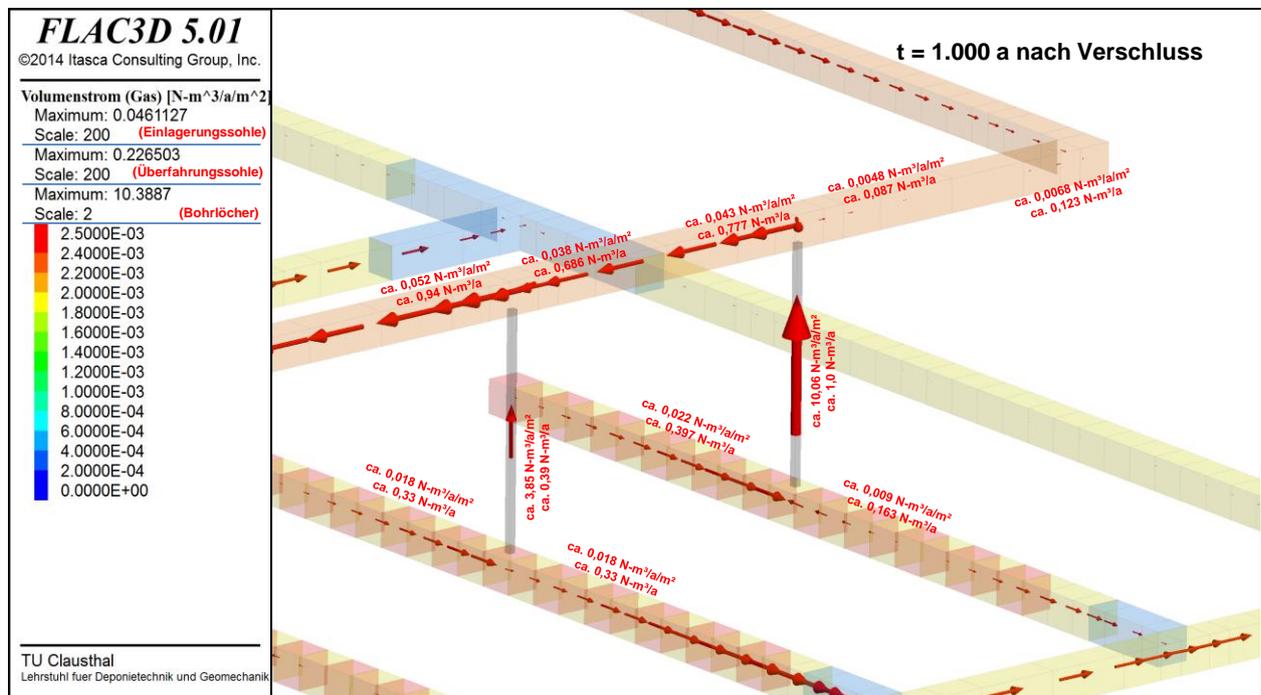


Bild 5.69 Gasströmung in Einlagerungsstrecken, Bohrlöchern bzw. Überfahrungssohle zum Zeitpunkt $t = 1.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle

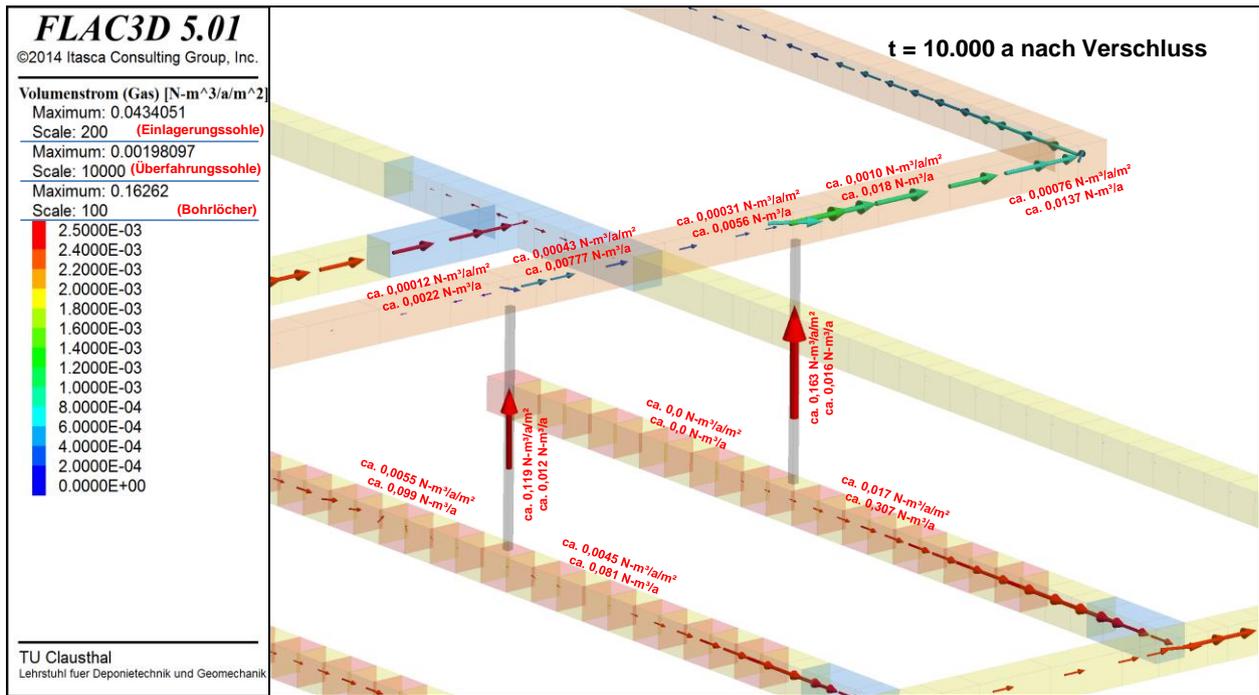


Bild 5.70 Gasströmung in Einlagerungsstrecken, Bohrlöchern bzw. Überfahrungssohle zum Zeitpunkt $t = 10.000 \text{ a}$ nach Verschluss der Einlagerungssohle

