

Projektgruppe Asse: Beratungsleistungen für BMUB bei der Aufsicht über Betrieb und Stilllegung der Schachtanlage Asse II

Vorhaben UM13A03505

Abschlussbericht über die Arbeiten der Projektgruppe
im Zeitraum Februar 2013 bis Januar 2016

Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau
und Reaktorsicherheit (BMUB)

Darmstadt,
15.04.2016

Berichterstatter für die Projektgruppe

Dipl.-Geol. Stefan Alt
Öko-Institut e.V.

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

info@oeko.de
www.oeko.de

Projektpartner:

Institut für Aufbereitung, Deponietechnik
und Geomechanik (IFAD) der TU
Clausthal

Brenk Systemplanung GmbH CDM Smith Consult GmbH

Projektpartner:

**Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und
Geomechanik (IFAD) der TU Clausthal**
Erzstraße 20
38678 Clausthal-Zellerfeld

Brenk Systemplanung GmbH
Heider-Hof-Weg 23
52080 Aachen

CDM Smith Consult GmbH
Am Umweltpark 3-5
44793 Bochum

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Zusammenfassung	9
1. Veranlassung	11
2. Themenfeld gebirgsmechanische Modellierung	12
2.1. Ausgangssituation	13
2.2. Datenqualität und Informationsstand zu Projektbeginn	14
2.3. Laborative Untersuchungen zur Ergänzung der Datengrundlage	15
2.4. Numerische Untersuchungen anhand von quasi-dreidimensionalen 36-m-Streifenmodellen	17
2.4.1. Analysen der historischen Entwicklung des Grubengebäudes	17
2.4.2. Rechenfall "Konvergenz nach instantaner Flutung"	19
2.4.3. Bereichsspezifische Konvergenz im Szenario „instantanes Absaufen“	21
2.4.4. Einfluss des Carnallititbaufelds an der Nordflanke und des Steinsalz-Baufelds im Sattelnern im Szenario „instantanes Absaufen“	22
2.4.5. Einfluss der Kriechfähigkeit bei niedrigen Beanspruchungszuständen im Szenario „instantanes Absaufen“	24
2.5. Entwicklung eines geometrisch-tektonisch vereinfachten Modells der westlichen Asse-Südflanke	26
2.6. Weiterentwicklung der Modelle hin zu echt-dreidimensionalen Modellstrukturen	30
2.6.1. 3D-Visualisierung und Diskretisierung	30
2.6.2. Optimierung von Rechenleistung und Arbeitsabläufen, Diskretisierungskonzeption	31
2.6.3. Modelltechnische Behandlung der Störungszonen im Deck- und Nebengebirge	34
2.6.4. Physikalische Modellierung des Materialverhaltens von Gebirge und Versatz	35
2.6.5. Erstellung der 3D-Berechnungsmodelle für die westliche Hälfte der Südflanke	39
2.7. Numerische Simulationen mit dem 3D-Modell Asse Westteil	42
2.8. Weiterentwicklung zu einem 3D-Gesamtmodell Asse	43
2.9. Zum Projektende erreichter Stand	49
3. Themenfeld Quellterm-Modellierung	51
3.1. Ausgangssituation	51
3.2. Analyse existierender Modelle	51
3.3. Entwicklung des Kompartimentmodells	53
3.4. Grundannahmen zu den zu berücksichtigenden Eigenschaften von Grubengebäude und Inventar	56
3.4.1. Geometrische Annahmen	56

3.4.2.	Permeabilitätsannahmen	58
3.4.3.	Hohlraumkonvergenz	59
3.4.4.	Gasbildung	60
3.4.5.	Inventar und radioaktiver Zerfall	61
3.4.6.	Auf- und Umlösungsprozesse	61
3.4.7.	Löslichkeitsgrenzen und Rückhalt von Radionukliden im Grubengebäude	62
3.4.8.	Radioaktiver Zerfall	63
3.5.	Ergebnisse aus der Modellierung von Szenarien eines raschen Absaufens der Asse	63
3.6.	Zum Projektende erreichter Stand	67
4.	Themenfeld Modellierung des Transports im Deckgebirge und der radioökologischen Konsequenzen in der Biosphäre	68
4.1.	Ausgangssituation	68
4.2.	Untersuchung der Wirkung von Einzelmaßnahmen der Notfallplanung	69
4.3.	Modellierung des Transports im Deckgebirge und der radioökologischen Konsequenzen	73
4.3.1.	Modellkonzept	73
4.3.2.	Entwicklung einer analytischen Lösung zur schichtweisen Modellierung des Transports im Deckgebirge	75
4.3.3.	Transportbeeinflussende Effekte innerhalb des Deckgebirges	78
4.3.3.1.	Geologische und hydrogeologische Informationen zum Deckgebirge	78
4.3.3.2.	Dispersion beim Transport durch das Deckgebirge	79
4.3.3.3.	Sorption beim Transport durch das Deckgebirge	80
4.3.3.4.	Kolloidaler Transport	81
4.3.3.5.	Effekt erhöhter Salinität	82
4.3.3.6.	Induzierte Mobilisierung	82
4.3.3.7.	Gekoppelte Migration	83
4.3.4.	Radionuklidtransport im Modell	83
4.3.5.	Radionuklidtransfer in der Biosphäre – Aspekte der Lebensgewohnheiten und Expositionsprofile	85
4.4.	Parameterunsicherheiten	88
4.5.	Beispielhafte Berechnungen zur Demonstration der Wirkung relevanter Einflussgrößen	89
4.6.	Zum Projektende erreichter Stand	90
5.	Themenfeld Betrieb	92
6.	Schlussbemerkungen	93
	Literaturverzeichnis	96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Stoffmodell <i>Lux/Wolters</i> – prinzipieller Aufbau und zu ermittelnde Materialparameter	16
Abbildung 2-2:	Versuchsprogramm für Laboruntersuchungen an Steinsalz und Kalisalzproben aus der Asse (Stand Projektanfang 2013)	16
Abbildung 2-3:	Versuchsprogramm für Laboruntersuchungen an Steinsalz- und Kalisalzproben aus der Asse	17
Abbildung 2-4:	Vergleich von Messwerten aus vier Extensometermessstellen auf der 700-, 574- und 553-m-Sohle und im 36-m-Scheibenmodell modellierten Pfeilerstauchungsraten der 700-m-Sohle und der 595-m-Sohle	18
Abbildung 2-5:	Simulation der Pfeilerstauchungsraten im 36-m-Scheibenmodell bei Annahme eines instantanen Absaufens	20
Abbildung 2-6:	Konvergenz (kumulativ) nach dem Absaufen, gegliedert nach Bergwerks-Sohlen	22
Abbildung 2-7:	Versatzdruckaufbau für das Carnallititbaufeld ohne und mit Carnallitit-Auflösungen – an in-situ Bedingungen angepasste Messwerte für einen feuchten Versatz entsprechend /IFG 2006/ und Annäherung für die rechnerischen Simulationen	23
Abbildung 2-8:	Stationäre Kriechrate in Abhängigkeit von der Vergleichsspannung bei verschiedenen Ansätzen	25
Abbildung 2-9:	Bandbreite der Ergebnisse bei Variation der Kriechfähigkeit des Steinsalzes im Bereich niedriger Beanspruchungen	26
Abbildung 2-10:	Geometrisch-tektonisch vereinfachtes Berechnungsmodell	27
Abbildung 2-11:	Schematischer Ablauf des Programms zur Abbildung eines Jahres	28
Abbildung 2-12:	Primärspannungszustand im GTV-Modell	29
Abbildung 2-13:	Glättung der räumlichen Geometrie der Asse-Südflanke	30
Abbildung 2-14:	Definition von Teilmodellen der Asse-Südflanke und des Asse-Salzgebirges	32
Abbildung 2-15:	Mögliche Übergangselemente im 3D-Raum	33
Abbildung 2-16:	Prinzip der "Übergangs"- und "Attach"-Elemente zur Verknüpfung von Teilmodellen	33
Abbildung 2-17:	Prinzip der variablen Diskretisierungsoptionen für Störungszonen im Deckgebirge	35
Abbildung 2-18:	Einflussfaktoren und Eigenschaften der Homogenbereiche	36
Abbildung 2-19:	Alternative Vorgehensweise zur Modellierung der Entfestigungsprozesse	37
Abbildung 2-20:	Verkürzung der Rechenzeiten bei ähnlich guter Näherung der Modellergebnisse	38
Abbildung 2-21:	Modellierung der Entfestigungsprozesse mit der alternativen Vorgehensweise: exemplarische Vergleich von Messwerten aus vier Extensometermessstellen auf der 700-, 574- und 553-m-Sohle und modellierten Pfeilerstauchungsraten der 700-m-Sohle und der 595-m-Sohle	39

Abbildung 2-22:	Berechnungsmodell 3D-BM-1: 3D-Modell für die westliche Hälfte der Südflanke	41
Abbildung 2-23:	Realisierte Teilmodelle des 3D-Modells für westliche Hälfte der Südflanke	41
Abbildung 2-24:	Vergleich mit charakteristischen in situ-Messwerten (Pfeilerstauchungsrate), 3D-Modell Asse Westteil	42
Abbildung 2-25:	Modellierung der durch einen Deckgebirgsblock hervorgerufenen Verschiebungen	43
Abbildung 2-26:	3D-Zeichnung zum geotektonischen Aufbau des Gebirges sowie zur Geometrie des untertägigen Hohlraumsystem	44
Abbildung 2-27:	3D-Zeichnung zur Digitalisierung der Baufelder des Grubengebäudes	45
Abbildung 2-28:	3D-Zeichnung zur Digitalisierung der Störungszonen im Nebengebirge	45
Abbildung 2-29:	Teilmodell-Bereiche im 3D-Berechnungsmodell für die gesamte Südflanke	46
Abbildung 2-30:	Berechnungsmodelle für die halbe westliche bzw. die halbe östliche Asse-Südflanke sowie die gesamte Asse-Südflanke	47
Abbildung 2-31:	Vergleich von numerischen Ergebnissen anhand des 3D-Gesamtmodells mit den in situ-Messwerten für die Pfeilerstauchungsraten	48
Abbildung 3-1:	Prinzipieller Aufbau eines Kompartiments	53
Abbildung 3-2:	Beispielhafte Zusammenfassung von Bereichen der 750-m-Sohle zu Modellkompartimenten	54
Abbildung 3-3:	Schematischer Aufbau ("Schaltbild") eines möglichen Kompartimentmodells der Asse-II-Südflanke	55
Abbildung 3-4:	Kompartimente der 750-m-Sohle	57
Abbildung 3-5:	Beispielhafte Aufteilung der 750-m-Sohle in Kompartimente und Verbindungen	58
Abbildung 3-6:	Näherungsweise mathematische Umsetzung der Konvergenzrate, beispielhaft für die 750-m-Sohle zur Implementierung in das Kompartimentmodell, Referenzfall	60
Abbildung 3-7:	Gasbildung in der abgesoffenen Asse nach /NRG et. al. 2005/	61
Abbildung 3-8:	Ergebnis der Kompartimentmodellierung: Ausgepresste Lösungsmenge, Referenzfall (Variante (1))	64
Abbildung 3-9:	Ergebnis der Kompartimentmodellierung: Ausgepresste Lösungsmenge, bei erhöhter Konvergenzrate und erhöhter Gasbildungsrate (Variante (3))	64
Abbildung 3-10:	Beispielhafte Darstellung der Freisetzung eines idealen Tracers aus den Modellkompartimenten (Variante (1))	65
Abbildung 3-11:	Austrag von Tracern mit der aus der Grube ausgepressten Lösung (Variante (1))	66
Abbildung 4-1:	Beispiel für den Vergleich verschiedener Umsetzungsgrade der Notfallplanung: Maximale effektive Dosis durch Tc-99 für einige ausgewählte Szenarien der LAW-Einlagerungsbereiche, Altersgruppe ≤ 1 Jahr, nach Berechnungsgrundlagen Bergbau	70

Abbildung 4-2:	Beispiel für die dosisbestimmenden Nuklide: Szenario „Basisfall“, Übertrittsstelle 2, Altersgruppe ≤ 1 Jahr, Lebensgewohnheiten nach AVV zu § 47 StrlSchV	71
Abbildung 4-3:	Kopplung der Modellteile	74
Abbildung 4-4:	theoretischer Ansatz der schichtweisen analytischen Modellierung	75
Abbildung 4-5:	Dispersiv-konvektive Migration in einem 3-Schichten Fall, Kd-Wert in der Schicht von 80 m bis 120 m ist 0,1 ml/g, sonst 0 ml/g	77
Abbildung 4-6:	Dispersiv-konvektive Migration in einem 3-Schichten Fall, Kd-Wert in der Schicht von 80 m bis 120 m ist 1 ml/g, sonst 0 ml/g	77
Abbildung 4-7:	Schematisierter Querschnitt durch das Deckgebirge im Bereich der Südflanke	79
Abbildung 4-8:	Expositionspfade zur Dosisberechnung ausgehend von kontaminiertem Grundwasser	85
Abbildung 4-9:	Expositionspfade	88
Abbildung 6-1:	Gesamtmodellkonzept zur Modellierung der radiologischen Konsequenzen eines Absaufens der Schachtanlage Asse II	94

Zusammenfassung

Im Rahmen des BMUB-Vorhabens UM13A03505 hat sich eine Projektgruppe, bestehend aus Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern von Öko-Institut e.V. Darmstadt, dem Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik an der TU Clausthal, der Brenk Systemplanung GmbH aus Aachen und der CDM Smith Consult GmbH aus Bochum mit methodischen Fragestellungen im Zusammenhang mit der Konsequenzenanalyse eines Absaufens der Schachanlage Asse auseinander gesetzt. Als zentrale Ergebnisse wurden dabei eine Reihe von Modellen entwickelt und erprobt, daneben wurden Entwicklungen und Erkenntnisse während des laufenden Betriebs der Schachanlage reflektiert. Im Detail sind die hierbei vorgenommenen Entwicklungen und erzielten Ergebnisse in den Berichten der Projektpartner dokumentiert. Der vorliegende Bericht gibt Verlauf und Ergebnisse der Arbeiten im Vorhaben UM13A03505 zusammenfassend wieder.

Die Arbeiten der TU Clausthal haben zu einem numerisch stabilen und rechentechnisch ausgefeilten Modellpaket zur gebirgsmechanischen Analyse der Schachanlage Asse und dem sie umgebenden Gebirge geführt, mit dem sowohl die historische Entwicklung des Bergwerks nachvollzogen werden kann als auch plausible Prognosen des zukünftigen Tragverhaltens im trockenen und abgesoffenen Zustand berechnet werden können. Dabei berücksichtigt das am weitesten entwickelte komplexe 3D-Modell auch die wesentlichen dreidimensionalen Asymmetrien, ist also nicht mehr auf vereinfachende Symmetrieüberlegungen angewiesen. Durch laborative Untersuchungen wurde darüber hinaus die Datenbasis für die im Modell implementierten Stoffgesetze und Materialparameter für zukünftige Modellierungen verbessert.

Die Brenk Systemplanung GmbH hat ein komplexes Kompartimentmodell zur Ermittlung von Freisetzungsuelltermen aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge erstellt, in dem das Grubengebäude der Schachanlage Asse II mit derzeit etwa 120 Kompartimenten abgebildet ist. Mit dem Kompartimentmodell lassen sich unter verschiedenen Annahmen Quellterme der Radionuklidfreisetzung herleiten. Diese Quellterme beschreiben den zeitlichen Verlauf der Radionuklidfreisetzung nach einem Volllaufen der Schachanlage Asse. Das Modell ist dabei in der Lage, durch unterschiedliche Parametrisierung der Modellkompartimente und der Verbindungen zwischen ihnen auch unterschiedliche Zustände des Grubengebäudes und variable Annahmen zu Inventaren und zur Gasbildung abzubilden.

Das Öko-Institut hat ein Modellpaket zur radioökologischen Konsequenzenanalyse eines Radionuklideintrags aus der Schachanlage Asse in die Biosphäre entwickelt, bestehend aus einem Transportmodell für den Transport der Radionuklide durch das Asse-Deckgebirge, und einem Expositionsmodell zur Abschätzung potenzieller Dosen für Referenzpersonen aus der Nutzung von radionuklidkontaminiertem Grundwasser. Ausgangspunkt sind Quellterme des Kompartimentmodells oder wahlweise andere Quellterme wie das stark vereinfachte Rührkesselmodell. Dabei können sowohl maßgebliche Wirkfaktoren entlang des Transportwegs, wie hydraulische Parameter und Sorptionsparameter, als auch Transferpfade und Verzehrgeohnheiten für die Dosisermittlung betrachtet und variiert werden. Hiermit wurde ein Instrument geschaffen, mit dem die langfristigen radiologischen Konsequenzen einer Freisetzung von Radionukliden aus der Schachanlage Asse II abgeschätzt werden können.

Es war explizit nicht Aufgabe des Vorhabens UM13A03505, eine Szenarienanalyse, geschwiege denn eine Sicherheitsanalyse, zur Schachanlage Asse vorzulegen, sondern eine methodische Grundlage zu schaffen für eine Konsequenzenanalyse, von den gebirgsmechanischen Randbedingungen über die Bildung von Quelltermen, den Radionuklidtransport im Deckgebirge bis zur Ableitung von potentiellen Strahlendosen bei Referenzpersonen.

1. Veranlassung

Bereits im Zeitraum September 2009 bis Dezember 2012 hat das Öko-Institut im Rahmen des Vorhabens UM09A03205 „Unterstützung des BMU bei der Aufsicht über Betrieb und Stilllegung der Asse“ umfangreiche Unterstützungs- und Beratungsleistungen erbracht /ÖKO 2013a/. Gegenstand der Unterstützung waren dabei die Prüfung von und Stellungnahme zu Unterlagen, Sachverhalten oder Fragestellungen, die im Zusammenhang mit Betrieb und Stilllegung der Asse von BMU oder Dritten in das Verfahren eingebracht werden. Außerdem wurden eigene Forschungsarbeiten mit Asse-spezifischen Fragestellungen im Bereich radioökologischer Modellierung durchgeführt.

BMU hat im Jahr 2010 in diesem Zusammenhang eine Projektgruppe unter Leitung des Öko-Instituts ins Leben gerufen, um Aspekte einer längerfristigen Offenhaltung der Asse zu untersuchen. Mitglieder der Projektgruppe waren außer dem Öko-Institut das Ingenieurbüro CDM Smith Consult (Bochum) und die TU Clausthal, hier der Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik am Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (IFAD) und das Institut für Endlagerforschung (IELF).

Die Projektgruppe hat sich intensiv mit betrieblichen, radioökologischen und gebirgsmechanischen Implikationen im Zusammenhang mit der Schachtanlage Asse II auseinander gesetzt. In diesem Zusammenhang wurden ein radioökologisches Modell inkl. Berücksichtigung von Deckgebirgseffekten sowie ein gebirgsmechanisches Modell zur Beurteilung der Tragfähigkeitsentwicklung der Asse-Südflanke entwickelt. Mit der Vorlage der Berichte der Projektpartner und einer Abschlussbesprechung am 06.07.2011 waren die bis dato vereinbarten Arbeiten abgeschlossen. Das Vorhaben UM09A03205 endete zum Jahresende 2012.

Mit Beauftragung des Vorhabens UM13A03505 "Projektgruppe Asse: Beratungsleistungen für BMUB bei der Aufsicht über Betrieb und Stilllegung der Schachtanlage Asse II" wurde die Arbeit der Gruppe im Zeitraum Februar 2013 bis Januar 2016 unter Leitung des Öko-Instituts fortgesetzt.

Beteiligte Institutionen und maßgebliche Bearbeiter waren:

- Öko-Institut e.V., Bereich Nukleartechnik und Anlagensicherheit, Darmstadt: Dipl.-Geol. Stefan Alt, Dipl.-Phys. Christian Küppers, Dr.-Ing. Veronika Ustohalova, Dipl.-Ing. Manuel Claus
- Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik am Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (IFAD) der TU Clausthal: Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Karl-Heinz Lux, apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Düsterloh, Dipl.-Ing. Oleksandr Dyogtyev, Dr.-Ing. Svetlana Lerche
- CDM Smith Consult GmbH, Bochum: Dr.-Ing. Christoph Pieper, Dr.-Ing. Aloys Kisse
- Brenk Systemplanung GmbH (BS), Aachen: Dipl.-Phys. Stephan Kistingner, Dipl.-Phys. Gert Hoppe

In dem Vorhaben wurden methodische Fragestellungen im Zusammenhang mit der Konsequenzenanalyse eines nicht auszuschließenden notfallbedingten Absaufens der Schachtanlage Asse während des Offenhaltungsbetriebs bearbeitet. Schwerpunkt war die methodische Weiterentwicklung des Instrumentariums der im Vorgängervorhaben UM09A03205 entwickelten Modelle zur gebirgsmechanischen und radioökologischen Modellierung mit den Zielen

- die bis dato vorhandenen Quasi-3D-Modelle zu einem dreidimensionalen Modell der Asse unter Berücksichtigung der relevanten Asymmetrien weiterzuentwickeln und die Belegsituation durch

Hinzuziehung weiterer Datenquellen und eigener laborativer Untersuchungen zu verbessern (Themenfeld gebirgsmechanische Modellierung, Schwerpunkt TU Clausthal)

- eine gegenüber dem Rührkesselmodell plausiblere und im Hinblick auf die Berücksichtigung verschiedener Anlagenzustände flexiblere Berechnung von Quelltermen für den zeitlichen Verlauf der Freisetzung von Radionukliden aus dem Grubengebäude zu entwickeln (Themenfeld Quellterm-Modellierung, Schwerpunkt Brenk Systemplanung)
- das Instrumentarium zur Modellierung der radioökologischen Konsequenzen eines Absaufens der Asse weiterzuentwickeln und unter Wahrung einer grundsätzlichen Konservativität begründbare Überkonservativitäten weiter abzubauen (Themenfeld Modellierung des Transports im Deckgebirge und der radioökologischen Konsequenzen in der Biosphäre, Schwerpunkt Öko-Institut)
- aktuelle Informationen zu Risiken bei laufendem Betrieb und Stilllegung der Asse in die Beratungen mit BMUB einzuspeisen (Themenfeld Betrieb, Schwerpunkt CDM Smith)

Insgesamt bestand das Vorhabenziel in der Weiterentwicklung von Methoden, nicht in der Durchführung von standortspezifischen Sicherheitsanalysen. Letztere Aufgabe obliegt ausschließlich dem Betreiber der Schachanlage Asse.

Der vorliegende Abschlussbericht fasst die im Projektzeitraum Februar 2013 bis Januar 2016 erzielten Ergebnisse und den zum Projektende erreichten Stand themenspezifisch zusammen. Der Bericht integriert die Inhalte der Sachstandsberichte der Jahre 2013 und 2014, gliedert sich aber stärker themenorientiert statt chronologisch. Er ist unabhängig von den Sachstandsberichten lesbar und gibt inhaltlich vollständig die im Projektverlauf bearbeiteten Themen wieder.

Wesentliche Unterlagen hierfür sind die von den teilnehmenden Instituten für ihr Themenfeld erarbeiteten Teilberichte, die den Arbeitsfortschritt umfassend und chronologisch dokumentieren. Die Berichte der teilnehmenden Institute liegen dem BMUB vor.

Der Bericht folgt thematisch der Abfolge der im Projekt bearbeiteten Prozesse, beginnend mit der gebirgsmechanischen Modellierung des Grubengebäudes und seiner Konvergenz (Kap. 2) über die Quelltermberechnung im Grubengebäude bei einem Absaufen der Asse (Kap. 3) bis zum Weg der im Zuge von Konvergenz und Gasbildung ausgepressten Radionuklide durch das Deckgebirge in die Biosphäre (Kap. 4).

Die umfangreiche projektbegleitende Berichterstattung zum Betrieb der Schachanlage wird in Kap. 5 ergänzend, aber nur kursorisch, erwähnt. CDM Smith hat diesbezüglich im Rahmen der Projektgruppensitzungen regelmäßig vorgetragen.

2. Themenfeld gebirgsmechanische Modellierung

Die Arbeiten des IFAD zur methodischen Weiterentwicklung des Instrumentariums der gebirgsmechanischen Modellierung der Asse sind in den Beiträgen des IFAD zu den regelmäßigen Projekttreffen sowie im Abschlussbericht zum "Teilbereich gebirgsmechanische Untersuchungen" /IFAD 2015/ dokumentiert, der dem BMUB zum Projektabschluss übergeben wurde. Die folgende Schilderung fasst die wesentlichen Arbeitsschritte und den zum Projektende erreichten Stand zusammen.

2.1. Ausgangssituation

Im Rahmen des Vorgängervorhabens UM09A03205 war es den Bearbeitern des IFAD der TU Clausthal gelungen, ein plausibles und numerisch stabiles gebirgsmechanisches 2D-Scheibenmodell aufzustellen und, unter Einbeziehung von Sachverhalten und Erkenntnissen aus Literatur zu vorhergehenden Untersuchungen, erste Prognosen zum Tragverhalten der Schachtanlage Asse II bei einer trockenen Offenhaltung ohne Absaufen des Grubengebäudes zu erarbeiten. Weiterhin konnten aus dem Modell erste Abschätzungen zur Konvergenz des abgesoffenen Grubengebäudes infolge eines nicht mehr beherrschbaren Lösungszutritts abgeleitet werden, die zusammen mit der Gasbildung die Auspressrate eingedrungener Lösungen aus dem abgesoffenen Grubengebäude bestimmt. Die Erfahrungen und Erkenntnisse aus dieser Bearbeitung sind die Grundlage für weitere Untersuchungen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit gebirgsmechanischer Prognosen im Zusammenhang mit der Schachtanlage Asse II. Ansatzpunkt für die Arbeiten des IFAD waren die im Rahmen der bisherigen Bearbeitung identifizierten Kenntnislücken, insbesondere was die Abbildung der räumlichen Tragwirkung betrifft, die bisher aufgrund der erforderlichen Abstraktion in den verwendeten Scheibenmodellen nicht hinreichend sichtbar wird.

Schwerpunkt der Untersuchungen des IFAD im Vorhaben UM13A03505 war es, das Berechnungsmodell lateral zu einem 3D-Berechnungsmodell zu erweitern und auf möglichst weitgehend belegter Grundlage das Tragverhalten des Grubengebäudes aktualisiert zu ermitteln, insbesondere im Hinblick auf Versagenspotential und Konvergenzverhalten unter trockenen und abgesoffenen Bedingungen.

Kenntnisdefizite bestanden und bestehen weiterhin hinsichtlich der Existenz, Lage und Eigenschaften von Störungszonen im Deckgebirge und der Materialeigenschaften der geologischen Einheiten des Deckgebirges. Diese konnten im Rahmen des Vorhabens allerdings nicht weiter reduziert werden, da betreiberseits im Projektzeitraum keine neuen Erkenntnisse zum Deckgebirgsaufbau zur Verfügung gestellt werden konnten.

In diesem Zusammenhang sollten auch Kenntnisdefizite zu standortspezifischen Materialkennwerten gezielt angegangen und reduziert werden. Diesbezüglich wurden laborative Untersuchungen zum Deformations- und Schädigungsverhalten der standortspezifischen Salinargesteine vorgenommen. IFAD hat hierzu ein Untersuchungsprogramm mit Probenmaterial aus der Asse durchgeführt. Die laborative Untersuchung von Deckgebirgsproben war optional vorgesehen, konnte aber mangels geeigneten Probenmaterials nicht durchgeführt werden.

Für die rechnerische Modellierung war vorgesehen, anstelle der bisher aus 2D-Modellen entwickelten 36-m-Scheibenmodelle einen größeren lateralen Gebirgsausschnitt (halbe bzw. ganze Südflanke) zu modellieren, um die Ausbildung und die daraus resultierenden Auswirkungen auch eines horizontalen Traggewölbes zu untersuchen, und um darüber hinaus auch heterogene Abbaugeometrien im Grubengebäude sowie zumindest im Grundsatz die Ausprägung von Störungszonen berücksichtigen zu können. Ziel war eine Entwicklung des Modells hin zu einem realitätsnäheren dreidimensionalen Modell zur Abbildung der halben bzw. ganzen Asse-Südflanke.

Wesentliche Teilziele dabei waren

- Berücksichtigung von Lastumlagerungen (Traggewölbe-Bildung) nicht nur in vertikaler, sondern nun auch in lateraler Richtung;
- Validierung des 3D-Modells anhand charakteristischer Messwerte (Pfeilerstauchungsraten);

- Erster Vergleich der Ergebnisse numerischer Untersuchungen mit weiteren zur Verfügung stehenden in situ-Messwerten;
- Numerische Simulationen zur Prognose des Tragverhaltens des Grubengebäudes in der Kurzzeitperspektive;

Plausible Abschätzung der Hohlraumkonvergenz im trocken gehaltenen bzw. abgesoffenen Zustand des Grubengebäudes, ggf. kammer-spezifisch.

2.2. Datenqualität und Informationsstand zu Projektbeginn

Die Arbeiten zur gebirgsmechanischen Modellierung bauen bezüglich der standortspezifischen Parameter auf vorhandenen bzw. im Projektverlauf verfügbar gemachten Informationen (z.B. Risswerk) und Daten auf. Lücken im Kenntnisstand wurden zunächst durch plausible Annahmen gefüllt, bis sie durch validere Daten abgelöst werden können. Gleichzeitig war zu beachten, dass ein Teil der grundlegenden Modellstrukturen im Rahmen der Modellerstellung frühzeitig festgelegt werden muss und insbesondere die geometrischen Festlegungen späteren Änderungen nur bedingt zugänglich sind.

Eine Schwierigkeit hinsichtlich der geologischen Strukturen im Bereich des Asse-Sattels besteht darin, dass die Interpolation zwischen benachbarten geologischen Querschnitten durch den Asse-Sattel nicht immer eindeutig ist bzw. dass sich nicht jede der in den Querschnitten enthaltenen Strukturen zweifelsfrei mit dem jeweils benachbarten Querschnitt in Verbindung bringen lässt. Hier waren entsprechende Interpretationen erforderlich, für die als Ausgangspunkt und zur Füllung von Darstellungslücken zur Übertragung von Informationen auf das dreidimensionale Modell hauptsächlich Informationen aus Schnitt 2 des Asse-Risswerks genutzt wurden. In diesem zentralen Schnitt sind im Vergleich zu den benachbarten Schnitten die meisten geologischen Informationen enthalten. Von Schnitt 2 aus wurden daher in benachbarten Schnitten die dort fehlenden Informationen extrapoliert und ergänzt, um eine möglichst konsistente dreidimensionale Modellstruktur zu erzeugen.

Um in den Modellen die Eigenschaften der betrachteten Materialien angemessen wiederzugeben und gleichzeitig die räumliche Variabilität dieser Eigenschaften handhabbar zu abstrahieren, wurden innerhalb der Modelle Homogenbereiche definiert, die für die jeweils enthaltene Hauptgesteinsart bzw. das enthaltene Versatzmaterial stehen und innerhalb derer die materialspezifischen Eigenschaften und Stoffmodelle homogen angewendet werden. Für die Modellrechnungen des IFAD wurden Homogenbereiche für Nebengebirgsgesteine, Salzgestein, Carnallit und Versatz definiert. Außerdem wurde das verstürzte Deckgebirge oberhalb des Salzsattels als eigener Homogenbereich ausgewiesen.

Naturgemäß am besten dokumentiert ist der Kenntnisstand zu den Salzgesteinen im Asse-Sattel. Für Salzgestein im Allgemeinen liegt zusätzlich ein großer Erfahrungsschatz aus dem Salzbergbau vor, der in den Modellen genutzt wurde. Hinsichtlich der Abbaukammern des Asse-Bergwerks wird deren Versatz durch ein versatzspezifisches Stoffmodell *C-WIPP* berücksichtigt. Die Berücksichtigung der Firstpalte ist modelltechnisch schwierig, weil ihre Höhe unterhalb der Diskretisierungsschwelle liegt und ihre Geometrie nicht gut genug bekannt ist.

Der Informationsstand hinsichtlich der Schichtenfolge unterhalb des Grubengebäudes ist sehr gering. Es ist nur ein einziger Querschnitt bekannt, der den tieferen Untergrund überhaupt schematisch zeigt (unterhalb 1000m). Grundlage dafür ist nur eine Bohrung, die diese Tiefe erreicht. Grundsätzlich ist die plausible Beschreibung auch der großräumigen Gebirgsstruktur im Liegenden des Grubengebäudes bedeutsam für den Primärspannungszustand im Modell. Die in

den verfügbaren Abbildungen dargestellte Geometrie der Gebirgsstruktur beruht damit auf i. W. den Befunden dieser Bohrung und auf weiteren Annahmen zu einem plausiblen, aber nicht genauer belegten Gebirgsaufbau.

Der stark zerblockte und gestörte Gebirgsbereich oberhalb des Salzsattels (verstärktes Deckgebirge) lässt sich aufgrund seiner komplexen und vielfältigen Störungszonengeometrie nicht im Detail in einem Modell abbilden. Hier sind modelltechnisch Grenzen gesetzt, zumal der Verlauf der einzelnen Störungszonen praktisch unbekannt ist. Um die zusätzlichen Effekte des hier vorhandenen komplexen, aber geometrisch nicht fassbaren Störungszonensystems dennoch adäquat berücksichtigen zu können, wird dieser Bereich im Modell daher als eigener Homogenbereich im Unterschied zum sonstigen, weniger tektonisierten Deckgebirge definiert, so dass das gebirgsmechanische Verhalten dieses Gebirgsbereichs durch spezifische Materialeigenschaften abgebildet werden kann. Zur Einschätzung bzw. Validierung soll der Abgleich mit den gemessenen Oberflächensenkungen oberhalb des Asse-Sattels dienen.

Das derzeitige Bild zum Aufbau und zu den Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges und zu den dort vorhandenen Störungszonen ist ebenfalls nicht gut belegt, sondern i. W. aus den vorliegenden Daten und unter Zuhilfenahme von Annahmen interpretiert. Für das gebirgsmechanische Verhalten wurden die erforderlichen Parameter aus Analogieschlüssen abgeschätzt oder plausible Annahmen auf Basis von Modellvariationen getroffen. Erkundungsmaßnahmen zur Verbesserung des Kenntnisstands zum Deckgebirge bzw. Ergebnisse solcher Untersuchungen wurden während der Projektlaufzeit nicht vorgelegt, so es diesbezüglich keine Erkenntnisgewinn für die Modellierung gab.

2.3. Laborative Untersuchungen zur Ergänzung der Datengrundlage

Zur Ergänzung der aus Drittinformationen und früher durchgeführten eigenen Untersuchungen des IFAD an Asse-Steinsalz konnte in 2013 eine größere Menge an Bohrkernen aus der Asse für standortspezifische Untersuchung der Materialparameter beschafft werden.

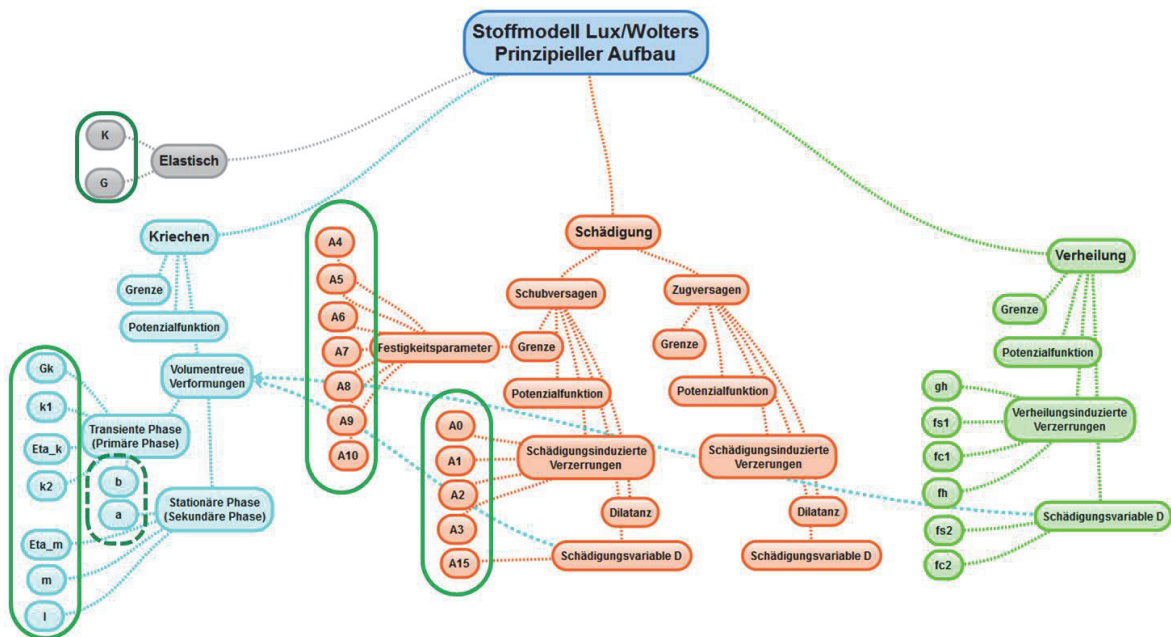
An dem Material wurden sukzessive im Rahmen von Festigkeits- und Kriechversuchen die für das Stoffmodell Lux/Wolters erforderlichen Gesteinsparameter (s. Abbildung 2-1) untersucht. Die Asse GmbH hat Bohrkernproben aus Steinsalz (zwei Varietäten: z2 und z3) und Carnallit zur Verfügung gestellt. An diesem Material wurden im gesteinsmechanischen Labor des IFAD Experimente zur Bestimmung der Festigkeitsparameter, Kriechparameter, sowie Schädigungsparameter durchgeführt.

Das zu Projektbeginn geplante und angebotene Versuchsprogramm (Abbildung 2-2) baut teilweise aufeinander auf und wurde ergebnisorientiert sukzessive an die auf die Asse bezogen relevanten Prozesse angepasst. Die aus der Modellierung folgenden Anforderungen an die Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung wurden kontinuierlich berücksichtigt (s. aktualisiertes Programm in Abbildung 2-3).

Wegen der langen Versuchsdauer konnten die Ergebnisse der Versuche im Rahmen des Vorhabens nicht unmittelbar in den rechnerischen Analysen verarbeitet werden. Sie stehen zum Projektabschluss aber für zukünftige physikalische Modellierungen und numerischen Simulationen zur Verfügung¹.

¹ Über Umfang und Ergebnisse der laborativen Untersuchungen wird das IFAD nach Projektende noch einen gesonderten Bericht vorlegen.

Abbildung 2-1: Stoffmodell Lux/Wolters – prinzipieller Aufbau und zu ermittelnde Materialparameter



Quelle: IFAD

Abbildung 2-2: Versuchsprogramm für Laboruntersuchungen an Steinsalz und Kalisalzproben aus der Asse (Stand Projektanfang 2013)

Versuchsprogramm für z3-Steinsalz:

- a) 20 Kurzzeitversuche / Festigkeitsversuche (TC/TE/UC/SZ)
- b) 10 Langzeitversuche (120d - 160d) / Kriechvermögen und Schädigung (TCc)
- c) 4 Langzeitversuche (120d - 160d) / Kriechvermögen und Schädigungsrückbildung (TCH)
- d) 3 Langzeitversuche (120d - 180d) / Kriechvermögen bei geringer Beanspruchung (UCc)
- e) 5 Langzeitversuche (120d - 180d) / Kriechvermögen bei geringer Beanspruchung (TCc)
- f) 6 Langzeitversuche (30d - 60d) / Feuchtekriechen (TCcl)

Versuchsprogramm für z2-Steinsalz:

- a) 5 Kurzzeitversuche / Festigkeitsversuche (TC/TE/UC/SZ)
- b) 2 Langzeitversuche (120d - 160d) / Kriechvermögen und Schädigung (TCc)
- c) 1 Langzeitversuche (120d - 160d) / Kriechvermögen und Schädigungsrückbildung (TCH)
- d) 3 Langzeitversuche (120d - 180d) / Kriechvermögen bei geringer Beanspruchung (UCc)
- e) 5 Langzeitversuche (120d - 180d) / Kriechvermögen bei geringer Beanspruchung (TCc)
- f) 6 Langzeitversuche (30d - 60d) / Feuchtekriechen (TCcl)

Versuchsprogramm für Kalisalz:

- a) 10 Kurzzeitversuche / Festigkeitsversuche (TC/TE/UC/SZ)
- b) 5 Langzeitversuche (120d - 160d) / Kriechvermögen und Schädigung (TCc)
- c) 2 Langzeitversuche (120d - 160d) / Kriechvermögen und Schädigungsrückbildung (TCH)
- d) 3 Langzeitversuche (120d - 180d) / Kriechvermögen bei geringer Beanspruchung (UCc)
- e) 5 Langzeitversuche (120d - 180d) / Kriechvermögen bei geringer Beanspruchung (TCc)

Quelle: IFAD

Abbildung 2-3: Versuchsprogramm für Laboruntersuchungen an Steinsalz- und Kalisalzproben aus der Asse

Standard	Festigkeits-Parameter	z3-Steinsalz	z2-Steinsalz	Kalisalz
Standard	Kriech-Parameter	z3-Steinsalz	z2-Steinsalz	Kalisalz
Standard	Schädigungs-Parameter	z3-Steinsalz	z2-Steinsalz	Kalisalz
ASSE-spezifisch	Kriech-Parameter bei σ_v niedrig	z3-Steinsalz	z2-Steinsalz	
ASSE-spezifisch	Kriech-Parameter im Nachbruch	z3-Steinsalz		

Quelle: IFAD

2.4. Numerische Untersuchungen anhand von quasi-dreidimensionalen 36-m-Streifenmodellen

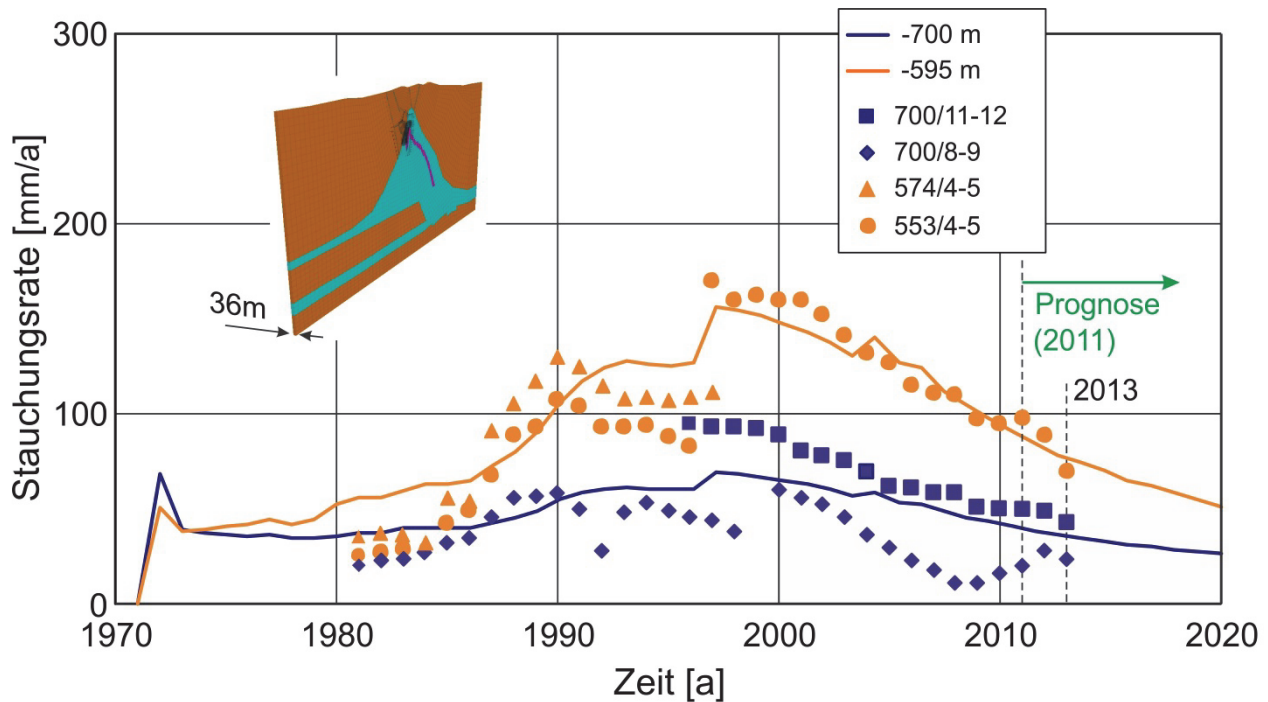
2.4.1. Analysen der historischen Entwicklung des Grubengebäudes

Bereits im Rahmen des Vorgängervorhabens UM09A03205 wurden umfangreiche numerische Voruntersuchungen anhand von quasi-dreidimensionalen 36 m-Streifenmodellen durchgeführt, die als Grundlage in Bezug auf den Verständnisaufbau zum Systemverhalten dienen. Mit diesen Modellen wurden erste Re-Analysen zu der historischen Entwicklung des Grubengebäudes (Auffahrungsphase, Entfestigungsphase, Verfüllungs- und Restabilisierungsphase) sowie erste Prognosen zum Tragverhalten und zum Konvergenzverhalten für den Fall des offen gehaltenen Grubengebäudes /IFAD 2011a/ und für den Fall eines abgesoffenen Grubengebäudes /IFAD 2011a/ erarbeitet.

Bei der Simulation der historischen Entfestigungsprozesse wurde zeitlich zwischen der Phase von 1918-1971 (Zeitraum der Auffahrung der Abbaukammern und des offenen Grubengebäudes) und 1971 bis heute (Zeitraum nach Auffahrung aller Hohlräume, Gebirgsentfestigung inkl. Schwebenbrüche, Versatz von Abbaukammern) unterschieden. Vergleichsgrößen zur Beurteilung der Modellergebnisse sind dabei die in der Asse beobachteten oder gemessenen Befunde zu unterschiedlichen geomechanisch relevanten Parametern wie Pfeilerstauchungsraten oder Gebirgsspannungen und Versatzdrücke. Diese Parameter werden mit ihrem räumlich-zeitlichen Verlauf als Indikatoren für die Bewertung der Übereinstimmung der rechnerischen Befunde des Modells mit den tatsächlich ablaufenden Prozessen im Asse-Sattel angesehen. Zentral wurden hierbei die aus Extensometermessungen hergeleiteten Pfeilerstauchungsraten mit modellierten Pfeilerstauchungsraten aus dem quasi-dreidimensionalen 36-m-Streifenmodell verglichen. Die hierzu ausgewählten Messstellen liegen in der Nachbarschaft des dem Streifenmodell zugrunde liegenden Schnitts 2 aus dem Asse Risswerks. Zwischen den Messstellen und dem

Modellquerschnitt befinden sich nach derzeitigem Kenntnisstand keine steil stehenden Störungszonen, die die Übertragbarkeit der Messwerte auf den Modellquerschnitt und damit die Vergleichbarkeit in Frage stellen würden.

