

Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

Verfahrensunterlage

Titel: Standsicherheits und Integritätsnachweis des zugelaufenen Endlagers
Autor: DBE
Erscheinungsjahr: 2008
Unterlagen-Nr.: P 267
Revision: 00
Unterlagenteil:



	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	9M	22341021					GC	LD	0009	01	

Inhaltsverzeichnis

Blatt

Zusammenfassung	6
1 Aufgabenstellung	7
2 Annahmen und Voraussetzungen für die Rechenmodelle	8
2.1 Nachweise und Nachweiskriterien für den stabilen Endzustand	8
2.2 Annahmen bezüglich des Zulaufens des ERAM	9
2.3 Materialverhalten	10
2.3.1 Mechanisches Verhalten	10
2.3.2 Thermisches Verhalten	12
2.3.3 Thermomechanische Kopplung	12
2.3.4 Hydratationsmodell für Salzbeton	13
2.4 Berechnungsmethode	15
3 Berechnungsmodell	16
3.1 Vereinfachungen	16
3.2 Randbedingungen	17
3.3 Belastungsgeschichte	20
4 Ergebnisse und Bewertung	22
4.1 Nachweis der Begrenzung der Verformung der Tagesoberfläche	22
4.2 Zusammenfassende Bewertung	26
5 Literatur	27
6 Glossar	29

Blattzahl dieser Unterlage: 30

	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	9M	22341021					GC	LD	0009	01	

Verzeichnis der Abbildungen

Blatt

Abbildung 2-1: Lage der charakteristischen Schnitte Zentralteil ERAM (Darstellung auf der 3a-Sohle)	9
Abbildung 3-1: Darstellung des geometrischen Modells (Subrosionsmulde bis zum angenommenen Lösungszutritt entsprechend der Lokation als z2HS West, z3AM und z3OS-BK/BD modelliert)	18
Abbildung 3-2: Darstellung des numerischen Modells	19
Abbildung 3-3: Diskretisierung im Bereich der Subrosionsmulde sowie der Abbaue (Ausschnitt)	19
Abbildung 3-4: Darstellung der zugelaufenen Bereiche	20
Abbildung 4-1: Senkung [m] an der Tagesoberfläche in Abhängigkeit des Ortes bis 10 000 Jahre nach Stilllegung des Endlagers	23
Abbildung 4-2: Verlauf der Senkung [m] an der Tagesoberfläche bis 10 000 Jahre nach Stilllegung des Endlagers für ausgewählte Auswertepunkte	24
Abbildung 4-3: Senkungen [m] (z-Verschiebungen) 10 000 Jahre nach Stilllegung	25

	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	9M	22341021					GC	LD	0009	01	

Verzeichnis der Tabellen

Blatt

Tabelle 2-1:	Parameter für linear elastisches Materialverhalten	11
Tabelle 2-2:	Materialparameter zur Temperaturberechnung	12
Tabelle 2-3:	Wärmeausdehnungskoeffizient der berücksichtigten Materialien nach /14/	13
Tabelle 3-1:	Berechnungsablauf der Simulation	21
Tabelle 4-1:	Zusammenstellung der berechneten maximalen Senkung und Senkungsrates sowie der Schiefstellung und Schiefstellungsrate an der Tagesoberfläche	24

ERA Morsleben

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341021					GC	LD	0009	01	

Stichworte:

Nachweis des stabilen Endzustands, Standsicherheit, thermomechanische Berechnung, Stilllegungskonzept, Verfüllung, zugelaufenes Endlager

Zusammenfassung

Im Rahmen der Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) ist vorgesehen, nahezu alle Hohlräume mit Salzbeton zu verfüllen.

Der Nachweis der Sicherheit der Bauzustände sowie des stabilen Endzustands des trockenen Endlagers wurde für den Zentralteil Bartensleben mittels thermomechanischer Berechnungen für 3D-Modelle, die charakteristische Bereiche des Zentralteils berücksichtigen, in /1/ geführt. Zutritte sind jedoch nicht vollständig auszuschließen. In diesen Szenarien kommt es zur Hohlraumneubildung, so dass ein verändertes Tragsystem vorliegt. Die Sicherheitsnachweise für das trockene Endlager sind deshalb nicht übertragbar und werden für das zugelaufene Endlager in dieser Unterlage geführt.

Wie in /2/ dargestellt, ist das Schutzziel des Nachweises des stabilen Endzustands für das zugelaufene Endlager der Schutz der Tagesoberfläche. Zum Nachweis wird eine 2D-Berechnung für einen Schnitt im Bereich des Zentralteils Bartensleben durchgeführt. Es wird zunächst ausgehend vom unverritzten Gebirge der aktuelle Zustand und die geplante Verfüllmaßnahme simuliert. Für die hier vorliegenden Modellberechnungen wird von einem Zulaufen des stillgelegten Endlagers 50 Jahre nach Abschluss der Stilllegungsmaßnahmen ausgegangen. Die Berechnung wird dann für den zugelaufenen Zustand bis 10 000 Jahre nach Stilllegung fortgesetzt. Wie schon in /1/ gezeigt, verringert die Verfüllung die Senkung der Tagesoberfläche. Auch nach Zulaufen des Endlagers bleiben die berechneten Senkungsraten an der Tagesoberfläche äußerst gering. Die maximale berechnete Senkung an der Tagesoberfläche liegt für den Betrachtungszeitraum von Beginn der Stilllegung bis 10 000 Jahre nach Stilllegung bei ca. 1 m, für den gesamten Berechnungszeitraum ergibt sich rechnerisch eine maximale Senkung von 1,23 m. Die Senkungsraten sinken auf ca. 0,1 mm/a. Die maximale berechnete Schiefstellung an der Tagesoberfläche bleibt im Betrachtungszeitraum mit 1/1 000 deutlich unter dem geforderten Wert von 1/300 pro 100 Jahre. Damit ist der Schutz der Tagesoberfläche gewährleistet und der Nachweis des stabilen Endzustands für das zugelaufene Endlager ist geführt.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341021					GC	LD	0009	01	

1 Aufgabenstellung

Im Konzept zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) ist vorgesehen, nahezu alle Grubenbaue mit Salzbeton zu verfüllen.

Lösungszutritte sind jedoch nicht vollständig auszuschließen. In diesen Szenarien kommt es zur Hohlraumneubildung, so dass ein verändertes Tragsystem vorliegt. Deshalb ist der Nachweis des stabilen Endzustands für das trockene und das zugelaufene Endlager zu führen. Für das trockene Endlager wird der Nachweis für die unterschiedlichen Feldesteile getrennt geführt, beispielsweise für den Bereich des Zentralteils in /1/.

Für den Nachweis des stabilen Endzustands des zugelaufenen Endlagers wurde eine 2D-Berechnung durchgeführt, die durch hinreichend konservative Annahmen abdeckend für das gesamte Endlager ist.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341021					GC	LD	0009	01	

2 Annahmen und Voraussetzungen für die Rechenmodelle

2.1 Nachweise und Nachweiskriterien für den stabilen Endzustand

In /2/ sind die durchzuführenden Sicherheitsnachweise für die Maßnahmen der Stilllegung dargestellt. Diese gliedern sich in den Nachweis der Standsicherheit der Bauzustände und den Nachweis des stabilen Endzustands. Da zum angenommenen Zeitpunkt des Zulaufens die Bauzustände abgeschlossen sind, muss für das zugelaufene Endlager nur der Nachweis des stabilen Endzustands geführt werden. Nach /2/ sind dafür folgende Nachweise zum Schutz der Tagesoberfläche und der Barrierenintegrität zu führen:

Schutz der Tagesoberfläche

- (1) Nachweis der Begrenzung der Verformungen der Tagesoberfläche unter Berücksichtigung des Betrachtungszeitraums

In /2/ wird als zulässiger Wert eine Senkung von 1 m, für die Schiefstellungsrate von 1/300 pro 100 Jahre angegeben. Der zulässige Wert von 1 m für die Senkung ist abgeleitet aus den Anforderungen des Bergrechts. Dort ist festgelegt, dass bei Senkungen unter 1 m keine UVP durchzuführen ist /3/, da die Auswirkungen solcher Senkungen auf die Umwelt als geringfügig eingestuft werden.

Bei Senkungen von 1 m bis 3 m ist eine UVP nur durchzuführen, wenn „erhebliche Beeinträchtigungen im Hinblick auf Vorflut, Grundwasser, Böden, geschützte Kulturgüter oder vergleichbare Schutzgüter zu erwarten sind“ (/3/, § 1, 1 cc).