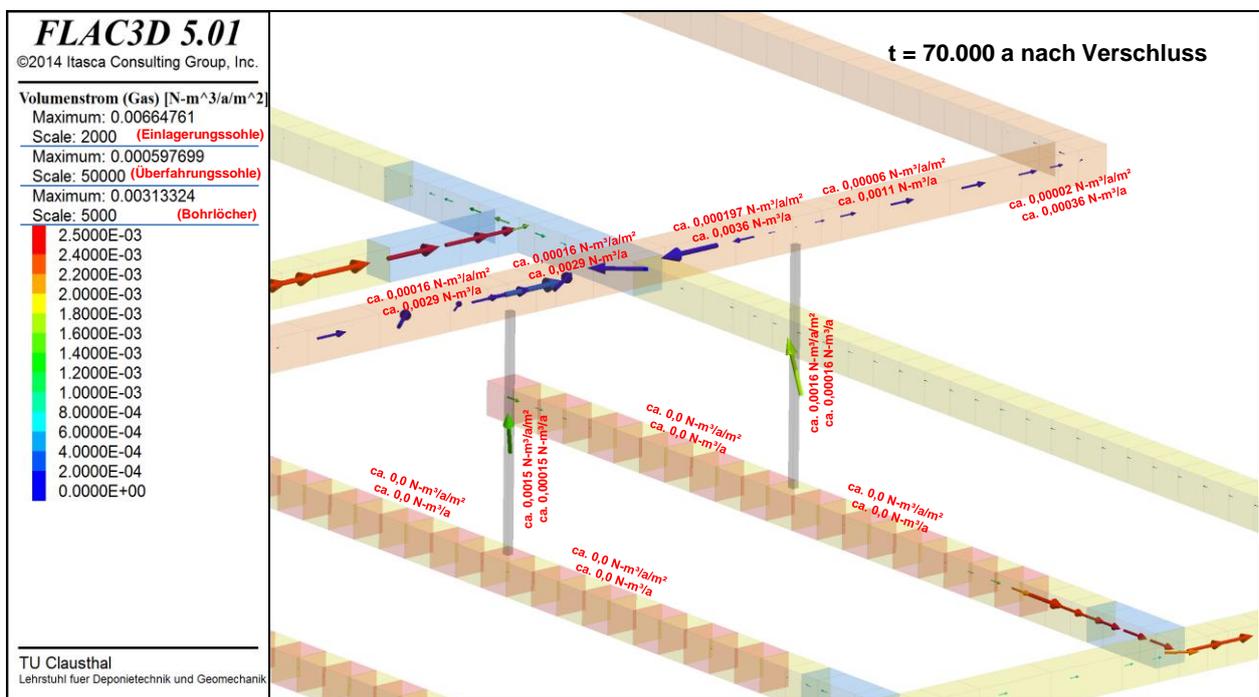


Bild 5.71 Gasströmung in Einlagerungsstrecken, Bohrlöchern bzw. Überfahrungssohle zum Zeitpunkt $t = 70.000 \text{ a}$ nach Verschluss der Einlagerungssohle

Salzgruspermeabilität immer langsamer, so dass für den Zeitpunkt $t = 10.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle nur noch Gasströmungsraten von $\dot{Q}_g \approx 140 \frac{N-l}{a \cdot m^2}$ ausgewiesen werden.

Das aus der Einlagerungssohle entlang der Monitoringbohrlöcher in die Überfahrungssohle aufsteigende Gas verteilt sich ebenso wie in der Simulationsvariation (1-10) in der Überfahrungssohle.

Eine vergleichende Betrachtung von Bild 5.72 (= Bild Q.13/5) und Bild A.12/5 ergibt im Gegensatz zur Wirtsgesteinsinformation Tobensteingebirge hier in der Wirtsgesteinsinformation Salinargebirge, dass der Aufstieg des Porengases entlang der Monitoringbohrlöcher zu einer eher geringfügigen Verzögerung des Porendruckanstiegs in der Einlagerungssohle führt. Einer stärkeren Verzögerung des Porendruckaufbaus wirkt hier die temperaturbedingt relativ rasch ablaufende Salzgruskompaktion entgegen. Entsprechend Bild 5.72 überschreitet der Porengasdruck in den Einlagerungsstrecken den lithostatischen Gebirgsdruck ebenso wie in der Basis-Simulation für die Wirtsgesteinsinformation Salinargebirge etwa zum Zeitpunkt $t = 10.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle, so dass auch hier ein druckgetriebener Gasinfiltrationsprozess initiiert wird. Zwischen 10.000 und 20.000 Jahren erreicht die Infiltrationsfront entsprechend Bild Q.16/2 die Überfahrungssohle und schreitet von dort in Richtung des Deckgebirges weiter voran, ähnlich wie in der Simulation ohne Überwachungssohle, wobei auch hier der Salzspiegel 200 m oberhalb der Einlagerungssohle entsprechend Bild Q.16/3 zum Zeitpunkt $t = 80.000 a$ nach Verschluss der Einlagerungssohle erreicht wird. Vor diesem Hintergrund führt im Rahmen der hier getroffenen Annahmen die Anord-

