


Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

Verfahrensunterlage


Titel: Numerische Untersuchungen zum Konvergenzverhalten eines Einzelhohlraumes
Autor: DBE
Erscheinungsjahr: 2001a
Unterlagen-Nr.: P 101
Revision: 00
Unterlagenteil:



Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Inhaltsverzeichnis


	Blatt
Verzeichnis der Abbildungen	5
Verzeichnis der Tabellen	8
Zusammenfassung	9
1 Einleitung und Zielsetzung	11
2 Konvergenz und ihre zeitliche Ableitung	12
2.1 Ermittlung der Konvergenz und der Konvergenzrate für die Langzeitsicherheitsanalyse	13
2.2 Programmsystem	14
2.3 Geometrische Größen	14
2.3.1 Konvergenzmaße	14
2.3.2 Porosität	16
3 Materialverhalten	18
3.1 Stoffgesetze	18
3.1.1 Allgemeine Beschreibung	18
3.1.2 Elastisches Stoffgesetz	18
3.1.3 Viskoplastische Stoffgesetze	19
3.2 Grenz- und Versagensbedingungen	21
3.3 Feuchtekriechen	22
4 Modellbeschreibung	25
4.1 Referenzsystem	25
4.2 Berechnungsvarianten	27
4.2.1 Stoffgesetz	27
4.2.2 Querschnittsform	29
4.2.3 Geometrische Einbettung	31
4.2.4 Verfüllung	32
4.3 Zusammenfassung der Berechnungsbeispiele	34
5 Ergebnisse	35
5.1 Stoffgesetzanpassung des Modells CWIPP für Salzgrus	35
5.2 Ergebnisse zur Hohlraumkonvergenz	36
5.2.1 Referenzsystem	37
5.2.2 Stoffgesetz des Wirtsgesteins	44

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Numerische Untersuchungen zum Konvergenzverhalten eines Einzelhohlraumes


Blatt 4

5.2.3	Querschnitt	47
5.2.4	Geometrische Einbettung	50
5.2.5	Verfüllung	55
5.3	Zusammenfassende Bewertung der Berechnungsergebnisse	68
6	Verwendete Unterlagen	71
7	Glossar	73
Verzeichnis der Anlagen		
	Anhang 1	79
	Anhang 2	81
Blattanzahl der Unterlage		
		81

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Verzeichnis der Abbildungen

	Blatt
Abbildung 1: Laugeneinfluss auf das Kompaktionsverhalten von Salzgrus in einer Oedometerzelle /13/	23
Abbildung 2: Verteilung des Vorfaktors α zu einzelnen Zonen im konturnahen Bereich bei einem Einflussbereich von 2 m und Vorfaktoren für das Feuchtekriechen zwischen 5 und 20	28
Abbildung 3: Verteilung des Vorfaktors α zu einzelnen Zonen im konturnahen Bereich bei einem Einflussbereich von 2 m und Vorfaktoren für das Feuchtekriechen zwischen 4 und 85	28
Abbildung 4: Verteilung des Vorfaktors α zu einzelnen Zonen im konturnahen Bereich bei einem Einflussbereich von 0,6 m und Vorfaktoren für das Feuchtekriechen zwischen 5 und 20	29
Abbildung 5: Geometrie der Abbaue zum Anfangszeitpunkt bei variiertem Höhen-Seitenverhältnis	30
Abbildung 6: Ausgangsdaten zur Parameteridentifikation und Simulation eines Oedometertests mit trockenem und feuchtem Salzgrus	36
Abbildung 7: Streckengeometrie zum Zeitpunkt der Auffahrung und für die Zeitpunkte 1.000 a, 10.000 a und 100.000 a nach der Auffahrung	37
Abbildung 8: Verschiebung von Firste, Sohle und Stoß über die Zeit im Referenzfall	38
Abbildung 9: Relative Streckenkonvergenz (Stauchung) und materielle Flächenkonvergenz im Referenzfall	39
Abbildung 10: Konvergenz in Abhängigkeit der unterschiedlichen Bezugssysteme für das Referenzsystem	40
Abbildung 11: Konvergenzrate in Abhängigkeit der unterschiedlichen Bezugssysteme für das Referenzsystem	41
Abbildung 12: Ausnutzungsgrad auf der Basis des BGR-Dilatanzkriteriums zum Zeitpunkt 5000 a nach Hohlraumauffahrung	44

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Numerische Untersuchungen zum Konvergenzverhalten eines Einzelhohlraumes

Blatt 6

Abbildung 13:	Materielle Konvergenz bei unterschiedlichen Vorfaktoren des Stoffgesetzes von Steinsalz	45
Abbildung 14:	Logarithmische Konvergenzrate bei unterschiedlichen Vorfaktoren des Stoffgesetzes von Steinsalz	45
Abbildung 15:	Materielle Konvergenz unter Einwirkung des Feuchtekriechens im Steinsalz	46
Abbildung 16:	Materielle Konvergenz für unterschiedlich dimensionierte Abbaue	48
Abbildung 17:	Logarithmische Konvergenzrate für unterschiedlich dimensionierte Abbaue	48
Abbildung 18:	Materielle Konvergenz in Abhängigkeit der Geometrieform	49
Abbildung 19:	Logarithmische Konvergenzrate in Abhängigkeit der Geometrieform	50
Abbildung 20:	Materielle Konvergenz in Abhängigkeit von der Teufe	51
Abbildung 21:	Logarithmische Konvergenzrate in Abhängigkeit von der Teufe	51
Abbildung 22:	Materielle Konvergenz in Abhängigkeit eines einseitig seitlich nahen Randes	52
Abbildung 23:	Logarithmische Konvergenzrate für ausgewählte Variationen der Randbedingungen	53
Abbildung 24:	Materielle Konvergenz in Abhängigkeit des Streckenabstandes zum unteren Berechnungsrand	53
Abbildung 25:	Materielle Konvergenz in Abhängigkeit des Streckenabstandes zu einem seitlichen und zum unteren Berechnungsrand	54
Abbildung 26:	Materielle Konvergenz in Abhängigkeit des Versatzmaterials bei Vollverfüllung	56
Abbildung 27:	Logarithmische Konvergenzrate in Abhängigkeit des Versatzmaterials bei Vollverfüllung	56
Abbildung 28:	Materielle Konvergenz der Referenzstrecke und Kompaktion des Salzgrusanteils bei unterschiedlicher Verfüllung mit Salzgrus	58




Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Abbildung 29:	Logarithmische Konvergenzrate des Salzgrusanteils bei Verfüllung mit Salzgrus	58
Abbildung 30:	Materielle Konvergenz des Porenraums bei Verfüllung mit Salzgrus	60
Abbildung 31:	Logarithmische Konvergenzrate des Porenraums bei Verfüllung mit Salzgrus	60
Abbildung 32:	Einfluss des Höhen-Seitenverhältnisses des Resthohlraumes bei unterschiedlichem Versatzmaterial auf die stationäre Konvergenzrate des offenen Hohlraumes	63
Abbildung 33:	Materielle Konvergenz des Resthohlraumvolumens bei einer Teilverfüllung mit 95 % für unterschiedliche Versatzmaterialien	64
Abbildung 34:	Zeitabhängiger Verlauf des relativen Volumenstroms aus teilverfüllten Hohlräumen bei Salzbeton als Versatzmaterial	66
Abbildung 35:	Materielle Konvergenz in Abhängigkeit unterschiedlicher hydraulischer Drücke nach Flutung	67
Abbildung 36:	Logarithmische Konvergenzrate in Abhängigkeit unterschiedlicher hydraulischer Drücke nach Flutung	67
Abbildung 37:	Vergleich der logarithmischen Konvergenzrate ausgewählter leerer Abbaue auf der 5a-Sohle Bartensleben	69

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Verzeichnis der Tabellen

	Blatt
Tabelle 1: Maße der Volumenkonvergenz und der Volumenkonvergenzrate in Abhängigkeit der mathematischen Beschreibung	15
Tabelle 2: Verwendete Stoffgesetze	18
Tabelle 3: Kennwerte der rein elastischen Versatzmaterialien	19
Tabelle 4: Materialparameter der viskoplastischen Stoffgesetze	20
Tabelle 5: Porosität im Salzgrus zu ausgewählten Zeitpunkten	57
Tabelle 6: Höhen-Seitenverhältnis bei den Querschnittvariationen gemäß Kapitel 5.2.3 und den Varianten der Teilverfüllung zusammen mit dem jeweiligen Versatzmaterial	62
Tabelle 7: Einfluss des Verfüllgrades auf den Konvergenzprozess bei Teilverfüllung mit Salzbeton	65

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Stichworte:

Langzeitsicherheitsanalyse, Parameterstudie, Einzelhohlraum, große Verzerrungen, Konvergenz, Konvergenzrate, Porosität, Kompaktion, Dilatanzkriterium, Kriechen, Feuchte kriechen, Hohlraumgeometrie, Hohlraumeinbettung, Materialvarianten, Versatzmaterial, Salzgrus, Salzbeton, Verfüllgrad, Lauge, Flutungszustand

Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit der Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) wird ein Nachweis der Langzeitsicherheit geführt, in dem gezeigt wird, dass der Schutz der Biosphäre vor den schädlichen Auswirkungen der radioaktiven Stoffe gewährleistet ist.


Für die Langzeitsicherheitsanalyse wird das Szenario betrachtet, dass in das ERAM große Mengen an Salzlösungen zutreten. Durch diesen Zutritt füllt sich das ERAM in einer Zeitspanne mit Salzlösung, die kurz ist im Vergleich zu der in der Langzeitsicherheitsanalyse zu betrachtenden Zeitspanne. Es wird davon ausgegangen, dass die zugetretene Salzlösung durch Radionuklide kontaminiert, durch Hohlraumkonvergenz und Gasbildung aus dem Endlager ausgepresst wird und in die Grundwasserleiter übergeht.

Da die Konvergenz bzw. Konvergenzrate der Hohlräume eine Eingangsgröße für die Langzeitsicherheitsanalyse ist, kommt ihrer Ermittlung eine wesentliche Bedeutung zu, wobei im Hinblick auf die langen zu betrachtenden Zeiträume die großen Deformationen der Hohlräume zu berücksichtigen sind. Zur Ermittlung der Konvergenz und Konvergenzrate wurde eine Parameterstudie an Hand von Einzelhohlräumen in Homogenbereichen aus Steinsalz durchgeführt, wobei die gewählten Parameter an die Bedingungen des ERAM angepasst wurden.

Es wurden Prognoseberechnungen zur Ermittlung der Konvergenz und Konvergenzrate durchgeführt, die einen mathematischen Ansatz zur Berücksichtigung großer Deformationen beinhalten. Ausgehend von dem Referenzfall einer Einzelstrecke im Steinsalz wurden zusätzlich zum Referenzfall verschiedene Varianten betrachtet. Eine Übersicht über die Berechnungsfälle ist nachstehend gegeben:

Referenzmodell:

Freie Konvergenz einer Einzelstrecke mit definierter Querschnittsgeometrie und Teufenlage im Steinsalz mit hoher Kriechfähigkeit auf der Basis einer geometrisch nichtlinearen Beschreibung zur Berücksichtigung großer Deformationen

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	


Varianten:

- 5 Variationen des Stoffgesetzes
- 5 Variationen der Querschnittform
- 13 Variationen zur geometrischen Einbettung
- 14 Variationen zur Verfüllung
- 3 Variationen zur Füllung mit Salzlösung

Die für den Referenzfall und die Berechnungsvarianten rechnerisch ermittelten Konvergenzraten weisen eine große Bandbreite auf, z. B. eine stationäre Konvergenzrate zwischen $8,3 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ und $2,9 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$. Dementsprechend kann für die Langzeitsicherheitsanalyse kein exakt ermittelter, einheitlicher Wert für die anzusetzende Konvergenzrate benannt werden, der gleichermaßen für alle Hohlräume angesetzt werden kann.

Werden jedoch bei großräumigen Betrachtungen die aus der Konvergenzrate resultierenden Volumenströme in Folge einer großen Zahl unterschiedlicher Hohlräume summiert, zeigt sich, dass der in der Langzeitsicherheitsanalyse bisher angesetzte Wert für die stationäre Konvergenzrate von $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ in Abgleich mit den hier durchgeführten Parametervariationen eine realistische Approximation darstellt. Dies gilt im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse des ERAM für die Durchmischungsvolumina von Feldesteilen, die aus einer Vielzahl von Hohlräumen bestehen. Für die Einlagerungshohlräume empfiehlt sich jedoch, die Konvergenzrate genauer zu ermitteln, da das Auspressen kontaminierter Salzlauge aus den Einlagerungsbereichen die Voraussetzung für den Nuklidtransport bis hin zu den Grundwasserleitern darstellt.

Abschließend soll nochmals deutlich darauf hingewiesen werden, dass es sich bei der vorliegenden Untersuchung um eine Parameterstudie an Hand von Einzelhohlräumen handelt. Eine gegenseitige Beeinflussung von Hohlräumen im Hinblick auf die Konvergenz und die Konvergenzrate, wie sie am Standort Morsleben in der Realität vorliegt, wurde in der vorliegenden Parametervariation nicht betrachtet.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

1 Einleitung und Zielsetzung

Vom Bundesamt für Strahlenschutz werden zur Zeit die erforderlichen Maßnahmen für die Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) geplant. Bestandteil der Planunterlagen zur Stilllegung des ERAM ist eine Langzeitsicherheitsanalyse, mit der der Nachweis erbracht wird, dass es zu keiner Freisetzung von Radionukliden kommt, die über dem Wert des § 45 Abs. 1 StrlSchV liegt. Für den Fall, dass sich die derzeitig vorhandenen Laugenzutrittsmengen in das ERAM nicht erhöhen, verbleibt das ERAM für einen sehr langen Zeitraum in einem Zustand, in dem es zu keiner Freisetzung von Radionukliden kommt und damit die Langzeitsicherheit automatisch gegeben ist. Hingegen werden für die Langzeitsicherheitsanalyse höhere Zutrittsmengen unterstellt /1/. Bei Ansatz eines solchen Szenarios ist das ERAM innerhalb weniger hundert Jahre mit Lauge gefüllt, d. h. dass es in einem Zeitraum gefüllt ist, der klein gegenüber Zeiträumen ist, die in der Langzeitsicherheitsanalyse betrachtet werden.

Der Prozess der Freisetzung von Radionukliden lässt sich in nachstehende Schritte gliedern:

- Herauslösen von Radionukliden aus den Abfällen und Übergang der Radionuklide in die in dem Endlager vorhandene Salzlösung
- Auspressen der kontaminierten Salzlösung aus dem Endlager in Folge von Gebirgskonvergenz und Gasbildung
- Übergang der kontaminierten Salzlösung in die Grundwasserleiter

Die Transportgeschwindigkeit der Schadstoffe hängt u. a. von der Konvergenzrate des Gebirges ab. In diesem Zusammenhang kommt der korrekten Ermittlung der Gebirgskonvergenz und -konvergenzrate eine wichtige Bedeutung in der Langzeitsicherheitsanalyse zu. Es ist zu beachten, dass für die in der Langzeitsicherheitsanalyse zu betrachtenden Zeiträume die auftretenden Deformationen der Hohlräume im Salz so groß sind, dass sie bei den Berechnungen im Rahmen einer geometrisch nichtlinearen Theorie berücksichtigt werden müssen. Die Berücksichtigung großer Verzerrungen erfolgte bisher auf der Basis sehr stark vereinfachter Berechnungsmodelle, die zu weitgehend einheitlichen Konvergenzraten für ganze Grubenbereiche führten. In der vorliegenden Unterlage werden auf der Basis genauerer Berechnungsansätze die Einflussfaktoren systematisch untersucht, welche die Konvergenz bzw. Konvergenzrate beeinflussen. Die Untersuchung der Einflussfaktoren und eine Sensitivitätsanalyse erfolgt anhand von Einzelhohlräumen in weit ausgedehnten Homogenbereichen aus Steinsalz, die an die Bedingungen des Standortes Morsleben angepasst sind.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00



2 Konvergenz und ihre zeitliche Ableitung

Werden Konvergenzuntersuchungen im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse durchgeführt, ist zu beachten, dass in diesen langen Zeiträumen große Deformationen im Steinsalz auftreten, d. h. neben großen Verschiebungen und Rotationen treten auch Verzerrungen von mehr als 2 - 3 % auf. Die Beschreibung der Konvergenz bzw. Konvergenzrate für die Langzeitsicherheitsanalyse muss daher große Verzerrungen berücksichtigen. Damit weicht die Definition von Konvergenz und Konvergenzrate, die der Langzeitsicherheitsanalyse zugrunde liegt, von der nachstehend aufgeführten bergmännischen Begriffsdefinition ab.

Im bergmännischen Sinn wird unter Konvergenz das Schließen eines Hohlraumes verstanden. Das Konvergenzverhalten eines Hohlraumes wird markscheiderisch in einzelnen Messquerschnitten bestimmt. Die Messungen erfolgen entlang von definierten Achsen. Als vertikale Konvergenz u_v wird die Summe aus Sohlenhebung u_s und Firstsenkung u_f gezeichnet, $u_v = u_f + u_s$, die horizontale Konvergenz u_h ist die Summe der nach innen gerichteten Wanderung der beiden seitlichen Stöße $u_{st1,2}$. Horizontale und vertikale Konvergenz sind daher mit der Einheit Länge behaftet. Ein Wert der Konvergenz von 0 wird markscheiderisch dem Zeitpunkt der Nullmessung zugeordnet, d. h. er hängt vom Zeitpunkt der Nullmessung ab. Als horizontale bzw. vertikale Konvergenzrate ergibt sich die Geschwindigkeit, mit der sich Sohle und Firste bzw. die beiden seitlichen Stöße aufeinander zu bewegen.

Im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse wird von einem modifizierten Begriff der Konvergenz bzw. Konvergenzrate ausgegangen. Zum einen wird die Konvergenz bzw. Konvergenzrate auf das Hohlraumvolumen bezogen bzw. bei Ansatz von sehr langen Hohlräumen wie Strecken ersatzweise auch auf die Querschnittsfläche des Hohlraums, zum zweiten ist zu beachten, auf welche Bezugsgröße des Hohlraumvolumens bzw. der Querschnittsfläche sich der Wert der Konvergenz bzw. Konvergenzrate bezieht. Da sich bei Betrachtung sehr langer Zeiträume die Geometrie eines Hohlraums im Salz deutlich verändert, die Konvergenz bzw. Konvergenzrate aber eine relative, auf die Geometrie des Hohlraums bezogene Größe darstellt, ist die Festlegung der geometrischen Bezugskonfiguration für die Konvergenz bzw. Konvergenzrate von wesentlicher Bedeutung. Dementsprechend ist die in der Langzeitsicherheitsanalyse benutzte Konvergenz einheitenlos. Die Konvergenzrate wird durch die Differentialgleichung (1)

$$\dot{\kappa}_V = -\frac{\dot{V}}{V} \text{ bzw. } \dot{\kappa}_A = -\frac{\dot{A}}{A} \quad (1)$$


mit

$\dot{\kappa}_V$ bzw. $\dot{\kappa}_A$: Konvergenzrate

\dot{V} bzw. \dot{A} : zeitliche Veränderung des aktuellen Volumens bzw. der aktuellen Fläche

V bzw. A : aktuelles Volumen bzw. aktuelle Fläche

bestimmt, so dass sich ein logarithmischer Zusammenhang $\kappa_V = \ln(V) + \ln(c)$ mit der Konstanten $\ln(c)$, die durch die Anfangsbedingungen bestimmt wird, ergibt.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

2.1 Ermittlung der Konvergenz und der Konvergenzrate für die Langzeitsicherheitsanalyse

Die Konvergenz bzw. Konvergenzrate für die Langzeitsicherheitsanalyse wurde bisher gemäß Gl. (1) ermittelt, wobei die Konvergenzrate $\dot{\kappa}_V$ im Sinne eines verallgemeinerten Spherical Void Models als Funktion

$$\dot{\kappa}_V = \dot{\kappa}_V(p, \eta, T; t) \quad (2)$$

mit

- p : Druck
- η : Porosität eines potentiellen Versatzmaterials
- T : Temperatur
- t : Zeit


beschrieben wird /2/. Das bedeutet jedoch, dass z. B. die Hohlraumform, die gegenseitige Beeinflussung mehrerer Hohlraumräume, Spannungsumlagerungen durch das Kriechen des Salzes sowie heterogene Verfüllungen des Hohlraumes bei der Bestimmung der Konvergenzrate unberücksichtigt bleiben. Die Ursache für die Vereinfachung des Ansatzes lag in den verfügbaren numerischen Rechenprogrammen, die zwar in der Lage waren, die Inhomogenität im Inneren und am Rand des Berechnungsgebietes adäquat abzubilden, jedoch nicht die für die Langzeitsicherheitsanalyse relevanten großen Verzerrungen.

Zwischenzeitlich stehen jedoch geeignete Rechenprogramme zur Modellierung großer Deformationen einschließlich großer Verzerrungen zur Verfügung. Wesentliche zu beachtende Gesichtspunkte bei der mathematischen Modellierung großer Verzerrungen sind

- die Wahl eines Bezugssystems, in dem alle Größen dargestellt werden
- die Wahl eines materiell objektiven Spannungsflusses, d. h. eines nicht vom Beobachter abhängigen Maßes für die Spannungsänderung
- ein dem Bezugssystem zugeordnetes Verzerrungsmaß
- die Formulierung der konstitutiven Gleichungen in Bezug auf das gewählte Bezugssystem.

In der Mechanik wird ein Wert, der sich auf den Ausgangszustand bezieht, als materiell bezeichnet, während er bei Bezug auf den aktuellen Zustand als räumlich bezeichnet wird. Darüber hinaus gibt es noch das logarithmische oder auch natürliche Maß. Die zugehörigen mathematischen und kontinuumsmechanischen Grundlagen sind z. B. in /3/, /4/ und /5/ detailliert beschrieben. Deshalb wird auf sie an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

Wie bereits aufgeführt, sind Konvergenz und Konvergenzrate relative Größen, die von der Wahl der Bezugsgeometrie, d. h. dem Bezugssystem, abhängen. Insofern ist die Wahl eines geeigneten Bezugssystems von wesentlicher Bedeutung, wozu im ersten Schritt geprüft werden

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

muss, welches Bezugssystem dem verwendeten Programmsystem für die Berechnungen zu Grunde liegt.

2.2 Programmsystem

Die im folgenden beschriebenen Berechnungen wurden mit dem Programm FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) /6/ durchgeführt. Es ist ein Programm auf der Basis der Finite Differenzen Methode (FDM), mit dem thermomechanische Strukturberechnungen durchgeführt werden können. FLAC verwendet ein explizites Integrationsschema, entsprechend groß ist die erforderliche Anzahl an Zeitschritten. Liegt ein stark nichtlineares Systemverhalten vor, wie es aus einem inelastischen Materialverhalten oder dem Auftreten von Kontakt resultiert, werden die Zeitschritte zwangsläufig kleiner. Im Hinblick auf die Diskretisierung und das resultierende Gleichungssystem ergeben sich zwischen der Finite Elemente Methode (FEM) und der FDM keine Unterschiede, falls bei der FEM ein Elementansatz mit linearer Verschiebungsfunktion gewählt wird.

Als Bezugssystem für die physikalischen Größen dient im Rechenprogramm FLAC passend zu einem inkrementellen Verfahren die Momentankonfiguration. So sind die ausgewiesenen Spannungen Cauchy-Spannungen und die Stoffgesetze sind ebenso wie die Verzerrungsgeschwindigkeiten in Bezug auf die Momentankonfiguration formuliert. Lediglich das ausgegebene Feld der Gesamtverschiebungen wird als Feld der Differenzvektoren zwischen den Knoten der Ausgangs- und der Momentkonfiguration dargestellt.

2.3 Geometrische Größen

2.3.1 Konvergenzmaße

Volumetrische Verzerrungsmaße stellen einen Spezialfall der allgemeinen Verzerrungsmaße dar und spielen bei der Beschreibung von Konvergenz- und Kompaktionsprozessen eine entscheidende Rolle, da die in den Langzeitsicherheitsanalysen verwendeten Werte für die Konvergenz und die Konvergenzrate in Abhängigkeit der gewählten mathematischen Beschreibung im Rechenprogramm unterschiedliche Zahlenwerte annehmen.

Unter Verwendung der Jacobi-Determinanten J als Determinante des materiellen Deformationsgradienten \underline{E} ergeben sich in Abhängigkeit der mathematischen Beschreibung die in Tabelle 1 aufgeführten Werte für die Konvergenz und die Konvergenzrate bei einer Beschreibung in volumenbezogenen Größen. Im Hinblick auf die numerische Beschreibung eines Kompaktionsverhaltens ist es notwendig, ein geeignetes Verzerrungsmaß in Zusammenhang mit einem Maß für die aus der Kompaktion resultierenden Spannungen zu stellen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00



	Konvergenz	Konvergenzrate
materiell	$K_V = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_0 - V}{V_0} = 1 - J$	$\dot{K}_V = -\frac{\dot{V}}{V_0} = -\dot{J}$
räumlich	$k_V = \frac{\Delta V}{V} = \frac{V_0 - V}{V} = \frac{1}{J} - 1$ $k_V = \frac{K_V}{J}$	$\dot{k}_V = -\frac{V_0}{V^2} \dot{V} = -\frac{\dot{J}}{J^2}$ $\dot{k}_V = \frac{\dot{K}_V}{J^2}$
logarithmisch	$\kappa_V = \ln(V_0) - \ln(V) = -\ln(J)$ $\kappa_V = -\ln(1 - K_V)$	$\dot{\kappa}_V = -\frac{\dot{V}}{V} = -\frac{\dot{J}}{J}$ $\dot{\kappa}_V = \frac{\dot{K}_V}{J}$

Tabelle 1: Maße der Volumenkonvergenz und der Volumenkonvergenzrate in Abhängigkeit der mathematischen Beschreibung

Im Rahmen einer Theorie kleiner Verzerrungen lassen sich die Volumenänderungen näherungsweise durch

$$\epsilon^{vol} = \epsilon_{ii} \approx \frac{V - V_0}{V_0} \tag{3}$$

mit

- V : aktuelles Volumen
- V₀ : Anfangsvolumen

beschreiben. Im Fall großer Verzerrungen ist ein solcher Ansatz nicht mehr korrekt. Es gilt

$$E^{vol} = \frac{V - V_0}{V_0} = \det \underline{\underline{F}} - 1 = J - 1, \tag{4}$$

als materielles Maß für die Volumenverzerrung.

Dieses materielle Maß für die Volumenverzerrung ist von Bedeutung, da sich die Porosität lokal als eine geometrische Größe interpretieren lässt und die Anfangsporosität eines Stoffes, z. B. eines Versatzstoffes in der Regel bekannt ist.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	DBE
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

2.3.2 Porosität

Werden Kompaktionsprozesse betrachtet, spielt die Porosität η des Versatzmaterials eine wesentliche Rolle. Ein poröses Material verfügt neben seinem Feststoffanteil über ein Leervolumen, den Porenraum.

$$\eta = \frac{V_P}{V} = \frac{V - V_M}{V} \quad (5)$$

mit

V_P : Porenvolumen

V_M : Feststoffvolumen

Eine im folgenden wesentliche Annahme ist die eines konstanten Feststoffvolumens, d. h. die auftretende Volumenänderung erfolgt vollständig im Porenraum. Geht die Porositätsänderung im realen Material mit einer Laständerung einher, ergibt sich aus dem elastischen Verhalten des Korngerüsts eine Volumenänderung. Diese Änderung wird als vernachlässigbar klein angesehen. Im technischen Sinne ist die Porosität eine geometrische Größe. Sie wird auf der Grundlage der bekannten Anfangsporosität η_0 zusammen mit einem geeigneten Verzerrungsmaß bestimmt. Aus Sicht der verwendeten Stoffgesetze ist die Porosität jedoch nur eine interne Variable, so dass deren Definition im Stoffgesetz nicht zwangsläufig der technischen Definition entsprechen muss. Falls eine abweichende Definitionen verwendet wird, muss jedoch mit Rahmen der zu Grunde gelegten Theorie die korrekte Umrechnung zwischen diesen beiden Größen gewährleistet sein.

