

VEB Gaskombinat Schwarze Pumpe
Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg
Forschungsbereich Kernenergie
Abteilung Endlagerung

Sicherheitstechnische Untersuchungen zur Einlagerung
radioaktiver Abfälle in der Steinsalzgrube Bartenaleben

(Zwischenbericht)

DEI - E - 10 - 20

Freiberg, den 30. November 1970

Zwischenbericht zur Studie

"Sicherheitstechnische Untersuchungen zur Einlagerung
radioaktiver Abfälle in der Steinsalzgrube Bartensleben"

Teil A: Probleme der Sicherheit bei der Endlagerung
radioaktiver Abfälle in Salzbergwerken

November 1970

VEB Gaskombinat Schwarze Pumpe
Deutsches Brennstoffinstitut
Freiberg
Forschungsbereich Kernenergie
Abt. Endlagerung

Bearbeiter: Dr.-Ing. H. Franke
Dr.-Ing. E. Mosler

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
1.1. Aufgabenstellung	1
1.2. Lösungsweg	2
2. Vorschriften zur Anlage eines zentralen Endlagers für radioaktive Abfälle	2
2.1. Berggesetz der Deutschen Demokratischen Republik	3
2.2. Strahlenschutzverordnung und Kernanlagen-Genehmigungsanordnung	5
3. Ursachen und Auswirkungen von Katastrophen im Kali- und Steinsalzbergbau	7
3.1. Katastrophen, ausgelöst durch gebirgsmechanische Vorgänge	8
3.1.1. Firstenzusammenbrüche	9
3.1.2. Gebirgsschläge	11
3.2. Katastrophen, ausgelöst durch Wasser- und Lösungszuflüsse	17
3.2.1. Zuflüsse, bedingt durch einen Abbau in der Nähe grundwasserführender Schichten	19
3.2.2. Zuflüsse aus undichten Schachtröhren	22
3.2.3. Zuflüsse aus Nachbargruben	23
3.2.4. Zuflüsse aus dem Liegenden	24
3.3. Katastrophen, ausgelöst durch Gasvorkommen	27
3.3.1. Freie Gasvorkommen	27
3.3.2. Gasausbrüche	28
3.3.3. Liegendenschläge im französischen Kalibergbau	31
3.4. Katastrophen, ausgelöst durch Grubenbrände	32
4. Beurteilung der Notwendigkeit sicherheitstechnischer Untersuchungen für die Steinsalzgrube Bartensleben	33
4.1. Geologische Verhältnisse	34
4.1.1. Regionalgeologischer Überblick	34
4.1.2. Geologie des Einlagerungsmediums	35
4.1.3. Geologie des Liegenden	3

4.1.4.	Geologie der hangenden zechsteinzeitlichen Bildungen	40
4.1.5.	Geologie des Deckgebirges	42
4.1.6.	Geologische Besonderheiten der Salzlagerstätte Bartensleben	45
4.2.	Geomechanische Verhältnisse	47
4.2.1.	Beurteilung der Gebirgsschlaggefahr	47
4.2.2.	Allgemeine Standsicherheit des Grubengebäudes	48
4.3.	Hydrologische Verhältnisse	52
4.3.1.	Zuflüsse aus dem Hangenden	52
4.3.2.	Zuflüsse über die Schachtröhre	56
4.3.3.	Zuflüsse aus Nachbargruben	59
4.3.4.	Zuflüsse aus dem Liegenden	62
4.4.	Gasvorkommen	62
4.5.	Brandgefährdung	63
5.	Ablauf und Auswirkungen von Katastrophen bei der Einlagerung radioaktiver Abfälle in Salzbergwerken	63
5.1.	Modellmäßige Darstellung der Voraussetzungen, des möglichen Ablaufs und der Auswirkungen des Ersaufens eines zentralen Endlagers	65
5.2.	Einige Bemerkungen zu notwendig werdenden Untersuchungen hinsichtlich der in dem Modell dargelegten Probleme	70
6.	Grundlagen zur Berechnung der Auflösungserscheinungen bei Wasser- und Salzlösungszuflüssen in einem Salzbergwerk	74
6.1.	Klassifizierung der Strömungsverhältnisse in den Grubenräumen	74
6.2.	Die Auflösung von Salzen in Wasser oder Salzlösung	76
6.2.1.	Auflösung unter erzwungener Strömung	78
6.2.2.	Die Auflösung unter konvektiven Bedingungen	83
6.2.3.	Der Einfluß der Klüftigkeit des Salzgesteins auf den Lösungsprozeß	85

Literatur

Anlagen

1. Einleitung

1.1. Aufgabenstellung

Ausgehend von den Ergebnissen bisheriger Untersuchungen zur Beseitigung radioaktiver Abprodukte aus kerntechnischen Anlagen erscheint es unter den territorialen und geologischen Gegebenheiten der DDR zweckmäßig, die Endlagerung aller Abfallkategorien in den Salzformationen des Zechsteins vorzunehmen. Ökonomische Vorteile bringt dabei die Verwendung von stillgelegten Bergwerksanlagen der Kali- und Steinsalzindustrie. Durch den Erwerb der ehemaligen Steinsalzgrube Bartensleben durch die Kernkraftwerksindustrie der DDR soll letztere Variante realisiert werden.

Voraussetzung für die Verwendung solcher Anlagen ist allerdings eine aus bergmännischer Sicht dem zu lagern-
den Medium entsprechende größtmögliche Sicherheit der Schächte und des Grubengebäudes gegen Katastrophenfälle. Für einen endgültigen Entscheid über die Eignung der Grube Bartensleben als Endlager für radioaktive feste und verfestigte Abfälle und für die Standortgenehmigung als kerntechnische Anlage entsprechend der Kernanlagen-Genehmigungsordnung ist deshalb die Sicherheit des Bergwerkes unter den gegebenen geomechanischen, hydrologischen und seismologischen Bedingungen zu beurteilen.

Als Kriterien der Sicherheit des zukünftigen Endlagers sind die Größe und die Wahrscheinlichkeit des maximal möglichen Unfalles anzusehen. Davon ausgehend sind bis zum Jahre 1972 Untersuchungen anzustellen mit dem Ziel der phänomenologischen Beschreibung des Ablaufes einer Katastrophe in einer Steinsalzgrube allgemein und der phänomenologischen Einschätzung des Eintrittes eines maximalen Katastrophenfalles in der Steinsalzgrube Bartensleben.

Die Aufgabe bestand deshalb zunächst darin, in vorbereitenden Betrachtungen zu diesem Problem die Faktoren, die in der Vergangenheit im Kali- und Steinsalzbergbau das Zustandekommen von Katastrophen begünstigten, zu

analysieren und ihr Zutreffen für das zukünftige Endlager zu beurteilen. Darauf aufbauend waren die Schwerpunkte der in den folgenden Jahren notwendig werdenden Arbeiten herauszustellen.

1.2. Lösungsweg

Die Ursachen und Auswirkungen von Katastrophen, die den Kali- und Steinsalzbergbau in seiner Geschichte heimgesucht haben, sollen durch eine entsprechende Literaturauswertung analysiert und die Parameter, die den Ablauf einer Katastrophe wesentlich beeinflussen, herausgestellt werden. Durch einen Vergleich der Ergebnisse mit den Verhältnissen im zukünftigen Endlager Bartensleben soll eine erste Einschätzung der Möglichkeit des Zutreffens der einzelnen Faktoren gegeben werden. Daraus lassen sich dann Schlußfolgerungen für die weitere Bearbeitung des Problems ableiten. Desweiteren wird ein Modell erarbeitet, in dem die bei den Untersuchungen zum maximalen Katastrophenfall zu beachtenden Zusammenhänge dargestellt werden. Das erstellte Modell soll als Grundlage für eine Entscheidungsfindung hinsichtlich der Bearbeitung von Schwerpunkten dienen. Abschließend wird noch auf die Zusammenhänge beim Lösungsvorgang während des Ersauens von Gruben des Kali- und Steinsalzbergbaus eingegangen.

2. Vorschriften zur Anlage eines zentralen Endlagers für radioaktive Abfälle

Ein zentrales Endlager für radioaktive Abfälle, das in einem stillgelegten Bergwerk eingerichtet werden soll, stellt in sicherheitstechnischer Hinsicht sowohl eine bergtechnische als auch eine kerntechnische Anlage dar.

Deshalb sind bei der Erarbeitung der Unterlagen für die Erteilung der Standortgenehmigung, bei der Projektierung und bei der Errichtung des Endlagers die einschlägigen Bestimmungen zu beachten. Im einzelnen handelt es sich dabei um das "Berggesetz der Deutschen Demokratischen Republik" mit den entsprechenden Durchführungsbestimmungen sowie um die "Strahlenschutzverordnung" mit Durchführungsbestimmung und die "Kernanlagen-Genehmigungsordnung", die als Grundlage der durchzuführenden Sicherheitsbetrachtungen anzusehen sind und deshalb im folgenden näher erläutert werden sollen.

2.1. Berggesetz der Deutschen Demokratischen Republik

Die grundlegende Formulierung, die die Notwendigkeit zur Durchführung von Untersuchungen zu Sicherheitsfragen in einem Bergwerk ausreichend begründet, lautet: "Untersuchungsarbeiten, Gewinnungsarbeiten, die unterirdische Speicherung und Sanierungsarbeiten sind so durchzuführen, daß keine Schäden auftreten, die bei Anwendung der neuesten technischen Erkenntnisse vermeidbar sind. Der Schutz vor spezifischen Gefahren des Bergbaus, insbesondere der Schutz

- des Lebens und der Gesundheit von Personen
- der Tagesoberfläche und des öffentlichen Verkehrs
- der Lagerstätten, der speicherfähigen Gesteine, der Grubenbaue und der sonstigen bergbaulichen Anlagen ist umfassend zu gewährleisten." [17].

Dabei wird dieser Schutz als Bergbausicherheit definiert. Entsprechend diesen Ausführungen kommen für einen Ausbau als zentrales Endlager für radioaktive Abfälle nur solche Anlagen in Frage, die einen reibungslosen Einlagerungsbetrieb und die Vermeidung von Folgeschäden gewährleisten, denn selbst für Bergschäden, die durch Nutzung des ursprünglichen Gewinnungsrechtes verursacht werden,

kann der Nachnutzer haftbar gemacht werden [27].

Der Nachweis der Erfüllung dieser Bedingungen kann nur durch umfangreiche geologische, geomechanische, hydrologische und seismologische Untersuchungen erbracht werden. Durch eine zweckmäßige Betriebsführung während der Einlagerung radioaktiver Abfälle und durch eine zweckmäßige Verwahrung des abgeworfenen Endlagers kann ein Schutz der Lagerstätte, der Tagesoberfläche mit den darauf befindlichen Anlagen und des öffentlichen Verkehrs erreicht oder zumindest das Ausmaß der Folgeschäden begrenzt werden.

Beim Ausbau eines Bergwerkes zu einem Endlager für radioaktive Abfälle hat man sich in den meisten Fällen mit der gegebenen Situation abzufinden.

Trotzdem wird eine bergmännische Tätigkeit zur Durchführung einer optimalen Einlagerungstechnologie nicht zu umgehen sein. Diesen Arbeiten ist die Arbeitsschutz- und Brandschutzanordnung 120/1 [37] zugrunde zu legen, in der die im Berggesetz niedergelegten Forderungen detailliert werden. Unter anderem werden dort, für den Bestand und die Sicherheit einer Anlage und zum Schutz der Belegschaft wichtige, Festlegungen zu folgenden Komplexen getroffen:

- Untersuchungsarbeiten
- Anlage und Einrichtung des Grubengebäudes
- Abbau und Versatz
- Grubenausbau
- Bewetterung
- Brandschutz
- Sprengwesen

Diese Vorschriften sind besonders bei untertägigen Untersuchungsarbeiten (Bohrungen), bei notwendig

werdenden Veränderungen am Grubengebäude (Aufwältigung von Strecken und Kammern, Auffahren von Streckenstummeln, Rollöchern u.ä. oder Schaffung von Durchbieben) und bei Neuauffahrung von zusätzlichen Lageräumen zu beachten.