Barrierenintegrität

- (2) Nachweis einer ausreichend dicken Salzbarriere für nicht zutrittsgefährdete Abbaue

Zutritte in zutrittsgefährdete Abbaue werden im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis betrachtet. Um die Wahrscheinlichkeit für Zutritte gering zu halten, werden in /2/ folgende Nachweise als wünschenswert angegeben:

- (3) Nachweis des Erhalts der derzeit vorhandenen Barrierenintegrität für potentiell zutrittsgefährdete Grubenbaue
- (4) Nachweis der Zustandsverbesserung des Anhydrits gegenüber dem heutigen Zustand über die Lastpfadkontrolle des lokalen Festigkeitskriteriums

Da im hier simulierten Fall des zugelaufenen Endlagers schon von einem Zutritt mit maximalen Zutrittsraten ausgegangen wird, verbleibt als Schutzziel der Schutz der Tagesoberfläche, es ist also Nachweis (1) zu führen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341021					GC	LD	0009	01

2.2 Annahmen bezüglich des Zulaufens des ERAM

Für das ERAM werden als mögliche Zutrittspfade Zutritte über den Hauptanhydrit im Zentralteil, Nordfeld oder Südostfeld Bartensleben oder im Bereich Marie angenommen /4/. Die Annahme des Zutrittspfades über den Hauptanhydrit im Zentralteil Bartensleben führt zu einer größeren Hohlraumneubildung im stark durchbauten Zentralteil Bartensleben als über die anderen Zutrittspfade. Deshalb wird für die Berechnungen konservativ der Pfad über den Hauptanhydrit im Zentralteil Bartensleben angenommen.

In Abbildung 2-1 ist die Lage der charakteristischen Schnitte ZTN-3.1, ZTS-3.1, ZT-3.3 und ZT-1.4 für die thermomechanischen Berechnungen für den Zentralteil des ERAM nach /4/ dargestellt. Für diese charakteristischen Schnitte wurden die Sonderschnittrisse ZTN-3.1 /5/, ZT-3.3 /6/, ZT-1.4 /7/ und ZTS-3.1 /8/ erstellt.

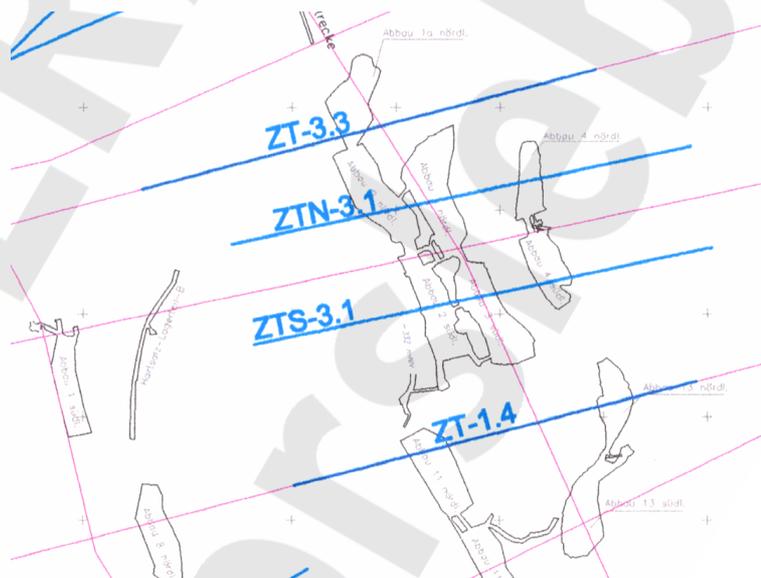


Abbildung 2-1: Lage der charakteristischen Schnitte Zentralteil ERAM (Darstellung auf der 3a-Sohle)

Beim Zulaufen des Endlagers kommt es zur Hohlraumneubildung durch Lösung des anstehenden Salzgesteins. Konservativ wird davon ausgegangen, dass nicht nur die neugebildeten Hohlräume mit Lösung gefüllt sind, sondern dass neben Steinsalz und Carnallit auch der im Rahmen der bGZ und Stilllegung zur Verfüllung eingebrachte Salzbeton M2 (bGZ) und M3 (Stilllegung) korrodiert wird, der Salzbeton keine Stützwirkung mehr besitzt und nur noch die Stützwirkung der Lösung vorhanden ist. Zudem wird für die hier vorliegenden Berechnungen davon ausgegangen, dass der Zutritt instantan 50 Jahre nach Abschluss der Verfüllmaßnahmen zur Stilllegung erfolgt.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341021					GC	LD	0009	01	

Hinsichtlich des Nachweisziels „Schutz der Tagesoberfläche“ ist der Schnitt ZTS-3.1 /8/ konservativ, da hier ein hoher Durchbauungsgrad sowie eine hinsichtlich dieses Nachweises ungünstige (nicht senkrechte) Lage des Kalilagers C mit großer Mächtigkeit und in carnallitischer Ausbildung gegeben sind.

Im Hinblick auf das Schutzziel wird weiterhin konservativ angenommen, dass Steinsalz sich in der Subrosionsmulde löst, die eine Längserstreckung von ca. 200 m besitzt. Ausgehend von einem beeinträchtigten Steinsalzvolumen von ca. 332 500 m³ /9/ ergibt sich dann für den ebenen Schnitt ZTS-3.1 eine Lösungsfläche des Steinsalzes von ca. 1 660 m². Im Hinblick auf das Schutzziel Tagesoberfläche wird konservativ unterstellt, dass der Carnallit vollständig im Lager C gelöst wird, und zwar zwischen Salzspiegel und dem Sohlenniveau -372 mNN.

Die Dichte der Lösung beträgt 1,2 g/cm³. Hierbei wird berücksichtigt, dass es sich nicht um eine reine NaCl-Lösung handelt. Es wird angenommen, dass die Lösung bis zur Tagesoberfläche ansteht. Das entspricht den tatsächlichen Verhältnissen während der Auspressphase.

2.3 Materialverhalten

Das Modell des Berechnungsschnittes umfasst die Materialien Steinsalz, Kaliflöz, Anhydrit, Altversatz (Salzgrus), Hutgestein und Deckgebirge und für die Verfüllung Salzbeton M2 (im Rahmen der bergbaulichen Gefahrenabwehrmaßnahme im Zentralteil (bGZ)) bzw. M3 (im Rahmen der Stilllegung). Es wird von bereichsweise homogenem und isotropem Verhalten ausgegangen. Die verwendeten Stoffgesetze und Materialparameter für das mechanische Verhalten von Steinsalz, Kaliflöz, Anhydrit, Altversatz und Deckgebirge sind in Abschnitt 2.3.1 angegeben.

Eine thermomechanisch gekoppelte Berechnung erfolgt lediglich bis zum Berechnungszeitpunkt 50 Jahre nach Abschluss der Verfüllung, da danach der Einfluss auf die zu betrachtenden mechanischen Berechnungsgrößen gering ist. Die hierfür verwendeten Stoffgesetze und Materialparameter sind in den Abschnitten 2.3.2 und 2.3.3 angegeben. In Abschnitt 2.3.4 wird das zur Modellierung des thermomechanischen Verhaltens des Salzbetons verwendete Hydratationsmodell sowie die jeweils angesetzten Parameter für den Salzbeton M2 bzw. M3 dargestellt.

2.3.1 Mechanisches Verhalten

Für Anhydrit, Altversatz, Deckgebirge und Hutgestein wird linear elastisches Materialverhalten angenommen. Das Deckgebirge wird hierbei analog zu /10/ differenziert erfasst, wobei die Schichten des Keupers, der Jura und Kreide (die beiden letztgenannten werden als ein Homogenbereich zusammengefasst) sowie des Quartärs als bereichsweise homogene Bereiche gehalten werden. Die Materialdaten für Deckgebirge, Hutgestein und für den Anhydrit sind nach /10/ und /11/ in Tabelle 2-1 angegeben. Für Altversatz wird ein Elastizitätsmodul von 60 MPa und eine Querkontraktionszahl von 0,27 angesetzt.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341021					GC	LD	0009	01	

Steinsalz weist elastisch-viskoplastisches Materialverhalten auf. Für die hier durchgeführte geometrisch lineare Berechnung kann von einer additiven Zerlegung des Verzerrungstensors und des Tensors der Verzerrungsgeschwindigkeiten in einen elastischen und einen viskoplastischen Anteil

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_v$$

ausgegangen werden. Der elastische Anteil des Stoffgesetzes wird als linear elastisch betrachtet, die Materialdaten hierfür nach /10/ und /11/ sind in Tabelle 2-1 angegeben.