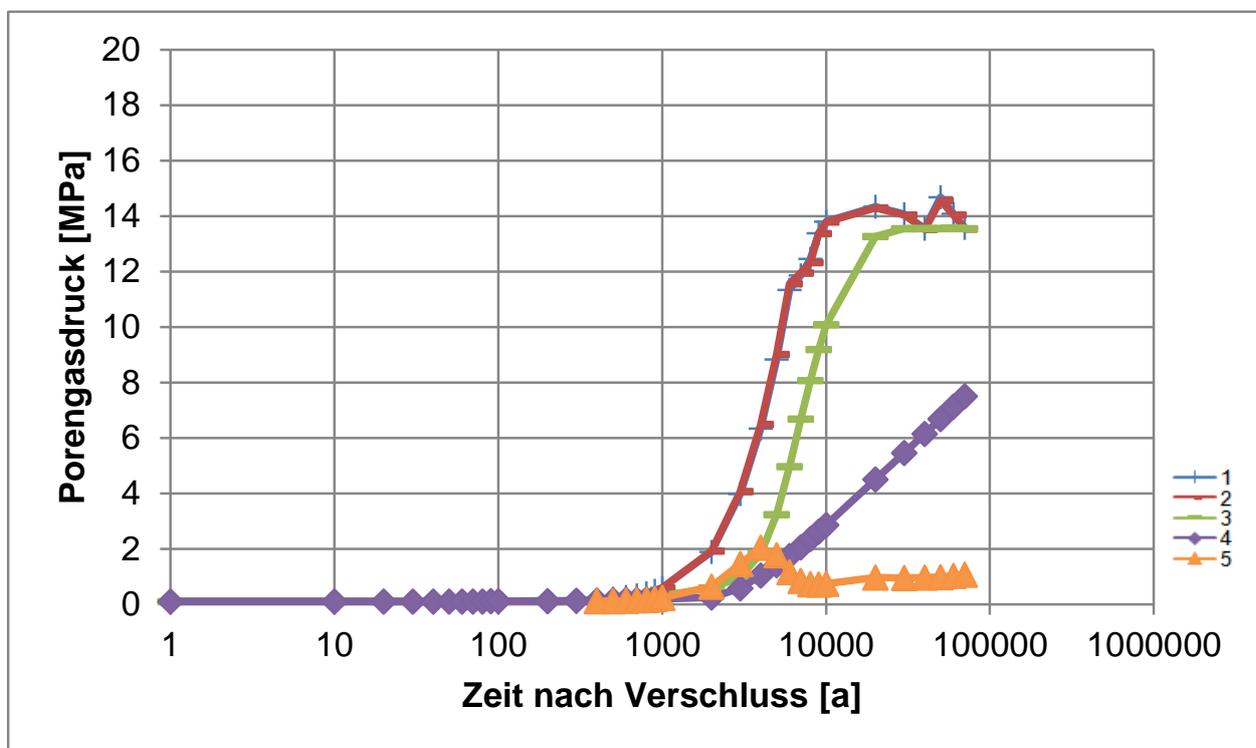


Bild 5.72 Zeitabhängige Entwicklung des Porengasdrucks in den ausgewählten Berechnungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

nung einer Überwachungssohle zu keinem sicherheitstechnischen Nachteil im Bezug auf den Erhalt der geologischen Barrierenqualität, da die Entwicklung der Infiltrationsfront eher nur marginal beeinflusst wird.

5.3 Einige Anmerkungen zu den bisherigen Arbeiten mit Blick auf die Bewertung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen

Entsprechend Abschnitt 1.3 befassen sich die Vertikalprojekte VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod mit Untersuchungen zur Analyse von fluiddynamischen Prozessen in einem Tiefenlager im Salinar- bzw. Tonsteingebirge nach Verschluss, wobei der Verschluss alternativ sofort nach Beendigung der Abfalleinlagerung oder erst nach einer zwischengeschalteten Beobachtungsphase und damit erst einige Zeit später erfolgt. In diesem Fall wird das Tiefenlagerbergwerk mit einer zusätzlichen Überfahrungssohle versehen. Nach Verschluss geht das Tiefenlager in ein Endlager über.

Zentrale Komponenten eines Endlagers sind

- die geologische Barriere (Salinar- oder Tonsteingebirge) und
- die geotechnischen Barrieren (Strecken- und Schachtverschlüsse).

Diese zentralen Komponenten tragen langfristig die Hauptverantwortung für den Einschluss der radioaktiven Abfälle im tiefen geologischen Untergrund und damit für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit. Diesen Komponenten wird damit im Rahmen des auf Sicherheitsfunktionen basierenden Bewertungskonzeptes auch die größte Bedeutung in Form der höchsten Relevanzstufe zugewiesen.

Um dieser Bedeutung gerecht werden zu können, werden zwangsläufig entsprechend hohe Anforderungen an die Robustheit der zu diesen Komponenten gehörenden Sicherheitsfunktionen gestellt. Robustheit bedeutet dabei

- die Zuverlässigkeit und Qualität und somit die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie
- die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen.

Um die Robustheit der Sicherheitsfunktionen zu bewerten, sind erforderlichlich

- ein umfassendes Prozessverständnis zur Funktionalität der Komponenten sowie
- ein weitreichendes Systemverständnis zur räumlichen Beschaffenheit und zur zukünftigen fluiddynamisch fokussierten Entwicklung der Komponenten.

Entscheidender Aspekt bei der Bewertung der Robustheit, mit der eine zentrale Sicherheitsfunktion einer Komponente des Endlagersystems versehen ist, ist damit die möglichst umfassende Dokumentation zur langfristigen Gewährleistung der Funktionalität, die dieser Komponente im Endlagersystem zugeordnet ist. Bei Systemkomponenten mit zentraler Abdichtungsfunktion steht damit mit Blick auf die Verhinderung eines advektiv getragenen Schadstofftransportes die hydraulische Wirksamkeit als Abdichtungselement in Raum und

Zeit im Vordergrund, gekennzeichnet durch die fluiddynamisch geprägten Einwirkungen und die diesen entgegenwirkenden hydraulischen Widerstände.