2.2. Strahlenschutzverordnung und Kernanlagen-Genehmigungsverordnung

Die Strahlenschutzverordnung [4] dient u.a. dem Schutz der Umwelt und von Sachgütern vor radioaktiver Verunreinigung und ist dementsprechend auch für den Betrieb von Kernanlagen gültig. Als Kernanlage im Sinne der Verordnung ist auch eine zentrale Anlage zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen zu betrachten. Die Strahlenschutzverordnung beinhaltet die Rechtsvorschriften und Normative zum Schutz des Menschen und der Biosphäre und soll die nukleare Sicherheit der Kernanlagen gewährleisten.

Der Betrieb von Kernanlagen bedarf der Strahlenschutzgenehmigung der Staatlichen Zentrale für Strahlenschutz. Die Bedingungen für die Erteilung der Strahlenschutzgenehmigung werden in der Kernanlagen-Genehmigungsanordnung [5] gesondert geregelt [6]. Die Genehmigung wird erteilt, wenn der Nachweis erbracht ist, daß die Kernanlage den Rechtsvorschriften auf dem Gebiet des Strahlenschutzes und den Anforderungen an die nukleare Sicherheit entspricht. Bei der Erteilung der Strahlenschutzgenehmigung werden 4. Etappen unterschieden:

- Zustimmung zum Standort einer Kernanlage
- Zustimmung zur Errichtung einer Kernanlage
- Zustimmung zur Inbetriebnahme einer Kernanlage
- Zustimmung zum Dauerbetrieb einer Kernanlage

Dem Antrag auf Erteilung der Strahlenschutzgenehmigung sind folgende Dokumentationen und Angaben beizufügen:

1. Begründung der Standortwahl
2. Angaben zum Anlagentyp und zur Kapazität
3. Hauptparameter der technologischen Prozesse
4. Grundkonzeption des Strahlenschutzes und der nuklearen Sicherheit
5. Charakterisierung der näher zu untersuchenden Havarie-situationen, in der eine Beeinträchtigung der Biosphäre zu befürchten kann
6. Abschätzung der Menge und Nuklidzusammensetzung der radioaktiven Ausfälle
7. Vorstellungen über die Lagerung radioaktiver Abfälle
8. Festlegung von Gütefaktoren an natürlichen Eigenschaften der Umgebung (Meteorologie, Hydrologie, Geologie usw.) und des zusammenwirtschaftlichen Vorgeschehendes
9. Angaben zur Beschädigung der Umgebung
10. Angaben zur Nutzung der Umgebung
11. Vorstellungen über ergänzende Untersuchungen zu den Punkten 8 bis 10
12. Angabe von Schätzwerten über die Strahlenbelastung von Personal und Umgebung
13. Angabe über die Strahlenbelastung in Havarie-situationen

Für ein zentrales Endlager sind die einzelnen Punkte entsprechend anzulegen.

Der Schwerpunkt bei der Erstellung der Unterlagen für das Genehmigungsverfahren haben danach Sicherheitsbetrachtungen darzustellen. Bei der Nutzung eines stillgelegten Bergwerkes sind neben den in der Anordnung aufgeführten Gütefaktoren (Meteorologie, Hydrologie, Geologie), die außerdem die Verhältnisse in Schacht- und Grubenbereich mit erfassen müssen, eine geomechanisches und ein seismologisches sowie ein Schachtgutachten anzufertigen, die das Endlager hinsichtlich der Sicherheit unter bergtechnischen Gesichtspunkten beurteilen. Auf dieser Grundlage können dann Untersuchungen zum Ablauf und zu den Auswirkungen eines außerge-

wöhnlichen Ereignisses im Havariefall angestellt werden. Ein außergewöhnliches Ereignis ist jedes Ereignis, das vom beabsichtigten Betriebsablauf abweicht [4]. Bei einem Endlager für radioaktive Abfälle in einem ehemaligen Bergwerk ist dies der Fall, wenn sich aufgrund der geologischen, hydrologischen und geomechanischen Verhältnisse die Grube mit Wasser oder Salzlösung füllt, Radionuklide in Lösung gehen und die abfließende kontaminierte Lösung in die Biosphäre gelangt. Der Grad der Auswirkungen wird je nach der Größe des Unfalles unterschiedlich sein. Für die Beurteilung der Sicherheit des zukünftigen Endlagers interessiert schließlich der größtmögliche anzunehmende Unfall. In die Betrachtungen sind deshalb die möglichen Ursachen für Katastrophen im Bergbau, der sich daraus ergebende Ablauf des Ersaufens einer Grube, die dabei durch Strömungsvorgänge im Grubengebäude hervorgerufenen Veränderungen sowie die Strömungsverhältnisse kontaminierter Lösungen im Deckgebirge einzubeziehen und die verschiedenen Möglichkeiten gegenüberzustellen.

3. Ursachen und Auswirkungen von Katastrophen im Kali- und Steinsalzbergbau

Im Laufe seiner Geschichte wurde der Bergbau von zahlreichen Katastrophen betroffen, die nicht nur größere materielle Schäden zur Folge hatten, sondern bei denen vielfach auch der Verlust von Menschenleben zu beklagen war. Ausgelöst wurden solche Katastrophen durch gebirgsmechanische Vorgänge, durch Wasser- bzw. Lösungszuflüsse, durch Gasausbrüche und durch Brände. Die Ursachen liegen vorwiegend in der mangelhaften Kenntnis der speziellen geologischen und hydrologischen Verhältnisse sowie der gebirgsmechanischen und hydrologischen Auswirkungen des Bergbaus, in der fehlenden Erfahrung und in Fehlern bei der bergmännischen Tätigkeit.

Im folgenden soll auf die Ursachen und Auswirkungen von Katastrophen im Kali- und Steinsalzbergbau näher eingegangen werden.

3.1. Katastrophen, ausgelöst durch gebirgsmechanische Vorgänge

Die bergmännische Auffahrungstätigkeit stellt immer einen Eingriff in die Spannungsverhältnisse des Gebirges dar. Der in einem unverritzten Feldesteil aus Teufenlage und Dichte des überlagernden Materials resultierende Spannungszustand (Teufendruck) wird durch das Anlegen von Strecken und Abbaukammern gestört. Für die als Bergfesten belassenen Pfeiler zwischen nebeneinander liegenden Hohlräumen und Schweben zwischen übereinander liegenden Kammern und Strecken ergeben sich dadurch erstens eine spezifisch höhere Druckbelastung und zum anderen eine ungleichförmige Spannungsverteilung über den tragenden Querschnitt. Die auftretenden Spannungsspitzen können das anstehende Material bis über seine Bruchfestigkeit hinaus belasten. Die Auswirkungen davon sind dann eine teilweise oder vollkommene Zerstörung der tragenden Elemente, was sich durch Ribbildungen und Abschalungen an Pfeilern, Kammer- und Streckenstößen, durch Firstfall und Bewegungen in der Sohle sowie durch Deformation der Grubenräume äußert.

Die geschilderten Vorgänge sind zeitabhängig und klinen meist, wenn die Bergfesten nach bergtechnischen und sicherheitstechnischen Gesichtspunkten richtig dimensioniert wurden und sobald ein sekundärer Gleichgewichtszustand erreicht ist, nach einem gewissen Zeitraum ab. Zu einem Zusammenbruch der Hohlräume kann es nur dann kommen, wenn durch fortschreitende Zerstörung die Pfeiler und Schweben ihre Funktion als tragende Elemente nicht mehr erfüllen können. Diese Art der Zerstörungen haben im Bergbau bisher noch keine Katastrophen ausgelöst, soweit sie zeitig genug erkannt wurden, sodaß entsprechende Gegen-

Maßnahmen eingeleitet werden konnten. Werden dabei allerdings auch Hangendschichten, die im Kali- und Steinsalzbergbau als Schutzschicht gegen hydrologische Einflüsse notwendig sind, in Mitleidenschaft gezogen, besteht die Gefahr von Wasser- und Lösungszuflüssen aus dem Deckgebirge. Im Bergbau bedeuteten Zuflüsse oft ein Ersaufen und damit eine Aufgabe der Gruben. Bei einem Endlager für radioaktive Abfälle kann eine derartige Situation wesentlich weitreichendere Folgen haben. Im Abschnitt 5. wird deshalb auf dieses Problem noch einmal einzugehen sein.

In einigen Fällen kam es jedoch auch im Kali- und Steinsalzbergbau zu sogenannten Firstenzusammenbrüchen und Gebirgsschlägen, in deren Verlauf ganze Gruben oder Feldesteile zerstört wurden,

3.1.1. Firstenzusammenbrüche

Firstenzusammenbrüche sind durch eine großräumige Zerstörung von Steinsalz- oder Hartsalzschiefern gekennzeichnet und laufen gegenüber Gebirgsschlägen mit relativ geringer Intensität über größere Zeiträume ab. Sie werden bedingt durch gebirgsmechanische Vorgänge an Pfeilern und in den Dachschichten. Die Zerstörungen äußern sich zunächst in einer Zerklüftung der Pfeiler und enden meist mit einer vollständigen Verfüllung der Grubenräume durch Absinken der Firste.

Firstenzusammenbrüche sind bisher nur in der Grube Schierstedt bekannt geworden. Dort wurde in 400 m Tiefe das schiefling ausgebildete Hartsalzlager (Flöz Staßfurt) im offenen Kammernbau (5-7 m Abbauhöhe) gewonnen. Der Firstenzusammenbruch im Jahre 1943 im Ostfeld der Grube kündigte sich 5 Tage vorher durch Herauswerfen größerer Gesteinsstücke aus den Pfeilern unter starker Geräuschbildung an.

Das Bruchfeld wurde durch einen Markscheidepfeiler zum Westfeld begrenzt [7_7].

Der Abbau des 150 m breiten Markscheidepfeilers war auch der Anlaß für den im Jahre 1955 zu verzeichnenden Firstenzusammenbruch im Westfeld. Die gebirgsmechanischen Vorgänge äußerten sich schon 20 Tage vor der Hauptserie der Zusammenbrüche durch Knistern und Krachen im Gebirge und dauerten fast 5 Monate an. Die Zerstörungen gingen vom Markscheidepfeiler aus und griffen in der Nachphase auch auf das gesamte Westfeld über.

Als Ursache der Zusammenbrüche in der Grube Schierstedt ist die Wechselwirkung zwischen überbelasteten Pfeilern und gebirgsmechanischen Vorgängen im Hangenden anzusehen [8_7]. Es wird angenommen, daß einzelne, besonders hoch belastete Pfeiler bei relativ gleichmäßiger Pfeilerverformung zerstört wurden. Dadurch kam es zu verschieden starker Durchbiegung der Hangendschichten (10 - 70 m Hauptanhydrit, 50 - 110 m Jüngeres Steinsalz) und zu einer veränderten Beanspruchung bisher weniger belasteter Pfeiler, wodurch eine schlagartige Änderung in deren Verformungscharakter gegeben war, die sich dann als Firstenzusammenbruch äußerte. Es ist nicht erwiesen, ob die erwähnten Hangendschichten als sogenannte schlagende Schichten gewirkt haben, d.h., daß durch eine starke Durchbiegung und einen sich daran anschließenden schollenweisen Abriß größere Mengen potentieller Energie freigesetzt wurden, die eine Zerstörung der Pfeiler und unmittelbaren Hangendschichten bewirkten. Die Änderung des Verformungscharakters der Pfeiler läßt sich auch durch alleinige Durchbiegung der Schichten erklären. Daß die Zerstörungen keinen gebirgsschlagartigen Charakter trugen, wird mit den Verformungseigenschaften von Hartsalz, das nicht wie Carnallitit zum Spröbruch neigt, und mit der relativ geringen Teufe erklärt [9_7].

Der Firstenzusammenbruch im Jahre 1955 entwickelte sich, vom Markscheidepfeiler ausgehend, wo durch eine unzweckmäßige Abbauführung eine hohe Spannungskonzentration in den Pfeilern zu verzeichnen war, die schließlich zu einer Zerstörung der Stützpfeiler im Bereich des Markscheidepfeilers führte, bis in das Westfeld hinein. Dabei kam es zu einer laufenden Verringerung der tragenden Pfeilerfläche und zu einer Spannungskonzentration in angrenzenden Pfeilern [9_7]. Schlußfolgernd kann gesagt werden, daß im Falle des Firstenzusammenbruches Schierstedt im Jahre 1943 in bezug auf die vorhandenen Lagerungsverhältnisse eine unzureichende Dimensionierung der Salzfesten (Verhältnis der Kammer- zu Pfeilerbreite 1,7) und beim Firstenzusammenbruch im Jahre 1955 eine unzureichende Dimensionierung (Verhältnis der Kammer- zu Pfeilerbreite im Markscheidepfeiler 1,7, im Westfeld 1,3) im Zusammenhang mit einer falschen Abbauführung die Gründe für die umfangreichen Zerstörungen waren.