Material	Elastizitätsmodul E	Querkontraktionszahl ν
Quartär	100 MPa	0,33
Jura-Kreide	2 GPa	0,27
Keuper	2 GPa	0,27
Hutgestein	10 GPa	0,27
Anhydrit	30 GPa	0,27
Steinsalz	25 GPa	0,27
Altversatz	60 MPa	0,27

Tabelle 2-1: Parameter für linear elastisches Materialverhalten

Der viskoplastische Anteil wird als stationäres Kriechen modelliert, wobei das Materialgesetz für Steinsalz nach /12/

$$\dot{\epsilon}_{eff}^r = A \cdot e^{\frac{-Q}{R \cdot T}} \cdot \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma_*} \right)^n$$

mit

$$\sigma_{eff} = \sqrt{3I_2^D}, I_2^D = \frac{1}{6} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right]$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ Hauptspannungen, I_2^D zweite Invariante des Spannungsdeviators

und den Parametern /12/

- Spannungsexponent n = 5
- Kriechfaktor A = 0,18 [1/d]
- Aktivierungsenergie Q = 54 [kJ/mol]
- Gaskonstante R = 8,314 * 10⁻³ [kJ/mol K]
- Normierungsspannung σ_* = 1 [MPa]

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341021					GC	LD	0009	01	

und der Temperatur T [K] angesetzt wird. Um unterschiedliche Kriechfähigkeit der verschiedenen stratigraphischen Einheiten zu berücksichtigen, werden unterschiedliche Vorfaktoren (Kriechklassen) gewählt, wie in /12/ empfohlen.

Nach /12/ wird für Bereiche des Kalilagers Staßfurt ein Stoffgesetz für Carnallit

$$\dot{\epsilon}_{eff, Carn}^r = A \cdot e^{\frac{-Q}{R \cdot T}} \cdot \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma_*} \right)^n + C \cdot \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma_*} \right)^2$$

mit $C = 4,5 \cdot 10^{-7}$ [1/d] und den oben für das Stoffgesetz für Steinsalz angegebenen Parametern angesetzt.

Die Dichte der Materialien wird zu 2,2 g/cm³ für das Steinsalz, 2,5 g/cm³ für den Anhydrit, 1,2 g/cm³ für den Altversatz und 2,2 g/cm³ für das Deckgebirge und das Hutgestein angesetzt.

2.3.2 Thermisches Verhalten

Für alle Materialien wird von thermisch isotropem Verhalten ausgegangen. Wärmeübertragung wird in den Berechnungen durch Wärmeleitung berücksichtigt, der Einfluss von Konvektion und Strahlung wird vernachlässigt. Die Materialparameter sind in Tabelle 2-2 zusammengestellt. Alle Parameter sind temperaturunabhängig.

Material	Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Deckgebirge und Hutgestein /13/	710	1,8
Anhydrit	864	5,32
Steinsalz	855	5,3
Altversatz	1840	0,52

Tabelle 2-2: Materialparameter zur Temperaturberechnung

Die Temperatur im unverfüllten Zustand wird im gesamten Berechnungsausschnitt mit 23 °C (296,15 K) teufenunabhängig vorausgesetzt, der Bewetterungseinfluss wird vernachlässigt.

2.3.3 Thermomechanische Kopplung

Die Kopplung der thermischen und der mechanischen Berechnung erfolgt über den Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T . Dieser ist für die einzelnen Materialien in Tabelle 2-3 angegeben. Für Altversatz wird 1/10 des in /14/ angegebenen Steinsalz-Wertes gesetzt.

Material	Wärmeausdehnungskoeffizient α_T [1/K]
Deckgebirge und Hutgestein	$5 \cdot 10^{-6}$
Anhydrit	$4 \cdot 10^{-5}$
Steinsalz	$4 \cdot 10^{-5}$
Altversatz	$4 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 2-3: Wärmeausdehnungskoeffizient der berücksichtigten Materialien nach /14/

2.3.4 Hydratationsmodell für Salzbeton

Der hydraulisch abbindende Versatz wird mit dem in /15/ dargestellten Hydratationsmodell modelliert. Hierbei hängen die aktuellen thermischen und mechanischen Materialkennwerte Elastizitätsmodul, Druck- und Zugfestigkeit vom Abbindeprozess ab, d. h. sie sind über den Hydratationsfortschritt gekoppelt. Der aktuelle Hydratationsgrad α wird bezogen auf das wirksame Betonalter t_e durch

$$\alpha(t_e) = e^{-\left(\ln\left(1 + \frac{t_e}{t_1}\right)\right)^b}$$

mit den betonspezifischen Konstanten b und t_1 beschrieben. Das wirksame Betonalter ergibt sich aus

$$t_e = \int_0^t \exp\left(\frac{E_A}{R} \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{T} \right]\right) dt$$

mit

T Betontemperatur [K]

E_A Aktivierungsenergie $E_A = 33500$ [J/mol] für $T > 293$ K

$E_A = 33500 + 1470 (293 - T)$ [J/mol] für $T < 293$ K

R universelle Gaskonstante, $R = 8,314$ [J/mol K]

Im Rahmen der bGZ wird Salzbeton entsprechend dem Referenzmaterial M2, für die Stilllegung Salzbeton M3 verwendet. In /16/ bzw. /17/ wird die Identifikation der Parameter für den Salzbeton M2 bzw. M3 beschrieben.

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	22341021					GC	LD	0009	01	

Salzbeton M2

$t_1 = 3,287$ [d]

$b = -1,3425$

Zugfestigkeit bei $\alpha = 1$: 2,95 [MPa]

Druckfestigkeit bei $\alpha = 1$: 46,8 [MPa]

Elastizitätsmodul bei $\alpha = 1$: 15,35 [GPa]

Die Werte für einen Hydratationsgrad $\alpha = 1$ sind theoretische Endwerte, sie werden rechnerisch nicht erreicht.

Zudem wurde in /16/ eine auf die Zementmenge von 328 kg/m^3 bezogene Wärmemenge Q_{ce}^{\max} von $3,295 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$ ermittelt. Weitere zur Modellierung benötigte betonspezifische Parameter sind der Mindesthydratationsgrad α_0 sowie die Konstanten a und c. Diese werden nach /16/ mit

$\alpha_0 = 0,263$ [-]

$a = 0,6667$ [-]

$c = 0,2037$ [MPa^{1/3}]

angesetzt.

Der Einfluss des Abbindevorganges auf die Querkontraktionszahl ν wird in den hier vorliegenden Berechnungen wie in /16/ angegeben vernachlässigt. Es gilt $\nu = 0,33$.

Weitere vom Hydratationsgrad unabhängige Materialkennwerte sind gemäß /16/:

Festmaterialdichte $\rho = 1980$ [kg/m³]

Spezifische Wärmekapazität $c_p = 930$ [J/kgK]

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 1,14$ [W/mK]

Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha_T = 4 \cdot 10^{-5}$ [1/K]

Salzbeton M3

$t_1 = 4,2101$ [d]

$b = -1,1255$

Zugfestigkeit bei $\alpha = 1$: 2,09 [MPa]

Druckfestigkeit bei $\alpha = 1$: 42,1 [MPa]

Elastizitätsmodul bei $\alpha = 1$: 10,7 [GPa]

Die Werte für einen Hydratationsgrad $\alpha = 1$ sind theoretische Endwerte, sie werden rechnerisch nicht erreicht.

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	22341021					GC	LD	0009	01	

Zudem wurde in /17/ eine auf die Zementmenge von 197 kg/m^3 bezogene Wärmemenge Q_{ce}^{\max} von $4,825 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$ ermittelt. Weitere zur Modellierung benötigte betonspezifische Parameter sind der Mindesthydratationsgrad α_0 sowie die Konstanten a und c. Diese werden nach /17/ mit

$$\alpha_0 = 0,385 \text{ [-]}$$

$$a = 0,6667 \text{ [-]}$$

$$c = 0,155 \text{ [MPa}^{1/3}\text{]}$$

angesetzt.

Der Einfluss des Abbindevorganges auf die Querkontraktionszahl ν wird in den hier vorliegenden Berechnungen wie in /17/ angegeben vernachlässigt. Es gilt $\nu = 0,255$.

Weitere vom Hydratationsgrad unabhängige Materialkennwerte sind gemäß /17/:

Festmaterialdichte $\rho = 1950 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
Spezifische Wärmekapazität $c_p = 918 \text{ [J/kgK]}$
Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,87 \text{ [W/mK]}$
Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha_T = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ [1/K]}$

Das mechanische Verhalten des Salzbetons wird durch einen elastoplastischen Ansatz nach Drucker-Prager approximiert. Die Materialparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung lassen sich aus den Werten der einaxialen Zug- und Druckfestigkeit (also abhängig vom Hydratationsgrad) bestimmen.