Die Entwicklung des Volumens wird durch die relative Volumenänderung E^{vol} als Änderung zwischen Ausgangs- und der Momentankonfiguration in Bezug auf das Anfangsvolumen V_0 beschrieben. Es gilt nachstehender Zusammenhang zwischen Volumenänderung und Porosität


$$E^{vol} = \frac{V - V_0}{V_0} = - \frac{\eta_0 - \eta}{1 - \eta} \quad (6)$$

bzw. nach η aufgelöst

$$\eta = \frac{\eta_0 + E^{vol}}{1 + E^{vol}}$$


In einer vollständig linearisierten Theorie werden alle geometrischen Größen auf die Ausgangskonfiguration bezogen. Entsprechend ergibt sich die linearisierte Porosität η_{lin} zu

$$\eta_{lin} = \frac{V - V_M}{V_0} \approx \eta_0 + \varepsilon^{vol} \quad (7)$$

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Wird in Gleichung (6) an Stelle der relativen Volumenänderung E^{vol} deren linearisierte Form ε^{vol} entsprechend Gleichung (3) verwendet, ergibt sich eine im Hinblick auf das Bezugssystem gemischte Basis. Nur bei speziellen Verzerrungszuständen lässt sich auf diese Weise die physikalisch richtige Porosität bestimmen.

ERA
Morsleben

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

3 Materialverhalten

3.1 Stoffgesetze

3.1.1 Allgemeine Beschreibung

Im Rahmen der im folgenden beschriebenen Berechnungen werden eine Reihe unterschiedlicher Versatzmaterialien vorausgesetzt. Ihr jeweiliges Materialverhalten wird durch unterschiedliche, in Tabelle 2 genannte Stoffgesetze beschrieben.


Anwendung	Material	Materialverhalten	Stoffgesetzbezeichnung
Wirtsgestein	Steinsalz	elastisch-viskoplastisch	BGRa bzw. WIPP
Versatzmaterial	korrodierter und nicht korrodierter Salzbeton	elastisch	Hooke
Altversatz	Salzgrus, -puder, Mischungen mit porösem Material	porös elastisch-viskoplastisch	CWIPP

Tabelle 2: Verwendete Stoffgesetze

Die Grundlage für die Kinematik bildet der additive Splitt des räumlichen Verzerrungsgeschwindigkeitstensors in einen elastischen und einen nichtelastischen Anteil. Durch den inkrementellen Ansatz der Verzerrungsgeschwindigkeit ist es möglich, sowohl große Verschiebungen als auch große Verzerrungen und Rotationen zuzulassen. Des weiteren lässt sich die räumliche Verzerrungsgeschwindigkeit völlig analog zur linearen Theorie behandeln, lediglich das Bezugssystem hat sich auf die Momentankonfiguration verlagert. An die Stelle der bei der linearen Theorie verwendeten Zeitableitung tritt nun die objektive Ableitung.

3.1.2 Elastisches Stoffgesetz

Unabhängig vom Auftreten des inelastischen Anteils erfolgt die Spannungsberechnung in jedem Fall der hier verwendeten Materialien über das rein elastische Verhalten. Sie wird als linearer Zusammenhang von Spannung und elastischer Verzerrung durch das *Hookesche* Gesetz beschrieben. Die Materialparameter des elastischen Verhaltens sind der Kompressionsmodul K und der Schubmodul G . Beide Moduln können auch durch den Elastizitätsmodul E und die Querkontraktion ν beschrieben werden. Diese vier Materialparameter sind bei einem hyperelastischem Verhalten im einfachsten Fall als konstant anzusetzen. Ein empirischer Ansatz für einen sich mit der Porosität verändernden Kompaktions- und Schubmodul ist beim elastischen Stoffgesetz für das poröse Material CWIPP wie folgt gegeben:

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

$$K = K_f e^{-c_K \frac{\eta}{1-\eta_0}}, \quad G = G_f e^{-c_G \frac{\eta}{1-\eta_0}} \quad (8)$$

mit

- K_f, G_f : Kompaktions- und Schubmodul des festen Steinsalzes
- c_K, c_G : Materialparameter

Bei diesem Ansatz beträgt das Verhältnis z. B. des aktuellen Kompressionsmoduls zu dem des festen Steinsalzes zu Beginn (Zeitpunkt t_0) der Kompaktion $\exp(-c_K \cdot \eta_0 / (1-\eta_0))$ und erreicht bei vollständiger Kompaktion den Wert 1. Sind die Materialparameter c_K und c_G identisch, ergibt sich eine von der Porosität unabhängige Querkontraktionszahl, wie sie für unterschiedliche Salzgrusmischungen gefunden wurden /8/.

Für die rein elastisch modellierten Materialien, das sind entsprechend Tabelle 2 einige der Versatzmaterialien, werden die folgenden Materialparameter verwendet, Tabelle 3. Zusätzlich zu den elastischen Materialparametern ist die Dichte der elastischen Versatzmaterialien mit in der Tabelle angegeben.


	Korrodiertes Salzbeton	Salzbeton
Dichte [kg/m³]	1995	1995
E-Modul [GPa]	5,3	20
Querkontraktion [-]	0,27	0,25

Tabelle 3: Kennwerte der rein elastischen Versatzmaterialien

3.1.3 Viskoplastische Stoffgesetze

Bei inelastischem Materialverhalten wird plastisches, d. h. zeitunabhängiges Verhalten als auch zeitabhängiges, viskoplastisches Verhalten unterschieden. Neben dem elastischen Anteil treten viskoplastische Anteile entsprechend Tabelle 2 bei den Stoffgesetzen für Steinsalz und Salzgrus auf.

Das viskoplastische Verhalten von Steinsalz wird auf der Basis einer assoziierten Fließregel mit einem J_2 -Fließpotential in Verbindung mit dem v. Mises Fließkriterium beschrieben. Als Vergleichsspannung dient die v. Mises-Vergleichsspannung. Durch das Fehlen eines rein elastischen Bereiches sowie von Verfestigungsfunktionen führen im Steinsalz bereits kleinste Deviatorspannungen zum Kriechen. Die Kriechintensität als skalarer Faktor wird mit Hilfe eines multiplikativen Splitts in einen temperaturabhängigen Anteil und einen spannungsabhängigen Anteil unterteilt. Der temperaturabhängige Anteil wird durch den Arrhenius-Term mit der Aktivierungsenergie Q als Materialparameter beschrieben und der spannungsabhängige durch den Norton-

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

schen Potenzansatz mit dem Strukturfaktor A und dem Spannungsexponenten n als Materialparameter /9/.


Bei Anwendung der in Tabelle 4 angegebenen Parameter wird das Stoffgesetz für das viskoplastische Verhalten des Steinsalzes als BGRa bezeichnet. Eine Anpassung dieses Stoffgesetzes an unterschiedliche Stratigraphien erfolgt durch einen Vorfaktor α , der in Tabelle 4 den Wert 1 hat.

Bezeichnung	Dimension	1-BGRa /9/	CWIPP, trocken (vgl. Kap. 5.1)	CWIPP, feucht (vgl. Kap. 5.1)
Dichte ρ_f	[kg/m ³]	2.200	2.200	2.200
Anfangsdichte ρ_0	[kg/m ³]	-	1.517	1.517
Elastizität:				
Elastizitätsmodul E_f	[GPa]	25	25	25
Anfangs- Elastizitätsmodul E_0	[MPa]	-	180	180
Querkontraktion ν	[-]	0,27	0,27	0,27
Viskoplastizität:				
Vorfaktor α	[-]	1	1	1
Strukturfaktor A	[d ⁻¹]	0,18	0,18	0,18
Aktivierungsenergie Q	[kJ/mol]	54	54	54
Spannungsexponent n	[-]	5	5	5
Materialparameter B_0	[kg/m ³ /d ⁻¹]	-	$3,162 \cdot 10^{17}$	$7,427 \cdot 10^{14}$
Materialparameter B_1	[MPa ⁻¹]	-	0,2605	0,1950
Materialparameter B_2	[m ³ / kg]	-	-0,0234	-0,0172

Tabelle 4: Materialparameter der viskoplastischen Stoffgesetze

Zur Beschreibung des Materialverhaltens von Salzgrus existieren eine Reihe unterschiedlicher Stoffgesetze. Im Rahmen eines EU-Forschungsprogramms wurde der Einfluss des Stoffgesetzes bei endlagerrelevanten Zuständen untersucht. Es zeigte sich, dass die unterschiedlichen Stoffgesetze zwar einen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben, die Differenzen sich aber in der gleichen Größenordnung befinden wie die Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen von unterschiedlichen Institutionen mit gleichem Versuchsmaterial, /10/. Darüber hinaus zeigte sich, dass ein rein hydrostatisches Stoffgesetz prinzipiell in der Lage ist, das globale Verhalten ähnlich gut abzubilden wie ein aufwendigeres hydrostatisch-deviatorisches Stoffgesetz.

Das elastisch-viskoplastische Verhalten eines porösen Materials wird in FLAC /6/ mit dem Stoffgesetz CWIPP beschrieben. Der inelastische Anteil der Verzerrungsgeschwindigkeiten wird in diesem Stoffgesetz additiv in einen Kompaktionsanteil und einen Scheranteil unterteilt. Der

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Kompaktionsanteil wird sowohl von dem hydrostatischen Spannungszustand als auch von dem deviatorischen Spannungszustand bestimmt. Die Größe des Kompaktionsanteils wird gemäß /9/ durch einen multiplikativen Splitt in einen porositätsabhängigen Anteil und in einen spannungsabhängigen Anteil geteilt. Um zusätzlich noch einen temperaturabhängigen Anteil zu integrieren, kann der Materialparameter B_0 als Arrhenius-Funktion interpretiert werden.

$$\varepsilon_{co}^{vol} = \frac{B_0}{\rho_f(1-\eta)} e^{B_2 \rho_f(1-\eta)} (1 - e^{B_1 \sigma_0}) \quad (9)$$

mit

B_{0-2} : Materialparameter

\underline{S} : Spannungsdeviator

ρ_f : Dichte des vollständig kompaktierten Materials

σ_0 : 1. Invariante des Spannungstensors

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} (\sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III})$$

Eine Änderung des Kompaktionsanteils und damit die Anwendung der Gleichung ist auf Druckzustände beschränkt. Gleichung (9) wird nur dann ausgeführt, wenn sich die erste Invariante des Spannungstensors im Druckbereich befinden. Eine weitere Begrenzung in der Anwendung der Gleichung erfolgt durch die Dichte. Wird der Zustand einer vollständigen Kompaktion erreicht, bleibt der Kompaktionsanteil des viskoplastischen Anteils in den folgenden Berechnungsschritten unberücksichtigt. Es verbleibt der isochore Anteil, der in diesem Zustand dem des festen Steinsalzes, Tabelle 4, entspricht. Dieser Schubanteil enthält durch die Verdichtung eine Porositätsabhängigkeit, so dass damit ein kontinuierlicher Übergang zum Verhalten des festen Steinsalzes gegeben ist. Die Parameter des volumetrischen Anteils in Tabelle 4 sind das Ergebnis einer Parameteridentifikation, Kapitel 5.1.

3.2 Grenz- und Versagensbedingungen

Zzt. wird die Standsicherheit eines Grubenbaues mit Hilfe von lokalen Bewertungskriterien auf der Basis des Spannungszustandes beurteilt. Die Kriterien werden als lokal bezeichnet, da sie zwar für alle Punkte des numerischen Modells ausgewertet werden, aber kein Zusammenhang im Bewertungskriterium zwischen den Ergebnissen benachbarter Punkte gezogen wird. Wird das Bewertungskriterium verletzt, kann nur von außen entschieden werden, ob die Verletzung des Kriteriums sicherheitsrelevant ist oder nicht. Im Hinblick auf das Zeitverhalten wird zwischen dem Dilatanzkriterium für das Langzeitverhalten und dem Bruchkriterium für das Kurzzeitverhalten unterschieden. Im Rahmen der vorliegenden Berechnungen wird die Dilatanzbedingung nach BGR /11/ zu Grunde gelegt.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00



$$\sqrt{\frac{J_2}{\hat{\sigma}^2}} \geq 1,053 \left(\frac{\sigma_0}{\hat{\sigma}} \right) - 0,0206 \left(\frac{\sigma_0}{\hat{\sigma}} \right)^2 \quad (10)$$

Wird das Dilatanzkriterium eingehalten, können über der Zeit Deformationen in beliebiger Größe schädigungsfrei auftreten. Wird das Dilatanzkriterium überschritten, kommt es zunächst zu Auflockerungen im Gebirge. Diese Auflockerungen sind Schädigungseffekte, die mit der Zeit zunehmen, sofern das Dilatanzkriterium weiterhin überschritten ist. Da das Dilatanzkriterium lediglich eine zeitunabhängige Grenzbedingung für das Auftreten von Auflockerungen darstellt, lässt sich dementsprechend keine quantitative Aussage über den Zeitpunkt des Auftretens einer Schädigung machen. Je weiter das Dilatanzkriterium überschritten wird, um so kürzer wird der Zeitraum, in dem die Schädigung eintritt. Wird darüber hinaus auch noch das Bruchkriterium als Kriterium für die Kurzzeitfestigkeit überschritten, tritt die Gefügeschädigung unmittelbar ein.

3.3 Feuchtekriechen

Feuchtigkeit hat einen signifikanten Einfluss auf das Kriechverhalten von Salz. Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss bei festem Steinsalz sind in /12/ dargestellt und zudem bei granularem Salz in /13/.

Untersuchungen im Zusammenhang mit Feuchtigkeit am festen Steinsalz bedeuten, den Einfluss des viskosen Verhaltens in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit zu bestimmen. Dazu wurden Versuche unter den folgenden Randbedingungen durchgeführt:

- rel. Luftfeuchtigkeit ϕ : $0 \leq \phi \leq 0,75$
- Temperatur ϑ : $22^\circ C \leq \vartheta \leq 50^\circ C$
- Belastung: ein- und triaxial
- Äußere Druckbeanspruchung

$$\left. \begin{array}{l} 13 \text{ MPa} \leq \sigma_z \leq 20 \text{ MPa} \\ 0,1 \text{ MPa} \leq \sigma_r \leq 15 \text{ MPa} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{einaxiale Belastung} \\ \text{triaxiale Belastung} \end{array}$$

$$\sigma_z - \sigma_r = \left\{ \begin{array}{l} 14 \text{ MPa} \\ 16 \text{ MPa} \end{array} \right.$$

Als Ergebnis ließ sich feststellen, dass sich eine gegenüber dem trockenen Zustand geänderte Luftfeuchtigkeit signifikant auswirkt. Es wurde eine Erhöhung der Kriechintensität bis um den Faktor 55 bei Versuchen in der Oedometerzelle festgestellt und bis zum Faktor 30 bei Versuchen in der Triax-Zelle. Ferner wurde festgestellt, dass eine Änderung der Zustandsgrößen Druck bzw. Feuchtigkeit unmittelbar zu einer sich ändernden Kriechintensität führte. Damit sich Feuchtigkeit im Kristallgefüge anlagern kann, muss die Möglichkeit eines Eindringens in das Salzgestein gegeben sein. Beim Feuchtekriechen des Steinsalzes handelt es sich daher um ein

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
9M	22341011					GH	BY	0004	00

konturnahes Problem, das eine dilatante Zone voraussetzt, in die Feuchtigkeit eindringen kann. In den Laborversuchen wurde gezeigt, dass die maximale Hauptspannung einen Druck von 3 MPa nicht überschreiten durfte, da sonst vorhandene Mikro- oder Makrorisse überdrückt wurden und Feuchtigkeit nicht in das Material eindringen konnte.

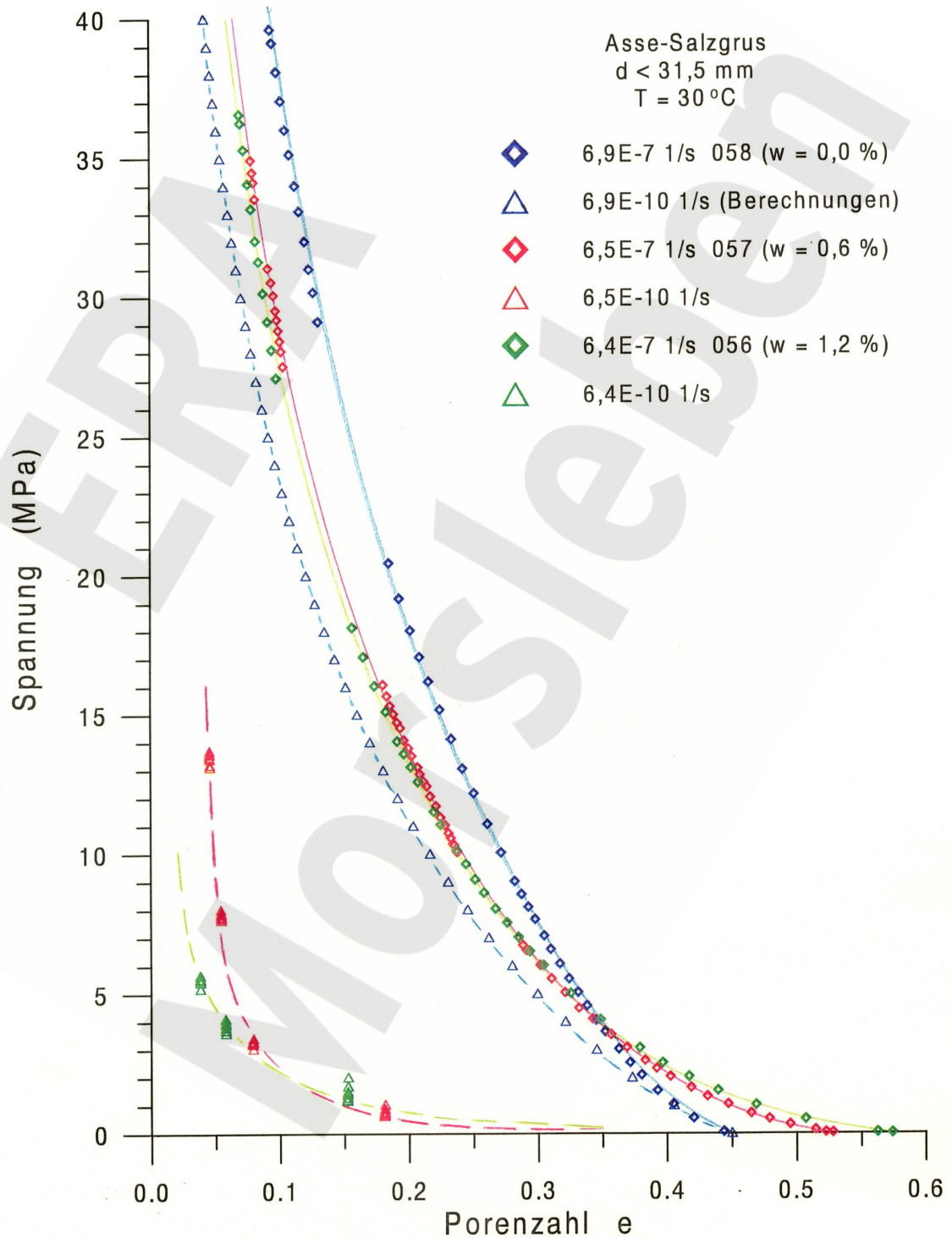



Abbildung 1: Laugeneinfluss auf das Kompaktionsverhalten von Salzgrus in einer Oedometerzelle /13/

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Der Einfluss der Feuchtigkeit besteht selbstverständlich auch beim granularen Salz. Da hier die Porosität eine Materialeigenschaft darstellt, die als innere Variable behandelt wird, wurde das Versuchsmaterial bereits vor Beginn der experimentellen Untersuchungen durch Mischung mit gesättigter Lauge präpariert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Beimischung von gesättigter Lauge einen signifikanten Einfluss auf das Kriechverhalten gegenüber dem des trockenen Materials hat, Abbildung 1. Innerhalb der Ergebnisse mit Feuchtigkeitsbeimischung ergeben sich bei den hier zugefügten Mengen jedoch keine signifikanten Unterschiede.

ERA
Morsleben

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00



4 Modellbeschreibung


Das Konvergenzverhalten eines einzelnen Hohlraumes wird durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst. Im Rahmen der vorliegenden Parameterstudie werden die Auswirkungen dieser Einflussfaktoren bestimmt. Von einem Referenzsystem ausgehend, wird zunächst immer nur eine Einflussgröße variiert. In einem geringen Umfang werden auch die Ergebnisse von Berechnungen mit gekoppelter Parametervariation dargestellt. Die durchgeführten Berechnungen werden den folgenden Gruppen zugeordnet, im Kontext ihrer Gruppenzuordnung beschrieben und im Anschluss diskutiert:

- Referenzsystem
- Stoffgesetz
- Querschnittform
- Geometrische Einbettung
- Verfüllung

4.1 Referenzsystem

Der Referenzfall beschreibt die Einbettung eines unverfüllten Einzelhohlraumes in einem weiträumig ausgedehnten Homogenbereich. Als Referenzgeometrie wird eine Strecke gewählt, so dass die Berechnungen auf der Basis einer zweidimensionalen Geometrie durchgeführt werden können, da die gebirgsmechanischen Lasten bei einer Strecke senkrecht zur Streckenlängsrichtung abgetragen werden. Die Annahme eines ebenen Verzerrungszustandes in einem 2D-Berechnungsschnitt entspricht der physikalischen Annahme, dass die Strecke in Längsrichtung unendlich ausgedehnt ist. Bei einem Hohlraum, dessen Dimension in Längsrichtung in der Größenordnung der Querschnittabmessungen liegt, wird die Umverteilung der Lasten vom Verhältnis aller drei Abmessungen zueinander mit bestimmt. Durch die Umverteilung in die dritte Richtung reduziert sich die Konvergenzrate, so dass die Konvergenzrate durch eine 2D-Berechnung überschätzt wird. Bei sehr langen Hohlräumen sind die Randeinflüsse der endlichen Streckenlänge gering, so dass eine 2D-Berechnung das reale Verhalten hinreichend genau beschreibt.

Die Streckenabmessungen im Referenzfall entsprechen etwa denen des Ostquerschlags des ERAM. Die Sohlenbreite beträgt 4 m und die Firsthöhe 3 m. Durch die Berücksichtigung einer Stoßwölbung von ca. 0,4 m und einer Firstwölbung von ca. 1 m wird die Streckengeometrie ausgerundet, so dass Spannungsspitzen an Konturrecken vermindert werden. Als Teufenlage wird die der 5a-Sohle Bartensleben gewählt, d.h. die Teufe beträgt -395 mNN. In dieser Teufe befinden sich die am tiefsten liegenden Einlagerungskammern für radioaktive Abfälle des ERAM. Ebenso ist es die tiefste Teufenlage für Steinsalzabbau. Die gewählte Referenzteufe ist daher eine konservative Abschätzung bezüglich des Teufendruckes für das zu erwartende Konvergenzverhalten aus Einlagerungskammern und Abbauen. Die im System enthaltene Symmetrie wurde bei der Modellierung ausgenutzt. Das Berechnungsgebiet hat daher eine Ausdehnung

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	


von 62 m in der Breite und 163 m in der Höhe, so dass der Abstand des Stoßes zum seitlichen Rand das 20-fache der Streckenhöhe beträgt und der Abstand von Firste bzw. Sohle zum oberen bzw. unteren Rand das 20-fache der Streckenbreite. Die Diskretisierung ist so gewählt, dass die Kantenlänge des Gitters an der Streckenkontur zwischen ca. 0,1 m und 0,25 m beträgt. Der während des Berechnungsprozesses auftretende Kontakt zwischen Sohle und Stoß bzw. zwischen Sohle und Firste machte diese feine Diskretisierung erforderlich.

Für das Materialverhalten des umgebenden Steinsalzes wurde von einem elastisch-viskoplastischen Verhalten entsprechend 1·BGRa ausgegangen. Diese Kriechintensität stellt den höchsten Wert für Steinsalze des ERAM dar, der bei numerischen Berechnungen normalerweise benutzt wird /15/. Typische Stratigraphien für diesen Wert sind z.B. z2HS3 im Westfeld und z3LS im Süd- und Ostfeld sowie im Zentralteil.

Als Anfangsbedingung wird von einem lithostatisch isotropen Spannungszustand ausgegangen. Dazu wurde die Tagesoberfläche in der Höhe von +134 mNN angenommen und eine konstante Materialdichte $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$. Die statischen Massekräfte ergeben sich unter Berücksichtigung einer Erdbeschleunigung von $9,81 \text{ m/s}^2$. Daraus ergibt sich die Spannung auf dem oberen Rand des Berechnungsgebietes zu -9,6 MPa und auf dem unteren Rand zu -13,1 MPa. Der in den Stoffgesetzen enthaltene Temperatureinfluss wird durch ein homogenes Temperaturfeld in Höhe von ca. 27 °C berücksichtigt. Im Hinblick auf die geometrischen Randbedingungen wird von den Standardverschiebungsrandbedingungen ausgegangen, indem die Verschiebungen normal zum unteren und zu den seitlichen Rändern des Berechnungsmodells unterdrückt sind und tangential zu den Rändern reibungsfrei möglich sind.

Es wird ein Betrachtungszeitraum von 100.000 Jahren zu Grunde gelegt. Bei solchen Betrachtungszeiträumen ergeben sich konturnah Verzerrungen, die deutlich über 2 - 3 % liegen, was als Grenzwert für die Anwendbarkeit von linearen Verzerrungsmaßen angesehen wird. Aus diesem Grund wird ein mathematischer Ansatz angewendet, der die Theorie großer Verzerrungen enthält. Ebenso erfordert die in das Modell eingebrachte Kontaktbedingung die Möglichkeit des geometrischen Updates, da nur so die aktuelle Geometrie den berechneten Verschiebungen nachgeführt wird. Die Kontaktbedingungen sind wie nachstehend gewählt, /6/. Dabei sind in einem geringen Umfang Zugspannungen im Kontakt zulässig. Erst wenn die Zugspannungen diesen Wert überschreiten, öffnet sich der Kontakt wieder. Bei den hier betrachteten Zuständen, die allein von einem konvergierenden Prozess ausgehen, tritt dieses Ereignis jedoch nicht ein.

Kohäsion	0,025 MPa
Dilatanzwinkel	0°
Reibwinkel	25°
Kontaktnormalsteifigkeit	180 GPa/m
Kontakt Schubsteifigkeit	98 GPa/m
Zugspannung	0,6 Mpa

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

4.2 Berechnungsvarianten

Die Berechnungsvarianten werden den vier bereits zu Beginn des Kapitels 4 aufgeführten und über den Referenzfall hinausgehenden Gruppen zugeordnet und im folgenden diskutiert.

4.2.1 Stoffgesetz

Das Verhalten des einen Hohlraum umgebenden Steinsalzes ist bei den hier durchgeführten Berechnungen von folgenden zwei Faktoren beeinflusst

- Stratigraphie
- Feuchtigkeit

Durch einen Vorfaktor zum Stoffgesetz zielen beide Faktoren auf ein erhöhtes viskoplastisches Kriechen, die Formulierung des Stoffgesetzes als solches bleibt unverändert. Die unterschiedliche Kriechintensität der Salze des ERAM wird durch die Zuordnung zu einer von sechs Kriechklassen beschrieben /9/. Neben der Kriechklasse des Referenzmaterials sind für das Konvergenzverhalten der aufgefahrenen Abbaue die Steinsalze mit geringerer Viskosität von Bedeutung. Um den Einfluss einer geänderten Stratigraphie um einen aufgefahrenen Hohlraum zu erfassen, werden für den Fall des trockenen Zustandes neben dem Referenzfall mit $1 \cdot BGRa$ auch die Varianten $\frac{1}{2} \cdot BGRa$ und $\frac{1}{4} \cdot BGRa$ betrachtet.