3.1.2. Gebirgsschläge

Gebirgsschläge verursachen ein Zubruchgehen bergmännisch aufgefahrener Hohlräume infolge plötzlicher Entspannung des Gebirges. Die Folge davon ist eine kurzzeitig ablaufende, intensive Zerstörung der Pfeiler der Abbaukammern, wobei das Pfeilermaterial einer starken Zersplitterung unterliegt und in die Kammern bzw. Strecken geschleudert wird, während die Firsten und Sohlen kaum beansprucht werden. Nach Tabelle 1 [7,9_7] sind zwei Gruppen von Gebirgsschlägen zu unterscheiden. Bei den Gruben der Gruppe 1 wurden das Flöz "Staßfurt" und bei denen der Gruppe 2 die Flöze "Hessen" und "Thüringen" abgebaut.

Tabelle 1: Kenngrößen von Gebirgsschlägen

Gruppe	Kaligrube	Jahr	Teufe m	Baufeld Größe km ²	Bruchfeld Größe km ²	max. Abbaue- höhen m
1	Ludwig II	1901	700	0,056	0,056	15
	Hallesche Salzwerke	1917	740		0,030	
	Krügers- hall	1940	660	0,6	0,6	16
	Neustaß- furt VI	1959			0,09	

2	Heringen	1953	500	7	0,7	10
	Merkers Obere Sohle	1958	630	20	2,8	10
	Untere Sohle		700	10	2,0	8
	Merkers	1961			0,2	

Beim größten Gebirgsschlag der Gruppe 1 in der Grube Krügershall wurden fast das gesamte Grubenfeld zerstört und 42 Bergleute getötet. In dem 40 m mächtigen, carnallitisch ausgebildeten Flöz wurden hier durchschnittlich 12 m hohe Abbaue angelegt. Die Kammerpfeiler hatten einen Schlankheitsgrad (Verhältnis von Höhe zu Breite der Pfeiler) von 1,0 bis 1,5 und die Streckenpfeiler einen solchen von 0,3.

Der Gebirgsschlag kündigte sich durch eine Zunahme der kanallartigen Geräusche und starke Deformation der Sprengbohrlöcher an. Außerdem waren anormale Zerstörungerscheinungen an den Grubenbauen zu verzeichnen. Die Auswirkungen des Gebirgsschlages waren besonders intensive Zerstörungen in den Förderstrecken, die fast völlig mit Gesteinsblöcken und größeren Schalen ausgefüllt waren. Später konnte nachgewiesen werden, daß die Schlaggefährlichkeit bei Pfeilern mit kleinen Schlankheitsgraden wesentlich größer ist als bei großen Schlankheitsgraden.

Schäden an der Firste wurden nur relativ selten festgestellt, ebenso Sohlenhebungen. Die eindeutige Wirkung von Sicherheitspfeilern ließ sich nicht erkennen [7].

Für die Gebirgsschläge der Gruppe 1 ergeben sich folgende gemeinsame Merkmale:

- Carnallitische Ausbildung der Flöze,
- Mächtigkeit des Hauptanhydrites 40 - 50 m,
- Abbau in einer Teufe von 700 m,
- Kammerbau mit unvollkommenem Versatz (außer Staßfurt VI),
- relativ hohe Abbauhöhen zwischen 9 und 16 m,
- vorwiegende Zerstörung der Salzfesten,
- Beobachtungen von Vorankündigungen.

Zum letzten Punkt ist zu bemerken, daß die festgestellten knallartigen Geräusche nicht eindeutig auf einen Gebirgsschlag hinweisen, da auch in anderen Gruben diese Symptome auftraten.

Der Gebirgsschlag im Jahre 1958 in der Kaligrube "Ernst Thälmann", Merkers, ist der bisher größte in der Geschichte des Bergbaus überhaupt. In dieser Grube wurden auf der oberen Sohle das kieseritische Hartsalz des Flözes "Hessen" sowie teilweise das carnallitisch ausgebildete Begleitflöz und auf der unteren Sohle das Flöz "Thüringen" abgebaut, das vorwiegend durch Trümmern carnallitit gebildet wird.

Beide Flöze sind durch das Mittlere Werrasteinsalz mit einer Mächtigkeit von durchschnittlich 60 m getrennt. Die Mächtigkeit des Oberen Werrasteinsalzes über dem Flöz "Hessen" beträgt ca. 100 m [9].

Das Kalilager im Werragebiet ist annähernd horizontal abgelagert (2° bis 3° Einfallen) und tektonisch wenig gestört. Die Flöze wurden im offenen Kammerbau gewonnen, wobei ein Kammer - Pfeiler - Breitenverhältnis von 2,0 auf der oberen Sohle und von 1,6 auf der unteren Sohle eingehalten wurde. Die Teufe im Bereich der Gebirgsschlagfelder betrug 500 bis 600 m bzw. 700 m. Aufgrund der Abbauhöhen zwischen 2 m und 10 m ergaben sich Pfeilerschlankheitsgrade von 0,2 bis 1,0.

Ausgelöst wurde der Gebirgsschlag durch Sprengungen während des Schichtwechsels. Er rief erdbebenartige Erschütterungen an der Erdoberfläche hervor, die noch von Erdbebenstationen in 2000 km Entfernung gemessen wurden.

Im Gegensatz zu den Gebirgsschlägen im Flöz "Staßfurt" konnten keine Vorankündigungen bemerkt werden.

Von den Zerstörungen wurden weite Grubenteile erfasst (annähernd 3 km^2 auf der oberen und 2 km^2 auf der unteren Sohle). Auf beiden Sohlen konnten typische Zerstörungszonen festgestellt werden. In der "Schlagzone" wurden die Pfeiler am stärksten beansprucht. Das Pfeilermaterial, meist weißer oder brekziöser Carnallit, lag als Haufwerk mit unterschiedlicher Stückgröße, zum Teil sogar pulverisiert, in Kammern und Strecken. Die Verbindung zwischen den Pfeilern und der Firste war dadurch verlorengegangen.

Die "Quetschungszone" war gekennzeichnet durch ein Herausschieben der Stöße in die Hohlräume um 1 bis 2 m, maximal 6 m. Die Pfeiler waren hier durch starke Zerklüftung zerstört. In der "Schalenzone" zeigten sich lediglich Schalenablösungen an den Pfeilerstößen. Es ist bemerkenswert, daß in den beiden wenig beanspruchten Zonen die Gesteinsschichten durch Hartsalz, Sylvinit oder Steinsalz gebildet wurden bzw. die Pfeiler einen hohen Schlankheitsgrad aufwiesen. Die Zerstörungen trugen in diesen Fällen den Charakter von Zerstörungen bei Firstenzusammenbrüchen, ohne daß jedoch die Firste in Mitleidenschaft gezogen wurde. Auch Aufpressungen an der Sohle waren relativ selten. Steinsalz erwies sich von allen Salzarten am widerstandsfähigsten [7,9].

Über Tage bildete sich über dem Bruchfeld ein deutlicher Senkungstrog mit maximalen Senkungswerten von 45 cm heraus. An den Rändern des Bruchfeldes waren Risse zu beobachten, die eine Breite bis maximal 13 cm hatten.

Aufgrund der Tatsache, daß keine Lösungszuflüsse zu verzeichnen waren, kann mit einer bruchfreien Durchbiegung der ihrer Unterstützung beraubten Schichten des Deckgebirges gerechnet werden. Für die im Werrakaligebiet registrierten Gebirgsschläge lassen sich folgende gemeinsame Merkmale erkennen [9_7]:

- carnallitische Ausbildung der Flöze,
- gleiche stratigraphische Verhältnisse in den Hangendschichten,
- Abbau in einer Teufe > 500 m,
- Kammerbau ohne Versatz,
- Abbauhöhen bis ca. 10 m,
- vorwiegend Zerstörung der Salzfesten,
- Ablauf der Gebirgsschläge ohne Vorankündigung,
- die Wirkung einer schlagenden Schicht im Hangenden der Lagerstätte kann ausgeschlossen werden.

Aus den bisher bekannt gewordenen Gebirgsschlägen und durchgeführten Untersuchungen bezüglich der Gebirgsschlaggefährlichkeit der in der Lagerstätte und im Hangenden anstehenden Gesteine [10_7] lassen sich einige Bedingungen ableiten, bei denen die Voraussetzungen für das Eintreten eines Gebirgsschlages gegeben sind:

- Vorhandensein einer schlaggefährlichen Schicht, d.h. einer Schicht, die in der Lage ist, große Energiemengen bei bestimmten Belastungsarten zu speichern und bei Änderung des Belastungscharakters beim Bruch diese Energie wieder freizusetzen. In dieser Hinsicht ist Carnallitit am gefährlichsten. Eine geringere Gebirgsschlaggefährlichkeit besitzen Anhydrit und Sandstein, während Hartsalz, Steinsalz und Syvinit als ungefährlich zu bezeichnen sind.
- Aufbau der Pfeiler aus schlagfähigem Material, selbst wenn das Haupthangende nicht als schlaggefährliche

Schicht ausgebildet ist (z.B. Carnallitit als Pfeilermaterial und oberes Werrasteinsalz als Haupthangendes im Werrakaligebiet).

- Ausbildung des Haupthangenden als schlaggefährliche Schicht, selbst wenn die Pfeiler aus nichtschlaggefährlichem Material bestehen (z.B. Grube Schierstedt). Nach den vorliegenden Erfahrungen laufen aber auch bei entsprechend ungünstigen bergtechnischen Bedingungen die Zerstörungen nicht in Form eines Gebirgsschlages ab.
- Ausbildung sowohl der Lagerstätte als auch des Haupthangenden als schlagfähige Schicht. In diesen Fällen kann das Haupthangende das Eintreten eines Gebirgsschlages begünstigen, obwohl dafür der Nachweis noch nicht erbracht wurde (Gebirgsschläge der Gruppe 1).

Zusammenfassend kann daraus geschlußfolgert werden, daß die Gefahr eines Gebirgsschlages besonders dann gegeben ist, wenn die Salzfesten aus Carnallitit bestehen.

Darüber hinaus sind allerdings noch weitere Faktoren maßgeblich an dem Zustandekommen von Gebirgsschlägen beteiligt:

- Aufgrund der Erfahrungen muß bei der Erfüllung oben angeführter Bedingungen und dem Zutreffen verschiedener weiter unten erwähnter Faktoren mit Gebirgsschlägen ab Teufen von 500 m gerechnet werden.
- Ungleiche Tragfähigkeit der Pfeiler erhöht die Wahrscheinlichkeit eines Gebirgsschlages.
- Ähnliche Auswirkungen können plötzliche Veränderungen in der Belastungsgeschwindigkeit der Pfeiler haben.
- Ein Abbau vom Baufeldrand in Richtung der Baufeldmitte oder in Richtung bereits abgebauter Feldesteile begünstigt durch die Ausbildung von Hochdruckzonen die Gebirgsschlagneigung.
- Restpfeiler beim Abbau von zwei Flözen, besonders in Verbindung mit abbaudynamischen Wirkungen, führen ebenfalls zu Änderungen in den Spannungsverhältnissen.

Der Einfluß weiterer Parameter, wie Abbauhöhe, Baufeldgröße und tektonische Störungen, konnte bisher nur ungenügend geklärt werden.

Die nach Gebirgsschlägen an den Firsten der Grubenründe festgestellten geringen Auswirkungen und die Tatsache, daß es trotz der oft-mals starken Absenkung der Hangend-schichten nicht zu sekundären Wasser- oder Lösungszuflüssen gekommen ist, lassen auf eine zerstörungsfreie Absenkung der zum Teil mächtigen Schutzschichten schließen. Lediglich im Zusammenhang mit den gebirgsschlagartigen Zusammenbrüchen auf der Kaligrube Leopoldshall I/II im Jahre 1879 (in der Tabelle 1 nicht mit erfaßt), wo der Abbau im Kainit in unmittelbarer Nachbarschaft wasserführender Schichten umging, stellten sich Wasserzuflüsse ein. Die Gefahr von Zuflüssen war hier allerdings auch unabhängig von den gebirgsmechanischen Vorgängen gegeben, wie in Abschnitt 3.2. erläutert.