Abbildung 2-4: Vergleich von Messwerten aus vier Extensometermessstellen auf der 700-, 574- und 553-m-Sohle und im 36-m-Scheibenmodell modellierten Pfeilerstauchungsraten der 700-m-Sohle und der 595-m-Sohle



Projekt: ASSE II Parameter: $\varepsilon_{vol} = 1,7\%$, $\rho_{Versatz} = 1180 \text{ kg/m}^3$, $E_{Versatz} = 16 \text{ MPa}$
 Modell: BM-Asse V4_SP/3D Pfeiler-Versatz 10% Restporosität (Schwebenbruch ab 1971)

Quelle: IFAD

Die Ergebnisse dieser ersten numerischen Untersuchungen am Streifenmodell zeigen bereits eine im Grundsatz gute Übereinstimmung der Modellkurven mit den Messergebnissen (s. Abbildung 2-4). Unter dem Vorbehalt eines weiterhin gleichartigen Tragverhaltens, also ohne weitere, das derzeitige Tragsystem nachhaltig verändernde zusätzliche Einwirkungen, kann ein derart historisch validiertes Modell dann auch für, je nach Grad der noch bestehenden Ungewissheiten zumindest orientierende, Prognoserechnungen zur zukünftigen Entwicklung verwendet werden. Der zentrale Ansatz ist also, eine möglichst zuverlässige Prognose des Tragverhaltens auf Basis einer in sich konsistenten Simulation der Vergangenheit herzuleiten und dabei neu hinzukommende Daten sukzessive für eine weitere Validierung der prognostischen Aussage heranzuziehen.

Am Beispiel in Abbildung 2-4 kann gezeigt werden, dass die bereits an Messreihen bis zum Jahr 2010 validierten rechnerischen Simulationen und die daraus entwickelte Prognose auch mit jüngeren Daten der Jahre 2011-2013 gut übereinstimmen. Das Scheibenmodell läuft bis zum Jahr 2100 numerisch nachvollziehbar und stabil und zeigt dabei keine methodischen Inkonsistenzen.

Insoweit sich das Tragverhalten der Asse nicht nachhaltig ungünstig verändert, z. B. durch zunehmende Durchfeuchtung bereits entfestigter Gebirgsbereiche, und das Tragverhalten daher

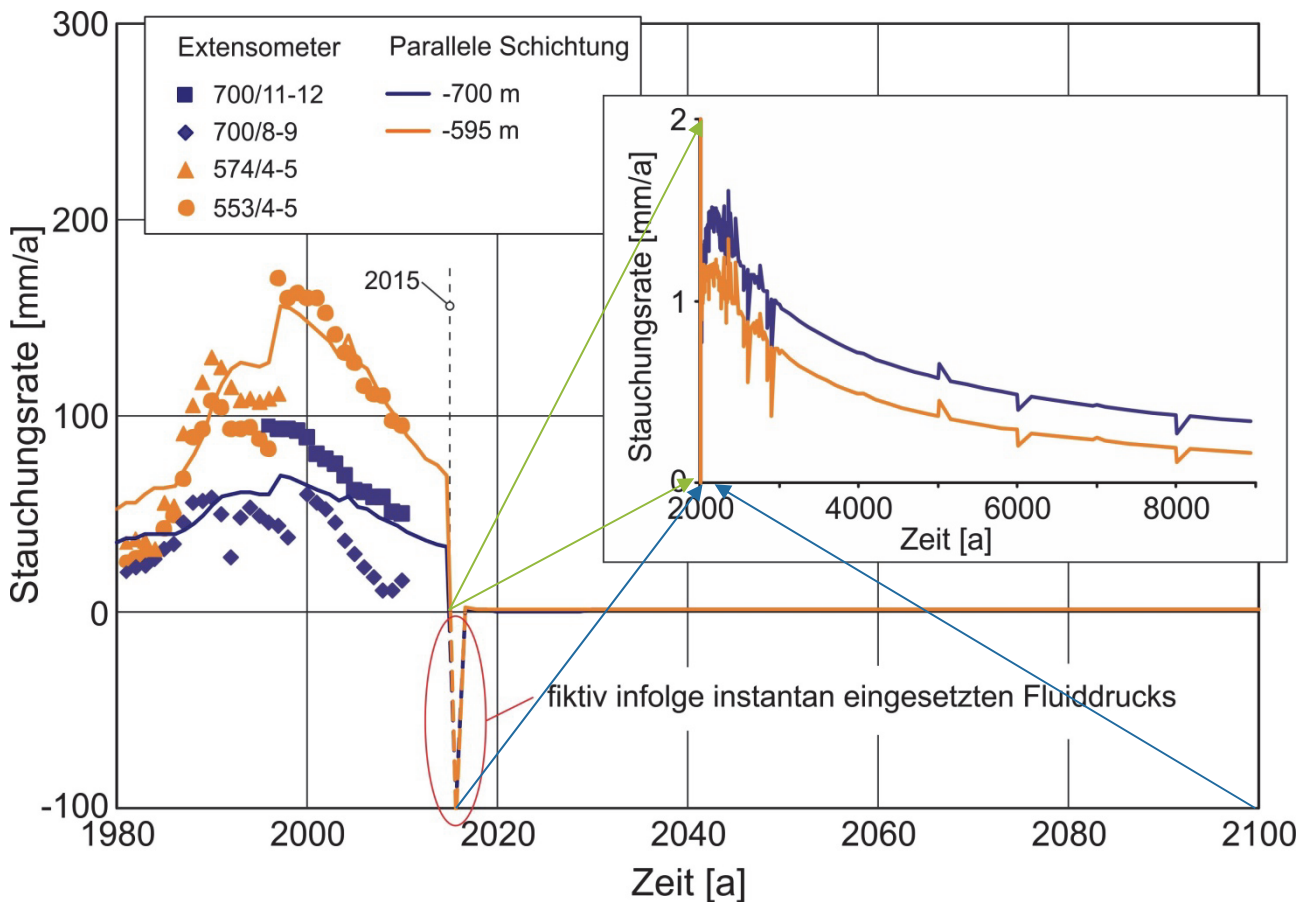
im Modell plausibel abgebildet wird, zeigen die Berechnungen auch in der Prognose weiterhin rückläufige Pfeilerstauchungsraten, also eine Fortsetzung der derzeit bereits zu beobachtenden Tendenzen mit einer grundsätzlichen Re-Stabilisierung des Tragsystems. Diese grundsätzliche Re-Stabilisierung schließt allerdings nicht aus, dass in einzelnen Bereichen weiterhin auch Entfestigungs- und damit De-Stabilisierungsprozesse noch fortschreiten, die dann zur Gewährleistung der bergbaulichen Sicherheit spezielle zusätzliche Sicherungsmaßnahmen erforderlich machen.

2.4.2. Rechenfall "Konvergenz nach instantaner Flutung"

Mögliche gebirgsmechanische Konsequenzen aus einem gefluteten Zustand der Asse (z.B. nach einem nicht mehr beherrschbaren Lösungszutritt und kontrollierter (Gegen-)Flutung oder einem nicht mehr kontrollierbaren Absaufen) wurden in einem ersten Szenario "instantanes Absaufen" orientierend modelliert. Dabei wurde ab einem willkürlich gesetzten Zeitpunkt quasi spontan der sich aufbauende Fluidruck als instantan in den Modellhohlräumen angesetzt und seine Auswirkung auf die Pfeilerstauchungsraten berechnet und dargestellt. Zusätzlich berücksichtigt wurde die Durchfeuchtung des Steinsalzes im Umfeld des Grubengebäudes, also das Verhalten des Steinsalzes unter dem Einfluss von Feuchtigkeit in den entsprechenden Gebirgsbereichen bei gleicher mechanischer Beanspruchung. In diesen Bereichen wird ein bis zu fünffach schnelleres Kriechen angenommen. Der tatsächliche zeitliche Verlauf eines unbeherrschbaren Lösungszutritts des Grubengebäudes (Szenario "sukzessives Absaufen") wurde dabei zunächst noch nicht berücksichtigt. Der Fluidruck als Gegendruck zur Konvergenz führt im Modell erwartungsgemäß unmittelbar zu einer starken Abnahme der Pfeilerstauchungsraten auf Werte von anfänglich unter 2 mm/a (gegenüber derzeit einigen 10er mm/a an den betrachteten Messpunkten), die in den Folgejahren noch weiter zurückgehen.

In Abbildung 2-5 wurde zur Illustration der Zeitpunkt des Absaufens willkürlich auf das Jahr 2015 gesetzt. Die Grafik zeigt deutlich die unmittelbar zu erwartenden Änderungen der Pfeilerstauchungsraten. Zu besserer Visualisierung des nach dem Absaufen in der Hauptgrafik nicht mehr sichtbaren modellierten Verlaufs der Pfeilerstauchungsraten enthält die Grafik eine zusätzliche Abbildung mit angepasstem Maßstab der Ordinate und verlängerter Abszisse.

Abbildung 2-5: Simulation der Pfeilerstauchungsraten im 36-m-Scheibenmodell bei Annahme eines instantanen Absaufens



Quelle: IFAD

Die auch im lösungserfüllten Bergwerk weiterhin, wenn auch signifikant langsamer wirkende Konvergenz der Hohlräume kann in einen zeitlichen Verlauf von Auspressraten übersetzt werden. Dieser wiederum lässt sich als Parameter für die radioökologische Modellierung nutzen. IFAD hat dafür die Ergebnisse aus dem quasi-dreidimensionalen 36-m-Streifenmodell als erste Annäherung auf die gesamte Breite der Südflanke hochgerechnet. Die tatsächliche dreidimensionale Struktur in der lateralen Ausdehnung des Grubengebäudes ist hierbei noch nicht berücksichtigt. Die Zahlenwerte können daher zunächst nur als eine erste orientierende Näherung für die zu erwartenden Größenordnungen angesehen werden.

Ohne Berücksichtigung einer zusätzlichen Gasbildung aus den Abfällen liegt die konvergenzgetriebene Auspressrate in der Modellrechnung anfänglich zwischen 200 und 300 m³/a. Übt die Gasbildung aus den Abfällen (hier zahlenmäßig übernommen aus einer älteren Abschätzung der ISTec) einen zusätzlichen Fluidruck im Grubengebäude aus, so steigt die gesamte Auspressrate anfänglich auf Werte über 800 m³/a, sinkt dann aber mit nachlassender Gasbildung nach Überschreitung des Maximums in den folgenden Jahrzehnten wieder stark ab. Im Modell lagen die zeitlichen Verläufe der Auspressraten mit und ohne Berücksichtigung der Gasbildung nach etwa 1.500 Jahren wieder übereinander, für die folgende langfristige Betrachtung konnte aus dem Modell heraus in der ersten Einschätzung eine mittlere Auspressrate um 50 m³/a abgeschätzt werden.

2.4.3. Bereichsspezifische Konvergenz im Szenario „instantanes Absaufen“

Mit dem in 2014 erreichten Entwicklungsstand der gebirgsmechanischen Modellierung war es möglich, parallel zur weiteren räumlich-geotektonischen Entwicklung des 3D-Modells auch aus grundsätzlichen Überlegungen und mit Hilfe der numerischen Simulationen anhand des quasi-dreidimensionalen Streifenmodells bereits erste orientierende Hinweise auf das mögliche Verhalten des Bergwerks im Falle des Absaufens mit den nachfolgenden Prozessen zu erarbeiten. Dabei ist hervorzuheben, dass in dieser ersten orientierenden Einschätzung die mit dem Absaufen einhergehenden und destabilisierend wirkenden Prozesse noch nicht umfassend implementiert sind.

In Weiterentwicklung der bereits in Kap. 2.4.2 abgeschätzten integralen Konvergenz im Fall des Absaufens, sind zusätzlich in einer zweiten orientierenden Einschätzung bereichsspezifische Konvergenzraten als Eingangsgröße für die Quelltermmodellierung (s. Kap. 3) näherungsweise berechnet, wesentliche Einflussfaktoren festgestellt und ihre Auswirkung auf das Konvergenzverhalten untersucht worden.

Vor allem von Bedeutung ist dabei der Einfluss der Kriechfähigkeit des Steinsalzes im Bereich niedriger Beanspruchungen sowie der Effekt der Carnallitit-Umlösung (s.a. IFAD 2011/) und daraus folgender Hohlraumneubildung. Die sich daraus ergebenden Bandbreiten in den numerisch ermittelten Konvergenzraten wurden für die Quelltermmodellierung im Kompartimentmodell des Partners Breck Systemplanung bereitgestellt.

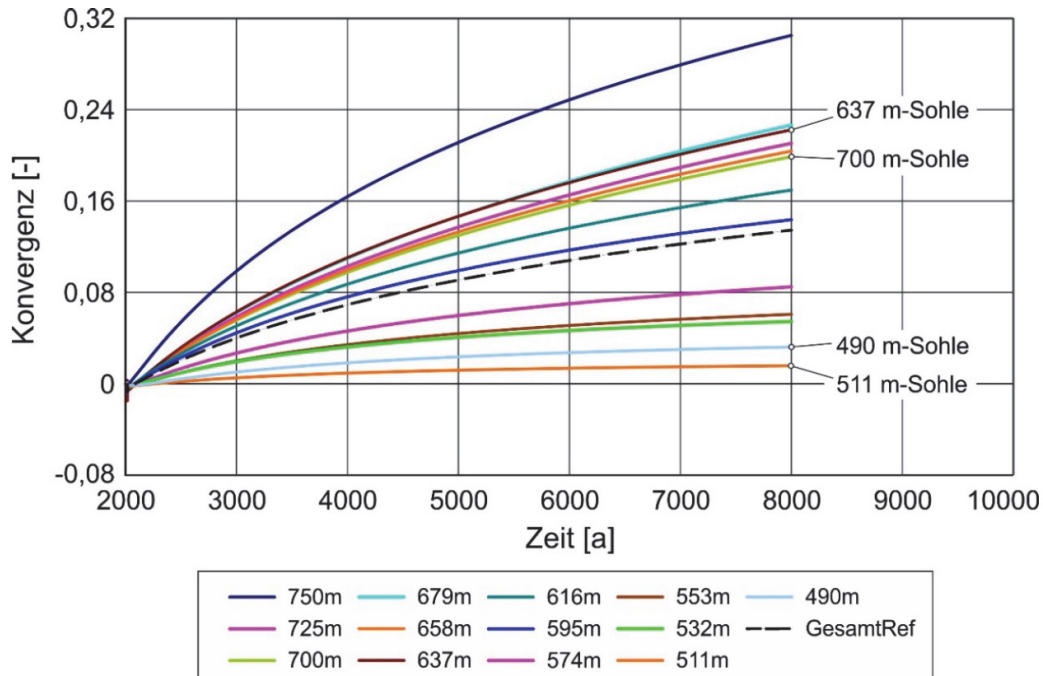
Aus den bisherigen Untersuchungen des IFAD in dem vorhandenen Streifenmodell wurde zunächst als stilisierter Ansatz für einen unbeherrschbaren Lösungszutritt das Szenario eines instantanen Absaufens betrachtet, ohne dabei den zeitlichen Verlauf des Absaufvorgangs (Dauer, Zeitablauf des Pegelanstiegs und dabei Volumenänderung durch Umlösung im Carnallititgebirge) zu berücksichtigen. Absaufen bedeutet dabei hinsichtlich der Konvergenz einerseits, dass der Fluiddruck der Hohlraumkonvergenz entgegenwirkt. Andererseits wird das Steinsalz im Umfeld des Grubengebäudes durchfeuchtet. Dabei werden seine Kriecheigenschaften hin zu größeren Kriechraten verändert. Die im Modell angesetzten Kriechparameter erzeugen unter dem Einfluss von Feuchtigkeit bei gleicher mechanischer Beanspruchung ein bis zu fünffach schnelleres Kriechen.

Als ein wesentliches Ergebnis der Simulation konnte festgestellt werden, dass die Konvergenzraten nicht systematisch mit der Tiefe zunehmen, sondern offenbar zu einem gewissen Teil auch durch spezifische Merkmale der einzelnen Sohlen geprägt sind. So ist die Konvergenzrate der 637-m-Sohle höher als die der 700-m-Sohle, die der 490-m-Sohle höher als die der 511-m-Sohle (s. Abbildung 2-6). Als erste Interpretation dieser Beobachtung bietet sich an anzunehmen, dass der sekundäre Gebirgsdruck im Gegensatz zum primären Gebirgsdruck nicht kontinuierlich und linear in Abhängigkeit der Tiefe zunimmt, sondern eine deutlich abweichende Verteilung aufweist, die vor allem mit Verschiebungen der durch Störungszonen definierten Gebirgsblöcke im Nebengebirge verbunden ist.

Die Größenordnung der Hohlraumkonvergenz nach dem Absaufen kann zunächst in Summe angegeben werden. Dabei werden mittelfristig Gesamtauspressraten von unter 100 m³/a prognostiziert, was bereits zu einem deutlichen Abbau von Konservativität um zwei bis drei Größenordnungen gegenüber älteren Annahmen (s. zum Vergleich z.B. /GRS 2009/: 10.000 m³/a) führt. Dabei zu beachten ist allerdings, dass es sich auf Grund der noch bestehenden Ungewissheiten in den geomechanischen Randbedingungen hierbei um Abschätzungen handelt, die zwar in einer plausiblen Größenordnung liegen, bei denen aber mit Blick auf die Realität insbesondere Abweichungen nach oben nicht ausgeschlossen werden können. Sie sind also nicht

als konservativ im Sinne einer sicheren (sicherheitsgerichteten) Konvergenzabschätzung anzusehen.

Abbildung 2-6: Konvergenz (kumulativ) nach dem Absaufen, gegliedert nach Bergwerks-Sohlen



Quelle: IFAD

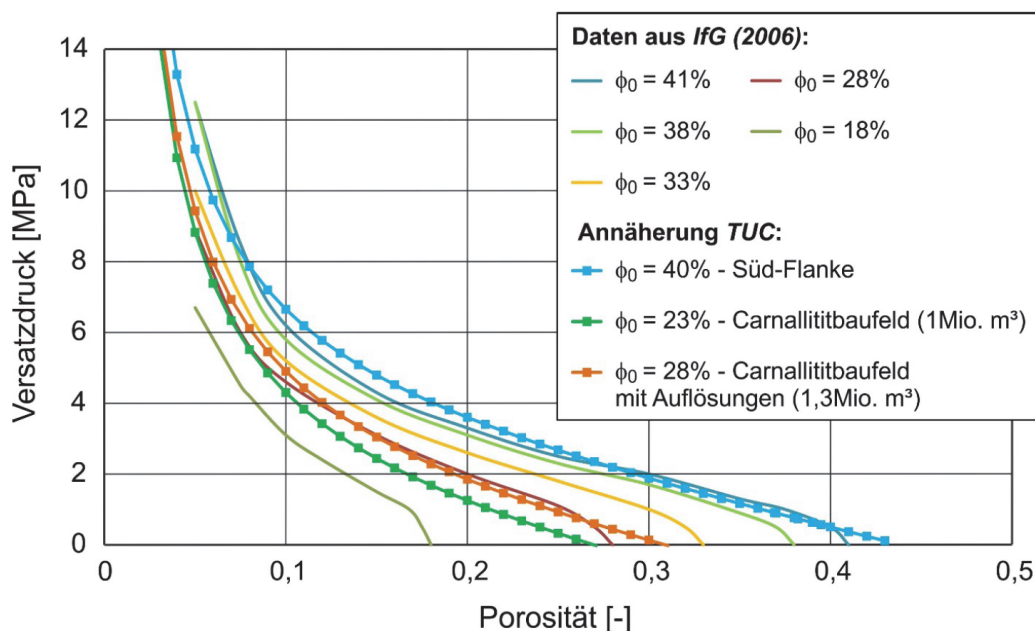
2.4.4. Einfluss des Carnallititbaufelds an der Nordflanke und des Steinsalz-Baufelds im Sattelkern im Szenario „instantanes Absaufen“

Eine im Modell bis dato noch nicht umfassend enthaltene Fragestellung, die für den Fall eines unbeherrschbaren Lösungszutrittes relevant wird, betrifft den Einfluss des Carnallititbaufelds an der Nordflanke auf das Tragsystem der Südflanke und insbesondere die Veränderungen im Tragsystem, die sich hierbei aus Umlösungsprozessen des Carnallitits ergeben können. Das versetzte Carnallititbaufeld befindet sich im Teufenbereich 710 bis 750 m. Das Bruttohohlraumvolumen, ohne Berücksichtigung von Auf- und Umlösungen in der Umgebung des Carnallititbaufelds, beträgt rd. 1 Mio. m³. Werden die aus der Auf- und Umlösung des Carnallititbaufeld im Fall eines unbeherrschbaren Lösungszutrittes resultierenden Volumina hinzu gerechnet, vergrößert sich das Hohlraumvolumen beim Absaufen auf schätzungsweise rd. 1,3 Mio. m³. Zum Vergleich: Im Steinsalz-Abbaufeld der Südflanke beträgt das Brutto-Hohlraumvolumen ca. 3.4 Mio. m³.

Um den Einfluss der Hohlraumbildung im Bereich des Carnallititbaufelds bei einem Absaufen der Asse im bestehenden quasi-dreidimensionalen Streifenmodell abzubilden, wurde die Modelldiskretisierung soweit verfeinert, wie die bereits bestehende Diskretisierung des eigentlich bereits zum Fernfeld der Süd-Flanke gezählten Carnallititgebirges diesen nachträglichen Eingriff in die geometrische Konfiguration ermöglichte. Als Restporosität des versetzten Carnallititbaufelds ohne Umlösungen wurde, ausgehend von Literaturdaten /IFG 2006/, ein Mittelwert von 23 % angesetzt. Für die neu implementierten auf- bzw. umgelösten ehemaligen Gebirgsbereiche wurde

eine Anfangsporosität von 45 % angenommen, so dass sich für den Fall eines Carnallititbaufelds mit Umlösungen eine mittlere Restporosität von 28 % ergibt. Die zur Simulation des Tragverhaltens erforderlichen Versatzdruckkennlinien für die beiden Variationen sind Abbildung 2-7 zu entnehmen. Für die Materialeigenschaften des Carnallitits wurde ein gegenüber Steinsalz erhöhtes Kriechverhalten angesetzt. Dabei zeigte sich, dass ein neu in das Berechnungsmodell implementierter Hohlraum im Bereich des Carnallititgebirges für die Südflanke gegenüber den Verschiebungsbeiträgen aus der Nordrichtung tendenziell dämpfend wirkt, während die aus dem Deckgebirge in die Südflanke eingetragenen Lasten natürlich weiterhin wirken.

Abbildung 2-7: Versatzdruckaufbau für das Carnallititbaufeld ohne und mit Carnallitit-Auflösungen – an in-situ Bedingungen angepasste Messwerte für einen feuchten Versatz entsprechend /IFG 2006/ und Annäherung für die rechnerischen Simulationen



Quelle: IFAD

Insgesamt führt die Berücksichtigung des versetzten Carnallititbaufelds an der Nordflanke im Szenario „instantanes Absaufen“ im Modell daher zu einer Verringerung des durch Konvergenz verfügbaren Auspressvolumens in der Südflanke um etwa 13 %. Als ein Effekt aus der Konvergenz des Carnallititbaufelds ohne Umlösungen vergrößert sich im Gesamtsystem das Auspressvolumen um 31 %. Als gemeinsamer Effekt aus dem Porenvolumen und der im Carnallitit durch Umlösung entstehenden weiteren Hohlräume vergrößert sich dann im Gesamtsystem das Auspressvolumen um 49 %. Dieser Vergleich der Auspressvolumina wurde zum Zeitpunkt $t=8.000$ a durchgeführt.

Analog zum Carnallititbaufeld wurde in einer ersten Näherung auch für das Satteln-Baufeld (Steinsalz Na₂) eine Abschätzung zu seiner Auswirkung auf die Konvergenz mit einer vergleichsweise groben Diskretisierung vorgenommen. Das versetzte Sattelnbaufeld stellt ein Bruttohohlraumvolumen von etwa 0,5 Mio. m³ dar. Es wurde, ebenso wie das Carnallititbaufeld, in erster Annäherung erst ab dem Jahr 2015 im numerischen Modell berücksichtigt. Die Restporosität von 33% und der Versatzdruckaufbau wurden hier entsprechend den Daten aus /IFG 2006/ angesetzt.

Bei der Gesamtbetrachtung der Volumenänderungen ergibt sich, dass das System Süd-Flanke/Carnallitit-Baufeld gegenüber einer alleinigen Betrachtung der Süd-Flanke eine um 31 % höhere Volumenveränderung aufweist. Bei dem System Süd-Flanke/Carnallititbaufeld/Sattelkern-Na2-Baufeld wird die Volumenänderung oder Konvergenzrate gegenüber der alleinigen Betrachtung der Südflanke um 40 % größer.

2.4.5. Einfluss der Kriechfähigkeit bei niedrigen Beanspruchungszuständen im Szenario „instantanes Absaufen“

Für den Einflussfaktor Kriechfähigkeit bei niedriger Beanspruchung ($\sigma_v < 8 \text{ MPa}$) wurde eine Parameterstudie für einen Referenzfall (*modLubby2* mit $a = 3$), für einen Erfahrungswert aus dem Kavernenbau (*modLubby2* mit $a = 1$ als Obergrenze) und für einen Grenzwert, bei dem der stationäre Teil im Stoffmodell *modLubby2* dem Stoffmodellansatz nach *Norton* entspricht (*modLubby2* mit $a = 4$ als Untergrenze), durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass mit diesen Stoffmodell-Parametervariationen bei Beanspruchungszuständen, wie sie in der Asse im Zeitraum der Entfestigung auftreten, die stationäre Kriechrate mit den verschiedenen Ansätzen ähnlich gut beschrieben werden kann, während für deutlich niedrigere Belastungszustände, wie sie im Fall des Absaufens zu konstatieren sind, die stationäre Kriechrate je nach Stoffmodellansatz um mehrere Größenordnungen variieren kann (Abbildung 2-8). Hier fehlen empirische Daten aus Laborexperimenten oder Langzeitbeobachtungen, da die Dynamik von Deformationsvorgängen bei niedrigen Beanspruchungszuständen so langsam abläuft, dass entsprechende Experimente und Versuchsbefunde bis dato nicht in einem hinreichenden Umfang verfügbar sind.

Die Auswertung der Berechnungsbefunde zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach einem Absaufen zeigt, dass der Einflussfaktor des Kriechverhaltens bei geringer deviatorischer Beanspruchung die größte Bandbreite in den Konvergenzen verursacht (bis zu einem Faktor von 9 bei Variation zwischen $a=1$ und $a=4$, s. Abbildung 2-9). Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass dieser Effekt für die Konvergenz unmittelbar nach dem Absaufen groß ist, dann aber deutlich abnimmt. Der Unterschied wird langfristig immer geringer, weil bei einer höheren Kriechfähigkeit des Salzgebirges ein stabilisierender Versatzdruck früher aufgebaut wird und sich später daher nicht mehr so intensiv ändern kann, während bei einer niedrigeren Kriechfähigkeit des Salzgebirges ein stabilisierender Versatzdruck mit einer anfangs im Vergleich niedrigeren und später höheren Intensität verläuft. Aus der Sicht der Langzeitprognose bedeutet dieses Ergebnis, dass der Faktor Kriechfähigkeit gerade zu Beginn der Entwicklung nach einem Absaufen einen großen Einfluss auf die Lösungsauspressung durch Konvergenz hat, dieser Einfluss langfristig aber immer mehr abnimmt.

Zusammenfassend konnten aus den Ergebnissen der vorstehend beschriebenen numerischen Untersuchungen als Grundlage für die Kompartimentmodellierung des Partners Brenk Systemplanung erste Näherungen und Abschätzungen für

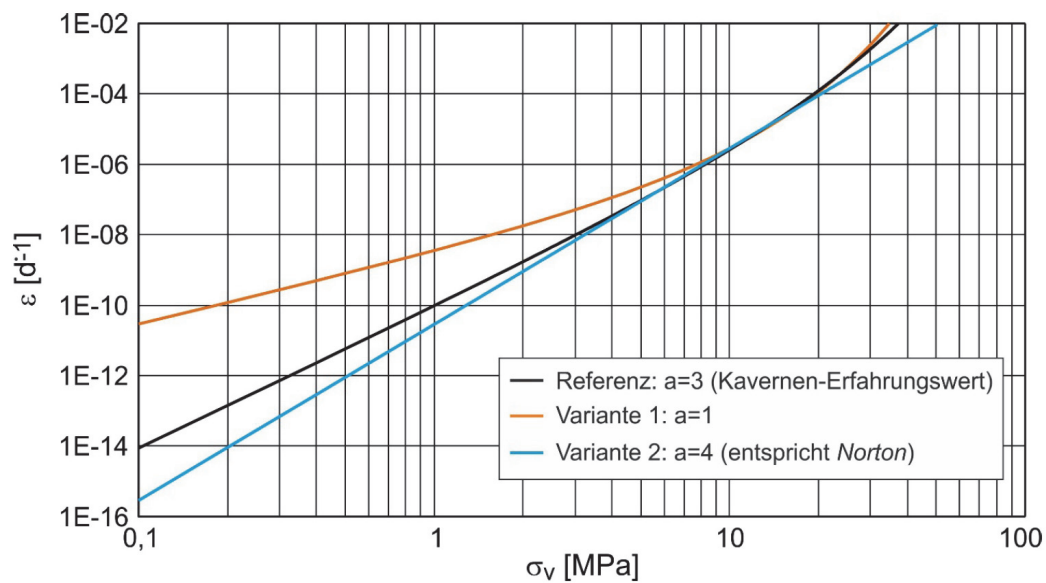
- die sohlenweise Konvergenz des Baufeldes in der Südflanke,
- das Konvergenzverhalten des Carnallititbaufelds und des Sattelkern-Baufeldes sowie
- zum Einfluss der Kriechfähigkeit bei niedriger Beanspruchung und des Versatzdruckaufbaus

bereitgestellt werden /IFAD 2014/.

Diese Abschätzungen können als erste orientierende Näherung für die zu erwartenden Größenordnungen angesehen werden. Allerdings ist dabei ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass

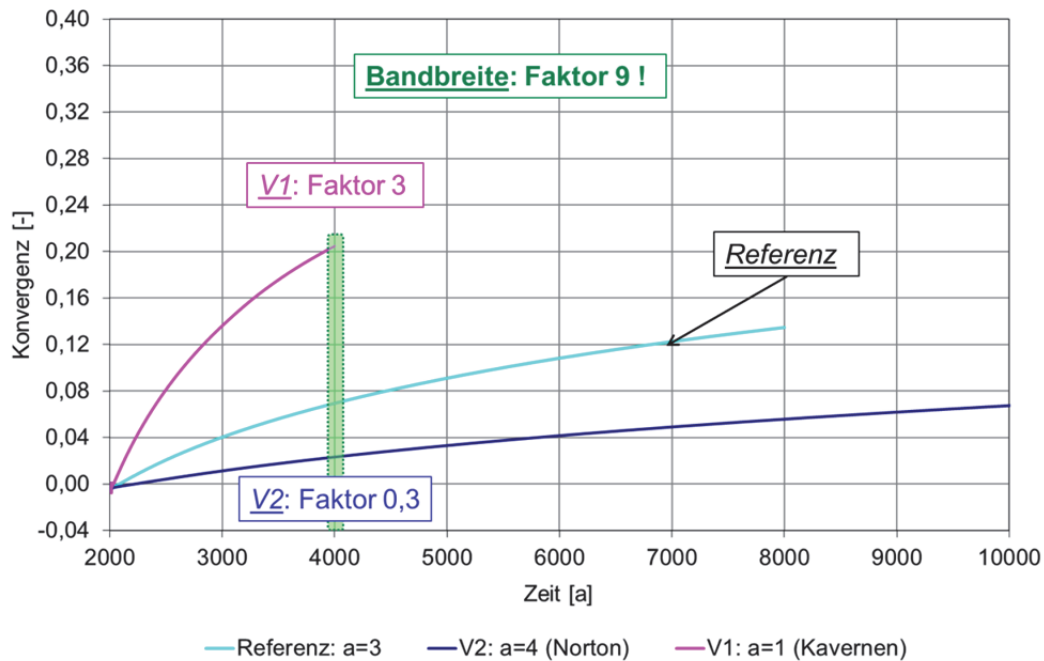
bei der Weiterverarbeitung dieser Daten zu beachten ist, dass derzeit stark vereinfachende geometrische und geotektonische Annahmen in die Simulationsmodelle implementiert sind und noch erhebliche Datendefizite bestehen. Die erhaltenen Zahlenwerte könnten vielleicht als optimistische Untergrenze eingeschätzt werden.

Abbildung 2-8: Stationäre Kriechrate in Abhängigkeit von der Vergleichsspannung bei verschiedenen Ansätzen



Quelle: IFAD

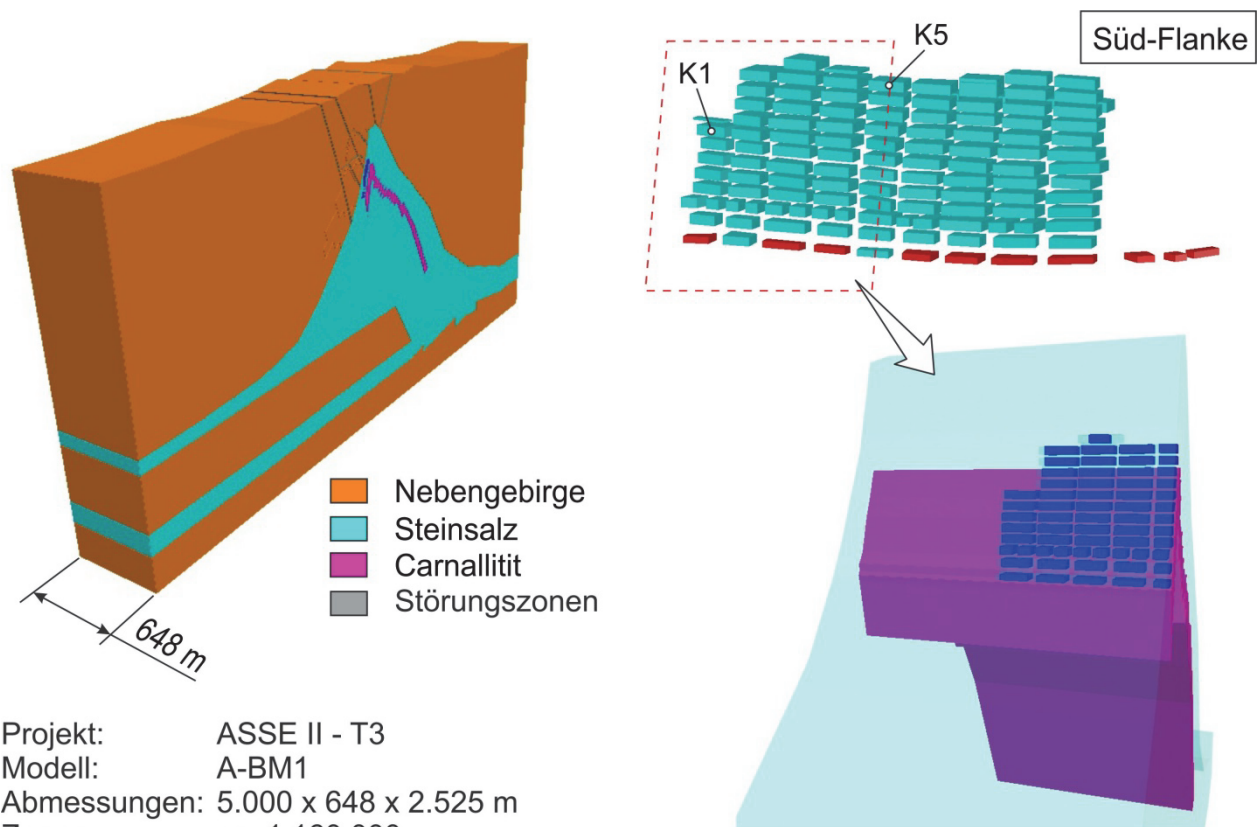
Abbildung 2-9: Bandbreite der Ergebnisse bei Variation der Kriechfähigkeit des Steinsalzes im Bereich niedriger Beanspruchungen



Quelle: IFAD

2.5. Entwicklung eines geometrisch-tektonisch vereinfachten Modells der westlichen Asse-Südflanke

Parallel zum Aufbau des komplexen 3D-Modells des gesamten Grubengebäudes wurde zur Verbesserung des Systemverständnisses in Weiterentwicklung des 36-m-Streifenmodells ein geometrisch-tektonisch vereinfachtes 3D-Modell (GTV-Modell) für numerische Simulationen entwickelt, in dem das halbe (westliche) Grubengebäude (Kammerreihe 1 bis 5) mit vereinfachter Geometrie, Einführung von Symmetriebedingungen und einer vereinfachten geotektonischen Situation abgebildet wird (Abbildung 2-10).

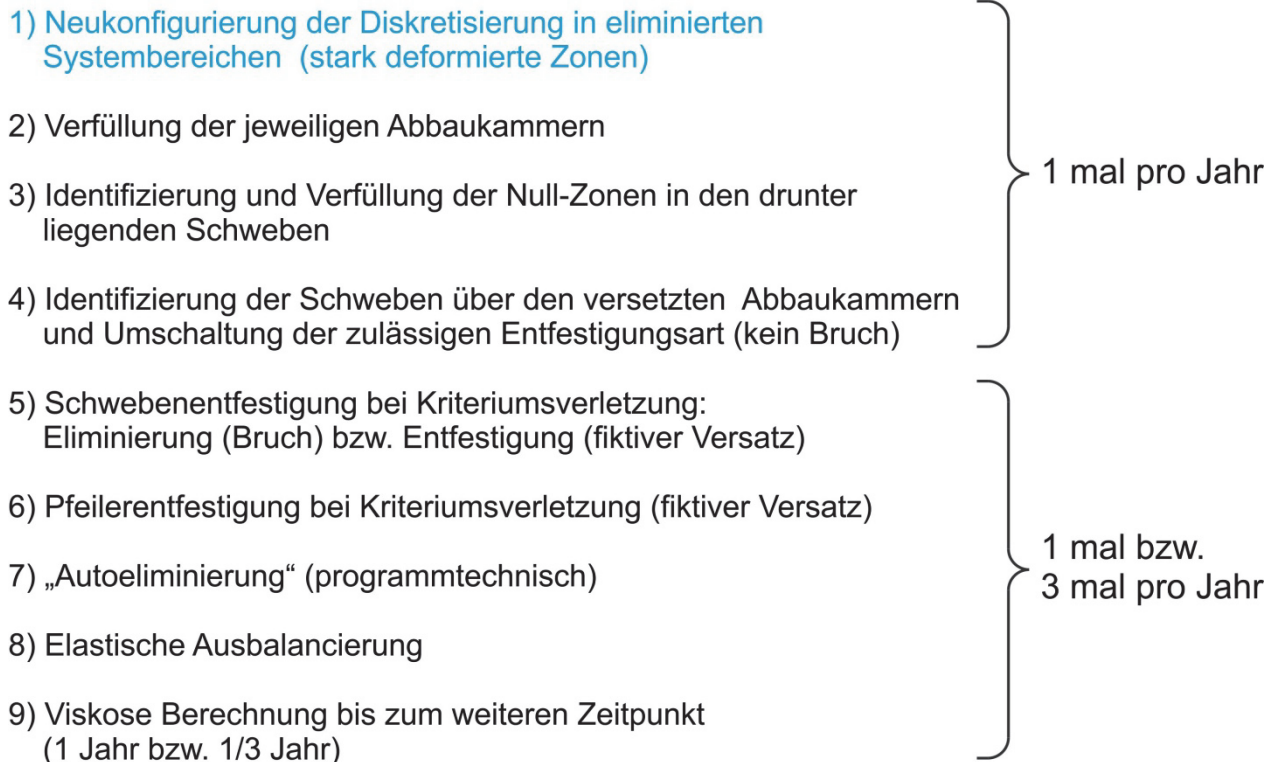
Abbildung 2-10: Geometrisch-tektonisch vereinfachtes Berechnungsmodell

Die geotektonischen Verhältnisse werden in dem vereinfachten Modell durch ein auf rd. 650 m Länge einfach extrudiertes Scheibenmodell des Schnitts 2 approximiert. Die Modellüberlegungen gehen davon aus, dass Gebirgs- und Hohlräumstrukturen wie z.B. die Anordnung der Abbaukammern, der Pfeiler und der Schweben in der Südflanke in Längsrichtung gleich ausgebildet sind. Unter Berücksichtigung der tatsächlichen Anordnung der Abbaukammern in der Südflanke wurde hieraus das geometrisch-tektonisch vereinfachte Berechnungsmodell für die westliche Hälfte der Südflanke entwickelt. Über die streichende Länge von rd. 650 m wird hierbei die geologische Information konstant gehalten; sie beruht i. W. auf einem zentralen Querschnitt ("Schnitt 2") durch den Asse-Sattel. Die tektonische Gliederung des Deckgebirges wird durch eine vereinfachte Störungszonengeometrie beschrieben.

Bei den bisherigen Berechnungen mit dem 36-m-Streifenmodell mussten die in der zeitlichen Entwicklung der Asse maßgeblichen Ereignisse und Prozesse (z.B. Zeitpunkt der Auffahrungen, Schwebenbrüche und Kammerverrückungen) einzeln eingepflegt und gesteuert werden. Um den Aufwand hierfür bei den Simulationen mit dem geometrisch-tektonisch vereinfachten Modell mit deutlich mehr Systemelementen zu verringern, wurde am IFAD die Eingabe- und Steuerungsdatei optimiert und teilweise neu strukturiert (Abbildung 2-11). Insbesondere für die Nachrechnung der Entwicklung ab 1971 werden die zu berücksichtigenden Zusammenhänge sehr komplex. Ein bis dreimal pro Modelljahr sind für die Schweben die Bruchkriterien zu prüfen und in Abhängigkeit des Ergebnisses Modellelemente zu eliminieren (Bruch) oder die Materialparameter durch diejenigen von fiktivem Versatz zu ersetzen (Entfestigung). Ähnliches gilt für die Pfeilerentfestigung, bei der die Materialparameter bei Kriteriumsverletzung durch diejenigen eines fiktiven Versatzes ersetzt

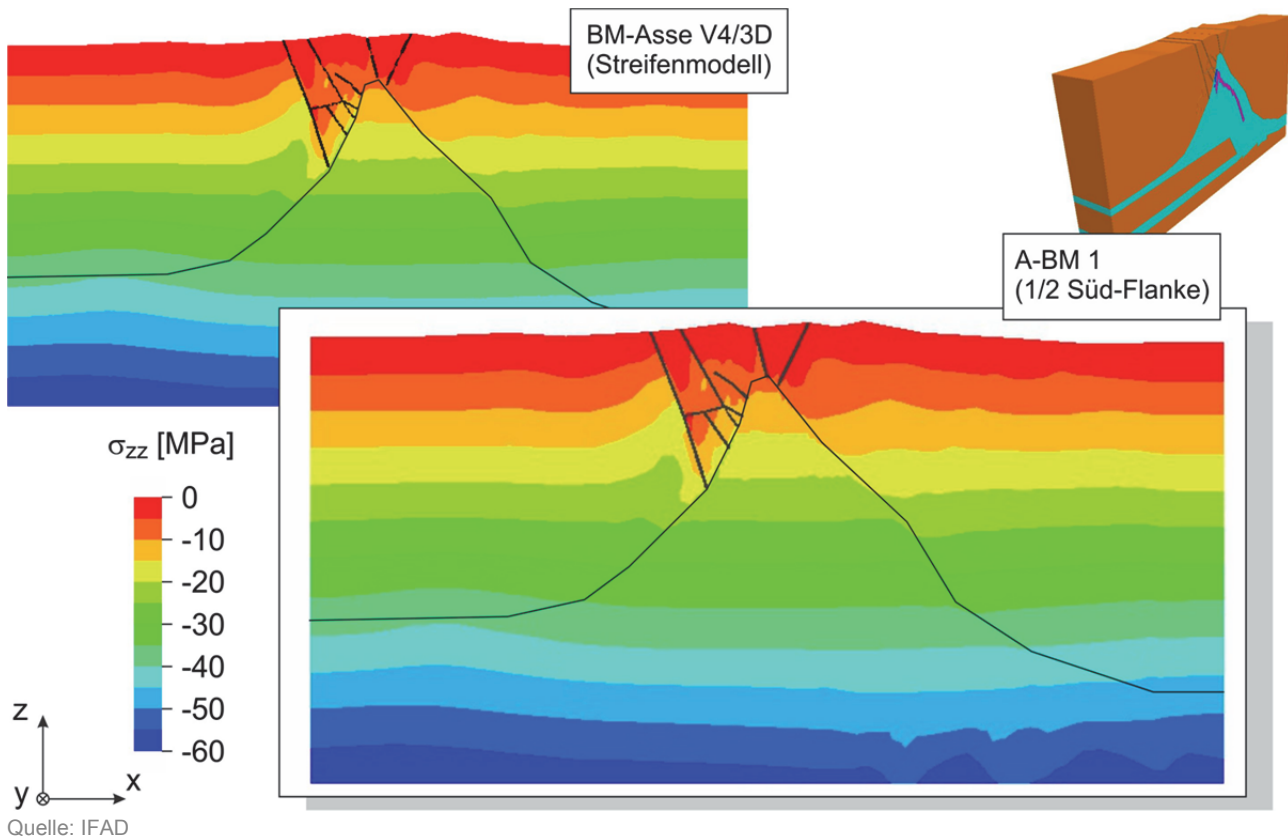
werden. Nach einer programmtechnisch realisierten „Autoeliminierung“ und einer „elastischen Ausbalancierung“ kann die Berechnung dann bis zum nächsten Prüfzeitpunkt fortgesetzt werden.

Abbildung 2-11: Schematischer Ablauf des Programms zur Abbildung eines Jahres



Quelle: IFAD

Trotz der schwer handhabbaren Größe des geometrisch-tektonisch vereinfachten Modells wurde nach Aufbau des Modells und Zuweisung der Materialparameter der Primärspannungszustand des Gesamtsystems in guter Plausibilität und in Übereinstimmung zum Vorgängervorhaben UM09A03202 erfolgreich modelliert (Abbildung 2-12).

Abbildung 2-12: Primärspannungszustand im GTV-Modell

Die Simulationsrechnungen mit dem geometrisch-tektonisch vereinfachten 3D-Modell dienten der Erweiterung des Systemverständnisses sowie der Optimierung von Arbeitsabläufen als Vorbereitung auf numerischen Simulationen mit dem eigentlichen komplexen 3D-Modell. Das GTV-Modell ließ sich aus dem vorhandenen Schnitt 2 und durch Symmetrieüberlegungen relativ einfach herleiten, hatte aber den Nachteil, dass es, obwohl es die eigentliche Geometrie nur vereinfacht abbildet, dennoch bereits aus fast 1,2 Mio. Rechenzonen bestand und damit die vorhandene Rechnerleistung vor Probleme hinsichtlich Kapazität und Rechenzeit stellte. Für vertiefte Untersuchungen und Sensitivitätsbetrachtungen war ein solches Modell daher nicht geeignet. Ein Ziel für das neu aufzubauende komplexe 3D-Modell bestand daher darin, eine Strategie zu entwickeln, die eine deutliche Reduzierung in der Anzahl der erforderlichen Rechenzonen ermöglicht bei gleichzeitig gut nachvollziehbaren, numerisch stabilen und im Ergebnis plausiblen Modellergebnissen.