Die in den vorherigen Abschnitten vorgestellten ersten Befunde zu den komplexen fluiddynamischen Prozessen im verschlossenen Endlager zeigen, dass

- mit dem FTK-Simulator eine konsistente multiphysikalische Modellierung und rechnerische Simulation von konfigurativ komplexen Endlagersystemen möglich ist, dass
- mit dem FTK-Simulator sowohl für ein Endlager im Salinargebirge wie auch für ein Endlager im Tonsteingebirge grundsätzlich ein umfassendes Prozess- und Systemverständnis unter endlagerrelevanten Einwirkungen erarbeitet werden kann, sowohl bezüglich der multiphysikalischen Prozessmodellierung wie auch bezüglich der großräumlich-zeitlichen Simulation von Fluidbewegungen im verschlossenen Endlagerbergwerk selbst und im umgebenden einschlusswirksamen Gebirgsbereich, dass
- mit Hilfe der rechnerisch ermittelten Fluidströmungen in Raum und Zeit im Endlagerbergwerk und im umgebenden Gebirgsbereich die Grundlage für die Ermittlung auch des advektiv getragenen Schadstofftransportes gegeben ist, dass
- mit Hilfe der Abbildungsmodelle die zukünftigen fluiddynamischen Verhältnisse sowohl für wahrscheinliche wie auch für weniger wahrscheinliche Endlagersystementwicklungen ermittelt und analysiert werden können und dass
- über Sensitivitätsanalysen ein Einblick in die Reaktion des fluiddynamischen Systems auf Parameterbandbreiten, Materialinhomogenitäten und nicht identifizierte, aber auch nicht ausschließbare geotektonische Defekte / Schwachstellen erarbeitet werden kann.

Damit ist mit den vorstehend vorgestellten Arbeiten zunächst ein wirksames Instrumentarium zur rechnerischen Analyse der endlagerrelevanten, insbesondere fluiddynamisch geprägten Zustände und Entwicklungen auf Prozess- und Systemebene geschaffen worden, sowohl für das Wirtsgestein Salinargebirge wie auch für das Wirtsgestein Tonsteingebirge. Darüber hinaus sind zumindest Grundlagen für die Bewertung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen zu zentralen Endlagerkomponenten des Endlagersystems geschaffen worden. Dabei handelt es sich einerseits um ein grundlegendes Verständnis der fluiddynamischen Prozesse in einem Endlager im Zusammenwirken von geologischen und geotechnischen Barrieren, andererseits um die ersten Analysen von Systemreaktionen auf Parametervariationen und geotektonische Schwachstellen.

Es ist geplant, im Rahmen der weiteren Bearbeitung der Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod neben der Entwicklung eines Funktionalmodells zur vereinfachten Beschreibung der hydraulischen Wirksamkeit von geotechnischen Barrieren zusätzlich zu den bereits in diesem Arbeitsbericht aufgeführten Variationssimulationen mit den entwickelten Globalmodellen noch weitere Variationssimulationen durchzuführen. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Existenz eines unentdeckten Laugennestes unterhalb der Einlagerungssohle im Salinargebirge hinsichtlich seiner Bedeutung für das Langzeitsystemverhalten des Referenz-Endlagersystems sowie im Rahmen der Auffahrung ausgehaltene, allerdings im Nahfeld des Endlagerbergwerks in steiler Lagerung anstehende Folgen von Anhydritblöcken, die einerseits im Lauf der Zeit zu Lösungszutritten in das Endlagerbergwerk führen könnten, sich andererseits aber auch zu bereits geogen angelegten und dann aktivierten Freisetzungswegsamkeiten entwickeln könnten.

Die zum Aufbau von Prozess- und Systemverständnis erforderliche multiphysikalische Modellierung und Simulation von endlagerrelevanten Prozessen auf Lokal- und Globalmodellebene erfordert die zahlenmäßige Determinierung einer Vielzahl mechanischer, hydraulischer und thermischer Materialkennwerte. Bei der Bewertung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen haben auch die Messbarkeit dieser Materialkennwerte und die Streubreite dieser Materialkennwerte sowie ihre Zuordnungsfähigkeit zu lithologisch-tektonisch definierten Homogenbereichen eine große Bedeutung. Zwar muss eine große Anzahl an Materialkennwerten nicht zwangsläufig korrespondieren mit größeren Schwierigkeiten bei ihrer jeweiligen Messbarkeit, allerdings steigen mit der Komplexität und der Nichtlinearität sowie der Kopplung der messtechnisch zu erfassenden Prozesse zumindest die Wahrscheinlichkeit von Messfehlern infolge von versuchstechnischen Mängeln oder in Verbindung mit zeitabhängigen Entwicklungen die Prognoseungewissheiten infolge nur begrenzter Messzeiten. Außerdem weist eine große Anzahl von Materialkennwerten zur Erfassung der als relevant erachteten physikalischen Prozesse bereits eo ipso auf die hohe Komplexität eines Endlagersystemverhaltens hin und kann selbst auch als ein Maß für die Robustheit einer Sicherheitsfunktion interpretiert werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des ENTRIA-Forschungsprojekts ist die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen für einen Vergleich von drei Entsorgungsoptionen vorgesehen. Diese drei Entsorgungsoptionen werden in drei so genannten Vertikalprojekten bearbeitet und konkretisieren sich in

- Teilprojekt VP 5: Endlager mit sofortigem Verschluss nach der Einlagerungsphase,
- Teilprojekt VP 6: Tiefenlager mit längerfristigem Monitoring nach Beendigung der Einlagerungsphase,
- Teilprojekt VP 7: Langfristiges Oberflächenlager.