Wenn Feuchtigkeit in das Salz eindringt, unabhängig ob in Form einer erhöhten Luftfeuchtigkeit der Wetter oder durch an der Streckenkontur anstehende Lauge, ist nicht auszuschließen, dass sie das Kriechverhalten des Steinsalzes im konturnahen Bereich um die Strecke stark beeinflusst, s. Kapitel 3.3. Die Größe des durch Feuchte beeinflussten Bereichs wird durch die Auflockerungszone wesentlich mitbestimmt. Da noch keine allgemein anerkannten Modelle existieren, um die Eindringtiefe der Feuchte in die Dilatanzzone und den Feuchtegehalt zu bestimmen, werden im Rahmen einer Parametervariation zwei unterschiedlich große Einflussbereiche angenommen. Bergmännische Erfahrungen ergeben, dass während der Betriebszeit eines Bergwerkes Auflockerungszonen von bis zu 1,5 - 2 m um aufgefahrene Hohlräume entstehen können. Für die numerische Berechnung wird erstens angenommen, dass sich ein durch Feuchte beeinflusster Bereich von ca. 2 m um die Kontur bildet, in dem ein erhöhtes Kriechen stattfindet. Damit Feuchtekriechen eintreten kann, muss nicht nur ein dilatanter Bereich existieren, sondern müssen auch Permeabilitäts- und Spannungsbedingungen erfüllt sein. Daher wird als zweites ein sehr viel geringerer feuchtigkeitsbeeinflusster Bereich mit 0,6 m um die Kontur angenommen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00

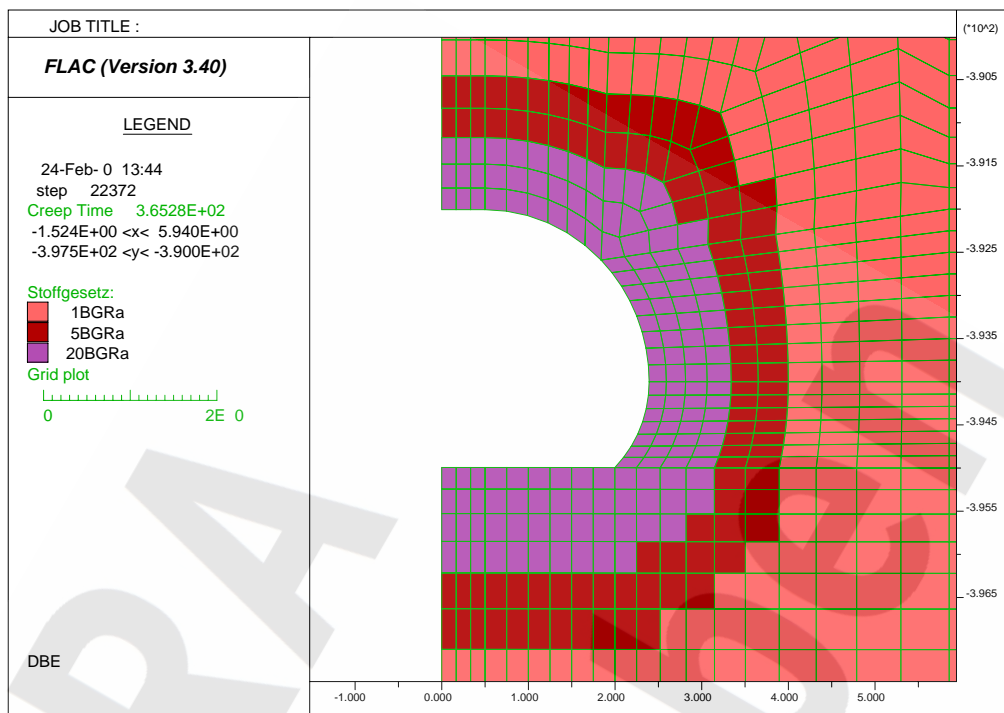


Abbildung 2: Verteilung des Vorfaktors α zu einzelnen Zonen im konturnahen Bereich bei einem Einflussbereich von 2 m und Vorfaktoren für das Feuchte kriechen zwischen 5 und 20

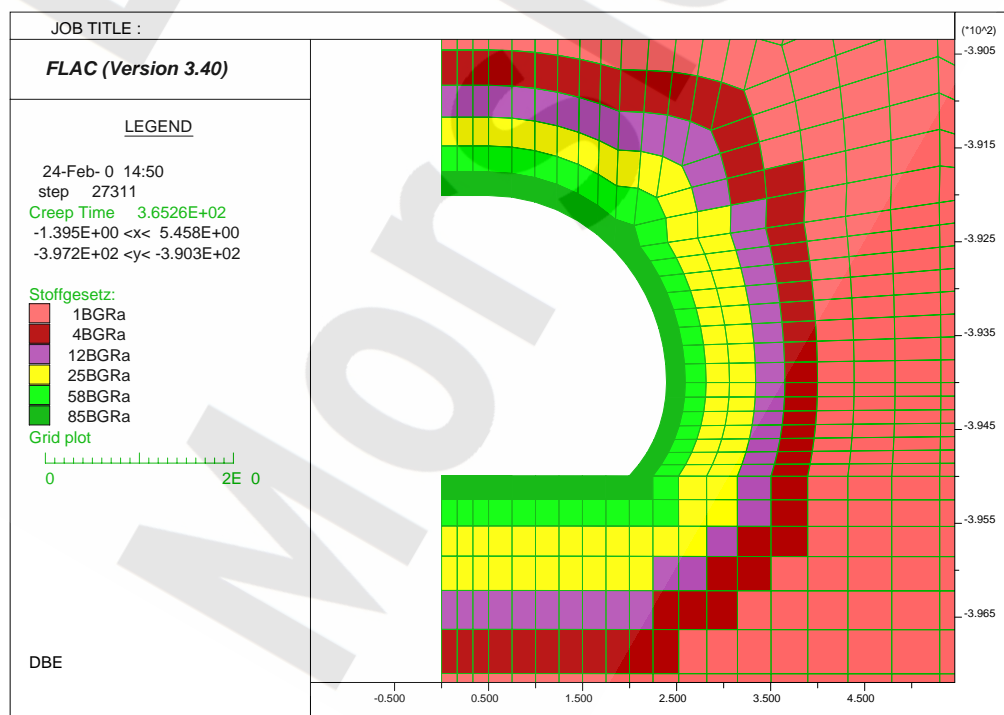


Abbildung 3: Verteilung des Vorfaktors α zu einzelnen Zonen im konturnahen Bereich bei einem Einflussbereich von 2 m und Vorfaktoren für das Feuchte kriechen zwischen 4 und 85

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00

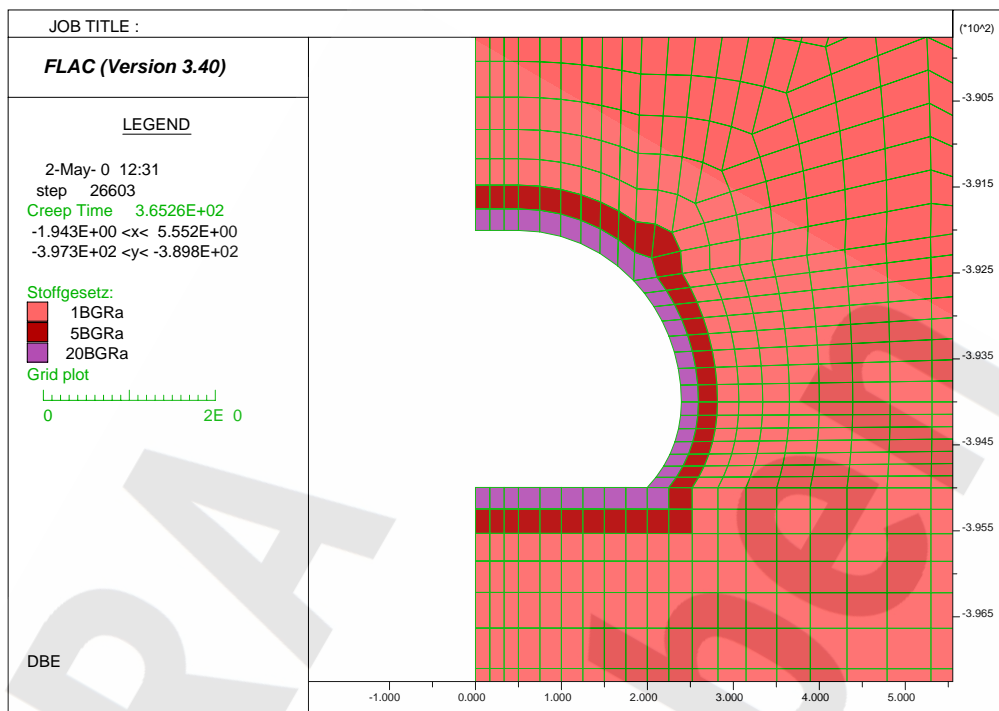


Abbildung 4: Verteilung des Vorfaktors α zu einzelnen Zonen im konturnahen Bereich bei einem Einflussbereich von 0,6 m und Vorfaktoren für das Feuchtekriechen zwischen 5 und 20

Neben der Größe des Bereiches, in dem Feuchtekriechen auftritt, wird die Kriechintensität in dem Feuchtebereich variiert. Dazu wurde einerseits auf der Kontur ein Vorfaktor $\alpha = 30$ angenommen, andererseits $\alpha = 100$. In beiden Fällen wird ein nichtlinearer Übergang zwischen der hohen Kriechrate auf der Kontur und der niedrigen des trockenen Steinsalzes angenommen. Entsprechend der räumlichen Ausdehnung des angenommenen Feuchtebereiches im numerischen Modell ist der Vorfaktor α in den Wertebereichen [5, 20] BGRa und [4, 85] BGRa innerhalb des Feuchtebereiches variiert worden, s. Abbildung 2 bis Abbildung 4.

4.2.2 Querschnittsform

Im Hinblick auf die Querschnittsform werden folgende grundsätzliche Variationen unterschieden

- Höhen-Seitenverhältnis
- geometrische Form des Grundkörpers

Die Auffahrung eines Hohlraumes stellt eine Störung des Anfangsspannungszustandes dar, der im Salz als lithostatisch isotroper Zustand angenommen wird. Als Folge des gestörten Spannungsfeldes beginnt das Steinsalz zu kriechen und der Hohlraum schließt sich. Dieser Vorgang

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00

setzt sich so lange fort, bis wieder ein überwiegend lithostatisch isotroper Spannungszustand erreicht ist. Während des Schließens findet eine Spannungsumlagerung statt, d. h. die Deviatorspannungen verringern ihre Maximalwerte und das Spannungsfeld ändert sich. Da die Störung des Anfangsspannungszustandes vom Hohlraum verursacht wird und die Last aus dem Gebirge von der Firste auf die Stöße umgeleitet werden muss, wird bei der Variation des Höhen-Breitenverhältnisses untersucht, inwiefern die Hohlraumgröße sich auf das Konvergenzverhalten auswirkt. Von den Querschnittabmessungen der Referenzstrecke mit einer Sohlenbreite $B_0 = 4$ m und einer Firsthöhe $H_0 = 3$ m ausgehend wird ein breiter, flacher Abbau mit einem Breiten-Höhenverhältnis von $B : H = 4B_0 : H_0$, ein schmaler, hoher Abbau mit $B : H = B_0 : 4H_0$ und ein großer Abbau mit $B : H = 4B_0 : 4H_0$ untersucht, Abbildung 5. In Abbildung 5 ist jede einzelne Geometrievariante durch eine unterschiedliche Farbe gekennzeichnet. Der breite flache Abbau repräsentiert z. B. die Abbaue des Westfeldes, schmale hohe Abbaue befinden sich in den Kalilagern und die meisten Steinsalzabbaue sind große Abbaue.

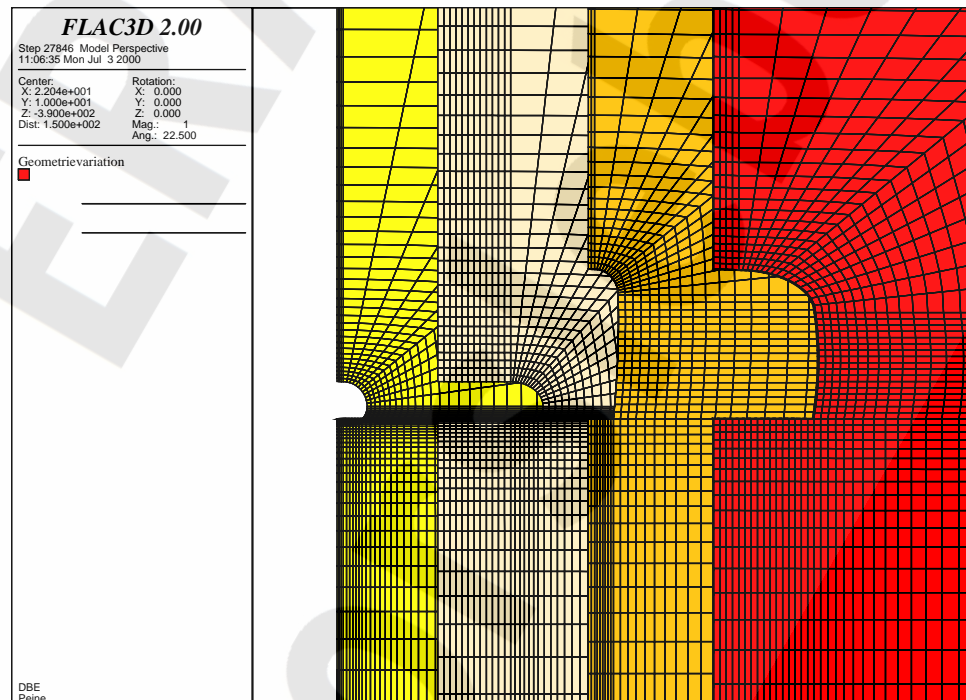



Abbildung 5: Geometrie der Abbaue zum Anfangszeitpunkt bei variiertem Höhen-Seitenverhältnis

Ein zweiter Aspekt der Geometrievariation zielt auf die Variation des geometrischen Grundkörpers. Der Kreis stellt die für eine homogene Druckbelastung ideale Geometrie dar und ein Viereck ist die einfachste Approximation eines Hohlraumes. Für diese Variation werden die folgenden Abmessungen zugrunde gelegt:

- Kreis : Radius 2 m
- Rechteck : Breite 4 m, Höhe 3 m

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

4.2.3 Geometrische Einbettung

Unter der geometrischen Einbettung wird die Lage der modellierten Auffahrung im Berechnungsgebiet verstanden. Zwei Faktoren beeinflussen diese Lage:


- Teufe
- Abstand zur Berandung

Aus der Teufe ergibt sich der lithostatische Spannungszustand, der wiederum den Spannungsdeviator als Folge der Hohlraumauffahrung beeinflusst. Da dieser Deviator im verwendeten Stoffgesetz BGRa mit dem Exponenten 5 eingeht, kommt der Teufe eine wesentliche Rolle hinsichtlich des Konvergenzverhaltens zu. Als Variation zum Referenzfall mit der Teufenlage 5a-Sohle Bartensleben werden die Teufenlage 3.-Sohle Bartensleben mit -332 m NN und 1a-Sohle Bartensleben mit -245 m NN gewählt.

Im numerischen Modell ist die Lage des Hohlraumes nicht nur durch seine Teufenlage sondern auch durch seinen Abstand zu den Rändern des Berechnungsgebietes bestimmt. Im Referenzfall werden an den äußeren Rändern des Berechnungsgebietes die Verschiebungen in Normalenrichtung verhindert, da im realen Grubengebäude an von Auffahrungen weit entfernten Punkten nur sehr kleine Verschiebungen auftreten. Gibt es ein sehr steifes Material in geringerer räumlicher Entfernung zum Abbau wie z. B. Anhydrit, so beeinflusst es ebenfalls das Verschiebungsverhalten in seiner Umgebung. Hier muss die geologische Situation im Einzelfall betrachtet werden.

Im Referenzfall sind die Ränder weit entfernt von der Hohlraumkontur. Bei der Variation des Randabstandes wurde davon ausgegangen, dass sich entweder ein Rand in geringerem Hohlraumabstand befindet und zwar hier ein seitlicher oder der untere Rand, oder es werden zwei hohlraumnahe Ränder modelliert und zwar ein seitlicher Rand und der untere Rand. Im Rahmen der Variation eines seitlichen Randes musste die Modellsymmetrie aufgegeben werden. Ein seitlicher Rand wird im Referenzabstand der 20-fachen Streckenhöhe belassen, während der andere Rand einen seitlichen Abstand des 5-, 2-, 1- oder 0,5-fachen der Streckenhöhe aufweist. Eine entsprechende Variation wird für den unteren Rand durchgeführt. Im ERAM befindet sich Anhydrit sowohl in der Nähe der Sohle von Hohlräumen als auch stoßnah. Dieser Effekt kombinierter, naher Ränder wird in folgender Form untersucht: Abstand des einseitig nahen Randes/Abstand des unteren Rands mit $1 H_0 : 0,5 B_0$, $0,5 H_0 : 1 B_0$ und $0,5 H_0 : 0,5 B_0$.

Doch nicht nur die Lage des Randes im Berechnungsgebiet hat einen Einfluss auf das Berechnungsergebnis sondern auch die auf diesen Rändern angenommenen Verschiebungen. Werden nur die Verschiebungen in Normalenrichtung unterbunden, sind Verschiebungen in tangentialer Richtung reibungsfrei möglich. Ränder, auf denen allein die Normalverschiebung unterdrückt ist, lassen sich als Symmetrieachse interpretieren. Für einen seitlichen Rand im Referenzabstand ist die Verschiebung entlang des Randes klein, so dass der Einfluss aus der tangentialen Verschiebung vernachlässigbar ist. Befindet sich der seitliche Rand in geringem Abstand zum Hohl-

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

raum, nimmt die Bedeutung der Reibungsverhältnisse auf dem Rand zu. Im Fall eines steifen Materials mit Anhydrit ist die Annahme einer reibungsfreien tangentialen Verschiebung nicht mehr möglich. In Anlehnung an die Situation im Südfeld, bei dem sich Anhydrit in Schollenform im Teufenbereich von ca. -280 mNN bis unter -500 mNN befindet, wird in den Berechnungsvarianten mit einem seitlich modifizierten Rand davon ausgegangen, dass die tangentielle Verschiebung auf diesem seitlichen Rand ausgehend von dem unteren Berechnungsrand bis in eine Höhe von 10 m oberhalb der Firste sowohl in Normalenrichtung als auch in tangentialer Richtung fixiert wird. Die übrigen Bereiche der seitlichen und des unteren Randes sind nur in Normalenrichtung fixiert. Unabhängig von der Variation des unteren Berechnungsrandes sind die Verschiebungen auf dem unteren Rand geringer, so dass eine tangentielle Verschiebung auf diesem Rand im Berechnungsmodell immer möglich ist.


Es gibt eine große Fülle an Zustandsbedingungen für die Modellierung der Ränder im Berechnungsmodell. Eine exakte Erfassung hängt vom Einzelfall ab. An dieser Stelle soll mit der Variation der Ränder die Tendenz aufgezeigt werden, die sich für das Konvergenzverhalten aus der Begrenztheit des Homogenbereiches ergeben kann.

4.2.4 Verfüllung

Im Zusammenhang mit der Verfüllung der Hohlräume werden unterschiedliche Versatzmaterialien, Verfüllgrade und auch Flutungszustände betrachtet.

Als Versatzmaterialien sind jeweils zwei Varianten von Salzbeton und Salzgrus berücksichtigt worden, Tabelle 2. Salzbeton wird zur Hohlraumverringering und als Last tragendes Element eingesetzt. Solange sich das Bergwerk im trockenen Zustand befindet, hat der Salzbeton sein normales Tragverhalten. Wird der Salzbeton der Einwirkung einer Lauge ausgesetzt, tritt ein als Korrosion bezeichneter Zersetzungsprozess ein, in Folge dessen sich das Steifigkeitsverhalten verringert. Beide Betonvarianten werden mit rein elastischem Materialverhalten beschrieben, wobei durch den höheren Elastizitätsmodul ein unkorrodierter Salzbeton beschrieben wird und der abgeminderte Elastizitätsmodul für den korrodierten Salzbeton steht, Tabelle 3. Für ein poröses Material, wie es z. B. Altversatz oder eingelagerter Abfall darstellen kann, wird das porositätsabhängige, elastisch-viskoplastische Stoffgesetz von Salzgrus verwendet sowie die Materialparameter gemäß Tabelle 4. Wie Salzbeton unter der Einwirkung von Feuchtigkeit korrodiert und sich dadurch in seinem Materialverhalten verändern kann, hat die Feuchtigkeit auch einen Einfluss auf das Kompaktionsverhalten von Salzgrus, s. Kapitel 3.3. Daher werden im Fall der Salzgrusmodellierung die Varianten des trockenen und des feuchten Materials untersucht.

Im Hinblick auf den Verfüllgrad werden Zustände mit vollständiger und mit teilweiser Verfüllung betrachtet. Für den Fall der vollständigen Verfüllung sind Varianten mit homogen und mit heterogen verteilter Verfüllungen berechnet worden. Im Fall einer homogenen Verfüllung wurden die o. g. Varianten der Versatzmaterialien berechnet, im Fall einer heterogenen Füllung wurde davon ausgegangen, dass der verbleibende Resthohlraum über einem bestehenden Altversatz mit

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

einem Salzbetonversatz vollständig verfüllt wird. Im Hinblick auf den Anfangszeitpunkt werden dazu die folgenden Volumenverhältnisse von trockenem Salzgrus zu unkorrodiertem Salzbeton in den Berechnungen berücksichtigt: 50 % : 50 % und 70 % : 30 %.

Teilversatz hat die Aufgabe, das Resthohlraumvolumen zu verringern und eine Stabilisierung des Grubengebäudes zu gewährleisten. Ausgehend von den beiden Varianten mit Salzbeton als Verfüllmaterial wurden die folgenden Verfüllgrade betrachtet

- 50 %, Minimalverfüllung
- 70 %, wesentliche Stabilisierung
- 85 %, wesentliche Hohlraumreduktion
- 95 %, maximale Verfüllung eines realen Abbaues

Ein Verfüllgrad von 95 % wird als maximale Verfüllung für einen Hohlraum mit normaler Welligkeit der Firste angesehen. Diese Welligkeit der Firste mit der daraus resultierenden Konsequenz, dass sich über der Firstbreite Stützstellen zum Versatz ausbilden, blieb unberücksichtigt, sondern es wurde ein durchgehender Firstspalt angenommen.

Der Füllstoff der Strecke braucht kein Feststoff zu sein, sondern im gefluteten Zustand ist es die Lauge. Im Falle der Flutung wird eine gesättigte Lauge mit der Dichte $\rho = 1280 \text{ kg/m}^3$ angenommen. Der aus dem Flüssigkeitspegel auf die Hohlraumkontur wirkende hydrostatische Druck führt zu einer Verringerung der Deviatorspannung und damit zu einer verringerten Konvergenzrate. Als Varianten werden ein bis zur Tagesoberfläche und ein bis zum Salzspiegel geflutetes Bergwerk betrachtet. Der Salzspiegel wurde dazu in einer Teufe von -150 mNN angenommen. Folgende Flüssigkeitsdrücke in der Strecke werden für die Berechnung angesetzt:

- 6,6 MPa, Flutung bis zur Tagesoberfläche
- 3,1 MPa, Flutung bis zum Salzspiegel

In den bisher beschriebenen Berechnungsvarianten ist im wesentlichen jeweils nur eine Größe gegenüber dem Referenzfall verändert worden. Abweichend von dem Vorgehen der Variation eines einzigen Parameters wird weiterhin untersucht, wie sich die Flutung mit gesättigter Lauge auswirkt, wenn an Stelle einer instantanen Flutung die Strecke zunächst im Zeitraum der ersten 100 a nach Auffahrung offen steht. Die daran anschließende Flutung geht von einem Pegelstand an der Tagesoberfläche aus.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00



4.3 Zusammenfassung der Berechnungsbeispiele


Nachstehend sind die Berechnungsbeispiele nochmals stichwortartig zu einer kurzen Übersicht zusammengefasst.

Referenzmodell:

Querschnittsgeometrie $B_0 : H_0 = 4 \text{ m} : 3 \text{ m}$ (Ostquerschlag), Teufe -395 mNN (5a-Sohle Bartensleben), Tagesoberfläche +134 mNN, 1 • BGRa, geometrisch nichtlinear

Varianten:

- Stoffgesetze
 - trockene Strecke: $\frac{1}{2} \cdot \text{BGRa}$, $\frac{1}{4} \cdot \text{BGRa}$
 - konturnahe Durchfeuchtung:
 - * Auflockerungszone bis 2 m Konturabstand: 5 bis $20 \cdot \text{BGRa}$, 4 bis $85 \cdot \text{BGRa}$
 - * Auflockerungszone bis 0,6 m Konturabstand: 5 bis $20 \cdot \text{BGRa}$
- Querschnitt
 - Querschnittgröße: Höhen-Seitenverhältnis mit 1 $H_0 : 4 B_0$, 4 $H_0 : 1 B_0$, 4 $H_0 : 4 B_0$
 - Querschnittform: Rechteck, Kreis
- Geometrische Einbettung
 - Teufe: -332 m NN (3. Sohle Bartensleben), 245 m NN (1a-Sohle Bartensleben)
 - Gebietsrandbedingungen:
 - * einseitig naher seitlicher Rand: 5 H_0 , 2 H_0 , 1 H_0 , 0,5 H_0
 - * einseitig naher unterer Rand: 5 B_0 , 2 B_0 , 1 B_0 , 0,5 B_0
 - * zweiseitig nahe Ränder: Verhältnis des seitlichen Abstandes eines nahen Randes zum unteren nahen Rand: 1 $B_0 : 0,5 H_0$, 0,5 $B_0 : 1 H_0$, 0,5 $B_0 : 0,5 H_0$
- Verfüllung
 - Vollversatz:
 - * homogene Verfüllung: Salzbeton und korrodierter Salzbeton sowie Salzgrus im trockenen und feuchten Zustand
 - * heterogene Verfüllung: Verfüllgrad mit trockenem Salzgrus : unkorrodiertem Salzbeton von 50 % : 50 %, 70 % : 30 %
 - Teilversatz: Salzbeton und korrodierter Salzbeton mit 50 %, 70 %, 85 %, 95 % Verfüllgrad
 - Flutung:
 - * instantane Flutung: Laugenpegel am Salzspiegel und an der Tagesoberfläche
 - * zeitversetzte Flutung zum Zeitpunkt 100a nach Auffahrung mit Laugenpegel an der Tagesoberfläche

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

5 Ergebnisse

5.1 Stoffgesetzanpassung des Modells CWIPP für Salzgrus

Für die Modellierung von Salzgrus wurde auf den in FLAC vorhandenen Ansatz CWIPP zurückgegriffen. Hierbei handelt es sich um ein Stoffgesetz, das für Belange der numerischen Berechnungen mit Salzgrus für das Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) entwickelt wurde. Für dieses Stoffgesetz müssen jedoch noch die Materialparameter bestimmt werden. Die Ergebnisse der Parameteridentifikation für diese Materialparameter werden im folgenden beschrieben.

Die Parameteranpassung des Stoffgesetzes für Salzgrus erfolgt auf der Basis von experimentell ermittelten Daten der BGR /13/ und des FZK-INE /14/. Daten zum Feuchtekriechen von Salzgrus sind allein in /13/ enthalten. Im Fall der BGR-Daten werden nur diejenigen Oedometerergebnisse berücksichtigt, die bei niedrigen Kompaktionsgeschwindigkeiten gemessen wurden. In einem Bergwerk wird von einer Konvergenzrate unter $1 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ bis $1 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ ausgegangen. Wie die Berechnungen zeigen werden, liegen die zu erwartenden Konvergenzraten im ERAM noch um eine bis drei Größenordnungen darunter.

Die Ergebnisse aus der Identifikation zeigen, dass es mit dem relativ einfachen CWIPP-Modell nur eingeschränkt möglich ist, den vorhandenen Zustandsraum hinreichend genau abzudecken. Gegenüber den in /10/ verwendeten Stoffgesetzen wird im CWIPP-Modell jeweils nur ein Parameter für die Zustandsgrößen Spannung, Porosität und Temperatur verwendet sowie ein Multiplikator zur allgemeinen Skalierung. Bei trockenem Salzgrus liegen die von BGR experimentell im Oedometer ermittelten Kurven für den Kompaktionsdruck dicht beieinander. Die Daten aus den Triax-Zellen von BGR und FZK weisen eine größere Bandbreite aus. Es sei angemerkt, dass die verwendeten Messdaten in einem Temperaturbereich zwischen 20 und 50 °C ermittelt wurden. Um diesen Temperatureinfluss im Stoffgesetz mit erfassen zu können, wurde der Multiplikator B_0 zum Arrhenius-Term erweitert. Die Ergebnisse der Parameteridentifikation sind in Abbildung 6 dargestellt. Die Identifikation liefert bei der Anpassung an die Daten des trockenen Salzgrus ein etwas breiteres Band. Eine bessere Anpassung kann an die Spannungskurven des feuchten Salzgrus erfolgen.