Der Gebirgsschlag auf der Grube Neustaßfurt VI stellt insofern eine Ausnahme dar, als dies der einzig bekannt gewordene Fall in einer Lagerstätte mit steiler Lagerung ist. In allen übrigen Gruben hatten die Flöze ein Einfallen von maximal 3° .

Abschließend soll noch einmal darauf hingewiesen werden, daß mit einem Gebirgsschlag dann gerechnet werden muß, wenn die Grubenbaue in einem carnallitischen Flöz angelegt sind und mehrere der oben angeführten Einflußfaktoren zutreffen.

3.2. Katastrophen, ausgelöst durch Wasser- und Lösungszuflüsse

Für den Kali- und Steinsalzbergbau stellt die Vermeidung von Wasser- und Lösungszuflüssen oft eine Lebensfrage dar. Nicht selten entwickelten sich - besonders aus Unkenntnis und fehlender Erfahrung - als harmlos angesehene geringfügige Zuflüsse zu einem nicht mehr zu beherrschenden Problem. Andererseits kam es aufgrund falscher Abbauführung oder ungenügender Erkundung der geologischen und hydrologischen Verhältnisse zu Wasser- oder Salzlösungseinbrüchen

mit Zuflüssen bis zu $17 \text{ m}^3/\text{min}$ und oftmals schwerwiegenden Folgen (teilweises oder völliges Zerstören von Grubenbauen oder Ersaufen von Schachtanlagen).

Die dem Salzbergbau zusitzenden Lösungen werden aufgrund ihres Gehaltes an gelöstem Salz unterteilt in Lösungen in Wasser ($< 35 \text{ g/l}$) und in Salzlösungen ($> 35 \text{ g/l}$).

Nach der Art ihrer Bildung unterscheidet man [11_7]:

- natürliche Lösungen (natürliche Wässer und natürliche Salzlösungen),
- technologisch bedingte Lösungen (Bewetterungs-, Spülversatz-, Rückstands- und versenkte Fabriklösungen).
- Standlösungen aus benachbarten Gruben.

Die Hauptgefahr für die Gruben stellen Zuflüsse der ersten und letzten Gruppe dar, obwohl nicht völlig ausgeschlossen werden kann, daß besonders Spülversatz- und versenkte Fabriklösungen ähnliche Auswirkungen haben. Die natürlichen Wässer bilden als oberirdische Wässer fließend oder auch stehend für den Bergbau insofern eine Gefahr, als sie auf tektonisch oder gebirgsmechanisch angelegten Klüften und Störungszonen oder über Erdfälle mit den Grubenbauen in Kontakt kommen können. Besonders gefährdet ist in dieser Hinsicht der Salzhangbereich. Diese, zumeist Süßwässer, können plötzlich in sehr großen Mengen einfließen und in kurzer Zeit große Salzmenen lösen.

Von den unterirdischen natürlichen Lösungen ist den Infiltrationswässern und -lösungen die größte Bedeutung beizumessen. Sie entstammen Speichergesteinen, die mit Niederschlagswässern aufgefüllt sind, und können auf folgenden Wegen in die Grubenbaue gelangen:

- durch die Schachtröhre,
- durch offene oder ungenügend verfüllte Bohrungen,
- auf natürlichen bzw. durch den Bergbau hervorgerufenen Störungszonen,
- über den Salzspiegel.

Infiltrationswässer aus dem Bereich des Salzspiegels stellen aufgrund der Größe des Speicherraumes, der meist durch Schlotten im Gipsstut gebildet wird, und der noch möglichen Verbindung zu den Oberflächenwässern oder Grundwässern im Hangenden des Zechsteins eine sehr große Gefahr dar. Dies wird auch durch die Angaben in den Tabellen 2 und 3 bestätigt.

Tabelle 2: Ersoffene Produktionsschächtanlagen [7]

<u>Ursache bzw. Herkunft der Zuflüsse</u>	<u>Anzahl der ersoffenen Schächtanlagen</u>
Abbau in Kainitschichten	16
Undichte Schächte	4
Zuflüsse aus ersoffenen Nachbargruben	4
Zuflüsse aus dem Liegenden (sekundär)	3
Zuflüsse aus dem Hauptanhydrit (sekundär)	1

3.2.1. Zuflüsse, bedingt durch einen Abbau in der Nähe grundwasserführender Schichten

Aus Tabelle 2 geht hervor, daß etwa 60 % aller während der Produktionsphase abgesoffenen Gruben infolge eines Abbaus in Kainitschichten aufgegeben werden mußten.

Der Kainit der Kaliflöze des Zechsteins, ein hochwertiges Kalimineral, ist gewöhnlich sekundär unter Einwirkung vadosen Grundwassers entstanden und in Deutschland nur in den Mutgesteinen des Flözes Staßfurt bekannt. [12].

Durch die oberflächennahe Lage der Kainitschichten und die Tatsache, daß bei steilem Einfallen der Schichten der Kainithut oft auf einem höheren Niveau lag als der Salzspiegel, erklärt sich auch die hydrologische Gefährdung dieser Grubenbaue.

In diesem Zusammenhang ist noch zu erwähnen, daß annähernd die Hälfte der Zuflüsse in Kainitabbauen während der Auf-fahrung der Hohlräume durch unmittelbares Anfahren salz-lösungsführender Horizonte oder Klüfte verursacht wurde.

Diese werden als primäre Zuflüsse bezeichnet [7]. Sekundäre Zuflüsse werden erst nach langer Dauer des Abbaus durch gebirgsmechanische Vorgänge ausgelöst. Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn die Ursachen für das Ersaufen stillgelegter Schachtanlagen betrachtet werden (Tabelle 3).

Tabelle 3: Nach der Stilllegung ersoffene Schachtanlagen [7]

<u>Art der Zuflüsse</u>	<u>Anzahl der ersoffenen Schachtanlagen</u>
Zuflüsse aus dem Kainit oder Gips- hut bzw. Fehlen einer ausreichenden Schutzschicht	4
Zuflüsse über den Schacht	13
Zuflüsse aus ersoffenen Nachbar- gruben	2
Zuflüsse aus dem Liegenden und Hangenden	4
Zuflüsse aus dem Lager	1
Zuflüsse die schon während Betriebs- zeit bekannt, ohne Angabe des näheren Grundes	2
Gründe unbekannt, da Anlage nicht mehr befahrbar	12

Der Vollständigkeit halber sei noch darauf hingewiesen, daß weitere 26 Schächte während des Abteufens wegen starker Zuflüsse aufgegeben werden mußten. Damit sind von den insgesamt im deutschen Kali- und Steinsalzbergbau geteufte Schächten 36 % ersoffen. Diese Zahl kann sich noch erhöhen durch Schächte, die stillgelegt wurden, aber deren Zustand heute nicht mehr bekannt ist.

Am stärksten wurde der mitteldeutsche Raum betroffen, wo sowohl relativ als auch absolut die meisten Anlagen abgeworfen werden mußten. Auch hier bilden Zuflüsse während oder als Folge des Abbaues im Kainit die Hauptursache für das Ersaufen der Gruben. Einen sehr typischen Fall stellt das Beispiel der Grube Leopoldshall I/II dar.

Dort kam es infolge unzureichender Abbauführung - Anlage von Kammern mit 10 - 12 m Breite und bis 12,5 m Höhe bei 5 m Pfeilerstärke und 5 m Schwebenmächtigkeit - zu umfangreichen Hangendbrüchen mit anfänglich geringen Lösungszuflüssen. Durch die Wechselwirkung zwischen gebirgsmechanischen Zerstörungen, die sich vermutlich bis in den Hauptanhydrit fortsetzten, und Auslösungserscheinungen auf sekundär verheilten Klüften des Hauptanhydrits und am Grubengebäude erhöhten sich die Zuflüsse laufend (bis $17 \text{ m}^3/\text{min}$) trotz eingeleiteter Gegenmaßnahmen. Die Grube wurde aufgegeben, als sich die starken Senkungserscheinungen und Schäden bis zur Tagesoberfläche fortsetzten und so auf die Wirkungslosigkeit der Gegenmaßnahmen hindeuteten. Die Folge des Ersaufens der Grube Leopoldshall I/II war ein Übertritt der Lösungen durch den Markscheidesicherheitspfeiler in die benachbarte Grube Staßfurt mit den Schächten v.d. Heydt, Manteuffel und Achenbach und von dort in die Grube Neustaßfurt I/II mit den Schächten Agathe, Hammacher und Neustaßfurt III [77].

Bei der Grube Friedrichshall war die Ursache der später eingetretenen Zuflüsse eine falsche Abbauführung, d.h. eine zu geringe Bemessung der Salzfesten, wodurch es zu einer starken Durchbiegung des Salztones und des Hauptanhydrits kam, die zu einer Zerklüftung dieser Schichten führte. Dadurch wurden Zuflußwege geöffnet, die sich im Laufe der Zeit durch chemische Auflösung aufweiteten, so daß sich die zufließenden Mengen ständig vergrößerten. Um ähnliche Zerstörungen in den Hangendschichten und an der Tagesoberfläche wie im Fall Leopoldshall I/II zu vermeiden, wurde die Anlage dem Ersaufen überlassen, als die Zuflüsse $1,2 \text{ m}^3/\text{min}$ betrugen. Dadurch konnten vermutlich spätere Lösungsübertritte durch den Markscheidesicherheitspfeiler zu den benachbarten Gruben Ludwig II und Berlepsch-Maybach vermieden werden [77].

Trotz einiger spezifischer Besonderheiten war die Ursache für die beschriebenen Zuflüsse in fast allen Fällen eine unzuverlässige Abführung, die durch

- Fehler bei der Planung der Grubenräume,
- zu große Annäherung an wasser- oder salzlösungs-führende Schichten, besonders beim Fehlen wasser-undurchlässiger Schutzschichten und
- ungenügende Dimensionierung der Salzfesten

gegeben war. Im Laufe des Abbaus kam es dadurch zu überdurchschnittlichen Absenkungen in den hangenden Schichten der Lagerstätte. Die Folge davon waren eine Öffnung vorgezeichneter Zuflußwege (sekundär verheilte Klüfte) in den Schutzschichten sowie chemische Auflösungen auf den Zuflußwegen und an den Grubenbauen. Diese wiederum bildeten die Voraussetzung für weitergehende Zerstörungen und für eine Zunahme der Zuflußmengen, die schließlich nicht mehr beherrscht werden konnten. Als Schutzschichten können bei entsprechender Ausbildung und Mächtigkeit plastische Gesteine, wie Tone, Letten, Mergel sowie genügend mächtiges, unzerklüftetes Steinsalz angesehen werden.

3.2.2. Zuflüsse aus undichten Schachtröhren

Diese bilden einen weiteren Schwerpunkt beim Ersaufen von Kali- oder Steinsalzgruben. Von den in der Tabelle 2 angegebenen Fällen waren zwei Schächte während des Teufens im Bereich des Gipshutes mehrmals ersoffen und anschließend wieder gesümpft worden. Dadurch wurden die im Bereich des Salzspiegels anstehenden Schichten stark zermürbt, so daß eine Abdichtung nicht mehr erreicht werden konnte.

Die beiden anderen Schächte konnten wegen undichter Tübbingsäule bzw. Schaden am Schachtausbau nicht mehr in Betrieb gehalten werden. Ähnliche Gründe dürften auch bei den in Tabelle 3 ausgewiesenen Schächten vorgelegen haben. Diese Anlagen sollten jedoch zur Ableitung von Schlussfolgerung hinsichtlich der Ursachen des Ersaufens nicht herangezogen werden, da in den meisten Fällen entsprechende Gegenmaßnahmen sicher derartige Auswirkungen verhindert

hätten, aber ein Bedürfnis zur Durchführung von Reparatur- und Abdichtungsarbeiten nicht vorlag. Damit kann als Hauptursache für das Ersaufen von Gruben über die Schachtröhre die Wasserdurchlässigkeit des Schachtausbaus, hervorgerufen durch eine unzuweckmäßige Wahl des Ausbaus (Art und Dimensionierung) und durch Nachlässigkeiten bei der Beseitigung von vorhandenen Schäden, angesehen werden.

Zuflüsse über eine längere Zeit können bei ungenügender Beachtung hinter dem Schachtausbau zu großen Hohlräumen durch Auswaschungsvorgänge führen, die dann Reparaturen unmöglich werden lassen.