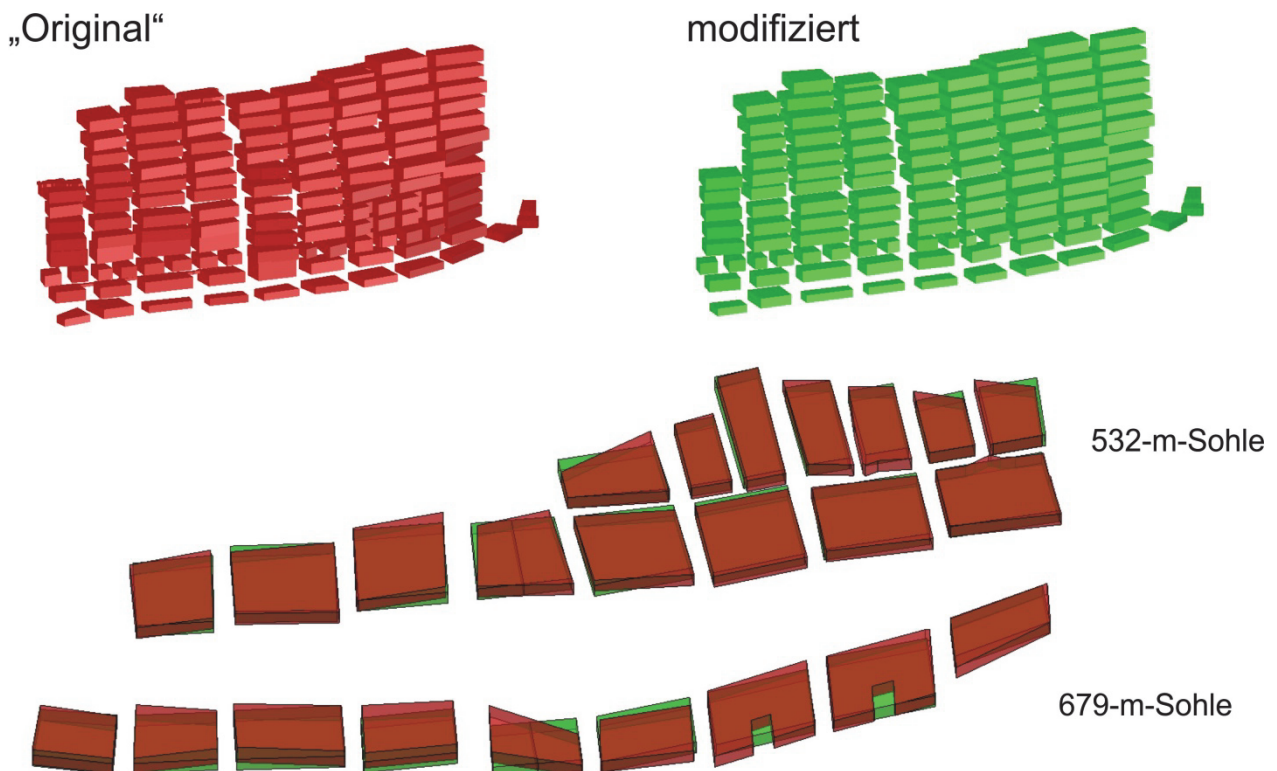
2.6. Weiterentwicklung der Modelle hin zu echt-dreidimensionalen Modellstrukturen

2.6.1. 3D-Visualisierung und Diskretisierung

Hinsichtlich der Modellentwicklung hin zu einer echten Dreidimensionalität hat IFAD anhand der vorhandenen Datengrundlagen mittels AutoCAD ein geometrisches 3D-Modell der Asse erstellt. Verwendet wurden i. W. Informationen aus dem Asse-Risswerk, wobei sowohl die Geometrie der Abbaukammern als auch der geologische Aufbau und die im Risswerk enthaltenen Störungen dreidimensional erfasst wurden.

Das AutoCAD-Modell war Grundlage der Diskretisierung der dreidimensionalen Modellstruktur. Für die Diskretisierung nach FLAC3D wurden über die in AutoCAD implementierte Programmiersprache AutoLISP eigene Routinen programmiert. Die rechentechnische Optimierung machte es dabei erforderlich, die in AutoCAD erfasste räumliche Geometrie der Hohlräume bis zu einem gewissen Grad zu vereinfachen und dabei Schrägen, Wölbungen und Nischen zu glätten (s. Abbildung 2-13). Dies führt in der Gesamtbetrachtung zwar zu räumlichen Unterschieden, z.B. in der Lage von Referenzpunkten oder Abweichungen in den Einzelvolumina. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass diese in der Bandbreite der ohnehin vorhandenen Unschärfen des Kenntnisstandes zwischen Risswerk und realer Situation liegen und daher die Aussagekraft der Modellrechnungen nicht zusätzlich beeinträchtigen.

Abbildung 2-13: Glättung der räumlichen Geometrie der Asse-Südflanke



Quelle: IFAD

2.6.2. Optimierung von Rechenleistung und Arbeitsabläufen, Diskretisierungskonzeption

Der dreidimensionale Aufbau der Modellstruktur und die große räumliche Ausdehnung können bei der erforderlichen Diskretisierung sehr hohe materielle Ansprüche an die Rechenkapazität zur Folge haben. IFAD hat die im Rahmen des Projekts möglichen rechentechnischen Anpassungen vorgenommen und damit eine im Rahmen des Vorhabens maximal verfügbare Rechnerleistung erreicht.

Zur Untersuchung der modelltechnischen Randbedingungen (Modellgröße, benötigte Rechnerleistung, Rechenzeit) wurde daher bei IFAD in einem ersten Ansatz aus dem vorhandenen 36-m-Scheibenmodell ein Modell lateral symmetrisch extrudiert, das in seiner Größe in etwa dem zu erwartenden 3D-Modell entspricht. Das Modell enthält in dieser Form bereits über 1.000.000 Rechenzonen. Aufgrund des hiermit verbundenen Bedarfs an Rechenkapazität und der erforderlichen Rechenzeiten für einzelne Rechenläufe waren für das angestrebte 3D-Modell umfangreiche Optimierungen erforderlich, mit dem Ziel einzelne Rechenläufe in adäquater Zeit zu absolvieren und dabei auch Parametervariationen durchführen zu können.

Dabei gebietet die limitierte Rechnerleistung eine Optimierung der Modellstruktur auch durch Anpassung an die jeweilige Fragestellung. Ein allen Fragestellungen mit gleicher Qualität gleichzeitig gerecht werdendes universales Modell der Asse-Südflanke ist mit den vorhandenen Rechenleistungen und der verfügbaren Rechenzeit rechentechnisch nicht handhabbar.

IFAD hat daher ein neues Konzept für die Diskretisierung eines großräumigen Gesamtsystems mit filigranen Teil-Strukturen verfolgt, in dem Diskretisierungsschnittstellen für die Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Maßstabsebenen und Teilmodellen implementiert werden. Da es modelltechnisch nicht ohne weiteres möglich ist, in einem derart großen Modell nachträglich Änderungen an der Modellgeometrie zu implementieren, werden für das eigentliche 3D-Modell Asse-spezifische Teilmodelle mit handhabbaren Modellgrößen definiert, die nachträglichen Modifikationen besser zugänglich sind.

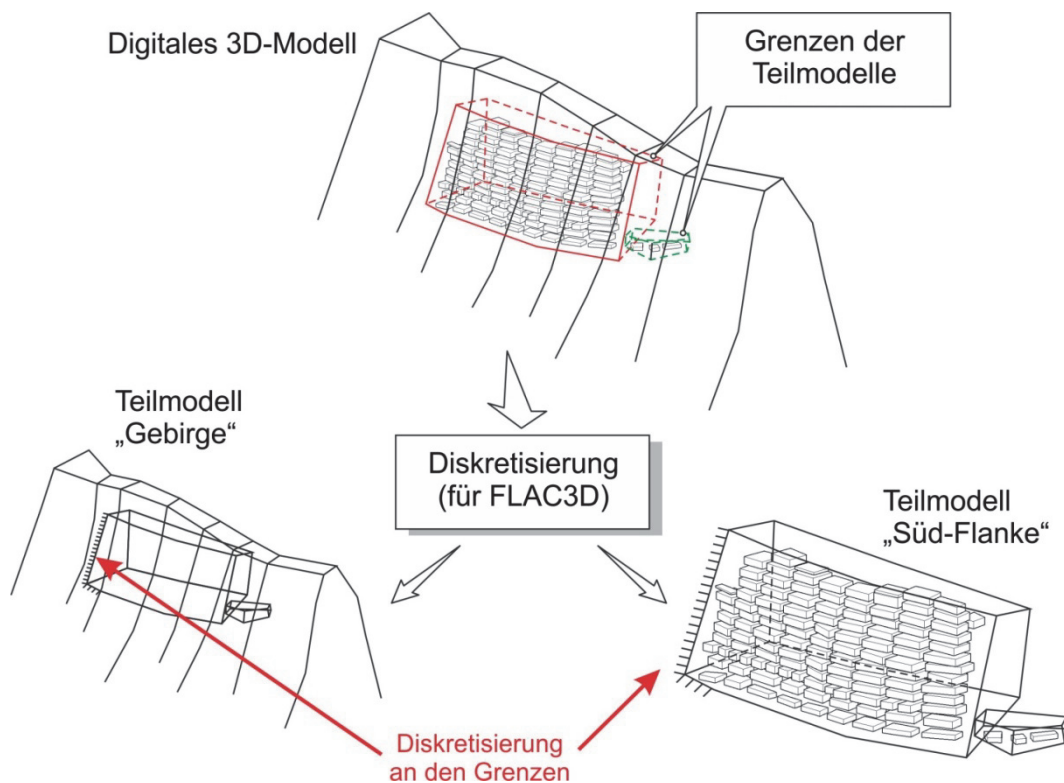
Der räumlich relevante Gebirgsbereich der Asse wird dabei als ein geotechnisches Tragsystem mit filigraner Teilstruktur verstanden, bei dem verschiedene Maßstabsebenen und daran angepasste Diskretisierungen berücksichtigt werden müssen. Vom großmaßstäblichen Fernfeld mit dem Primärspannungszustand und den damit implizit implementierten Deformationsrandbedingungen über das Nahfeld mit dem Nebengebirge und seinen Störungszonen bis hin zu den Strukturen des Tragsystems im Grubengebäude werden die zu erfassenden Strukturelemente immer feingliedriger (filigraner), wobei die einzelnen Maßstabsebenen miteinander rückkoppeln.

Das Teilmodell des Grubengebäudes bildet dabei zunächst die Steinsalz-Abbaukammern in der Asse-Südflanke und im Sattelnern dreidimensional ab. Innerhalb des Salzgebirges als weiterem Teilmodell wird zwischen Steinsalz- und Carnallit-Bereichen als Homogenbereichen unterschieden. Das umgebende Deckgebirge wird als eigenes Teilmodell dargestellt und bildet einen weiteren Homogenbereich, der durch Störungszonen in Blöcke gegliedert wird. Deren Geometrie orientiert sich an den derzeit vorliegenden Interpretationen der Störungszonen, wobei allerdings die Störungszonen und ihre Lage im Raum nicht wirklich nachgewiesen sind. Das verstürzte Deckgebirge oberhalb des Sattelnern bildet innerhalb des Deckgebirgs-Teilmodells einen eigenen Homogenbereich. Mit der Einführung derartiger Teilmodelle und nur ihrer z. B. geometrischen Modifikation kann deutlich flexibler und schneller analysiert werden, welchen Einfluss Änderungen bestimmter Parameter haben, ohne dass dafür das Gesamtmodell modifiziert werden muss. In Abbildung 2-14 ist diese prinzipielle Vorgehensweise, beispielhaft für die Teilmodelle Salzgebirge und Asse-Südflanke, schematisch dargestellt.

Die Teilmodelle bestehen aus unterschiedlich fein diskretisierten Bereichen. Die Diskretisierung wird dabei, ausgehend von den Abbaukammern und ihrem Randbereich, nach außen hin gröber. Grundsätzlich ergeben sich Bereiche im Gebirge und in der Tragwerksstruktur, die eine feinere Diskretisierung erfordern sowie Bereiche, in denen eine gröbere Diskretisierung ausreicht.

Ziel ist es dabei, eine mit Blick auf die numerischen Ergebnisse hinreichend gute dreidimensionale Diskretisierung der Teilmodelle zu erreichen und dabei die Anzahl der erforderlichen Rechenzonen zu minimieren. Die Abbau-Kammern der Asse-Südflanke werden im entsprechenden Teilmodell z.B. mit einer räumlichen Auflösung je Rechenzone von etwa 5 m diskretisiert, während für das Nebengebirge im Fernfeld eine Auflösung von 150 m je Rechenzone ausreicht. Ausnahmen im Nebengebirge sind Störungszonen, die aus modelltechnischen Überlegungen heraus deutlich feiner diskretisiert wurden.

Abbildung 2-14: Definition von Teilmodellen der Asse-Südflanke und des Asse-Salzgebirges

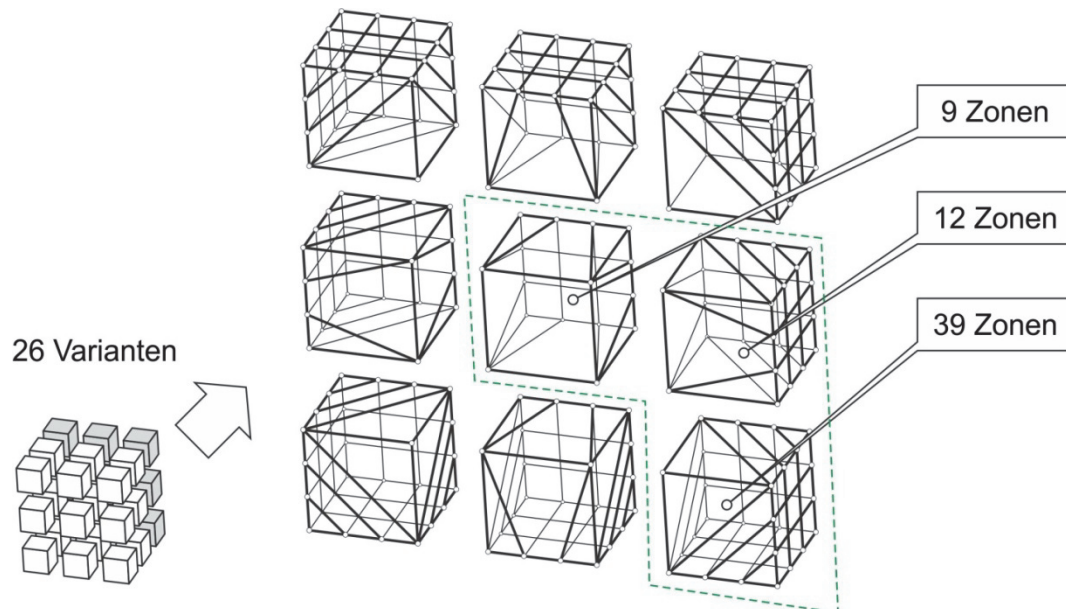


Quelle: IFAD

Eine besondere Herausforderung bestand darin, die Teilmodelle über ihre jeweiligen Grenzflächen simulationstechnisch optimal ineinander zu überführen und miteinander zu verknüpfen. Für die Handhabung der Übergänge zwischen den Teilmodellen wurde am IFAD eine eigene spezifische Methode entwickelt. Um Informationen zwischen den Teilmodellen zu transferieren, werden sie über sogenannte "Übergangselemente" verknüpft. Es gibt hierzu drei geometrisch unterschiedliche Bausteine, die in unterschiedlicher Lage im Raum platziert werden können, um in Kombination miteinander die Übergänge von feinerer zu gröberer Diskretisierung zu gestalten. Die Übergangselemente selbst bestehen je nach Geometrie aus 9, 12 oder 39 Zonen (s. Abbildung 2-15). Diese "Übergangs"-Elemente sind zwar aufwendiger in der Vorbereitung als die im

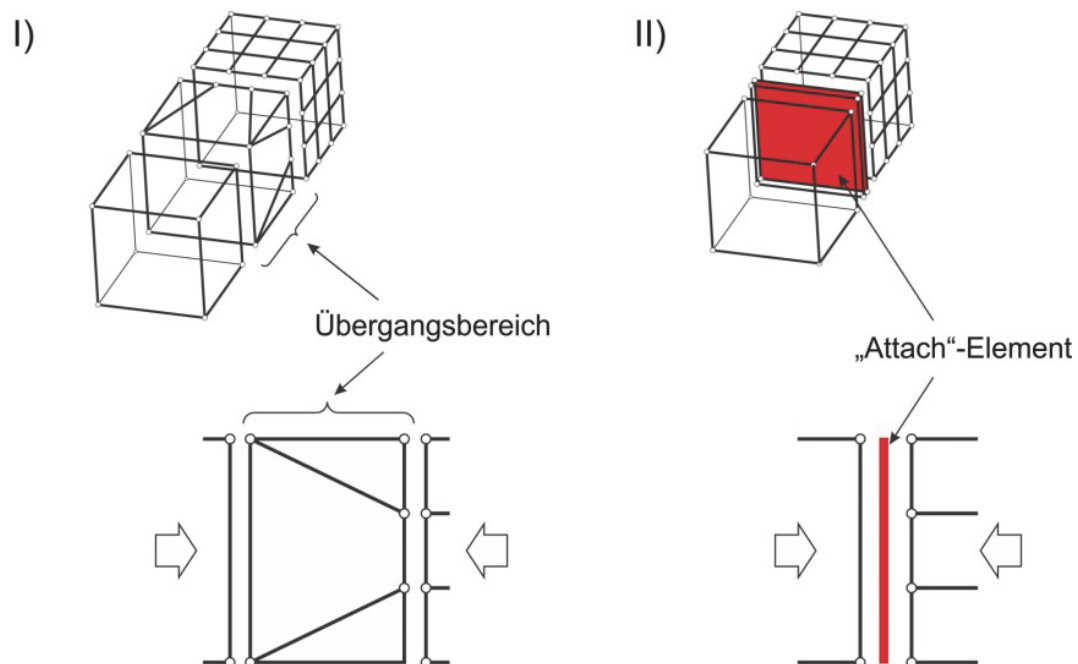
Software-Code FLAC3D schon zur Verfügung stehenden "Attach"-Elemente, erwiesen sich jedoch in den weiteren numerischen Untersuchungen vor allem in Bezug auf die Stabilität der numerischen Simulationen als optimalere Diskretisierungsform für die Verbindung zwischen den Teilmodellen mit unterschiedlichem Feinheitsgrad der Diskretisierung. (Abbildung 2-16).

Abbildung 2-15: Mögliche Übergangselemente im 3D-Raum



Quelle: IFAD

Abbildung 2-16: Prinzip der "Übergangs"- und "Attach"-Elemente zur Verknüpfung von Teilmodellen



Quelle: IFAD

2.6.3. Modelltechnische Behandlung der Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

Die Modellierung des Deck- und Nebengebirgsverhaltens leistet insgesamt einen wichtigen Beitrag zum prinzipiellen Verständnis des gebirgsmechanischen Verhaltens des Gesamtsystems; sie darf aber aufgrund des eingeschränkten Kenntnisstands nicht im Sinne räumlicher Details des Deckgebirges überinterpretiert werden. Eine besondere Herausforderung für die gebirgsmechanische Modellierung des Tragsystems der Schachtanlage Asse II ist dabei die Berücksichtigung von Störungen im Deckgebirge, die einen großen Einfluss auf die Lastverteilung und die aus dem Deckgebirge in das Baufeld der Asse-Südflanke eingetragenen Kräfte haben.

Zwar ist bekannt, dass das Deck- und Nebengebirge der Asse von Störungszonen zergliedert wird, ihre Darstellung im Risswerk beruht allerdings auf Annahmen, Erfahrungswerten und Interpretationen recht weniger Daten aus einer sehr geringen Anzahl von Bohrungen. Die tatsächliche Geometrie der Störungszonen kann de facto nur vermutet werden. Im geologischen Risswerk /Asse 2009/ wird zwischen nachgewiesenen, vermuteten oder wahrscheinlichen Störungszonen unterschieden, wobei für alle Störungszonenarten gilt, dass sich die Vorstellungen von ihrem Verlauf und ihrer räumlichen Ausdehnung aus der Interpretation bestenfalls punktförmiger Befunde herleiten. Es ist daher nicht ausgeschlossen, dass sich das Bild von der Störungszonengeometrie im Zuge einer detaillierteren Deck- und Nebengebirgserkundung zukünftig ändern wird.

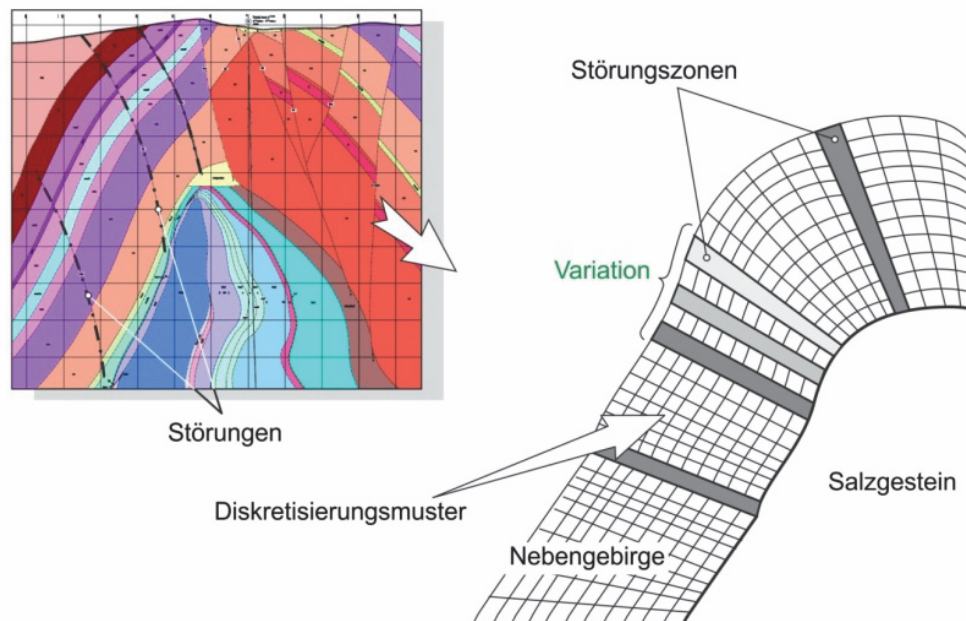
Modelltechnisch betrachtet sind Störungszonen i. W. flächenhafte Strukturen im Raum. Über die Dicke oder Mächtigkeit der Störungszone ergibt sich ein Volumen, dem im Modell gegenüber dem Deckgebirge abweichende Materialeigenschaften zugeordnet werden. Im Zuge des Modellaufbaus und der Diskretisierung der im Modell abgebildeten geometrischen Strukturen müssen Lage und Geometrie der Störungszonen in der 3D-Struktur des Teilmodells „Gebirge“ festgelegt werden. Sie sind bei einem sich ändernden Kenntnisstand in einem bestehenden Modell nur sehr eingeschränkt veränderbar.

Zu interpretieren sind Störungszonen als Zonen tektonisch bedingter Entfestigung, in denen die Festigkeit des Gebirges signifikant herabgesetzt ist. Im Modell wird dieser Effekt durch den Ansatz eines im Vergleich zum Gebirge stark abgeminderten Materialparametersatzes im Bereich der entfestigten Störungszonen realisiert. Dabei sind im Modell Mächtigkeiten geotektonischer Strukturelemente unter 10 m nicht mit verhältnismäßigem Aufwand darstellbar, so dass Störungszonen mit mindestens 10 m Breite approximiert werden müssen. Über die tatsächliche Breite einer Störungszone liegen keine gesicherten Informationen vor. Störungszonen sind im Modell derzeit als ebene Flächen dargestellt. Auf die Abbildung eines durchaus anzunehmenden listrischen Verlaufes von Störungszonen wurde aufgrund der unzureichenden Zuverlässigkeit der Informationen zur Lage und zum Verlauf der Störungszonen verzichtet.

Die Deck- und Nebengebirgsgeometrie insbesondere im Bereich der Störungszonen ist derzeit der größte Unsicherheitsfaktor bei der Erstellung der Berechnungsmodelle. Um hier eine gewisse Flexibilität gegenüber zukünftigen Kenntnissgewinnen zu erreichen, hat IFAD bei der Weiterentwicklung des Modells einen Ansatz der Diskretisierung implementiert, der eine größere Flexibilität gegenüber der Störungszonengeometrie erlaubt und in gewissen Grenzen eine Anpassung der Störungszonengeometrie inkl. einer Verschiebung ihrer Position im Raum bei einem sich weiter entwickelnden Kenntnisstand ermöglicht. Hierfür wird die Diskretisierung im Bereich der derzeit bekannten oder vermuteten Position von Störungszonen an dieser ausgerichtet und zu einem größeren Diskretisierungsbereich erweitert. Innerhalb dieses Diskretisierungsbereichs kann dann die Lage/Position der jeweiligen Störungszone variabel ausgestaltet werden, so dass die im Modell zunächst wirksamen Störungszonen in begrenztem

Umfang auch nachträglich noch verschoben bzw. andersartig diskretisiert werden können (Abbildung 2-17).

Abbildung 2-17: Prinzip der variablen Diskretisierungsoptionen für Störungszonen im Deckgebirge



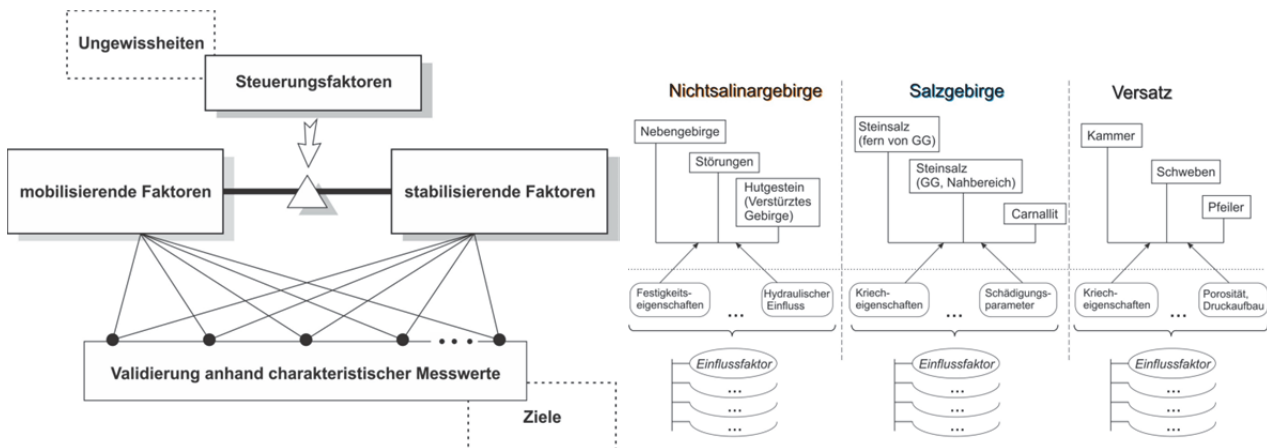
Quelle: IFAD

2.6.4. Physikalische Modellierung des Materialverhaltens von Gebirge und Versatz

Neben den geometrischen Aspekten der Modellentwicklung sind das Verständnis und die modelltechnische Abbildung des Materialverhaltens in den Homogenbereichen Nichtsalinargebirge (Deckgebirge), Salzgebirge und Versatzmaterial von entscheidender Bedeutung. Mobilisierende und stabilisierende Faktoren stehen dabei über Steuerungsfaktoren miteinander in Beziehung und interagieren (s. Abbildung 2-18). Die Validierung ihrer Zahlenwerte im Modell erfolgt dabei anhand charakteristischer Messwerte.

Der begrenzte Kenntnisstand zu den einzelnen Parametern, z.B. über bisher nicht erkannte und nicht berücksichtigte Wirkfaktoren, Annahmen zu Materialeigenschaften oder unbekannte geometrische Strukturen und Zusammenhänge, führt zu Ungewissheiten oder Mehrdeutigkeiten in der Parametrisierung des Modells. Um diese angemessen zu adressieren, werden in einem ersten Schritt die zahlreichen Einflussfaktoren systematisiert (Abbildung 2-18). Anschließend werden einige, möglicherweise ergebnissensitive, Parameter im Rahmen der Kalibrierung des Modells variiert und die daraus entstehenden Effekte analysiert. Für das Nichtsalinargebirge sind dabei Festigkeitseigenschaften im Bereich der Störungszonen und des verstürzten Gebirges unmittelbar oberhalb des Asse-Sattels von besonderem Interesse. Für das Salzgebirge im Tragsystem der Asse hatten die Kriecheigenschaften der Salzgesteine im entfestigten Zustand einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten des Tragsystems.

Abbildung 2-18: Einflussfaktoren und Eigenschaften der Homogenbereiche

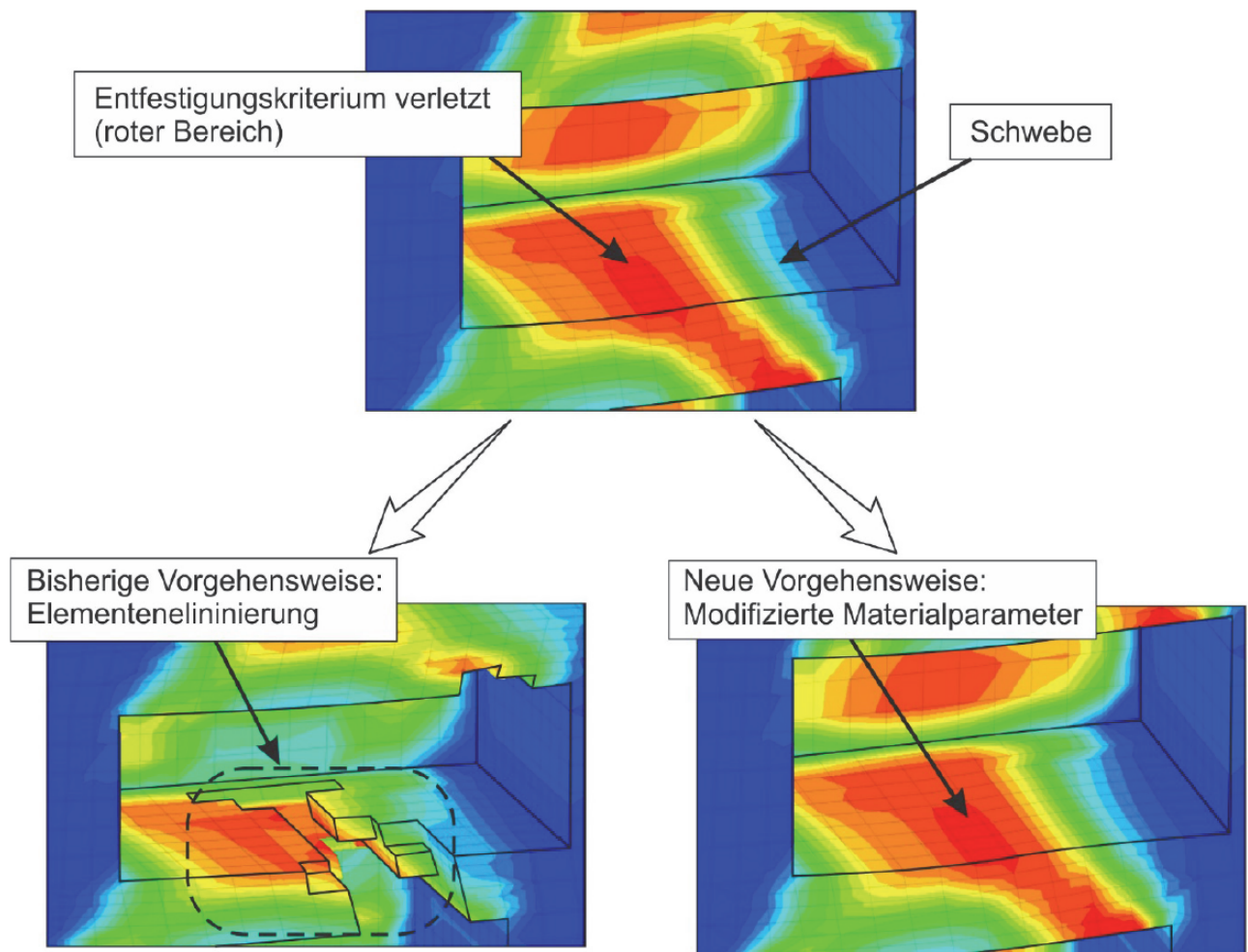


Quelle: IFAD

Die Vorgehensweise bei der Beurteilung der Einflussfaktoren durch Variation ihrer spezifischen Zahlenwerte erfordert wiederholte Rechenläufe zum Nachvollziehen der zeitlichen geomechanischen Entwicklung des Grubengebäudes unter Variation der gerade untersuchten Einflussfaktoren. In den bestehenden großräumigen Modellen führt dieser methodische Ansatz zu sehr langen Rechenzeiten, weshalb auch hier nach alternativen Vorgehensweisen zur Reduzierung des Bedarfs an Rechenkapazität und Rechenzeit gesucht wurde.

Daher sind diese grundlegenden Untersuchungen mit Hilfe des numerisch effektiver handhabbaren quasi-dreidimensionalen 36-m-Streifenmodells durchgeführt. Als besonders vielversprechend hat sich dabei die Entwicklung alternativer Vorgehensweisen für die Abbildung der Entfestigungsprozesse nach dem Auffahren der Abbauhohlräume herausgestellt, weil hier aufgrund der Komplexität der Vorgänge die längsten Rechenzeiten entstanden sind. Ursache für die langen Rechenzeiten waren nach der bisherigen Vorgehensweise die häufig notwendigen externen Eingriffe in den Simulationslauf, um beispielsweise regelmäßig auf die Eliminierung der entfestigten Teilbereiche des Tragsystems zu reagieren und das Modell vor dem nächsten Rechenschritt wieder auszubalancieren.

In den ersten Modellansätzen wurden diese Eingriffe händisch für diejenigen Rechenzonen durchgeführt, für die im vorangegangenen Iterationsschritt ein Entfestigungskriterium überschritten und daher Änderungen der Materialeigenschaften bzw. der für die betroffenen Rechenzone angesetzten Stoffmodelle erforderlich wurden. Diese Eingriffe wurden für jeden Rechenlauf etwa ein- bis dreimal pro berechnetem Modelljahr erforderlich. Gegenüber dieser zeitintensiven händischen Steuerung des Modells wurde durch Einführung variabel einstellbarer Entfestigungsgrade und einer höheren Aktivierungsfrequenz eine deutliche Reduzierung der Rechenzeiten bei stabilen und gleichwertig guten Berechnungsergebnissen erzielt. In Abbildung 2-19 wird diese alternative Vorgehensweise anhand eines Beispiels illustriert.

Abbildung 2-19: Alternative Vorgehensweise zur Modellierung der Entfestigungsprozesse

- Größe der entfestigten Bereiche variabel

Eliminierung der entfestigten Bereiche:

- Entfestigungsgrad in diesen Bereichen nicht variabel

- Aktivierungsfrequenz – ausgeprägt diskret (1-3 mal pro Jahr)
Balancierung notwendig – zeitaufwendig!

- Größe der entfestigten Bereiche variabel

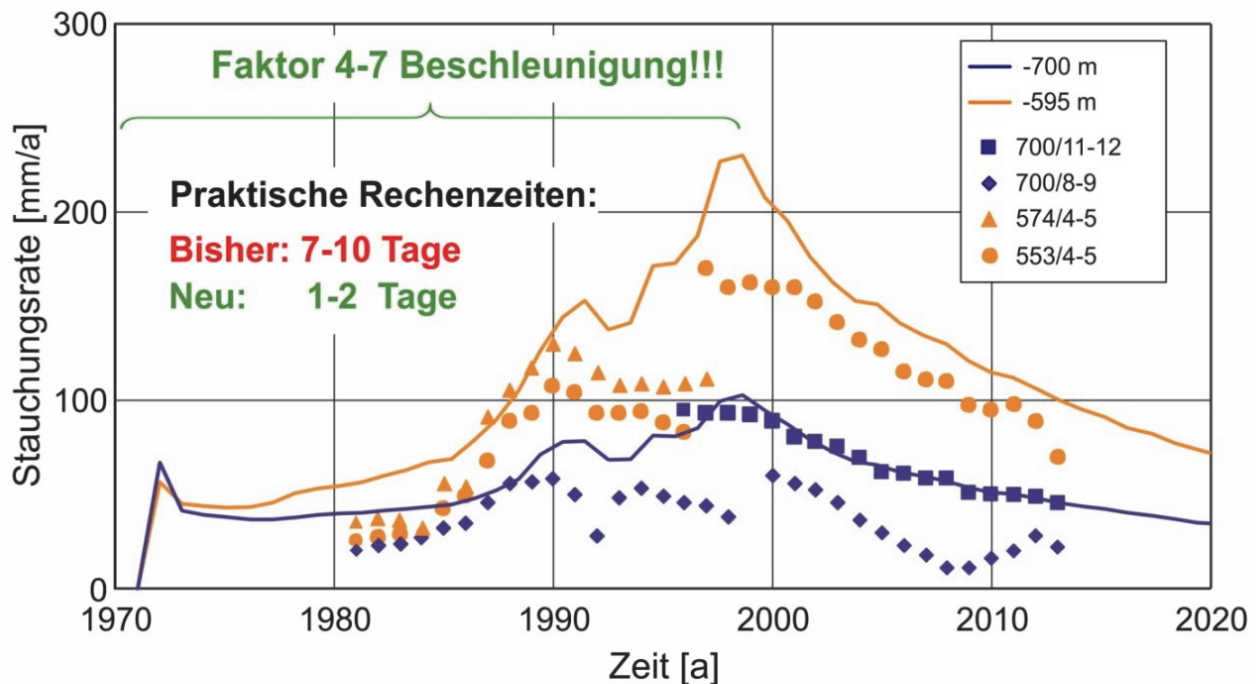
- Entfestigungsgrad dieser Bereiche variabel

- Aktivierungsfrequenz – nahezu kontinuierlich (Balancierung des Systems nicht notwendig)

Quelle: IFAD

Nachrechnungen der bisherigen Simulationen zur Entwicklung der Pfeilerstauchungsraten mit der neu implementierten Vorgehensweise zur rechnerischen Modellierung des entfestigten Steinsalzgebirges ergaben, dass ihr Verlauf im Vergleich zu den vorhandenen Messwerten mit den vorgenommenen Modifizierungen ähnlich plausibel nachvollzogen werden kann wie in den vorangegangenen Berechnungen, dass diese Simulationen aber gleichzeitig mit um einen Faktor 4 bis 7 reduzierten Rechenzeiten und damit numerisch signifikant effektiver gelingen als vorher (s. Beispiel in Abbildung 2-20). Dieser Entwicklungstand eröffnet damit methodisch neue Möglichkeiten für Variationsanalysen: Durch die schnelleren Rechenläufe sind nunmehr deutlich mehr Simulationen in der gleichen Zeit möglich.

Abbildung 2-20: Verkürzung der Rechenzeiten bei ähnlich guter Näherung der Modellergebnisse



Projekt: ASSE II
Modell: Q-3D

Alternative Vorgehensweise, Entfestigung ab 1971
Parameter: $\varepsilon_{vol} = 1,5\%$, $a_0 = 0,08$, EtaFaktor1500

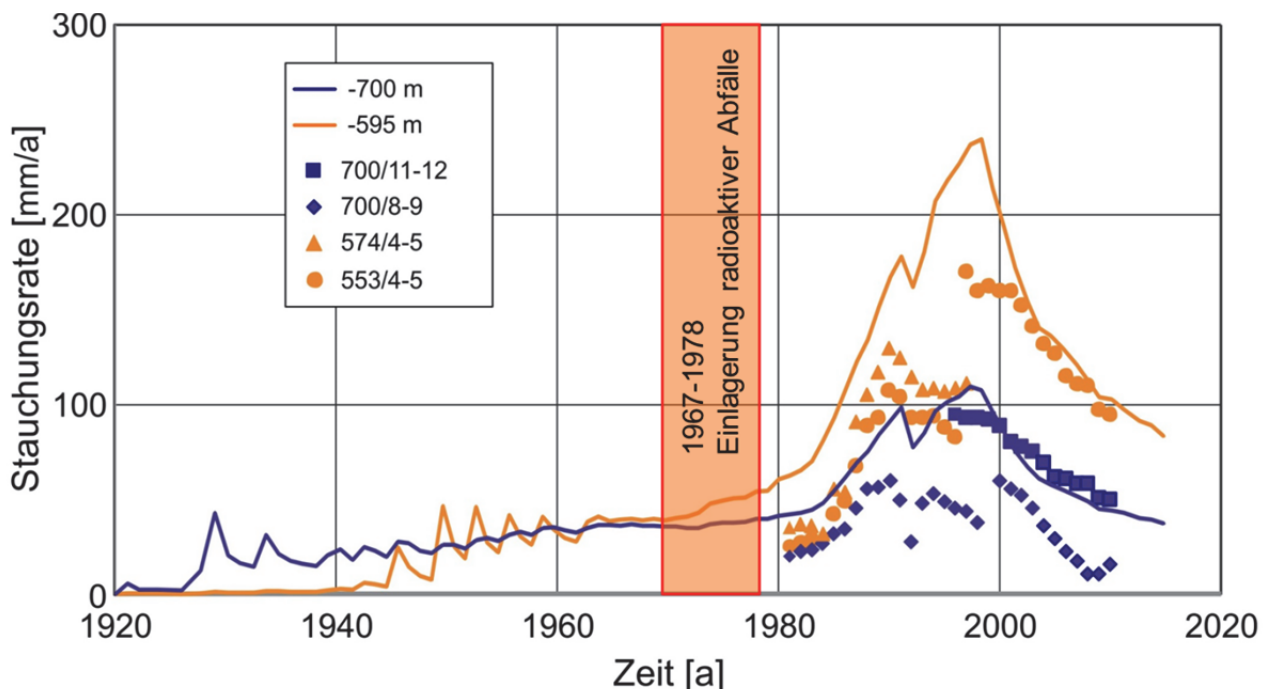
Quelle: IFAD

Im Rahmen der Variationsanalysen zur Validierung des numerischen Systems sind in den Modellberechnungen Steuerungsfaktoren zu variieren, um zu untersuchen, wie sensitiv das System auf den jeweiligen Faktor reagiert und wie stark sein Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses ist. Die Reduzierung der Rechenzeit und damit die Möglichkeit der Untersuchung einer größeren Anzahl von Parametervariationen stellt demzufolge eine deutliche Weiterentwicklung der methodischen Möglichkeiten zur Verbesserung des Systemverständnisses dar.

Eine weitere Entwicklung in diesem Zusammenhang führte zu der Möglichkeit, dass die im Modell bis dato zeitlich erst nach vollständiger Abbaukammerauffahrung wirksam werdenden gebirgsentfestigenden Faktoren nun von Anfang an berücksichtigt werden können und damit auch eine direkte Koppelung der Entfestigungsmechanismen an die Hohlraumauffahrung realisiert wurde. Abbildung 2-21 zeigt diese Weiterentwicklung beispielhaft für die Modellierung der Pfeilerstauchungsraten auf der 700- und 595-m-Sohle. Es ergibt sich in der Modellrechnung nicht nur eine nach wie vor gute Übereinstimmung mit den seit Beginn der 80er Jahre vorliegenden Messwerten, vielmehr gelingt es nunmehr auch, die Hohlraumauffahrung im Laufe der Abbauhistorie schlüssig abzubilden. Ein weiterer nicht uninteressanter Befund aus dieser weiterentwickelten Modellierung ist, dass das Modell zeigen kann, dass die Einlagerung der radioaktiven Abfälle in die Asse in den späten 60er und 70er Jahren offenbar in einer gebirgsmechanisch vergleichsweise ruhigen Phase der Entwicklung des Asse-Tragsystems stattfand, bei vergleichsweise konstanten Pfeilerstauchungsraten von ca. 30 mm/a. Die entfestigungsbedingte Beschleunigung der Pfeilerstauchungen begann demzufolge erst nach Abschluss der Einlagerung, was zum damaligen Zeitpunkt mit dem damals verfügbaren

geomechanischen Instrumentarium nicht zahlenmäßig prognostizierbar, allenfalls aufgrund genereller Einschätzungen zum Tragverhalten von noch beanspruchten Tragelementen im Salzgebirge grundsätzlich erwartbar war. Mit den im Rahmen des Vorhabens heute entwickelten geomechanischen Modellen wäre eine Prognose der Tragwerksentwicklung bereits zum Zeitpunkt der Einlagerung zu dem Ergebnis gekommen, dass sich die Entfestigungsvorgänge in abschätzbarer Zeit von einigen Jahren beschleunigen werden. Rückschauend lässt sich also vermuten, dass eine derartige Prognose zum damaligen Zeitpunkt wahrscheinlich auch Einfluss auf die damaligen Sicherheitsbetrachtungen gehabt hätte.

Abbildung 2-21: Modellierung der Entfestigungsprozesse mit der alternativen Vorgehensweise: exemplarische Vergleich von Messwerten aus vier Extensometersmessstellen auf der 700-, 574- und 553-m-Sohle und modellierten Pfeilerstauchungsraten der 700-m-Sohle und der 595-m-Sohle



Projekt: ASSE II

Modell: Q-3D

Quelle: IFAD

Alternative Vorgehensweise, Entfestigung ab 1920

Parameter: $\varepsilon_{vol} = 2,0\%$, $a_0 = 0,11$, $E_{ta} = 1400$

2.6.5. Erstellung der 3D-Berechnungsmodelle für die westliche Hälfte der Südflanke

Eine der Grundaufgaben des IFAD bestand im Aufbau eines komplexen 3D-Modells der Asse-Südflanke und damit eines großräumigen Berechnungsmodells mit filigranen Teil-Strukturen. Das Ziel war dabei die Abbildung der gesamten Asse-Südflanke, d.h. Grubengebäude und relevantes umgebendes Gebirge. Im Rahmen der schrittweise organisierten Arbeiten wurde zunächst die Realisierung eines komplexen Modells für die halbe (i.e. westliche) Südflanke durchgeführt.