2.4 Berechnungsmethode

Zur Berechnung wird die Methode der Finiten Differenzen mit einem expliziten Verfahren sowie eine gemischte Diskretisierungstechnik, die eine Diskretisierung mit unstrukturierten Gittern erlaubt, Programmpaket FLAC^{3D} /18/ Version 3.1 mit dem Präprozessor ANSYSPrepPost /19/, verwendet. Es ergeben sich bei gleicher Diskretisierung die gleichen Gleichungssysteme wie bei einer Diskretisierung mit finiten Elementen mit linearen Verschiebungsansätzen. Auch für die Temperaturberechnung werden lineare Ansätze verwendet. Die thermomechanische Kopplung erfolgt in jedem Rechenschritt.

Zum Nachweis des stabilen Endzustandes wird ab einem Zeitpunkt von 50 Jahren, nachdem die Verfüllung abgeschlossen wurde, nur noch eine mechanische Berechnung durchgeführt, da dann der Temperatureinfluss nur noch gering ist.

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	22341021					GC	LD	0009	01



3 Berechnungsmodell

Zum Nachweis des stabilen Endzustands des zugelaufenen Endlagers wurde eine Berechnung an einem 2D-Modell (ebener Verzerrungszustand) durchgeführt.

Ausgehend vom Sonderschnitt ZTS-3.1 werden zunächst Vereinfachungen der Geologie und Geometrie durchgeführt. Das vereinfachte Modell wird in ANSYS PrepPost /19/ vernetzt, wobei 4-Knoten-Elemente und eine geringe Anzahl von 3-Knoten-Elementen (unter 0.1% und nicht im Nahbereich der Hohlräume) verwendet werden. Das so generierte Netz wird dann in FLAC^{3D} eingelesen.

3.1 Vereinfachungen

In Abbildung 3-1 wird das Berechnungsmodell inklusive der durchgeführten Vereinfachungen für den Sonderschnitt ZTS-3.1 /8/ dargestellt. Für das Deckgebirge wird, wie in Abschnitt 2.3.1 dargestellt, linear elastisches Materialverhalten für die modellierten Homogenbereiche Quartär, Jura-Kreide, Keuper und Hutgestein angesetzt. Abweichend von /10/ wird die DGL-Schicht (Deckanhydrit, Grauer Salzton, Leine-Karbonat) nicht gesondert modelliert, da der Einfluss auf die Senkung an der Tagesoberfläche geringfügig ist.

Westlich des Lagerteils C wird das sich im Muldenkern der Südmulde II befindliche Salz der Aller-Serie (z4, Kriechklasse 2) dem Anhydritmittel-Tonmittelsalz (z3AM-TM, Kriechklasse 0) zugeschlagen. Das den Verlauf der Muldenachse der Südmulde II begleitende Kaliband (z2SF, z2HG-SF), sowie die sich im Hangenden des Lagerteils C befindlichen Schichten des Hangendsalzes (z2HG, Kriechklasse 0) bis hin zu den kieseritischen Übergangsschichten (z2UE, Kriechklasse 0) werden ebenfalls in der Modellierung nicht berücksichtigt und dem Hauptsalz West (z2HS3, Kriechklasse 1) zugeordnet.

Die Schichten des Hangendsalzes bis hin zu den kieseritischen Übergangsschichten (z2HG-UE) der Kriechklasse 2 östlich des Lagerteils D werden dem Hauptsalz Ost (z2HS2, Kriechklasse 4) zugeordnet. Für den Modellbereich des Ostsattels bis hin zum rechtem Modellrand wird ein bankrechter Gebirgsaufbau mit Hauptsalz (z2HS2 (Kriechklasse 4) im Liegenden und Orangsalz-Bank/Bändersalz (z3OS-BK/BD, Kriechklasse 1) sowie Anhydritmittelsalz (z3AM, Kriechklasse 0) im Hangenden modelliert.

Altversatz in den Kalilagern wird bis zum rechnerisch angenommenen Lösungszutritt berücksichtigt.

Liegt der Anhydrit in Schollen vor, wird zwischen diesen Schollen eine geringmächtige Schicht Salz modelliert, auch wenn der Anhydrit im Sonderschnitt als zusammenhängend dargestellt ist.

Die dargestellte Subrosionsmulde wird bis zum angenommenen Lösungszutritt entsprechend der Lokation als z2HS West, z3AM und z3OS-BK/BD modelliert.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341021					GC	LD	0009	01	

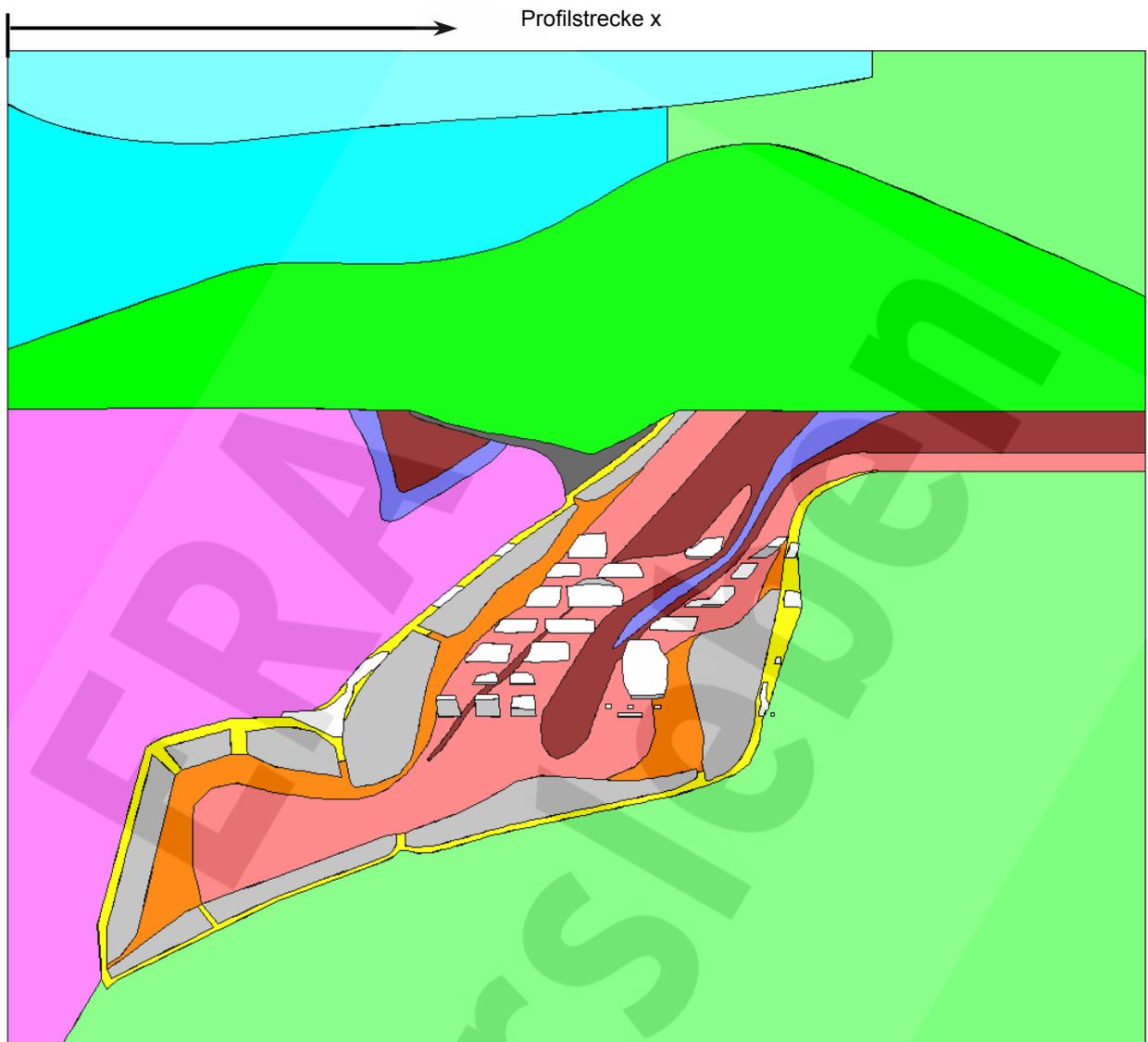
3.2 Randbedingungen

An den seitlichen Randflächen werden Verschiebungsrandbedingungen angesetzt, die die Verschiebungen in x- bzw. y-Richtung behindern. An der unteren Randfläche werden die Verschiebungen in z-Richtung festgehalten.