3.2.3. Zuflüsse aus Nachbargruben

Eine nicht zu übersehende Gefahr für Kali- und Steinsalzbergwerke stellen ersoffene Nachbargruben dar, wie das Beispiel des Ersaufens der im Carnallitit bauenden Gruben Staßfurt und Neustaßfurt I/III am Staßfurter Sattel zeigt. Die Stärke des Markscheidesicherheitspfeilers zwischen der ersoffenen Grube Leopoldshall I/II und der Grube Staßfurt betrug teilweise nur 23 m. Die Austrittsstelle der $MgCl_2$ -gesättigten Lösung lag jedoch in 600 m Entfernung von der Markscheide. Es wird angenommen, daß die Lösungen auf den streichenden Klüften des Hauptanhydrits in die Nachbargrube gelangt sind, da große Hangendbrüche beiderseits des Markscheidepfeilers als Folge des Abbaus und der Vorgänge beim Ersaufen von Leopoldshall I/II zu verzeichnen waren. Allerdings erscheint auch eine Durchdringung des Sicherheitspfeilers im Kalilager nicht ausgeschlossen.

Der Übertritt von Salzlösungen aus Staßfurt in die Anlagen Neustaßfurt I/III auf geologisch vorgebildeten und später wieder verheilten Klüften des Hauptanhydrits infolge gebirgsmechanischer Beanspruchung und damit weiterer Zerklüftung des Hauptanhydrits sowie durch Auf-

lösung der sekundären, aus Steinsalz oder Carnallit bestehenden Kluftfüllung gilt dagegen als gesichert. Vermutlich wurden die Vorgänge durch Ablaugungserscheinungen am Salzkopf des Leinesteinsalzes begünstigt.

Der Markscheidesicherheitspfeiler hatte an seiner schwächsten Stelle nur eine Breite von 150 m. Der Einfluß der Strömungsverhältnisse im Deckgebirge, am Salzkopf und in den oberen Teilen des Hauptanhydrits wird als bedeutend angesehen, da im Fall der Grube Friedrichshall derartige Ablaugungen durch rechtzeitiges Aufgeben des Pumpbetriebes und Ersaufenlassen der Anlage vermieden werden konnten, obwohl der Markscheidesicherheitspfeiler an seiner schwächsten Stelle auch nur 164 m breit war.

Ein Durchdringen von Markscheidesicherheitspfeilern mit Breiten größer als 400 m durch Salzlösungen wurde bisher nicht beobachtet, obwohl in einem Fall (Markscheidesicherheitspfeiler zwischen Neustaßfurt I/III und Neustaßfurt IV) die gleichen Voraussetzungen, wie oben beschrieben, durch das Vorhandensein eines Kluftsystems im Hauptanhydrit gegeben waren [?].

3.2.4. Zuflüsse aus dem Liegenden

Liegendzuflüsse sind bisher vorwiegend nur im Südharz-Kalirevier bekannt geworden und haben dort teilweise zu größeren Schäden geführt. In diesem Gebiet wird das Kaliflöz Staßfurt, das Mächtigkeiten bis über 30 m erreichen kann, von 30 bis 60 m mächtigem Staßfurtstein-salz unterlagert. Das Liegende des Steinsalzes bildet der Hauptdolomit (15 - 50 m), der als Speicherhorizont für Erdöl, Erdgas und Salzlösungen anzusehen ist, wobei diese Vorkommen an das tektonisch bedingte Kluftsystem gebunden sind. Das Speichervermögen dieses Horizontes ist abhängig von der Größe der tektonischen Beanspruchung.

Die Verbindung zwischen den meist parallel zu den tektonischen Strukturen verlaufenden Klüften ist nicht immer gegeben und sehr unregelmäßig. Vereinzelt sind die oberen Schichten des Hauptanhydrits durch bis zu 30 m mächtigen Basalanhydrit ersetzt, der ähnliche Speichereigenschaften wie der Hauptdolomit hat.

Im allgemeinen bilden die im Hauptdolomit und Basalanhydrit gespeicherten und unter Druck stehenden Gase und Salzlösungen - Drücke bis 100 kp/cm^2 sind bekannt geworden - keine Gefahr für den Bergbau, wenn zwischen den Speicherhorizonten und den bergmännischen Auffahrungen eine ausreichende Schutzschicht (Staßfurtsteinsalz) vorhanden ist. Durch die relativ starke tektonische Beeinflussung des Gebietes hat die Schutzschicht aber oft nur eine geringe Mächtigkeit.

Wegen der unregelmäßigen Kluftanordnung und schwankenden Stärke der Schutzschicht läßt sich die Gefährdung durch Liegendzuflüsse jedoch nur schwer einschätzen. Hinzu kommt, daß der Einfluß der Abbautätigkeit nicht völlig geklärt ist.

In vier Fällen (Königshall, Hindenburg, Reinhardtsbrunn und Neubleicherode) waren Zuflüsse aus dem Liegenden alleinige Ursache des Ersaufens von Gruben. Davon sind drei Schächte ersoffen als sie noch in Produktion standen. Die Schächte Königshall und Hindenburg konnten später nach zweimaligem Sumpfen wieder in Betrieb genommen werden. Beim Schacht Neubleicherode handelt es sich um eine stillgelegte Anlage. Die stillgelegte Grube Bernterode mit zwei Schächten ist aufgrund von Zuflüssen aus dem Hangenden und Liegenden ersoffen. Ähnlich wie bei anderen stillgelegten, aus verschiedenen Gründen ersoffenen Schachtanlagen ist nicht sicher, ob die vorhandenen Zuflüsse bei Einleitung entsprechender Gegenmaßnahmen die geschilderten Auswirkungen gehabt hätten.

Somit ist der Schacht Reinhardtsbrunn der einzige Fall, wo wegen Zuflüssen aus dem Liegenden der Betrieb völlig eingestellt werden mußte.

Im Südhartzkalirevier sind derzeit weitere Zuflußstellen aus dem Liegenden bekannt, aus denen anfänglich bis zu 150 l/min Salzlösung austraten. Im Laufe der Zeit verringerten sich die Zuflußmengen, so daß diese Lösungen heute keine Gefahr mehr für die Gruben darstellen. Zusammenfassend lassen sich folgende Kriterien für das Auftreten von Salzlösungszuflüssen aus dem Liegenden angeben [7]:

- Voraussetzung für Lösungszuflüsse ist das Vorhandensein eines Salzlösungsleiters mit flächenhafter oder lokaler Salzlösungsführung bei flächenhafter oder lokaler Durchlässigkeit der sogenannten Liegendenschutzschicht.
- Primäre Zuflüsse, die bei der Auffahrung der Grubenbaue durch Anfahren von Schwächezonen auftreten können, lassen sich durch entsprechende Abbauführung (Umgehung der gefährdeten Bereiche) vermeiden. Deshalb sind diese relativ selten.
- Sekundäre Liegendzuflüsse sind, ähnlich wie bei den Zuflüssen aus dem Hangenden, als Folgen geomechanischer Auswirkungen bei bergmännischer Tätigkeit zu betrachten.
- Die für einen sicheren Schutz der Grubenbaue erforderliche Mächtigkeit der Liegendenschicht ist abhängig von mehreren Faktoren, die für das gebirgsmechanische Verhalten vom Bergbau beeinflusster Bereiche ausschlaggebend sind (z.B. Teufenlage, Größe des Baufeldes und der Hohlräume, Abbauintensität, Eigenschaft der Salzgesteine), und von der tektonisch angelegten Inhomogenität in der Schutzschicht.
- Bei einer ungünstigen Spannungsverteilung im Liegenden von Strecken und Abbauen ist die Möglichkeit von lokalen Verformungen in der Liegendenschicht bei gleichzeitiger Öffnung vorgebildeter Klüfte und damit die Gefahr von Liegendzuflüssen gegeben.

Der in Tabelle 2 aufgeführte Schacht Roßleben, der durch sekundäre Zuflüsse über den Hauptanhydrit erschaffen ist, konnte nach erfolgreicher Sumpfung wieder in Betrieb genommen werden.

3.3. Katastrophen, ausgelöst durch Gasvorkommen

Grundsätzlich sind zu unterscheiden [7]

- Vorkommen freier Gase auf Spalten, Klüften und in anderen Hohlräumen, die bei ihrer Freilegung in Abhängigkeit vom Druck, unter dem sie stehen, mit unterschiedlicher Intensität ausblasen und
- Vorkommen inter- oder intrakristallin an das Salzgestein gebundener Gase, die unter bestimmten Bedingungen in Form von plötzlichen Ausbrüchen freigesetzt werden können.

Im deutschen Kali- und Steinsalzbergbau sind Gasunfälle und Gasausbrüche mit größerer Schadenswirkung bisher hauptsächlich aus dem Südharz- und dem Werra-Revier bekannt geworden.

3.3.1. Freie Gasvorkommen

Die im Südharkalirevier primär oder sekundär austretenden freien Gase sind Gemische aus hauptsächlich Methan und anderen Kohlenwasserstoffen (Anteile bei 7 bis 30 %), Stickstoff (bis ~90%) und Kohlendioxid (bis 50 %). Die Mehrzahl der durch ausströmendes oder sich angesammeltes Gas verursachten Unfälle - insgesamt sind 46 Personen tödlich verunglückt - ist auf eine Entzündung durch offenes Geleucht oder elektrischen Funken zurückzuführen (Schlagwetterexplosionen). Nur in drei Fällen trat Tod durch Erstickung oder Vergiftung ein. Als gasführend sind bisher im Südharzrevier folgende Horizonte erkannt worden [7]:

- Hauptdolomit und Basalanhydrit,
- Liegendes Steinsalz des Flözes Staßfurt,
- Kaliflöz Staßfurt,

- Grauer Salzton,
- Hangendes des Kalilagers und Deckgebirge.

Die Hauptgefahr für den Bergbau stellten bisher die liegenden Schichten dar, und zwar sowohl beim direkten Anfahren bzw. Anbohren zerklüfteter Bereiche im Hauptdolomit und Basalanhydrit bzw. von Schlechten, Schnitten und Spalten im Steinsalz als auch durch sekundäre Gasaustritte infolge gebirgsmechanischer Auswirkungen des umgehenden Bergbaus. Gasaustritte aus dem Grauen Salzton bilden insofern eine nicht zu unterschätzende Gefahr, als sie meist mit Tonbrüchen verbunden sind.

Im Werrakalirevier bildet Kohlendioxid den Hauptbestandteil der frei vorkommenden Gase. Nebenbestandteile sind Stickstoff und in Spuren Kohlenwasserstoffe und Schwefelwasserstoff. Die Gase werden meist im Zusammenhang mit dem Anbohren oder Anfahren von Störungszonen, besonders von Schnitten, angetroffen. Diese Störungszonen sind nicht an besondere stratigraphische Horizonte gebunden.

Die von diesen Vorkommen ausgehende Gefahr ist meist wegen der geringen ausströmenden Mengen nicht sehr groß. In Einzelfällen ist es jedoch beim Bohren von Sprenglöchern zu einer Zerstörung der Bohrwerkzeuge und zu tödlichen Unfällen gekommen. Bemerkenswert ist, daß im Zusammenhang mit größeren Bohrdurchmessern (Erkundungsbohrungen) die bisher größten Gasaustritte zu verzeichnen waren, in deren Folge größere Teile der Grubenbelegschaft durch stickende Wetter bedroht oder in Mitleidenschaft gezogen wurden.

3.3.2. Gasausbrüche

Sowohl im Südharz als auch im Werrakaligebiet konnten die Gase durch Aufsteigen hauptsächlich gashaltiger Wässer auf tektonischen Störungszonen in die Salzgesteinsschichten gelangen und bei der Neu- und Umkristallisation der Salze

in das Salzgefüge eingebaut werden. Das Vorkommen derartiger Gase, die etwa die gleiche Zusammensetzung wie die freien Gase aufweisen, ist nicht unmittelbar an das Vorhandensein von Spalten und Schnitten gebunden. Durch das Wandern der Lösungen und Gase im Kalilager in horizontaler Richtung fand vielmehr eine flächenhafte Verbreitung statt.

Gasausbrüche, die stets mit dem Auswurf größerer Mengen Salzgesteins verbunden sind, haben im Revier Südharz bisher zu keinen größeren Schäden an Ausrüstungen geführt. Beim größten registrierten Ausbruch fielen gleichzeitig 4000 t Salz an.