Trotz der vorhandenen Einschränkungen des CWIPP-Modells weist es unter Berücksichtigung großer Verzerrungen den höchsten verfügbaren Entwicklungsstand auf und kommt deshalb zur Anwendung.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341011					GH	BY	0004	00

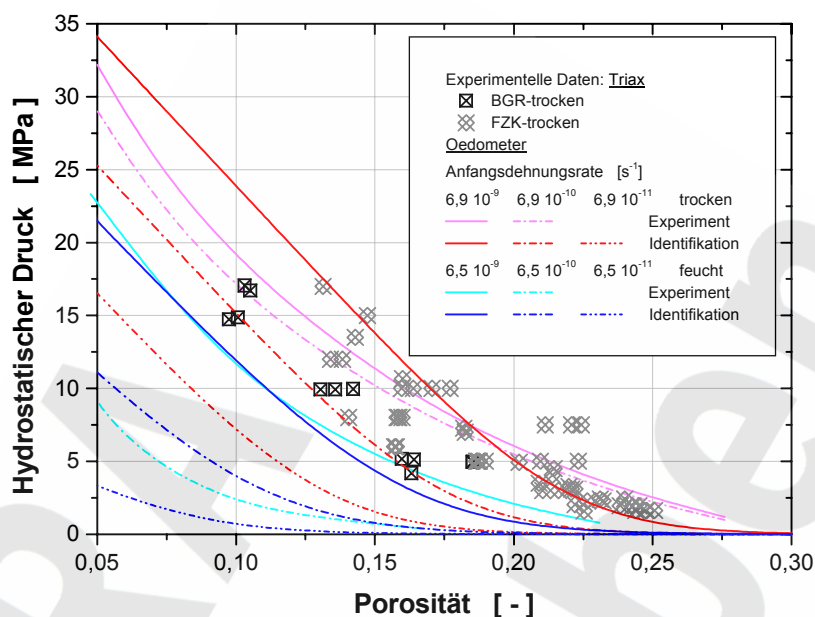


Abbildung 6: Ausgangsdaten zur Parameteridentifikation und Simulation eines Oedometertests mit trockenem und feuchtem Salzgrus

5.2 Ergebnisse zur Hohlraumkonvergenz

Die Berechnungen zur Hohlraumkonvergenz werden sowohl mit dem Programm FLAC als auch mit dem Programm $FLAC^{3D}$ durchgeführt. Wird $FLAC^{3D}$ verwendet, so entspricht ein Scheibenmodell mit unterdrückten Verschiebungen in Dickenrichtung einer zweidimensionalen Berechnung unter Annahme eines ebenen Verzerrungszustandes.

Die Berechnungsergebnisse für das Referenzsystem und die Varianten sind in den nachstehenden Kapiteln beschrieben sowie charakteristische Ergebnisdaten für die Berechnungsvarianten in den Tabellen der Anhänge 1 und 2, zusammengestellt.

In Bezug auf die im folgenden enthaltenen Bilder sei noch einmal ausdrücklich auf die unterschiedlichen Bezugssysteme hingewiesen, s. Kapitel 2.3.1. Soweit nicht gesondert darauf hingewiesen wird, handelt es sich bei der in den Bildern dargestellten Konvergenz um die materielle Flächenkonvergenz, während für die Konvergenzrate das logarithmische oder auch natürliche Maß verwendet wird. Ein unmittelbarer Bezug zwischen den beiden Darstellungen ist daher nicht gegeben sondern erfordert neben der Zeitableitung die Transformation mit der Jacobi-Determinanten J .

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00



5.2.1 Referenzsystem

Die Konvergenz eines Streckenquerschnittes ist ein zeitabhängiger Prozess. In Abbildung 7 ist die durch das konvergierende Gebirge deformierte Geometrie für die Referenzstrecke zu vier ausgewählten Zeitpunkten dargestellt. Jeder Zeitpunkt ist durch eine Farbe gekennzeichnet und die Lage der Symmetrieachse ist zu Gunsten einer besseren Erkennbarkeit jeweils etwas verschoben. Im Fall später Zeitpunkte beschreiben die Interface-Elemente den Kontaktbereich, in dem die einzelnen Anteile der Kontur aufeinandertreffen.

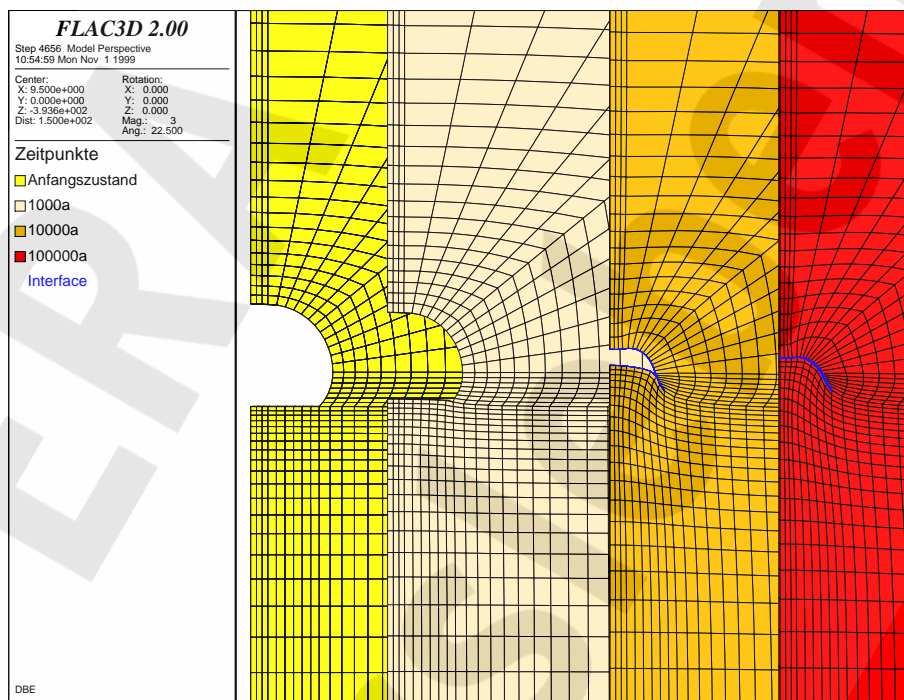


Abbildung 7: Streckengeometrie zum Zeitpunkt der Auffahrung und für die Zeitpunkte 1.000 a, 10.000 a und 100.000 a nach der Auffahrung

Wie in Abbildung 7 zu erkennen, schließt sich der Hohlraum zunächst nahezu gleichmäßig von allen Seiten, wobei sich beim Übergang zwischen Sohle und Stoß eine Strukturversteifung ergibt. Als Folge dieser Versteifung bleibt dieser Übergang hinsichtlich seines Verschiebungszustandes zurück und es kommt zum Kontakt zwischen der sich aufwölbenden Sohle und dem nach innen wandernden Stoß. In diesem Fall wird zunächst die Stoßwanderung eingeschränkt, bevor es zu einem späteren Zeitpunkt zum Kontakt zwischen Sohle und Firste kommt. Nach dem Kontakt von Sohle und Firste bleibt in der Firstwölbung ein sich nur sehr langsam schließender Resthohlraum übrig. Anzumerken ist, dass sich die Diskretisierung im Rahmen der mathematischen Formulierung des Kontaktes bemerkbar macht. Ein Kontakt ereignis kann im numerischen Systemverhalten zu einer sprunghaften Änderung führen, in der Realität ergibt sich aus der Berührung von zwei Wandungen ein kontinuierlicher Prozess. Zwischen Sohle und Firste zeigen sich Unterschiede bezüglich des konturnahen Kriechens. Während das Salz, das

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	DBE
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

die Sohlenhebung bewirkt, aus einem weiträumigen Bereich kommt, kriecht es im Bereich der Firstwölbung verstärkt aus dem konturnahen Bereich nach. Entsprechend höher sind die Dehnungen in den konturnahen Zonen der Firstwölbung.

In Abbildung 8 sind die in die Strecke hinein gerichteten Verschiebungen von Firste, Sohle und Stoß dargestellt. Als Referenzpunkte werden die First- und die Sohlenmitte sowie der Punkt auf dem Niveau der maximalen Streckenbreite am Stoß gewählt. Die Verschiebungen sind in allen drei Punkten nahezu gleich groß, so dass die daraus resultierende horizontale und vertikale Konvergenz ebenfalls nahezu gleich groß ist. Dazu ist anzumerken, dass die horizontale und die vertikale Konvergenz jeweils eine Verschiebungsgröße ist, Kapitel 2.

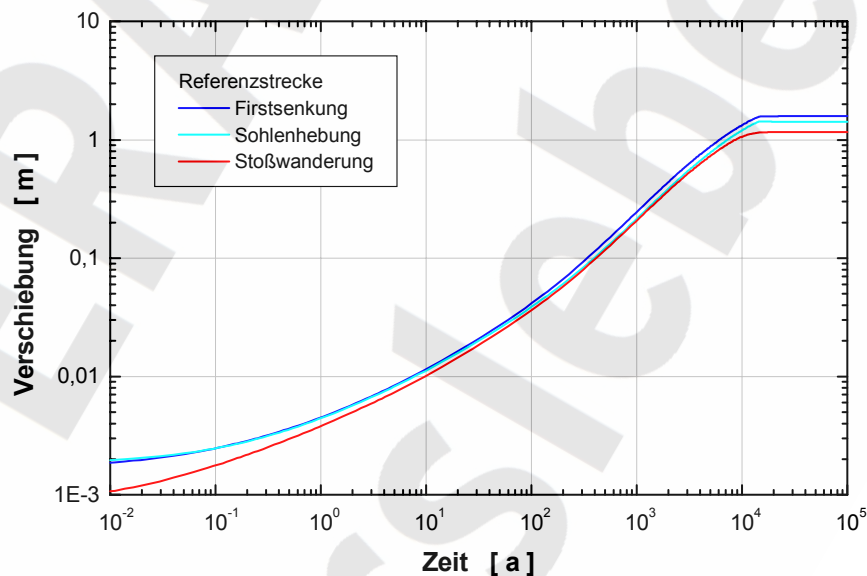


Abbildung 8: Verschiebung von Firste, Sohle und Stoß über die Zeit im Referenzfall

Wird die Konvergenz in horizontaler Richtung auf die ursprüngliche Streckenbreite an diesen Punkt bezogen, ergibt sich ein Maß für die Stauchung des Streckenprofils in horizontaler Richtung. Entsprechendes gilt auch für die vertikale Richtung. Wie Abbildung 7 und Abbildung 9 zeigen, wird die Referenzstrecke in erster Linie von Sohle und Firste geschlossen und nicht so sehr von den Stößen her. Die Stauchung in vertikaler Richtung erreicht den Wert 1. In horizontaler Richtung wird nur ein Wert von ca. 0,6 erreicht.

Wird ersatzweise für die Streckengeometrie ein Rechteck verwendet, bei dem die o. g. Referenzpunkte von Sohle, Firste und Stoß auf den Kanten liegen, lässt sich eine angenäherte Flächenkonvergenz bestimmen. Im Vergleich mit der berechneten Flächenkonvergenz, bei der die tatsächliche Streckengeometrie der Referenzstrecke berücksichtigt wird, zeigt sich, dass bei

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00

diesem sich sehr gleichmäßig schließenden Hohlraum kaum Unterschiede gegenüber der approximierten Flächenkonvergenz besteht, Abbildung 9.

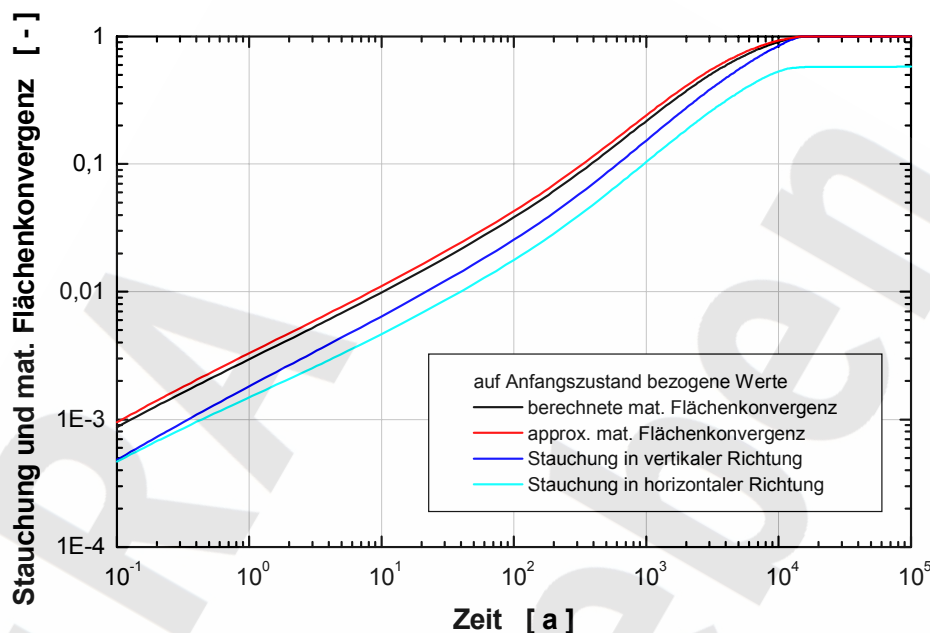


Abbildung 9: Relative Streckenkonvergenz (Stauchung) und materielle Flächenkonvergenz im Referenzfall

Im folgenden wird nicht weiter auf die Konvergenz in horizontaler und vertikaler Richtung eingegangen werden. Zur Vereinfachung im Text wird daher die Flächenkonvergenz nachstehend nur noch verkürzt als Konvergenz bezeichnet, der Hinweis auf das Bezugssystem bleibt jedoch erhalten. Gleiches gilt für die Konvergenzrate.

In Kapitel 2.3.1 sind die unterschiedlichen mathematischen Formulierungen der Flächen- bzw. Volumenkonvergenz sowie die daraus abzuleitenden Konvergenzraten beschrieben worden. Wie sich diese unterschiedliche mathematische Beschreibung auswirkt, ist für die Referenzstrecke in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt. Da nur die anfänglich zur Verfügung stehende Querschnittfläche geschlossen werden kann, strebt die materielle Konvergenz bei vollständigem Verschluss der Strecke gegen den Wert 1. Die aktuelle Fläche dagegen verringert sich immer mehr und tendiert gegen den Wert 0. Sowohl die räumliche als auch die logarithmische Konvergenz liegen daher oberhalb der materiellen Konvergenz, entsprechendes gilt für die Konvergenzraten.

Solange die Abweichungen gegenüber der Anfangskonfiguration klein sind, ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Größen in den unterschiedlichen Bezugssystemen,

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00



Abbildung 10. Wird als Grenze für die Abweichung zwischen materieller und räumlicher Konvergenzrate im Verhältnis zur logarithmischen Konvergenzrate ein Wert von 20 % gewählt, so wird dieser Zustand, ab dem es zu einer merklichen Differenz zwischen den drei Bezugssystemen kommt, ca. 300 a nach der Hohlraumauffahrung erreicht. Zu diesem Zeitpunkt beträgt der Wert der materiellen Konvergenz ca. 10 %.

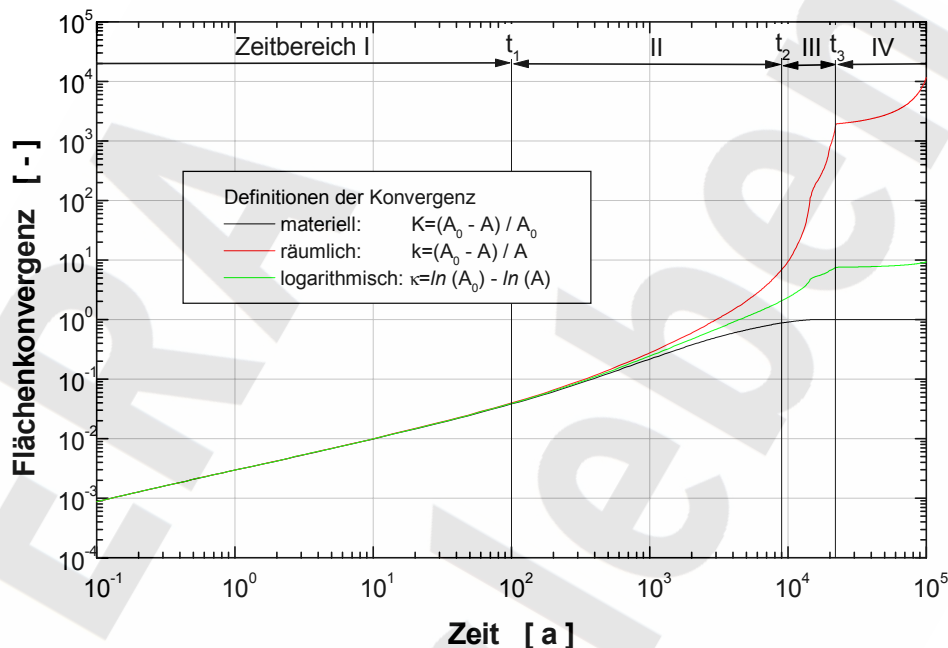


Abbildung 10: Konvergenz in Abhängigkeit der unterschiedlichen Bezugssysteme für das Referenzsystem

Das Zeitverhalten der Konvergenzrate wird im folgenden in vier Teilbereiche unterteilt, Abbildung 11. Ausgehend vom Zeitpunkt der Auffahrung nimmt die Konvergenzrate unabhängig von der Wahl des Bezugssystems im ersten Teilbereich ab. Daran schließt sich ein Zeitbereich mit nahezu konstanter logarithmischer Rate an. Der dritte Bereich ist durch ansteigende und abfallende logarithmische Konvergenzraten gekennzeichnet bzw. durch einem stärkeren Abfall in der materiellen Konvergenzrate. Der vierte Bereich stellt sich bei weitgehender materieller Konvergenz ein und beginnt unabhängig von der Wahl des Bezugssystems mit einem drastischen Abfall der Konvergenzrate. Anschließend verbleibt die materielle Konvergenzrate auf einem sehr niedrigen Niveau, die beiden übrigen steigen wieder auf Grund des sich verringernden aktuellen Volumens an. Obwohl nicht in allen Berechnungsvarianten immer alle vier Teilbereiche ausgeprägt sind und sich genau in der beschriebenen Weise entwickelt, charakterisieren diese vier Teilbereiche jeweils eine Veränderung im Systemverhalten.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00

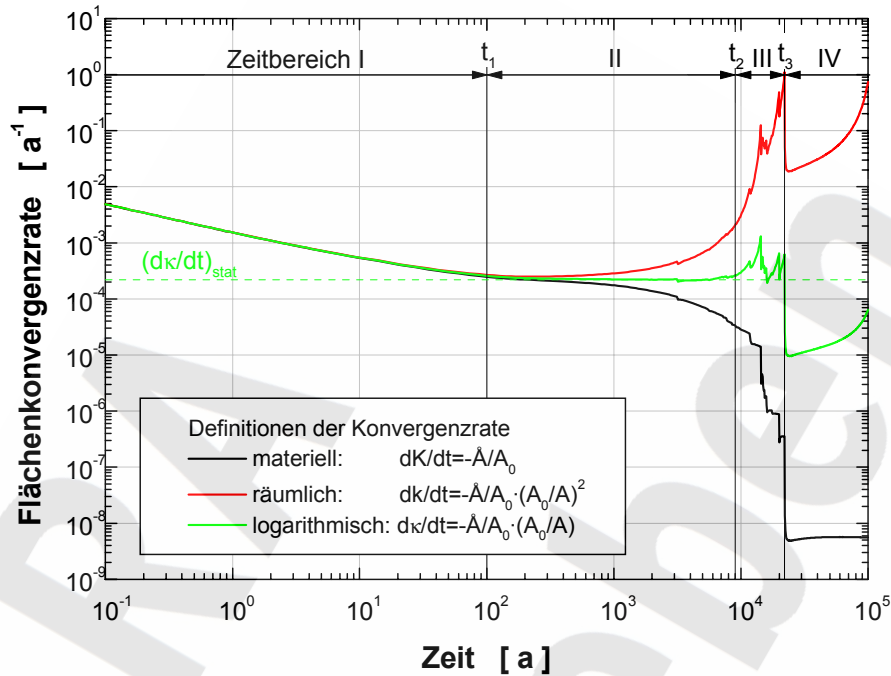



Abbildung 11: Konvergenzrate in Abhängigkeit der unterschiedlichen Bezugssysteme für das Referenzsystem


Der zweite Bereich ist für die Beschreibung des Konvergenzverhaltens der Auffahrung von besonderer Bedeutung, da der Wert für die logarithmische Konvergenzrate dem Wert entspricht, wie er in dem vereinfachten Modell /2/ angenommen wird. In einer Vielzahl der Fälle bildet sich dieser Teilbereich mit einer nahezu konstanten logarithmischen Konvergenzrate aus. Der Wert, den die Rate dabei annimmt, wird im folgenden als stationäre Konvergenzrate $\dot{\kappa}_{stat}$ bezeichnet. Auch wenn bei dem Begriff „stationäre Konvergenzrate“ nicht explizit auf das logarithmische Maß hingewiesen wird, ist doch immer das logarithmische Maß gemeint. Es gibt jedoch Berechnungsbeispiele, in denen sich kein stationärer Bereich einstellt. Weist die logarithmische Konvergenzrate im Übergang zwischen dem ersten und dem dritten Teilbereich ein Minimum auf, so wird der Wert dieser minimalen, logarithmischen Konvergenzrate als Wert für die stationäre Konvergenzrate gewählt, $\dot{\kappa}_{stat} = \dot{\kappa}_{II,min}$. Weist die logarithmische Konvergenzrate dagegen eine streng monoton fallende Charakteristik auf, wird als Wert für die stationäre Konvergenzrate der Wert gewählt, der zum Zeitpunkt der maximalen Konvergenzbeschleunigung, d. h. am Wendepunkt der Konvergenzrate, zwischen dem ersten und dem dritten Teilbereich auftritt, $\dot{\kappa}_{stat} = \dot{\kappa}_{II}(\dot{\kappa}_{II,max}) = \dot{\kappa}_{II}(\ddot{\kappa}_{II} = 0)$. Für die Auswertung der Berechnung wird die Zeitdauer des

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

stationären Bereichs (Teilbereich II) durch eine zulässige Abweichung von 20 % gegenüber dem stationären Wert der logarithmischen Konvergenzrate $\dot{\kappa}_{stat}$ definiert.

Die Veränderungen des Systemverhaltens, die den vier Teilbereichen zugeordnet sind, werden im folgenden beschrieben. Im Teilbereich I erfolgt eine Spannungumlagerung durch das viskoplastische Materialverhalten vom konturnahen Bereich auf das den Hohlraum umgebende Gebirge. Durch den damit verbundenen Abbau deviatorischer Spannungen fällt die Konvergenzrate kontinuierlich. Im daran anschließenden stationären Bereich findet nur noch eine geringe Spannungumlagerung statt. Die logarithmische Konvergenzrate ist weitgehend konstant und beträgt im Referenzfall ca. $2,2 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$, d. h. $7,0 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$, Anhang 1. Der Zeitbereich, in dem eine stationäre Konvergenzrate angenommen werden kann, erstreckt sich im Referenzfall auf die Dauer von ca. 100 a bis ca. 9.000 a nach Auffahrung der Strecke. Innerhalb dieser Zeitdauer hat sich die Referenzstrecke um ca. 80 % des Ausgangsquerschnittes geschlossen. Wie in der Darstellung der Querschnittsfläche in Abbildung 7 gezeigt ist, treten in diesem Zeitbereich bereits Kontakte auf, hier zwischen Sohle und Stoß. Am zeitlichen Verlauf der Konvergenzrate ist das Schließen solcher Kontakte erkennbar, erstmals bis ca. 3.000 a nach Hohlraumauffahrung. Im daran anschließenden Zeitbereich III steigt die Konvergenzrate zunächst auf Grund starker Veränderungen der Streckengeometrie ggf. mit geringen Störungen überlagert an, bis es zum ersten durch den Hohlraum durchgängigen Kontakt kommt. Im Referenzfall tritt dieser Kontakt zum Zeitpunkt von 14.500 a nach Hohlraumauffahrung zwischen Sohle und Firste auf, vgl. Abbildung 8. Mit diesem ersten Kontakt tritt eine signifikante Änderung des Systemverhaltens ein, da die verbleibende Abbaubreite innerhalb kurzer Zeit drastisch reduziert wird. Bis zum Zeitpunkt des weitgehend vollständigen Verschlusses verbleibt ein Resthohlraumvolumen, das sich vorzugsweise im Bereich der Firstwölbung konzentriert. Ist der Abbau sehr hoch im Verhältnis zur Abbaubreite, kann sich statt einer vertikalen Verbindung zwischen Firste und Sohle eine horizontale Verbindung zwischen den Stößen bilden, so dass sich nun die Restvolumina über Sohlenmitte und unterhalb der Firstmitte bilden. Unabhängig, ob der durchgängige Kontakt in horizontaler oder vertikaler Richtung auftritt, wird dieses Ereignis in Anhang 2 als „1. Kontakt“ bezeichnet. Dieser dritte Bereich wird mit dem weitgehend vollständigen Verschluss beendet, t_4 . Der Zeitpunkt für diesen weitgehend vollständigen Verschluss liegt im Referenzfall rechnerisch bei ca. 22.000 a nach Auffahrung, Anhang 2. Bereits zu diesem Zeitpunkt kann der Konvergenzprozess als abgeschlossen betrachtet werden. Die Rate der materiellen Konvergenz fällt auf einen sehr kleinen Wert, der in der Folgezeit gehalten wird, im Referenzfall z. B. rechnerisch ca. $6 \cdot 10^{-9} \text{ a}^{-1}$.

Für den Referenzfall wird überprüft, ob beim Verschließen einer Strecke bruchloses oder bruchhaftes Verhalten das System dominiert. Obwohl die Dilatanz- und Bruchbedingung vom physikalischen Verständnis her Bestandteil der Stoffgesetzformulierung sein müsste, von der eine Rückwirkung auf das Systemverhalten ausgeübt werden kann, erfolgt im vorliegenden Fall die Überprüfung des Bruchverhaltens im Anschluss an die Berechnung in einem Nachlaufprozess. Entsprechend muss ggf. von außen eine erforderliche Strukturveränderung vorgenommen wer-

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

den. Wie die nachfolgenden Ergebnisse zeigen werden, ist ein Eingriff in das Tragverhalten des Systems nicht erforderlich.

Zum Zeitpunkt der Streckenauffahrung wird praktisch im gesamten Konturbereich das Dilatanzkriterium erreicht. Entsprechend dem Abstand zwischen Dilatanz- und Bruchkriterium sind die Werte für das Spannungsverhältnis, das zur Überprüfung des Bruchkriteriums herangezogen wird, deutlich unter 1. Der Konturbereich ist beansprucht, mit einem unmittelbaren Löserfall der sich bildenden Abschaltungen ist jedoch nicht zu rechnen. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich bei dem Zustand zu diesem Zeitpunkt um eine rein elastische Reaktion auf die Auffahrung handelt. Im Anschluss setzt Kriechen ein und die Spannungsspitzen bauen sich ab. Entsprechend reduziert sich der Bereich, in dem das Dilatanzkriterium überschritten ist. Drei Monate nach der Auffahrung wird am Stoss und in der Firste das Dilatanzkriterium nicht überschritten, lediglich in einer Zone in der Sohle, die in der Nähe des Übergangs zum Stoß liegt, ergibt sich rechnerisch ein Wert von 1,07. In der Folgezeit steigt das Spannungsverhältnis, das zur Bewertung der Dilatanz herangezogen wird, geringfügig in der Firstmitte an und erreicht in Abhängigkeit von der Zeit rechnerisch den Ausnutzungsgrad 1, wobei anzumerken ist, dass im numerischen Modell die Firste im Mittelteil keine Wölbung aufweist. Mit weiterer fortschreitender Zeit kommt es auf Grund der Konvergenz der Strecke zum Kontakt zwischen Stoß und Sohle. Dadurch baut sich in diesem Kontaktbereich ein Druckzugangszustand auf, der rechnerisch zu weiter abnehmenden Werten in Bezug auf das Dilatanzkriterium führt. Die hier beschriebene Beanspruchung wird in der ersten Zonenreihe um die Hohlraumkontur erreicht, d. h. in einem Abstand von der Kontur von ca. 0,1 bis 0,2 m. Bereits in der nächsten Reihe, was einem Abstand des Zonenmittelpunktes von der Kontur von ca. 0,4 m entspricht, wird lediglich im Sohlenbereich für einen Zeitbereich ein Ausnutzungsgrad über 1 erreicht, so dass sich hier ein dilatanter Bereich bilden wird. Insgesamt lässt sich feststellen, dass für den Fall der Referenzstrecke das Dilatanzkriterium im die Strecke umgebenden Salz sowohl bei zeitlicher als auch bei räumlicher Betrachtung weitgehend unterschritten ist, lediglich in der Sohle wird zeitweise ein dilatanter Bereich ermittelt, Abbildung 12.

Die Bewertung des Spannungszustandes durch das Dilatanz- und das Bruchkriterium lässt sich für die Referenzstrecke wie folgt zusammenfassen. Das Bruchkriterium wird während des gesamten Betrachtungszeitraumes zu keinem Zeitpunkt verletzt. Im Hinblick auf das Dilatanzkriterium gibt es in der Sohle eine beanspruchte Zone. Hier wird es zu einer Auflockerung kommen. Unter dem Aspekt eines Verbruchs hat diese Auflockerung keine Bedeutung. Im Bereich der Firstmitte wird das Dilatanzkriterium gerade erreicht, allerdings ist bei der numerischen Modellbildung nur eine ebene Firste innerhalb der ersten drei Zonen ausgehend von der Symmetrieachse berücksichtigt worden. Die Möglichkeit einer lokalen Abschaltung kann daher nicht ausgeschlossen werden, über den Zeitpunkt des Ereignisses kann jedoch keine Angabe gemacht werden. Insgesamt kommt dem Verbruch bei der hier gewählten Streckengeometrie für einen Einzelhohlraum in einem Homogenbereich nur eine untergeordnete Bedeutung zu, das Systemverhalten wird durch bruchlose Verformungen beherrscht. Die Bewertung des Dilatanzkriteriums und des Bruchkriteriums ist auf den Einzelfall bezogen. Eine Übertragung auf andere Berechnungen ist nicht möglich.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	DBE
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

nungsvarianten ist nicht generell möglich, sondern hängt von der Vergleichbarkeit der Spannungsfelder ab, speziell wenn es sich um Abbausysteme handelt.