Der Berechnungsausschnitt umfasst in der x-z-Ebene ein Gebiet von 850 m x 750 m. In z-Richtung verläuft dieser Ausschnitt von 130 mNN bis -620 mNN. Dieser 2D-Ausschnitt wurde mit 37 172 Zonen diskretisiert. In y-Richtung wurde 1 m extrudiert (= 1 Zone). Aufgrund der Verschiebungsrandbedingungen in y-Richtung entspricht dieses 3D-Modell einer 2D-Modellierung.

In Abbildung 3-2 ist die Diskretisierung des gesamten Modells, in Abbildung 3-3 im Bereich der Subrosionsmulde sowie der oberen Abbaue dargestellt. Für dieses Modell wird davon ausgegangen, dass eine Mulde mit einer Querschnittsfläche von ca. 1 750 m² entsteht. Dies entspricht in etwa der unter Abschnitt 2.2 berechneten Größe von 1 660 m².

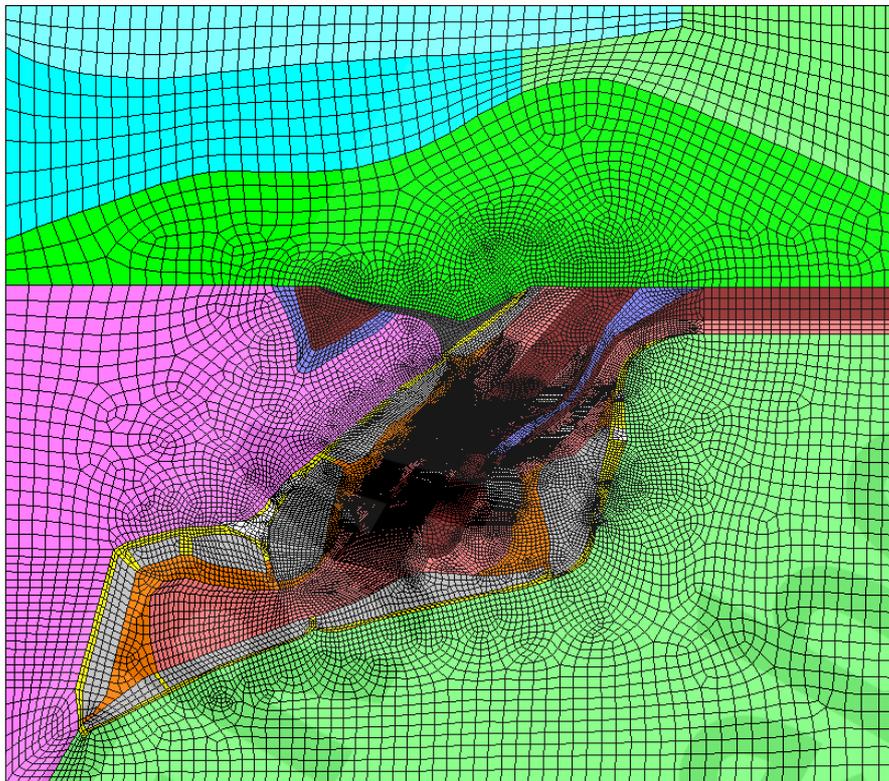
Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341021					GC	LD	0009	01



- | | | |
|-----------------------|------------------------|------------|
| Deckgebirge / Quartär | z3HA | z2SF |
| Deckgebirge / Kreide | z3AM | z2HS Ost |
| Deckgebirge / Keuper | z3OS-BK/BD Südmulde II | z2HS West |
| Hutgestein | z3OS-BK/BD | Abbau |
| Subrosionsmulde | z3LS | Altversatz |
| | z3SS-TM | |

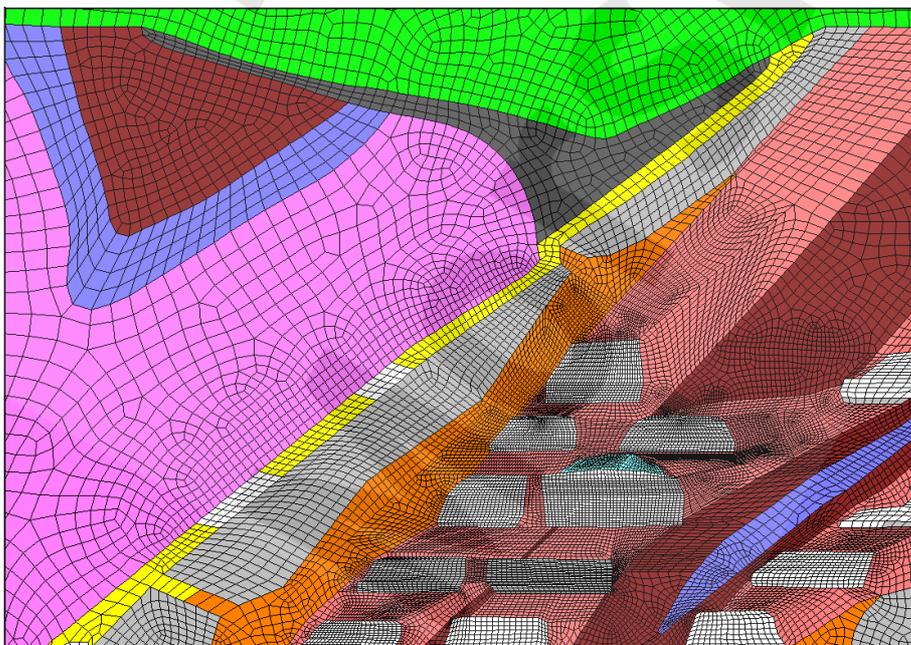
Abbildung 3-1: Darstellung des geometrischen Modells (Subrosionsmulde bis zum angenommenen Lösungszutritt entsprechend der Lokation als z2HS West, z3AM und z3OS-BK/BD modelliert)

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341021					GC	LD	0009	01



- Deckgebirge / Quartär
- Deckgebirge / Kreide
- Deckgebirge / Keuper
- Hutgestein
- z3HA
- z3AM
- z3OS-BK/BD Südmulde II
- z3OS-BK/BD
- z3LS
- z3SS-TM
- z2SF
- z2HS Ost
- z2HS West
- Abbau
- Altversatz
- Subrosionsmulde

Abbildung 3-2: Darstellung des numerischen Modells



- Hutgestein
- z3HA
- z3AM
- z3OS-BK/BD Südmulde II
- z3OS-BK/BD
- z3LS
- z3SS-TM
- z2SF
- z2HS Ost
- z2HS West
- Abbau
- Altversatz
- Subrosionsmulde
- Löser Abb. 3 südl.

Abbildung 3-3: Diskretisierung im Bereich der Subrosionsmulde sowie der Abbaue (Ausschnitt)

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341021					GC	LD	0009	01



3.3 Belastungsgeschichte

Die Berechnung berücksichtigt die Belastungsgeschichte seit Auffahrung der Grubenbaue, die Maßnahmen der bergbaulichen Gefahrenabwehrmaßnahme im Zentralteil (bGZ) sowie die Verfüllung der Grubenbaue im Rahmen der Stilllegungsmaßnahmen.

Zunächst wird ein dem lithostatischen Druck entsprechender Primärspannungszustand erzeugt, bei dem sich das Gebirge in einem Gleichgewichtszustand befindet. Danach wird die Auffahrung der Abbaue und Strecken simuliert. Es wird von einem gleichzeitigen Auffahren aller Hohlräume im Jahr 1935 im betrachteten Berechnungsausschnitt ausgegangen. Es folgt eine Kriechberechnung bis zum Einbringen des Altversatzes in Abbauen der Lagerteile C und D, welcher im Jahr 1950 simuliert wird. Nach weiteren 40 Jahren Simulationszeit erfolgt der Teilversatz mehrerer Steinsalzabbaue. Des Weiteren wird durch die Modellierung der Löserfall vom November 2001 im Abbau 3 südl. erfasst. Die Simulation der Verfüllmaßnahmen von bGZ und Stilllegung erfolgt durch das Zuweisen des Hydratationsmodells für M2 bzw. M3 in den entsprechenden Abbauen. Nach Abschluss der Stilllegung wird eine Standzeit des trockenen Endlagers von 50 Jahren simuliert (siehe Abschnitt 2.2). Das Zulaufen des Endlagers wird in einem Rechenschritt simuliert, wobei die in Abbildung 3-4 dargestellten Bereiche (Ablaugungsmulde, Kalilager C bis zum Sohlenniveau -372 mNN, alle Steinsalzabbaue und Strecken) als instantan zugelaufen angenommen werden. Dies wird simuliert, indem auf den Konturen dieser Bereiche ein dem Lösungsdruck entsprechender Druck angesetzt wird. Es wird davon ausgegangen, dass die Lösung bis zur Tagesoberfläche ansteht, der Lösungsdruck wird teufenabhängig entsprechend angesetzt (Dichte der Lösung $\rho = 1,2 \text{ g/cm}^3$). Die Stützwirkung korrodierten Salzbetons wird nicht zum Ansatz gebracht. Danach wird die Berechnung bis 10 000 Jahre nach Stilllegung fortgesetzt. Der Berechnungsablauf ist aus Tabelle 3-1 ersichtlich.