Aufgrund der im Werrarevier gesammelten Erfahrungen konnten Unfälle von Belegschaftsmitgliedern vermieden werden.

Im Werrarevier sind plötzliche Ausbrüche von Salz und Gas in allen vom Bergbau berührten stratigraphischen Horizonten aufgetreten [7]. Dabei blieben jedoch die Ausbrüche nur auf die Umwandlungszonen der Salze beschränkt. Bezeichnenderweise wurden die häufigsten und schwersten Ausbrüche auch in jenen Salzhorizonten registriert, in denen aufgrund der leichteren Löslichkeit der Salze (Kalisalze) der Umwandlungsprozeß weitere Bereiche erfaßt hatte, als es beispielsweise beim Steinsalz möglich war, oder in denen typische Umwandlungssalze vorlagen (Sylvinit).

Beim bisher größten Gasausbruch in der Kaligrube Manzengraben im Jahre 1953 wurden über $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (N) Gas freigesetzt und 100 000 t Salz ausgeworfen. In kurzer Zeit war das gesamte Grubengebäude mit hauptsächlich CO_2 -haltigen Gasen gefüllt, die danach 25 min lang über die beiden Schächte zur Tagesoberfläche ausströmten.

Die während des Schließens zum Schichtwechsel ausgefahrenen Bergleute und die Anwohner mußten auf die naheliegenden Anhöhen fliehen. Trotzdem fanden noch drei Personen den Tod durch Ersticken. Außerdem wurden große Zerstörungen im Schacht und an den untertägigen Anlagen angerichtet [13].

Für die Vielzahl der im Kalibergbau registrierten Gasausbrüche - in den Jahren 1963 und 1964 waren es allein 32 mit jeweils über 100 t Salzauswurf - lassen sich folgende gemeinsame Merkmale angeben [77]:

- Voraussetzung für einen plötzlichen Gasausbruch ist das Vorhandensein ausbruchsaktiver Zonen, die durch einen wesentlich höheren Gasgehalt als das umgebende Salzgestein gekennzeichnet sind.
- Salzgesteine ausbruchsaktiver Zonen zeigen, sobald der dreiachsige Spannungszustand durch bergbauliche Gewinnungsarbeiten gestört ist, verminderte Verbandsfestigkeit, größere Neigung zum Spröbruch durch Zersplittern und Freigabe beträchtlicher Energiemengen beim Spröbruch. Dieses Verhalten wird bedingt durch das unter Druck stehende, eingeschlossene Gas.
- Mit dem Zustandekommen eines Ausbruches ist erst dann zu rechnen, wenn eine sogenannte kritische Mindestgröße der ausbruchsaktiven Zone freigelegt ist. Das dabei angewendete Gewinnungsverfahren bleibt in diesem Zusammenhang ohne Bedeutung. Deshalb sind Gasausbrüche auch in Verbindung mit Gebirgsschlägen denkbar.
- Gasausbrüche werden durch die bei der Auffahrung der Hohlräume auftretenden Spannungsumlagerungen begünstigt. Durch die gebirgsmechanische Zerklüftung des Salzgesteins in der ausbruchsaktiven Zone wird die Gasfreisetzung eingeleitet. In einer Art Kettenreaktion werden, sobald eine ausreichend große Aktivierungsgeschwindigkeit erreicht ist, weitere Gasmengen freigesetzt, die wiederum an der Gesteinszerstörung teilnehmen.
- Die Mehrzahl der Ausbrüche ist schlauchförmig. Abweichende Ausbruchsformen ergeben sich lediglich beim Abbau des Begleitflözes Hessen, wo selbst durch geringe Gaseinlagerungen die von Natur aus geringe Zugfestigkeit der Salzgesteine weiter herabgesetzt wird. Die Folge davon ist verstärkter Firstfall, der wieder die Voraussetzung für eine Ausbruchsaktivierung sein kann.

Da bei diesen Vorgängen auch Bereiche geringer Ausbruchsaktivität erfaßt werden, entstehen in diesem Fall meist blockförmige Ausbrüche.

- Bedingt durch die Art des Gewinnungsverfahrens wurden Gasausbrüche bisher meist durch Sprengarbeiten ausgelöst.
- Die spezifisch freigesetzte Gasmenge je Tonne Auswurf-
salz wurde zu 3 bis 20 m³ (N) errechnet.

Bei den beschriebenen Gasausbrüchen ist mit folgenden Schadenswirkungen zu rechnen [13]:

- Sauerstoffmangel, wodurch es zum Erstickungstod bei Bergleuten kommen kann,
- mechanische Verletzungen, besonders von Personen, die bohrende oder schneidende Maschinen bedienen,
- Verschüttung von Gruben Hohlräumen, die zu Produktionsausfällen führen,
- Zerstörung von Ausrüstungen.

Zum heutigen Zeitpunkt sind jedoch die Bekämpfungsmethoden für Gasausbrüche so weit verbessert worden, daß Personenschäden fast völlig ausgeschlossen sind und größere materielle Schäden weitgehend vermieden werden können.

3.3.3. Liegendschläge im französischen Kalibergbau

Eine Besonderheit im Vergleich zu den Gasvorkommen im deutschen Kalibergbau stellen die aus dem elsässischen Bergbau bekannten Liegendschläge dar. Während das schlagartige Öffnen von Spalten im Liegenden bei gleichzeitigem starken Gasaustritt gewisse Ähnlichkeiten mit entsprechenden Vorgängen im Südharzrevier aufweist, läßt sich der Ausstoß von Salz aus dem Liegenden bei gleichzeitigem Gasaustritt nicht klar in eine der bisher beschriebenen Gruppen einordnen. Es können jedoch folgende gemeinsame Merkmale für diese Liegendschläge angegeben werden [17]:

- Speicherung des Gases (vorwiegend Methan) in porösen Liegendsschichten,
- Auftreten der Schläge in Abbauen beim Kammerpfeilerbruchbau und beim Strebau an der Strebkante,
- mittlerer Gesteinsauswurf 200 bis 300 t, dabei freigesetzte Gasmenge 10 000 bis 100 000 m³,
- maximale Abmessungen des Auswurfkraters: 20 m Achsenlänge, 6 m Tiefe,
- Begrenzung des Kraters an einer relativ festen Schicht (Anhydrit, Steinsalz) im Liegenden.

Da die Ursachen und der Mechanismus der Liegendsschläge bisher noch nicht völlig geklärt ist und damit Vergleiche mit den Verhältnissen im deutschen Kali- und Steinsalzbergbau nicht möglich sind, werden diese Vorgänge nicht näher beschrieben.

3.4. Katastrophen, ausgelöst durch Grubenbrände

Grubenbrände, die meist mit hohen volkswirtschaftlichen Verlusten verbunden sind (Förderausfall, Zerstörung von Ausrüstungen, Aufgabe von Feldesteilen), haben in vielen Fällen auch zu größeren Personenschäden bzw. zu tödlichen Unfällen geführt. Obwohl der Steinkohlenbergbau aufgrund der leichten Entzündbarkeit der aufgeschlossenen Kohlenflöze am häufigsten von Grubenbränden betroffen ist

- in der Mehrzahl handelt es sich um endogene Brände infolge Oxidation von Kohle - muß auch im Kali- und Steinsalzbergbau mit ihrem Auftreten gerechnet werden.

Eine der größten Katastrophen durch Brände in der Geschichte des Bergbaus ereignete sich auf der Kaligrube Buggingen in Baden im Jahre 1934, wo durch einen Öltransformatorbrand, der auf große Teile des Grubengebäudes übergrieff, 86 Bergleute den Tod durch Brandgase fanden [14]. Auch in anderen Bergwerken ist es in der Folge von Bränden mehrfach zu Verletzungen gekommen, vereinzelt waren sogar Todesfälle zu verzeichnen. Als mögliche Entstehungsursachen von Bränden im Kali- und Steinsalzbergbau

können

- Heißlaufen von Fördermitteln und Maschinen,
- Überlastung von elektrischen Anlagen,
- Kurzschlüsse und Funkenbildung,
- Sprengarbeiten,
- Schweißarbeiten und
- Rauchen und Umgang mit offenem Licht

angesehen werden [15].

Einige der angeführten Ursachen haben verschiedentlich Schlagwetterexplosionen ausgelöst, die sich zu Grubenbränden entwickeln konnten. Voraussetzung dafür ist das Vorhandensein schlaggefährlicher Wetter, die durch die im Abschnitt 3.3. beschriebenen Gasaustritte entstehen können. Im allgemeinen sind Grubenbrände dadurch gekennzeichnet, daß sie vom Brandherd auf die Ausrüstungen und den Ausbau im Grubengebäude und im Schacht übergreifen. In einigen Fällen waren jedoch auch Menschenleben durch reine Kabel- oder Transportbandbrände zu beklagen.

Abschließend ist zu bemerken, daß der Kali- und Steinsalzbergbau bisher in weit geringerem Maße von Grubenbränden bedroht war als andere Bergbauzweige. Hinzu kommt, daß in der Vergangenheit durch Fortschritte auf den Gebieten des Erkennens von Gasaustritten und der Brandbekämpfung sowie durch entsprechende Sicherheitsvorschriften die Gefährdung von Menschen und Anlagen wesentlich verringert werden konnte.

4. Beurteilung der Notwendigkeit sicherheitstechnischer Untersuchungen für die Steinsalzgrube Bartensleben

Die im Abschnitt 2 begründete Notwendigkeit der Durchführung von Untersuchungen hinsichtlich des maximal möglichen Unfalls im zukünftigen Endlager für radioaktive Abfälle bedingt eine eingehende Analyse der geologischen, hydrologischen und geomechanischen Verhältnisse in der als zentrales Endlager vorgesehenen ehemaligen Steinsalzgrube

Bartensleben, denn die bisher aus der Geschichte des Kali- und Steinsalzbergbaus bekannten Katastrophen bilden beim Vorliegen ungünstiger Bedingungen die Grundlage einer möglichen, wesentlich weitreichenderen Gefährdung der Umwelt, und zwar als Folge des Übertritts von Radionukliden aus dem Bereich des Endlagers in den der Biosphäre. Im Folgenden werden deshalb zunächst die geologischen Verhältnisse in der Grube Bartensleben näher beschrieben, um anschließend durch einen Vergleich mit den im Abschnitt 3 dargelegten Gefährdungsmomenten im Kali- und Steinsalzbergbau erste Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Zutreffens der verschiedenen Faktoren zu erhalten und Schlußfolgerungen für noch durchzuführende Untersuchungen abzuleiten.

4.1. Geologische Verhältnisse

4.1.1. Regionalgeologischer Überblick

Die geologischen Verhältnisse des Grubenfeldes Bartensleben - gleichbedeutend mit den geologischen Bedingungen für notwendige sicherheitstechnische Betrachtungen - sind sehr kompliziert aufgrund der Anlage des oberen Allertales als herzynisch streichende Störungszone. Es kam hier zu einer Salzgesteinanstauung unter gleichzeitiger Ausdünnung dieser Zechsteinhorizonte im Bereich der Begrenzungseinheiten der zu betrachtenden Grabenzone. Somit stellt die Salzlagerstätte des oberen Allertales einen Spaltendiapir mit einer Breite von ungefähr 1,5 km dar, der vermutlich während der kimmerischen Phase der saxonischen Gebirgsbildung entstanden ist.

In dieser Störungszone befinden sich die ursprünglich flachgelagerten Schichten des Salinars steil aufgerichtet und verfaltet mit einem Generalstreichen parallel zu den Grabenrändern. In Richtung Randnähe des Spaltendiapirs tritt dabei eine Spannweitenabnahme der Sattel- und Mulderbildungen auf. Im Gegensatz zur Südwestflanke des Diapirs, für die ein relativ allmähliches Abtauchen unter die diskordant dazu aufliegenden Gesteinsschichten angenommen

wird, muß als Nordostbegrenzung die hier als gewaltige Bruchlinie ausgebildete und steiler als 65° nach SW einfallende Allertalspalte selbst angesehen werden.

[16].