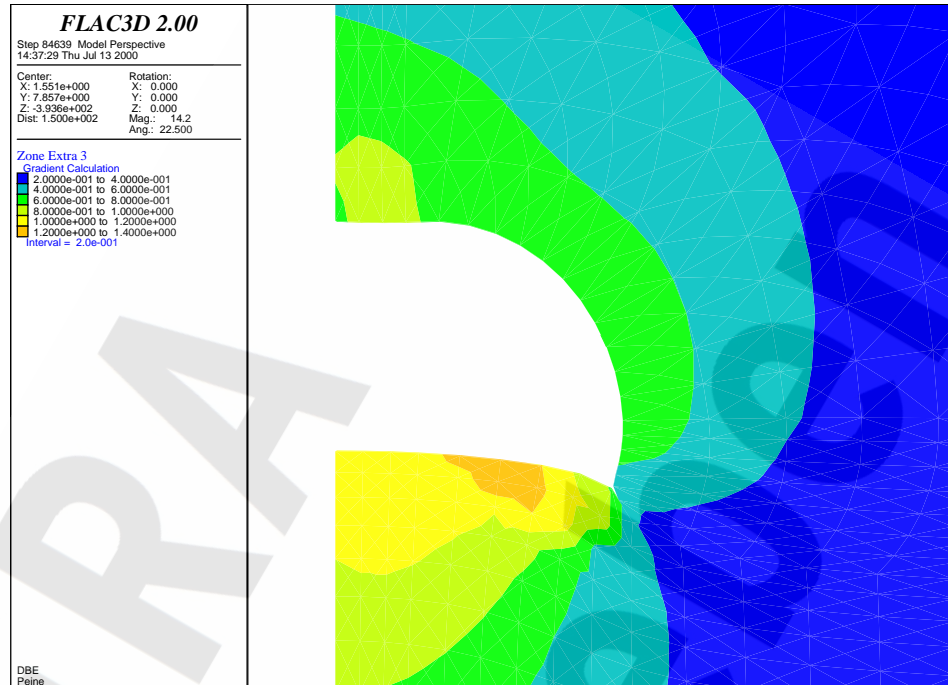


Abbildung 12: Ausnutzungsgrad auf der Basis des BGR-Dilatanzkriteriums zum Zeitpunkt 5000 a nach Hohlraumauffahrung

5.2.2 Stoffgesetz des Wirtsgesteins

Im Fall des Stoffgesetzes wird zum einen seine globale Auswirkung untersucht, in dem die Hohlraumauffahrung in unterschiedlich kriechfähigen Homogenbereichen untersucht wird, und zum anderen seine zonale Auswirkung, in dem Feuchtigkeit im konturnahen Bereich zu einer erhöhten Kriechrate des Materials führt.

Das Stoffverhalten des Steinsalzes im gesamten Homogenbereich wird für den Fall der trockenen Grube von dem die Kriechintensität beschreibenden Vorfaktor α beeinflusst und damit auch das Konvergenzverhalten einer Strecke. Der Einfluss des Vorfaktors auf das Konvergenzverhalten zeigt sich in Abbildung 13 und Abbildung 14 deutlich. Mit abnehmender Kriechfähigkeit schließt sich der Hohlraum später. Wie die charakteristischen Zeitangaben zeigen, Anhang 1 und Anhang 2, ist es im wesentlichen eine Zeittransformation, mit der die Ergebnisse der Konvergenz zwischen den einzelnen Berechnungsvarianten ineinander überführt werden können. Das Verhältnis der charakteristischen Zeitpunkte sowie das der stationären Konvergenzrate zwischen den Varianten entspricht dem reziproken Verhältnis der Vorfaktoren. Vor dem Hintergrund einer überwiegend viskoplastischen Deformation und unter der Voraussetzung, dass sich der durch die Auffahrung bedingte elastische Spannungszustand um den Hohlraum in den drei Va-

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341011					GH	BY	0004	00

rianten zunächst in gleicher Weise aufbaut, stellt das Verhältnis der Vorfaktoren des viskoplastischen Stoffgesetzes einen Skalierungsfaktor für das Zeitverhalten dar.

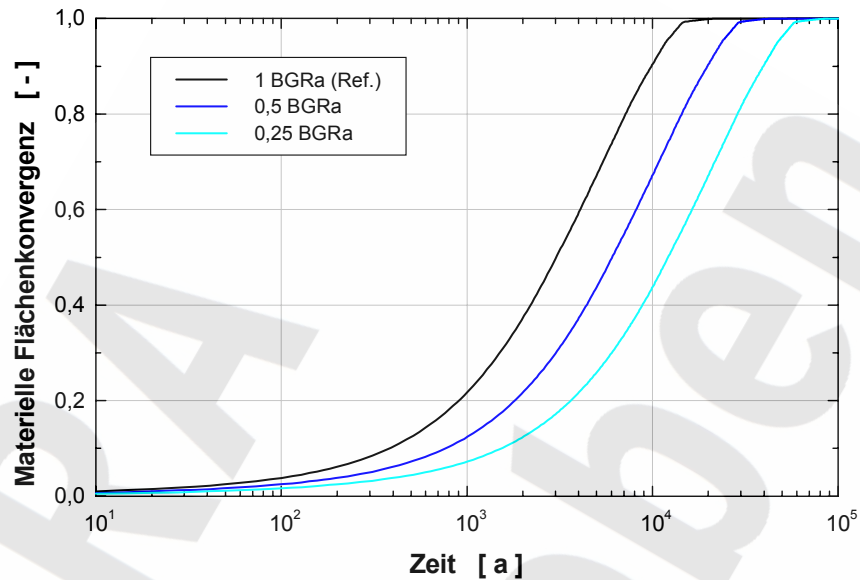


Abbildung 13: Materielle Konvergenz bei unterschiedlichen Vorfaktoren des Stoffgesetzes von Steinsalz

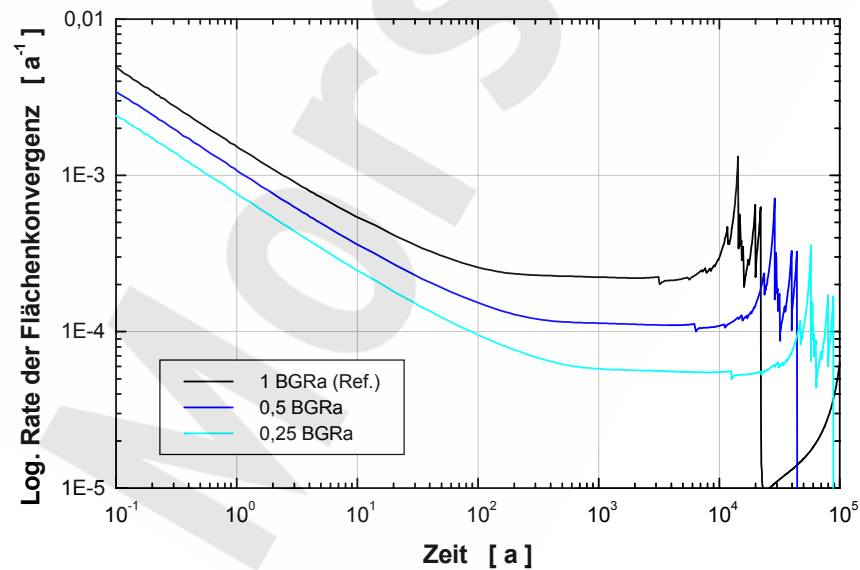


Abbildung 14: Logarithmische Konvergenzrate bei unterschiedlichen Vorfaktoren des Stoffgesetzes von Steinsalz

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00



Im Gegensatz zu den voranstehenden Untersuchungen werden im Fall des Feuchtekriechens nur die Zonen im unmittelbaren Nahbereich um die Strecke mit einem geänderten Vorfaktor α beaufschlagt, Abbildung 2 bis Abbildung 4. Wesentlich stärker als der maximale Vorfaktor des Stoffgesetzes macht sich die Größe des beeinflussten Gebietes bemerkbar, Abbildung 15. Im Fall eines 0,6 m breiten, von Feuchtigkeit beeinflussten Gebietes um die Hohlraumkontur ergibt sich nur eine geringfügig erhöhte Konvergenzrate gegenüber dem Referenzfall. Anzumerken ist, dass diese Berechnung zum Zeitpunkt 8000 a nach Hohlraumauffahrung beendet wurde, da durch die hohe Kriechfähigkeit des Materials in Verbindung mit Kontakt ereignissen eine irreguläre Zonengeometrie aufgetreten ist. Mit einer geänderten Diskretisierung lässt sich diese Variation jedoch auch bis zum Berechnungsende durchführen. Sowohl die stationäre Konvergenzrate als auch die weiteren charakteristischen Zeitpunkte befinden sich in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Referenzfalls, Anhang 1 und Anhang 2. Wird darüber hinaus noch berücksichtigt, dass sich die Dilatanzzone als notwendige Bedingung für das Eindringen von Feuchtigkeit rechnerisch nur für die erste Zonenreihe um die Kontur ergeben hat und einen etwas größeren Bereich unterhalb der Sohle, so zeigt sich, dass für eine Einzelstrecke mit der gewählten Geometrie im Homogenbereich das Feuchtekriechen nur eine untergeordnete Rolle spielt.

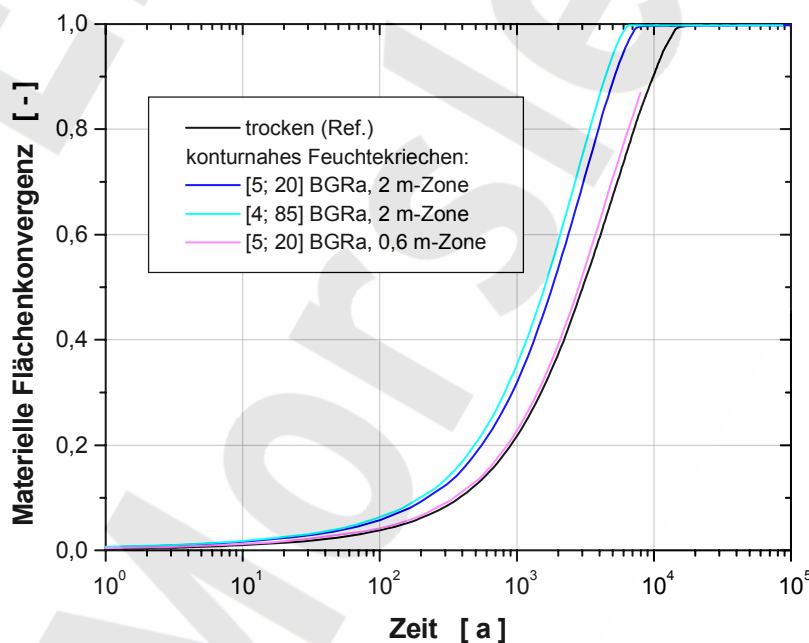



Abbildung 15: Materielle Konvergenz unter Einwirkung des Feuchtekriechens im Steinsalz

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

5.2.3 Querschnitt

Im Fall der Variationen zur Querschnittfläche wird untersucht, ob einerseits ein- oder zweiachsige Streckungen der Querschnittgeometrie und andererseits Vereinfachungen der komplexen Hohlraumgeometrie zu geometrischen Grundkörpern einen Einfluss auf das Konvergenzverhalten haben.

Die Berechnungen zur Variation der Querschnittabmessungen zeigen, dass besonders das spezifische Tragverhalten eines Streckenquerschnittes gegenüber dem auflastenden Gebirgsdruck das Konvergenzverhalten beeinflusst. Ausgehend vom Referenzfall werden in den folgenden Betrachtungen die Abmessungen von Streckenbreite und Streckenhöhe verändert. Dadurch ergibt sich für den Referenzfall und den großen Abbau eine vergleichbare Grundform, Abbildung 5. Da es sich bei der Konvergenz um eine durch die Querschnittfläche selbst normierte Größe handelt, macht sich der Einfluss einer rein geometrischen Vergrößerung nicht bemerkbar, Abbildung 16 und Abbildung 17.

Das sieht anders aus, wenn die Grundform in eine Richtung gestreckt wird. Im Fall des schmalen, hohen Abbaus ergibt sich eine abweichende Charakteristik im Vergleich mit der Konvergenzrate des Referenzfalls, Abbildung 17. Die stationäre Konvergenzrate wird nur im Sinn einer minimalen Konvergenzrate bestimmt. Näherungsweise wird der Wert des Referenzmodells bzw. der des geometrisch vergrößerten Abbaus erreicht. Da der Zeitverlauf der Konvergenzrate vom Referenzfall abweicht, unterscheiden sich die charakteristischen Zeitpunkte, Anhang 1 und Anhang 2. Der Zeitpunkt des Kontaktes, der in diesem Fall von den seitlichen Stößen ausgeht, wird deutlich früher als beim Referenzmodell erreicht. Durch das Zusammentreffen der Stöße ergibt sich eine Zweiteilung des verbleibenden Hohlraumes, bei der sich ein kleinerer Resthohlraum in dem dann von deviatorischen Spannungen weniger beanspruchten unteren Hohlraumteil ergibt und ein größerer Resthohlraum mit einer etwas höheren Beanspruchung im oberen Hohlraumteil. Wie die Abbildungen zeigen, erfolgt bereits von dem Zeitpunkt des ersten Kontaktes der Stöße an eine kontinuierliche Abnahme der Konvergenzrate mit einer geringen Störung durch die weitere Kontaktfindung. Aus Anhang 1 und Anhang 2 ist zu entnehmen, dass erst zum Zeitpunkt des gewählten Berechnungsendes von 100.000 a eine ähnlich hohe Konvergenz erreicht wird, wie er sich bei dem Referenzmodell bereits nach ca. 22.000 a ergibt.

Der breite, flache Abbau ist in dem hier betrachteten Kontext der geometrischen Variation das Beispiel mit der höchsten Konvergenzrate, Abbildung 17. Die Auflast aus dem Gebirge führt zu einer hohen vertikalen Konvergenz, so dass sich durch die kontinuierliche Bewegung eines weiten Teiles von Firste und Sohle die Strecke in zwei Resthohlräume im Bereich der Stoßwölbung teilt. Durch den signifikanten Abbau des Spannungsdeviators ist die erforderliche Zeitdauer zwischen dem Zeitpunkt für das Auftreten des ersten Kontaktes zwischen Sohle und Firste und dem Zeitpunkt der nahezu vollständigen Konvergenz in Relation mit den anderen Varianten groß, Anhang 1 und Anhang 2. Wird der absolute Zeitmaßstab zu Grunde gelegt, ist der Hohlraum jedoch sehr viel früher als die anderen vollständig geschlossen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341011					GH	BY	0004	00

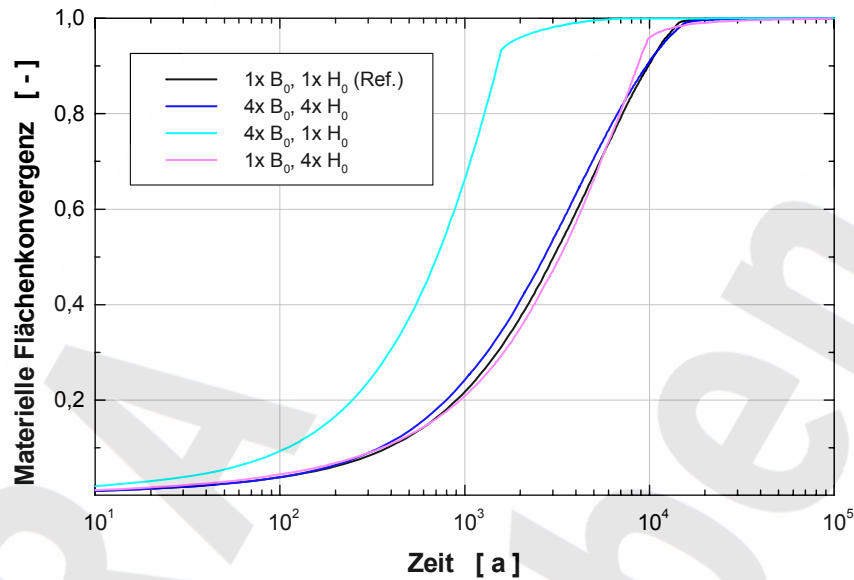


Abbildung 16: Materielle Konvergenz für unterschiedlich dimensionierte Abbaue

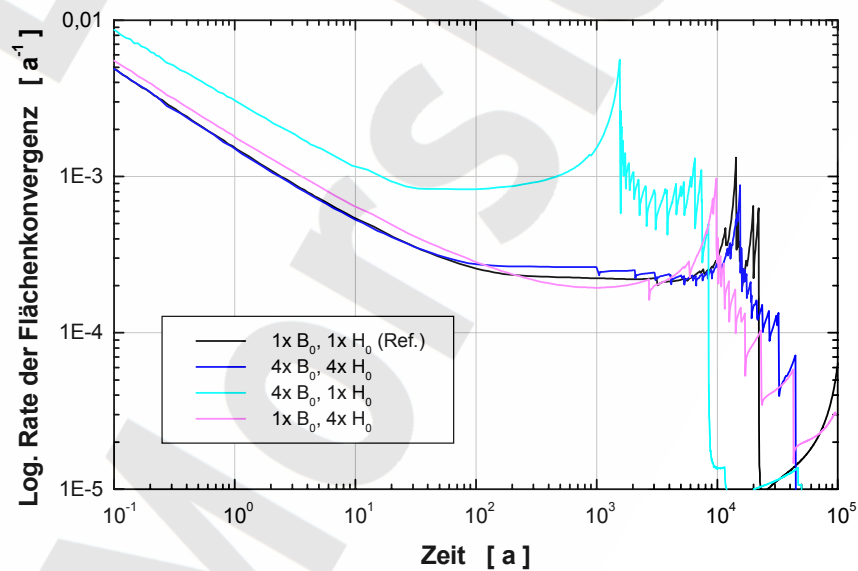


Abbildung 17: Logarithmische Konvergenzrate für unterschiedlich dimensionierte Abbaue

Im Hinblick auf die Variation der geometrischen Grundform beschreibt der Kreis ein System, für das im Sinn eines Spherical Void Models eine analytische Lösung verfügbar ist. In einem nahezu homogenen, nur von der Tiefe beeinflussten Spannungsfeld schließt sich die kreisförmige

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341011					GH	BY	0004	00

Strecke kontinuierlich von allen Seiten. Daher bleibt die Kreisgeometrie zu jedem Zeitpunkt erhalten. Insbesondere wird dadurch Kontakt mit den daraus resultierenden Störungen ausgeschlossen. Bei einem Kreisquerschnitt fehlen die Spannungskonzentrationen, z. B. im Übergangsbereich von Sohle zu Stoß oder in Folge einer gering gewölbten Firste. Dadurch liegt das deviatorische Spannungsniveau insgesamt niedriger als bei allen übrigen Querschnittformen eines offenen Hohlraums derselben Teufenlage. Die Konvergenzrate ist deshalb geringer und entsprechend ist zu einem vergleichbaren Zeitpunkt eine größere Querschnittfläche offen, Abbildung 18 und Abbildung 19. Die zeitliche Änderung der logarithmischen Konvergenzrate zeigt, dass es keinen stationären Bereich im Konvergenzverhalten gibt. Deshalb wird für diese Variante die stationäre Konvergenzrate in Anhang 1 durch den Wendepunkt charakterisiert. Sie wird zum Zeitpunkt von ca. 1000 a nach Hohlraumauffahrung erreicht.

Wird der Nahbereich um die Strecke eines Rechteckprofils betrachtet, zeigt sich für das Spannungsfeld ein in guter Näherung um zwei Achsen symmetrischer Zustand. Dementsprechend kommt es sowohl zwischen Sohle und Stoß als auch zwischen Stoß und Firste zum Kontakt. Als Folge davon bleibt die Querschnittsgeometrie von einer geringen Zipfelbildung in den Ecken abgesehen immer näherungsweise ein Rechteck. Durch die von den Ecken ausgehenden Spannungsspitzen ergibt sich zunächst eine geringfügig höhere stationäre Konvergenzrate als im Referenzfall. Mit dem Zusammentreffen von Sohle und Firste tritt jedoch eine deutliche Verringerung der Konvergenzrate ein, so dass das verbleibende Resthohlraumvolumen erst zu einem späteren Zeitpunkt als im Referenzfall vollständig verschlossen ist.

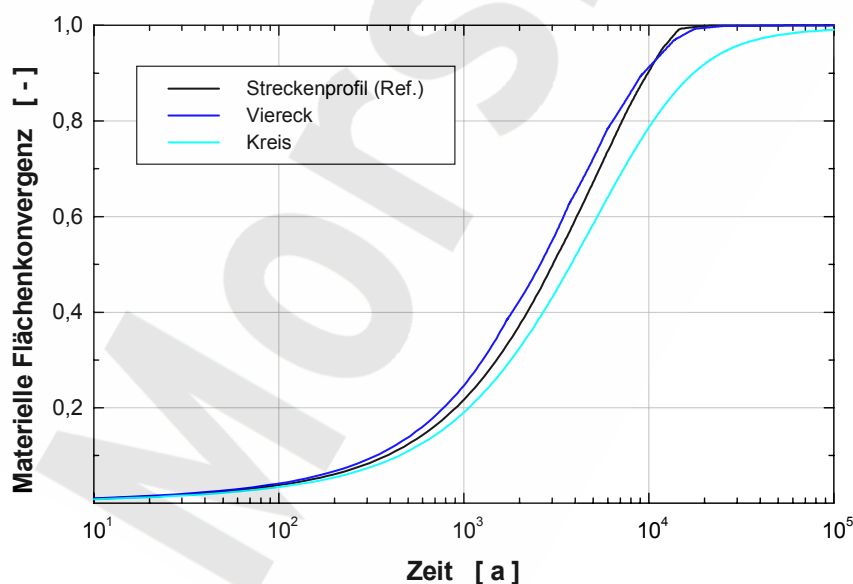


Abbildung 18: Materielle Konvergenz in Abhängigkeit der Geometrieform

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
9M	22341011					GH	BY	0004	00

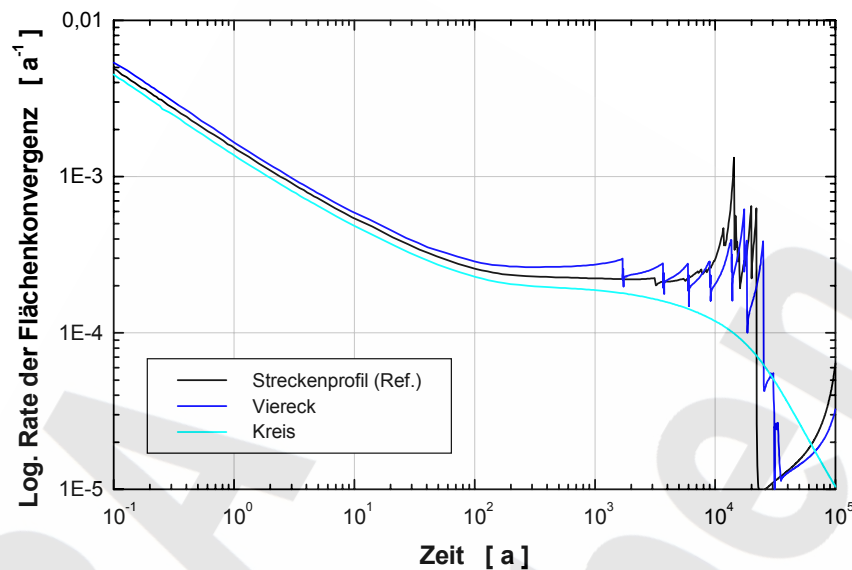


Abbildung 19: Logarithmische Konvergenzrate in Abhängigkeit der Geometrieform

5.2.4 Geometrische Einbettung

Die geometrische Einbettung wird einerseits durch die Teufenlage der Auffahrung und andererseits durch den Abstand zum Rand des numerischen Berechnungsgebietes bestimmt.

Die Teufenlage ist maßgebend für den Anfangsspannungszustand im Gebirge. Mit Abnahme des Teufendruckes reduziert sich die durch die Auffahrung induzierte deviatorische Spannung. Sie wiederum ist der Antriebsmotor für das Kriechen des Steinsalzes. Entsprechend verringert sich mit abnehmender Teufe die auflaufende Konvergenz, Abbildung 20. Im Rahmen der betrachteten Parametervariation liegt zwischen der maximalen und der minimalen stationären Konvergenzrate etwa eine Größenordnung, Anhang 1 und Abbildung 21.

Ausgehend von dem viskoplastischen Stoffgesetz ist es zunächst unerheblich, ob die sich ergebenden Deformationen aus einer Änderung des Vorfaktors α oder einer geänderten Effektivspannung herrührt. In Kapitel 5.2.2 ist auf die Skalierung der Zeit durch den Vorfaktor des viskoplastischen Stoffgesetzes eingegangen. Bei den Variationen innerhalb dieses Kapitels wird der Spannungseinfluss verändert. Wird die Effektivspannung über ihren Maximalwert in Form der elastischen Antwort eines dickwandigen Zylinders abgeschätzt, so ergibt sich daraus ein Verhältnis für die räumliche Kompaktionsrate $\dot{k}_{stat} / \dot{k}_{stat,Ref} |_{zyl.} = \left(h / h_{Ref} \right)^n$, wobei h die Höhe des auflastenden Gebirges ist und n der Spannungsexponent des viskoplastischen Stoffgesetzes für Steinsalz. Daraus ergibt sich für die Teufenlage -332 mNN ein Wert von 0,53 und für die Teufenlage -245 mNN ein Wert von 0,19. Das Verhältnis der stationären Kriechrate $\dot{k}_{stat} / \dot{k}_{stat,Ref}$

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00



ergibt für die Teufenlage -332 mNN einen Wert von 0,51 und für die Teufenlage -245 m NN einen Wert von 0,15. Werden die Ergebnisse aus der Teufenvariante -332 mNN mit der Stoffgesetzvariante ½ BGRa in Anhang 1 und Anhang 2 verglichen, zeigt sich eine gute Übereinstimmung in den charakteristischen Werten.

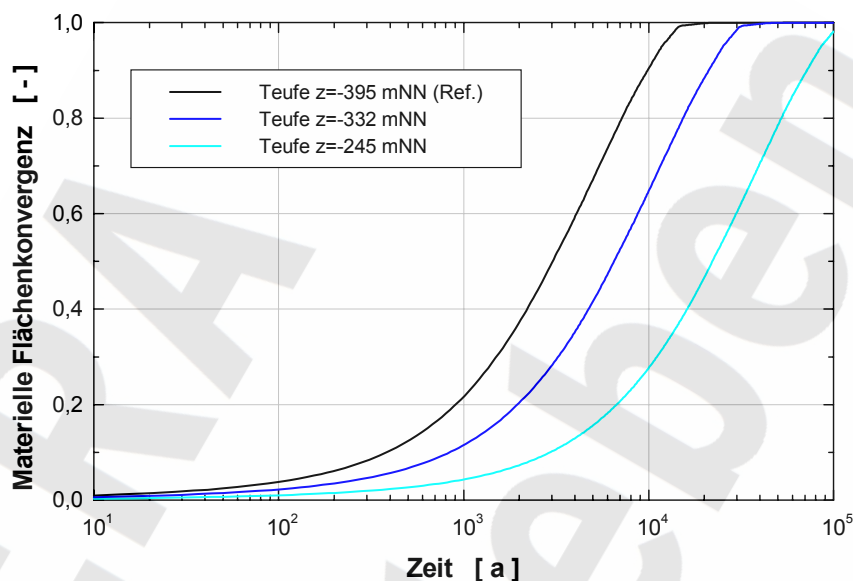


Abbildung 20: Materielle Konvergenz in Abhängigkeit von der Teufe

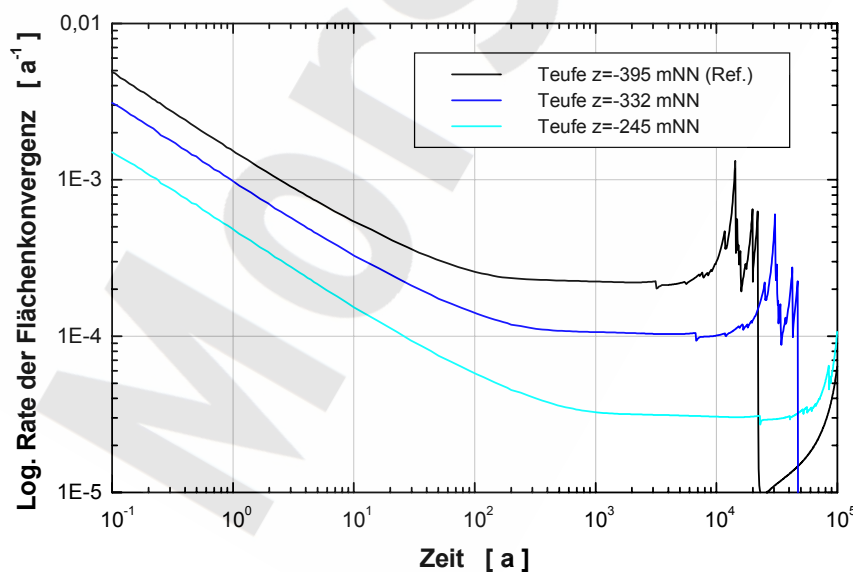


Abbildung 21: Logarithmische Konvergenzrate in Abhängigkeit von der Teufe

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00



Im folgenden werden die Auswirkungen von Rändern auf das Verhalten der Strecke betrachtet. Der Randabstand zur Strecke wird in Relation zur Streckengeometrie gewählt. Der Abstand zwischen dem unteren Berechnungsrand und der Streckensohle erfolgt im Verhältnis zur Streckenbreite und der Abstand zwischen dem Stoß und dem seitlichen Berechnungsrand in Abhängigkeit von der Streckenhöhe.