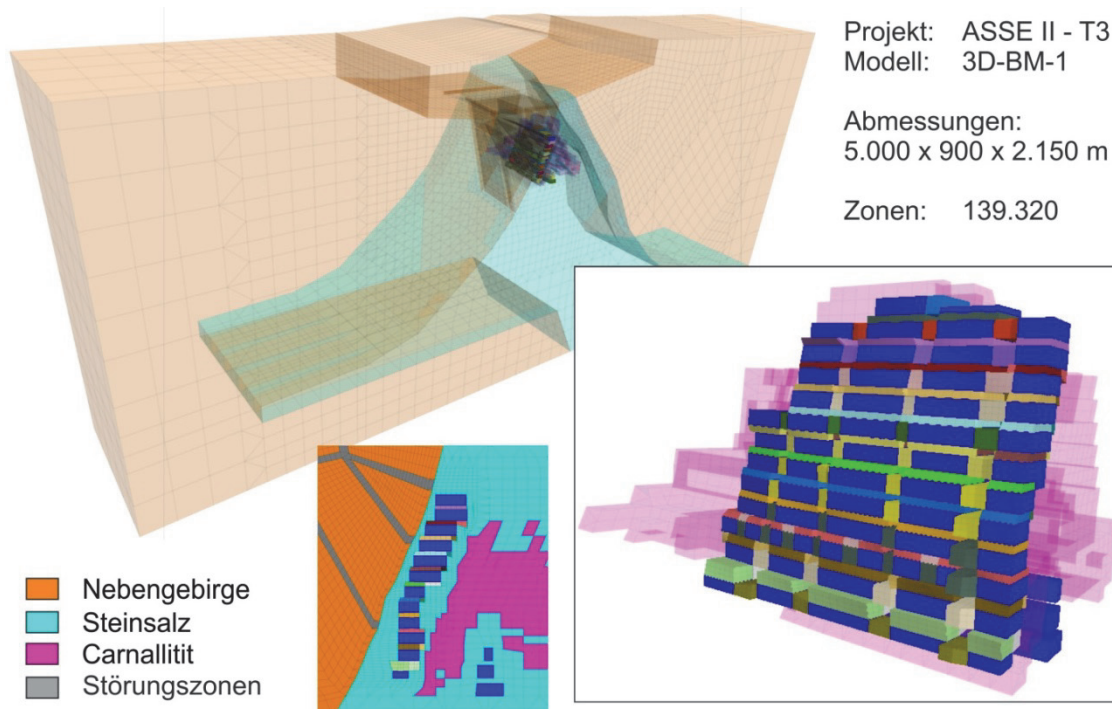
Die einzelnen in dieses 3D-Modell Asse Westteil integrierten Teilmodelle wurden hierfür durch Modellzeichnungen in AutoCAD dreidimensional visualisiert. Auf diese Weise sind in den im

Projekt erstellten fünf Teilmodellen mehrere tausende graphische Elemente definiert worden. Diese mussten für die eigentliche Modelldiskretisierung in die Modellumgebung FLAC3D übertragen werden, was über von IFAD für die AutoCAD-Umgebung programmierte Routinen erfolgte. Die fünf erzeugten Teilmodelle bestehen insgesamt aus etwas weniger als ca. 140.000 Berechnungselementen ("Zonen"), wofür etwa 24.000 geometrisch unterschiedliche FLAC3D-Diskretisierungsbausteine/Raumzerteilungs-Befehle programmiert werden mussten. Damit wurde eine diskrete Struktur für ein erstes 3D-Modell für die westliche Hälfte der Südflanke entworfen (Abbildung 2-22), die mit deutlich weniger Zonen auskommt als das bis dato verwendete 3D-Modell. Dieses Modell war zwar geometrisch einfacher durch symmetrische Erweiterung eines 2D-Modells zu erzeugen (Extrusion), stößt aber aufgrund der daraus entstehenden großen Anzahl von bis zu mehreren Millionen Zonen an die Grenze der verfügbaren Rechenkapazitäten und bildet dabei insbesondere die dritte (streichende) Dimension nicht so realitätsnah ab wie das jetzt konzipierte 3D-Modell.

Das 3D-Modell Asse Westteil fußt dabei auf dem derzeitigen Kenntnisstand zur Hohlraumgeometrie und zur Geometrie der geologischen Haupteinheiten Steinsalz, Carnallitit und Deck- bzw. Nebengebirge sowie zur Lage der Störungszonen und bildet diesen Kenntnisstand in allen Raumrichtungen ab. Die modellierte Struktur von Gebirge und Tragsystem wird von außen nach innen in Richtung Abbaufeld Südflanke filigraner. Notwendige geometrische Vereinfachungen (Glättungen) liegen im Rahmen der ohnehin den Daten innewohnenden Ungenauigkeiten. Für den Aufbau des 3D-Modells wurde dabei statt einer vereinfachenden Extrusion aus dem Streifenmodell weitgehend die tatsächliche Geometrie der Abbaukammern des Abbaufeldes in der Südflanke des Asse-Salzsattels realisiert, um ein realitätsnäheres 3D-Modell mit einem hohen geometrischen Übereinstimmungsgrad zwischen der Modellgeometrie und dem Kenntnisstand zur realen Geometrie zu erstellen.

In dem 3D-Modell Asse Westteil sind die Teilmodelle "Grubengebäude", "Nahbereich", "Störungszonenbereich", "Übergang" und "Fernbereich" enthalten (Abbildung 2-23) und über ihre Grenzflächen durch Übergangselemente miteinander verknüpft. Weitere verknüpfte Teilmodelle beschreiben den Übergang vom Salzgebirge zum verstürzten Deckgebirge oberhalb des Salzsattels (Teilmodell "Übergang" sowie die Fernbereiche des Nebengebirges südlich und nördlich des Salzgebirges inklusive der tiefer (unterhalb der Abbaukammern) liegenden Salzstruktur (Teilmodell "Fernbereiche").

Diese Teilmodelle können für spezifische Fragestellungen geotektonisch oder geometrisch aktualisiert und durch Teilung der enthaltenen Zonen auch weiter in ihrer Diskretisierung verfeinert werden, ohne die Grundstruktur zu verändern. Die Entwicklung der Modellumgebung hat mehrere Berechnungsmodelle mit unterschiedlichem Diskretisierungsgrad verfügbar gemacht, die bereits für numerische Simulationen eingesetzt werden können und die ein besonders hohes Niveau an Flexibilität in Bezug auf Modellmodifikationen aufweisen. Damit wurde auch die Möglichkeit geschaffen, zukünftig mit einem relativ geringen Zeitaufwand mehrere weitere aufgabenspezifisch optimierte 3D-Modelle zu entwickeln.

Abbildung 2-22: Berechnungsmodell 3D-BM-1: 3D-Modell für die westliche Hälfte der Südflanke

Quelle: IFAD

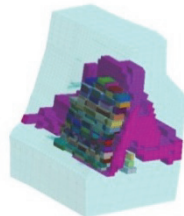
Abbildung 2-23: Realisierte Teilmodelle des 3D-Modells für westliche Hälfte der Südflanke

TM-"Grubengebäude"



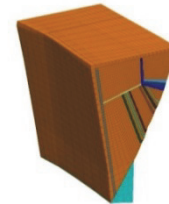
Zonenzahl: 46.000

TM-"Nahbereich"



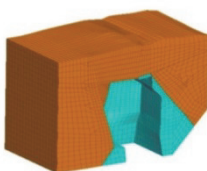
Zonenzahl: 18.000

TM-"Störungszonenbereich"



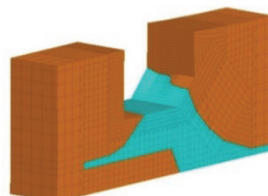
Zonenzahl: 35.600

TM-"Übergang"



Zonenzahl: 21.600

TM-"Fernbereiche"



Zonenzahl: 17.700

Zonenzahl
139.320

Quelle: IFAD

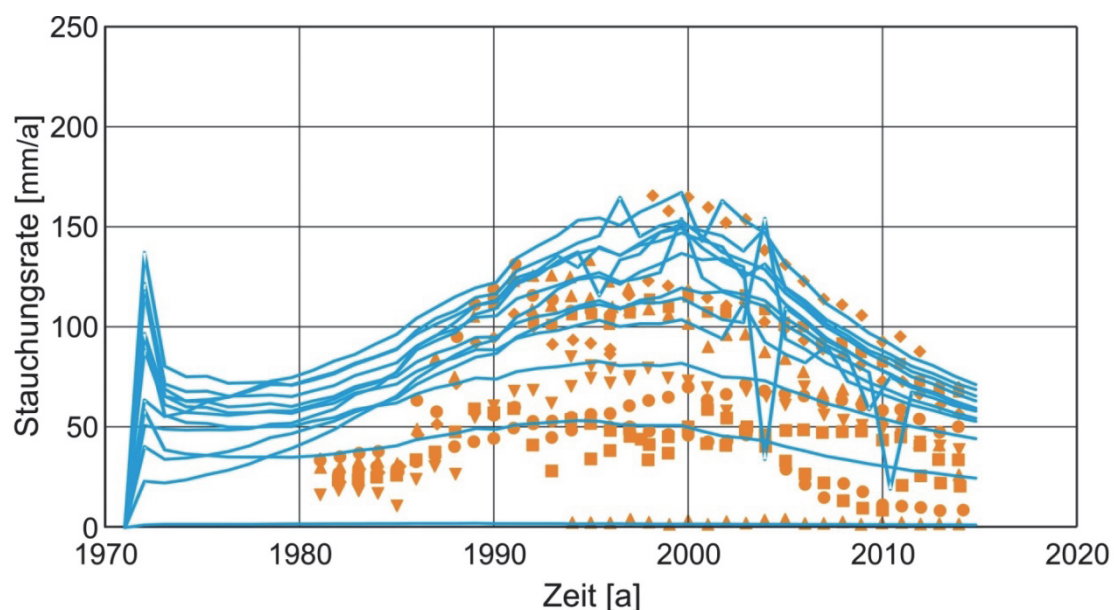
2.7. Numerische Simulationen mit dem 3D-Modell Asse Westteil

Mit den neu aufgestellten 3D-Modellen der westlichen Hälfte der Asse-Südflanke konnten erste numerische Berechnungen zu ihrer Validierung anhand von charakteristischen Messwerten (Pfeilerstauchungsraten) durchgeführt werden. Wie bei den bisherigen Quasi-3D-Modellen kann dabei auch für die weiterentwickelten 3D-Berechnungsmodelle als ein zentraler Validierungsparameter der zeitliche Verlauf der berechneten Pfeilerstauchungsraten im Vergleich zu den vorhandenen Messwerten gut abgebildet werden (Abbildung 2-24).

Die grundlegende These zum Tragverhalten ist nach wie vor, dass im Zentralbereich der Asse-Südflanke von Störungszonen begrenzte Deckgebirgsblöcke infolge der Gravitationskräfte und reduzierter sowie auch überschrittener Scherfestigkeiten in den Störungszonen von Süden her auf das Salinargebirge der Südflanke und die Tragelemente des Baufeldes einwirken und dadurch die aus südlicher Richtung eingetragenen dominanten Deformationen im Salzgebirge hervorrufen. Die im Modell berücksichtigten großräumigen Störungszonen ermöglichen dabei ein eigenes Verschiebungsverhalten der Gebirgsblöcke gegenüber dem restlichen Deckgebirge. Die Modellergebnisse bilden diese Annahme gut ab. Die einzelnen Schnitte in Abbildung 2-25 verdeutlichen exemplarisch für die westliche Hälfte der Südflanke die Abnahme der Verschiebungsbeträge in von Ost nach West streichender Richtung.

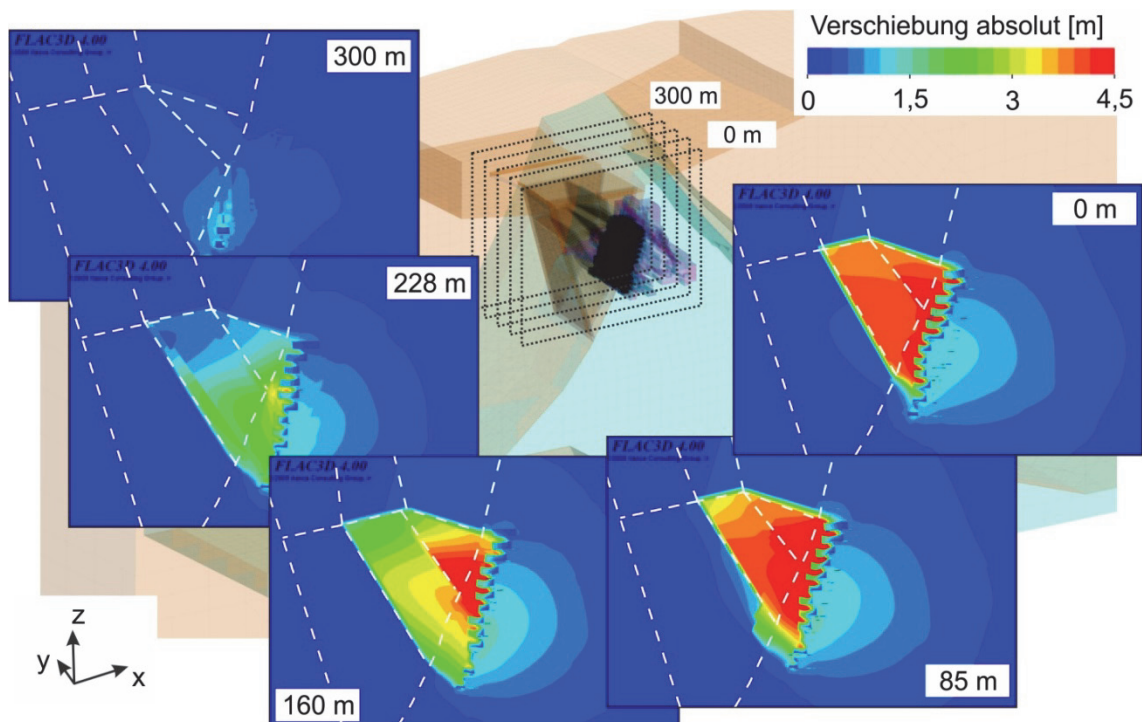
Generell kann geschlussfolgert werden, dass die zum Vergleich herangezogenen Messwerte der Extensometermessungen mit den Modellrechnungen qualitativ und quantitativ gut nachvollziehbar sind. Allerdings haben numerische Simulationen ergeben, dass mit zwei unterschiedlichen Steuerparametersätzen vergleichbare Ergebnisse erreicht wurden. Die Tatsache, dass plausible Ergebnisse mit zwei unterschiedlichen Parametersätzen modelliert werden können, zeigt, dass die Validierung an einigen wenigen Messwerten allein noch nicht zu eindeutigen Angaben hinsichtlich der Wirkung der beteiligten Kräfte und Eigenschaften führt und damit auf dieser Grundlage durchgeführten prognostische Simulationen noch nicht hinreichend zuverlässig sind.

Abbildung 2-24: Vergleich mit charakteristischen in situ-Messwerten (Pfeilerstauchungsrate), 3D-Modell Asse Westteil



Quelle: IFAD

Abbildung 2-25: Modellierung der durch einen Deckgebirgsblock hervorgerufenen Verschiebungen



Quelle: IFAD

2.8. Weiterentwicklung zu einem 3D-Gesamtmodell Asse

Ausgangspunkt der schlussendlich im Projekt verfolgten Entwicklung eines 3D-Modells für die gesamte Asse-Südflanke ist die aus der Digitalisierung vorhandener Informationen zur Geometrie der Schachanlage Asse II und zur geotektonischen Situation ihrer Umgebung entstandene Auto-CAD-3D-Zeichnung. Die Darstellung beinhaltet die räumliche Position

- des Grubengebäudes mit insgesamt drei Baufeldern (Carnallitbaufeld an der Nordflanke, Steinsalzbaufeld im Sattelkern, Steinsalzbaufeld an der Südflanke),
- der unmittelbar in der Nähe des Grubengebäudes verlaufenden Grenzflächen des Salinargebirges (Steinsalz- und Carnallitgebirge) – Nahbereich,
- der Störungszonen im Nichtsalargebirge und
- des großräumigen Gebirgsaufbaus (Fernbereiche mit Abstand > 400 m von der Schachanlage).

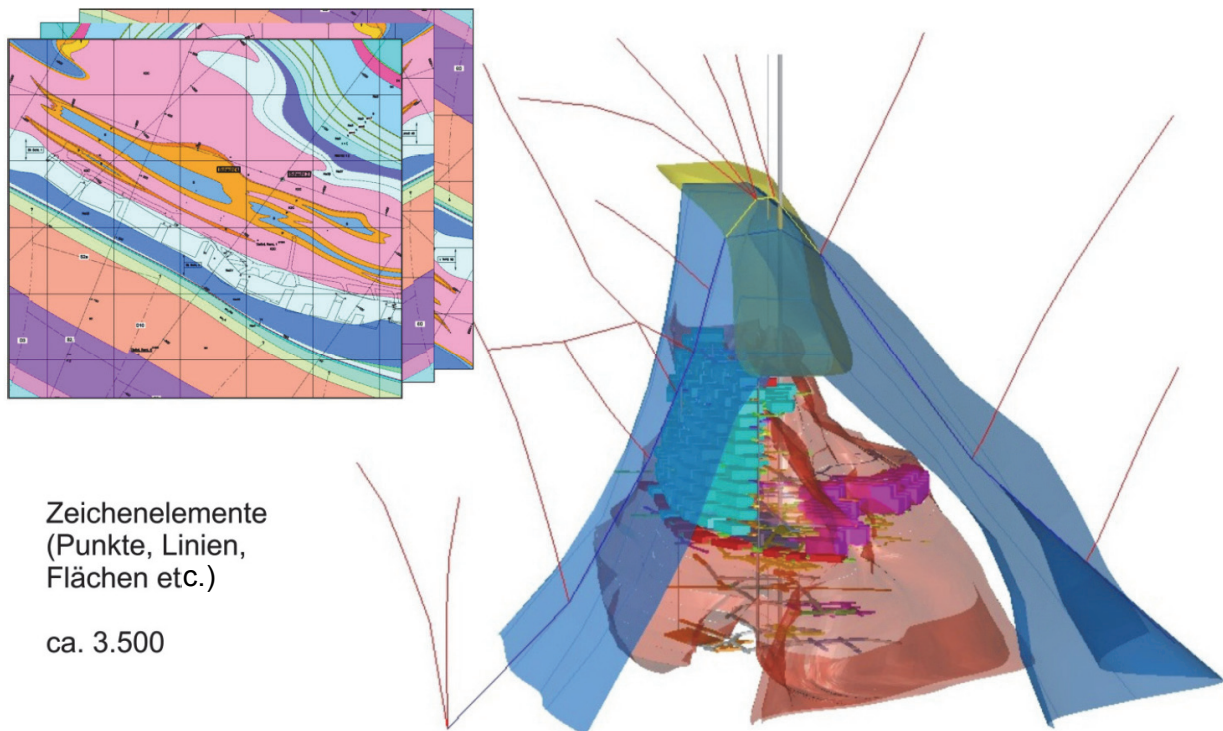
Das Ergebnis dieses Digitalisierungsschritts ist in Abbildung 2-26 bis Abbildung 2-28 als Überblick sowie exemplarisch für die Abbaukammern und die Geometrieebenen der Störungszonen illustriert. Die Digitalisierung führte zur Definition von etwa 3.500 einzelnen geometrischen Elementen, darunter die ca. 150 Abbaukammern des Asse-Grubengebäudes.

Auch für das Gesamtmodell war es natürlich modelltechnisch erforderlich, die komplexen Geometrien zu vereinfachen und die Rechenroutinen zu optimieren, was analog zu der bereits in Kap. 2.6 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt wurde. Bei der Vereinfachung der

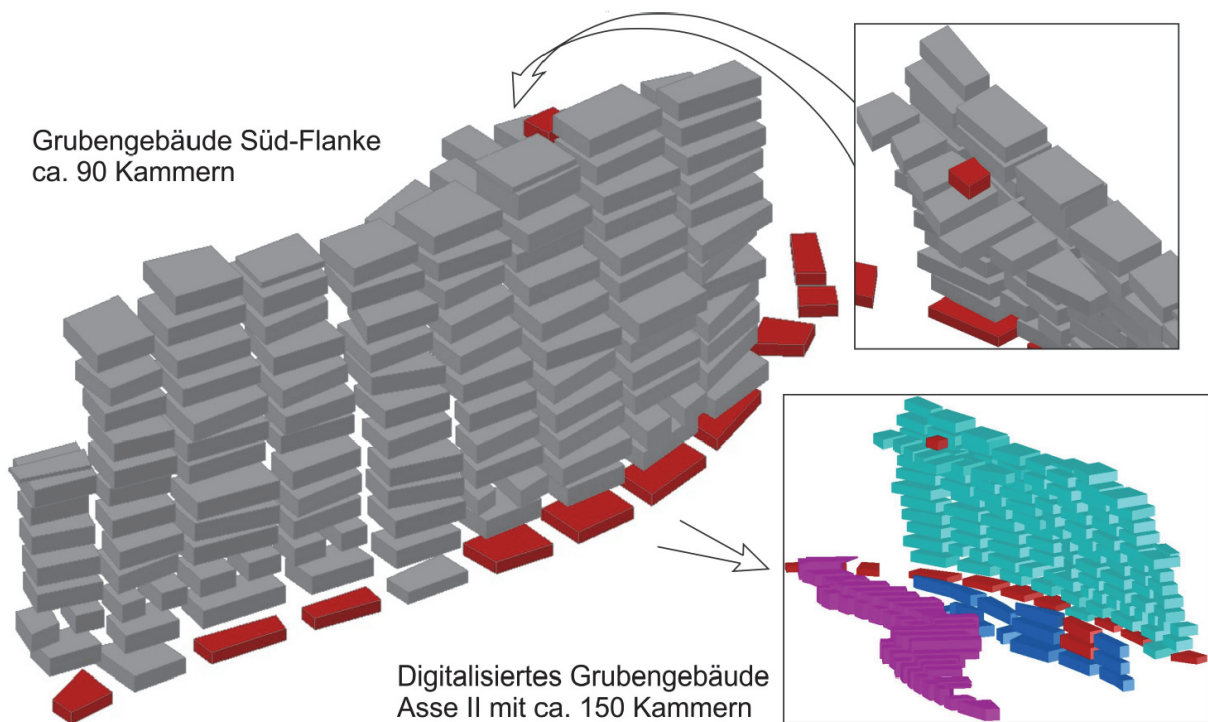
Geometrie der Hohlräume des Grubengebäudes wurde insbesondere darauf geachtet, dass trotz der Vereinfachungen das Gesamtvolumen der Hohlräume des Grubengebäudes möglichst weitgehend dem tatsächlichen Kenntnisstand entspricht, was mit einer Abweichung von lediglich 2 % gut gelungen ist. Die Störungszonen wurden als Ebenen mit einer minimalen Breite von 10 m approximiert und im Modellgitter in Positionen angeordnet, die aufgrund ihrer zur Störungszonenfläche parallelen Diskretisierung in begrenztem Umfang eine nachträgliche Verschiebung ermöglichen. Hinsichtlich des Verlaufs der Oberfläche des Salzsattels wurden Extrapolationen infolge vorhandener Kenntnislücken in größerer Tiefe und im Fernfeld der Schachtanlage erforderlich.

Unter Berücksichtigung der modelltechnisch erforderlichen Vereinfachungen und Anpassungen und der Untergliederung in Teilmodelle ergaben sich analog zu den bereits für die westliche Hälfte definierten Teilmodellen (s. Kap. 2.7) im Gesamtmodell die in Abbildung 2-29 dargestellten, ineinander greifenden Teilmodelle "Grubengebäude", "Nahbereich", "Störungszonenbereich", "Übergang" und "Fernbereiche". Die einzelne Teilmodelle und ihre Maßstabsebenen sind jeweils durch das in Kap. 2.6.2 Verfahren der Übergangselemente miteinander verknüpft.

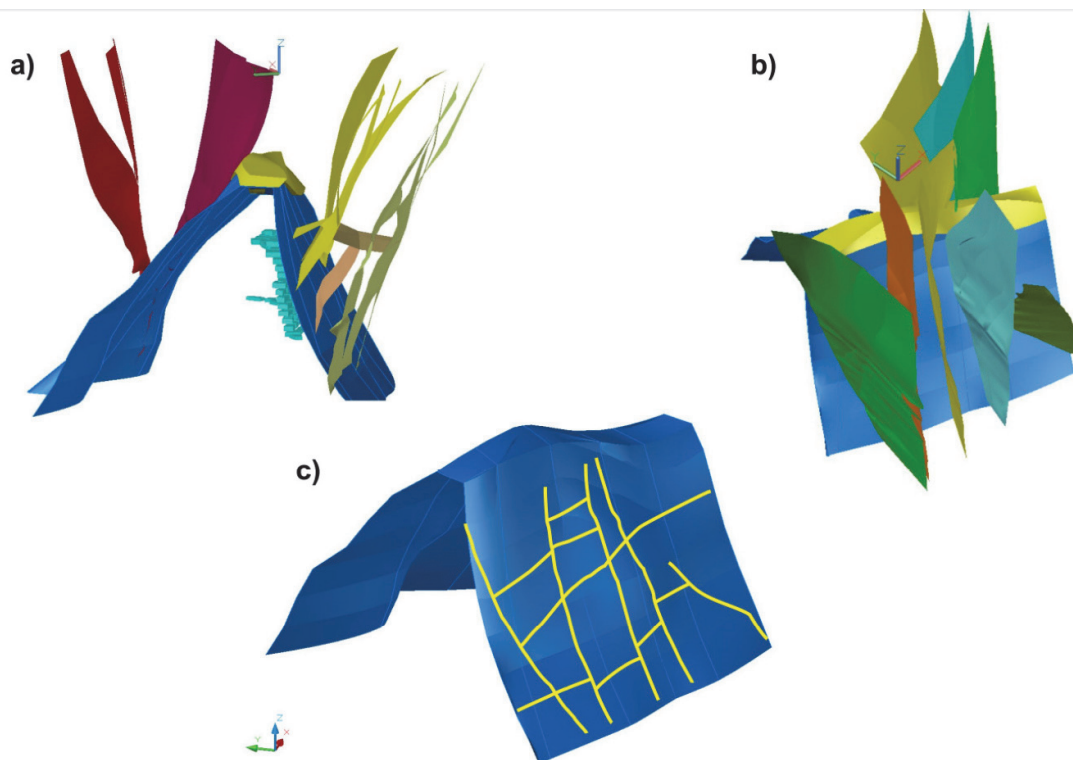
Abbildung 2-26: 3D-Zeichnung zum geotektonischen Aufbau des Gebirges sowie zur Geometrie des untertägigen Hohlraumsystem



Quelle: IFAD

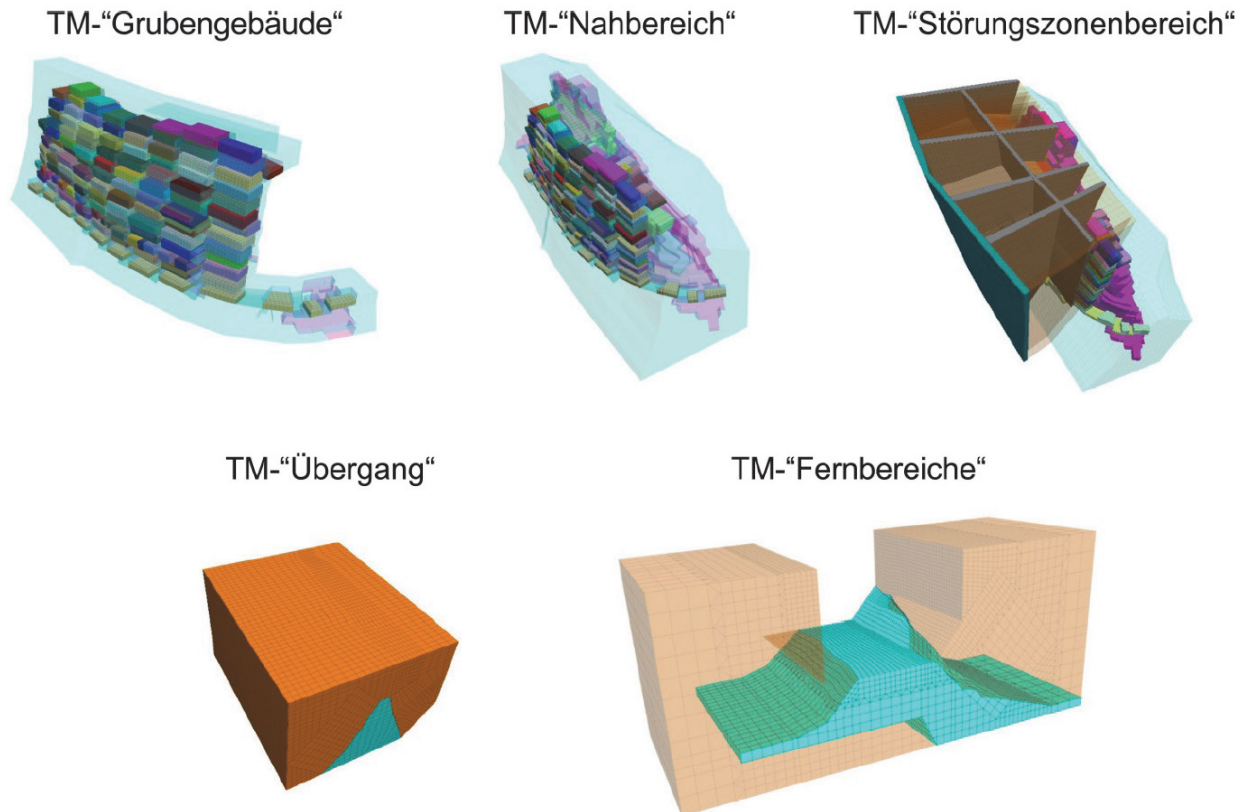
Abbildung 2-27: 3D-Zeichnung zur Digitalisierung der Baufelder des Grubengebäudes

Quelle: IFAD

Abbildung 2-28: 3D-Zeichnung zur Digitalisierung der Störungszonen im Nebengebirge

Quelle: IFAD

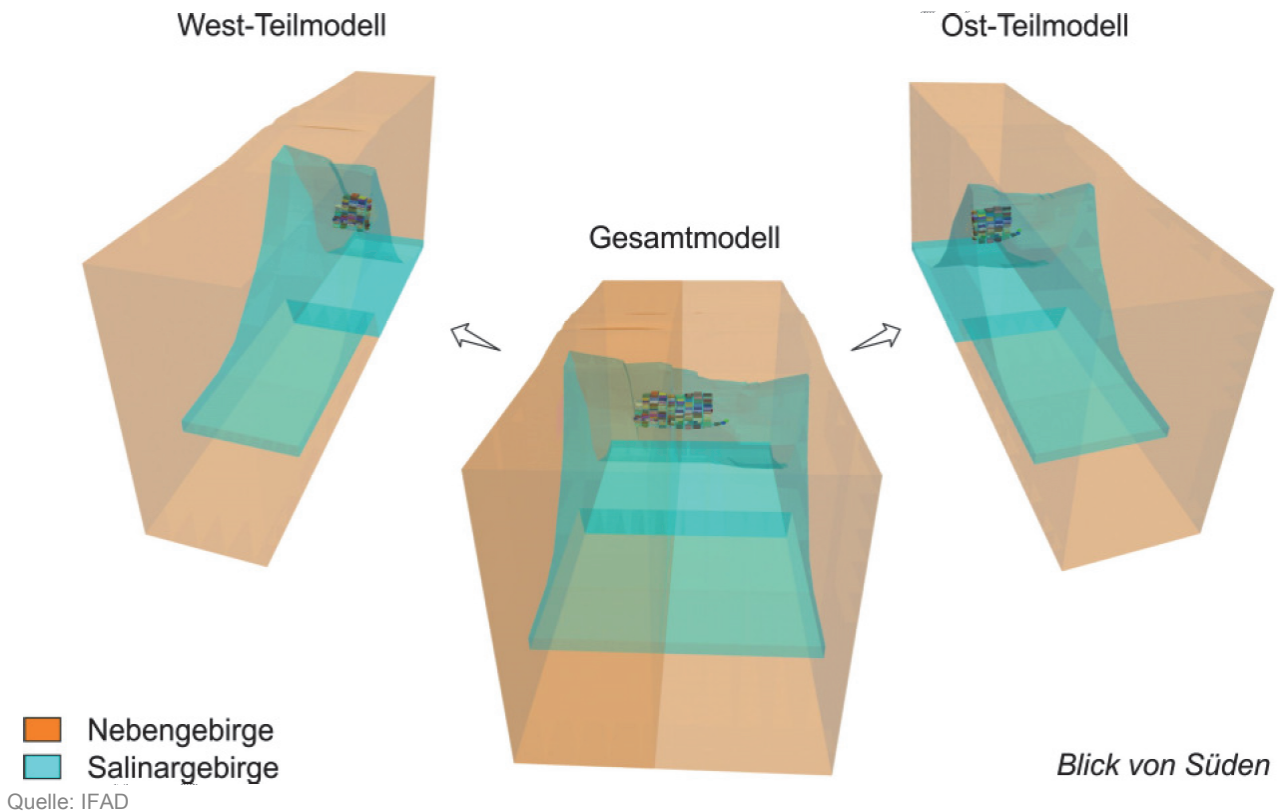
Abbildung 2-29: Teilmodell-Bereiche im 3D-Berechnungsmodell für die gesamte Südflanke



Quelle: IFAD

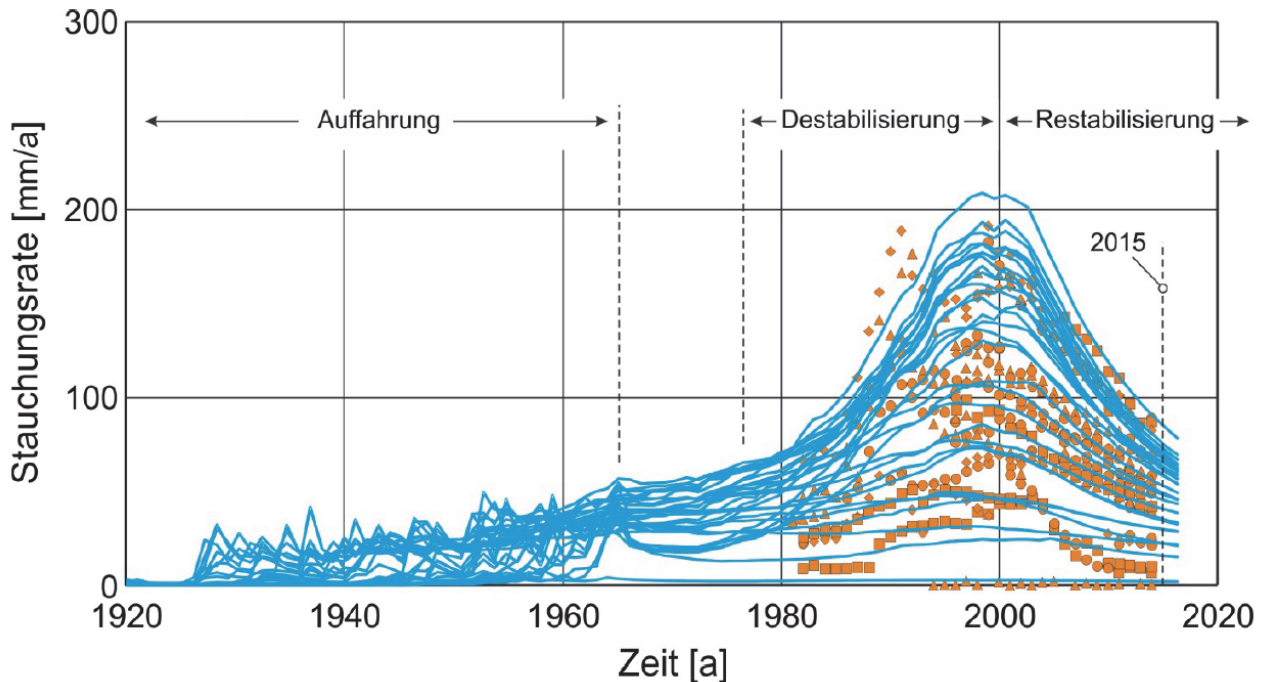
In der abschließenden Diskretisierungsstufe wurden für die komplexe 3D-Modellreihe drei Berechnungsmodelle erstellt, die die westliche und östliche Hälfte des Modellraums sowie den Gesamtraum darstellen (s. Abbildung 2-30). Für den Aufbau dieser 3D-Modelle wurde in der Diskretisierung weitgehend der tatsächliche Kenntnisstand zu den Geometrien der Abbaukammern des Abbaufeldes in der Südflanke des Asse-Salzsattels realisiert, d.-h. es wurde keine Extrusion aus einem Streifenmodell mit vereinfachten Annahmen oder unter vereinfachenden Symmetriebedingungen vorgenommen. Durch die dem Kenntnisstand entsprechende Diskretisierung wurden damit deutlich realitätsnähere 3D-Modelle mit einem sehr hohen geometrischen Übereinstimmungsgrad zwischen Modellgeometrien und den vorhandenen Interpretationen zur realen Geometrie erreicht.

Abbildung 2-30: Berechnungsmodelle für die halbe westliche bzw. die halbe östliche Asse-Südflanke sowie die gesamte Asse-Südflanke



Mit dem nunmehr entwickelten Gesamtmodell mit der Bezeichnung "3D-Gesamtmodell Asse" wurde, analog zur bisherigen Vorgehensweise, eine Re-Analyse der historischen Entwicklung der Asse unter Bergbaueinwirkungen durchgeführt. Die Ergebnisse können zunächst anhand des Indikators "Pfeilerstauchungsraten" mit realen Messwerten zur Tragwerksentwicklung der Asse verglichen werden. Es zeigt sich, dass auch mit dem komplexen 3D-Modell und den im Rahmen des Projekts entwickelten Herangehensweisen sowohl die Abbauhistorie des Salzbergbaus als auch die mit Messwerten belegte Phase der Destabilisierung in den 80er und 90er Jahren des letzten Jahrhunderts mit sich beschleunigenden Pfeilerstauchungen sowie der seit Beginn der 2000er Jahre zu beobachtende degressive Verlauf der Pfeilerstauchungsraten infolge der Versatzmaßnahmen gut nachvollzogen werden kann (s. Abbildung 2-31).

Abbildung 2-31: Vergleich von numerischen Ergebnissen anhand des 3D-Gesamtmodells mit den in situ-Messwerten für die Pfeilerstauchungsraten



Quelle: IFAD

Über die Gegenüberstellung von Mess- und Simulationsbefunden zu Pfeilerstauchungsraten hinaus hat IFAD weitere Vergleiche mit Messwerten der Inklinometermessungen, zur Verschiebung von Festpunkten, zur Absenkung der Tagesoberfläche, zu Volumenänderungen der Einlagerungskammern, zu Spannungsmessungen und zu Versatzdruckmessungen vorgenommen /IFAD 2015/. Aus diesen Vergleichen kann insgesamt die Schlussfolgerung bezogen werden, dass es gelungen ist, insbesondere in Bezug auf die mit Gebirgsverschiebungen im Bereich des Grubengebäudes direkt in Zusammenhang stehenden Messwerte (Pfeilerstauchungen, Inklinometerverschiebungen, Festpunktverschiebungen) gute Übereinstimmungen zwischen Modellaussagen und Messwertdatensätzen zu erzielen.

Im Hinblick auf die großräumigen Gebirgsbewegungen und den hierfür herangezogenen Indikator der Oberflächenabsenkungen zeigt das Modell allerdings zwar qualitative richtige Tendenzen, weicht in der quantitativen Betrachtung aber noch deutlich von den Messwerten der Oberflächenabsenkungen ab. Diese Abweichung wird insbesondere auf die bestehenden Kenntnislücken und Ungewissheiten bezüglich der Materialparameter für die relevanten Gebirgsformationen des Deckgebirges und bezüglich der Lage und Materialeigenschaften der Störungszonen zurückgeführt.

Die vorhandenen Messwerte zu den Gebirgsspannungen (Spannungsgeber im Gebirgs-Tragsystem und Druckkissen im Versatz) werden bei pauschalierender Betrachtung durch die Modelle zumindest in der Größenordnung zutreffend eingeschätzt, wobei hier darauf hinzuweisen ist, dass sich bereits die Messwertdatensätze aufgrund fehlender oder ungenauer Angaben zu den Messwertlokalisationen, zusätzlichen Ungewissheiten insbesondere bei den Versatzdruckmessstellen und ihrer Sensitivität gegenüber lokalen Einflüssen für eine Interpretation hinsichtlich der großräumigeren Entwicklungen im Tragsystem ohnehin weniger eignen.

Insgesamt stellt IFAD eine plausible qualitative und teilweise auch quantitativ sehr gute, oder zumindest zufriedenstellende Übereinstimmung der Ergebnisse der numerischen Simulationen mit dem gesamten Datenkollektiv der vorhandenen, bezüglich der Messgrößen auch sehr unterschiedlichen in situ-Messwerte aus der Asse fest.

Unter Nutzung des entwickelten 3D-Modells hat IFAD zum Projektabschluss die bereits während des Vorhabens mit vereinfachten Modellen getroffenen Abschätzungen zu kammer- oder sohlespezifischen Konvergenzen im Falle eines unbeherrschbaren Lösungszutritts in der Asse erneut durchgeführt und konnte dabei die für die Quelltermmodellierung zuvor schon bereitgestellten Schätzwerte im Grundsatz bestätigen. Dabei wurde in Weiterentwicklung des vereinfachten Ansatzes mit einem instantan ablaufenden Absaufen der Schachanlage erstmals auch eine Dynamik in den Ablauf des unbeherrschbaren Lösungszutritts implementiert, indem in dem modellierten Szenario eine zeitliche Abfolge eines sukzessiven Absaufens unter willkürlicher Annahme einer Flutungsdauer von 0,5 Jahren pro Sohle und damit etwa 7,5 Jahren für das vollständige Absaufen des Grubengebäudes nachempfunden wurde. Dabei konnten erstmals zum Ende des Vorhabens auch kammerspezifische Volumenänderungen ausgewiesen werden, was für zukünftige Modellrechnungen dazu beitragen kann, insbesondere im Hinblick auf Quelltermabschätzungen kammerspezifische Konvergenzraten zu berücksichtigen. Allerdings ist hier ausdrücklich zu betonen, dass im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen keine Szenarienbetrachtungen und auch keine Unsicherheitsanalysen durchgeführt worden sind. Insbesondere fehlt hier derzeit noch eine systematische Sensitivitätsanalyse zur Erfassung der potenziellen Auswirkungen von systemimmanenten Ungewissheiten.

2.9. Zum Projektende erreichter Stand

Zum Projektabschluss steht aus den Arbeiten der TU Clausthal nunmehr ein numerisch stabiles und rechentechnisch ausgefeiltes Modellpaket zur Verfügung, mit dem sowohl die historische Entwicklung des Bergwerks nachvollzogen werden kann als auch plausible Prognosen des zukünftigen Tragverhaltens im trockenen und abgesoffenen Zustand berechnet werden können. Dabei berücksichtigt das am weitesten entwickelte komplexe 3D-Modell auch die wesentlichen dreidimensionalen Asymmetrien, ist also nicht mehr auf vereinfachende Symmetrieüberlegungen angewiesen. Durch unterschiedliche Grade der Diskretisierung und eine ausgefeilte Methodik zur Verbindung von großräumigen und filigranen Strukturen können dabei Fragestellungen unterschiedlicher Maßstabsebenen bearbeitet werden, wobei modifizierte bzw. zusätzliche Teilmodelle für entsprechende lokale Fragestellungen mit herangezogen werden können. Zusätzliche physikalische Modellierungen haben dazu beitragen, die im Grubengebäude ablaufenden Prozesse mit hoher Plausibilität und minimiertem rechentechnischem Aufwand abzubilden. Durch laborative Untersuchungen wurde darüber hinaus die Datenbasis für die im Modell implementierten Stoffgesetze und Materialparameter für zukünftige Modellierungen verbessert.

Die entwickelten Modelle liefern plausible, mit den verfügbaren Messwerten weitgehend konsistente Ergebnisse und bilden damit ein Instrumentarium, dass das prinzipiell geeignet ist, im Rahmen der getroffenen Annahmen und Voraussetzungen eine aus gebirgsmechanischer Sicht plausible und angemessen realitätsnahe retrospektive Abbildung von globalen geomechanischen Prozessen im Gesamtsystem der Asse zu ermöglichen. Damit können die Modelle auch als ein geeignetes Instrumentarium zur Erstellung von prognostischen Simulationen bzw. Tragwerksanalysen genutzt werden. Letzteres, sowie eine denkbare prognostische Analyse von weiteren zukünftigen lokalen Eingriffen in das Tragsystem, beispielsweise im Rahmen der

Rückholung der eingelagerten radioaktiven Abfälle, setzt allerdings eine weitere Reduzierung noch bestehender Datendefizite voraus.

Aufgrund der nach wie vor unbefriedigenden öffentlich bzw. innerhalb des Vorhabens zugänglichen Datenlage haben die mit den Modellen exemplarisch durchgeführten Berechnungen orientierenden und vorläufigen Charakter. Für eine weiter gehende Qualifizierung und Anwendung der Modelle wäre eine detailliertere Kenntnis der örtlichen Gegebenheiten und der räumlichen Strukturen erforderlich, die im Rahmen des Vorhabens nicht verbessert konnte, zumal sich auch die standortspezifische Datenlage nur langsam weiterentwickelt. Qualitative Verbesserungen wären hier durch Erhebung und Einbeziehung weiterer Messdaten möglich. Dabei sollte der Fokus darauf liegen, noch bestehende Ungewissheiten des geomechanischen Systems durch entsprechende Untersuchungen, Messungen und Beobachtungen zu reduzieren. Die Erhebung von Messdaten innerhalb des Tragsystems der Asse ist Aufgabe des Betreibers. Parallel wurde am IFAD das Materialverhalten einzelner Komponenten des Salzgebirges im Rahmen des Vorhabens in Laborexperimenten mit Probenmaterial aus der Asse ermittelt. Die Ergebnisse der Modellrechnungen könnten systematisch mit neueren Messwerten verglichen werden, wenn diese betreiberseitig zur Verfügung gestellt werden. Ergebnisse aus laborativen Untersuchungen zum Gesteinsverhalten werden die noch bestehenden Ungewissheiten weiter reduzieren, stehen aber aufgrund der erforderlichen langen Versuchszeiten erst mit Abschluss des laufenden Vorhabens als Datenmaterial zur Verfügung.

Über weitere Variationsanalysen könnte das Modell iterativ an neue Messergebnisse angepasst werden. Darüber hinaus ist zu analysieren, wie sich die Ergebnisse der prognostischen Analysen voneinander unterscheiden, wenn in einigen Parametern unterschiedliche Parametersätze aus der historischen Validierung auf die Prognose des zukünftigen Tragverhaltens angewandt werden.

3. Themenfeld Quellterm-Modellierung

Die Arbeiten der Brenk Systemplanung GmbH (BS) zur Quelltermmodellierung sind im Detail in den Berichten /BS 2014/ und /BS 2015/ dokumentiert, die dem BMUB als Auftraggeber vorliegen. Die folgende Schilderung fasst die wesentlichen Arbeitsschritte und den zum Projektende erreichten Stand zusammen.

3.1. Ausgangssituation

Hinsichtlich der Ermittlung oder Abschätzung von Quelltermen zur nachfolgenden Untersuchung radioökologischer Konsequenzen eines Absaufens der Schachanlage Asse war die Projektgruppe im Vorgängervorhaben UM09A03205 auf das sogenannte Rührkesselmodell angewiesen, welches bereits in Vorarbeiten von NRG et al. /NRG et al. 2005/ und GRS /GRS 2009/ mit dem Ziel einer konservativen Herleitung von Quelltermen verwendet worden war. Im Kern beschreibt das Rührkesselmodell die vollständige Auflösung des Radionuklid-Inventars der Asse in einem vorgegeben Lösungsvolumen, bzw. die vollständige Auflösung von Teilinventaren bei entsprechend modifizierter Fragestellung. Das Öko-Institut hat für seine eigenen Berechnungen Korrekturen an diesem Modell vorgenommen, die sich i. W. auf neueren Informationen zum Inventar selbst (e. g. des Plutoniumanteils) sowie zu Löslichkeitsbegrenzungen für Radionuklide in gesättigter Salzlösung beziehen. Insbesondere das Inventar von Uran und Thorium in der Asse liegt oberhalb der Gesamtlöslichkeit im vorgegebenen Flutungsvolumen. Ihr Anteil am Quellterm kann daher als Löslichkeits-kontrolliert angenommen werden. Bei allen anderen Radionukliden des Asse-Inventars wurde eine vollständige Auflösung unterstellt, weil die Inventare dieser Radionuklide deutlich unterhalb ihrer spezifischen Löslichkeitsgrenzen liegen und ihr Anteil am Quellterm daher als Inventar-kontrolliert angesehen werden kann.