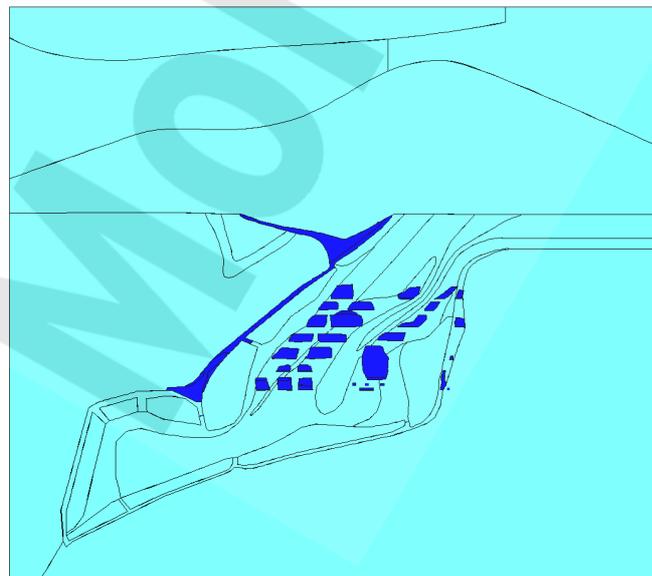


Abbildung 3-4: Darstellung der zugelaufenen Bereiche

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	22341021					GC	LD	0009	01



	Simulationszeit [Tage]	Abbau	Bemerkungen
	0		Initialisierung, Berechnungszeitpunkt 01/1935
	5 479	Abbaue im Lagerteil C und D	Einbringen Altversatz Berechnungszeitpunkt 01/1950
	20 089	diverse Abbaue im Steinsalz	Einbringen Altversatz Berechnungszeitpunkt 01/1990
	24 440	12YEA52 R002 Abb. 3 südl.	Löserfall Abbau 3s, 2. Sohle
bGZ (Salzbeton M2)	25 986	15YEA51 R002 Abb. 2 südl.	
	26 028	15YER51 R002 Abb. 3 südl.	
	26 097	13YEA52 R002 Abb. 3 südl.	
	26 148	13YEA51 R002 Abb. 2 südl.	
	26 256	13YEA53 R002 Abb. 4 südl.	
	26 579	12YEA52 R002 Abb. 3 südl.	
	26 581	12YEA51 R002 Abb. 2 südl.	
	27 047	10YEA51 R002 Abb. 2 südl.	
	27 111	10YEA52 R002 Abb. 3 südl.	
	27 366	09YER51 R002 Abb. 2 südl.	
Stillelegung (Salzbeton M3)	29 347	17YEA56 R004 Abb. 3 südl.	
	29 397	16YER51 R004 Abb. 2 südl.	
	29 704	16YEA52 R002 Abb. 4 südl.	
	29 785	16YEA51 R006 Abb. 2b südl.	
	29 797	16YEA51 R005 Abb. 1b südl.	
	29 901	16YER51 R003 Abb. 1 südl.	
	30 837	12YER52 R002 Abb. 4 südl.	
	30 874	10YEA53 R002 Abb. 4 südl.	
	30 921	09YEA51 R002 Abb. 3	Ende Stillelegung, Berechnungszeitpunkt 08/2019
	49 183	alle Abbaue + Lagerteil C bis -375 mNN	Instantaner Zulauf
	3 701 683		Ende Simulation

Tabelle 3-1: Berechnungsablauf der Simulation

Die Simulation der Verfüllung der Abbaue erfolgt für jeden einzelnen Abbau in einem Schritt (instantane Verfüllung). Die Simulation einer lagenweisen Verfüllung wie in /1/ ist hier nicht erforderlich, da die Auswirkung der Verfüllschritte auf die Verformung der Tagesoberfläche vernachlässigbar ist. Änderungen bzgl. der Verfülldauer und Verfüllreihenfolge haben keinen signifikanten Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Als Einbringtemperatur für den Salzbeton M2 bzw. M3 werden die zum Einbringzeitpunkt vorhandenen Umgebungstemperaturen (zwischen ca. 20°C und ca. 30°C angesetzt. Eine thermomechanisch gekoppelte Berechnung wird nur bis 50 Jahre nach Abschluss der Verfüllung durchgeführt, da danach der Einfluss auf die mechanischen Berechnungsgrößen gering ist /1/.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341021					GC	LD	0009	01	

4 Ergebnisse und Bewertung

Die in dieser Unterlage vorgestellte Berechnung dient dem Nachweis des stabilen Endzustands des zugelaufenen Endlagers. Wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, ist der ausreichende Schutz der Tagesoberfläche nachzuweisen. Dazu werden im Folgenden die Berechnungsergebnisse für die:

Verschiebungen / Senkungen s [m] sowie die daraus abgeleiteten Größen

Senkungsrate \dot{s} [m/a] sowie

Schiefstellung $\alpha = \frac{\Delta s}{\Delta x}$ [-] dargestellt.

Die Berechnungsergebnisse beziehen sich auf die Knoten, welche die Tagesoberfläche repräsentieren ($z = 130$ mNN).

4.1 Nachweis der Begrenzung der Verformung der Tagesoberfläche

Zur Ermittlung der Senkungen sowie der daraus abgeleiteten Größen werden an 18 Auswertepunkten der Tagesoberfläche (im Abstand von jeweils 50 m entlang der Profilstrecke x) die Verschiebungen in z -Richtung aufgezeichnet. In Abbildung 4-1 sind für ausgewählte Zeitpunkte (Ende Stilllegung, 100, 1 000, 5 000 und 10 000 Jahre nach Ende der Stilllegung) die Senkungen entlang der Profilstrecke (x -Richtung) dargestellt. Die maximale Senkung tritt über dem als zugelaufen angenommenen Kalilager C auf.

Zu Beginn der Stilllegung werden rechnerisch initiale standzeitbedingte Senkungen der Tagesoberfläche von -0,14 m bis maximal -0,27 m ermittelt, wobei das Zentrum der Senkungsmulde über den Steinsalzabbauen liegt. Die maximalen Schiefstellungen betragen zu diesem Zeitpunkt $< 1 / 2 000$.

Die maximalen berechneten Senkungen der Tagesoberfläche (inklusive der standzeitbedingten Senkungen seit Auffahrung) betragen zum Zeitpunkt 10 000 a nach Ende der Stilllegung $s = 1,23$ m und treten über den unteren Sohlen des gelösten Lagerteils C auf, vgl. Abbildung 4-1. Zu diesem Zeitpunkt tritt ebenfalls die maximale Schiefstellung mit $\alpha = 1 / 1000$ an der östlichen Flanke der Senkungsmulde auf.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341021					GC	LD	0009	01