Unter dem Aspekt der räumlichen Lage eines Abbaus in einen realen Salzstock gewinnt die Frage des Einflusses geologischer Schichten mit steifem und wenig viskosem Materialverhalten an Bedeutung, weil sich in einem solchen Fall nur geringe Verschiebungen an dem Material ergeben. Als Modellannahme wurde im Fall eines seitlich nahen Randes angenommen, dass bis in eine Höhe von 10 m über der Firste keine Verschiebung möglich ist. Dadurch wird der Materialfluss von der Seite dieses Randes mit abnehmendem Randabstand des Hohlraumes beeinträchtigt, Abbildung 22. Ursache dafür ist ein Abfall des deviatorischen Spannungszustandes im Niveau der Strecke zum nahen Rand in Folge der Stützwirkung des Randes. Die Abnahme in der Konvergenzrate wird um so größer, je näher sich die Strecke am seitlichen Rand befindet. Als Folge davon schließt sich die Strecke in den einzelnen Varianten erst zu einem späteren Zeitpunkt weitgehend vollständig, als es im Referenzmodell der Fall ist. Trotz des verzögerten Schließens bleibt jedoch der charakteristische Verlauf in der Konvergenz bzw. deren Rate erhalten. Für einige ausgewählte Variationen der Randbedingungen ist in Abbildung 23 die logarithmische Konvergenzrate dargestellt.

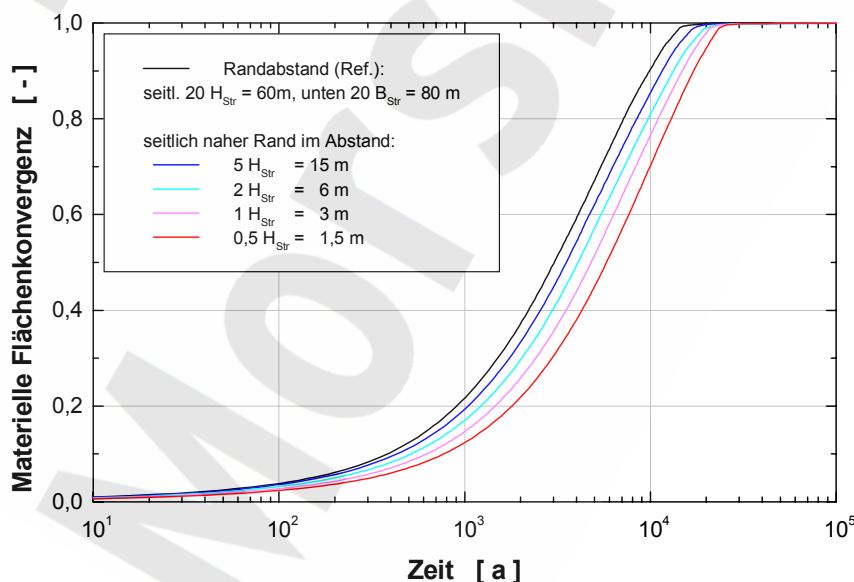


Abbildung 22: Materielle Konvergenz in Abhängigkeit eines einseitig seitlich nahen Randes

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00

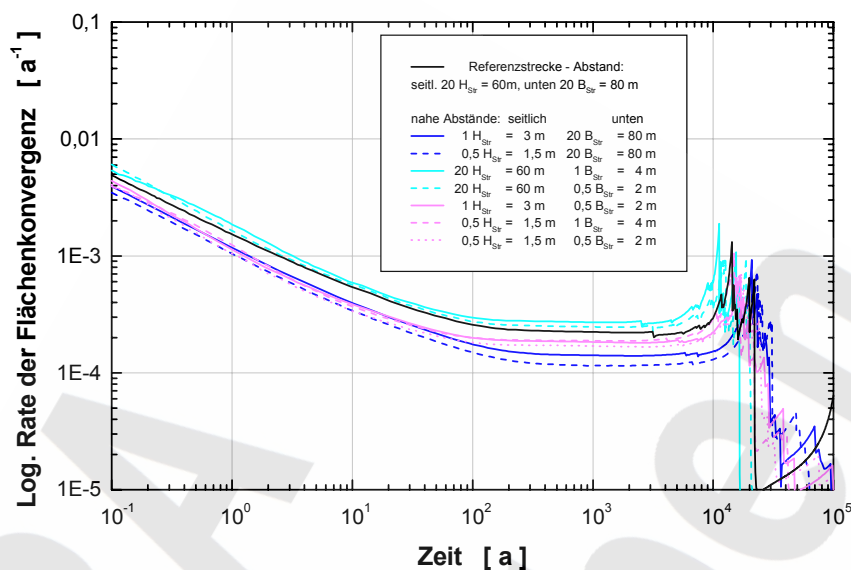


Abbildung 23: Logarithmische Konvergenzrate für ausgewählte Variationen der Randbedingungen

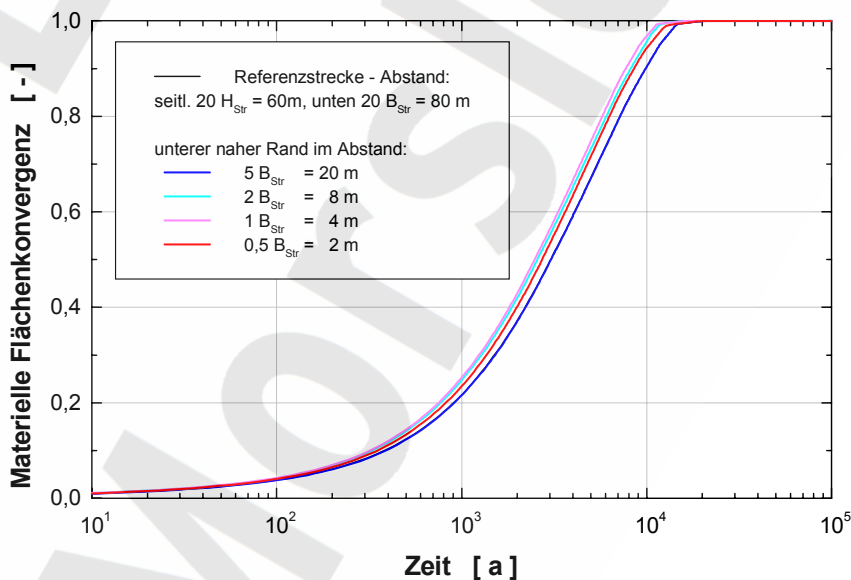


Abbildung 24: Materielle Konvergenz in Abhängigkeit des Streckenabstandes zum unteren Berechnungsrand

Im Fall eines einseitig unteren nahen Randes besteht für die Variante mit einem Randabstand des fünffachen der Streckenbreite keine signifikante Abweichung gegenüber dem Referenzmodell, Abbildung 24. Mit einem geringeren Randabstand erhöht sich zunächst die Konvergenzrate

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00



im gesamten Zeitbereich durch die Verringerung der horizontalen Steifigkeit in Folge der gewählten Randbedingung. Entsprechend früher schließt sich die Strecke. In der letzten Variante mit einem Randabstand von lediglich 2 m reduziert sich die Konvergenzrate dagegen wieder gegenüber einem Randabstand von 4 m. Ursache dafür ist die Abschirmung der Strecke durch ein Druckgewölbe, das auf dem unteren Rand aufsetzt und dadurch innerhalb der unmittelbaren Umgebung um die Strecke ein in der deviatorischen Spannung reduziertes Spannungsfeld erzeugt.

In der Kombination von zwei nahen Berechnungsrändern ergibt sich eine teilweise Kompensation der einander gegenläufigen Tendenzen aus der Abnahme der Konvergenzrate im Fall eines seitlich nahen Randes und der Zunahme im Fall eines unteren nahen Randes. In der Kombination überwiegt die Abnahme aus dem seitlich nahen Randeinfluss, Abbildung 25. Das charakteristische Verhalten aus dem Einfluss des unteren Randes bleibt jedoch erhalten, da erstens die stationäre Konvergenzrate aus der Kombination der beiden Ränder insgesamt höher ist als die Rate allein aus der Variation des seitlichen Randes bei gleichem seitlichen Randabstand und zweitens die stationäre Konvergenzrate im Fall der Randabstände $[0,5 H_0, 0,5 B_0]$ niedriger ist als bei den Randabständen $[0,5 H_0, 1 B_0]$, was dem in Abbildung 24 dargestellten Verhalten entspricht.

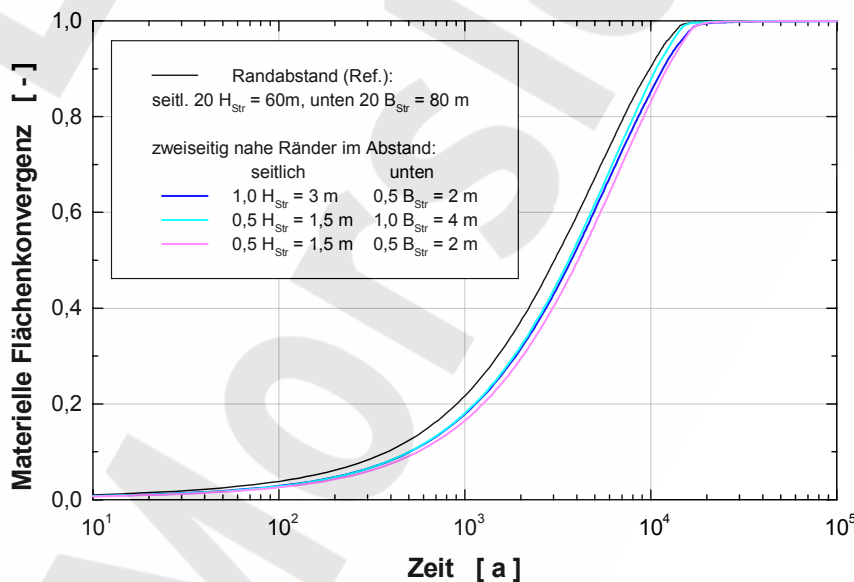


Abbildung 25: Materielle Konvergenz in Abhängigkeit des Streckenabstandes zu einem seitlichen und zum unteren Berechnungsrand

Insgesamt lässt sich feststellen, dass sich aus der Einbettung des Hohlraumes in seine Umgebung ein Einfluss auf die stationäre Konvergenzrate ergibt. Je näher der Rand am zu untersuchenden Hohlraum liegt, um so mehr ist mit einem Einfluss aus dem Rand zu rechnen. Dabei

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	DBE
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

hat sich gezeigt, dass ein seitlicher Randabstand in der Größe der fünffachen Streckenhöhe bereits Auswirkungen hat. Eine Tendenz für die Änderung in der stationären Konvergenzrate in einer komplexen Gesamtsituation muss jedoch am Einzelfall geprüft werden. Insgesamt beträgt die maximale Erhöhung der stationären Konvergenzrate im Rahmen der Variationen des Randes 1,2 und die größte aufgetretene Reduktion der stationären Konvergenzrate 0,5. Damit ist gezeigt, dass ein signifikanter Einfluss von den Rändern ausgeht. Es ist jedoch in jedem Einzelfall zu untersuchen, welches numerische Modell für den Rand anzusetzen ist und in welchem Umfang sich der Randeinfluss bemerkbar macht.

5.2.5 Verfüllung

Die Verfüllvarianten behandeln Zustände mit homogener, d. h. mit vom Material einheitlicher Vollverfüllung, und heterogener, d. h. mit vom Material geschichteter Vollverfüllung sowie die teilweise Verfüllung des Streckenquerschnitts mit einem festen Material. Im Rahmen der Vollverfüllung werden darüber hinaus Zustände mit flüssigem Versatz untersucht.

Versatzmaterial hat einen signifikanten Einfluss auf das Konvergenzverhalten einer Strecke. Wird der ursprüngliche Streckenquerschnitt betrachtet, kann durch den im Versatzmaterial vorhandenen Festkörperanteil für die materielle Konvergenz ein Wert von 1 nicht mehr erreicht werden. Vielmehr ist die Kompaktion, wie die Konvergenz einer Strecke mit vollständiger Verfüllung bei Bezug auf das Versatzmaterial auch bezeichnet wird, im Fall eines nicht-porösen, rein elastischen Versatzmaterials allein das Ergebnis des elastischen Materialverhaltens. Bei diesen Materialien zeigt sich der Einfluss des Kompressionsmoduls deutlich. Eine Kompaktion ist sowohl bei korrodiertem als auch bei nicht korrodiertem Salzbeton nur in einem sehr geringen Maß möglich, Abbildung 26. Um sie überhaupt in der Abbildung deutlich machen zu können, musste auch auf der Ordinatennachse eine logarithmische Einteilung gewählt werden. Zum Zeitpunkt des Berechnungsendes beträgt die Kompaktion 0,07 % für Salzbeton und 0,23 % für korrodierten Salzbeton. Aufgrund der Vollverfüllung reicht bereits eine geringe Kompaktion aus, um im Salzbeton auf Grund des hohen Kompressionsmoduls einen hohen Stützdruck zu erzielen. Bereits 3 Monate nach Hohlraumverfüllung beträgt der Stützdruck in den beiden Varianten des Salzbetons ca. 1,5 - 2 MPa.

Solange sich im Versatzmaterial kein Stützdruck entwickelt hat, kann der verfüllte Hohlraum frei konvergieren. Tritt zu einem späteren Zeitpunkt eine Stützwirkung ein, kann sich die Konvergenzrate gegenüber des unverfüllten Hohlraumes nur verringern. Daher kann unter dem Einsatz eines Vollversatzes höchstens die stationäre Konvergenzrate erreicht werden, die bei freier Konvergenz auftritt. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass die Stützwirkung vor Beginn des stationären Bereiches eintritt, wie es bei freier Konvergenz der Fall ist Abbildung 27. Mit dem durch die Konvergenz weiter ansteigenden Druck im Versatzmaterial existiert kein Zeitbereich mit stationärer Konvergenzrate. Die logarithmische Konvergenzrate ist in allen hier betrachteten Varianten der Vollverfüllung eine streng monoton fallende Funktion. Auf Grund der Vollverfüllung

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341011					GH	BY	0004	00



gibt es im vorliegenden Berechnungsmodell keinen verbleibenden Resthohlraum und Störungen aus Kontakt ereignissen können in der numerischen Berechnung nicht auftreten.

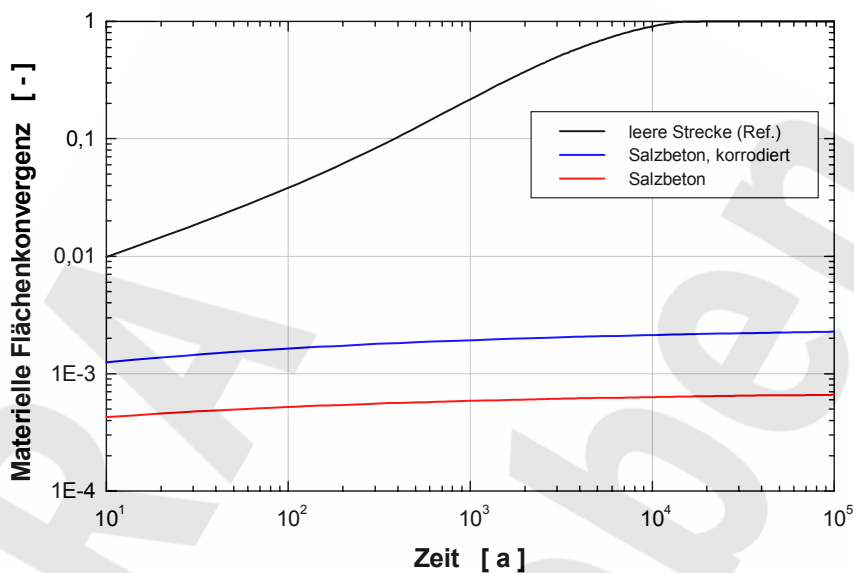


Abbildung 26: Materielle Konvergenz in Abhängigkeit des Versatzmaterials bei Vollverfüllung

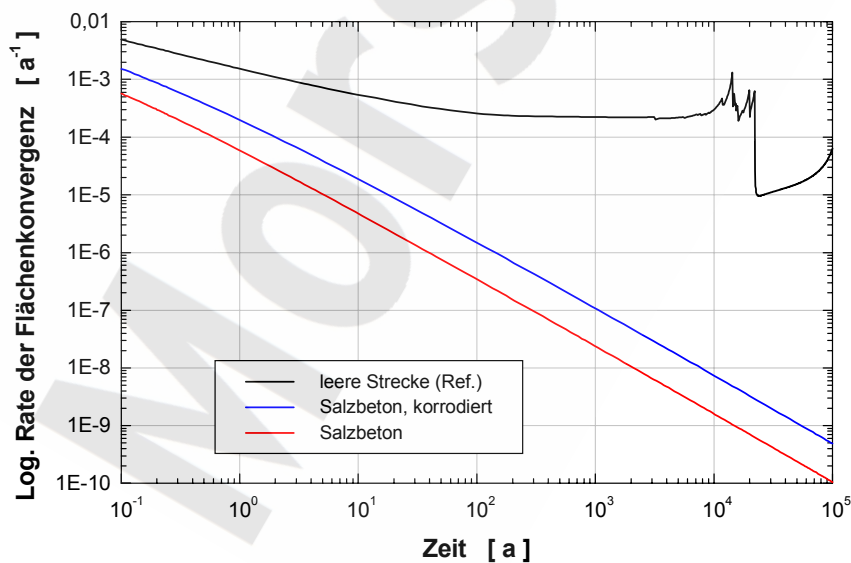



Abbildung 27: Logarithmische Konvergenzrate in Abhängigkeit des Versatzmaterials bei Vollverfüllung

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Wird in der numerischen Berechnung ein Stoffgesetz für das Versatzmaterial verwendet, das die Porosität explizit enthält, wie es im Modell CWIPP entsprechend Kapitel 3.1.3 für die Modellierung von Salzgrus der Fall ist, kann höchstens eine Kompaktion von der Größe der Anfangsporosität erreicht werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich das Feststoffvolumen während des Kompaktionsprozesses nicht ändert, d. h. dass elastische Änderungen am Korngerüst unberücksichtigt bleiben. Für die hier berechneten Varianten einer Verfüllung mit Salzgrus beträgt die Anfangsporosität 31 %. Der zeitliche Verlauf der Konvergenz ist in Abbildung 28 und der der Konvergenzrate in Abbildung 29 dargestellt. Auf das in den Abbildungen dargestellte Verhalten bei Teilversatz wird weiter unten eingegangen.

Bereits aus den experimentellen Daten ergibt sich, Abbildung 6, dass sich trockenes Salzgrus weniger viskos verhält als feuchtes. Die Stützwirkung aus dem Versatz setzt ca. 40 a nach der Verfüllung ein und ist in ihrer Entwicklung bis ca. 1000 a nach Verfüllung unabhängig vom Feuchtigkeitseinfluss auf das Versatzmaterial, Abbildung 29. Doch sowohl bei einer Verfüllung mit feuchtem Salzgrus als auch bei einer mit trockenem Salzgrus ergibt sich rechnerisch eine vollständige Kompaktion des vorhandenen Porenraumes. Entsprechend dem unterschiedlichen Kompaktionsverhalten wird die vollständige Kompaktion des Salzgruses bei einer Verfüllung mit feuchtem Salzgrus etwas eher erreicht als im Fall eines trockenen Salzgrus-Versatzes. Einige weitere Daten, die sich aus dem Kompaktionsprozess ergeben, sind in Tabelle 5 angegeben. Insgesamt sind es die gemittelte Porosität zum Zeitpunkt 1000 a nach Verfüllung $\eta_{t=1000 a}$, der Zeitpunkt bei Erreichen einer Restporosität von 1 % im Salzgrus $t_{\eta=1 \%}$ sowie der rechnerische Zeitpunkt der vollständigen Kompaktion des Porenraumes $t_{\eta=0 \%}$ angegeben. Die angegebene Porosität ergibt sich aus der über den gesamten mit Salzgrus verfüllten Bereich gemittelten Porosität. Der Ausgangspunkt für die Kompaktion ist die Streckenkontur. Es zeigt sich, dass bei der gewählten Streckengeometrie die Kompaktion im sohlennahen Stoßbereich am höchsten ist. Die jeweils geringste Kompaktion im Salzgrus ergibt sich im Bereich unterhalb der Firste.

	$\eta(t=1000 a)$ [-]	$t(\eta=1 \%)$ [a]	$t(\eta=0 \%)$ [a]
100 % Salzgrus feucht	15,7	2.500	3.000
100 % Salzgrus trocken	15,9	4.000	5.000
50 % Salzgrus trocken, 50 % Salzbeton	16,3	4.800	35.000
70 % Salzgrus trocken, 30 % Salzbeton	17,2	5.200	> 100.000 ¹⁾

1): Vollständige Kompaktion außerhalb des Berechnungszeitraumes

Tabelle 5: Porosität im Salzgrus zu ausgewählten Zeitpunkten

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341011					GH	BY	0004	00

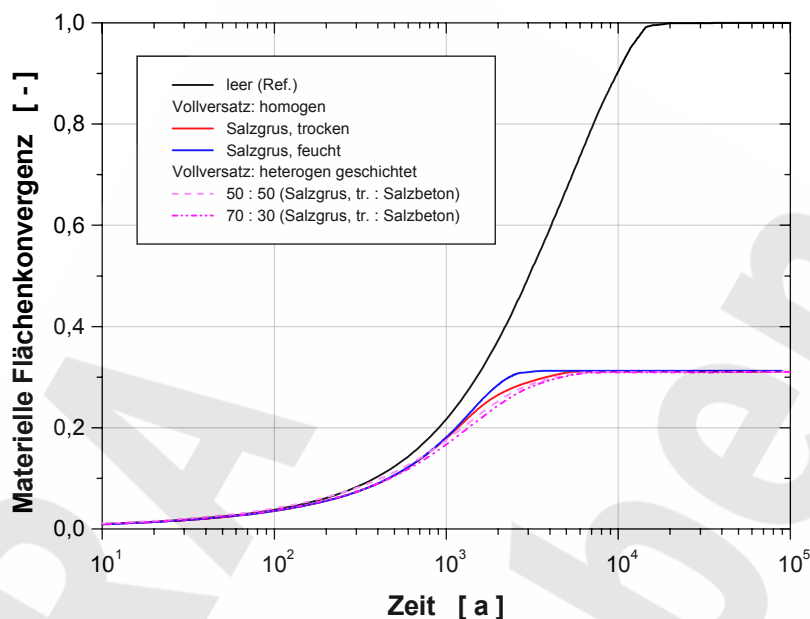


Abbildung 28: Materielle Konvergenz der Referenzstrecke und Kompaktion des Salzgrusanteils bei unterschiedlicher Verfüllung mit Salzgrus

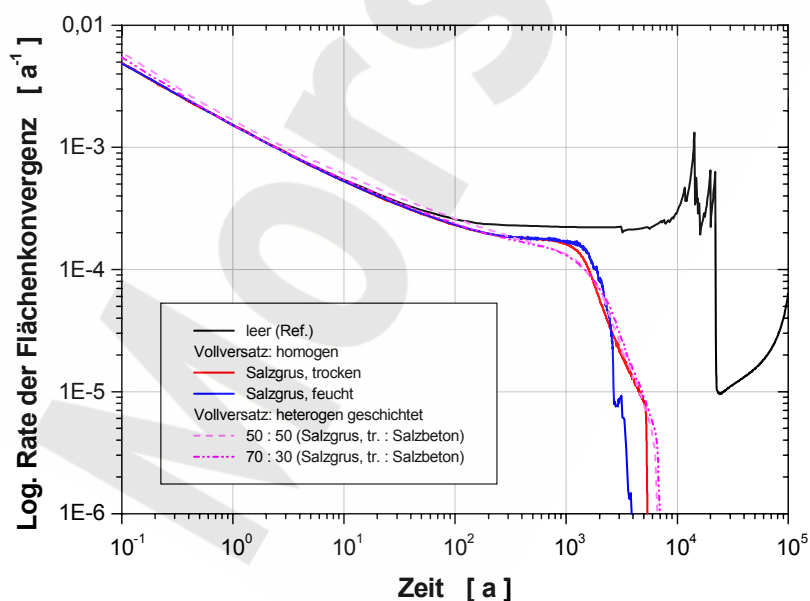



Abbildung 29: Logarithmische Konvergenzrate des Salzgrusanteils bei Verfüllung mit Salzgrus

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Die materielle Bezugsgröße im Fall der Referenzstrecke ist die anfängliche Querschnittfläche der Strecke. Diese Hohlraumfläche kann durch die Konvergenz geschlossen werden. Wird an die Stelle der gesamten Querschnittfläche als korrespondierendes Maß für das Leervolumen eines porösen Versatzmaterials das Porenvolumen gewählt, ergibt sich der Zusammenhang zwischen der materiellen Konvergenz einer mit Salzgrus gefüllten Fläche und der materiellen Konvergenz des Porenanteils dieser Fläche K_P zu $K_P = K / \eta_0$. Wie im Fall der vollständigen Konvergenz des unverfüllten Streckenquerschnitts beträgt der Endwert bei vollständiger Kompaktion des Porenvolumens im materiellen Bezugssystem 1. Diese Reparametrisierung der Kompaktion des Salzgrus auf die Größe des Porenvolumens ist in Abbildung 30 im Vergleich mit Abbildung 28 und für die Konvergenzrate in Abbildung 31 im Vergleich mit Abbildung 29 dargestellt.

Besonders in diesen reparametrisierten Darstellungen wird erkennbar, dass sich das verfügbare Porenvolumen deutlich schneller schließt als die leere Strecke im Referenzfall. Im Vergleich zwischen einer Verfüllung mit feuchtem und mit trockenem Salzgrus zeigt sich, dass sich erst nach ca. 1000 a ein Unterschied aus der Stützwirkung des Versatzes ergibt. Der Stützdruck baut sich von den Stößen her im Versatz auf. Zum Zeitpunkt 1000 a nach Verfüllung beträgt der hydrostatische Druck im Salzgrus direkt am Stoß oberhalb der Sohle 3 bis 5 MPa, im Kernbereich des trockenen Salzgrus ist der Stützdruck um ca. 1 bis 2 Größenordnungen niedriger als am Stoß, im feuchten Versatz sogar bis zu 3 Größenordnungen niedriger. Dass trotz einer schnellen vollständigen Kompaktion des Salzgrus das Spannungsfeld auch zu einem Zeitpunkt von 5000 a nach Hohlraumverfüllung noch nicht ausgeglichen ist, zeigt der hydrostatische Druck. Er betrug im trockenen Salzgrus ca. 5 MPa und im feuchten ca. 6 MPa.