Entsprechend einer Vorabstimmung zwischen VP 5 und VP 6 wird das Monitoring des Tiefenlagers bis in den Anfang der Nachverschlussphase fortgesetzt, realisiert über eine spezielle, zusätzlich zu der Abfallablagerungssohle in einem wirtsgesteinsspezifisch festzulegenden Abstand aufgefahrene Überfahrungssohle. Damit wird im Rahmen von ENTRIA grundsätzlich auch ein Entsorgungsbergwerk betrachtet, das aus einer Abfalleinlagerungssohle und einer darüber angeordneten Überfahrungssohle besteht. Die Überfahrungssohle wird in ihrem Zugschnitt auf die Monitoringaufgabe nach Verschluss der Abfalleinlagerungssohle konzipiert, kann aber gleichzeitig funktional auch als Erkundungssohle genutzt werden (z.B. Endlager in einem Salzstock / Erkundungssohle am Standort Gorleben).

In Teilprojekt VP 6 wird die längerfristige Monitoringphase bis zum endgültigen Verschluss des Tiefenlagers und damit seiner Überführung in ein Endlager insbesondere aus geotechnischer und monitoringbezogener Sicht untersucht, während in Teilprojekt VP 5 zunächst ein Referenztiefenlager bzw. Referenzendlager untersucht wird, das lediglich aus einer Einlagerungssohle besteht und sofort nach Einstellung des Einlagerungsbetriebes verschlossen wird. Das Verhalten des in Teilprojekt VP 6 hinsichtlich der längerfristigen Monitoringphase untersuchten Tiefenlagers wird ebenfalls nach seiner Überführung in ein Endlager in der Nachverschlussphase von den Bearbeitern des Teilprojekts VP 5 analysiert; formal werden die zugehörigen Arbeiten allerdings in Teilprojekt VP 6.7mod durchgeführt.

Die Teilprojekte VP 5 und VP 6 sind damit insofern eng miteinander verbunden als die Nachverschlussphase von Teilprojekt VP 6 ebenfalls von den Bearbeitern des Teilprojekts VP 5 untersucht wird. Daher sind in einem bereits im Jahr 2014 erarbeiteten Dossier, das dann im Jahr 2015 als ENTRIA-Arbeitsbericht veröffentlicht worden ist, gemeinsam die abfalltechnischen, geometrischen und gebirgsmechanischen sowie materialbezogenen Randbedingungen für die in den Teilprojekten VP 5 und VP 6 zu untersuchenden Referenzmodelle festgelegt worden, *Stahlmann et al. (2015)*.

Vor diesem Hintergrund werden in den Teilprojekten VP 5.1, VP 5.2 bzw. VP 6.7mod mit Blick auf das Endlagerverhalten nach Verschluss hinsichtlich Tragverhalten und Fluidynamik analysiert sowohl (1) das Entsorgungskonzept eines Tiefenlagers mit sofortigem Verschluss nach Einlagerungsende und damit sofortiger Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager wie auch (2) das Entsorgungskonzept eines Tiefenlagers mit zunächst längerfristiger Monitoringphase auch noch nach Einlagerungsende vor dem endgültigen Verschluss und damit einer zeitlich mindestens um Jahrzehnte bis vielleicht einhundert Jahre versetzten Überführung in ein Endlager. Diese Konzeption gibt nachfolgenden Generationen damit planerisch von vornherein die Möglichkeit des Monitorings und der Reversibilität (Fehlerkorrektur) bei einem tatsächlich nicht den Erwartungen entsprechenden Systemverhalten. Erste

Untersuchungen zu den mit dieser Konzeption infolge zusätzlicher Auffahrungen und Offenhaltung von Grubenbauen verbundenen sicherheitstechnischen Auswirkungen sind Gegenstand der vergleichenden Analysen in den Teilprojekten VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod. Das Einlagerungskonzept ist auf die Streckenlagerung beschränkt. Eine Bohrlochlagerung in tiefen Bohrlöchern, die eher mit einem Endlager in einem Salzstock verbunden ist, wird nicht betrachtet. Die Referenzendlager werden vergleichend im Salinargebirge und im Tonsteingebirge positioniert.

Im Rahmen der Teilprojekte VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod werden damit nachstehende Entsorgungskonzepte bearbeitet:

- VP 5.1 Tiefenlager mit sofortigem Verschluss im Salinargebirge (1-söhliges Referenzendlager),
- VP 5.2 Tiefenlager mit sofortigem Verschluss im Tonsteingebirge (1-söhliges Referenzendlager),
- VP 6.7mod Tiefenlager mit längerfristigem Monitoring vor endgültigem Verschluss sowohl im Salinargebirge wie auch im Tonsteingebirge (2-söhliges Referenzendlager).