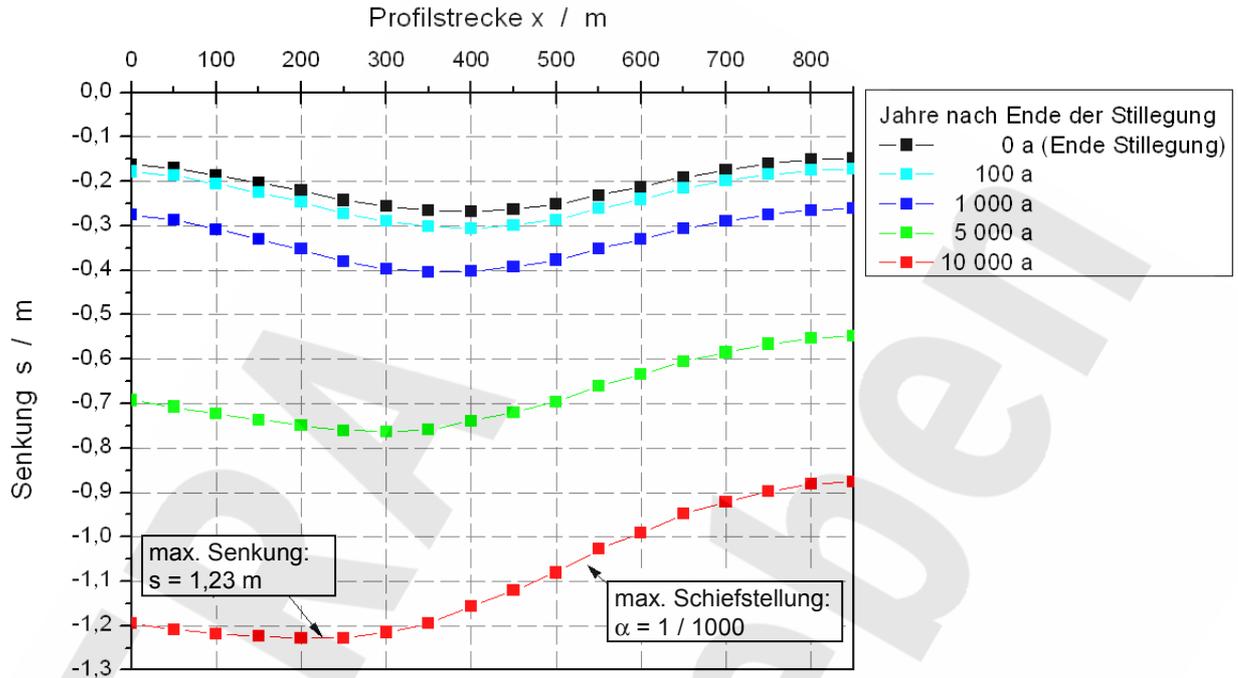


Abbildung 4-1: Senkung [m] an der Tagesoberfläche in Abhängigkeit des Ortes bis 10 000 Jahre nach Stilllegung des Endlagers

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	22341021					GC	LD	0009	01



In Abbildung 4-2 werden die Senkungsverläufe an der Tagesoberfläche für ausgewählte Auswertepunkte wiedergegeben. Aus Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2 wird ersichtlich, dass die maximalen Senkungsraten der Tagesoberfläche am westlichen Modellrand auftreten. Die Senkungsraten nehmen für alle Auswertepunkte geringfügig im Laufe des Auswertzeitraumes ab. Am westlichen Modellrand werden zum Ende des Betrachtungszeitraumes maximale Senkungsraten mit Beträgen von ca. 0,1 mm/a berechnet.

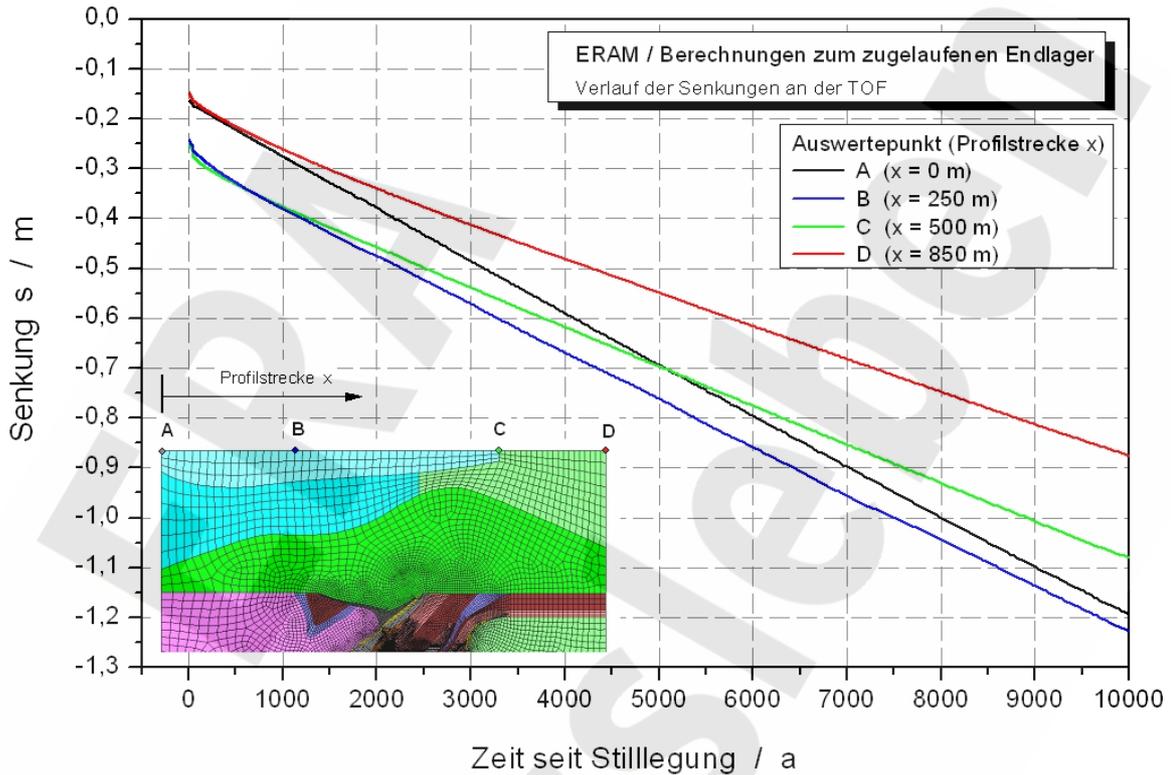


Abbildung 4-2: Verlauf der Senkung [m] an der Tagesoberfläche bis 10 000 Jahre nach Stilllegung des Endlagers für ausgewählte Auswertepunkte

In der Tabelle 4-1 sind für verschiedene Zeitpunkte nach Stilllegung Berechnungsergebnisse zur maximalen Senkung und Schiefstellung sowie deren –raten zusammengestellt.

Zeitpunkt nach Stilllegung [a]	Maximale Senkung an der TOF [m]	Maximale Senkungsrates an der TOF [mm/a]	Maximale Schiefstellung an der TOF [-]	Maximale Schiefstellungsrate an der TOF [1/a]
100	-0,31 (-0,04)	0,16	1 / 1900	$5,3 \times 10^{-6}$
1 000	-0,40 (-0,14)	0,11	1 / 1800	$2,8 \times 10^{-6}$
5 000	-0,76 (-0,54)	0,10	1 / 1400	$6,9 \times 10^{-7}$
10 000	-1,23 (-1,04)	0,10	1 / 1000	$1,0 \times 10^{-6}$

Werte in Klammern: Senkungen abzüglich initialer standzeitbedingter Senkungen vor Beginn der Stilllegung

Tabelle 4-1: Zusammenstellung der berechneten maximalen Senkung und Senkungsrates sowie der Schiefstellung und Schiefstellungsrate an der Tagesoberfläche

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22341021					GC	LD	0009	01



Die maximale Senkung an der Tagesoberfläche im Betrachtungszeitraum von Beginn der Verfüllmaßnahmen bis 10 000 Jahre nach Abschluss der Verfüllung beträgt 1,04 m.