4.1.2. Geologie des Einlagerungsmediums

Die für die Endbeseitigung der niedrig- und mittelaktiven Abfälle in Frage kommenden Lagerkammern sind im Leine-Steinsalz aufgeföhren. Dieses Salzgestein ist eine zechsteinzeitliche Evaporitbildung des Leine-Zyklus (Zechstein 3). Als Normalprofil läßt es sich für den betreffenden Lagerstättenbereich vom Hangenden zum Liegenden wie folgt darstellen [16, 17, 18].

Tonflockensalz	($\text{Na}_3 \text{C}$)	2,5 m
Schwadensalz	($\text{Na}_3 \text{V}$)	5,5 m
Anhydritmittelsalz	($\text{Na}_3 \text{7}$)	25 m
Übergangsschichten (Bändersalz-Zone $\text{Na}_3 \text{5}$)		1-2 m
Kristallsalz (Organgensalz)	($\text{Na}_3 \text{7}$)	15-30 m
Linienalz	($\text{Na}_3 \text{3}$)	6-17 m
Basissalz	($\text{Na}_3 \text{a}$)	2 m.

Der Kristallsalzhorizont war in der Vergangenheit Hauptgegenstand der bergmännischen Hohlraum-schaffung (in jüngster Vergangenheit wurde aufgrund der tektonischen Situation und des geringen bergmännischen Vorlaufes auch das Linienalz hereingewonnen [23]). Demzufolge stehen die meisten vorhandenen Firstenbaue im Kristallsalz, das darüberhinaus größtenteils die Sohlen, Pfeiler und Schweben zwischen den einzelnen Steinsalzfirsten aufbaut. Dieser Gesteinshorizont besteht zum Großteil aus einem riesenkörnigen Steinsalz (maximale Kantenlänge bis zu 30 cm, bei einer durchschnittlichen Korngröße von 0,2 bis 15 mm) mit einem durchschnittlichen NaCl-Gehalt zwischen 98,5 % und 99,2 %. Das Salz ist farblos und nur vereinzelt rötlichbraun gefärbt. Es wird in einem durchschnittlichen Abstand von 10 bis 30 cm (maximal 70 cm) von 1 bis 2 cm

starken grauen Anhydritschnüren durchzogen. Die Anhydritkristalle der Anhydritschnüre sind oftmals durch Flüssigkeitseinschlüsse und carbonatisch-tonige Fetzen verunreinigt. Die riesenkörnigen Partien des Kristallsalzhorizontes sind sehr rein. Sie führen aber häufig mikroskopisch kleine Laugen- und Gaseinschlüsse [17].

Infolge der tektonischen und halotektonischen Bildungsgeschichte dieses Lagerstättenbezirkes kam es zur Herausbildung steil aufgerichteter Sättel und Mulden.

In Abhängigkeit von den petrophysikalischen Eigenschaften des gesamten Salinarkomplexes gerieten die Kristallsalzp Partien dabei in die Muldenkernzonen. Im Grubenfeld sind insgesamt vier Muldenstrukturen aufgeschlossen. Da die Mehrzahl der geschaffenen Abbauräume in der sich deutlich nach SW eintauchenden Hauptmulde befinden, haben meist nur die östlich gelegenen Baue eine weitreichende Schweben aus Kristallsalz, während für die westlich gelegenen mit flächenmäßig weniger Schweben aus diesem Salzgestein zu rechnen sein wird und dafür ältere zechsteinzeitliche Bildungen als Hangendes oberhalb der Firste in Erscheinung treten. Eine Abbausohle aus Kristallsalz wird dementsprechend für die westlichen Kammern typisch sein, während in den östlichen Kammern ältere zechsteinzeitliche Bildungen in der Sohle anstehen. Eine zusätzliche spießwinklig zum Generalstreichen hauptsächlich Nordwest-Südost streichende Kulissenfaltung, deren Achsen steil im Raum stehen und mit durchschnittlich 70 bis 90° in die Tiefe tauchen, führte zu einer Insichverfaltung der einzelnen Mulden im Grubenfeld. Da sich die Sattel- und Muldenachsen der Kulissen meist mit geringer seitlicher Verschiebung gegenüber stehen, ist es zu einem abwechselnden Einschnüren und Ausbuchten des Großfaltenbaus im Streichen gekommen [16].

Demzufolge bestehen die Pfeiler zwischen den einzelnen Kammern verschiedentlich nicht nur oder gar nicht aus Kristallsalz, sondern meist aus älteren zechsteinzeitlichen Bildungen.

Eine starke innere Verfallung, annähernd parallel zur Hauptstreichrichtung der Mulden, führte weiterhin dazu, daß die den Muldenkern bildende Kristallsalzzone in Streichrichtung von Partien älterer und jüngerer zechsteinzeitlicher Bildungen durchzogen wird. Diese Schichten bilden oftmals die Stöße, Pfeiler und Firsten der besonders in den Muldenzentren gelegenen Abbaukammern. Nur im Idealfall wird das Liegende und Hangende der Firstbaue vom Kristallsalz aufgebaut. Es ist anzunehmen, daß es in vertikaler Erstreckung von den Muldensohlen bis zum Salzspiegel reicht. Infolge seiner Grobkörnigkeit neigt es in den Baukammern zu Firstfällen kleinerer Ausmaße.

Da diese Kristallsalzhorizonte häufig weitgehend bis zum nächst älteren Gesteinshorizont hinein abgebaut sind, muß auch das Linien-salz als Einlagerungsmedium für die zukünftigen Endlagerungsprodukte angesehen werden. Dieses Steinsalz ist klein-, mittel- und grobkörnig ausgebildet (durchschnittliche Korngröße 0,35 bis 5 mm). Aufgrund der unterschiedlichen Anordnung der Anhydritschnüre kann es in eine hangende Zone (Notenlinien-salz) mit sehr gleichmäßiger notenlinienartiger Anordnung der 0,1 bis 1 cm breiten und in einem Abstand von 2 bis 6 cm auftretenden Anhydritschnüre und eine liegende Zone untergliedert werden. In der letzteren gehören ebenfalls wieder mehrere schwächere Linien zu einem starken Anhydritstreifen ohne jedoch ein typisches Notenlinienbild zu ergeben. Im Salz treten außer Anhydrit auch idiomorphe Hämatiteinschlüsse, Pyrit, Carbonattüfelchen, Quarz und Laugenbläschen auf. In den Anhydritschnüren sind einzelne Anhydritkristalle durch Flüssigkeitströpfchen bräunlich gefärbt. Der weitere Mineralinhalt dieser Schnüre baut sich aus xenomorphen Material, Hämatit, Cölestin, Boracit, Glimmer, Quarz und Pyrit auf [17]. Die tektonischen Lagerungsverhältnisse dieses Gesteins sind vergleichbar mit denen des Kristallsalzhorizontes. Generell ergeben sich demzufolge 2 bis 10 m mächtige Salzfesten aus Linien-salz als

längsseitige Begrenzungen der Abbaukammern. In Einzelfällen können sie jedoch von 0 bis über 50 m Mächtigkeit variieren.

4.1.3. Geologie des Liegenden

Aufgrund der bergtechnischen Anlage der einzelnen Abbaukammern treten die geologisch liegenden Schichtenfolgen nur in den muldentiefsten Firstenbauen auch als durchgehende Horizonte - wenn auch unterschiedlich stark verfaltet oder gestört - unterhalb der Abbausohlen auf. Darüber hinaus stellen sie für alle Kammern das mit zunehmendem Alter weiter entfernte seitwärts anstehende Gestein dar. In diesem Sinne folgt auf das Liniensalz das Basissalz.

Dieses im Hangenden bräunlichgrau, bräunlich oder rötlich gefärbte mittelkörnige Steinsalz ist durch eine dichte Folge grauer und schwärzlicher 0,3 cm breiter Anhydritschnüre im Abstand von 3 bis 10 cm eng gestreift. Es führt parallel zu den Korngrenzen und zur Spaltbarkeit Laugenbläschen. Die durchschnittliche Mächtigkeit dieses Horizontes beträgt 2,4 m. Stellenweise ist es auf stark bewegten Störungszonen zur vollständigen Ausquetschung des Basissalzes gekommen [16, 17].

Den stratigraphisch tieferen Horizont bildet der Hauptanhydrit (A3). Er ist in einen hellen hangenden und dunklen liegenden Teil untergliederbar. Er besteht aus idiomorphen bis xenomorphen klein bis feinstkörnigen Kristallen, die aber durch größere Einzelkristalle oder Anhydritaggregate teilweise ersetzt werden können.

Massenhaft eingelagerte Flüssigkeitströpfchen bewirken stellenweise eine Braunfärbung. Der Anhydritgehalt erreicht im hellen hangenden Teil sein Maximum und nimmt zum liegenden Teil um 10 bis 15 % ab. Spiegelbildlich dazu verhalten sich die CO_2 - und MgO -Gehalte [17].

Aufgrund seiner relativ hohen Sprödhheit kam es bei den halotektonischen Vorgängen in der Lagerstätte zu einem mehrmaligen Zerreißen der Hauptanhydritfolge und zu ihrer Einmündung inmitten des aufwärtssteigenden stratigraphisch ehemals tiefer liegenden Staßfurt-Steinsalzes (Na₂).

Der Hauptanhydrit kann als formgebendes Skelett der Muldenstrukturen im Diapir angesehen werden. Er besitzt seine größten Mächtigkeiten in den muldentiefsten Bereichen der Lagerstätte und verjüngt sich in höher gelegenen Feldesteilen und an den stark eingegengten Flanken der Muldenstrukturen. Zusätzlich wurden bei den Verformungsprozessen mächtige Schuppen und Blöcke des hangenden Hauptanhydrits als Schollen in das Leine-Steinsalz verlagert und die Muldensohlen stark verfaltet und teilweise tektonisch zerrissen, so daß hier nicht überall mit einer durchgehend intakten Anhydritfolge zu rechnen ist. Die Normalmächtigkeit dieses Gesteins betrug in ursprünglicher Lagerung 30 bis 40 m. In den Muldenstrukturen steht es mit durchschnittlich 50 m Mächtigkeit an.

Die darauffolgenden stratigraphisch älteren Gesteins-horizonte des Grauen Salztones (T3) und des Kalisalzflözes Staßfurt (K2) bilden die äußere Haut der halokinetischen Mulden im Salzdom. Sie wirkten nach außen hin gegenüber dem Staßfurt-Steinsalz Na₂ als Ausgleichshorizont. Das erklärt die häufige tektonische Verdrückung des normalerweise 4m mächtigen T3 - Horizontes und des ehemals 8 bis 10 m mächtigen Kalisalzflözes Staßfurt einschließlich des Decksteinsalzes. Während es sich beim T3-Horizont im stofflichen Aufbau um ein toniges Magnesitgestein im Hangenden, mit einer Tonsteinfohle in der Mitte und einem Anhydritgestein im Liegenden handelt, nimmt generell in den aufgeschlossenen Grubenteilen im Kalisalzflöz die carnallitische Ausbildung von West nach Ost und von Nord nach Süd zu. Dabei vollzieht sich der Übergang von Carnallitgestein zu Hartsalz im Streichen und Fallen, indem im

Hangenden und Liegenden des Carnallitgesteins zunächst ein Hartsalzbesteg auftritt, dessen Mächtigkeit auf Kosten des Carnallitgesteins zunimmt [16, 7].

Zwischen den einzelnen Mulden ragt das normalerweise 100 bis 200 m mächtige Staßfurt-Steinsalz (Na₂), in das auch die liegendsten Horizonte der Muldensedimente eingebettet sind, aus bisher nicht bestimmten Teufenzonen in zwiebel förmigen Strukturen auf. Sie trennen als 50 bis 200 m breite, im Generalstreichen des Diapirs verlaufende Steinsalzlücken, die 50 bis 400 m breiten Mulden voneinander. Das Staßfurt-Steinsalz ist grobspätig und von schmutzig weißer Farbe. Es ist mit anhydritischen Linien, Schlieren, Schmitzen und Flecken versehen. Nur im hangenden 3 m-Bereich - als Kieseritregion bezeichnet - treten im Gegensatz zu der mächtigen liegenden Anhydritregion in Wechsellagerung mit dem Steinsalz Kieseritschnüre auf [16, 17]. Im Liegenden des Staßfurtsteinsalzes stehen zur Teufe zu (vorsalinarer Untergrund) als salinarer Unterbau der Salzstockbildung mit großer Wahrscheinlichkeit noch die folgenden Gesteinshorizonte an:

Basalanhydrit	(A2)	2 m
Stinkschiefer	(Ca2st)	4 - 7 m
Werra-Anhydrit	(A1)	38 - 48 m
Zechsteinkalk	(Ca1)	4 - 10 m
Kupferschiefer	(T1)	0,3 m
Zechsteinkonglomerat	(S1)	1 m.