Wird als Bezugsgröße für die logarithmische Konvergenzrate das aktuelle Volumen der mit Salzgrus gefüllten Strecke gewählt, ergibt sich wie für die elastischen Versatzmaterialien eine streng monoton fallende logarithmische Konvergenzrate, Abbildung 29. Wird dagegen als Bezugsgröße das aktuelle Porenvolumen gewählt, bildet sich ein Bereich mit stationärer Konvergenzrate heraus, Abbildung 31. Durch die vollständige Kompaktion des Salzgrus geht das Porenvolumen gegen 0 und entsprechend tendieren die logarithmischen Konvergenzraten bei Bezug auf das Porenvolumen gegen große Werte. Der Abbruch der in Abbildung 31 dargestellten Verläufe ist das Ergebnis der vollständigen Kompaktion des Salzgrus.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341011					GH	BY	0004	00

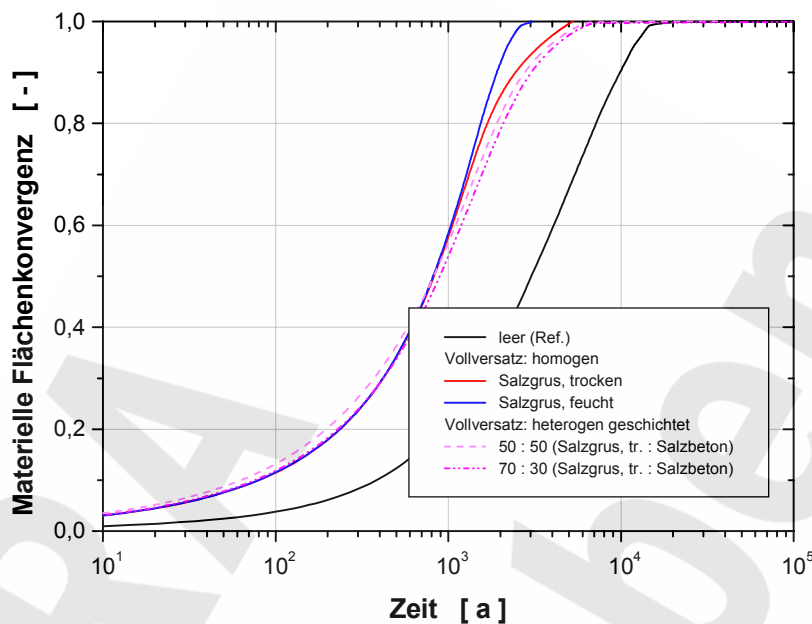


Abbildung 30: Materielle Konvergenz des Porenraums bei Verfüllung mit Salzgrus

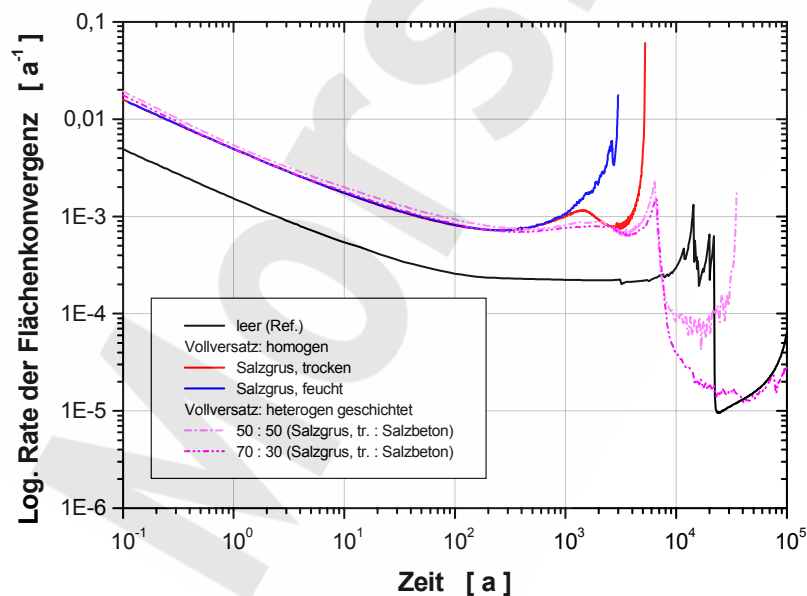




Abbildung 31: Logarithmische Konvergenzrate des Porenraums bei Verfüllung mit Salzgrus

	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
	N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
	9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Es sind zwei Varianten zur Vollverfüllung mit heterogener Materialverteilung in der Strecke untersucht worden. Der Anteil an trockenem Salzgrus im unteren Streckenteil beträgt in der ersten Variante 50 % und in der zweiten 70 %, der Rest der Querschnittsfläche ist mit unkorrodiertem Salzbeton aufgefüllt. Bei den Ergebnissen in Abbildung 26 und Abbildung 27 zu den voll verfüllten Varianten muss angemerkt werden, dass die Konvergenz der Strecke bei einer Vollverfüllung mit Salzbeton aus dem elastischen Materialverhalten resultiert, wohingegen der Porenraum des Salzgrus tatsächlich konvergiert. Die graphische Darstellung der Ergebnisse zur heterogenen Verfüllung in der Abbildung 28 bis Abbildung 31 bleibt daher auf das Konvergenzverhalten des Salzgruses beschränkt. Wie die Ergebnisse aus der Teilverfüllung noch zeigen werden, gibt es mit dem Geometrieinfluss für das Höhen-Breitenverhältnis des komprimierbaren Streckenanteil und dem Steifigkeitseffekt aus dem eingebrachten Salzbeton zwei miteinander konkurrierende Effekte im Hinblick auf eine Veränderung der stationären Konvergenzrate. Bei den hier betrachteten Verfüllanteilen der einzelnen Versatzmaterialien überwiegt die stützende Wirkung des Salzbetons, indem der Zeitpunkt einer vollständigen Kompaktion im Salzgrusanteil zu einem späteren Zeitpunkt erreicht wird, als bei einer reinen Verfüllung mit Salzgrus, Tabelle 5, Abbildung 28 und Abbildung 30. Die mit 50 % Salzgrus verfüllte Strecke weist gegenüber allen anderen mit Salzgrusverfüllung berechneten Varianten im Zeitbereich bis ca. 700 a nach Hohlraumverfüllung eine geringfügig höhere Konvergenzrate auf. Dieser Effekt kann bereits seine Ursache in dem Höhen-Seitenverhältnis der mit Salzgrus verfüllten Teilfläche haben. Wie die erreichte Porosität nach 1000 a zeigt, Tabelle 5, sind die Auswirkungen gering. So gibt es auch nur geringe Unterschiede im Zeitpunkt, zu dem eine Restporosität von 1 % im Versatzmaterial erreicht wird. Dagegen treten große Unterschiede in der Zeitdauer bis zum Erreichen des rechnerischen Zeitpunktes einer vollständigen Kompaktion des Salzgruses auf, die für die heterogenen Verfüllvarianten bei deutlich späteren Zeitpunkten als bei einer homogenen Verfüllung liegen. Zum einen kann die Ursache in der Bewegungsbehinderung für das kriechende Salz in dem eingebrachten Salzbeton gesehen werden, da sich unterhalb der Betonsohle ein Bereich mit höherer Porosität bildet, zum anderen macht sich der Einfluß der Diskretisierung und der Modellbildung am Übergang von Steinsalz, Salzgrus und Salzbeton bemerkbar. Eine zahlenmäßige Angabe für das reale Verhalten kann die numerische Berechnung auf Grund der unterschiedlichen Modellgenauigkeiten nicht liefern, sondern sie gibt als Tendenz den Einfluß der unterschiedlichen Varianten im Hinblick auf die vollständige Kompaktion an. Es bleibt daher festzuhalten, dass, falls die vollständige Kompaktion des porösen Materials innerhalb kurzer Zeit gefordert wird, für die Resthohlraumverfüllung ein Material mit geringerer Steifigkeit besser geeignet ist.

Im folgenden werden die Varianten der Teilverfüllung des Hohlraumes mit korrodiertem und nichtkorrodiertem Salzbeton beschrieben. Aus der Teilverfüllung ergeben sich zwei Aspekte: Die Änderung der Resthohlraumgeometrie und Änderung des Systemtragverhaltens. Das geänderte Systemtragverhalten macht sich in zwei Effekten bemerkbar. Je nach Materialeigenschaft des Versatzmaterials wirkt das Verfüllmaterial bereits wie eine Biegeversteifung gegenüber der sich aufwölbenden Sohle, so dass die freie vertikale Konvergenz von der Sohle her behindert wird. Darüber hinaus entwickelt der Teilversatz wie im Fall der Vollverfüllung durch seine horizontale Einspannung eine Stützwirkung, indem in Folge der Kompaktion des Teilversatzes an der Kon-

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

tur ein Gegendruck gegenüber dem Gebirgsdruck aufgebracht wird, was ebenfalls zu einer verringerten Konvergenzrate führt. Der rein geometrische Aspekt bei einer Teilverfüllung ergibt sich aus dem gegenüber dem ursprünglichen Hohlraum veränderten Höhen-Seitenverhältnis des oberhalb des Versatzkörpers verbleibenden Resthohlraums. Dieses Höhen-Seitenverhältnis verschiebt sich mit zunehmendem Verfüllgrad immer mehr in Richtung eines breiten, flachen Hohlraumes.

Der Einfluss eines in seinen Abmessungen geänderten Streckenquerschnittes ist bei den Variationen der Querschnittabmessungen in Kapitel 5.2.3 untersucht worden. Die zur Geometriebeschreibung wesentliche Kennziffer, das Höhen-Seitenverhältnis, wird im vorliegenden Fall durch die verbleibende Firsthöhe und die Sohlenbreite an der Oberfläche des Versatzmaterials bestimmt. In Tabelle 6 sind die Werte des Höhen-Seitenverhältnisses des verbleibenden offenen Querschnittes für die untersuchten Varianten aufgelistet, die sich im Fall der Querschnittvariation und den hier untersuchten Teilverfüllungen ergeben. Bei den Varianten der Teilverfüllung treten in einem sehr viel größerem Maß flache, schmale Hohlräume auf als es bei den unverfüllten Hohlräumen der Fall ist. Auch wenn im folgenden die Bezeichnung für die Teilverfüllung beibehalten wird, konnten im Rechenmodell auf Grund der Diskretisierung nur die folgenden Verfüllstufen erreicht werden: 54,3 %, 71,4 %, 86,9 % und 93,9 %.

Querschnittvariation	H : B
$4 H_0 : B_0$	3
$H_0 : B_0 = 4 H_0 : 4 B_0$	0,75
$H_0 : 4 B_0$	0,1875

Teilverfüllung	H : B
50 %	0,317
70 %	0,222
85 %	0,1803
95 %	0,0635

Tabelle 6: Höhen-Seitenverhältnis bei den Querschnittvariationen gemäß Kapitel 5.2.3 und den Varianten der Teilverfüllung zusammen mit dem jeweiligen Versatzmaterial

Wird das Höhen-Seitenverhältnis einer Teilverfüllung von 50 % auf eine offene Strecke mit der Referenzhöhe übertragen, so entspricht das einem Höhen-Seitenverhältnis $H : B = H_0 : 2,4 B_0$. Obwohl damit ein relativ breiter Hohlraum vorliegt, ist die eintretende stationäre Konvergenzrate des Resthohlraumvolumens mit $1,8 \cdot 10^{-4} a^{-1}$ geringer als im Referenzfall mit $2,2 \cdot 10^{-4} a^{-1}$, Anhang 1 und Abbildung 32. Da nur das Resthohlraumvolumen betrachtet wird, ist die Bezugsgröße der Konvergenzgröße in diesem Fall nicht der gesamte Streckenquerschnitt sondern nur der unverfüllt verbleibende Raum. Der Versatz behindert trotz freier Bewegung der Firste in einem gewissen Umfang die Konvergenz, da sich bereits zum Zeitpunkt 3 Monate nach Hohlraumverfüllung im Randbereich des Versatzkörpers zum umgebenden Steinsalz ein hydrostatischer Druck von 3 MPa bis 5 MPa eingestellt hat. Zwischen den beiden Betonvarianten ergeben sich dabei keine signifikanten Unterschiede. Wie beim leeren Hohlraum sich mit abnehmendem Höhen-

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341011					GH	BY	0004	00

Seitenverhältnis die Konvergenzrate erhöht, steigt auch mit zunehmender Teilverfüllung die Konvergenzrate des verbleibenden Resthohlraumvolumens, Anhang 1 und Abbildung 32.

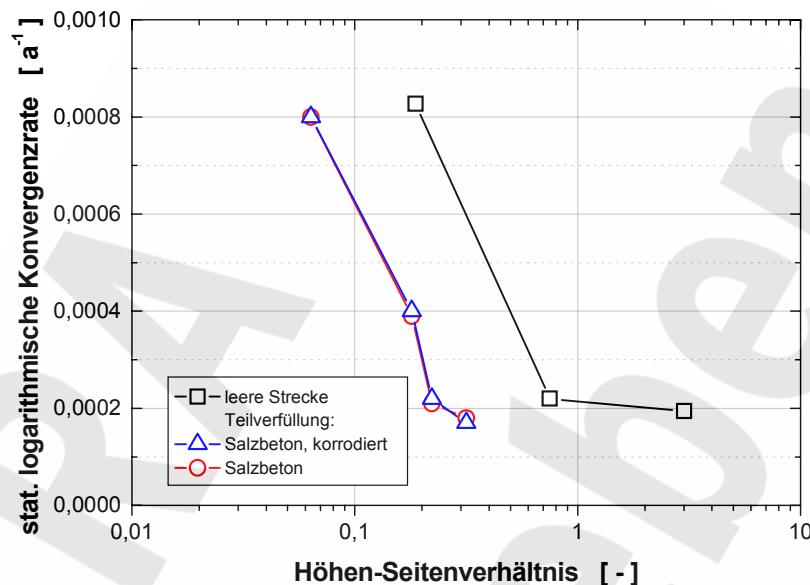


Abbildung 32: Einfluss des Höhen-Seitenverhältnisses des Resthohlraumes bei unterschiedlichem Versatzmaterial auf die stationäre Konvergenzrate des offenen Hohlraumes

Der zeitliche Verlauf der materiellen Flächenkonvergenz aus den Varianten mit 95 % Teilverfüllung ist mit dem des Referenzfalls in Abbildung 33 dargestellt. Im Fall des zu 95 % mit Salzbeton verfüllte Hohlraums beträgt die stationäre Konvergenzrate $8,0 \cdot 10^{-4} a^{-1}$ und ist damit signifikant höhere als die stationäre Konvergenzrate im Referenzfall mit $2,2 \cdot 10^{-4} a^{-1}$. Entsprechend schließt sich der Resthohlraum der teilverfüllten Variante in kürzerer Zeit weitgehend. Nachdem sich die Firste auf den Betonkörper aufgelegt hat, verbleibt jedoch im stoßnahen Bereich der Firstwölbung ein Resthohlraum von zunächst ca. 5 % des anfänglichen Resthohlraumvolumens, welches dann bis zum vollständigen Verschließen einen sehr viel höherer Zeitbedarf erfordert als im Referenzfall. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die materielle Konvergenz ein relativer Wert ist: 5 % des Ausgangsvolumens bei einem zu 95 % teilverfüllten Hohlraum sind 0,25 % des vor der Verfüllung vorhandenen Hohlraumvolumens, im Referenzfall beziehen sich 5 % dagegen unmittelbar auf das ursprüngliche Volumen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341011					GH	BY	0004	00

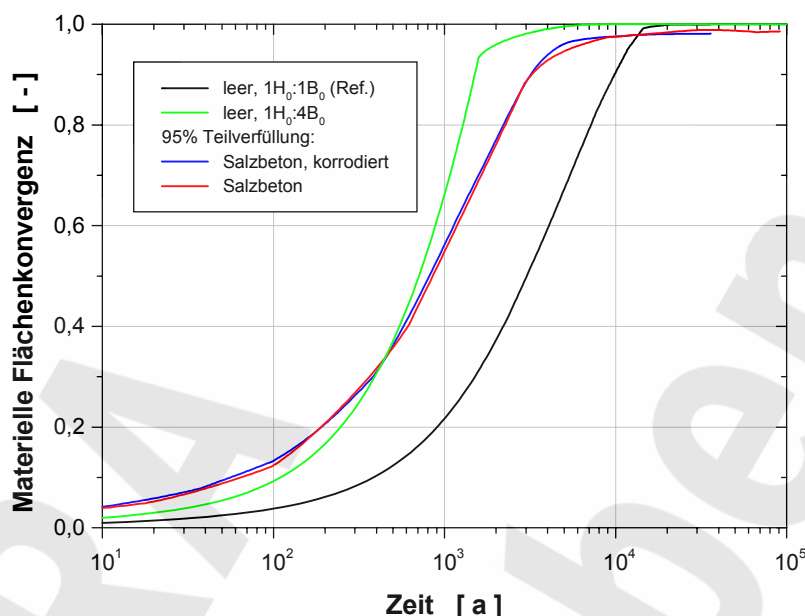


Abbildung 33: Materielle Konvergenz des Resthohlraumvolumens bei einer Teilverfüllung mit 95 % für unterschiedliche Versatzmaterialien

Der Einfluss des Verfüllgrades ω auf die Konvergenzrate und speziell den in der Langzeitsicherheit eigentlich relevanten Volumenstrom soll im folgenden noch einmal näher beleuchtet werden. Dazu wird von der vereinfachenden Annahme ausgegangen, dass allein die stationäre Konvergenzrate den gesamten Konvergenzprozess beschreibt. Mit dieser Annahme und mit Hilfe der in Tabelle 1 gegebenen Definitionen für die mathematische Beschreibung der Größen ergibt sich der Volumenstrom aus dem Resthohlraum, gekennzeichnet durch den Index R, zu

$$\dot{V}_R = \dot{\kappa}_{R,stat} V_R = \dot{\kappa}_{R,stat} (1 - K_R)(1 - \omega)V_0 = \dot{K}_R (1 - \omega)V_0 \quad (11)$$

Die stationäre Konvergenzrate ist unabhängig von der Zeit, aber sowohl das aktuelle Resthohlraumvolumen als auch die materielle Konvergenz und deren Zeitableitung sind von der Zeit und ggf. von der stationären Konvergenzrate abhängig. Unter den vereinfachenden Annahmen ergibt sich die materielle Konvergenz des Resthohlraumes zu

$$K_R = 1 - \frac{1}{e^{\dot{\kappa}_{R,stat} \cdot t}}$$

In Abbildung 32 ist die stationäre Konvergenzrate in Abhängigkeit des Höhen-Seitenverhältnisses graphisch dargestellt, so dass sich die Abhängigkeit vom Verfüllgrad nur mittelbar ergibt. In Tabelle 7 ist diese stationäre Konvergenzrate des Resthohlraumes in Abhängigkeit der Verfüll-

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00



stufe aufgelistet. Auch wenn die Konvergenzrate bei hohen Verfüllgraden einen nahezu doppelt bis viermal so großen Wert wie im unverfüllten Zustand erreicht, fällt der Volumenstrom aus den so teilverfüllten Hohlräumen deutlich geringer aus als im unverfüllten Zustand. Tatsächlich tritt zu Beginn des Konvergenzprozesses unter den hier getroffenen vereinfachenden Annahmen im Fall der teilverfüllten Hohlräume nur ein Drittel bis ein Fünftel des Volumenstroms eines unverfüllten Hohlraumes aus. Bei den beiden Varianten mit hohem Verfüllgrad zeigt sich allerdings auch, welcher erhebliche Aufwand am Verfüllvolumen aufgebracht werden muss, um den Volumenstrom zum Anfangszeitpunkt z. B. gegenüber der 70 % Verfüllung weiter zu reduzieren. Der Vorteil eines hohen Verfüllgrades zeigt sich erst mit fortschreitender Konvergenz, indem der Konvergenzprozess bei den beiden Varianten mit hohem Verfüllgrad bereits frühzeitig weitgehend abgeschlossen ist, so dass nur noch ein sehr geringer Volumenstrom austritt. Dazu ist in der Tabelle der Zeitpunkt angegeben, zu dem der teilverfüllte Resthohlraum zu 95 % konvergiert ist, und das Verhältnis des Volumenstromes aus dem teilverfüllten Hohlraum zu dem des unverfüllten zu dem Zeitpunkt. Wird der relative Volumenstrom zu Beginn des Konvergenzprozesses und der zum Zeitpunkt einer 95 %-tigen Konvergenz miteinander verglichen, zeigt sich, dass der Volumenstrom der 70 %-Variante im Verhältnis zum unverfüllten Hohlraum nahezu konstant bleibt, bei einem geringeren Verfüllgrad wird jedoch zum Ende hin beinahe der Volumenstrom des unverfüllten Hohlraumes erreicht.

Verfüllstufe	0	0,5	0,7	0,85	0,95
Verfüllgrad ω	0	0,543	0,714	0,869	0,939
$\dot{K}_{R,stat}$ [a ⁻¹]	2,2·10 ⁻⁴	1,7·10 ⁻⁴	2,1·10 ⁻⁴	3,9·10 ⁻⁴	8,0·10 ⁻⁴
$\frac{\dot{K}_{R,stat}}{\dot{K}_{R,stat,\omega=0}}$ [-]	1,00	0,77	0,95	1,77	3,64
$\frac{\dot{V}_R}{V_o} \Big _{t=0}$ [a ⁻¹]	2,2·10 ⁻⁴	7,8·10 ⁻⁵	6,0·10 ⁻⁵	5,1·10 ⁻⁵	4,9·10 ⁻⁵
$\frac{\dot{V}_R}{\dot{V}_{R,\omega=0}} \Big _{t=0}$ [-]	1,00	0,35	0,27	0,23	0,22
$\frac{\dot{V}_R}{\dot{V}_{R,\omega=0}} \Big _{t(K_\omega=0,95)}$ [-]	1,00	0,85	0,31	0,063	0,025
$t(K_\omega = 0,95)$ [a]	13620	17620	14270	7680	3740

Tabelle 7: Einfluss des Verfüllgrades auf den Konvergenzprozess bei Teilverfüllung mit Salzbeton

Das Zeitverhalten des auf das unverfüllte Anfangsvolumen bezogenen Volumenstroms ist in Abbildung 34 dargestellt. Zustände, bei denen die materielle Konvergenz Vielfache von 0,1 erreicht sowie der Zustand einer materiellen Konvergenz von 0,95 sind in der Abbildung beson-

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341011					GH	BY	0004	00

ders gekennzeichnet. Es ist erkennbar, dass sowohl der für den Verschluß erforderliche Zeitbedarf sich mit zunehmendem Verfüllgrad verringert, als auch der mit fortschreitender Zeit weniger abnehmende Volumenstrom bei einer 50 %-Verfüllung gegenüber dem unverfüllten Referenzfall.

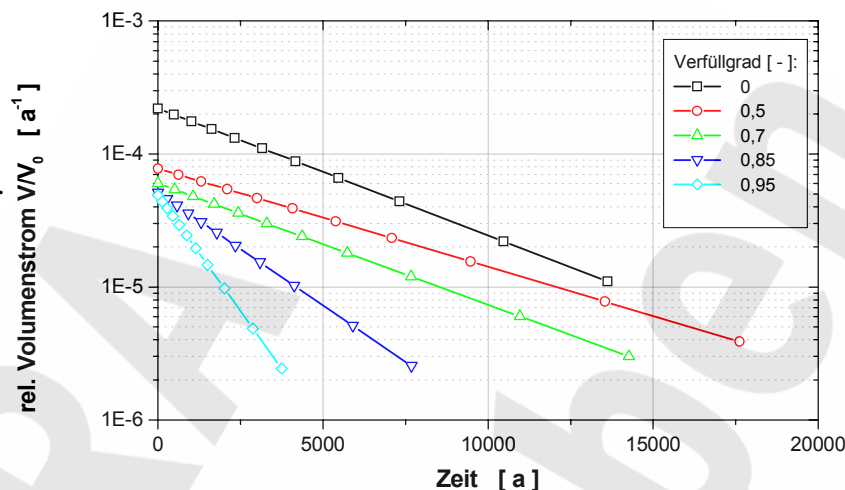


Abbildung 34: Zeitabhängiger Verlauf des relativen Volumenstroms aus teilverfüllten Hohlräumen bei Salzbeton als Versatzmaterial

Eine stabilisierende Wirkung auf Hohlräume im Salz lässt sich nicht nur durch das Einbringen von festem Versatzmaterial erzielen, sondern auch durch die Flutung mit einer Flüssigkeit. Um Auf- und Umlöseprozesse zu vermeiden, ist im Salzbergbau eine gesättigte Lauge erforderlich. Die Stabilisierung erfolgt über den von außen auf die Hohlraumkontur wirkenden hydrostatischen Druck. Dieser Druck wirkt instantan und muß nicht erst wie beim Versatz mit einem Festkörper durch die Konvergenz aufgebaut werden. Als Folge des hydraulischen Drucks wird zunächst die maximale Hauptspannung verringert, die im Fall des leeren Hohlräum an der Kontur in der Nähe von 0 MPa liegt. Dadurch verringert sich die Deviatorspannung, so dass der gesamte Konvergenzprozess langsamer abläuft, Abbildung 35.

Die Annahme eines Laugepegels bis zum Salzspiegel ohne weiteren auflastenden Druck führt zu einem hydrostatischen Druck im Niveau der Referenzstrecke von ca. 3,1 MPa. Gegenüber dem Referenzfall führt das zu einer um den Faktor 4,3 verringerte stationäre Konvergenzrate. Im Fall eines Laugepegels bis zur Tagesoberfläche ergibt sich bei einem an der Streckenkontur anstehenden Druck von ca. 6,6 MPa eine Reduktion der stationären Konvergenzrate gegenüber dem Referenzfall um den Faktor 70, Abbildung 36, Anhang 1 und Anhang 2. Bereits ein geringer hydrostatischer Druck genügt daher zur Stabilisierung des Hohlräum.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341011					GH	BY	0004	00

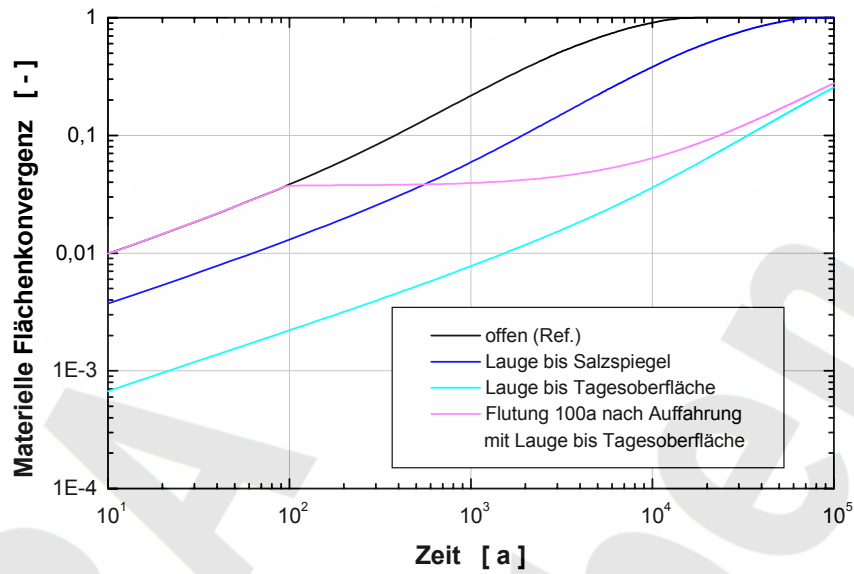


Abbildung 35: Materielle Konvergenz in Abhängigkeit unterschiedlicher hydraulischer Drücke nach Flutung

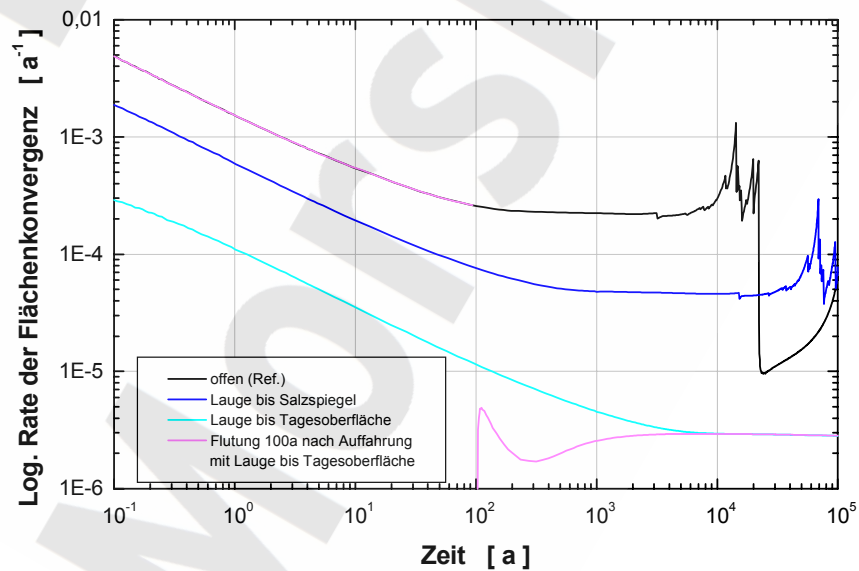



Abbildung 36: Logarithmische Konvergenzrate in Abhängigkeit unterschiedlicher hydraulischer Drücke nach Flutung

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Die Flutung erfolgt in den beiden oben beschriebenen Berechnungsbeispielen zeitgleich mit der Auffahrung. Im Fall einer um 100 a zeitversetzten Flutung mit einem Laugepegel bis zur Tagesoberfläche entspricht das Konvergenzverhalten innerhalb der ersten 100 a dem des Referenzfalls. Bis zum Zeitpunkt der Flutung war die Streckenkantur frei von äußeren Lasten, mit der Flutung wirkt der hydrostatische Druck der Lauge in Normalenrichtung auf die Kontur. Durch das elastische Materialverhalten des Steinsalzes kommt es unmittelbar mit der Laständerung zu einer geringfügigen Aufweitung der Strecke. Durch den wieder einsetzenden Materialfluss können die Spannungen nur langsam wieder umgelagert werden, so dass sich die Hohlraumänderung erst mit der Zeit wieder in einen den Hohlraum schließenden Prozess umwandelt. Entsprechend setzt die Konvergenzrate nach der Flutung zunächst mit negativen Werten ein, wandelt sich langsam und geht in das Verhalten über, wie es sich bei instanter Flutung bis zur Tagesoberfläche ergibt. Das Zusammentreffen der logarithmischen Konvergenzraten bei zeitversetzter und instanter Flutung im stationären Bereich, ist lediglich eine Folge des gewählten Flutungszeitpunktes und kein systematischer Effekt.