Im Rahmen dieser Bearbeitung sind zahlreiche numerische Simulationen anhand von Referenzmodellen mit hier daher zunächst exemplarischem Charakter durchgeführt worden, die Einsicht geben in die thermisch-hydraulisch-mechanische Entwicklung eines Tiefenlager-/Endlagersystems. Das erarbeitete Simulationsinstrumentarium ist vor dem Hintergrund der damit geschaffenen Simulationmöglichkeiten multiphysikalisch / prozessbezogen als herausragend und mit Blick auf die Prognose der unter verschiedenen Rahmenbedingungen ablaufenden fluiddynamischen Prozesse sicherheitstechnisch als bedeutsam anzusehen. Exemplarische Ergebnisse sind bereits in den vorstehenden Abschnitten ausführlich diskutiert worden. Die in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod durchgeführten numerischen Simulationen zu den in Endlagersystemen im Salinargebirge bzw. im Tonsteingebirge ablaufenden fluiddynamischen Prozessen betrachten im Rahmen einer umfangreichen Variationsanalyse verschiedene Endlagersystementwicklungen, z.B. eine ausbleibende, moderate oder relativ starke Behälterkorrosion, unterschiedliche Barriereigenschaften der geologischen und geotechnischen Barrieren oder die Existenz nicht entdeckter geologischer Schwächezonen. Die rechnerischen Simulationen dieser Variationsanalyse sind grundsätzlich deterministisch angelegt. Die erarbeiteten fluiddynamischen Simulationsergebnisse werden über eine in den verwendeten FTK-Simulator implementierte Schnittstelle zur weiteren Bearbeitung an das ENTRIA-Teilprojekt VP 5.3 übergeben, wobei insbesondere die Strömungsdaten der fluiden Phasen in Raum und Zeit von Interesse sind, da die auftretenden Fluidströmungen zu einem advektiv getragenen Transport von Radionukliden aus dem Endlager heraus führen können. Im Rahmen des ENTRIA-Teilprojekts VP 5.3 werden daher basierend auf den übergebenen Strömungsdaten weitergehende Radionuklidtransportsimulationen ausgehend vom Ort der Radionuklidfreisetzung im Bereich der eingelagerten Abfallbehälter über das Endlagernahfeld in das Endlagerfernfeld und dann weiter bis in die Biosphäre durchgeführt, zu denen der FTK-Simulator selbst derzeit noch nicht in der Lage ist. Diese Radionuklidtransportsimulationen werden entsprechend *BMU (2010)* im Rahmen einer Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse durchgeführt und sind daher nicht deterministisch, sondern unter angemessener Begrenzung des Realisierungsumfangs semi-probabilistisch angelegt.

Mit Hilfe der vorgenommenen exemplarischen physikalischen Modellierungen und rechnerischen Simulationen für ein Endlager im Salinargebirge und im Tonsteingebirge ohne und mit längerfristiger Überwachung in der Nachverschlussphase werden Grundlagen geschaffen, die zu der Ableitung von Vor- und Nachteilen dieser Entsorgungsoptionen aus naturwissenschaftlich-technischer Sicht beitragen.

Bereits einleitend erläutert worden ist, dass ein wesentliches Ziel des ENTRIA-Forschungsprojekts in der interdisziplinären Analyse von Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe hinsichtlich ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile sowie darauf aufbauend auch in der Entwicklung von Bewertungsgrundlagen für einen umfassenden Vergleich dieser Entsorgungsoptionen besteht. Nach *Kreusch & Neumann (2015)* könnte ein derartiger Vergleich der Entsorgungsoptionen auf Basis von so genannten Sicherheitsfunktionen erfolgen, wie es auch bereits im Forschungsprojekt VerSi vorgeschlagen wurde, dort allerdings noch beschränkt auf den Vergleich von Endlagersystemen im Salinargebirge bzw. im Tonsteingebirge, hier dann um weitere Wirtsgesteinsformationen (Kristallingestein, Ton), die Anordnung einer Monitoringphase nach Beendigung der Einlagerungsphase in einem geologischen Tiefenlager sowie die Option der längerfristigen oberflächennahen Zwischenlagerung erweitert. Damit sind im Rahmen des ENTRIA-Forschungsprojekts u.a. geeignete Sicherheitsfunktionen für alle zu betrachtenden Entsorgungsoptionen zu definieren und hinsichtlich ihrer Relevanz und Robustheit zu analysieren. Die Bearbeitung dieser Aufgabe ist im Rahmen des ENTRIA-Teilprojekts TP 4.3 geplant.

Im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Reststoffe in tiefen geologischen Formationen ist nach *BMU (2010)* [...] *entscheidend für die Zuverlässigkeit des langzeitsicheren Einschlusses ein robustes Barrierensystem, bei dem die Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen unempfindlich sind, das Verhalten des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gut prognostizierbar ist und die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen unempfindlich sind.*

Die in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod durchgeführten Arbeiten tragen mit Blick auf die Entsorgung der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen ohne bzw. mit vorab implementierter Möglichkeit zur auch längerfristigen Rückholbarkeit der Abfälle und einem Monitoring auch nach Beendigung des Einlagerungsbetriebes in mehrfacher Hinsicht bei zur Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen mit sehr hoher Relevanz. Als Beiträge sind hier zu nennen

- die Verbesserung des Verständnisses zum langfristigen Systemverhalten von Endlagersystemen im Salinargebirge und im Tonsteingebirge, insbesondere im Hinblick auf die im Endlagerbergwerk sowie im umgebenden Wirtsgestein ablaufenden fluiddynamischen Prozesse, insbesondere auch unter Berücksichtigung des Einflusses einer Überfahrungssole auf die Funktionalität der geologischen und geotechnischen Barrieren. Dabei wird in Erweiterung zu den in der VSG durchgeführten Arbeiten nicht nur das Endlagerbergwerk als Röhrensystem abstrahiert betrachtet, sondern im Sinne eines Globalmodells auch die umgebende Wirtsgesteinsformation mit den dort in Raum und Zeit ablaufenden insbesondere thermischen und fluiddynamischen Prozessen,
- die Analyse von bereits verfügbaren Funktionalmodellen und darauf aufbauend die Verbesserung dieser Funktionalmodelle bzw. die Entwicklung neuartiger Funktionalmodelle zur Abstraktion ausgewählter Prozessabläufe im Rahmen von numerischen TH2M-gekoppelten Analysen,

- die Analyse komplexer TH2M-gekoppelter Prozesse unter endlagerrelevanten Einwirkungen anhand von Lokalmodellen, die charakteristische Komponenten eines Endlagers abbilden,
- die Verbesserung des Verständnisses zu ausgewählten physikalischen Prozessen, die in Endlagersystemen im Salinargebirge bzw. im Tonsteingebirge zu erwarten sind und die als relevant bei der Bewertung der langfristigen Funktionalität der geologischen und geotechnischen Barrieren angesehen werden, durch retrospektive Analysen von in der nationalen und internationalen Literatur veröffentlichten und dafür geeigneten Laborversuchen und Felduntersuchungen sowie durch die Durchführung eigener zusätzlicher laborativer Untersuchungen und
- die Entwicklung und Implementierung weiterer Stoffmodellansätze in das zur physikalischen Modellierung und rechnerischen Simulation der ablaufenden Prozesse eingesetzte Simulationsinstrumentarium (FLAC^{3D}-TOUGH2-Simulator) sowie
- die Verifikation und Validation dieses erweiterten Simulationsinstrumentariums.