Nach wie vor war diese, im Grunde naturwissenschaftlich unrealistische, Herangehensweise für eine Weiterentwicklung der Fragestellungen unbefriedigend. Eine Bearbeitung von weitergehenden Fragestellungen, die beispielsweise den Einfluss einzelner Grubenbereiche (z.B. Einlagerungsbereiche bzw. -kammern), die Wirksamkeit von Barrieren, die Folgen sekundärer Wasserwegsamkeiten oder auch die Auswirkungen einzelner Notfallmaßnahmen betreffen, war auf Basis des Rührkesselmodells und der daraus hergeleiteten Quellterme nicht in adäquater Weise möglich.

Vor diesem Hintergrund war es die Aufgabe von Brenk Systemplanung, im Rahmen des Vorhabens ein Quelltermmodell zur Quantifizierung der Freisetzung gelöster radioaktiver Stoffe aus dem Grubengebäude bei einem Absaufen der Asse in Abhängigkeit des zeitlichen Zustands der Schachanlage zu entwickeln. Die hierdurch erzeugten Quellterme charakterisieren den zeitlichen Verlauf der Radionuklidfreisetzung nach einem Volllaufen der Schachanlage und können als Eingangsgröße für die Beschreibung der Radionuklidmigration durch das Deckgebirge an das diesbezügliche Modell des Öko-Instituts weiter gegeben werden. Hierbei werden im Verlauf der Modellerstellung Daten zur Auspressung von Radionukliden aus Berechnungen des IFAD zur Konvergenz im abgesoffenen Zustand, ergänzt um Überlegen zur Gasbildung, übernommen.

3.2. Analyse existierender Modelle

Mit Beginn der Arbeiten hat BS zunächst die bisher vorliegenden Modellierungen zur Radionuklidfreisetzung anderer Autoren hinsichtlich einer Verwendbarkeit der Modellansätze, zur Auswertung und Berücksichtigung der bisher gewonnenen Erkenntnisse und zur Ermittlung der verfügbaren Datenlage für die eigene Modellparametrisierung überprüft, soweit hierüber Informationen verfügbar gemacht werden konnten:

2005 haben NRG et al. /NRG et al. 2005/ ein Kompartimentmodell zur Abbildung des nach dem HMGU-Schließungskonzept vorgesehenen Endzustands des Grubengebäudes entwickelt. Das Modell leistete bereits eine zweckmäßige Auflösung des Grubengebäudes in Modellkompartimente und berücksichtigte hinsichtlich der Parametrisierung die für eine Modellierung wesentlichen Prozesse. Der von NRG et. al modellierte Zustand des Grubengebäudes entsprach dem seinerzeit geplanten Schließungszustand und damit ungefähr dem Zustand nach Abschluss der derzeit geplanten Vorsorge- und Notfallmaßnahmen. Abweichungen bestehen hinsichtlich des Umfangs der vorgesehenen Verfüllmaßnahmen, der Berücksichtigung der Firstspaltverfüllung, sowie der erforderlichen Korrekturen hinsichtlich der Grubenvolumina, sei es durch spätere Vermessungen oder durch die seither stattgefundenen Konvergenz. Eine Modellierung von Szenarien eines Absaufens bei nicht oder unvollständig umgesetzten Verfüllmaßnahmen wurde seinerzeit, aufgrund des andersartigen Schließungskonzeptes, nicht durchgeführt. Bei einem Absaufen zu berücksichtigende erhöhte Zutrittsraten, eine vom geplanten Flutungs-Fluid abweichende Zusammensetzung der Zutrittslösung aus dem Deckgebirge sowie die Ausbildung von bevorzugten Fließwegen in Grube und Deckgebirge waren daher nicht Gegenstand der Untersuchungen. Die in der Modellierung zu erkennende Diskrepanz zwischen den derzeitigen Zutrittsraten in die Asse und dem dabei diskutierten "Drossel"-Konzept als Erklärung für die Begrenzung der Zutrittsmengen einerseits und den wesentlichen höheren Modellannahmen für die Auspressung von Lösung aus dem planmäßig gefluteten Grubengebäude andererseits wurde von den Autoren damals nicht diskutiert.

Die Konsequenzen eines Absaufens der Asse wurden erstmals 2009 von GRS grob abgeschätzt /GRS 2009/, aber nicht modelltechnisch untersucht. Die Abschätzung beschränkte sich methodisch auf ein vereinfachtes Rührkesselmodell als Quellterm, eine angenommene Auspressrate, eine zusätzlichen Verdünnung zur Reduzierung der Salzkonzentration auf für den menschlichen Gebrauch nutzbare Werte sowie der unmittelbaren Umrechnung des Ergebnisses mittels Dosiskonversionsfaktoren. Die damaligen Abschätzungen der GRS gaben Anlass zu den Modellentwicklungen des Öko-Instituts im Vorgängervorhaben UM09A03202.

Im Zusammenhang mit der Abschätzung der Wirksamkeit der Notfallmaßnahmen hat die GRS im Jahr 2010 über weitere Berechnungen zur Radionuklidfreisetzung berichtet /GRS 2010/. Dabei wurde, wie bereits 2005, ein Kompartimentmodell eingesetzt, wobei allerdings einige Änderungen in der Parametrisierung von Konvergenz und Strömungswiderständen sowie bei den Postulaten zum geochemischen Milieu vorgenommen wurden. Das geochemische Milieu wurde dabei als Randbedingung vorgegeben, ergab sich also nicht als Modellergebnis aus den Berechnungen. Da das geochemische Milieu großen Einfluss auf die Radionuklidfreisetzung hat, werden auf diese Weise die Modellergebnisse durch eine wesentliche Randbedingung maßgeblich, wenn nicht überwiegend, beeinflusst. In /GRS 2010/ sind aufgrund der andersartigen Aufgabenstellung keine Angaben zur Radionuklid-Konzentration im Grundwasser und zur daraus abzuschätzenden potentiellen Dosis gemacht worden. Ein Teil der in diesem Vorhaben angestellten Rechnungen bricht vor Ablauf des jeweiligen Betrachtungszeitraums aufgrund numerischer Instabilitäten ab.

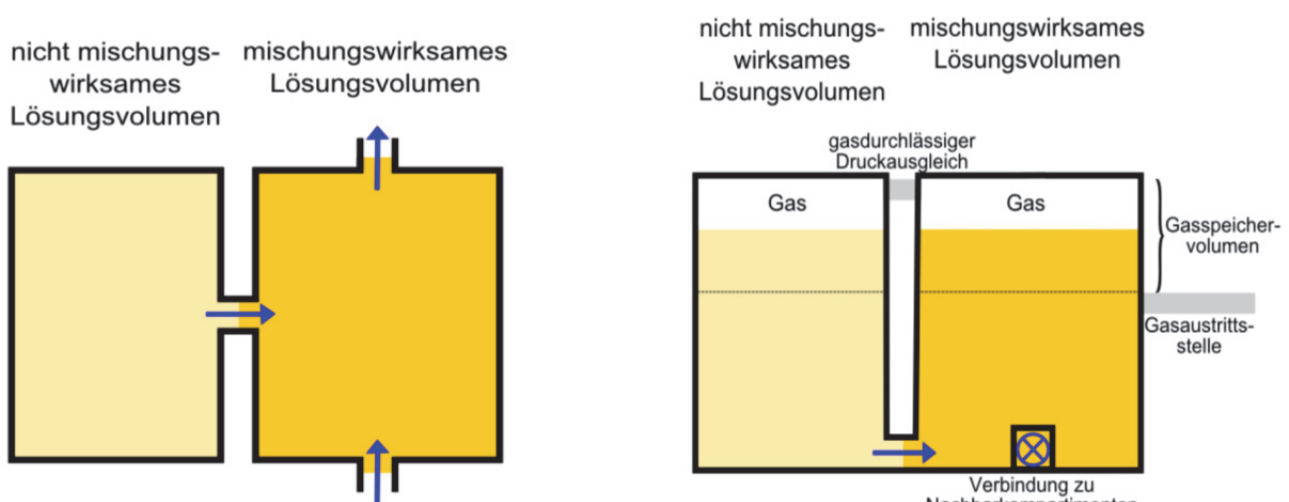
Die radioökologischen Modellierungen des Öko-Instituts aus dem Vorgängervorhaben UM09A03202 beruhen bis dato hinsichtlich der Radionuklidfreisetzung im Grubengebäude auf einem gegenüber den Ansätzen der GRS leicht modifizierten Rührkessel-Modell. Letzteres ist nicht notwendigerweise ausreichend konservativ, da es Szenarien mit möglicherweise höheren Radionuklidkonzentrationen aus Teilkompartimenten der Asse bei kleineren Lösungsvolumina nicht berücksichtigt. Auf diese Weise kann es durch Mittelung über das gesamte Grubenvolumen in einzelnen denkbaren Szenarien zur einer Unterschätzung der Radionuklidkonzentration am Übergang zum Deckgebirge kommen.

3.3. Entwicklung des Kompartimentmodells

Aus den bis dato vorgenommenen Modellierungen anderer Autoren lässt sich grundsätzlich schlussfolgern, dass die schlussendlich berechnete Strahlenexposition stark vom Quellterm und der Dynamik seiner Freisetzung in das Deckgebirge abhängt, und dass außerdem die Rückhaltung im Deckgebirge die Dosis maßgeblich beeinflusst. Durch das Kompartimentmodell sollte im Ergebnis des Vorhabens UM13A03505 eine Methodik zur Verfügung gestellt werden, mit der über eine differenziertere Betrachtung der Vorgänge im Grubengebäude plausible szenariospezifische Quellterme für den Übergang vom Grubengebäude in das Deckgebirge hergeleitet werden können.

Das von BS hierzu konzipierte Kompartimentmodell besteht aus einer Anzahl an Einheiten (Kompartimenten), die über Schnittstellen miteinander verschaltet werden. Jedem Kompartiment werden spezifische Eigenschaften zugeordnet. Wesentliche Eigenschaften der Kompartimente sind ihr Volumen und ihr innerer hydraulischer Widerstand (bzw. ihre Permeabilität). Zusätzlich kann innerhalb des Kompartiments zwischen mischungswirksamen und nicht mischungswirksamen Teilvolumina unterschieden werden. Den einzelnen Kompartimenten kann außerdem ein Gasspeichervolumen zugeordnet werden, über das die Wechselwirkung zwischen Gasbildung und Lösungsinhalt des jeweiligen Kompartiments beschrieben werden kann (s. Abbildung 3-1). Gase können das jeweilige Kompartiment über eine hypothetische Gasaustrittsstelle verlassen, wenn das Gasspeichervolumen erschöpft ist.

Abbildung 3-1: Prinzipieller Aufbau eines Kompartiments



Links: Draufsicht, rechts: Vertikalschnitt

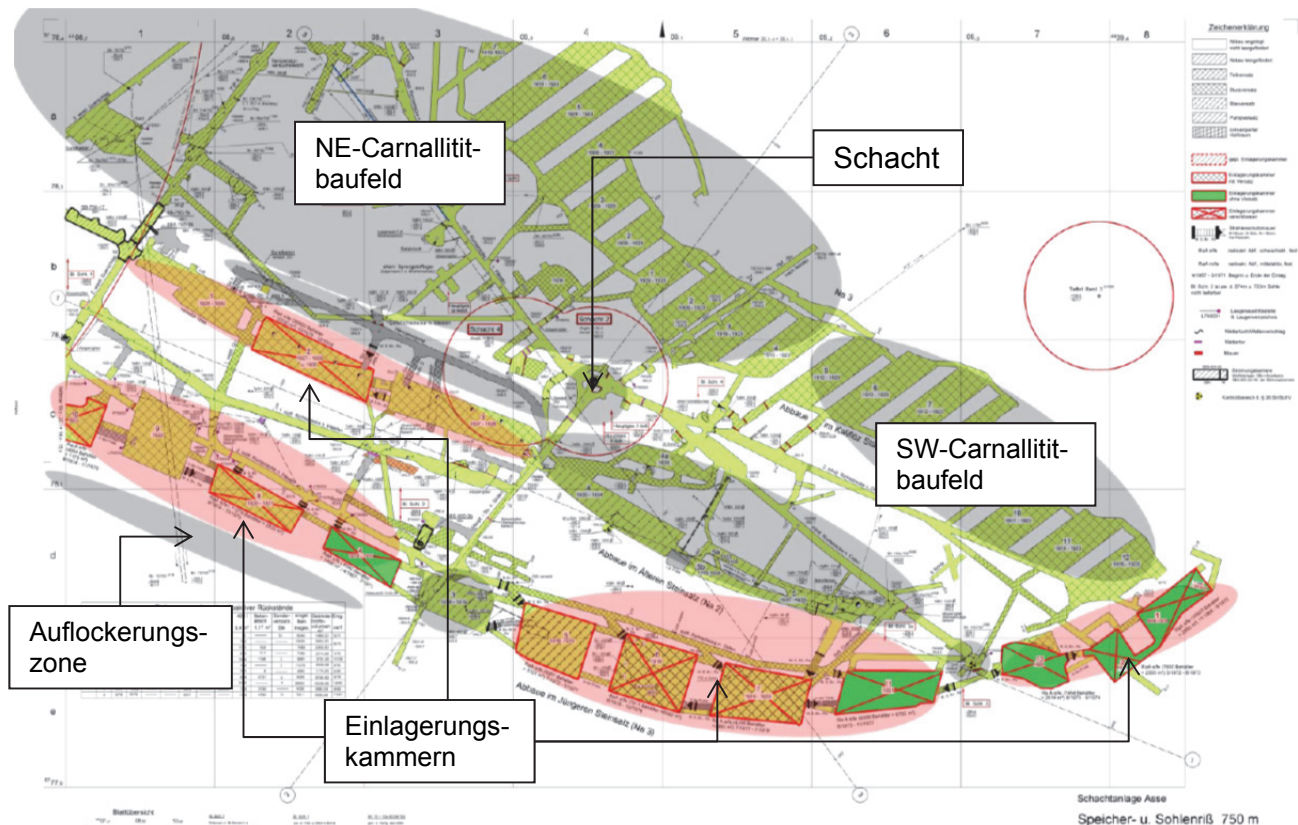
Quelle: Brenk Systemplanung

Die im Modell zu definierenden Einheiten stellen, ausgehend von den im Risswerk dokumentierten Geometrien, sinnvoll zusammengefasste Bereiche des Asse-Grubengebäudes dar, innerhalb derer Freisetzungsprozesse aus dem Inventar in Kontakt mit einer mehr oder weniger gesättigten Salzlösung sowie deren Migration durch Konvergenz und Gasdruck modelliert werden können.

Mit dieser Vorgehensweise kann das gesamte Grubengebäude in Kompartimente aufgeteilt werden, die über verschiedene Verbindungen miteinander verschaltet sind (s. Schema in Abbildung 3-3). Das Modell bildet dabei alle Sohlen der Asse separat ab. Wendelstrecke und

Blindschächte (Blindschacht 1 bis 3 und ein Wetterblindschacht) werden neben dem Schacht Asse II zusätzlich als vertikale Strukturen berücksichtigt. Auch Auflockerungszonen wie beispielsweise im Übergang Südflanke/Deckgebirge wurden als eigene Kompartimente berücksichtigt (s. Beispiel der 750-m-Sohle in Abbildung 3-2).

Abbildung 3-2: Beispielhafte Zusammenfassung von Bereichen der 750-m-Sohle zu Modellkompartimenten

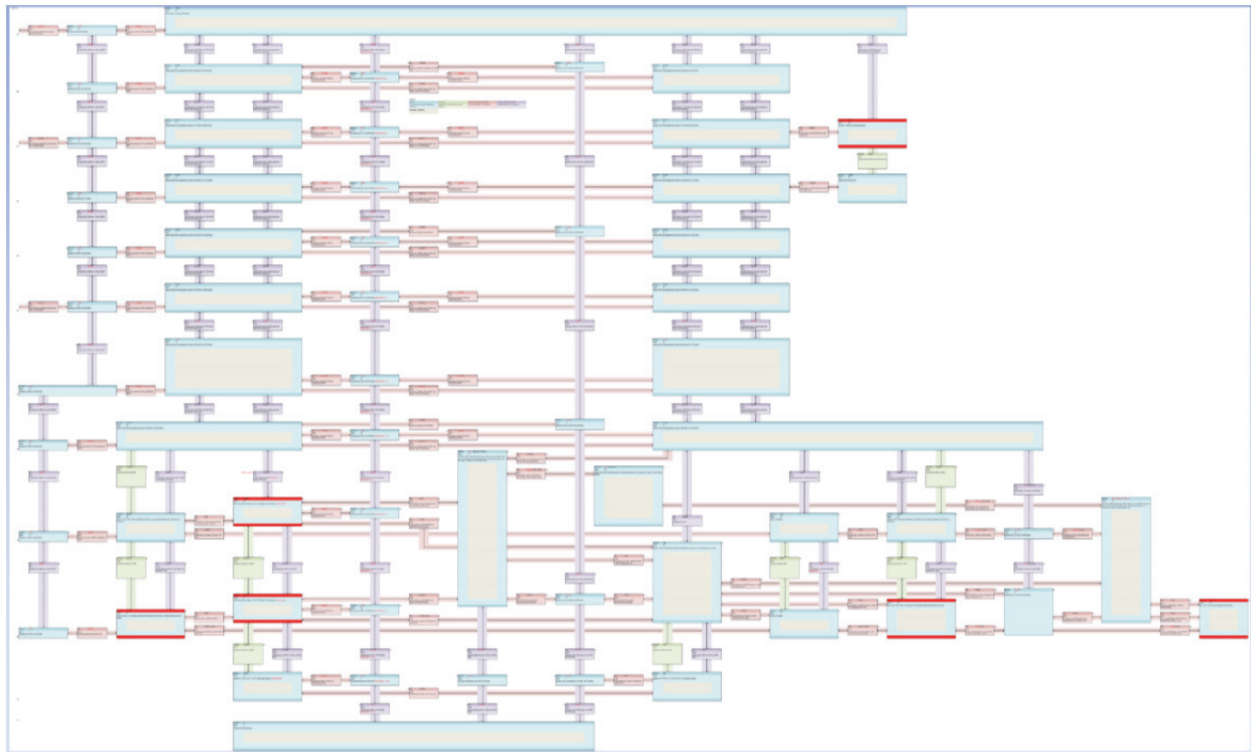


Quelle: Brenk Systemplanung, auf Basis des Sohlenrisses der Asse-GmbH

Die Schnittstellen zwischen den Kompartimenten und die ihnen zugeordneten Prozesse stellen dabei Verbindungen zwischen den Einheiten dar, über die Flüsse von Gasen und Lösungen erfolgen und darüber die aus dem Inventar freigesetzten Radionuklide an benachbarte Einheiten weiter gegeben werden können. Die Verbindungen werden als volumenlos modelliert und weisen einen hydraulischen Widerstand (bzw. eine Permeabilität) auf.

Aus dem Zusammenspiel der in den Bereichen ablaufenden Prozesse und Reaktionen und dem Austausch gelöster Stoffe über die Schnittstellen lassen sich schlussendlich Quellterme am Übertritt in das Deckgebirge in einer zeitlichen Abfolge herleiten. Über die Definition von Szenarien zum jeweiligen Zustand der Asse und ihre Umsetzung in Bezug auf die Eigenschaften der Kompartimente und Schnittstellen bietet ein derartiges Modell zukünftig auch die Möglichkeit, unterschiedliche Anlagenzustände, beispielsweise in Bezug auf die Umsetzung und Wirksamkeit von Notfallvorsorge und Notfallmaßnahmen oder auf die Bergung von Teilinventaren, zu untersuchen, und diesbezügliche Quellterme für den Fall des Absaufens abzuleiten.

Abbildung 3-3: Schematischer Aufbau ("Schaltbild") eines möglichen Kompartimentmodells der Asse-II-Südflanke



Quelle: Brenk Systemplanung

Hinsichtlich der im Modell berücksichtigten Prozesse (Zuflüsse, Auf- und Umlösung von Salzgestein, Konvergenz, Permeabilität, Gasbildungseffekte, Lösungsfluss im Grubengebäude und Abfluss in das Deckgebirge, Mobilisierung, Transport und Zerfall von Radionukliden) benötigt das Modell Eingangsgrößen für die Konvergenz und die Mobilisierung der Radionuklide.

Für das Modell war der Ausgangszustand der Grube beim Absaufen in Abstimmung mit den Projektpartnern festzulegen. Dabei ging es um den anzusetzenden Umfang der Firstspaltverfüllung, den Zustand der Schächte und der Wendelstrecke, Umsetzungsgrad und Qualität der Notfallvorsorge, Umfang und Lokalisierung von Volumenänderungen durch Um- oder Auflösung. Die Basis des derzeitige Informationsstands beruht auf dem im Jahr 2005 geplanten Endzustand der Grube, dem 2009 veröffentlichten Risswerk und den Planungen zur Notfallvorsorge. Konvergenz, neuere Vermessungsdaten und der Status der Firstspaltverfüllung wurden dem gegenüber aktualisiert, wozu die Informationen aus der gebirgsmechanischen Modellierung des IFAD /IFAD 2014/ herangezogen wurden. Auf diesen Grundlagen aufbauend bildet das Kompartimentmodell als Referenzzustand den Zustand der Schachtanlage Asse II im Bezugsjahr 2009, mit plausiblen Annahmen zur Aktualisierung, näherungsweise ab. Anlagenzustände im Zusammenhang mit unterschiedlichem Grad der Umsetzung von Notfallmaßnahmen wurden bis dato nicht berücksichtigt: hierzu wäre die Definition entsprechender Szenarien erforderlich, was nicht Gegenstand des beauftragten Vorhabens war.

Die Grundinformationen zu den chemischen Randbedingungen der Radionuklidfreisetzung innerhalb der Einlagerungskammern sind dem Bericht des damaligen GSF (heute HMGU) zum chemischen Inventar aus dem Jahr 2004 zu entnehmen /GSF 2004/. Weiterhin lagen die von KIT-INE zusammengetragenen Informationen zum Radionuklidverhalten vor, die sich allerdings auf die Wechselwirkung der Radionuklide mit dem Deckgebirge beziehen /INE 2010/.

3.4. Grundannahmen zu den zu berücksichtigenden Eigenschaften von Grubengebäude und Inventar

In diesem Zusammenhang ist einmal mehr darauf hinzuweisen, dass der dem Kompartimentmodell zugrunde liegende Informationsstand nicht vollständig ist und die eingesetzte Parameterwerte daher in weiten Teilen auf Annahmen und Schätzungen sowie auf Herleitungen und Kalibrierungen aus unterschiedlichen, teils inhaltlich nicht völlig übereinstimmenden Quellen beruhen. Diese in relevanten Teilen generische Herangehensweise ist dem allgemein mangelhaften Kenntnisstand bezüglich der erforderlichen Parameter in der Asse geschuldet. Sie beeinträchtigt nicht die methodische Konsistenz des Kompartimentmodells, stellt aber die Gültigkeit der berechneten Modellergebnisse unter den Vorbehalt der Gültigkeit der getroffenen Annahmen.

Der aktuell lückenhafte Kenntnisstand über den Zustand des Grubengebäudes erforderte eine Vereinbarung zu den zu berücksichtigenden Eigenschaften entsprechend dem in der Projektgruppe verfügbaren Informationsstand. Als Ausgangszustand der Grube wurde der Zustand, entsprechend dem verfügbaren Stand des Risswerks (markscheiderisches Risswerk Stand 15.05.2008, geologisches Risswerk Stand 20.04.2009) ohne zusätzliche Vorsorge- und Notfallmaßnahmen, unterstellt. Für das Absaufen sollte dabei berücksichtigt werden, dass die Schächte 2 und 4 wirksam abgedichtet wurden.

Berücksichtigt werden die räumlichen Verhältnisse in der Grube, das Auf- und Umlösen von Salzen im Hinblick auf die Bildung zusätzlicher Hohlräume, die Konvergenz des Gebirges und die Bildung von Gasen durch Korrosion von Metallen und Zersetzen organischen Materials.

Eine Rückhaltung gelöster Radionuklide in der Grube sowie die Berücksichtigung von Dichte- und Temperatureffekten auf die Migration der Flutungslösung in der Grube waren nicht zu berücksichtigen. Die Nichtberücksichtigung dieser Effekte trägt zur Konservativität der Ergebnisse bei, da sowohl Rückhalt als auch Dichteunterschiede tendenziell zu niedrigeren Radionuklidkonzentration im Quellterm an der Austrittsstelle in das Deckgebirge führen.

Die Parametrisierung erfolgte entsprechend den vorliegenden Unterlagen, die zeitliche Entwicklung der Konvergenzen wurde durch den Projektpartner IFAD berechnet und an Brenk Systemplanung weitergegeben /IFAD 2014/. Das zugrunde zu legende Radionuklid-Inventar wurde aus der jüngsten Prüfung der Inventarinformationen durch TÜV Süd /TÜV 2013/ übernommen. Weitere wesentliche Informationsquellen hinsichtlich der Parametrisierung waren die Modellierungen von NRG, AF Colenco und GRS (/NRG et. al. 2005;/ /GRS et. al. 2011/) sowie Angaben im Zusammenhang mit der Notfallplanung seitens des Betreibers Asse GmbH /ASSE 2010/.

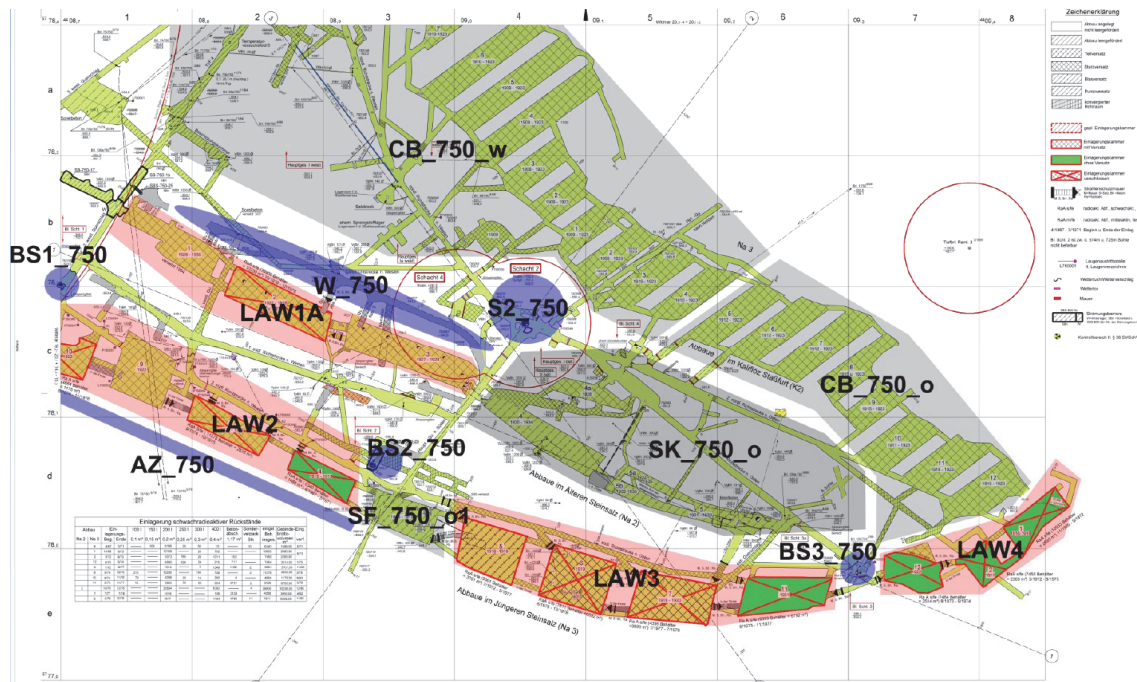
3.4.1. Geometrische Annahmen

Brenk Systemplanung hat im Kompartimentmodell für jede einzelne Sohle eine sinnvolle Aufteilung in Kompartimente vorgenommen (s. Beispiel in Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5). Die erreichte Auflösung ermöglicht eine komplexe Betrachtung der Quelltermentstehung, die weit über das alte Rührkesselmodell hinausgeht.

Die Struktur kann im Rahmen einer weiteren Entwicklung noch erweitert werden, um für zukünftige Untersuchungen eine größere Flexibilität hinsichtlich unterschiedlicher Grubenzustände, Notfallmaßnahmen und präferentieller Fließwege (e.g. Auflockerungszone zwischen den Abbauen und der Südflanke und dem Deckgebirge) zu erreichen und anbieten zu können.

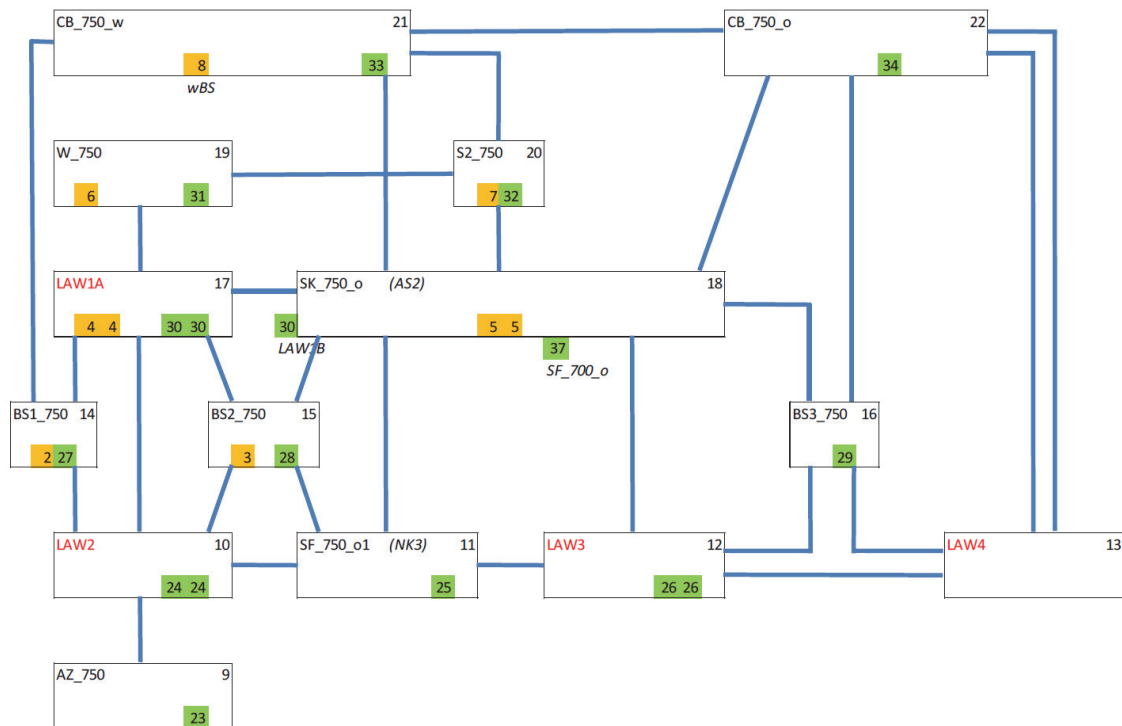
Hinsichtlich der für die Modellierung zentralen Volumina der einzelnen Kompartimente wurde das Gesamtvolumen der Schachanlage Asse aus dem Vorsorge-/Notfallkonzept der Asse GmbH /ASSE 2010/ herangezogen und hinsichtlich der räumlichen Differenzierung nach Tiefenaufschluss, Carnallitbaufeld, Südflanke, Sattelkern und Schächten auf Informationen aus /TUC 2014/, /NRG et al. 2005/ und GRS 2011/ zurückgegriffen. Da sich hierbei zahlenmäßige Unterschiede zum Gesamtvolumen ergaben, war eine Skalierung der räumlichen Differenzierung auf die Summenangabe aus /ASSE 2010/ erforderlich.

Abbildung 3-4: Kompartimente der 750-m-Sohle



Quelle: Brenk Systemplanung

Abbildung 3-5: Beispielhafte Aufteilung der 750-m-Sohle in Kompartimente und Verbindungen



Quelle: Brenk Systemplanung

3.4.2. Permeabilitätsannahmen

Die Auflockerungszone in der Südflanke (beispielhaft Kompartiment "AZ_750" in Abbildung 3-5) wurde als 200 m lange und 10 m mächtige Schicht im Salzgestein zwischen den Abbauen der Südflanke und dem Deckgebirge mit einer Porosität von 1 % und einer Permeabilität von 10^{-12} m^2 modelliert. Dabei wurden die Werte so gewählt, dass eine Wegsamkeit für einen fiktiven Zufluss einer NaCl-gesättigten Lösung von $1.000 \text{ m}^3/\text{d}$ entsteht, der das Absaufen der Asse simuliert. Da die Notfallplanungen der Asse GmbH davon ausgehen, dass Zutrittsmengen von bis zu $500 \text{ m}^3/\text{d}$ handhabbar sind, wurden niedrigere Werte nicht berücksichtigt. Diese Wegsamkeit bleibt auch für das Auspressen der Lösung nach dem Absaufen wirksam.

Für die Abschätzung der Permeabilität der mit Salzgrus verfüllten Gruben Hohlräume wurde ein heuristischer Ansatz nach GRS gewählt, in welchen die Referenzpermeabilität sowie die Referenzporosität und die zeitlich abhängige Porosität einfließen. Die Werte der Permeabilitäten in den Gruben Hohlräumen, den Schweben in der Südflanke und im Sattelkern entsprechen den Angaben in /GRS et. al. 2011.

Für die Permeabilitäten der weiteren Kompartimente und die Wegsamkeiten im Grubengebäude werden im Modell hilfsweise folgende Annahmen getroffen:

- Vertikaler Transport erfolgt über die offenen Wegsamkeiten der bergmännischen Verbindungen, d.h. i. W. über die Blindschächte und die Wendelstrecke, sowie zusätzlich lokal über die offene Beschickungsbohrung zwischen der 490-m-Sohle und MAW-Kammer 8a/511.
- Die Strecken sind offen und daher ebenfalls als hydraulischer Kurzschluss definiert.

- Schacht 2 und die Einlagerungskammern sind verschlossen, jede Kammer verfügt über zwei Verbindungen.
- Die Flanken außerhalb der Auflockerungszone sind hydraulisch dicht.

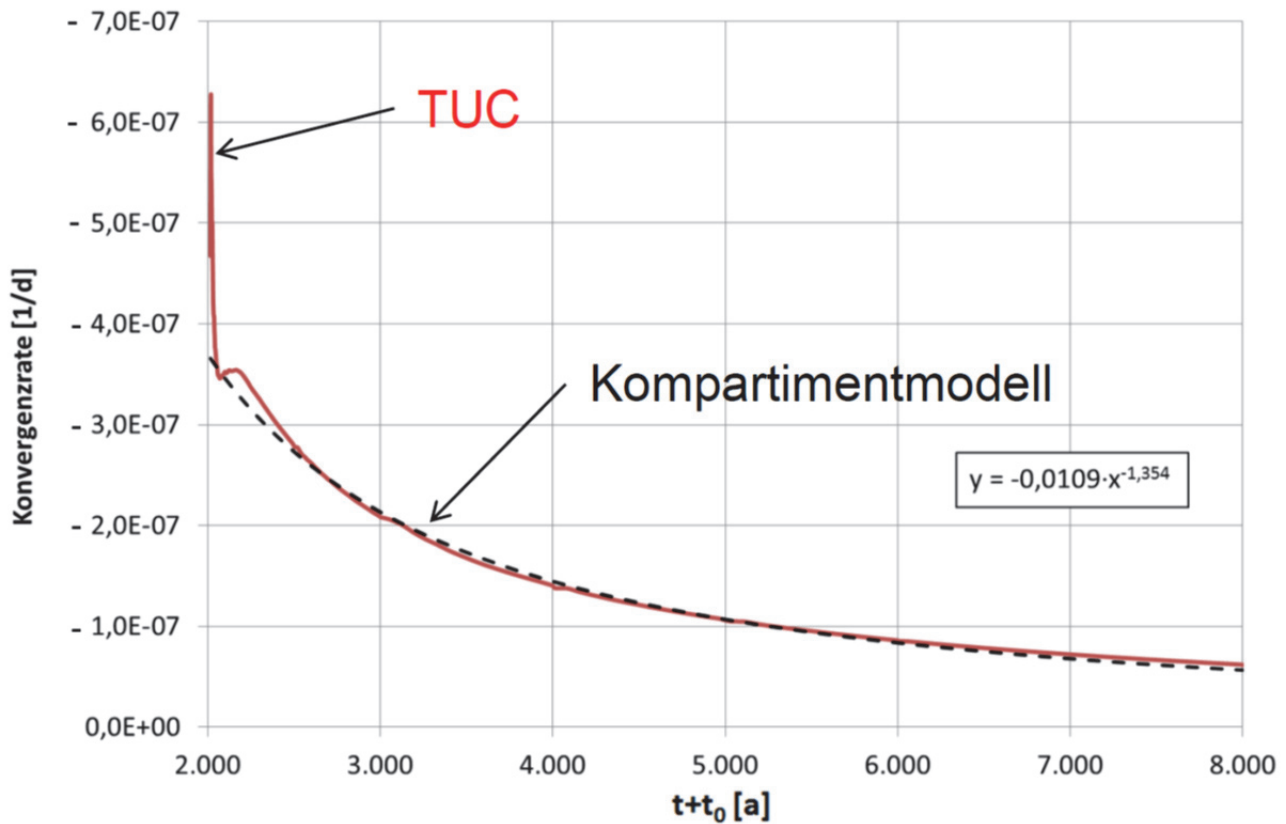
3.4.3. Hohlraumkonvergenz

Die zeitliche Entwicklung der Abbauvolumina und der Konvergenzraten für die verschiedenen Abbaue des mit Lösung gefüllten Grubengebäudes wurden von IFAD näherungsweise ermittelt /IFAD 2014/. Dazu wurde eine Analyse der Parametersätze der in den Berechnungen verwendeten Stoffmodelle durchgeführt. In der aktuell auf Basis von zeitlich erforderlichen Vereinfachungen angestellten Überlegungen wird der Versatzdruck auf den höheren Sohlen der Südflanke überschätzt und auf den tieferen Sohlen unterschätzt. Die Konvergenzen der unteren Sohlen werden deswegen bei langen Zeiträumen nicht hinreichend genau abgebildet. Umlösungseffekte aus der Umlösung des Carnallitits konnten im Rahmen des Vorhaben grob abgeschätzt werden.

Für die Berechnungsszenarien wurden ein Referenzfall und ein Fall erhöhter Konvergenzen abgeleitet. Die von IFAD übernommenen Konvergenzraten beziehen sich auf ein Volllaufen im Jahr 2015. Die Einbindung der von IFAD ermittelten zeitlichen Entwicklungen der Konvergenzraten für jede Sohle in das Kompartimentmodell erfolgte über eine von Brenk Systemplanung entwickelte Näherung mit zwei angepassten Parametern. Die Parameter wurden so gewählt, dass der von IFAD ermittelte zeitliche Verlauf der Konvergenzraten für jede Sohle der Südflanke sowie für den Sattelkern und das Carnallitit-Baufeld gut angenähert werden kann (s. Beispiel in Abbildung 3-6).

Für lange Zeiträume (ab 6.000 Jahre nach dem Absaufen für den Referenzfall und nach 2.000 Jahren für den Fall erhöhter Konvergenz) liegen keine Berechnungen des IFAD vor. Annähernd wurden Berechnungen bis 15.000 Jahre bzw. 5.000 Jahre mit der Annahme durchgeführt, dass eine weitere Volumenabnahme durch Konvergenz proportional zum Fluidvolumen erfolgt. Als Endbedingung wurde festgelegt, dass keine weitere Konvergenz erfolgt sobald die Porosität eines Kompartiments den Wert von 1% oder das Gesamtvolumen eines Kompartiments 10% des anfänglichen Wertes erreicht hat.

Abbildung 3-6: Näherungsweise mathematische Umsetzung der Konvergenzrate, beispielhaft für die 750-m-Sohle zur Implementierung in das Kompartimentmodell, Referenzfall

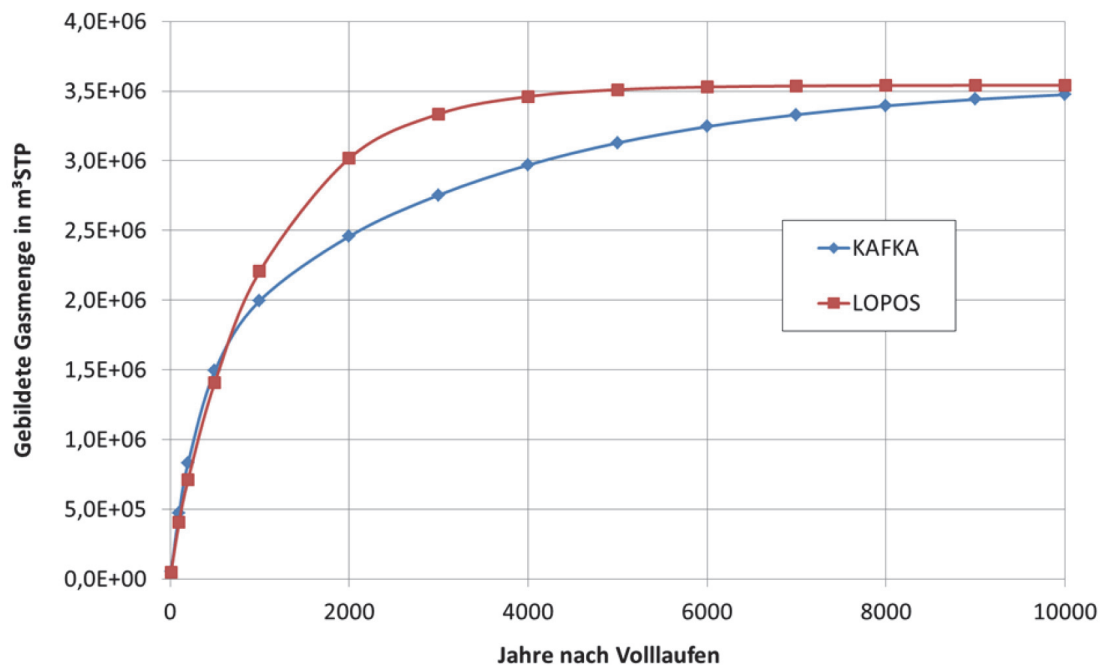


Quelle: Brenk Systemplanung

3.4.4. Gasbildung

Gasbildung erfolgt im abgesoffenen Bergwerk aufgrund von Metallkorrosion und/oder Zersetzung organischer Stoffe. Analog zu den bereits in /NRG et. al. 2005/ definierten Randbedingungen wird die Gasbildung aus organischen Substanzen aufgrund ihres geringen Beitrags auch im vorliegenden Fall vernachlässigt. Für die Beschreibung der Gasbildung wird der Ansatz nach /NRG et. al. 2005/ übernommen. Dabei wurde aus den beiden dort dokumentierten Herleitungen der konservativere Parametersatz aus LOPOS ausgewählt (s. Abbildung 3-7).

Die in der Asse vorhandenen Metallmengen wurden aus /GRS et. al. 2011/ übernommen. Für die Gasumsetzungsraten werden in /NRG et al. 2005/ neben mittleren Werten auch Maximalwerte angenommen. Analog dazu kann im Kompartimentmodell der Brenk Systemplanung wahlweise mit einem mittleren Referenzwert und mit einem 2-mal höheren Wert gerechnet werden.

Abbildung 3-7: Gasbildung in der abgesoffenen Asse nach /NRG et. al. 2005/

Quelle: Brenk Systemplanung, nach /NRG et. al. 2005/

Für den Gastransport wurde angenommen, dass das Gas, nachdem es das entsprechende Kompartiment in Abhängigkeit der örtlichen Druckverhältnisse ausgefüllt hat, aufgrund weiterer Gasbildung oder aufgrund von Konvergenz über Wegsamkeiten nach oben strömt und dort ein den geänderten Druckbedingungen entsprechendes Volumen einnimmt. Hieraus ergibt sich ein diskontinuierlicher Verlauf des Einflusses der Gasbildung und Gasmigration auf die Lösungsauspressung. Die Gas speichernden Kompartimentanteile wurden aus /NRG et. al. 2005/ übernommen, mit Ausnahme einer Korrektur für die MAW-Kammer, um hier einen später realisierten Bohrlochverschluss zu berücksichtigen.

3.4.5. Inventar und radioaktiver Zerfall

Das Inventar (59 Radionuklide, Stichtag 01.01.2012) wurde in Abstimmung mit dem Partner Öko-Institut auf der Basis der letzten Prüfung durch den TÜV SÜD von 2013 gewählt /TÜV 2013/. Zur Berücksichtigung der Zerfallsvorgänge wurde als Stichtag der Flutung der 01.01.2015 und als Beginn des Austritts ins Deckgebirge der 01.01.2020 angesetzt.

Zusätzlich wurde in jedem Einlagerungskompartiment des Modells ein virtueller Tracer installiert.

3.4.6. Auf- und Umlösungsprozesse

Gegenwärtig wird das Auf- und Umlösen von Salzen in der volllaufenden Grube in dem Modell nicht berücksichtigt. Derartige Lösungsvorgänge führen zur Bildung zusätzlichen Hohlraums, zur Entstehung neuer Fließwege innerhalb der Grube, zu dichtegetriebener Konvektion und zu einer Veränderung der Konvergenzraten. Um dieses komplexe Zusammenspiel in einem Modell plausibel zu erfassen, bedarf es einer detaillierteren Analyse der Grube und einer Erweiterung des Modells. Eine solche Weiterentwicklung war nicht mehr Gegenstand des hier beschriebenen Vorhabens, wäre aber im Rahmen eines nächsten Entwicklungsschritts sinnvoll. Um dennoch

einen ersten Eindruck von den Konsequenzen dieser Prozesse zu vermitteln, hat Brenk Systemplanung eine zusätzliche Variante „Zufluss ungesättigter Lösungen“ mit einem (lösungsbedingt) erhöhten Hohlraumvolumen modelliert.

Ausgehend von einem fluidzugänglichen Volumen von ca. 2 Mio. m³ zum Ende des Jahres 2009 wurden folgende Ableitungen zur Entstehung neuer Hohlräume getroffen: Bei einer nur 25%igen NaCl-Sättigung der Zutrittslösung gehen ca. 250.000 m³ Steinsalz zusätzlich in Lösung. Ist die Lösung gegenüber Carnallit ungesättigt, kommt es zu einer Umlösung von ca. 3 Mio. m³ Carnallit und der Entstehung von 1,35 Mio. m³ zusätzlichen Porenraums. In der zusätzlichen Variante wurde deshalb der Porenhohlraum in den Abbauen der Südflanke um ca. 250.000 m³ erhöht und in den Carnallit-Abbauen um 1,35 Mio. m³.

3.4.7. Löslichkeitsgrenzen und Rückhalt von Radionukliden im Grubengebäude

Einige Radionuklide mit sehr langen Halbwertszeiten liegen in der Asse in vergleichsweise großen stofflicher Mengen vor. Untersuchungen des Karlsruher Institut für Technologie – Institut für nukleare Entsorgung (KIT-INE) kamen zu dem Ergebnis, dass das Inventar der Elemente Uran, Plutonium, Thorium und Americium in den Einlagerungsbereichen der Schachanlage Asse II bei einem Absaufen nicht vollständig mobilisiert werden kann, da andernfalls ihre Löslichkeitsgrenzen überschritten würden /INE 2010/.