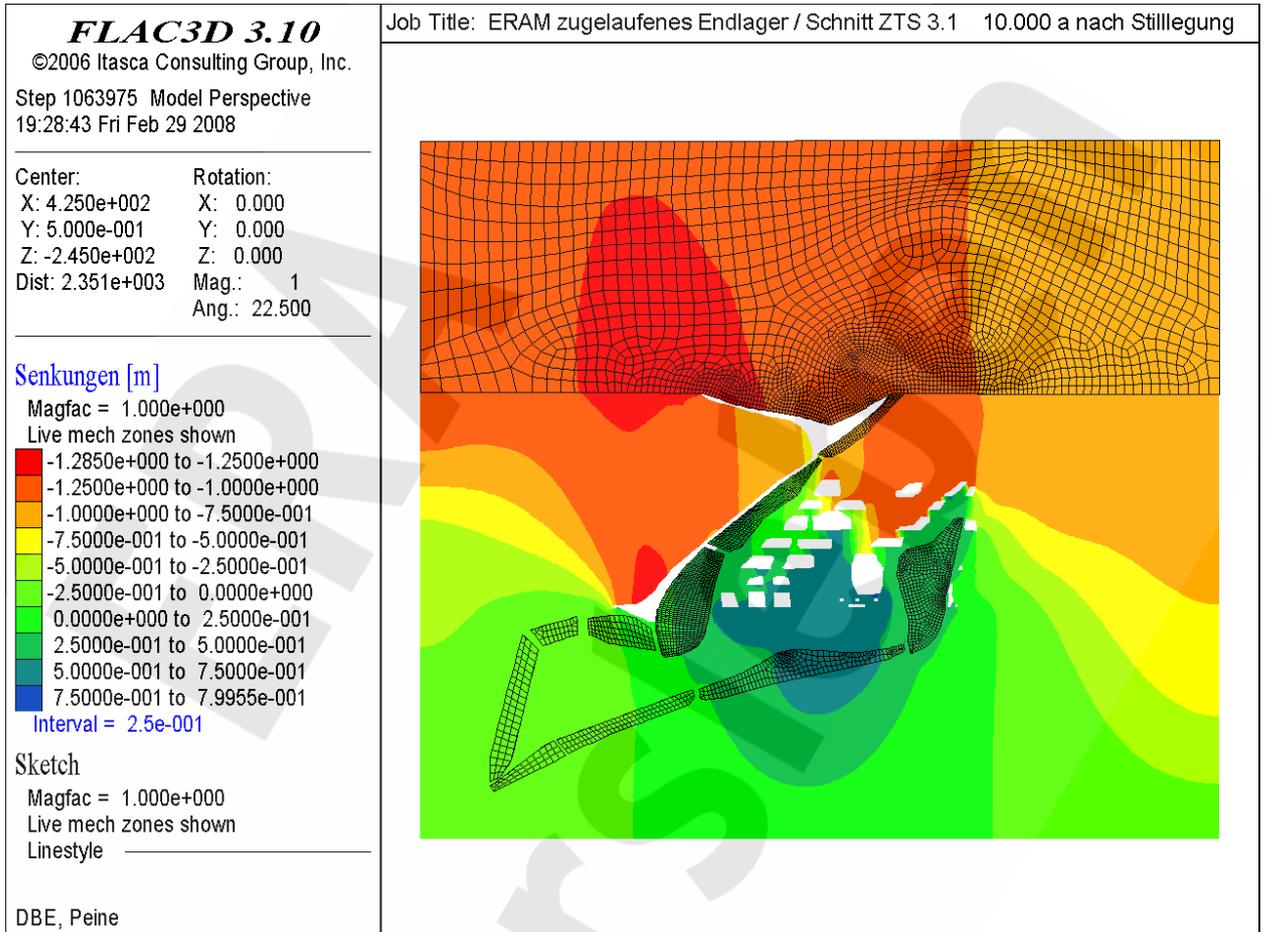


Abbildung 4-3: Senkungen [m] (z-Verschiebungen) 10 000 Jahre nach Stilllegung

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341021					GC	LD	0009	01	

Zwar wird der in /2/ angegebene Grenzwert von 1 m für die Senkung der Tagesoberfläche hier rechnerisch überschritten, der Grenzwert für die Schiefstellungsrate wird jedoch eingehalten. Zudem sind die Senkungsraten äußerst gering, Auswirkungen auf die Umwelt sind nicht zu besorgen. Der Schutz der Tagesoberfläche ist damit gewährleistet. Diese Aussage kann aufgrund der geringen berechneten Senkungsraten auch auf einen längeren Betrachtungszeitraum erweitert werden.

4.2 Zusammenfassende Bewertung

Da der Nachweis der Begrenzung der Senkung und der Schiefstellungsrate rechnerisch geführt werden konnte, ist für das zugelaufene Endlager der Nachweis des stabilen Endzustands geführt. Zudem wurden sehr geringe Senkungsraten von ca. 0,1 mm/a nach 10 000 Jahren berechnet. Diese sind als geringfügig einzustufen und haben keine nachteiligen Auswirkungen auf die Umwelt.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341021					GC	LD	0009	01	

5 Literatur

- /1/ DBE:
Stand sicherheits- und Integritätsnachweis des verfüllten Endlagers: Zentralteil Bartensleben, Stand: 24.02.2006

- /2/ DBE:
Sicherheitsnachweismethoden und Sicherheitsnachweiskriterien für die Maßnahmen der Stilllegung (Stand sicherheit und Integrität), Stand: 15.12.2005

- /3/ Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau) vom 13. Juli 1990 (BGBl. I S. 1420), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 24. Januar 2008 (BGBl. I S. 85)

- /4/ DBE:
Verfüllplan zur Stilllegung des ERAM nach Durchführung der bergbaulichen Gefahrenabwehrmaßnahme im Zentralteil - Konzeptplanung, Stand: 15.12.2005

- /5/ DBE:
Sonderschnitt ZTN-3.1, Geologie und Kriechklassen, FEM-Modellierung, Stand: 20.11.2000

- /6/ DBE:
Sonderschnitt ZT-3.3, Geologie und Kriechklassen, FEM-Modellierung, Stand: 20.11.2000

- /7/ DBE:
Sonderschnitt ZT-1.4, Geologie und Kriechklassen, Stand: 03.08.2001

- /8/ DBE:
Sonderschnitt ZTS-3.1, Geologie und Kriechklassen, Stand: 22.10.2001

- /9/ GRS:
Endlager Morsleben – Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit mit dem Rechenprogramm EMOS, GRS-A-3185, 01.08.2006

- /10/ BGR:
Auswirkungen von Feuchtekriechen auf die Integrität der Salzbarriere im südlichen Zentralbereich Bartensleben, Auftrags-Nr.: 9M2324101100, Tgb.-Nr. 10929/05, Hannover, Juli 2005

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341021					GC	LD	0009	01	

- /11/ BGR:
Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere in der Schachanlage Bartensleben, Archiv-Nr.: 0120259, Tgb.-Nr. 11118/00, Hannover, Dezember 2000

- /12/ BGR:
Ingenieurgeologische Erkundung von Homogenbereichen (AP 9M 213 100 15), Abschlussbericht, Archiv-Nr.: 117213, Tgb.-Nr.: 10683/98, Hannover, Mai 1998

- /13/ Gröber, Erk, Grigull:
Die Grundgesetze der Wärmeübertragung, Springer-Verlag, New York u.a., 1988

- /14/ BGR:
Geotechnische Erkundung und Standsicherheitskriterien, Salzmechanik X, Februar 1989

- /15/ Onken, Rostasy:
Wirksame Betonzugfestigkeit im Bauwerk bei früh einsetzendem Temperaturzwang, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 449, 1995

- /16/ DBE:
Verfüllmaterial von Strecken mit hohen Anforderungen - Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2, Stand: 27.02.2004

- /17/ DBE:
Salzbeton Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte (Referenzmaterial M3), Stand: 13.01.2006

- /18/ Itasca Consultants:
FLAC ^{3D} Manuals, Minnesota, USA, 2006

- /19/ ANSYS Inc.:
ANSYS Release 11.0 Documentation, USA, 2007

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341021					GC	LD	0009	01	

6 Glossar

Abbau:	Bezeichnung für einen durch bergmännische Tätigkeiten bei der Gewinnung von Kali- oder Steinsalz hergestellten Hohlraum
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 söhligem oder geneigten Strecke oder eines anderen Grubenbaus
Bauzustand:	Zustand, der während der Baumaßnahme temporär auftritt
Diskretisierung:	Mathematische Beschreibung eines räumlich zusammenhängenden Systems (Kontinuums) durch räumlich beschränkte Gebiete
Druckfestigkeit:	Festigkeit eines Materials unter Druckbeanspruchung
Endzustand, stabiler:	Zustand eines (Trag)systems, in dem sich sein Zustand im Betrachtungszeitraum nicht mehr verschlechtert
Finite-Differenzen-Methode:	Numerisches Verfahren zur Lösung von Randwertproblemen mittels -> Diskretisierung und Ersetzen der Ableitungen durch Differenzen
Hydratationsgrad:	Verhältnis von hydratisierten zu hydratisierbaren Bindemittelanteilen
Hydratationswärme:	Wärme, die als Folge exothermer Mineralreaktionen der Bindemittel (z. B. Zement, Flugasche) mit der Anmischflüssigkeit freigesetzt wird
lithostatisch:	Unter Einfluss der ruhenden Gebirgslast
Salzbeton:	Baustoff bestehend aus den Grundbestandteilen Zement, Betonzusatzstoff, Salzzuschlag sowie Wasser oder Salzlösungen als Anmachflüssigkeit

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22341021					GC	LD	0009	01	

- Salzspiegel: Obere Grenzfläche diapirischer Salzkörper oder flach gelagerter Salzgesteine etwa parallel zum Grundwasserspiegel, entstanden durch flächenhafte Lösung des Salzgesteins
- Sohle: Hier: Gesamtheit der annähernd in einem Niveau aufgefahrenen Grubenbaue
- Teufe: Tiefenlage unter einem Bezugsnormal wie z. B. der Tagesoberfläche
- Versatz: Material für die Verfüllung oder Stützung von Grubenbauen