Die vorstehend genannten Beiträge sollen zusammenfassend mit dazu beitragen, durch Verbesserung der Zuverlässigkeit physikalischer Modellierungsansätze sowie numerischer Simulationswerkzeuge und durch ein vertieftes Systemverständnis die Voraussetzungen zu schaffen für die technisch-wissenschaftliche Akzeptabilität von Endlagersystemen in tiefen geologischen Formationen.

Die zunächst interdisziplinär angelegten Forschungsarbeiten leisten auch einen Beitrag zur transdisziplinären Ausrichtung des ENTRIA-Projekts. Entsprechend Bild 6.1 sollte neben der

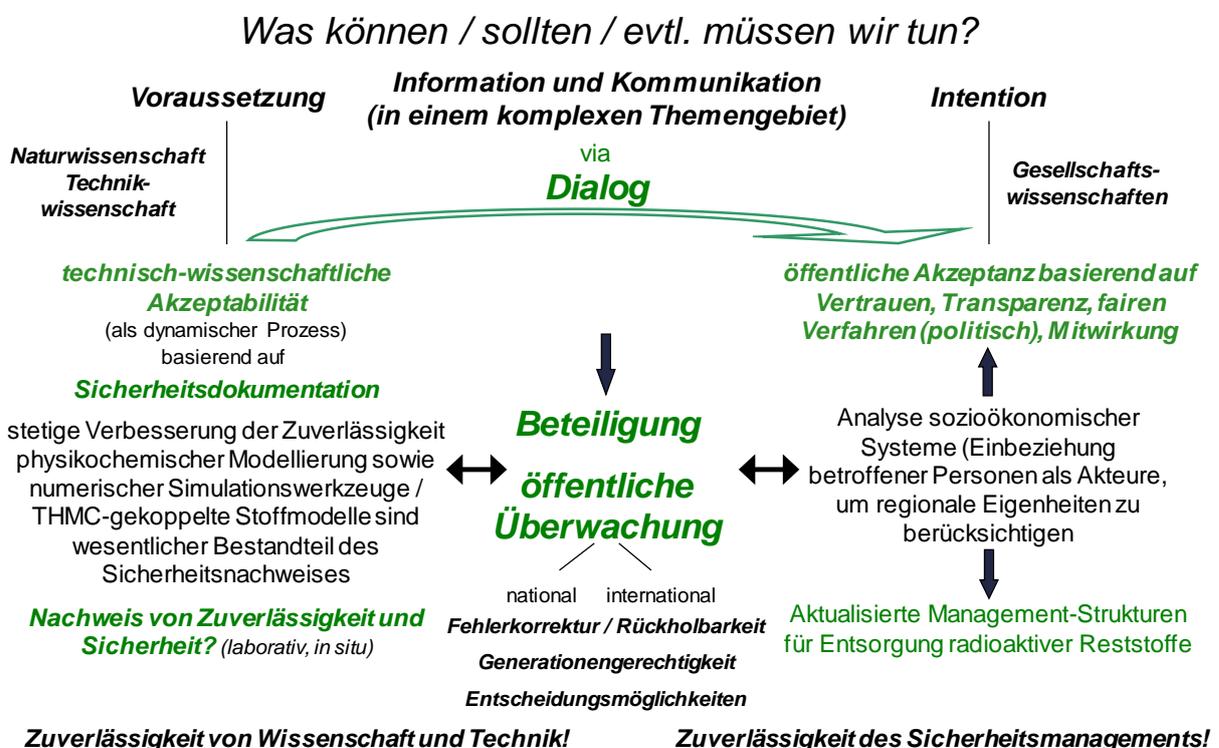


Bild 6.1 Interaktion von Natur- und Technikwissenschaften mit Gesellschaftswissenschaften

technisch-wissenschaftlichen Akzeptabilität im Rahmen eines Dialogs mit der von einem Endlager betroffenen Bevölkerung durch Information und Kommunikation, aber auch durch Beteiligungsmöglichkeiten z.B. im Rahmen einer begleitenden, von der lokalen Öffentlichkeit mitgetragenen Überwachung der Arbeiten zu Errichtung, Betrieb und Stilllegung sowie endgültigem Verschluss des Endlagers auch eine öffentliche Akzeptanz basierend auf Vertrauen, Transparenz sowie einem fairen und eine angemessene Partizipation vorsehenden Verfahren angestrebt werden. In diesem Zusammenhang kann das bislang erarbeitete Prozess- und Systemverständnis eingebracht werden in den Dialog mit der von einem Tiefenlager / Endlager betroffenen Bevölkerung, insbesondere bei der gemeinsam zu führenden Diskussion zur Implementierung von Fehlerkorrektur-Möglichkeiten in die Anlagenplanung und die damit verbundene Ausarbeitung von konfigurativen Grundlagen für eine Monitoringkonzeption. Um diesen Diskurs auf eine hinreichend zuverlässige Grundlage zu stellen, sind weitere numerische Simulationen, aber auch laborative Untersuchungen der als relevant eingeschätzten physikalischen Prozesse durchzuführen. Allerdings kann von der bestehenden Grundlage ausgehend zunächst ein generisch basierter Dialog Technik – Zivilgesellschaft begonnen werden. Ziel sollte es sein, unter den Prämissen von Sicherheit, Gerechtigkeit, Vertrauen und Überprüfung einen auf breite Akzeptanz ausgerichteten, wissenschaftlich basierten und transdisziplinär organisierten Implementierungsprozess für ein HAW-Endlager zu konzipieren. Dieses Konzept sollte bereits vor Beginn des Standortauswahlprozesses in seinen zentralen Komponenten zusammen mit Vertretern der Zivilgesellschaft erarbeitet und in die Öffentlichkeit kommuniziert werden.