Bei den in der Schachanlage Asse II eingelagerten Abfällen betrifft dies insbesondere die Radionuklide U-238 (Inventar in der Asse: 104.000 kg) und Th-232 (Inventar in der Asse: 81.000 kg), die im Inventar mit vergleichsweise großen stofflichen Mengen enthalten sind. Die große Menge kann – abhängig vom chemischen Milieu – dazu führen, dass die Radionuklide in den Einlagerungskammern aufgrund von Löslichkeitsgrenzen nur teilweise in Lösung gehen können. Da die Löslichkeitsgrenzen elementspezifisch und nicht nuklidspezifisch sind, hat dies zur Folge, dass auch andere Isotope des gleichen Elements, z. B. U-234 (Inventar in der Asse: 6 kg) und Th-230 (Inventar in der Asse: 0,2 kg) einer Löslichkeitsbegrenzung unterliegen, obwohl sie in nur vergleichsweise geringen stofflichen Mengen vorliegen.

Die Freisetzung dieser Elemente aus dem Inventar wurde daher im Kompartimentmodell als löslichkeitslimitiert angenommen. Für die anderen am Radionuklidinventar beteiligten Stoffe gilt dies nicht, so dass für diese weiterhin eine dem Inventar entsprechende Freisetzung angenommen wurde. Diese Information wurde bei der Quelltermberechnung mit berücksichtigt.

Im Modell führt die Berücksichtigung oder Nichtberücksichtigung einer Löslichkeitsbegrenzung für die betroffenen chemischen Elemente zu deutlichen Unterschieden im errechneten Stoffaustrag: für Uran bedeutet dies beispielsweise, dass ohne Löslichkeitsgrenze von den anfänglich vorhandenen 104.000 kg Uran rechnerisch nach 10.000 Jahren etwa 31.000 kg aus dem Grubengebäude ausgetragen werden, während der Ansatz einer Löslichkeitsgrenze gem. /INE 2010/ im gleichen Zeitraum nur einen rechnerischen Austrag von ca. 8 kg erlaubt.

Eine darüber hinaus gehende Rückhaltung von Radionukliden im Grubengebäude, beispielsweise durch Sorptionsprozesse, konnte mangels geeigneter Datengrundlage nicht berücksichtigt werden. Insofern beschränkt sich die Quelltermmittlung hinsichtlich des Radionuklidrückhalts auf vergleichsweise gut benannte Wechselwirkung zwischen Inventar und Lösungsvolumen (i.e. Löslichkeit). Ebenso unberücksichtigt blieb der Einfluss von Dichte- und Temperatureffekten auf die Migration der Flutungslösung in der Grube

Die Quelltermmittlung bleibt in dieser Hinsicht konservativ, da ein stoffspezifischer permanenter oder temporärer Rückhalt von Radionukliden im Grubengebäude tendenziell zu niedrigeren

Radionuklidkonzentration im Quellterm an der Austrittsstelle in das Deckgebirge führt, das Verfahren in seiner jetzigen Konfiguration die Radionuklidkonzentration im Quellterm also überschätzt.

3.4.8. Radioaktiver Zerfall

Bei der Modellierung der Quelltermstehung wird der radioaktive Zerfall und der Aufbau von Zerfallsprodukten („Tochternukliden“) berücksichtigt. Die Zerfallskorrektur im Programm bezieht sich dabei auf den 01.01.2012 als dem Stichtag der Aktivitätsangaben für das Radionuklidinventar in /TÜV 2013/.

3.5. Ergebnisse aus der Modellierung von Szenarien eines raschen Absaufens der Asse

Folgende Varianten für das Szenario „rasches Volllaufen der Schachanlage“ wurden berechnet:

- (1) Referenzfall (Referenzzustand der Grube im Dezember 2009)
- (2) Variante mit unwirksamen Verschlüssen der Einlagerungskammern
- (3) Variante mit erhöhter Konvergenz und erhöhter Gasbildungsrate sowie
- (4) Variante mit erhöhtem Hohlraumvolumen aufgrund von Lösungsprozessen

Berechnet wurde die zeitliche Entwicklung der aus dem Grubengebäude ausgepressten Volumina der Lösung zusammen mit den entsprechenden Aktivitätsmengen der 59 Radionuklide des Inventars in dieser Lösung.

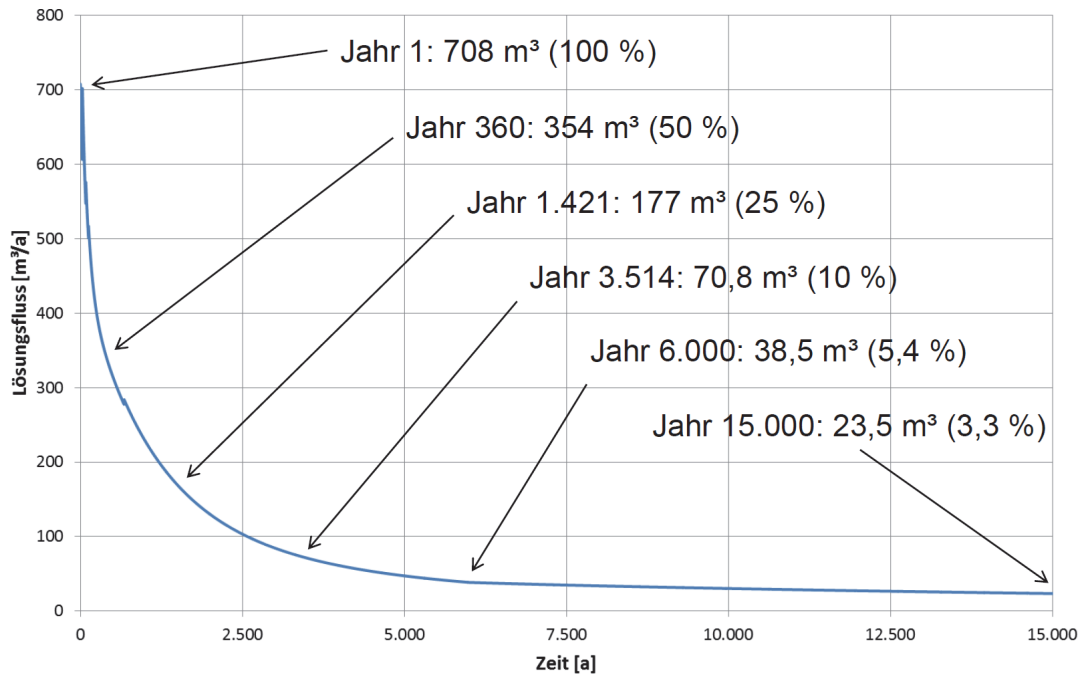
Vom Projektpartner IFAD wurden frühzeitig vorläufige Berechnungen zur Konvergenz der abgesoffenen Grube zur Verwendung bei der Entwicklung des Kompartimentmodells durchgeführt [IFAD 14]. Für den Referenzparametersatz lagen hieraus Daten für einen Zeitraum von 6.000 a vor, für den Datensatz erhöhter Konvergenz lagen Daten für einen Zeitraum von 2.000 a vor². Die Betrachtungszeiträume der Kompartimentmodellierung erstrecken sich bis zu 15.000 Jahren bzw. 5.000 Jahren in die Zukunft nach einem Absaufen. Ergebnisse der Kompartimentmodellierung, die weiter als 6.000 bzw. 2.000 Jahre in die Zukunft liegen beruhen auf einer Extrapolation der vorläufigen Daten des IFAD und sind daher mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftet [BS 2015].

Neben den Radionukliden wurde ein fiktiver Tracer mit berechnet und zum Vergleich außerdem die homogene Durchmischung aller Radionuklide entsprechend dem alten Rührkesselmodell betrachtet. Aus dem Modell ergibt sich der in Abbildung 3-8 dargestellte Verlauf der aus dem Grubengebäude jährlich ausgepressten Lösungsvolumina für den Referenzfall (Variante (1)) und in Abbildung 3-9 für den Fall erhöhter Konvergenz und Gasbildung (Variante (3)).

Die Lösungsabflüsse in das Deckgebirge zeigen eine exponentielle Abnahme. In Variante (1) fällt der Lösungsabfluss innerhalb der ersten 1.500 Jahre auf ca. 25 % seines anfänglichen Wertes ab. Variante (3) führt erwartungsgemäß zu einer Beschleunigung der Auspressung – der maximale Fluss ist mehr als zweimal so groß im Vergleich zum Referenzfall; nach 1000 Jahren ist der Lösungsfluss auch hier auf ca. 25 % seines anfänglichen Wertes abgefallen.

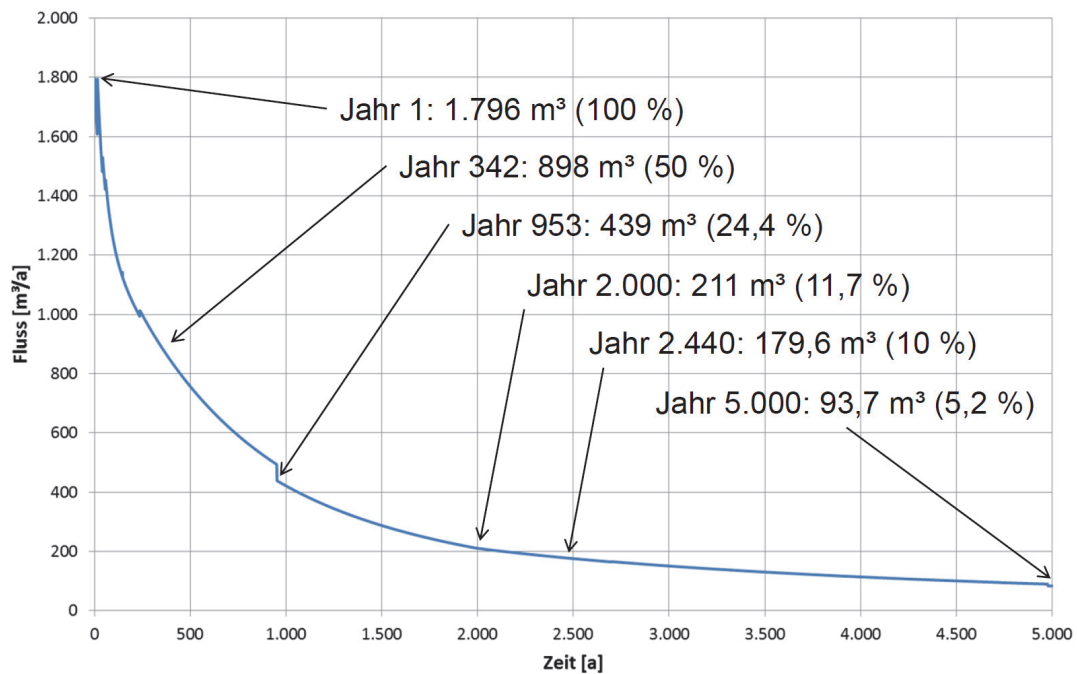
² IFAD hat die gebirgsmechanische Modellierung im Anschluss hieran kontinuierlich weiterentwickelt (s.a. Kap. 2). Ein Abgleich mit den hierbei bis Projektabschluss gewonnenen Verfeinerungen war im Vorhaben UM13A03505 nicht möglich.

Abbildung 3-8: Ergebnis der Kompartimentmodellierung: Ausgepresste Lösungsmenge, Referenzfall (Variante (1))



Quelle: Brenk Systemplanung

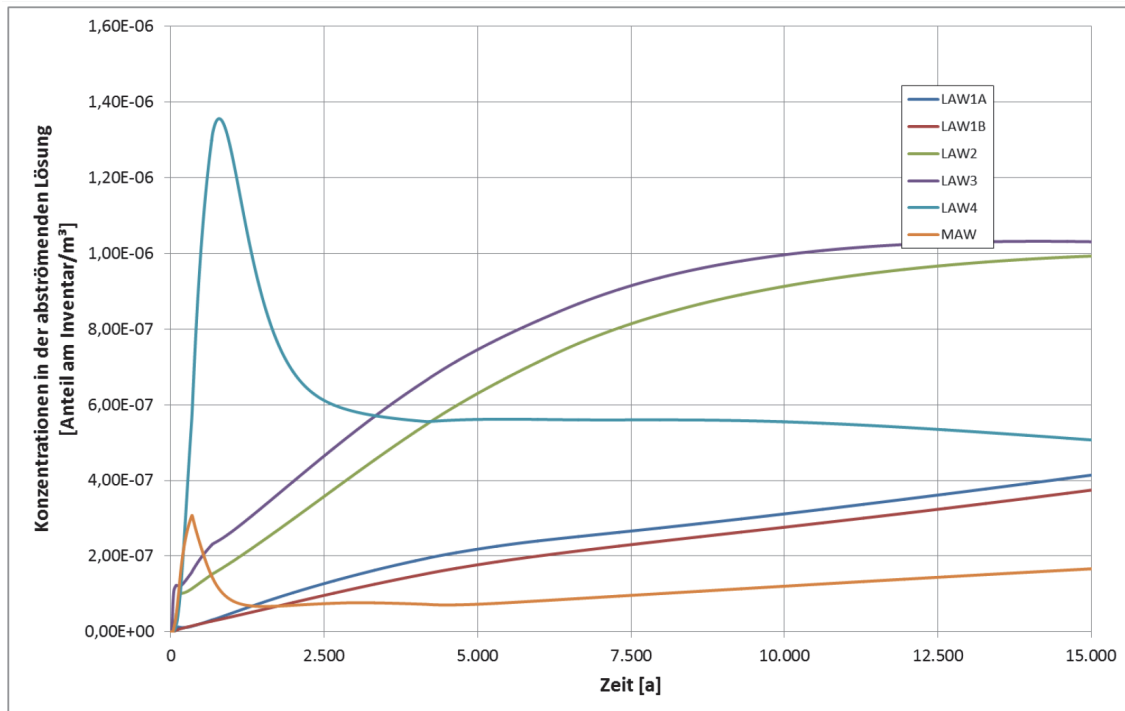
Abbildung 3-9: Ergebnis der Kompartimentmodellierung: Ausgepresste Lösungsmenge, bei erhöhter Konvergenzrate und erhöhter Gasbildungsrate (Variante (3))



Quelle: Brenk Systemplanung

An den zeitlichen Abläufen von Tracer-Konzentrationen kann untersucht werden, welchen Beitrag die einzelnen Einlagerungsbereiche (ELB) zur Freisetzung aus dem Grubengebäude zu welchen Zeiten leisten, hier beispielhaft für den Referenzfall dargestellt in Abbildung 3-10.

Abbildung 3-10: Beispielhafte Darstellung der Freisetzung eines idealen Tracers aus den Modellkompartimenten (Variante (1))



Quelle: Brenk Systemplanung

Generell ist der Verlauf der Konzentrationen stark abhängig von den betrachteten Einlagerungsbereichen und Auspressvarianten. Beim Referenzfall (Variante (1)) und bei unwirksamen Verschlüssen der Einlagerungsbereiche (Variante (2)) dominiert innerhalb der ersten 2.000 Jahre die Freisetzung aus dem Bereich „LAW4“³. In anderen Varianten kann die Freisetzung von diesem Bild deutlich abweichen. Bei Variante (3) werden beispielsweise innerhalb der ersten 1.000 Jahre Maxima bei „LAW4“, „LAW3“ und „LAW2“ erreicht. Zu einem deutlichen Anstieg der Freisetzung aus dem MAW-Bereich kommt es hier nach 3.000 Jahren. Im Fall des Zuflusses ungesättigter Lösungen (Variante (4)) ist neben dem dominierenden Maximum aus „LAW4“ nach ca. 1.500 Jahren ein langsamer Anstieg der Freisetzung aus den Bereichen „LAW3“ und „LAW2“ über die betrachtete Zeitspanne bis 15.000 Jahre zu beobachten (s. /BS 2014/).

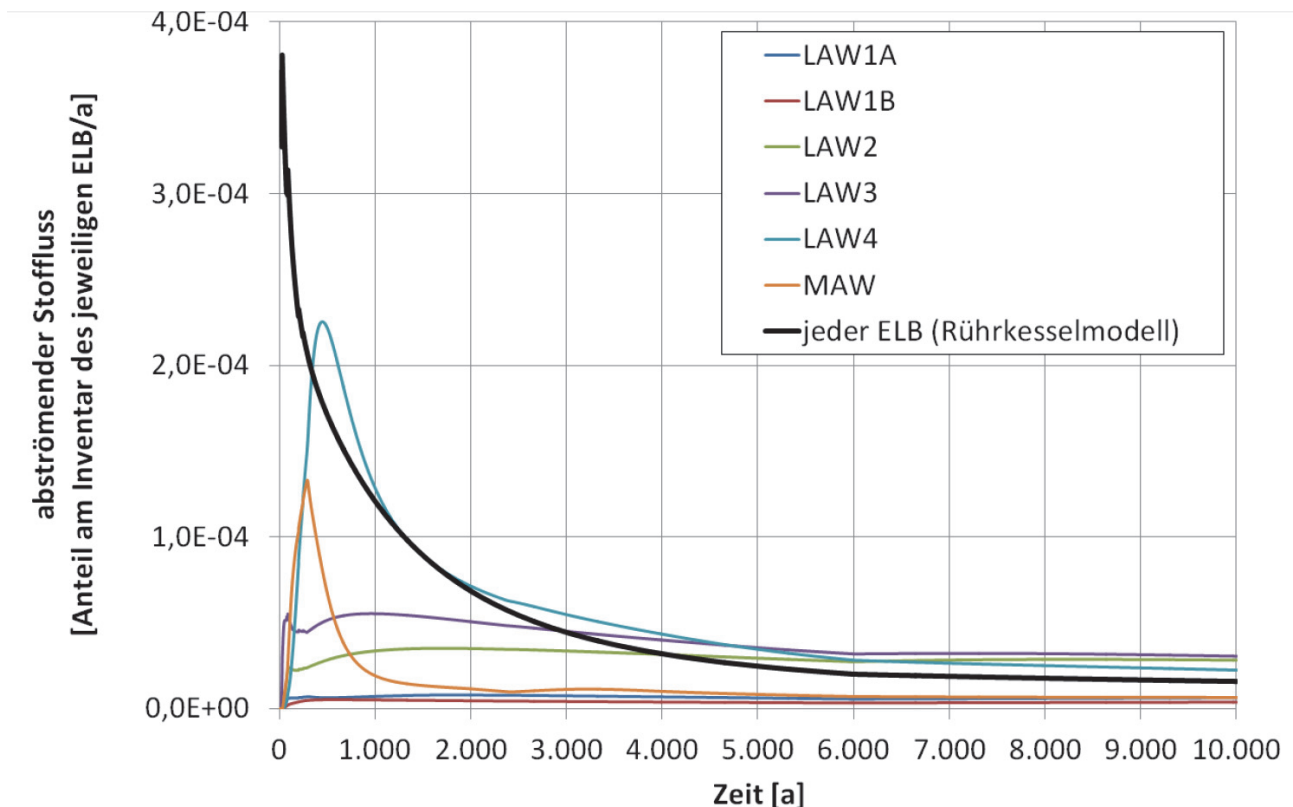
Die Werte der maximalen Tracer-Konzentrationen sind für alle Varianten ähnlich. Wird über den gesamten Austrag gemittelt, sind die Ergebnisse identisch mit denen des Rührkesselmodells. Die Mittelung über die maximalen Konzentrationen aller Einlagerungsbereiche ergibt einen um Faktor zwei höheren Wert. Die maximale Konzentration im Quellterm kann bei Betrachtung einzelner Einlagerungsbereiche bis zu viermal größer werden als das Rührkesselmodell. Der zeitliche Ablauf zeigt beim Referenzfall, dass in den frühen Jahren im Vergleich zum Rührkesselmodell deutlich weniger Fracht in das Deckgebirge ausgepresst wird.

³ Zur Bezeichnung der Kompartimente s.a. Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5.

In der Variante (2) „unwirksame Verschlüsse der Einlagerungsbereiche“ zeigt sich in allen Fällen mit Ausnahme von „LAW4“ eine deutlich frühere Freisetzung, die dann mit der des Rührkesselmodells vergleichbar ist. Der Bereich „LAW4“ bleibt hier von den unwirksamen Verschlüssen unberührt; der Verlauf der Freisetzung ist ähnlich dem Referenzfall.

Ergebnis der Berechnungen im Hinblick auf Radionuklid-Quellterme am Übergang Grubengebäude-Deckgebirge waren Angaben zu zeitabhängig aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge ausgepressten Lösungsmengen (Auspressraten) und zu den darin enthaltenen Radionuklidkonzentrationen für 59 Radionuklide des Asse-Inventars. Die hieraus gebildeten Datenreihen wurden an den Projektpartner Öko-Institut zur Implementierung in das Deckgebirgs-Transportmodell übergeben. Sie haben eine für die nachfolgende Transport- und Radioökologie-Modellierung erforderliche zeitliche Auflösung von einem Jahr und decken Berechnungszeiträume von 10.000 und 5.000 Jahren ab. Abbildung 3-11 zeigt zur Illustration des Gesamtergebnisses beispielhaft für den Referenzfall (Grubenzustand 2009) die Entwicklung der abströmenden Stoffflüsse aus den Modellkompartimenten der Einlagerungsbereiche für einen stoffunspezifischen, vollständig in Lösung befindlichen Tracer, normiert als pro Jahr in das Deckgebirge freigesetzte Anteile am jeweiligen (Tracer-)Inventar des betrachteten Einlagerungsbereichs.

Abbildung 3-11: Austrag von Tracern mit der aus der Grube ausgepressten Lösung (Variante (1))



Quelle: Brenk Systemplanung

3.6. Zum Projektende erreichter Stand

Das Quelltermmodell bildet das Grubengebäude der Schachtanlage Asse II als Kompartimentmodell mit derzeit etwa 120 Kompartimenten ab, die über 256 Schnittstellen miteinander verschaltet sind. Es ist damit in der Lage, bei weitgehend konservativer Herangehensweise aus dem Radionuklidinventar der Asse und in Abhängigkeit der betrachteten Randbedingungen zeitabhängige Quellterme abzuleiten, mit denen die Freisetzung von Radionukliden aus der Asse in das benachbarte Deckgebirge beschrieben werden kann. Anhand einiger exemplarischer Szenarien wurden entsprechende Quellterme berechnet und für die Betrachtung des Radionuklidtransports durch das Deckgebirge in die Biosphäre zur Verfügung gestellt. Das Kompartimentmodell ist dabei in der Lage, durch unterschiedliche Parametrisierung der Modellkompartimente und der Verbindungen zwischen ihnen auch unterschiedliche Zustände des Grubengebäudes und variable Annahmen zu Inventaren und zur Gasbildung abzubilden.

Für eine zukünftige Weiterentwicklung des Kompartimentmodells der Asse wurden weitere Arbeiten vorgeschlagen, z.B.

- eine realitätsnähere Abbildung des Grubengebäudes (u. a. die Abbildung einzelner Abbaue, Strecken und Abdichtbauwerke),
- eine Analyse des Zustands der Grube mit dem Ziel einer eigenständigen Abschätzung der Modellparameter,
- eine Analyse des Prozesses eines Volllaufs mit dem Ziel, Orte und Umfänge möglicher Lösungs- und Umlösungsprozesse detaillierter zu erfassen,
- die Berücksichtigung von Dichteeffekten in der Grube und
- die Berechnung von Szenarien zur Wirkung der verschiedenen Vorsorge- und Notfallmaßnahmen auf den Quellterm.

Eine zukünftige Verfeinerung des Kompartimentmodells könnte zu insgesamt mindestens 350 (statt gegenwärtig 120) Kompartimenten mit mindestens 750 Verbindungen (gegenwärtig 256) führen. Zur detaillierten Betrachtung hydraulischer Prozesse sollte dabei der Modellaufbau und die Parametrisierung an den aktuellen Grubengebäudezustand angepasst werden, wofür entsprechende Informationen des Betreibers erforderlich sind. Die genaue Beschreibung des aktuellen Grubengebäudezustands spielt dabei eine zentrale Rolle, auch bei der Erfassung der Vorsorge- und Notfallmaßnahmen im Modell gerade im Hinblick auf zukünftige Szenarienbetrachtungen.

4. Themenfeld Modellierung des Transports im Deckgebirge und der radioökologischen Konsequenzen in der Biosphäre

Die Ergebnisse der zu Beginn des Vorhabens UM13A03505 durchgeführten Untersuchung der Wirkung von Einzelmaßnahmen der Notfallplanung sind im Bericht des Öko-Instituts aus dem Jahr 2013 /ÖKO 2013b/ dokumentiert. Die Ergebnisse der weiteren Modellentwicklung im Themenfeld Radioökologie sind im diesbezüglichen Projektbericht des Öko-Instituts /ÖKO 2015b/ detailliert beschrieben.

4.1. Ausgangssituation

Der vom Öko-Institut im Rahmen des Vorgängervorhabens UM09A03205 entwickelte Ansatz der radioökologischen Modellierung beinhaltet zwei unabhängige, miteinander koppelbare Modellteile. Der erste Modellteil umfasst eine Betrachtung der Radionuklidmigration durch das Deckgebirge, basierend auf der analytischen Lösung der 1D-Dipensions-Konvektions-Transportgleichung mit radioaktivem Zerfall und Gleichgewichtssorption. Berücksichtigt werden dabei Abstandsgeschwindigkeiten, Sorption und gekoppelte Migration. Ergebnis dieser Modellrechnung sind Radionuklidkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser. Der zweite Modellteil ermöglicht daraus die Berechnung von Strahlungsdosen mit variablen Lebensgewohnheiten der betrachteten Referenzpersonen (z. B. analog der AVV zu § 47 StrlSchV oder der Berechnungsgrundlagen Bergbau (BglBb)). Der dabei entwickelte Ansatz der Dosisberechnungen wird auch schnellen zeitlichen Änderungen der Konzentration von Radionukliden im genutzten Grundwasser gerecht.

Der im Vorgängervorhaben als Ausgangspunkt verfügbare Quellterm aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge war aufgrund seiner Ableitung aus einem einfachen "Rührkesselmodell" (Auflösung des gesamten Radionuklidinventars der Asse in einer vorgegeben Wassermenge, Berücksichtigung von Löslichkeitsgrenzen für Uran und Thorium) und einem gemittelten Freisetzungsverlauf nicht befriedigend. Aus diesem Grund sollte das bestehende Modell dergestalt weiterentwickelt werden, dass ein zeitabhängiger Quellterm aus der Quelltermmodellierung des Partners Brenk Systemplanung übernommen und als Eingangsgröße für die Radionuklidmigration im Deckgebirge verarbeitet werden kann.

In Weiterentwicklung des Ansatzes sollte dabei die Radionuklidmigration im Deckgebirge für einen mehrschichtigen Aufbau des Deckgebirges modelliert werden. Ziel war es dabei, die Konservativität des bisher modellierten Ein-Schicht-Falls durch Berücksichtigung einer Abfolge von Schichten mit unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften und unterschiedlichem Sorptionsverhalten der Radionuklide abzubauen und den Zeitablauf der der sich ergebenden Radionuklidkonzentration im oberflächennahen Grundwasser näher zu untersuchen.

Der 1D-analytische Ansatz der Deckgebirgsmodellierung erlaubt es dabei, wissenschaftliche Daten zum Radionuklidverhalten im Deckgebirge (im Projekt zusammengestellt von KIT-INE, s. z.B. /INE 2010/ und /INE 2012/) hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Radionuklidtransport im Deckgebirge mit zu betrachten und im Sinne einer Sensitivitätsanalyse zu variieren. Der eindimensionale Ansatz bleibt dabei jedoch insoweit konservativ, als verdünnende 2- und 3D-Effekte nicht berücksichtigt werden.

4.2. Untersuchung der Wirkung von Einzelmaßnahmen der Notfallplanung

Die erste Aufgabe des Öko-Instituts im Vorhaben UM13A03505 war die Untersuchung der Wirkung von Einzelmaßnahmen der Notfallplanung auf die Strahlenexposition der Bevölkerung bei auslegungsüberschreitendem Lösungszutritt, die auf Basis von Quelltermberechnungen der GRS /GRS 2010/ durchzuführen war. Diese Fragestellung war bereits im Vorgängervorhaben UM09A03205 formuliert worden, konnte dort aber nicht abschließend bearbeitet werden.

GRS hat im Jahr 2010 ein Gutachten zur Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen der Notfallvorsorge in der Schachanlage Asse veröffentlicht /GRS 2010/. In dem Gutachten wurden drei Hauptszenarien für die eingelagerten schwach radioaktiven Abfälle (LAW) und ein Hauptszenario für die mittelradioaktiven Abfälle (MAW) der Einlagerungskammer 8a/511 definiert und daraus insgesamt 17 Subszenarien hinsichtlich der Umsetzung einzelner Notfallmaßnahmen abgeleitet. Anhand dieser Szenarien wurde der Effekt von Notfallmaßnahmen auf die Radionuklidfreisetzung in das Deckgebirge im Fall eines Absaufens der Asse überprüft.

Die betrachteten Szenarien lagen dabei in einem Spektrum, dessen Endpunkte von einem "Basisfall" mit vollständiger (und wirksamer) Umsetzung der Notfallmaßnahmen und einem "worst case" ohne Umsetzung von Notfallmaßnahmen beschrieben wurden. Die Berechnungen lieferten szenariospezifische Datensätze zur zeitlichen Abhängigkeit von Volumenströmen und Radionuklidkonzentrationen an zwei Übertritts-Stellen vom Grubengebäude in das Deckgebirge in 500 bzw. 574 m Tiefe.

Es war Aufgabe des Öko-Instituts, auf dieser Grundlage die Auswirkungen der Notfallvorsorge auf die Bevölkerungsdosis im Falle einer unkontrollierten Flutung der Asse abzuschätzen. Hierzu wurden die Ergebnisdatensätze von der GRS zur Verfügung gestellt und seitens Öko-Institut die Datentransformation in Quellterme für die Inputdaten des radioökologischen Modells durchgeführt. Mit den Quelltermen aus /GRS 2010/ wurde der Transport durch das Deckgebirge modelliert und eine Berechnung der potenziellen Strahlenexposition für Einzelpersonen der Bevölkerung mit Annahmen und Parametern in Anlehnung an die AVV zu § 47 StrlSchV /AVV 2012/ und parallel dazu in Anlehnung an die Annahmen und Parameter der Berechnungsgrundlagen Bergbau (BglBb 2010/ durchgeführt. Hierzu wurde eine Reihe von Szenarien definiert. Die technische Wirksamkeit (u.a. abhängig von der Auswahl geeigneter Materialien, sachgerechter Einzelfallplanung und qualitätsgesichertem Einbau) und die zeitliche Umsetzbarkeit als Vorsorge oder unter Notfallbedingungen wurden bei den Berechnungen des Öko-Instituts, wie auch im Gutachten der GRS, vorausgesetzt.

GRS hat in ihren Berechnungen das Inventar der Asse fünf Einlagerungsbereichen für LAW (LAW 1 bis LAW 5) und einem MAW-Bereich zugeordnet, die jeweils mit spezifischen Notfallmaßnahmen assoziiert sind. Aufgrund der seither erfolgten Weiterentwicklung und tatsächlichen Realisierung der Notfallmaßnahmen war ein Abgleich der Annahmen der GRS mit dem Status Quo erforderlich. Bei der Überprüfung der von der GRS 2010 erzeugten Datensätze haben sich außerdem Probleme hinsichtlich der Zeitreihen ergeben. In den meisten der 17 Zeitreihen wurde ein Zeitraum von 100.000 Jahren abgebildet. Fünf der durchgeführten Rechenläufe brechen aber, nach Auskunft von GRS aus numerischen Gründen, deutlich früher ab.

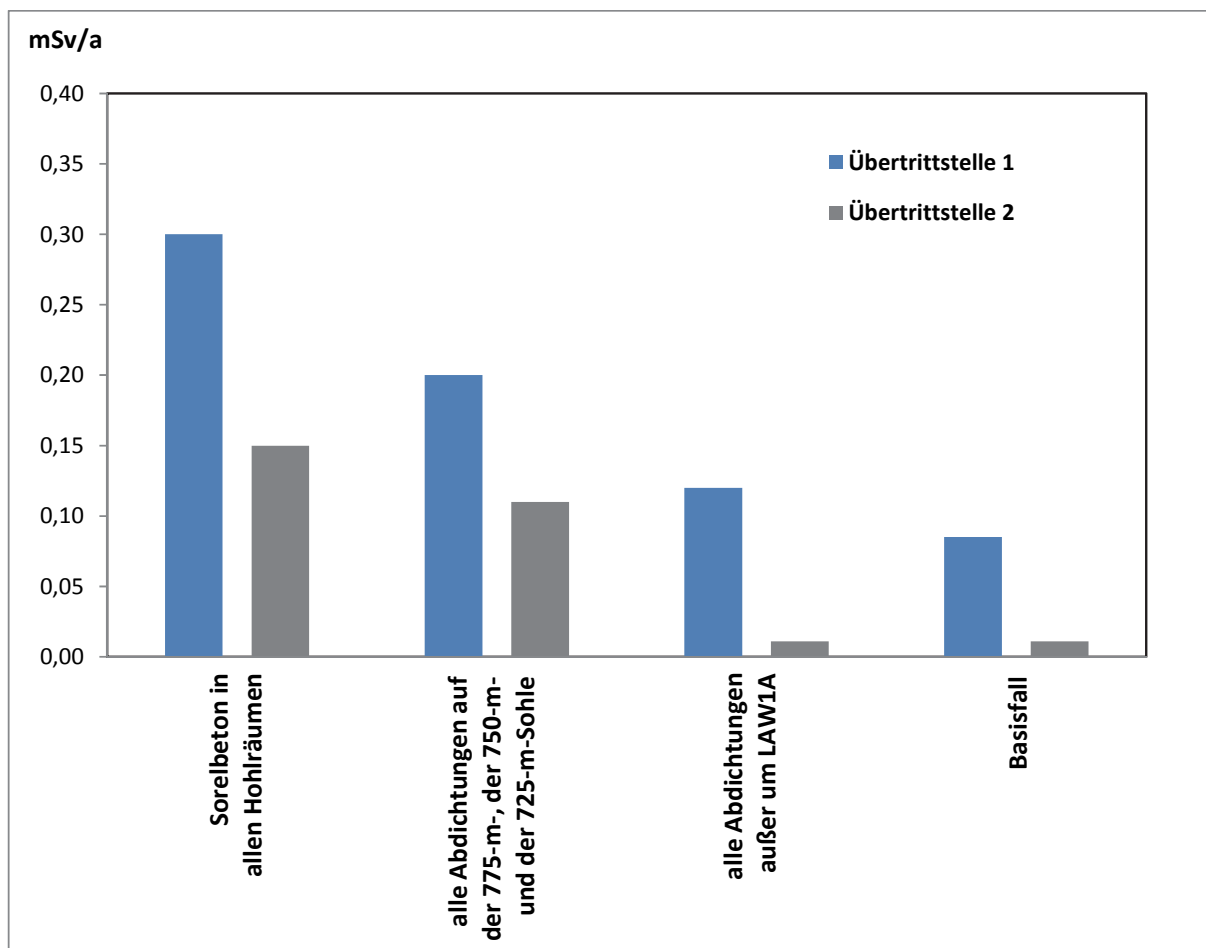
Für die Berechnungen des Öko-Instituts bedeutete dies, dass nicht alle aus den Datensätzen ermittelten Dosen unmittelbar vergleichbar sind. Einer der hiervon betroffenen Datensätze ist der „worst case“ (ohne Umsetzung von Notfallmaßnahmen), dessen Datenreihe nach etwa 3090 Jahren abbricht. Der Vergleich von „worst case“ und Dosen nach Umsetzung von Einzelmaßnahmen der Notfallplanung stützte zunächst die Erwartung, dass die Umsetzung der Maßnahmen eine Reduzierung der Dosis um 1 bis 2 Größenordnungen bewirken kann. Eine

genauere Überprüfung der abgebrochenen GRS-Datensätze ergab, dass diese in den letzten ca. 5 Zeilen unplausibel hoch ansteigende Nuklidkonzentrationen enthalten, was sich naturgemäß auf die daraus ermittelte Dosis auswirkt. Die Ausklammerung dieser nicht plausiblen Zeilen bewirkt bereits eine rechnerische Reduzierung der Dosis im "worst case" um etwa einen Faktor 50.

Eingedenk dieser Befunde kam das Öko-Institut zu dem Schluss, dass eine Beurteilung der Wirksamkeit der Einzelmaßnahmen der Notfallplanung gegenüber dem „worst case“ mit den GRS-Datensätzen nicht möglich ist.

Der Vergleich verschiedener Maßnahmen untereinander blieb aber möglich. Dabei wurden bei den Berechnungen des Öko-Instituts hinsichtlich der Realisierung der Notfallmaßnahmen im LAW-Bereich je ein geringster Umsetzungsgrad, ein maximaler Umsetzungsgrad sowie verschiedene Kombinationen in der Umsetzung betrachtet. Außerdem gingen in die Betrachtung zur maximalen Umsetzung der LAW-Maßnahmen drei Szenarien zur Umsetzung von Notfallmaßnahmen in der MAW-Einlagerungskammer ein. Für die Quelltermgenerierung wurde das von Öko-Institut im Vorgängervorhaben UM09A03205 modifizierte Rührkesselmodell verwendet.

Abbildung 4-1: Beispiel für den Vergleich verschiedener Umsetzungsgrade der Notfallplanung: Maximale effektive Dosis durch Tc-99 für einige ausgewählte Szenarien der LAW-Einlagerungsbereiche, Altersgruppe ≤ 1 Jahr, nach Berechnungsgrundlagen Bergbau



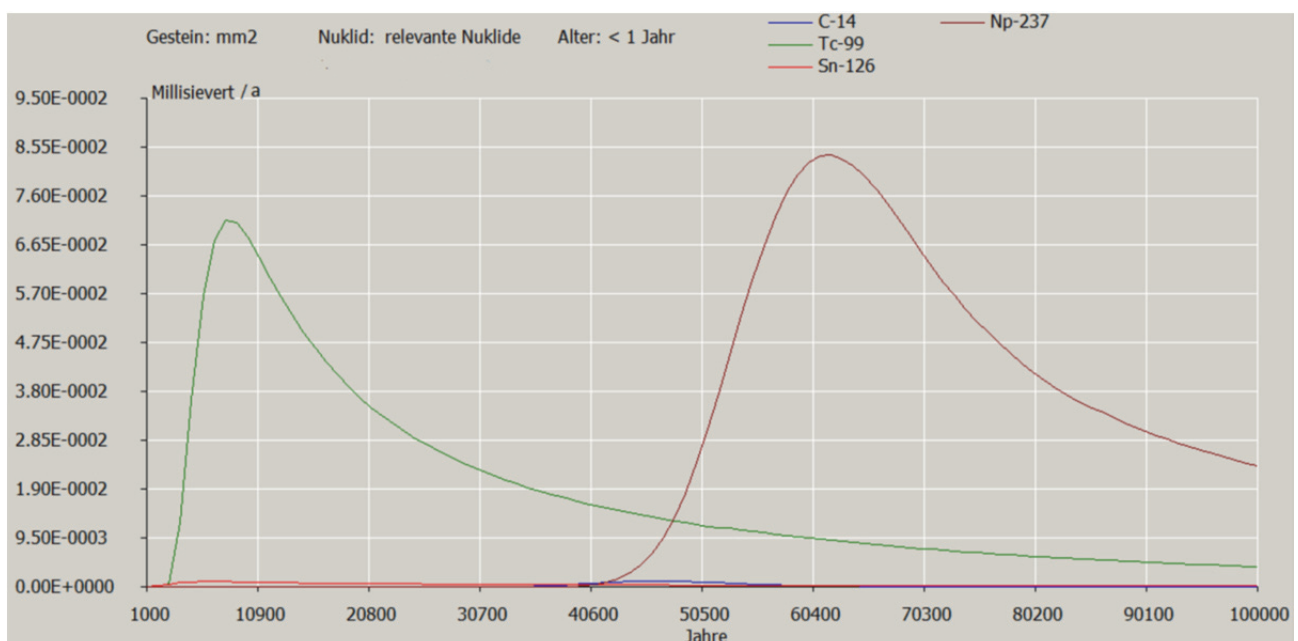
Quelle: Öko-Institut, aus /ÖKO 2013b/

Die Transportmodellierung im Deckgebirge wurde mit dem analytischen 1D-Modell des Öko-Instituts durchgeführt. Dabei wurden Sorptionsdaten des KIT-INE /KIT INE 2010/ verwendet. Das Deckgebirge wurde entsprechend dem damaligen Entwicklungsstand als eine Schicht mit ungünstigen Parametern approximiert.

Insgesamt ergaben sich 68 Rechenfälle. Tendenziell ist dabei festzustellen, dass sich die Notfallmaßnahmen neben einer Verringerung der Dosis auch auf den Eintrittszeitpunkt des Dosismaximums auswirken. Dies ist einleuchtend, da die Maßnahmen auch dazu dienen, die Transportvorgänge im Grubengebäude zu verzögern. Außerdem ergaben die Modellrechnungen, dass eine Realisierung von Maßnahmen ausschließlich in dem als "LAW 2" bezeichneten Bereich im Vergleich mit anderen Teillösungen die am wenigsten effektive ist.

Als dosisbestimmend erweisen sich unter Berücksichtigung von Sorptionseffekten im Deckgebirge insbesondere Tc-99 und Np-237 (s.a. Abbildung 4-2). Die GRS kam seinerzeit in ihrer Auswertung zu dem Ergebnis, dass sich die Einzelmaßnahmen der Notfallplanung kaum auf das insgesamt in das Deckgebirge freigesetzte Inventar an Tc-99 im Deckgebirge auswirken. Im Unterschied dazu weisen die radioökologischen Berechnungen des Öko-Instituts im Vergleich der Maßnahmen Szenarien deutliche Unterschiede in der prognostizierten Jahresdosis für Tc-99 aus, wenn nicht das Inventar im Grubengebäude, sondern die maximale Aktivitätskonzentration in einem Jahr im oberflächennahen Grundwasser (also nach dem Transport durch das Deckgebirge) die entscheidende Größe ist. Dabei kommt es im Modellzeitraum zu einem ersten Maximum der Jahresdosis, dominiert durch Tc-99, im Bereich von 7.000 Jahren bis 10.000 Jahren. Ein zweites, durch Np-237 dominiertes, Maximum folgt nach etwa 70.000 Jahren. Je nach Szenario ist das erste oder das zweite Maximum das absolut höchste.

Abbildung 4-2: Beispiel für die dosisbestimmenden Nuklide: Szenario „Basisfall“, Übertrittsstelle 2, Altersgruppe ≤ 1 Jahr, Lebensgewohnheiten nach AVV zu § 47 StrlSchV



Quelle: Öko-Institut, aus /ÖKO 2013b/

Gründe für die Dominanz von Tc-99 sind auf der einen Seite der vergleichsweise große Anteil an dem ins Deckgebirge freigesetzten Gesamtinventar, auf der anderen Seite, unter Berücksichtigung der Sorption im Deckgebirge, die im Vergleich zu Radionukliden anderer Elemente hohe Mobilität von Tc-99.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde dem radioökologischen Modell des Öko-Instituts eine Methodik hinzugefügt, mit der nunmehr aus extern erzeugten Zeitreihen des Eintrags von Radionukliden in das Deckgebirge der zeitliche Verlauf der Strahlenexpositionen von Referenzpersonen ermittelt werden kann. Für eine zukünftige Beurteilung von Maßnahmen steht dieses Instrument nun zur Verfügung.

Die Anwendung unterschiedlicher Berechnungsmethoden (bzw. Lebensgewohnheiten) für die Exposition der Referenzpersonen (AVV vs. BglBb) ergab erwartungsgemäß systematisch für die AVV höhere Dosismaxima, wobei der Zeitpunkt des Auftretens der Dosis von der Berechnungsgrundlage her nicht beeinflusst wird. Die höheren Maxima ergeben sich anhand der in AVV deutlich höheren unterstellten Verzehrswerten und Aufenthaltszeiten.

Zu den Ergebnisse der Untersuchung der Wirkung von Einzelmaßnahmen der Notfallplanung wurde vom Öko-Institut ein gesonderter Bericht vorgelegt, in dem die einzelnen Untersuchungen dokumentiert sind /ÖKO 2013b/.

4.3. Modellierung des Transports im Deckgebirge und der radioökologischen Konsequenzen

4.3.1. Modellkonzept

Am Öko-Institut wurde im Rahmen des Vorhabens UM13A03505 ein Modell zur Berechnung der möglichen Strahlenexpositionen für einzelne Referenzpersonen der Bevölkerung nach einem Absaufen der Asse entwickelt. Es knüpft an die Abschätzung von Quelltermen am Übergang Grubengebäude-Deckgebirge an, die aus unterschiedlichen Herleitungen wie einem Rührkesselmodell (/GRS 2009/, /ÖKO 2012/) oder einem Kompartimentmodell /BS 2015/ übernommen werden können. Das Modell bezieht wichtige Effekte der Radionuklidmigration im Deckgebirge und des Radionuklidtransfers in der Biosphäre in die Berechnung der Strahlendosis ein, bleibt dabei aber möglichst konservativ, d.h. es soll die tatsächlich zu erwartenden Strahlendosen systematisch überschätzen.

Die in älteren Berichten anderer Autoren vorgenommenen Abschätzungen potenzieller Strahlenexpositionen infolge eines Absaufens während der Betriebsphase haben in bestimmten Szenarien zwar konservative, aber naturwissenschaftlich nicht begründbare Werte geliefert, vor allem weil die rückhaltenden und verzögernden Effekte im Deckgebirge bei diesen Berechnungen vernachlässigt wurden. Auf Basis sehr konservativer Ansätze ergaben sich in einigen dieser Szenarien potenzielle Strahlenexpositionen weit oberhalb tolerierbarer Dosen. Dieser Ansatz stellte zwar sicher, dass die realen Werte sicher überschätzt wurden, es zeigte sich hier aber ein methodisches Grundproblem konservativer Abschätzungen: Unterschreiten streng konservative Abschätzungen vorgegebene Grenzwerte (im Sinne einer sicherheitsgerichteten Unterschreitung) so kann man aufgrund der Konservativität mit hoher Wahrscheinlichkeit eine reale Überschreitung (also ein Sicherheitsdefizit) ausschließen. Führen solche Abschätzungen jedoch zu Werten oberhalb von Grenzwerten, dann ist auch eine reale Überschreitung mit der angewendeten Methode nicht auszuschließen. Dabei bleibt aber ungeklärt, ob der errechnete oder geschätzte Wert aufgrund der Konservativität (also rein methodisch bedingt) oberhalb des Grenzwertes liegt oder ob dies auch unter realistischer Betrachtung zu erwarten wäre. Streng konservative Abschätzungen können aus diesem Grund nur bei Grenzwertunterschreitungen als Beurteilungshilfe dienen, da das Ergebnis in diesem Fall eindeutig sicherheitsgerichtet ist. Grenzwertüberschreitungen sind hingegen nicht eindeutig und erfordern daher immer eine Überprüfung der in der Abschätzung enthaltenen Konservativität. Als Beurteilungshilfe sind konservative Abschätzungen in solchen Fällen ungeeignet.