5.3 Zusammenfassende Bewertung der Berechnungsergebnisse

Verschiedene Abbaue in einem Salzbergwerk können sich um mehrere Größenordnungen in ihrer Konvergenzrate voneinander unterscheiden. Die wesentlichen Einflussfaktoren für dieses Verhalten sind der Teufendruck, die Hohlraumgeometrie, das Materialverhalten innerhalb des den Hohlraum umgebenden Gesteins, Materialien, die das Verschiebungsfeld weiträumig begrenzen, sowie der Versatzzustand. Bereits ohne den Einfluss des Teufendrucks und nur unter Berücksichtigung einer freien Konvergenz im Abbau beträgt das Verhältnis der betrachteten Varianten von höchster zu niedrigster stationärer Konvergenzrate 15, Abbildung 37. Bei der Betrachtung eines realen Abbaus ist jedoch nicht nur ein Einflussfaktor isoliert zu betrachten. Als weitere Einflussgröße ist das Verhalten in Abhängigkeit gegebener Randbedingungen mit dargestellt.

Mit einem analytischen Ansatz wie dem Spherical Void Model lässt sich das Konvergenzverhalten an einem vereinfachten Modell gut abschätzen. Solche Modelle sind in der Lage, den Teufendruck sowie das Materialverhalten des Wirtsgesteins zu erfassen. Je nach Ansatz ist es möglich, eine vollständige Verfüllung im Modell zu berücksichtigen, wenn die Stoffgesetze für das Versatzmaterial zur analytischen Lösung geeignet sind. Im Fall der leeren Abbaue hat sich gezeigt, dass es bei bergmännisch üblichen Abbaugeometrien einen stationären Bereich in der logarithmischen Konvergenzrate gibt. Die stationäre Konvergenzrate des Referenzfalls stimmt in guter Näherung mit der Lösung aus dem Spherical Void Model überein. Mit Ausnahme des Stoffgesetzverhaltens können die übrigen, bereits in der Abbildung 37 gezeigten Effekte von vereinfachenden Modellen nicht erfasst werden. Doch nicht in allen Fällen bildet sich eine weitgehend stationäre logarithmische Konvergenzrate heraus. Wird der Hohlraum mit einem porösen Material vollständig gefüllt oder ist der Hohlraum geeignet geformt, durchläuft die logarithmische Konvergenzrate nur ein Minimum oder es handelt sich sogar nur um eine streng monoton fallende Kurve.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00

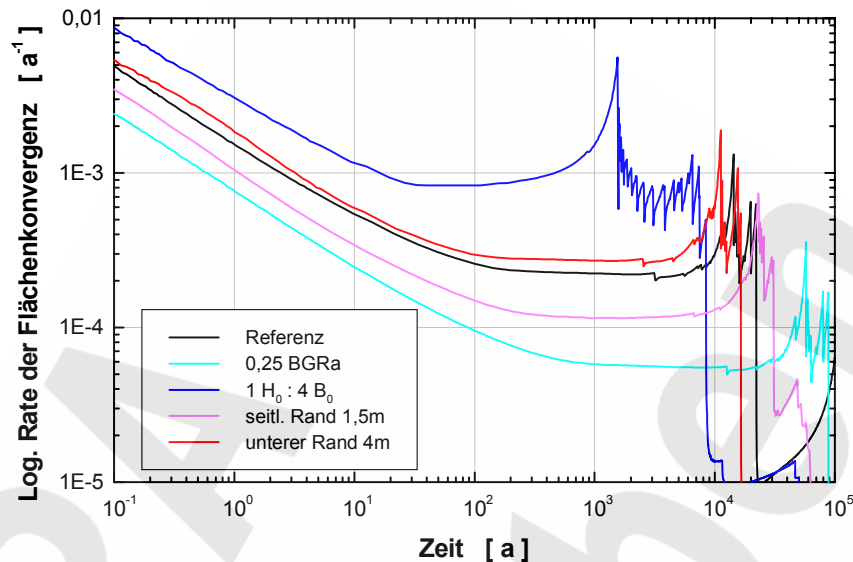



Abbildung 37: Vergleich der logarithmischen Konvergenzrate ausgewählter leerer Abbaue auf der 5a-Sohle Bartensleben


Die Reduktion des Volumenstroms aus einem Hohlraum ist durch die Verwendung von Versatzmaterialien gegeben. Eine genaue Analyse im Zeitverhalten muss zeigen, ob eine genügende Reduktion im Volumenstrom gegenüber dem Vergleichszustand erzielt werden kann. Gerade bei einer Teilverfüllung mit einem hohen Verfüllgrad zeigt sich, dass sich ein Resthohlraum mit einer verhältnismäßig breiten Geometrie im Vergleich zur verbleibenden Höhe zwar schnell zu in der Regel über 90 % des Anfangsvolumens des Resthohlraumes schließt, das verbleibende Volumen jedoch nur sehr langsam konvergiert. Die Ursache liegt darin, dass in der Firstwölbung ein sich nur langsam schließender Hohlraum verbleibt. Vollversatz bzw. Flutung ist ein geeignetes Mittel, die Konvergenzrate zu reduzieren. Eine frühzeitig wirksame Reduktion der Konvergenz ergibt sich mit der Flutung, da der Laugendruck nicht unmittelbar vom Konvergenzverhalten abhängt. Im Fall von festen Versatzmaterialien ist die Konvergenz der Antriebsmotor, damit sich ein Stützdruck im Versatzmaterial aufbaut. Niedrige hydrostatische Drücke reichen bereits aus, die Konvergenzrate signifikant zu reduzieren.

Damit sich eine Verfüllmaßnahme im Systemverhalten auswirkt, muss sie sich auf einen genügend großen Bereich erstrecken. Z. B. wird das Abbausystem bei einer Teilverfüllung von 50 % erkennbar beeinflusst. Wird dagegen ein zonal erhöhtes Kriechen im Wirtsgestein berücksichtigt, so erfordert es sehr konservative Annahmen im Hinblick auf seine räumliche Verteilung, um im System feststellbar zu sein. Wird für einen Einzelhohlraum eine realistische durch Feuchtigkeit beeinflusste Zone angenommen, hat durch Feuchtigkeit erhöhtes Kriechen nur eine sehr untergeordnete Bedeutung.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	


Aussagen über das Konvergenzverhalten setzen Bezugssysteme voraus. Es lassen sich mehrere Bezugssysteme finden, die gleichwertig neben einander stehen. Zwischen den einzelnen Bezugssystemen bestehen eindeutige Transformationsvorschriften, mit denen die Größen des einen Systems in das andere überführt werden können. Der Vergleich von Konvergenzgrößen setzt ein gemeinsames Bezugssystem voraus. Nicht desto trotz ist es sinnvoll, für einzelne Aussagen das jeweils geeignete Bezugssystem zu wählen.

ERA
Morsleben

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	


6 **Verwendete Unterlagen**

- /1/ BGR: Projekt ERA Morsleben: Szenarienanalyse - Geologische Langzeitbewertung und Ermittlung der Zuflusszenarien ohne technische Maßnahmen. Hannover: BGR, 1999
- /2/ Storck, R. et. al: PAGIS-Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste, Disposal in Salt formations. GSF-Bericht 23/88. 1988
- /3/ Flügge, S. (Hrsg.): Handbuch der Physik, Band III/3 „Die nicht-linearen Feldtheorien der Mechanik, Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1965
- /4/ Malvern, L. E.: Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1969
- /5/ Miller, A. K.: Unified Constitutive Equations for Creep and Plasticity, Elsevier, London, New York, 1987
- /6/ Itasca: FLAC Fast Lagrangian Analysis of Continua, Theory and Background. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 1998
- /7/ Marsden, J. E; Hughes, T. J. R.: Mathematical Foundations of Elasticity, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1983
- /8/ Hein, H.-J.: Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgranulat. Dissertation, RWTH Aachen, 1991
- /9/ BGR: Themomechanisches Verhalten von Salzgestein, Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben, Archiv-Nr. 114805, Tgb.-Nr. 10926/96, 1996
- /10/ Bechthold, W.; Rothfuchs, T., et al.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project) - Final Report. European Commission EUR 19124 EN, Luxembourg: European Communities, 1999
- /11/ BGR: ERA Morsleben, Gebirgsmechanische Beurteilung der Standsicherheit von Abbauen im Südfeld der Grube Bartensleben während der Betriebsphase, Archiv-Nr. 114778, Tgb.-Nr. 10709/96, 1996
- /12/ BGR: Effect of Humidity and Confining Pressure on Creep of Rock Salt. In: The Mechanical Behavior of Salt. Palaiseau, 1993
- /13/ BGR: Projekt Gorleben, Kompaktion und Permeabilität von Salzgrus, Endbericht 1995 - 1997, Archiv-Nr. 116922; Tgb.-Nr. 10051/98, 1998

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	


- /14/ Korthaus, E.: Consolidation and Deviatoric Deformation Behaviour of Dry Crushed Salt at Temperatures up to 150°C. 4th Conference on the Mechanical Behaviour of Salt (Montreal 1996)
- /15/ BGR: ERA Morsleben - Gebirgsmechanische und geotechnische Untersuchungen im Labor und in situ - Ingenieurgeologische Erkundung von Homogenbereichen, Abschlußbericht zum AP 9M21310015, Archiv-Nr. 117213. Hannover: BGR, 1998

ERA Morsleben


Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

7 Glossar


Abbau:	Bezeichnung für einen durch bergmännische Tätigkeiten bei der Gewinnung von Kali- oder Steinsalz hergestellten Hohlraum
Aktivierungsenergie:	Mindestenergie zur Erzielung einer chemischen Reaktion
Altversatz:	Versatz, der gegenüber dem Betrachtungszeitpunkt vor langer Zeit in den Hohlräumen eingebracht wurde und dadurch dem Einfluss der Gebirgskonvergenz ausgesetzt sein kann
Auffahren (Auffahrung):	Herstellen einer söhligten oder geneigten Strecke oder eines anderen Grubenbaus
Ausnutzungsgrad:	Relatives Bewertungsmaß in Bezug auf einen Grenzzustand
Bruchkriterium:	Grenzbedingung für das Auftreten von makroskopischen Rissen innerhalb einer kurzen Zeit, die zum Versagensfall Bruch führen
Deviator:	Mathematische Größe; ein Tensor, in dem der hydrostatische Anteil abgespalten ist
Dilatanz:	Volumenvergrößerung eines Körpers in Folge von mikrostrukturellen Änderungen wie Phasenumwandlungen oder Rissbildung
Dilatanzkriterium:	Grenzbedingung für das Auftreten von mikroskopischen Rissen, die zur Volumenvergrößerung und über Risswachstum innerhalb eines langen Zeitraums zum Versagensfall Bruch führen
Diskretisierung:	Mathematische Beschreibung eines räumlich zusammenhängenden Systems (Kontinuums) durch räumlich beschränkte Gebiete

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Einlagerung:	Einbringen von radioaktiven Abfällen in Hohlräumen mit dem Ziel der Endlagerung
Elastizität:	Eigenschaften eines Stoffes, bei der ein Körper in Folge einer Belastung und späteren Entlastung wieder seine ursprüngliche Form annimmt
elastoplastisch:	Materialverhalten mit reversiblen, elastischen und irreversiblen, plastischen Anteilen
Firste:	Obere Grenzfläche eines Grubenbaus
Firstsenkung:	Nach unten gerichtet Bewegung der Firste relativ zum Grubenbau
Flächenkonvergenz:	Konvergenz einer Fläche
Hydrostatik:	Lehre von den Gleichgewichtszuständen ruhender Flüssigkeiten unter dem Einfluss äußerer Kräfte wie der Schwerkraft, deren wichtigstes Gesetz den Druck im Innern einer Flüssigkeit als nach allen Seiten gleich (isotrop) beschreibt
Hyperelastizität:	Mathematische Beschreibung des elastischen Materialverhalten, bei dem der elastische Zustand durch den Energiegehalt eines elastischen Potentials beschrieben wird, so dass der elastische Zustand unabhängig vom Verformungsweg ist
Hypoelastizität:	Mathematische Beschreibung des elastischen Materialverhalten, bei dem die Existenz des elastischen Potentials nicht gefordert wird
Integration:	Mathematische Methode zur Berechnung einer Summe in einem Gebiet; explizite I.: Mathematische Methode zur näherungsweise Berechnung einer Summe unter Verwendung der Größen des letzten Rechenschrittes; implizite I.: Mathematische Methode zur näherungsweise Berechnung einer Summe unter Verwendung der Größen des aktuellen Rechenschrittes

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

- isotrop: Stoffeigenschaft, bei der alle Raumrichtungen gleiche physikalische Eigenschaften aufweisen
- Kohäsion: Zusammenhaften von Atomen, Molekülen, Kristallen und granularen Materialien gleicher Art
- Kompaktion: Volumenverringern eines Körpers
- Kontur: Umriss(linie)
- Konvergenz: Mathematische Beschreibung, bei der die Volumenreduzierung eines Hohlraumes infolge Verformung der Kontur als bezogene Größe beschrieben wird; materielle K.: Der Anfangszustand des Hohlraumes wird als Bezugszustand verwendet; räumliche K.: Der aktuelle Zustand des Hohlraumes wird als Bezugszustand verwendet
- Konvergenzrate: Zeitliche Ableitung der Konvergenz; beschreibt die Geschwindigkeit mit der sich ein Grubenbau schließt; stationäre K.: Keine Änderung der K. über der Zeit
- lithostatisch: Unter Einfluss der ruhenden Gebirgslast
- Oedometer: Versuchsapparatur, in der Zylinderproben Belastungen in axialer und radialer Richtung ausgesetzt werden können
- Plastizität: Eigenschaft eines Stoffes, bei der ein Körper in Folge einer Belastung eine neue Form auch nach einer späteren Entlastung bleibend behält
- Porenraum/-volumen: Hohlraum im Versatz und/oder eingelagertem Abfall
- Porosität: Das Gesamtvolumen eines Gesteins setzt sich aus dem Volumen der festen Bestandteile und dem Volumen der Hohlräume oder Poren im Gestein zusammen. Die Gesamtporosität ist definiert als das Verhältnis von Porenvolumen zu dem Gesamtvolumen des Gesteins. Die effektive Porosität ist definiert als das Verhältnis des für die Durchströmung nutzbaren Porenvolumens zu dem

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

Gesamtvolumen des Gesteins

Querkontraktion: Verformung normal zur Längsdeformation bzw. -dehnung bei elastisch festen Körpern. Die Querkontraktionszahl μ ist das negative Verhältnis der Quer- zur Längsverformung

Radionuklid: Instabiles Nuklid, das spontan ohne äußere Einwirkung unter Strahlungsemission zerfällt

Resthohlraum: Porenraum/-volumen und unverfüllter Hohlraum eines Grubenbaus/des Grubengebäudes

Sensitivität: Empfindlichkeit eines Systems gegenüber Änderungen einer Zustandsgröße

Sohle:

1. Gesamtheit der annähernd in einem Niveau aufgefahrenen Grubenbaue
2. Untere Grenzfläche eines Grubenbaus

Sohlenbreite: Breite eines Grubenbaus auf der Sohle

Sohlenhebung: Nach oben gerichtete Bewegung der Sohle relativ zum Grubenbau


Steifigkeit: Ein aus Materialverhalten und Formgebung entwickeltes Maß, das den Verformungswiderstand eines Baustoffes oder -werkes gegenüber Beanspruchungen kennzeichnet

Stoß: Seitliche Kontur eines Grubenbaus

Stoßwanderung: Bewegung des Stoßes in Folge der Gebirgskonvergenz

Stratigraphie (Formationskunde): Lehre von der Aufeinanderfolge der Gesteinsschichten und Formationen sowie deren altersmäßige Zuordnung

Strecke: Tunnelartiger Grubenbau, der nahezu söglich aufgefahren ist

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

- Tensor:** Mathematische Form (Multilinearform) zur Beschreibung des physikalischen Zustandes oder der physikalischen Eigenschaft eines Raumpunktes: Z. B. ist Temperatur als skalare Größe ein Tensor nullter Stufe, Verschiebung als vektorielle Größe ein Tensor erster Stufe, Spannung und Verzerrung sind Tensoren zweiter Stufe und ein mechanisches Stoffgesetz ein Tensor vierter Stufe
- Teufe:** Tiefenlage unter einem Bezugsnormal wie z. B. der Tagesoberfläche
- Versatz:**
 1. Verfüllgut für die Verfüllung oder Stützung von Grubenbauen, auch Versatzmaterial
 2. Verfüllung eines Grubenbaus (Versetzen)
- Versatzmaterial:** Verfüllgut für die Verfüllung oder Stützung von Grubenbauen
- Verzerrung:** Änderung von Längen- und Winkelgrößen eines Körpers in Folge von Formänderungen des Körpers
- Viskoplastizität:** Verhalten eines Stoffes, bei dem das plastische Verhalten von der Zeit abhängt
- Vollverfüllung:** Unter den grubenspezifischen Randbedingungen höchstmöglicher erreichbarer Verfüllgrad
- Volumenkonvergenz:** Konvergenz, Flächenkonvergenz
- Zustand:** Gesamtheit von Parametern, die zu einem bestimmten Zeitpunkt ein bestimmtes System beschreiben


Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00



Numerische Untersuchungen zum Konvergenzverhalten eines Einzelhohlraumes

Anhang

Variante	Kenndaten des stationären Bereichs				
	stationäre log. Konvergenzrate $\dot{\kappa}_{stat}$ [a ⁻¹]	Anfangszeitpunkt $t_1(\dot{\kappa}_{stat})$ [a]	mat. Konvergenz zu t_1 : $K_1(t_1)$ [-]	Endzeitpunkt $t_2(\dot{\kappa}_{stat})$ [a]	mat. Konvergenz zu t_2 : $K_2(t_2)$ [-]
Referenz	2,2·10 ⁻⁴	100	0,04	9.000	0,80
½ BGRa	1,1·10 ⁻⁴	200	0,04	18.000	0,87
¼ BGRa	5,5·10 ⁻⁵	350	0,03	36.000	0,87
Feuchte: 2 m, [5,20]BGRa	3,6·10 ⁻⁴	90	0,05	2.500	0,62
Feuchte: 2 m, [4,85] BGRa	4,1·10 ⁻⁴	50	0,04	2.200	0,64
Feuchte: 0,6 m, [5,20] BGRa	2,4·10 ⁻⁴	90	0,04	6.000	0,77
4 B ₀ , 4 H ₀	2,2·10 ⁻⁴	110	0,04	11.000	0,93
4 B ₀ , 1 H ₀	8,3·10 ⁻⁴	20	0,04	450	0,36
1 B ₀ , 4 H ₀	1,9·10 ⁻⁴	200	0,07	4.500	0,62
Kreis	1,9·10 ⁻⁴	100	0,04	5.000	0,58
Rechteck	2,4·10 ⁻⁴	100	0,04	12.000	0,95
Teufe -332 mNN	1,0·10 ⁻⁴	180	0,03	19.500	0,87
Teufe -245 mNN	3,0·10 ⁻⁵	500	0,03	66.000	0,87
Rand seitlich 5 H ₀	1,8·10 ⁻⁴	130	0,04	10.000	0,86
Rand seitlich 2 H ₀	1,6·10 ⁻⁴	120	0,04	11.500	0,86
Rand seitlich 1 H ₀	1,4·10 ⁻⁴	120	0,03	12.000	0,83
Rand seitlich 0,5 H ₀	1,2·10 ⁻⁴	140	0,03	12.000	0,78
Rand unten 5 B ₀	2,2e ⁻⁴	100	0,04	7.500	0,82
Rand unten 2 B ₀	2,6·10 ⁻⁴	70	0,03	6.700	0,83
Rand unten 1 B ₀	2,5·10 ⁻⁴	70	0,03	5.800	0,81
Rand unten 0,5 B ₀	2,5·10 ⁻⁴	70	0,03	7.100	0,84
Rand 1 H ₀ , 0,5 B ₀	1,8·10 ⁻⁴	70	0,02	9.700	0,84
Rand 0,5 H ₀ , 1 B ₀	1,9·10 ⁻⁴	60	0,02	7.800	0,79
Rand 0,5 H ₀ , 0,5 B ₀	1,7·10 ⁻⁴	70	0,02	9.000	0,80
korrodierter Salzbeton	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾
Salzbeton	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾
Salzgrus trocken ²⁾	7,2·10 ⁻⁴	80	0,1	3.400	0,95
Salzgrus feucht ²⁾	7,2·10 ⁻⁴	80	0,1	680	0,43
Salzgrus trocken 50 %, Salzbeton 50 % ²⁾	6,8·10 ⁻⁴	180	0,19	4.500	0,97
Salzgrus trocken 70 %, Salzbeton 30 % ²⁾	6,5·10 ⁻⁴	130	0,14	5.100	0,98
Salzbeton 50 % ³⁾	1,8·10 ⁻⁴	180	0,06	14.500	0,92
Salzbeton 70 % ³⁾	2,1·10 ⁻⁴	260	0,09	9.200	0,86
Salzbeton 85 % ³⁾	3,9·10 ⁻⁴	110	0,08	4.500	0,80
Salzbeton 95 % ³⁾	8,0·10 ⁻⁴	100	0,12	2.300	0,80
korrodierter Salzbeton 50 % ³⁾	1,7·10 ⁻⁴	200	0,06	15.000	0,92
korrodierter Salzbeton 70 % ³⁾	2,2·10 ⁻⁴	160	0,07	8.900	0,85
korrodierter Salzbeton 85 % ³⁾	4,0·10 ⁻⁴	80	0,06	4.900	0,84
korrodierter Salzbeton 95 % ³⁾	8,0·10 ⁻⁴	70	0,11	2.700	0,87
Lauge Tagesoberfläche	2,9·10 ⁻⁶	2.700	0,01	- ⁴⁾	- ⁴⁾
Lauge Salzspiegel	4,7·10 ⁻⁵	304	0,03	70.000	0,99
Lauge Tagesoberfläche, 100a	2,9·10 ⁻⁵	730	0,04	- ⁴⁾	- ⁴⁾

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

- 1) kein Minimum oder Wendepunkt in der logarithmischen Konvergenzrate erkennbar
- 2) Konvergenzgrößen auf das Porenvolumen bezogen
- 3) Konvergenzgrößen auf das unverfüllte Resthohlraumvolumen bezogen
- 4) rechnerischer Eintrittszeitpunkt außerhalb des Berechnungszeitraumes von 100.000 a

Anhang 1: Kenndaten zum Bereich der stationären logarithmischen Konvergenzrate


ERA Morsleben

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22341011					GH	BY	0004	00



Numerische Untersuchungen zum Konvergenzverhalten eines Einzelhohlraumes

Variante	Zeitpunkt für 1. Kontakt $t_{3,1.Kont}$ [a]	mat. Konvergenz zu t_3 : $K_3(t_{3,1.Kont})$ [-]	Zeitpunkt für na- hezu vollständige Konvergenz $t_{4,vollst}$ [a]	mat. Konvergenz zu t_4 : $K_4(t_{4,vollst})$ [-]
Referenz	14.500	0,992	22.000	0,9994
½ BGRa	29.500	0,992	44.000	0,9995
¼ BGRa	58.000	0,991	88.500	0,9995
Feuchte: 2 m, [5,20]BGRa	7.300	0,991	9.500	0,9968
Feuchte: 2 m, [4,85] BGRa	6.300	0,995	7.200	0,9973
Feuchte: 0,6 m, [5,20] BGRa	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾
4 B ₀ , 4 H ₀	15.500	0,990	32.500	0,9992
4 B ₀ , 1 H ₀	1.500	0,933	8.500	0,9996
1 B ₀ , 4 H ₀	9.800	0,956	100.000 ⁵⁾	0,9992
Kreis	- ²⁾	- ²⁾	- ²⁾	0,9909 ⁶⁾
Rechteck	17.500	0,992	25.500	0,9997
Teufe -332 mNN	31.000	0,989	47.500	0,9993
Teufe -245 mNN	- ⁵⁾	- ⁵⁾	100.000 ⁵⁾	0,9812
Rand seitlich 5 H ₀	16.500	0,987	32.000	0,9987
Rand seitlich 2 H ₀	19.000	0,986	31.000	0,9981
Rand seitlich 1 H ₀	21.000	0,990	30.500	0,9986
Rand seitlich 0,5 H ₀	23.000	0,990	31.000	0,9986
Rand unten 5 B ₀	14.500	0,993	20.500	0,9994
Rand unten 2 B ₀	11.800	0,992	17.000	0,9994
Rand unten 1 B ₀	11.500	0,993	16.500	0,9993
Rand unten 0,5 B ₀	13.500	0,992	20.500	0,9992
Rand 1 H ₀ , 0,5 B ₀	17.000	0,988	39.000	0,9986
Rand 0,5 H ₀ , 1 B ₀	15.000	0,998	22.000	0,9983
Rand 0,5 H ₀ , 0,5 B ₀	17.000	0,988	34.000	0,9990
korrodierter Salzbeton	- ²⁾	- ²⁾	- ²⁾	0,0023 ⁶⁾
Salzbeton	- ²⁾	- ²⁾	- ²⁾	0,0007 ⁶⁾
Salzgrus trocken ³⁾	- ²⁾	- ²⁾	5.300	1,0000
Salzgrus feucht ³⁾	- ²⁾	- ²⁾	3.000	1,0000
Salzgrus trocken 50 %, Salzbeton 50 % ³⁾	6.400	0,997	36.000	1,0000
Salzgrus trocken 70 %, Salzbeton 30 % ³⁾	6.700	0,995	100.000 ⁵⁾	0,9995
Salzbeton 50 % ⁴⁾	21.000	0,990	31.000	0,9977
Salzbeton 70 % ⁴⁾	14.000	0,970	20.500	0,9970
Salzbeton 85 % ⁴⁾	7.700	0,960	11.500	0,9890
Salzbeton 95 % ⁴⁾	3.000	0,883	4.900	0,9643
korrodierter Salzbeton 50 % ⁴⁾	21.000	0,990	28.000	0,9972
korrodierter Salzbeton 70 % ⁴⁾	15.500	0,990	25.000	0,9972
korrodierter Salzbeton 85 % ⁴⁾	8.800	0,982	9.500	0,9840
korrodierter Salzbeton 95 % ⁴⁾	3.600	0,923	100.000 ⁷⁾	0,9820 ⁶⁾
Lauge Tagesoberfläche	- ⁵⁾	- ⁵⁾	- ⁵⁾	0,2554 ⁶⁾
Lauge Salzspiegel	70.000	0,991	- ⁵⁾	0,9989 ⁶⁾
Lauge Tagesoberfläche, 100a	- ⁵⁾	- ⁵⁾	- ⁵⁾	0,2772 ⁶⁾

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341011					GH	BY	0004	00	

- 1) Remeshing erforderlich
- 2) Kontakt physikalisch nicht möglich
- 3) Konvergenzgrößen auf das Porenvolumen bezogen
- 4) Konvergenzgrößen auf das unverfüllte Resthohlraumvolumen bezogen
- 5) rechnerischer Eintrittszeitpunkt außerhalb des Berechnungszeitraumes von 100.000 a
- 6) Bezugszeitpunkt ist Zeitpunkt des Berechnungsendes von 100.000 a
- 7) Eintrittszeitpunkt in der Ergebnisdarstellung nicht erkennbar

Anhang 2: Kenndaten zu Zeitpunkten einer weitgehenden Konvergenz

ERA Morsleben