7 Literaturverzeichnis

- 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 FI4W-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., Rutqvist, J., Birkholzer, J.T., Wolters, R., Rutenberg, M., Zhao, J. & Lux, K.-H. (2014)*: Comparison of two modeling procedures to evaluate thermal-hydraulic-mechanical processes in a generic salt repository for high-level nuclear waste. Presentation and Paper at the 48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium.
- Blanco Martín, L., Wolters, R., Rutqvist, J., Lux, K.-H. & Birkholzer, J.T. (2015a)*: 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., Rutenberg, M. & Zhao, J. (2015b)*: Three-dimensional modeling of a heater test to investigate crushed salt reconsolidation and rock salt creep for the underground disposal of heat-generating nuclear waste. Presentation and Paper at the 13th International Congress on Rock Mechanics.
- Blanco Martín, L., Wolters, R., Rutqvist, J., Lux, K.-H. & Birkholzer, J.T. (2015c)*: Coupled modelling of the Thermal Simulation for Drift Emplacement underground test. Presentation and Paper at the 8th Conference on the Mechanical Behavior of Salt.
- 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.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2010)*: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (Stand: 30.09.2010).
- Darcy, H. (1856)*: Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris 1856.
- 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 (2016)*: Zwischenbericht 2013-2015 – Ergebnisse, Arbeitsstand und Leistungsbilanz.
- Fourier, J.B.J. (1822)*: Théorie analytique de la chaleur. Paris 1822.
- Grunwald, A. (2005)*: Zur Rolle von Akzeptanz und Akzeptabilität von Technik bei der Bewältigung von Technikkonflikten. Theorie und Praxis 14(2005)3, S. 54-60.
- Hassel, T. (2015)*: Erstellung von generischen Behältermodellen. Präsentation beim 4. ENTRIA-Jahrestreffen.
- Itasca (2013)*: FLAC^{3D} – 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.
- Kreusch, J. & Neumann, W. (2015)*: Transversalprojekt Interdisziplinäre Risikoforschung, Arbeitspaket Interdisziplinäre Risikoforschung: Ermittlung von Robustheitsdefiziten bei Sicherheitsfunktionen – beispielhafte Vorgehensweise. Präsentation beim 4. ENTRIA-Jahrestreffen.
- Lux, K.-H. (2013)*: Präsentation zum ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 24.-26.04.2013.
- Lux, K.-H., Düsterloh, U., Wolters, R., Birkholzer, J.T., Rutqvist, J. & Blanco Martín, L. (2014a)*: THM-coupled processes in rock salt with special attention to two-phase flow. Presentation at the 5th US/German workshop on salt repository research, design, and operation.
- Lux, K.-H., Wolters, R. & Zhao, J. (2014b)*: Risikolandschaft und erste Gedanken zu einer Operationalisierung in Bezug auf den Vergleich der Entsorgungsoptionen. Internes Positionspapier (Stand: 19.11.2014).
- Lux, K.-H., Wolters, R. & Düsterloh, U. (2015a)*: Konsistente TH2M-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., Rutenberg M., Seeska, R., Feierabend, J. & Düsterloh, U. (2015b)*: Kopplung der Softwarecodes FLAC^{3D} 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., Düsterloh, U., Wolters, R., Zhao, J., Rutenberg, M. & Feierabend, J. (2017)*: TH2M-basierte Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge – Ein Beitrag zur Verbesserung der Robustheit von Sicher-

heitsfunktionen mit sehr hoher Relevanz im Rahmen der Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen. Lehrstuhlbericht zu den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod, Clausthal-Zellerfeld (in Vorbereitung).

Nagra (2002): Project Opalinus Clay – Models, Codes and Data for Safety Assessment. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Technical Report 02-06, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra).

Navarro, M. (2013): Die vereinfachte Berechnung der Konvergenzrate salzgrusverfüllter Hohlräume im Steinsalz. GRS-307.

Navarro, M. & Eckel, J. (2016): TOUGH2-GRS. Version 1. User Manual. GRS-403.

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 4561/50, Auftragsnummer 9M 23220020, Colenco Power Engineering AG. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS).

Rutqvist, J. & Tsang, C.F. (2004): A fully coupled three-dimensional THM analysis of the FEBEX in situ test with the rocmas code: prediction of THM behaviour in a bentonite barrier. Coupled thermos-hydro-mechanical-chemical processes in geo-systems, Elsevier.

Stahlmann, J., Leon-Vargas, R. & Mintzloff, V. (2015): Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung. ENTRIA-Arbeitsbericht-03, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig.

StandAG (2013): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG).

Stelte, N. (1985): Analytische Approximation der Konvergenzrate salzgrusversetzter und unter hydraulischem Druck stehender Hohlräume im Salzgestein. Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Abschlussbericht, Fachband 15: Einzeluntersuchungen zur Radionuklidfreisetzung aus einem Modellsalzstock, Vol. 15, S. 108-141, 1985.

Storck, R., Birthler, 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.

VerSi (2010): Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen – Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik. Abschlussbericht des Forschungsprojekts VerSi – Teilprojekt „Evaluierung der Vorgehensweise“ mit dem Förderkennzeichen 3607R02589.

VSG – Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K. & Vogel, P. (2012a): Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286.

VSG – Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Wolf, J., Czaikowski, O. & Wieczorek, K. (2012b): Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 2: Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-288.

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.