Das Modell des Öko-Instituts verfolgt aus diesem Grund den Ansatz, unter grundsätzlicher und argumentativ belegbarer Beibehaltung der Konservativität eine näher an den real zu erwartenden und wissenschaftlich begründbaren Prozessen liegende Abschätzung radiologischer Konsequenzen eines Absaufens der Asse zu ermöglichen. Es besteht aus drei Modellteilen:

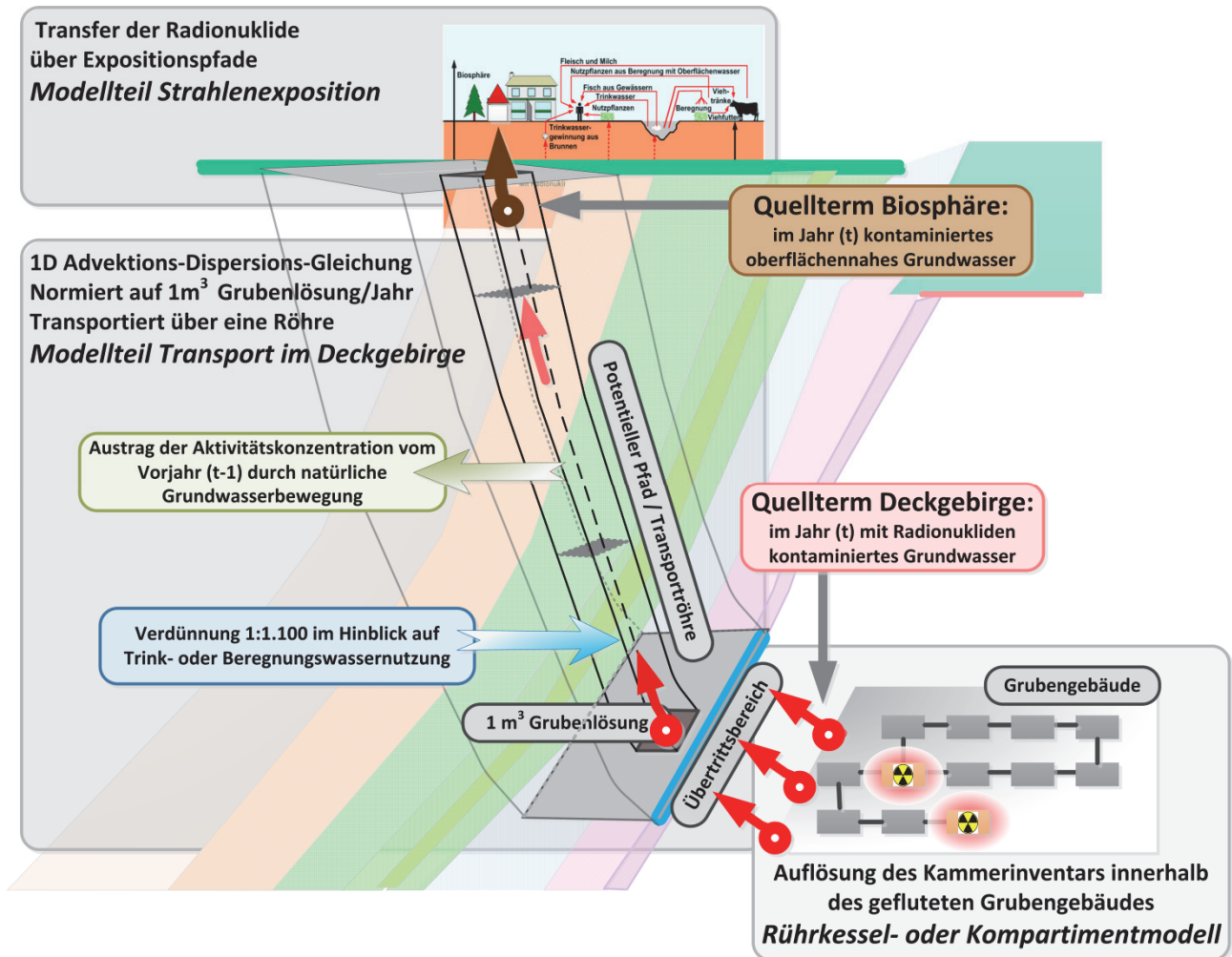
- Modellteil I: Generierung eines Freisetzungsquellterms aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge. Zu Vorhabenbeginn wurde hierfür ein modifiziertes "Rührkesselmodell" des Asse-Inventars unter Berücksichtigung von Inventarkorrekturen, Löslichkeitsgrenzen und Auspressraten verwendet. Im Projektverlauf konnten zusätzlich exemplarische Quellterme aus dem vom Partner Brenk Systemplanung entwickelten Kompartimentmodell (s. Kap. 3) berücksichtigt werden.
- Modellteil II: Transportmodell zum Radionuklidtransport durch das Deckgebirge über den Grundwasserpfad (Berücksichtigung von Transportgeschwindigkeit und Sorption). Im Rahmen

des Vorhabens wurde eine flexible analytische Mehrschichtlösung der 1D-Dipersions-Konvektions-Transportgleichung abgeleitet und implementiert.

- Modellteil III: Expositionsmodell zur Exposition des Menschen durch Nutzung von kontaminiertem Grundwasser (Transferfunktionen und Lebensgewohnheiten gem. AVV und BglBb). Hier wurden im Rahmen des Vorhabens die Möglichkeiten des bereits im Vorgängervorhaben entwickelten Modells erweitert und flexibilisiert.

Abbildung 4-3 illustriert die miteinander gekoppelten Modellteile.

Abbildung 4-3: Kopplung der Modellteile



Quelle: Öko-Institut e.V.

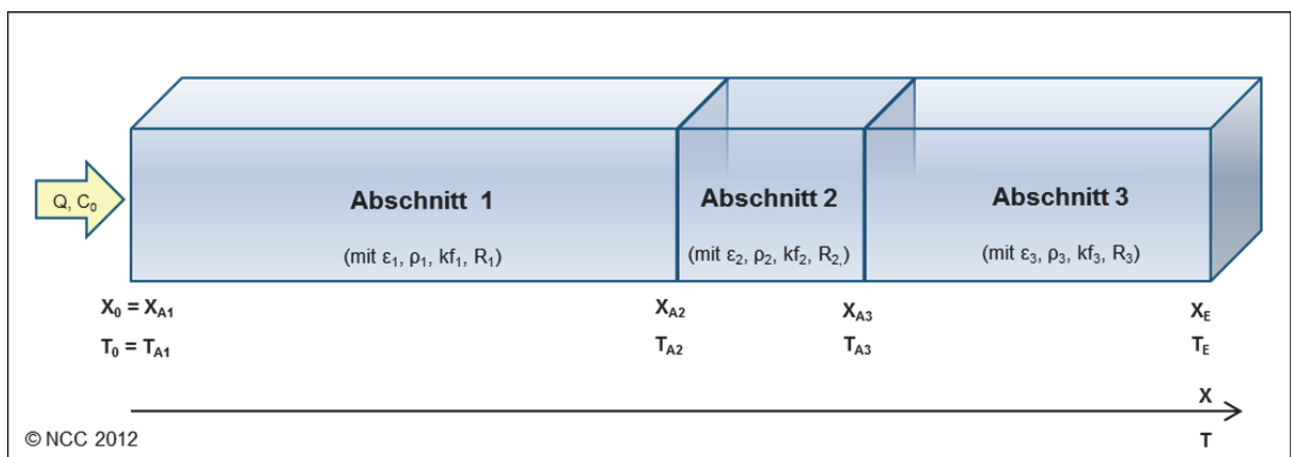
Die nachfolgenden Erläuterungen beziehen sich auf die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Entwicklungen zur schichtweisen Modellierung im Transportmodell und zur Weiterentwicklung des radioökologischen Expositionsmodells. Hinsichtlich der als Eingangsparameter für die Transportmodellierung zu verwendenden Quellterme sei in Bezug auf das Rührkesselmodell auf den Bericht des Öko-Instituts zum Vorgängervorhaben /ÖKO 2012/ sowie zur Entwicklung des Quellterm-Modells als Kompartimentmodell auf den Bericht des Partners Brenk Systemplanung (/BS 2015/ und hier in Kap. 3) verwiesen.

4.3.2. Entwicklung einer analytischen Lösung zur schichtweisen Modellierung des Transports im Deckgebirge

Zur Weiterentwicklung des bereits im Vorgängervorhaben entwickelten 1D-Transportmodells wurde unter spezifischer Zuarbeit durch die Nuclear Control & Consulting GmbH⁴ eine analytische Lösung für ein System zur schichtweisen Modellierung des Deckgebirgstransports entworfen /ÖKO 2015b/. Das Modell berücksichtigt mehrere nacheinander geschaltete Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften in einem eindimensionalen analytischen Ansatz (Abbildung 4-4).

Charakteristische, für die Transportmodellierung relevante Parameter der einzelnen Schichten sind dabei neben der Schichtdicke der Porenanteil (ε_j), die Gesteinsdichte (ρ_j), und der stoffspezifische K_d -Wert, aus denen sich der Retardationsfaktor (R_j) ergibt. Der Durchlässigkeitsbeiwert (kf_j) fließt in den analytischen Mehrschichtansatz nicht direkt ein, sondern es wird die in allen Abschnitten konstante Filtergeschwindigkeit bezogen auf eine konstante Gesamtquerschnittsfläche betrachtet (die tatsächliche Porengeschwindigkeit bzw. Abstandsgeschwindigkeit bezieht sich auf die effektive durchströmbare Querschnittsfläche und kann theoretisch unterschiedlich sein, wenn sich die Porenanteile einzelner Schichten unterscheiden).

Abbildung 4-4: theoretischer Ansatz der schichtweisen analytischen Modellierung



Quelle: Öko-Institut, NCC

Die Konservativität der eindimensionalen Betrachtung ist dabei nach wie vor gerechtfertigt, zumal der Kenntnisstand über die räumliche Verteilung der Gesteinseigenschaften in den Deckgebirgsformationen weiterhin unzureichend ist. Auch durch zukünftige Untersuchungsprogramme wie das geplante Erkundungsprogramm zur Deckgebirgs-Hydrogeologie ist mittelfristig kein Kenntnisgewinn in räumlicher Hinsicht zu erwarten, der es erlauben würde, eine mehrdimensionale hydraulische Deckgebirgsmodellierung mit befriedigender Realitätsnähe und ohne schwierig zu interpretierende Mehrdeutigkeiten zu entwickeln. Dieser Umstand macht eine dreidimensionale Diskretisierung des Deckgebirgsraumes problematisch, weil sie immer mehrdeutig und von Annahmen geprägt sein wird. Ein 3D-Modellansatz führt somit bei dem gegenwärtigen Stand des Wissens nicht unbedingt zu besser abgesicherten Ergebnissen einer Transportmodellierung.

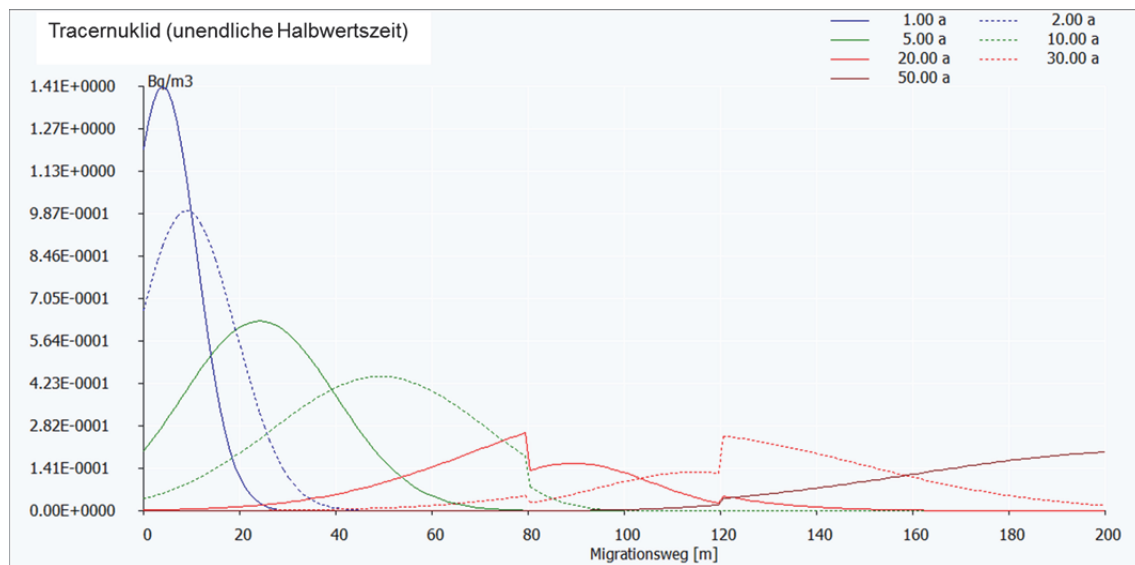
⁴ NCC, Herrn Dr. Gellermann

Eine zentrale Konservativität der vom Öko-Institut durchgeführten eindimensionalen analytischen Modellierung bestand bisher darin, dass aus dem vorliegenden Kenntnisstand zu den einzelnen Deckgebirgsformationen (Schichten) jeweils die Schicht mit den ungünstigsten Transporteigenschaften (die zu der höchsten Aktivitätskonzentration des oberflächennahen Grundwassers führen) ausgewählt wurde. Das Deckgebirge wurde in dieser Hinsicht als Homogenbereich definiert, d.h. die Transporteigenschaften wurden dem gesamten Transportpfad zugeordnet. Die Weiterentwicklung im Vorhaben UM13A03505 führt dazu, dass Parametervariationen entlang des Transportpfads berücksichtigt werden können. Damit kann nunmehr ein Schichtaufbau des Deckgebirges in der Transportmodellierung abgebildet werden.

Der derzeitige Entwicklungsstand des Modells erlaubt die Aufgliederung des Deckgebirges in mehrere hintereinander geschaltete Schichten. Dabei wurden Dispersionsvorgänge zunächst vernachlässigt. Mit der Dispersion geht immer auch mit einer Verringerung der Konzentration einher, daher führt ihre Vernachlässigung zunächst zu diesbezüglich konservativen Ergebnissen. Im einem weiteren Entwicklungsschritt, nachdem mit dem vereinfachten, rein konvektiven Ansatz (ohne Dispersion) die Plausibilität der Modellierung erfolgreich überprüft wurde, wurde die Dispersion ebenfalls implementiert, indem die entsprechenden analytischen Lösungen der 1D-Dispersions-Konvektions-Differenzialgleichung für jede Schicht abgeleitet und in das Modell integriert wurden.

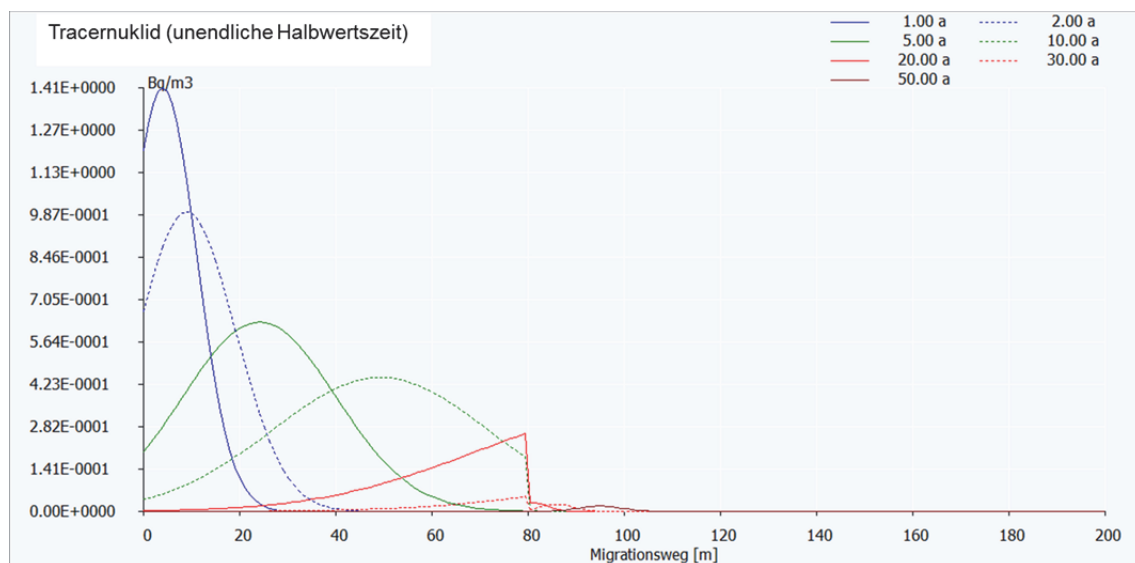
An einem aus drei Schichten bestehenden Beispiel mit einem nicht radioaktiven Tracer kann gezeigt werden, welchen Einfluss ein mehrschichtiger Aufbau auf die Transportvorgänge hat. Verändert man gegenüber einem gleichmäßigen Ausgangszustand in einer Schicht den K_d -Wert des betrachteten Stoffes, hat dies unmittelbar Auswirkungen auf die Konzentrationsverteilung in den Schichten entlang des Transportweges. Der hier angewendete lineare K_d -Ansatz (Henry-Isotherme) beschreibt eine reversible Sorption, die bei niedrigeren K_d -Werten entweder zu einer kurzfristigen Transport-Verzögerung (Beispiel: K_d -Wert von 0,1 ml/g, Abbildung 4-5) oder schon ab einem K_d -Wert von 1 ml/g zu einer deutlich längerfristigen Rückhaltung (Beispiel K_d -Wert 1 ml/g, Abbildung 4-6) führt. Diese Verzögerung führt bei zusätzlicher Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls (im Beispiel nicht dargestellt) über die Zeit zu einer Verringerung der Radionuklidkonzentration am betrachteten Ort.

Abbildung 4-5: Dispersiv-konvektive Migration in einem 3-Schichten Fall, K_d -Wert in der Schicht von 80 m bis 120 m ist 0,1 ml/g, sonst 0 ml/g



Quelle: Öko-Institut, NCC

Abbildung 4-6: Dispersiv-konvektive Migration in einem 3-Schichten Fall, K_d -Wert in der Schicht von 80 m bis 120 m ist 1 ml/g, sonst 0 ml/g



Quelle: Öko-Institut, NCC

Die Mehrschichtgleichung wurde ursprünglich für einen einzelnen Impulseintrag in das Deckgebirge als Quellterm umgesetzt und wird nun für einen Impulsverlauf über mehrere Jahre entsprechend repetiert. Durch die Erweiterung des Modells ist es nunmehr möglich, über jährlich sich ändernde Impulseinträge den zeitlichen Verlauf der Radionuklidfreisetzung in das Deckgebirge differenziert in einem Mehrschichtmodell zu betrachten. Die Testrechenläufe wurden zur Kontrolle und Qualitätssicherung mit sehr guter Übereinstimmung gegengerechnet.

4.3.3. Transportbeeinflussende Effekte innerhalb des Deckgebirges

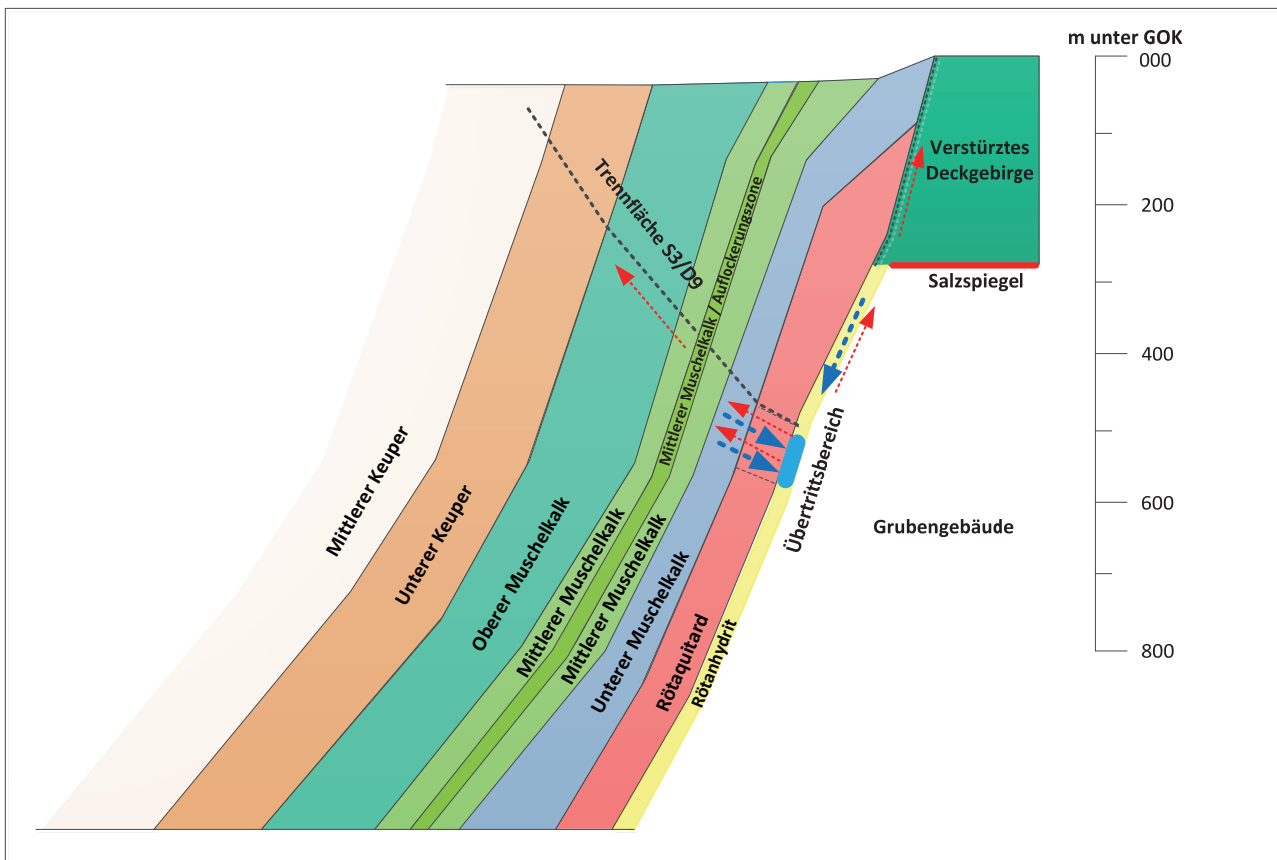
Der geologische Aufbau sowie die hydrogeologischen und geochemischen Verhältnisse des Asse-Deckgebirges sind für die mögliche Migration von aus der Asse freigesetzten Radionukliden bis zum oberflächennahen Grundwasser entscheidend. Die folgenden Ausführungen befassen sich mit den gegenwärtig bekannten bzw. plausibel abgeschätzten Eigenschaften bzw. deren Parameter. Außerdem werden Prozesse beschrieben, die für die Beschreibung der Transportvorgänge notwendig sind und als vereinfachende Annahmen in die Transportmodellierung einfließen.

4.3.3.1. Geologische und hydrogeologische Informationen zum Deckgebirge

Als Informationsgrundlage zur Ableitung der Parameterwerte und der Annahmen dienten insbesondere die geologischen und hydrogeologischen Analysen der Fließsysteme und der Durchlässigkeiten der Gesteinsschichten des Deckgebirges, die daraus abgeleiteten Parameterwerte sowie bereits ausgearbeitete Modelansätze, die bestimmte Hinweise auf das Systemverhalten bei einer Flutung der Asse geliefert haben. Diese Arbeiten wurden zum Einen im Rahmen der damaligen Stilllegung Asse durchgeführt, zum Anderen erfolgten bis dato im Rahmen der Vorbereitungen zur Rückholung einige Aktualisierungen dieser Arbeiten, die bei der hier beschriebenen Modellierung des Deckgebirgstransports mit berücksichtigt wurden. Die geologischen Gegebenheiten des Deckgebirges der Schachanlage Asse II wurden umfassend in /ERC 2004/ behandelt, die daraus abgeleitete erweiterte Betrachtung zu den hydrogeologischen Verhältnissen diente als Grundlage der dreidimensionalen numerischen Modellierung (s. z.B. /Col 2006/. In diesen Arbeiten wurden alle zum damaligen Zeitpunkt relevanten Informationen zusammengefasst und analysiert. Hieran orientierten sich bereits die Überlegungen des Öko-Instituts im Vorgängervorhaben UM09A03205 /ÖKO 2012/ zur Relevanz der für den eindimensionalen Transport maßgebenden Eigenschaften in verschiedenen Schichten des Deckgebirges.

Die Anordnung und die Beschaffenheit einzelner geologischer Schichten mit ihrem spezifischen wassergefüllten Porengefüge sind zentrale Merkmale des hydrogeologischen Fließsystems des Deckgebirges. Die der Modellvorstellung zugrunde liegende Anordnung der geologischen Einheiten ist in der Abbildung 4-7 schematisch dargestellt. Für die Transportmodellierung geht es dabei i. W. um die Schichtenfolge oberhalb bzw. südlich der Asse-Südflanke. Hier verlaufen die im Falle eines Absaufens mit nachfolgender Lösungsauspressung kürzesten Transferpfade durch das Deckgebirge in die Biosphäre, sei es durch die Schichtenfolge von Röt, Muschelkalk und Keuper oder durch die Auflockerungszone entlang der Südflanke und das verstürzte Deckgebirge. Andere (auch deutliche längere oder durch Dichteunterschiede der Fluide beeinflusste) Pfade oder Pfadkombinationen wären denkbar, wurden im Rahmen des Vorhabens aufgrund des Schwerpunkts der Methodenentwicklung aber nicht systematisch abgeleitet.

Abbildung 4-7: Schematisierter Querschnitt durch das Deckgebirge im Bereich der Südflanke



Quelle: Öko-Institut e.V. nach /Col 2006/

Hydraulisch gesehen handelt es sich beim Deckgebirge um eine Wechselfolge von Grundwasserleitern (Aquifere, hier i. W. als Kluftgrundwasserleiter anzusehen) und Gering- oder Nichtleitern (Aquitarde), die durch Kluft- und Matrixströmung gekennzeichnet sind (s.a. /Col 2006/). Gegenwärtig befindet sich der Hauptzutrittsbereich für Lösungen in die Schachanlage Asse II vermutlich zwischen den Teufen -500 m und -575 m u. GOK. Dieser Bereich wird allgemein auch als Hauptaustrittsstelle in der Phase der Lösungsauspressung nach einem Absaufen oder einer Flutung der Asse angesehen.

4.3.3.2. Dispersion beim Transport durch das Deckgebirge

Während der Passage der aus dem Grubengebäude ausgepressten kontaminierten Lösung durch die geologischen Schichten des Deckgebirges werden die darin enthaltenen radioaktiven Stoffe je nach der hydraulischen Durchlässigkeit und dem Druckgradienten mit der Strömung transportiert, während gleichzeitig mit der Dispersion eine „Verschmierung“ der Stofffront stattfindet.

Für die Durchlässigkeit der Gesteinsschicht sowie die Dispersion ist die räumliche Anordnung der Poren- oder Kluftstrukturen bestimmend. Dabei sind das Porengefüge bzw. die Porengrößenverteilung und die Poreninterkonnektivität maßgebend, welche stark variieren können. Die Durchlässigkeit im Zusammenspiel mit dem Druckgradienten entscheidet über die Richtung und die Größe der Fließgeschwindigkeit. Die Grundwasserbewegung wird dabei generell

als eine Überlagerung der mittleren Bewegung des Grundwasserhauptstroms (Advektion) und der hydromechanischen Dispersion durch die Strömungsverteilung im Porenraum beschrieben. Die hydromechanische Dispersion ist hier ein Parameter, der den Einfluss der Mikrostruktur des Porengefüges sowie der makroskaligen Inhomogenitäten auf die Fließwege umfasst. Effekte der diffusiven Verteilung aufgrund von Konzentrationsunterschieden sind bei sehr kleinen Fließgeschwindigkeiten wirksamer als bei schneller Grundwasserbewegung.

Im Porengefüge kommt es dabei zunächst zu einer Vermischung von aus der Asse ausgepresster Lösung und darin transportierter Stoffe mit dem im Porenraum vorhandenen Grundwasser, was im hier betrachteten Fall zu einer Verringerung der Konzentration der betrachteten Radionuklide führt. Entsprechend dem vorgefundenen Stand der Interpretation der Deckgebirgsgeologie (s. z.B. /ERC 2004/, /Col 2006/) sind in der Schichtenfolge neben den Porensystemen des Buntsandsteins und Muschelkalks mit feineren Poren Störungszonen (z.B. Trennfläche S3/D9) vorhanden, in welchen die Kluft- oder Kluft-Matrix-Strömung mit höheren Durchlässigkeiten wahrscheinlich bevorzugte Wegsamkeiten findet. Bei einem kluftig porösen Gestein sind die großskaligen Klüfte maßgeblich für die hydraulische Leitfähigkeit bzw. Gebirgsdurchlässigkeit, während die Mikrokluft- und Porennetzwerke die Speicherkapazität bestimmen. Somit kommt es bei der Kluft-Matrixströmung während des Stofftransports entlang der vorhandenen Wegsamkeiten im Gestein über Diffusionsvorgänge an der Grenze Kluft/Matrix zu einem Übergang der gelösten Stoffe in die Matrix und damit zur (Zwischen-)Speicherung. Diese Diffusionsvorgänge bewirken eine Verringerung der Konzentration mit zunehmendem Abstand von der Quelle.

Die somit bedingte Variabilität der Fließbewegung quer zur Haupt-Strömungsrichtung verursacht eine zunehmende räumliche Ausbreitung der transportierten Fracht. Dabei finden während der Passage durch den Porenraum eine Verschmierung der Schadstofffront und eine Verringerung der Stoffkonzentration in der Lösung statt.

4.3.3.3. Sorption beim Transport durch das Deckgebirge

Ein weiterer wesentlicher Effekt im Deckgebirge ist die Sorption an Oberflächen oder den Einbau in Mineralphasen. Der Stoffrückhalt durch die Sorption, bei welcher der gelöste Stoff an der Gesteinsoberfläche in Abhängigkeit des betrachteten Stoffes (hier des Radionuklids), seiner Konzentration in der Lösung sowie der Beschaffenheit der Porenwässer und der Gesteinsoberfläche „gebunden“ und somit langfristig oder reversibel immobil wird, führt zu einer verzögerten Migration, ggf. auch zu einer langfristigen Rückhaltung an oder in der Gesteinsmatrix. Das sich während der Lösungsauspressung in das Deckgebirge temporär einstellende geochemische Milieu im Zusammenspiel mit der Festphasenoberfläche (Gestein) bestimmt, welche (Radionuklid)Spezies in welcher Form in der Lösung verbleiben und weitertransportiert oder zurückgehalten werden. Hierdurch bildet die Sorption einen wichtigen Mechanismus des Radionuklidtransports im Deckgebirge.

Für die Bewertung der Migration im Deckgebirge war es für die Modellierung wichtig, die Mechanismen der Sorption daraufhin zu analysieren, auf welche Weise ihr Einfluss in den vereinfachenden Modellansatz sinnvoll zu implementieren wäre. Die mit dem Modellansatz berechneten Ergebnisse sind dann vor diesem Hintergrund zu interpretieren.

Die hierfür betrachteten Sorptionseffekte wurden von KIT-INE zusammengestellt /INE 2010, INE 20102/. Bei der Sorption werden unterschiedliche Mechanismen mit unterschiedlicher Dauerhaftigkeit der Rückhaltung wirksam. Weil der Effekt der Sorption stark ortsabhängig ist, wird er experimentell jeweils für das jeweilige Gestein mit seiner Porenstruktur und spezifischen

Porenwasserchemie ermittelt. Für das Deckgebirge der Asse besteht derzeit ein begrenzter Kenntnisstand aus eigenen laborativen Untersuchungen des INE. Die Übertragung aus anderen Fällen ist nur unter bestimmten Bedingungen möglich und muss jeweils geprüft werden. Dennoch sind bei fehlender standort- bzw. gesteinspezifischer Information auch Analogschlüsse aus anderen Zusammenhängen hilfsweise zulässig.

Durch die Sorption erfolgt die An- bzw. Einlagerung einer chemischen Spezies aus der wässrigen Phase an bzw. in die angrenzende feste Phase des Gesteins während des Transports durch den Porenraum. Aufgrund der unterschiedlichen immer vorhandenen Oberflächenladungen streben die chemischen Spezies in der wässrigen Phase grundsätzlich eine Verbindung mit der festen Oberfläche an und können auch in die feste Phase eindringen. Dementsprechend findet eine Oberflächensorption und/oder eine Matrixsorption statt. Umgekehrt können die Spezies, wenn sich das geochemische Milieu ändert, durch Desorption aus der Festphase wieder in die Lösung gehen.

Ein Weg, den Effekt der Sorption quantitativ auf der Makroskala in einem Modell zu beschreiben, ist die Einführung des Verteilungskoeffizienten (oder Sorptionskoeffizienten). Dieser " K_d -Wert" ist definiert als Verhältnis zwischen der aus der Lösung entfernten Stoffmenge bezogen auf die Masse des sorbierenden Feststoffes und der in der Lösung verbleibenden Stoffmenge bezogen auf das Volumen der wässrigen Phase (KIT INE 2012), welches sich nach dem Erreichen des Sorptionsgleichgewichts einstellt. Das Erreichen (oder auch die Änderung) des Sorptionsgleichgewichts wird neben dem geochemischen Milieu durch die Sorptionskinetik und die Fließgeschwindigkeiten im Porenraum bestimmt. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten kommt es zu einer „schnelleren“ Sorption und früherem Erreichen des Sorptionsgleichgewichts im Vergleich zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten.

Durch die Einführung des K_d -Wert-Konzeptes bei der Transportmodellierung im radioökologischen Modellansatz wird ein Übergang zwischen den mikroskaligen Effekten der Sorptionsmechanismen, welche nicht immer bekannt sein können, und deren makroskaligen Auswirkungen geschaffen. Das Konzept im Transportmodell geht von einem annähernd linearen Zusammenhang zwischen der in der Lösung befindlichen und an der Oberfläche gebundenen Stoffmenge aus - der sog. linearen Henry-Isotherme - und setzt eine über die Zeit reversible, schnell verlaufende Sorption voraus. Das bedeutet, dass die an der Gesteinsoberfläche sorbierten Radionuklidverbindungen mit einer zeitlichen Verzögerung wieder in die Lösung gehen und weitertransportiert werden. Die stattfindenden dauerhaften chemischen Sorptionsphänomene wie Einbau oder Matrixsorption werden in dem K_d -Wert-Konzept ignoriert. Hierdurch bleibt die Betrachtung der Sorption im Hinblick auf die Radionuklidkonzentration in Lösung konservativ, d.h. die Aktivitätskonzentrationen der Radionuklide im betrachteten Grundwasser werden tendenziell überschätzt, ohne die Sorption als Phänomen gänzlich zu vernachlässigen.

4.3.3.4. Kolloidaler Transport

Ein der Sorption an der Matrix verwandter, hinsichtlich seiner Wirkung aber gegenläufiger Effekt ist die Sorption an ihrerseits im Grundwasser mobilen Feststoffpartikeln (Kolloide), die (z.B. aufgrund von Ladungsunterschieden) nicht zur Anlagerung an vorhandene Oberflächen und daher an sie sorbierte Radionuklide mit der Grundwasserströmung weiter transportieren. Im Gegensatz zum rückhaltenden Effekt der Sorption am Gestein wird also die Migration des Stoffes durch Anhaften an einem Kolloid-Teilchen begünstigt.

Der kolloidale Transport kann in dem hier implementierten Ansatz des radioökologischen Modells nicht direkt berücksichtigt werden. Seine potenzielle Auswirkung auf die Radionuklidkonzentration

kann allerdings sehr effektiv über die Variation der Sorptionskoeffizienten und damit über die Betrachtung der Wirksamkeit der Sorption untersucht werden. Bei geringeren K_d -Werten wird dabei auch die Sorption an den Kolloiden reduziert und damit der kolloidale Transport rechnerisch eingeschränkt, wobei gleichzeitig die Migration in gelöster Form durch die reduzierte Sorption an der Gesteinsmatrix begünstigt wird (vgl. auch /ÖKO 2012/).

4.3.3.5. Effekt erhöhter Salinität

Die K_d -Werte in den hydrogeologischen Systemen des Asse-Deckgebirges wurden bis dato experimentell für niedrige Ionenstärken untersucht und die von KIT-INE zusammengestellten Wertebandsbreiten ausgehend von Experimenten und Analogien für solche Bedingungen abgeleitet. In /INE 2012/ wird diesbezüglich auf die Änderung der Sorption bei hohen $MgCl_2$ -Konzentrationen sowie auf die Änderungen im Sorptionsverhalten in einem hochsalinaren Milieu hingewiesen. Es ist daher wichtig, den Einfluss der erhöhten Ionenstärke auf den K_d -Wert ebenfalls zu betrachten.

Der derzeitige verfügbare Kenntnisstand aus Untersuchungen des Sorptionsverhaltens in hochsalinaren Systemen zeigt, dass sich die Sorption bei hoher Ionenstärke gegenüber einem schwachsalinaren Milieu generell verringert, wobei dies je nach betrachtetem Radionuklid nicht durchgängig die Regel ist.

Die aus dem Grubengebäude der Asse nach einer Flutung in das Deckgebirge austretende Lösung wird als stark $NaCl$ - und $MgCl_2$ - $CaCl_2$ -haltig angenommen und hat daher zunächst eine hohe Ionenstärke. Es kann daher angenommen werden, dass die Sorption entlang der Transportpfade im Bereich der an die Südflanke unmittelbar angrenzenden Buntsandsteinschichten gegenüber den im Hangenden folgenden Schichten des Muschelkalks salinitätsbedingt zunächst schwächer ist. Die während des Transports erfolgende Durchmischung mit dem Deckgebirgsgrundwasser führt zu einer Reduktion des Salzgehaltes (der Ionenstärke) und somit zu einer Änderung (in der Regel Erhöhung) der Sorptionsneigung des betrachteten Radionuklids entlang des Pfades. In größerer Entfernung von der Quelle und mit nachlassender Ionenstärke der Deckgebirgslösung wird die Sorption demnach stärker wirksam.

Die im Rahmen der Transportmodellierung durchgeführten Variationen der Sorptionskoeffizienten ermöglichen grundsätzlich auch eine Betrachtung der Effekte reduzierter Sorption, unabhängig von deren Ursachen. Eine entlang des Transportpfades sich ändernde Salinität der Lösung bzw. ihr Effekt auf die Radionuklidkonzentration kann in dem nun implementierten schichtenweisen Ansatz durch Parametervariationen mit untersucht werden.

4.3.3.6. Induzierte Mobilisierung

Das in den Modellvorstellungen zur Radionuklidfreisetzung aus der Asse berücksichtigte radioaktive Inventar umfasst ausschließlich die aus dem Grubengebäude ausgetragenen radioaktiven Stoffe. Geogen bereits im Deckgebirge vorhandene Radionuklide bleiben unberücksichtigt. Diese werden unter "normalen" Randbedingungen nur über lange Zeiträume auf niedrigem Konzentrationsniveau in das Deckgebirgsgrundwasser freigesetzt und bilden den natürlichen Radionuklidgehalt des Grundwassers. Bei starken Milieuänderungen wie z.B. pH-Wertverschiebung oder Versalzungen kann jedoch eine erhöhte Freisetzung (sog. induzierte Mobilisierung) erfolgen. Weil eine Auspressung der Salzlösung aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge zu derartigen Milieuänderungen entlang der Freisetzungspfade führen kann, könnte dieser Effekt zu einer zusätzlichen Radionuklidfracht im Grundwasser führen. Da bis dato allerdings keine Daten zum geogenen Radionuklidgehalt der Deckgebirgsformationen verfügbar

sind, kann dieser Effekt derzeit nur generisch beschrieben werden. Von den natürlichen Radionukliden käme hier vor allem die Mobilisierung von Radium-226 und -228 bei erhöhten Chloridkonzentrationen in Frage. Ein derartiger Beitrag zur Radionuklidfracht wäre primär und je nach Pfadkonfiguration entlang der ersten ca. 100 m der Schichten des oberen Buntsandsteins oder unteren Muschelkalks zu erwarten, wo während der Lösungsauspressung aus der Asse ein signifikanter Anstieg der Salzkonzentrationen zu erwarten wäre. Die zu erwartende Größenordnung würde sich im Bereich von 0,3 bis 3 Bq/l bewegen, vergleichbar mit den niedrigsten Konzentrationsbeiträgen der Radionuklide des Inventars. Der Beitrag der induzierten Mobilisierung würde sich entlang des Transportpfades mit der Transportdistanz und der Angleichung des Milieus im Rahmen der Durchmischung verringern. Der tatsächliche Beitrag zur Radionuklidkonzentration im oberflächennahen Grundwasser wäre also wahrscheinlich vernachlässigbar. Der Beitrag der induzierten Mobilisierung wird daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

4.3.3.7. Gekoppelte Migration

Der Effekt der gekoppelten Migration verweist auf die möglichen Beiträge zur Aktivitätskonzentration in der Zielregion durch die Nachbildung von Tochternukliden (auch in der festen Phase). Vereinfachend betrachtet muss für das betrachtete Ausgangsradiionuklid die Strecke zwischen der Quelle und der Zielregion hinreichend lang, das Radionuklid „entsprechend kurzlebig“ und die Abstandsgeschwindigkeit im Verhältnis „klein“ sein, damit die Nachbildung der Tochternuklide einen signifikanten Beitrag zur Summe der Aktivitätskonzentrationen in der Zielregion hat. Dabei wirkt weiterhin die rückhaltende Wirkung des durchgeströmten Porenraums (ausgedrückt durch den Retardationsfaktor) natürlich auch auf die Tochternuklide. Bereits im Vorgängervorhaben wurde als Bewertungsmaßstab die Migrationslänge eingeführt, welche die genannten Größen ins Verhältnis setzt (s.a. ÖKO 2012 und ÖKO 2015b).

Ist die Migrationslänge sehr viel kleiner als die gesamte Migrationsstrecke zwischen der Quelle und der Zielregion (kürzere Zerfallszeiten, hohe Retardation und niedrigere Abstandsgeschwindigkeiten), dominiert die radioaktive Umwandlung den Migrationsprozess (gekoppelte Migration). Dabei wird die Aktivitätskonzentration des Radionuklids in der Zielregion durch seine Vorgängernuklide bestimmt. Ist unter der gegebenen Parameterkombination die Migrationslänge gegenüber der Transportdistanz verhältnismäßig groß, werden die migrierenden Radionuklide über ihre Vorgänger nicht nachgebildet (isolierte Migration).

Die Aktivitätskonzentration in der Zielregion wird im Modell als Kombination der Beiträge aus isolierter und gekoppelter Migration ermittelt. Dabei muss modelltechnisch die Voraussetzung erfüllt sein, dass das Konzentrationsmaximum des langlebigen Vorgängernuklids in der Zielregion angekommen und ein genügend langer Zeitraum zur Einstellung des Aktivitäts-Gleichgewichts am Zielort vergangen ist.

4.3.4. Radionuklidtransport im Modell

In den Modellteil Transport fließt ein zeitabhängiger Quellterm im Übergang Grubengebäude-Deckgebirge ein, der aus dem Kompartiment- (s. Kap. 3) oder einem Rührkesselmodell abgeleitet sein kann. Er enthält die Information über die pro Jahr freigesetzten nuklidspezifischen Frachten [Bq/a] und die im jeweiligen Jahr ausgepressten Lösungsvolumina bzw. Auspressraten [m^3/a]. Aus der pro Jahr freigesetzten Fracht, dividiert durch das entsprechende ausgepresste Volumen, wird die pro Jahr freigesetzte Fracht in einem Kubikmeter (also die Aktivitätskonzentration) ermittelt. Im Rührkesselmodell wird aus der instantanen Vermengung des radioaktiven Inventars im definierten Lösungsvolumen eine über die Zeit konstante Aktivitätskonzentration berechnet.

Im Modellteil Transport wird die Migration der Aktivitätskonzentration als „normierte“ Fracht bezogen auf 1 m^3 betrachtet und entlang vordefinierter Transportpfade nachvollzogen. Als die treibende Kraft der Bewegung fungiert hierbei die Geschwindigkeit $[\text{m/a}]$, mit welcher die normierte Fracht durch das Deckgebirge weitertransportiert wird. Die Berechnung der Migration kann wahlweise über den Einschicht- oder Mehrschichtansatz durchgeführt werden, im zweiten Fall sind bis zu sechs Schichten wählbar. Die maximale Anzahl der Schichten entspricht der zurzeit bekannten geologischen Gliederung des Asse-Deckgebirges oberhalb der Südflanke. Für den Fall der Pfadführung entlang des verstürzten Deckgebirges (oder beliebiger anderer Pfade) kann die Schichtenfolge entsprechend modifiziert werden.

Bei Approximierung des Deckgebirges durch eine einzelne Schicht wird der Transport mit Hilfe der Abstandsgeschwindigkeit, also der tatsächlichen Geschwindigkeit im durchflusswirksamen Porenraum beschrieben. Der Mehrschichtansatz verwendet die Filtergeschwindigkeit, mit welcher die gesamte Querschnittsfläche durchflossen wird. Sie muss entsprechend der eindimensionalen Modellbetrachtung über alle Schichten konstant bleiben, weil die (Gesamt)Querschnittsfläche sich nicht verändert. Durch die Änderung der Porosität von Schicht zur Schicht wird in der Berechnung eine jeweils schichtbezogene Abstandsgeschwindigkeit generiert. Anschaulich wird in der eindimensionalen Vorstellung die Radionuklidfracht über eine "Stromröhre" mit einer definierten Querschnittsfläche bis zum oberflächennahen Grundwasser transportiert. Die sich dort einstellende Aktivitätskonzentration ist Ausgangspunkt für die radioökologische Betrachtung der Exposition einer Referenzperson (s. Kap. 4.3.5).

Entlang der Transportstrecke wirkt der radioaktive Zerfall sowie eine Verdünnung bis zum Erreichen einer Salzkonzentration auf Trinkwasserniveau (Faktor 1:1100), die für eine sinnvolle Betrachtung der radioökologischen Transferpfade notwendig ist. Die Massenerhaltung wird durch eine Parameterwahl gewährleistet, bei der die zeitliche Summe eines stabilen Tracers (ohne Zerfall), der am Übertritt Grubengebäude/Deckgebirge in den Modellteil „Transport“ einfließt, gleich der zeitlichen Summe dieses Tracers im genutzten Grundwasser ist (Details zur programmtechnischen Umsetzung s. /ÖKO 2015b/).

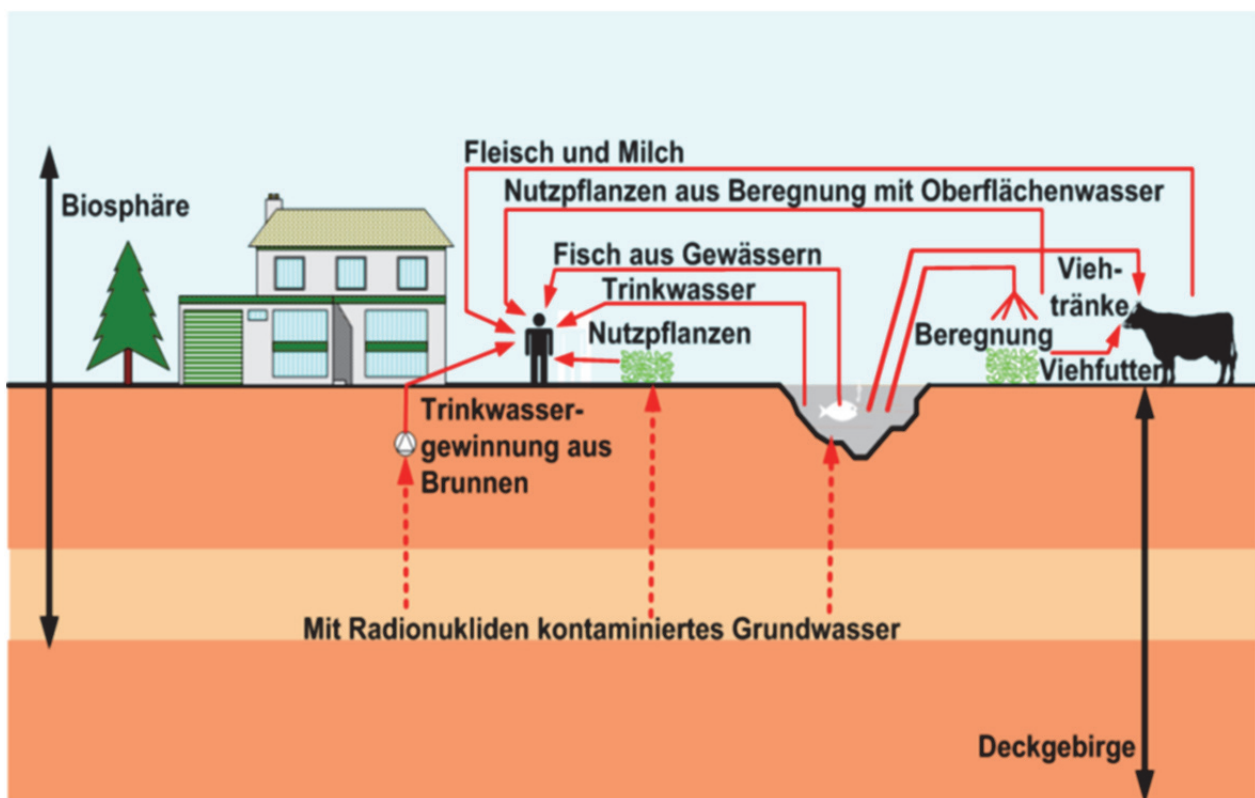
Die eindimensionale Vorstellung ist durch die Ausrichtung des Geschwindigkeitsvektors im Deckgebirge entlang der „Röhre“ nach oben bis zur Zielregion und die Vernachlässigung des Austausches mit dem umgebenden Grundwasser konservativ. Dabei wird kein direkter Zusammenhang zwischen der Auspressrate des zeitabhängigen Quellterms im Kompartimentmodell und der Geschwindigkeit hergestellt, da nicht schlüssig von der Auspressrate auf die Strömungsgeschwindigkeit im Deckgebirge geschlossen werden kann. Stattdessen können die Werte der Geschwindigkeiten im Rahmen einer Szenarienanalyse vorgegeben und variiert werden. Durch eine über die Zeit konstant gehaltene Geschwindigkeit (je Rechenfall) wird ein „gleich schneller“ Radionuklidtransport auch zu Zeiten mit deutlich kleineren Auspressraten und somit im Ergebnis ein konservativerer Dosisverlauf erzwungen, als es bei einer entsprechend den Auspressraten zeitlich reduzierten Geschwindigkeit der Fall wäre.

Ergebnisse der Berechnungen ist ein Quellterm der zeitlichen Entwicklung der Aktivitätskonzentration für jedes Radionuklid des Quellterms im oberflächennahen Grundwasser Radionuklidkonzentration im oberflächennahen Grundwasser, der als Eingangsgröße an das Expositionsmodell weiter gegeben wird.

4.3.5. Radionuklidtransfer in der Biosphäre – Aspekte der Lebensgewohnheiten und Expositionspfade

Der bereits im Vorgängervorhaben in seinen Grundzügen entwickelte und programmierte Modellteil zur radiologischen Belastung in der Biosphäre wurde im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens programmtechnisch überarbeitet und dabei hinsichtlich der Auswertungsmöglichkeiten flexibilisiert und in der Bedienbarkeit angepasst. Die aus /AVV 2012/ bzw. /BglBb 2010/ abzuleitenden Expositionspfade aus kontaminiertem Grundwasser sind in Abbildung 4-8 schematisch dargestellt.

Abbildung 4-8: Expositionspfade zur Dosisberechnung ausgehend von kontaminiertem Grundwasser



Quelle: Öko-Institut e.V.

Hinsichtlich der zentralen Prozesse bleibt die Dosisberechnung gegenüber dem Vorgängervorhaben i. W: unverändert (s. /ÖKO 2012/). Die Dosisberechnung erfolgt aus Zahlenwerten zur Aktivitätskonzentration im oberflächennahen Grundwasser, die das Programm zur Expositionsrechnung als Ergebnis aus der Transportmodellierung übernimmt. Entlang der definierten Expositionspfade wird hieraus die Strahlenexposition (in der Regel effektive Dosis) von Referenzpersonen im Langzeitmaßstab bestimmt. Das im Vorjahr jeweils nicht verbrauchte Grundwasser, welches durch die natürliche Bewegung den Ort der Entnahme verlässt, wird im Modell in die Berechnung der Exposition im aktuellen Jahr nicht miteinbezogen, die Anreicherung im Boden und Pflanzen bleibt davon unberührt. Da die Bewertung auf die Abschätzung der Strahlenexposition der am höchsten exponierten einzelnen Referenzperson abzielt, ist ein „Überschuss“ an Wasser für die Betrachtung nicht relevant.

Der Modellteil zur Ermittlung der potenziellen Strahlenexposition wird in seinem Aufbau fallbezogenen und schnelleren (kurzfristigeren) Änderungen der Radionuklidkonzentrationen gerecht, was mit dem bislang verbreiteten Konzept der für langfristige Gleichgewichtszustände entwickelten Dosiskonversionsfaktoren nicht möglich ist.

Bei der Ermittlung möglicher Strahlenexpositionen ist neben der Definition der Expositionspfade die Festlegung der Lebensgewohnheiten der betrachteten Referenzpersonen von wesentlicher Bedeutung. Bislang wurde in Deutschland kein Verfahren zur Ermittlung der Strahlenexposition bei einem Endlager verbindlich festgelegt. Gegenwertig stehen im Deutschen Regelwerk lediglich Berechnungsverfahren zur Verfügung, die für analoge Berechnungen in Frage kommen: Ermittlung der Strahlenexposition mit extrem ungünstigen Lebensgewohnheiten für geplante Anlagen und Tätigkeiten gem. AVV zu § 47 StrlSchV /AVV 2012/ bzw. Anlage VII Teil B StrlSchV oder mit Lebensgewohnheiten in Anlehnung an die Berechnungsgrundlagen Bergbau /BglBb 2010/ für die radiologische Bewertung von Interventionssituationen aufgrund bergbaulicher Hinterlassenschaften. Während die AVV zu § 47 StrlSchV einen stark vorsorgenden Charakter hat, strebt die Berechnungsgrundlage Bergbau nach einer konservativen, aber realistischeren Bewertung einer tatsächlichen Situation und der hierfür erforderlichen Intervention. Nach der AVV zu § 47 StrlSchV wird daher der ausschließliche Verzehr kontaminierter Lebensmittel betrachtet, während bei den Berechnungsgrundlagen Bergbau je nach Lebensmittelgruppe auch eine Reduzierung kontaminierter Lebensmittel auf 50% der mittleren Verzehrtrate angesetzt wird.

Die Strahlenschutzkommission (SSK) hat sich mit der Fragenstellung geeigneter Rechenansätze und eingehender Parameterwerte zur Dosisermittlung bei einem Endlager und bei bergbaulichen Hinterlassenschaften sowie der Rolle der AVV zu § 47 StrlSchV und der Berechnungsgrundlagen Bergbau befasst und eine Empfehlungen zur Ermittlung der Strahlenexposition erarbeitet /SSK 2013/. Die SSK macht in dieser Empfehlung auf die hohe Konservativität der AVV zu § 47 StrlSchV aufmerksam:

In der AVV zu § 47 StrlSchV werden die Modelle und Parameter zur Berechnung der Strahlenexposition so festgelegt, dass bei ihrer Anwendung die zu erwartende Strahlenexposition des Menschen nicht unterschätzt wird. Sie ist hoch konservativ und stellt eine Abschätzung dar.

Dabei verweist die SSK auch auf die EURATOM-Grundnormen und ICRP 103, welche in diesem Zusammenhang eine möglichst realistische Ermittlung der Strahlenexposition fordern:

Sowohl in ICRP 60 von 1991 als auch in den EURATOM-Grundnormen von 1996 war die Forderung nach einer realistischen Ermittlung der Strahlenexposition erhoben worden. In ICRP 103 und im vorliegenden Entwurf der EURATOM-Grundnormen (EC 2012) wird an dieser Forderung festgehalten. In den Formulierungen der ICRP (1991, 2007) wird der Ausdruck „so realistisch wie möglich“ so präzisiert, dass die Ergebnisse von Ermittlungen der Strahlenexposition „beste Schätzwerte“ im metrologischen Sinne sein sollen. Gleichzeitig wird auf die Bedeutung der Angabe von Unsicherheiten hingewiesen.

Die Ermittlung einer Strahlenexposition in der fernen Zukunft, wie sie bei einem Endlager erforderlich ist, stellt insofern ein besonderes Problem dar, als heutige Expositionssituationen nur mit Einschränkung auf lange Zeiträume übertragbar sein können. Für den Zweck einer Langzeitsicherheitsanalyse für ein Endlager unterscheidet die SSK in ihrer Empfehlung zwischen Prognosen „in überschaubaren Zeiträumen“ und der Langzeitbewertung. Als anzustrebende Ergebnisgröße empfiehlt die SSK

- für überschaubare Zeiträume die Dosis einer repräsentativen Referenzperson an der ungünstigsten Einwirkungsstelle (most exposed individual) als „bester Schätzwert mit Unsicherheit“, und
- für die Langzeitbewertung die Dosis einer repräsentativen Referenzperson an der ungünstigsten Einwirkungsstelle als „Indikatorwert mit Unsicherheit“.

Die mit dem im Rahmen des Vorhabens UM13A03505 weiterentwickelten Modell ermittelten Werte der Strahlenexposition wären in diesem Kontext als Indikatoren für die langfristige Betrachtung zu verstehen. Die Unsicherheit der Betrachtung wird dann durch die Variation möglicher Expositionsszenarien abgebildet. Im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens steht dabei die Demonstration der Einsatzfähigkeit der entwickelten Instrumente anhand exemplarische Szenarien im Vordergrund. Eine breit angelegte Szenarienanalyse war nicht Gegenstand der Untersuchungen.

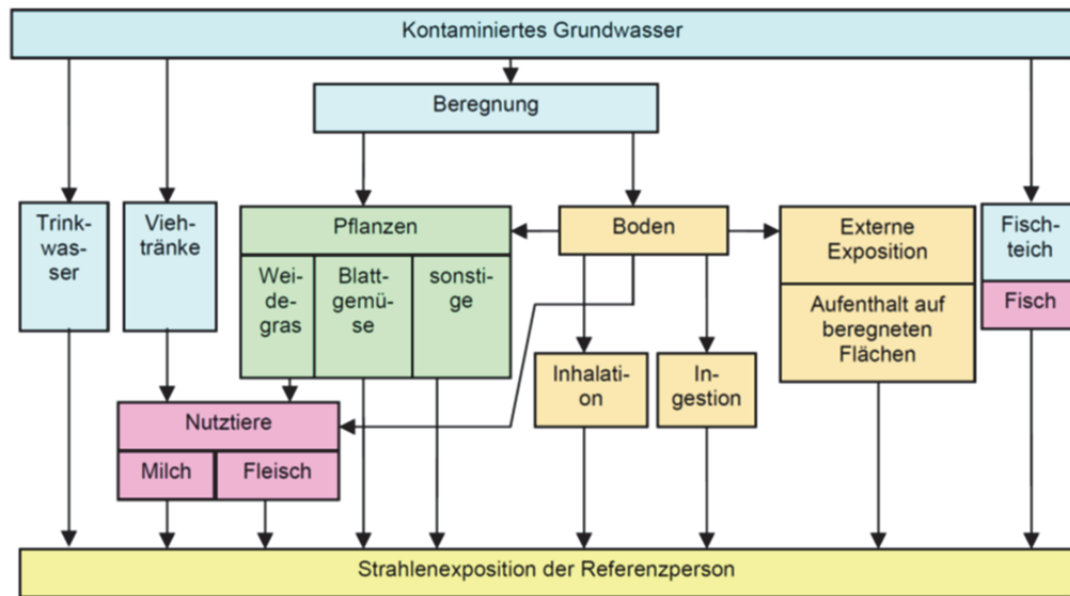
Das Modell berücksichtigt folgende Expositionspfade (s. a. Abbildung 4-9):

- Verzehr des kontaminierten Grundwassers als Trinkwasser,
- Speisung eines Fischteichs mit kontaminiertem Grundwasser und Verzehr des Fisches,
- Viehtränke mit kontaminiertem Grundwasser und Verzehr von dadurch kontaminierten Milch- und Fleischprodukten,
- Beregnung landwirtschaftlicher Flächen mit kontaminiertem Grundwasser und Verzehr dadurch kontaminierter pflanzlicher Lebensmittel,
- Beregnung von Weideflächen mit kontaminiertem Grundwasser und Verzehr von dadurch kontaminierten Milch- und Fleischprodukten,
- Aufenthalt auf mit kontaminiertem Grundwasser beregneten Flächen und dadurch bedingte äußere Strahlenexposition, Inhalation von suspendierten Bodenpartikeln sowie Verzehr von Bodenpartikeln,
- Verzehr kontaminierter Muttermilch infolge der Aufnahme radioaktiver Stoffe durch die Mutter über alle o. g. Inkorporationspfade.

Die aus den Expositionsszenarien resultierende Strahlenexposition wird als Organdosis der jeweils betroffenen Organe pro Jahr berechnet. Die effektive Dosis ist die Summe der gewichteten Organdosen gemäß Anlage VI Teil C StrlSchV.

Die Referenzpersonen sind Einzelpersonen der Bevölkerung der Altersgruppen ≤ 1 Jahr, > 1 bis ≤ 2 Jahre, > 2 bis ≤ 7 Jahre, > 7 bis ≤ 12 Jahre, > 12 bis ≤ 17 Jahre und > 17 Jahre. Im Modell sind demnach alle Altersgruppen der Strahlenschutzverordnung enthalten.

Abbildung 4-9: Expositionspfade



Quelle: Öko-Institut e.V.

4.4. Parameterunsicherheiten

Die im radioökologischen Modell erfasste kausale Kette der zur Exposition einer Referenzperson führenden Prozesse von der Inventarfreisetzung über den Deckgebirgstransport bis zum Radionuklidtransfer in der Biosphäre beinhaltet notwendiger Weise eine ganze Reihe Vereinfachungen – eingeführt entweder wegen des geringfügigen Einflusses auf die betrachtete Zielgröße (hier: effektive Dosis) oder wegen der eingeschränkten Informationsbasis mit entsprechendem Grad der Konservativität. Diese Vereinfachungen sind immer auch mit Unsicherheiten auf verschiedenen Ebenen verbunden:

- Unsicherheiten bei der Beschreibung der Komponenten (schematisiertes Bild der Strukturen) und Prozesse und deren mathematische Beschreibung und Umsetzung im Modell,
- Unsicherheiten der eingehenden Parameterwerte inklusive der Schadstoffquelle,
- Unsicherheiten bei der Definition von Szenarien.

Solche Unsicherheiten sind in jeder Modellbetrachtung enthalten, und ihr Einfluss auf die Zielgröße muss entsprechend bewertet werden; die Ergebnisse der Modellierung sind dann aus diesem Blickwinkel zu interpretieren. Dabei wird ermittelt, wie sich die Varianz der Zielgröße durch Variation (Unsicherheit) der Eingangsvariablen verändert und in welchen Fällen diese Veränderung am stärksten (sensitivsten) ist.

In /ÖKO 2015b/ werden diesbezüglich die für den vom Öko-Institut bearbeiteten Modellteil relevanten Unsicherheiten bzw. Wertebandbreiten/Variationsmöglichkeiten bei den Eingangsparametern (Quellterme), dem Transport (Auspressrate, Transportgeschwindigkeit, Pfadlänge, Gesteinseigenschaften, Dispersionslänge, Sorptionskoeffizienten) und den für die Dosisberechnung relevanten Transferpfade und Verzehrgewohnheiten benannt und diskutiert.

4.5. Beispielhafte Berechnungen zur Demonstration der Wirkung relevanter Einflussgrößen

In Tabelle 4-1 sind die bisher modelltechnisch betrachteten Freisetzungsvarianten aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge aufgeführt. Für jeden der dort genannten Fälle ergab sich ein spezifischer Freisetzungsquellterm. Mit diesen Quelltermen wurden im Rahmen einer vereinfachten Variationsanalyse des Deckgebirgstransports verschiedene Einflüsse entlang des Transportpfades bis zur Biosphäre untersucht und dabei Variationen innerhalb der Wertebandbreiten für Sorptionskoeffizienten, Pfadlänge und Transportgeschwindigkeit durchgeführt. Zur Ermittlung der Dosis aus den erzielten Rechenwerten für die Kontamination des oberflächennahen Grundwassers wurden Verzehrsgewohnheiten aus /AVV 2012/ und /BgI BB 2010/ berücksichtigt.

Tabelle 4-1: Varianten der Freisetzung im Grubengebäude

Freisetzungsvariante		Variantenbeschreibung
Rührkesselmodell		Instantane Freisetzung des Gesamtinventars in einem definierten Fluidvolumen
Kompartimentmodell	Ohne Löslichkeitsgrenzen	1.1 Referenzfall (Zustand der Grube im Dezember 2009)
		1.2 Variante mit unwirksamen Verschlüssen der LAW-Einlagerungskammern
		1.3 Variante mit erhöhter Konvergenz und erhöhter Gasbildungsrate
		1.4 Variante mit erhöhtem Hohlraumvolumen aufgrund von Lösungsprozessen
	Mit - Löslichkeitsgrenzen U/Th	2.1 Referenzfall (Zustand der Grube im Dezember 2009)
		2.2 Variante mit unwirksamen Verschlüssen der LAW-Einlagerungskammern
		2.3 Variante mit erhöhter Konvergenz und erhöhter Gasbildungsrate
		2.4 Variante mit erhöhtem Hohlraumvolumen aufgrund von Lösungsprozessen

Quelle: Öko-Institut e.V.

Aus jeder der hier betrachteten Freisetzungsvarianten ergab sich ein spezifischer Quellterm. Im Vergleich erwies sich dabei der Quellterm aus dem Rührkesselmodell nicht immer als der hinsichtlich der erzeugten Dosis ungünstigste.

Mit den Untersuchungen kann zum Einfluss der Sorption gezeigt werden, dass die im Quellterm betrachteten Radionuklide je nach Sorptionsneigung mit ihrem Beitrag zur Dosis sehr sensitiv auf die angesetzten Sorptionskoeffizienten reagieren. Stark sorbierende Radionuklide (hierzu zählen insbesondere die Isotope von Americium, Plutonium, Uran und Thorium) erzeugen bereits bei Ansatz der unteren Grenzen ihrer K_d -Wertebereiche keinen dosisrelevanten Beitrag in der Biosphäre. Durch Betrachtung der Untergrenzen der K_d -Wertebereiche werden dabei auch transportbegünstigende Einflüsse auf die Sorption (z.B. Kolloid-Effekte) implizit mit berücksichtigt. Die Dosis wird dabei grundsätzlich von mobilen Radionukliden mit geringer oder keiner Sorptionsneigung bestimmt (e.g. Ni-63, -Ni59, Cl-36, Se-79).

Variationen in der Länge der Pfade in die Biosphäre zeigen, dass naturgemäß kürzere Transferpfade zu höheren Dosen führen, für die hier betrachteten Pfadlängen ergeben sich für den kurzen Pfad (400 m) um Faktor 1,2 bis 4 höhere Dosiswerte als für den langen Pfad (600 m).

Ein gleichgerichteter Effekt zeigt sich bei Variation der Transportgeschwindigkeit, in der sich beispielsweise Effekte bevorzugter hydraulischer Wegsamkeiten bei gleichzeitig höherer Abstandsgeschwindigkeit ausdrücken. Dabei werden höhere Dosiswerte neben dem schnelleren Transport auch durch ein früheres Auftreten der Aktivitätsmaxima im oberflächennahen Grundwasser erzeugt. In den in /ÖKO 2015b/ angestellten Betrachtungen tritt das Dosismaximum für die Referenzperson einige hundert Jahre früher auf und zeigt (bei Ansatz unterer Grenzen der K_d -Wertebereiche) eine im Faktor 8 höhere Maximaldosis, die dafür über kürzere Zeiträume (einige Jahrzehnte bei hoher Transportgeschwindigkeit gegenüber einigen Jahrhunderten bei niedriger Transportgeschwindigkeit) wirksam ist.

Bezüglich der Berechnung der Dosis aus der Grundwasserkontamination über die Transferpfade nach /AVV 2012/ oder /BglBB 2010/ ergeben sich aus den Transferfunktionen bzw. Verzehrgewohnheiten nach AVV aufgrund der dort enthaltenen vorsorgend konservativen Ansätze bei gleicher Aktivitätskonzentration im Grundwasser grundsätzlich höhere potenzielle Dosen der Referenzperson als aus den Verzehrgewohnheiten nach BglBB. Grundsätzlich weisen dabei immer die Altersgruppen < 1a und 1-2a die höchsten Belastungen auf.

Zusammenfassend ergeben sich also aus der Kombination *konservativer Freisetzungsquellterm* → *Niedrige K_d -Werte* → *hohe Transportgeschwindigkeit* → *kurzer Pfadlänge* → *vorsorgend konservative Verzehrgewohnheiten* bei der Exposition die höchsten potenziellen Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung, und dort speziell für Säuglinge und Kleinkinder.

4.6. Zum Projektende erreichter Stand

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Instrument geschaffen, mit dem die langfristigen radiologischen Konsequenzen einer Freisetzung von Radionukliden aus der Schachanlage Asse II abgeschätzt werden können. Dies beinhaltet zum einen die Modellierung des Transports durch das Deckgebirge in einem 1D-Modell, das die Einbeziehung von Sorptions- und Desorptionseffekten auf dem Transportweg möglich macht. Zum anderen wurde ein Modell zur Ermittlung der Strahlenexposition durch im genutzten Grundwasser vorliegende Radionuklide entwickelt, das von keinen Gleichgewichtsbedingungen Kredit nimmt, sondern den Transfer in der Biosphäre in Jahresschritten modelliert.

In /ÖKO 2015b/ wird der erreichte Entwicklungsstand des Transport- und Expositionsmodells beschrieben und auch programmtechnisch erläutert. Anhand exemplarischer Szenarien wird die Einsatzfähigkeit der entwickelten Modellumgebung demonstriert. Dabei gelingt es, Transportvorgänge entlang eindimensionaler, in mehrere Schichten gegliederter Transportpfade mit relevanten Prozessen im Deckgebirge zu verknüpfen und die daraus resultierenden radionuklidspezifischen Migrationsvorgänge inklusive der Problematik der Tochternuklide nachzuvollziehen und dabei die maßgeblichen Parameter auch für Variationsanalysen zugänglich zu machen. Mit der Übergabe der hieraus ermittelten Radionuklidkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser an den Modellteil zur Ermittlung potenzieller Strahlenexpositionen können hieraus nicht nur Angaben zu potenziellen Expositionen analog /AVV 2012/ und /BglBB 2010/ berechnet werden, es ist auch möglich, die hierfür angesetzten Verzehrgewohnheiten zu variieren, was für zukünftige Überlegungen hinsichtlich der radiologischen Bewertung von endlagerspezifischen Langzeitsicherheitsanalysen in Erweiterung der derzeit verfügbaren Rechenvorschriften von Interesse sein dürfte.

Es sind weitere Untersuchungen des Deckgebirges der Asse erforderlich, um zuverlässigere Erkenntnisse über mögliche Transportwege vom Grubengebäude durch das Deckgebirge sowie Eigenschaften von Gesteinen des Deckgebirges, die sich auf den Radionuklidtransport auswirken, zu erhalten. In der hier vorliegenden Studie wurden, ausgehend vom aktuellen Stand des Wissens, plausible Variationen von Parametern und Annahmen vorgenommen, die mögliche Wertebereiche von Strahlenexpositionen und noch bestehende Unsicherheiten aufzeigen. Auch hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs der Lösung von Radionukliden aus den radioaktiven Abfällen in zugetretener Salzlösung im Grubengebäude besteht weiterer Untersuchungsbedarf, so dass auch in dieser Hinsicht hier nur von vereinfachenden Annahmen ausgegangen werden konnte, die aber als konservativ anzusehen sind.

Im Rahmen einer exemplarischen Szenarienanalyse wurden folgende Variationen vorgenommen:

- Variation der Quellterme aus dem Grubengebäude: Rührkesselmodell versus Varianten des Kompartimentmodells.
- Berücksichtigung von Rückhalteeffekten beim Transport durch das Deckgebirge, insbesondere durch die Variation von Sorptionskoeffizienten
- Variation der Pfadlänge vom Grubengebäude bis zum genutzten Grundwasserleiter (400 m und 600 m).
- Variation der Abstandsgeschwindigkeit beim Transport durch das Deckgebirge (1 m/a bis 10 m/a).
- Variation der Lebensgewohnheiten der berücksichtigten Referenzpersonen

Im Rahmen des Vorhabens UM13A03505 wurden Parametervariationen durchgeführt um den damit verbundenen Effekt für die Dosis aufzuzeigen. Entsprechende Variationen können zukünftig auch Gegenstand einer umfassenden Szenarienanalyse sein, die aber nicht mehr Gegenstand des Vorhabens UM13A03505 war.

5. Themenfeld Betrieb

Im Rahmen des Vorhabens UM13A03505 hat der Projektpartner CDM Smith anlassbezogen gegenüber der Projektgruppe im Rahmen der regelmäßig stattfindenden Besprechungen über aktuelle betriebliche Entwicklungen berichtet, z.B. zu

- Lösungszutritten
- Lösungsfassung
- Lösungsmanagement
- Entsorgungswege
- Tragverhalten der Südflanke
- Arbeitssicherheit in betrieblich genutzten Hohlräumen
- Stabilisierungsmaßnahmen
- Vorsorgemaßnahmen zur Konsequenzenminimierung
- Baustoffproduktion

Schwerpunkte der Berichterstattung waren insbesondere die sich laufend verschlechternden Randbedingungen für den Offenhaltungsbetrieb, sowie deren Einflüsse auf die Umsetzung der Notfallplanung. Ein weiterer Schwerpunkt war die Prüfung der gebirgsmechanischen und radioökologischen Modellierungen im Zusammenhang mit dem aktuellen Status der Notfallvorsorgemaßnahmen.

Eine solche projektbegleitende Berichterstattung war für die Mitglieder Projektgruppe von großem Wert, da sie über die verfügbaren, allerdings häufig an Aktualität mangelnden Dokumente hinaus Einblicke in den aktuellen Zustand und den Betrieb der Schachtanlage vermittelte. CDM Smith ist als Fachgutachter für das BfS in der Asse tätig und verfügt aus dieser Tätigkeit über Kenntnisse und Erfahrungen aus der jeweils aktuellen betrieblichen Situation. Die Beteiligung von CDM Smith an der Projektgruppe des BMUB war mit BfS und Asse GmbH abgestimmt, um Interessenskonflikte aus beiden Auftragsverhältnissen auszuschließen.

CDM Smith hat diesbezüglich im Rahmen der Projektgruppensitzungen regelmäßig vorgetragen. Eine gesonderte Berichterstattung zum Projektabschluss war nicht vorgesehen, daher werden die Inhalte der projektbegleitenden Berichterstattung im Rahmen des hier vorgelegten Berichts nicht im Einzelnen wiedergegeben.

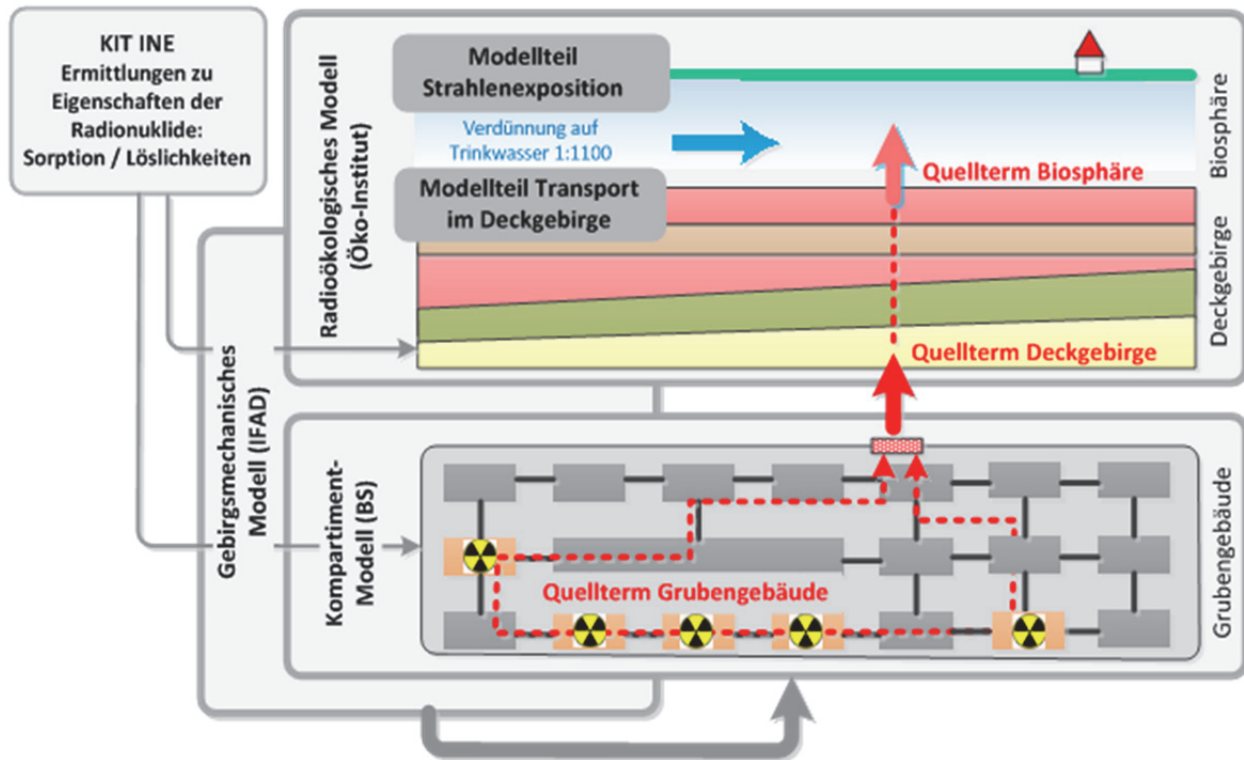
6. Schlussbemerkungen

Mit Abschluss des Vorhabens UM13A03505 hat die Projektgruppe Asse eine Reihe an Modellen entwickelt und exemplarisch erprobt. Die Modelle bauen aufeinander auf und ermöglichen folgende Untersuchungen:

- Untersuchungen zum Tragverhalten des Grubengebäudes in einem komplexen dreidimensionalen Modell mit globalen und filigranen Strukturen unter Berücksichtigung trockener oder gefluteter Grubenzustände, inkl. daraus abgeleitete Konvergenzraten
- Untersuchungen zur Ermittlung von Radionuklid-Quelltermen zur notfallbedingten Freisetzung in das Deckgebirge aus dem abgesoffenen Bergwerk, unter Berücksichtigung von Konvergenzraten, Überlegungen zur Gasbildung, Interaktionen zwischen rd. 120 Kompartimenten und verschiedenen Anlagenzuständen.
- Untersuchungen zur gekoppelten Migration von Radionukliden im Deckgebirge in einem mehrschichtigen analytischen Transportmodell, unter Berücksichtigung von Dispersion und Sorption, mit dem Ergebnis konservativer Radionuklid-Quellterme im oberflächennahen Grundwasser
- Untersuchungen zu radiologischen Konsequenzen eines notfallbedingten Radionuklideintrags in das oberflächennahe Grundwasser als potenzielle Dosis von Einzelpersonen der Bevölkerung entsprechend den Verzehrgewohnheiten nach AVV und BGIBB.

Abbildung 6-1 verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Modellen in einem Gesamtmodellkonzept. Die entwickelten Modelle sind mathematisch stabil und methodisch ausgereift, können aufgrund der mangelhaften Datenlage aber auf absehbare Zeit wahrscheinlich nicht für qualifizierte standortspezifische Modellierungen eingesetzt werden. Hierfür müssten durch entsprechende Datenerhebung seitens des Betreibers zunächst die notwendigen Voraussetzungen geschaffen werden. Mit den im hiermit abgeschlossenen Vorhaben entwickelten Instrumenten wäre es dann möglich, Szenarien zu verschiedenen Grubenzuständen bei Eintritt des Notfalls und zu diesbezüglichen Radionuklidfreisetzungen zu entwerfen und hinsichtlich ihrer radiologischen Auswirkungen in der Biosphäre zu untersuchen. Die bisherigen beispielhaften Berechnungen zu einem hypothetischen Absaufen der Asse haben gezeigt, dass die Modelle hierbei plausible und nachvollziehbare Ergebnisse liefern.

Abbildung 6-1: Gesamtmodellkonzept zur Modellierung der radiologischen Konsequenzen eines Absaufens der Schachanlage Asse II



Quelle: Öko-Institut e.V.

Die Gesamtheit der im Rahmen des Vorhabens entwickelnden Modellvorstellungen ermöglicht nach Auffassung der Projektpartner eine nach wie vor gegenüber einer real stattfindenden Radionuklidfreisetzung konservative Untersuchung des Radionuklidtransfers aus den in der Asse eingelagerten Abfällen in die Biosphäre, da insbesondere eine Reihe von die Freisetzung oder die Migration verzögernden Prozessen unberücksichtigt bleiben. Wesentliche Punkte, die die Konservativität bestimmen sind dabei

- Annahmen zur Mobilisierung der Radionuklide aus den eingelagerten Abfällen: Es wurden lediglich Löslichkeitsgrenzen in salinaren System und unter den sich mit hoher Wahrscheinlichkeit einstellenden, anfangs stark alkalischen, langfristig schwach alkalischen, pH-Werten optional berücksichtigt. Die Modelle ermöglichen dabei zu Vergleichszwecken oder "worst case" Betrachtungen auch den vollständigen Verzicht auf diese Löslichkeitsgrenzen. Die Lösungskinetik bleibt ebenfalls unberücksichtigt, so dass Annahmen zur Radionuklidmobilisierung aus instantan wirkenden Prozessen abgeleitet werden.
- Annahmen zur Radionuklidmigration im Grubengebäude: Die Migration der Radionuklide im Grubengebäude bis zum Austrittspunkt in das Deckgebirge wird ausschließlich von hydraulischen Randbedingungen bestimmt. Hydrochemische Prozesse und Wechselwirkungen mit der durchströmten Matrix, die zu Sorption im Grubengebäude führen, wurden ebensowenig berücksichtigt wie Temperatur- und Dichteffekte. Diese nicht berücksichtigten Effekte würden gegenüber den Berechnungsergebnissen der Quelltermmittlung im Falle eines tatsächlichen Absaufens der Asse grundsätzlich zu einer Verzögerung und Verringerung der Radionuklidfreisetzung in das Deckgebirge führen.

- Annahmen zur Radionuklidmigration durch das Deckgebirge: Durch die Variation der Pfadlänge und der sorptionsrelevanten Eigenschaften der auf dem Weg in die Biosphäre durchströmten Gesteinsschichten können mit dem entwickelten Instrumentarium Bandbreiten untersucht werden, die von keinerlei Sorption und damit rein hydraulisch gesteuerter Migration, bis hin zu einer auf Annahmen und/oder wissenschaftlich belegbaren Daten zur Sorption beruhenden Rückhaltung von Radionukliden im Deckgebirge reicht. Die Eindimensionalität der Transportrechnung beinhaltet dabei gegenüber komplexeren 2- und 3-dimensionalen Modellvorstellungen eine zusätzliche Konservativität durch die Nichtberücksichtigung räumlich wirkender Effekte. Temperatur- und Dichteffekte, die im Deckgebirge bei unterschiedlich dichten Fluiden wie dem Deckgebirgs-Wasser und der ausgepressten Salzlauge die Migrationsrichtung beeinflussen und dabei grundsätzlich in Richtung auf eine Verlängerung des Transferpfades und damit auf eine verlängerte Wechselwirkung zwischen Radionukliden und Deckgebirgsmatrix wirken, bleiben ebenfalls unberücksichtigt.
- Annahmen zur potenziellen Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung: Die Abbildung von Transferpfaden aus der Biosphäre in den menschlichen Körper bzw. für die Wirkung von Direktstrahlung auf den menschlichen Körper folgt der vorsorgenden Herangehensweise der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung /AVV 2012/ und optional den Berechnungsgrundlagen Bergbau /BglBB 2010/. Gegenüber den dort hinterlegten, grundsätzlich konservativen (weil real nicht vollständig umsetzbaren) potenziellen Verhaltens- und Verzehrgewohnheiten ermöglicht die radioökologische Modellierung darüber hinaus die Untersuchung von Verhaltens- und Verzehrvariationen.

Andere Randbedingungen der Radionuklidfreisetzung in das Deckgebirge, wie die gebirgsmechanischen Randbedingungen, Konvergenz des Grubengebäudes im abgesoffenen Zustand, die Gasbildung oder die modelltechnischen Kompartimentierung des Grubengebäudes für die Quelltermmittlung sind in den entwickelten Modellen nicht notwendigerweise konservativ, wurden aber auf plausible Art und Weise wissenschaftlich abgeleitet und bieten darüber hinaus die Möglichkeit eines zukünftigen Abgleichs mit der weiteren Entwicklung des Grubengebäudes und des Kenntnisstands zum Gesamtsystem Asse.

Es war explizit nicht Aufgabe des hiermit abgeschlossenen Vorhabens, eine umfassende Szenarienanalyse zur Schachanlage Asse vorzulegen, vielmehr sollten mit der Entwicklung der erforderlichen Methodik die Möglichkeiten der Fachaufsicht im Sinne einer qualifizierten und unabhängigen Gegenrechnung betreiberseitiger Angaben gestärkt werden. Aus Sicht der Bearbeiter ist dies durch die entwickelten Modelle gelungen. Mit den im Rahmen des Projekts entwickelten Werkzeugen steht damit als Ergebnis des Vorhabens ein Prüf-Instrumentarium zur Verfügung. Voraussetzung für eine Anwendung und spezifische Weiterentwicklung im Sinne und im Rahmen der Fachaufsicht wäre ein fortlaufender und regelmäßiger Abgleich mit den beim Betreiber vorhandenen und im Zusammenhang mit weiteren Untersuchungen zukünftig erlangten Kenntnisstand, sowie mit den betreiberseitig vorgelegten Szenarien.

Literaturverzeichnis

- ASSE 2009 Asse GmbH: Risswerk der Schachtanlage Asse II, Remlingen, Stand 2009
- ASSE 2010 ASSE-GmbH: Notfallplanung zur Minimierung der Konsequenzen eines auslegungsüberschreitenden Lösungszutritts (Kurztitel: Notfallplanung zur Konsequenzenminimierung), 23.02.2010
- AVV 2012 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung (Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen) vom 28.08.2012 (BAnz AT 05.09.2012 B1)
- BglBB 2010 Bundesamt für Strahlenschutz: Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen - Bergbau), BfS-SW-07/10, Salzgitter, März 2010
- BS 2014 Brenk Systemplanung: Berechnung von Quelltermen für den zeitlichen Verlauf der Freisetzung von Radionukliden aus dem Grubengebäude der Schachtanlage Asse II – Teilschritt 1 -; Aachen, 23.09.2014
- BS 2015 Brenk Systemplanung: Berechnung von Quelltermen für den zeitlichen Verlauf der Freisetzung von Radionukliden aus dem Grubengebäude der Schachtanlage Asse II – Teilschritt 2 -; Aachen, 22.07.2015
- Col 2006 Colenco Power Engineering AG: Hydrogeologische Modellvorstellungen. Bericht 4956/07. Revision 3. Unter Mitarbeit von W Klemenz, J M Lavanchy, G Resele und A Poller; Baden/Schweiz 2006
- ERC 2004 ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft und TU Clausthal, Institut für Geologie: Zusammenfassung der geologischen Grundlagen für die Langzeitsicherheitsbewertung der Schachtanlage Asse II; Erfurt, 2004
- GRS 2009 Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Abschätzung potenzieller Strahlenexposition in der Umgebung der Schachtanlage Asse II infolge auslegungsüberschreitender Zutrittsraten der Deckgebirgslösung während der Betriebsphase, GRS – A – 3468, 21.04.2009
- GRS 2010 Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Schachtanlage Asse: Stellungnahme zur Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen der Notfallplanung, GRS-A-3520, Auftrags-Nr.: 550800, Rev. 02, April 2010
- GRS et. al. 2011 GRS, AFC, NRG: Schachtanlage Asse, Modellierung der Fluidbewegung und des Radionuklidtransports, Datensatz und Strukturmodell; Braunschweig, Baden (CH), Petten (NL), März 2011

- GSF 2004 GS- Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit - Forschungsbergwerk Asse: Bestimmung des Inventars an chemischen und chemotoxischen Stoffen in den eingelagerten radioaktiven Abfällen der Schachanlage Asse - Abschlussbericht, März 2004
- IELF 2011 Technische Universität Clausthal – Institut für Endlagerforschung: Prüfung einer längerfristigen Offenhaltung der Asse unter dem Aspekt möglicher Konsequenzen eines auslegungsüberschreitenden Lösungszutritts während des Offenhaltungsbetriebes - Chemische Reaktionen von Festkörpern und Lösungen in der Schachanlage Asse II; Clausthal-Zellerfeld, 09.05.2011
- IFAD 2011a Technische Universität Clausthal – Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik: Abschlussbericht / Teil 1: Risikobetrachtung für eine längerfristige Offenhaltung der Asse, Teil Gebirgsmechanische Untersuchungen – Erste gebirgsmechanische Impressionen zum längerfristigen Tragverhalten; Clausthal-Zellerfeld, Mai 2011
- IFAD 2011b Technische Universität Clausthal – Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik: Abschlussbericht / Ergänzung: Risikobetrachtung für eine längerfristige Offenhaltung der Asse, Teil Gebirgsmechanische Untersuchungen – Zur Konvergenz des Grubengebäudes im Fall eines unbeherrschten Lösungszutritts –; Clausthal-Zellerfeld, Juli 2011
- IFAD 2014 Dyogtyev O., Lerche S., Lux K.-H.: Technischer Bericht – Ergebnisse numerischer Untersuchungen zum Konvergenzverhalten des hypothetisch abgesoffenen Grubengebäudes Schachanlage ASSE II; Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der Technischen Universität Clausthal, Clausthal, August 2014
- IFAD 2015 Technische Universität Clausthal – Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik: Abschlussbericht / Teilprojekt 3: Risikobetrachtung für eine längerfristige Offenhaltung der Asse, Teilbereich Gebirgsmechanische Untersuchungen – Erweiterte gebirgsmechanische Untersuchungen zum längerfristigen Tragverhalten im Hinblick auf die Verbesserung der Prognosezuverlässigkeit -; Clausthal-Zellerfeld, Dezember 2015
- IFG 2006 Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachanlage Asse in der Betriebsphase. Bericht im Rahmen der LVB II des Rahmenvertrages „Gebirgsmechanische Modellierung“, Revision 02 vom 06.10.2006.
- INE 2010 Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für nukleare Entsorgung (INE): Zusammenstellung von Daten zur wissenschaftlich belastbaren Abschätzung potentieller Strahlenexpositionen für die Berechnungen des Öko-Instituts, Karlsruhe 2010

- INE 2012 Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für nukleare Entsorgung (INE): Abschätzung von Sorptionskoeffizienten im Deckgebirge der Schachanlage Asse II. Ableitung von oberen und unteren Grenzwerten der Sorptionskoeffizienten für nicht untersuchte Nuklide. Unter Mitarbeit von B. Kienzler, T. Kupcik, J. Lützenkirchen, V. Metz und T. Schäfer.
- NRG et al. 2005 NRG, COLENCO, GRS: Projekt Langzeitsicherheit Asse Transportmodellierung Fluid- und Radionuklidtransport am Standort Asse, Petten, 27.07.2005
- ÖKO 2012 Öko-Institut e.V.: Modellierung des Transports von Radionukliden durch Gesteinsschichten und der resultierenden Strahlenexposition von Referenzpersonen - Berechnungen mit Parametern der Asse II Bericht im Rahmen des Vorhabens UM09A03205; Darmstadt, 21.5.2012
- ÖKO 2013a Vorhaben UM09A03205: Tätigkeiten des Öko-Instituts im Zusammenhang mit der Unterstützung des BMU bei der Aufsicht über Betrieb und Stilllegung der Asse – Abschlussbericht-, Berichtszeitraum September 2009 bis Dezember 2012; Darmstadt, 26.07.2013
- ÖKO 2013b Öko-Institut e.V.: Wirkung von Einzelmaßnahmen der Notfallplanung der Schachanlage Asse II hinsichtlich der Strahlenexposition der Bevölkerung bei auslegungsüberschreitendem Lösungszutritt;- Bericht im Rahmen des Vorhabens UM13A03505, Darmstadt, 30.10.2013
- ÖKO 2014 Öko-Institut e.V.: Projektgruppe Asse: Beratungsleistungen für BMUB bei der Aufsicht über Betrieb und Stilllegung der Schachanlage Asse II – Vorhaben UM13A03505, Sachstandsbericht für den Zeitraum: Februar bis Dezember 2013, Darmstadt, 31.03.2014
- ÖKO 2015a Öko-Institut e.V.: Projektgruppe Asse: Beratungsleistungen für BMUB bei der Aufsicht über Betrieb und Stilllegung der Schachanlage Asse II – Vorhaben UM13A03505, Sachstandsbericht für den Zeitraum: Januar bis Dezember 2014, Darmstadt, 31.03.2015
- ÖKO 2015b Öko-Institut e.V.: Methodik zur Bewertung der Strahlenexposition im Rahmen der Konsequenzenanalyse für die Schachanlage Asse II; Darmstadt; Abschlussbericht zum Themenfeld Radioökologie im Rahmen des Vorhabens UM13A03505, Darmstadt, 28.01.2016
- SSK 2013 Strahlenschutzkommission: Ermittlung der Strahlenexposition, Empfehlung der Strahlenschutzkommission (Verabschiedet in der 263. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 12. September 2013).

TÜV 2013 TÜV Süd Industrie Service GmbH: Schachtanlage Asse II; Bericht zur Überprüfung des Abfallinventars; 3. Einzelbeauftragung: Überprüfung der sonstigen Abfalldaten Bericht ETS4-43/2011 Rev. 1, November 2013