4.1.4. Geologie der hangenden zechsteinzeitlichen Bildungen

In natürlicher Abfolge kam es unmittelbar im Hangenden des Kristallsalzhorizontes zur Ablagerung der Übergangsschichten. Dieses 2 m mächtige Steinsalz ist von schwach bräunlicher Farbe und eng gestreift. Im hangenden Teil wird es von bräunlich verwaschenen Linien und im liegenden Teil von schwärzlich schärferen Linien durchzogen. Östlich treten in diesem feinkristallinen Salz stärkere Anhydritstreifen von 2 bis 3 m Dicke auf [19].

Darauf folgt das durch vier charakteristische Anhydritmittel gekennzeichnete Anhydritmittelsalz. Es ist ein gelb, orange oder rötlich gefärbtes mittel- bis grobkörniges Steinsalz mit vielen scharfen oder verwachsenen Anhydritstreifen zusätzlich der Anhydritbänke. Die 0,8 bis 1,5 m mächtigen Anhydritmittel sind häufig infolge tektonischer Beanspruchung boudinageartig zu Linsen verschiedener Größe aufgelöst und sind oftmals nur noch durch anhydritische Striemen miteinander verbunden. Dieses Salzgestein befindet sich stets in den innersten Teilen der Mulden, so daß in unmittelbarer östlicher Nähe der westlichen Firstenbaue und in unmittelbarer westlicher Nähe der östlichen Firstenbaue im allgemeinen mit anstehenden Anhydritmittelsalz gerechnet werden kann. Die Entfernung vom Abbaustoß bis zu diesem Salz beträgt dabei 2 bis 10 m (entspricht der anstehenden Mächtigkeit vom Liniensalz). Mit zunehmender Teufe tritt das Anhydritmittelsalz seltener auf [16, 17].

Das ehemals darüberlagernde Schwadensalz tritt im Grubenfeld selten auf. Dieses hellgelblich, orange oder leicht bräunlich gefärbte 2 bis 8 mm körnige Steinsalz mit vereinzelten schwachen grauen bis leicht bräunlichen Anhydritschnüren, die selten aushalten und verschieden stark deformiert sind, steht im Muldeninnersten im Hangendbereich in Form sehr schmaler und steiler Spezialeinfaltungen in tektonisch stark reduzierten Profilen meist oberhalb der Reichweite der aufgefahrenen Grubenräume an. Lediglich in der randnah gelegenen Westmulde des Salzstockes wurde diese Gesteinsfolge häufig bergmännisch durchörtet.

Letzteres trifft auch für die noch folgenden jüngeren Zechsteinschichten zu. Als Tonflockensalz tritt hier ein 0,2 bis 2,6 m mächtiges Steinsalz auf, das wechselnd braun und orange gefärbt ist. Es wechseln dabei Partien, die durch grüngrauen und roten Ton in Schwaden, Brocken und als feinverteilte Spreu schmutziggelblich erscheinen, mit reinen, orange gefärbten Lagen, die seltener kleinste Ton-

Bröckchen enthalten, ab.

Der Rote Salzton (T4) als stratigraphisch höherer Horizont baut sich aus einer 0,5 m mächtigen grünlich-grauen, teilweise mit dünnen Anhydritschnüren versehenen Liegendpartie, und einer 2 bis 4,5 m mächtigen massigen, rotbraunen, vereinzelt etwas grünfleckigen, durch Lin-lagerungen von Fasersteinsalz, Faser-carnallit und Anhydritknollen charakterisierten, brekziösen Tonsteinfolge als Hangendpartie auf.

Der normalerweise darüberlagernde Pegmatitanhydrit (A4) tritt hier, 0,2 bis 0,5 m mächtig, als graugrüner bis weißlichen oder rosa Anhydrit mit eingelagertem Halit in Form von Kristallen, Körnern oder Linsen auf. Das darauffolgende und zum stratigraphischen Hangenden hin die zechsteinzeitlichen Bildungen hier abschließende Aller-Steinsalz (Na4) liegt, wie auch schon für die gesamten letztgenannten Bildungen als allgemein typisch herausgestellt, nur in stark tektonisch beanspruchten Profilen an der SW-Flanke des Salzrückens vor. Es handelt sich um ein schwachgelbliches bis orange gefärbtes, mittel- bis grobkörniges Steinsalz [16, 17, 19].

4.1.5. Geologie des Deckgebirges

Unmittelbar über dem Gipshut des Salzstockes lagern im östlichen Bereich des Allertalgrabens stark zerrüttete Ton- und Gips-schichten des Mittleren Keupers in vielfachem Wechsel und vereinzelt unmittelbar am östlichen Grabenrand Schichten des Unteren Muschelkalkes und Oberen Keupers [21]. Der westliche Teil des Grabens baut sich über dem zu betrachtenden Lagerstättenbereich neben Schichten des Oberen Keupers aus gegenseitig verworfenen Schichtenkomplexen von Jurasedimenten (Lias, Dogger und Malm) auf [16]. Insgesamt handelt es sich bei diesen Deckgebirgsschichten um vorwiegend tonige Sedimente. In verschiedenen Schichtenfolgen treten darin dünnplattige Sandsteine mit kalkigen Bestandteilen auf.

Im Hangenden wird der gesamte Grabeninhalt von tertiären und quartären Lockersedimenten (schluffige Feinsande und Tone des Unter- und Mitteloligozäns mit ca. 20 m Mächtigkeit sowie pleistozäne Sande und Kiese mit tonigen Zwischenlagen mit 10 bis 15 m Mächtigkeit) überdeckt [20].

Die Gesteinsschichten der Lappwaldmulde fallen als SW-Begrenzung der Allertalstörungszone flach nach SW ein. Die hier anstehenden Schichtenfolgen weisen vom Liegenden zum Hangenden folgende Mächtigkeiten (in m) auf:

Unterer Buntsandstein 250 bis 300

(Schiefertone und massige Tonsteine, in die dünne Sandsteinbänke fein-körniger Ausbildung mit kalkigem Bindemittel oder Rogensteinbänken eingelagert sind)

Mittlerer Buntsandstein 130 bis 160

(Fein- bis mittelkörnige Sandsteine mit tonigem und teilweise dolomitischem Bindemittel, Sandstein-Schluffstein-Wechselagerungen und Tongesteine)

Oberer Buntsandstein 150 (ohne Salz)

240 (mit Salz)

(Schluffstein, Dolomit, Gips, Steinsalz)

Unterer Muschelkalk 100 bis 120

(Wellenkalk, dem die Oolithbänke, die Terebratelbänke und die Schaumkalkbänke eingelagert sind)

Mittlerer Muschelkalk 50 (ohne Salz)

100 (mit Salz)

(Dolomite, dolomitische Mergel, Gips und Steinsalz)

Oberer Muschelkalk 50 bis 70
(Wechselfolge kalkiger und tonig-
mergeliger Schichten)

Unterer Keuper 40 bis 60
(Bröckelige Letten mit dünnen Sand-
steinbänken und geringmächtigen
Kalksteinlagen)

Mittlerer Keuper 250 bis 300
(Dolomitmergel, Tone und Gips)

Oberer Keuper 80 bis 120
(Tonsteine und Sandsteine)

Stellenweise und nicht vollständig ausgebildet (nur bis zu 150 m von insgesamt 200 bis 250 m Mächtigkeit) treten zusätzlich als hangendste Sedimentbildung die Unteren Lias-Sedimente (Tonsteine und Sandsteine des Lias α und Lias β) auf [20, 21].

Der Ansatzpunkt des Schachtes "Bartensleben" befindet sich dicht westlich des Allertalgrabens im Mittleren Keuper der Lappwaldscholle, und die Schachtröhre erreicht - bedingt durch das SW-gerichtete Einfallen der Randspalte - bei rund 282 m Teufe das Salzgebirge. Die davon 1,6 km nordnordwestlich gelegene Schachthanlage "Marie", die als Notfahrschacht für die erstere Anlage angesehen werden muß, befindet sich ungefähr 100 m östlich des westlichen Grabenrandes im Bereich der Allertalgrabenzone. Hier durchteuft sie geringmächtiges Pleistozän, Jura und Keuper, um bei 198 m Teufe den Gipshut und nach weiteren 72 m das aufgesetzte Steinsalz der Staßfurtserie zu erreichen [16].

Als Nordostbegrenzung des Allertalgrabens ist die dem Flechtinger Höhenzug im Südwesten vorgelagerte Weferlingen-Schönebecker Triasplatte anzusehen. Unter einer schwachen Bedeckung jüngerer Sedimente (Quartär und Tertiär) stehen in einem einfachen geologischen Aufbau Gesteine aus der

Trias (im wesentlichen Buntsandstein- und Muschelkalkabfolgen mit einem Gesteinsaufbau, wie für die Lappwaldmulde beschrieben) an. Die Gesteinsschichten fallen flach nach Südwesten ein und werden diskordant von der Allertalspalte als Nordostbegrenzung der Allertalstörungszone angeschnitten [16].

4.1.6. Geologische Besonderheiten der Salzlagerstätte "Bartensleben"

Die für alle Salzaufpressungen typische Salzspiegelbildung als Hangendaabschluß dieser Diapire infolge der Tätigkeit vadoser Wasser ist auch für die Salzlagerstätte des oberen Allertales ein markanter Begrenzungshorizont. Im Feldesteil "Bartensleben" ist dieser relativ ebene Salzspiegel 1,5 bis 2 km breit und befindet sich bei ca. 270 m unter Gelände. Über dieser nahezu horizontalen Ebene lagern unterschiedlich mächtige Residualbildungen (von wenigen Metern bis 100 m). Sie stellen eine unregelmäßige Masse aus tonig-schluffigem Material, Anhydritresten und Gipstrümmern dar, die durch Gips, Ton sowie untergeordnet Steinsalz mehr oder weniger miteinander verkittet sind. Oft wird dieser Gipshut klüftig, verbrochen und von Hohlräumen durchsetzt sein [16, 20].

Mit einer Zirkulation von wässrigen Lösungen muß demzufolge - wenn auch mit sehr geringer Geschwindigkeit - in den Klüften und Schloten des Gipshutes gerechnet werden. Mit einem permanent starken Lösungsandrang ist vor allem im Bereich der Nordost-Störungszone zu rechnen. Das Einzugsgebiet dieser Grundwässer bildet die Weferlingen-Schönebecker Triasplatte. An der Südwestgrenze dieses Lagerstättenbereiches ist trotz des Schichteneinfallens der Sedimentabfolgen der Lappwaldmulde nach SW aufgrund vorhandener Randstörungen zwischen Salinargestein und Triassedimenten mit züsitzenden Wässern zu rechnen. In die Schachtröhre treten laufend 5 bis 10 l/min Zuflüsse aus dem Deckgebirge ein [16, 20]. Im Salinerverband selbst sind geringe Zuflüsse

an gesättigter Lauge im Nordfeld der Hauptmulde im Bereich der 1., 2a. und 2. Sohle zu verzeichnen. Es ist anzunehmen, daß diese Zuflüsse an den stratigraphischen Horizont des Hauptanhydrits (A3) gebunden sind. Des weiteren ist zu vermuten, da diese Tropfstellen und Laugendurchfeuchtungen am oder in unmittelbarer Nähe des Hauptanhydrits im nördlichen Bereich der 1. Sohle am stärksten auftreten, daß hier die Anhydritaltenschenkel teilweise bis in den Gips- hutbereich hinaufragen und somit Kommunikationsmöglichkeiten für die Entwässer zur Salzlagerstätte darstellen [22].

Des öfteren kam es bei Auffahrungen in Verbindung mit Laugenaustritten auch zu unterschiedlich starken Entgasungen des anstehenden Gesteins, weit häufiger jedoch nur zum Auftreten von Gas in diesem Lagerstättenbereich. Die Gasaustritte erfolgten hauptsächlich aus dem Hauptanhydrit, dem Grauen Salzton (T3) und dem Kalisalz- lager Staßfurt (K2) in Sylvinit, Hartsalz- oder Carnallit- gesteinsausbildung, wobei der größte Anteil auf den Hauptanhydrit entfällt. Meist stehen die beim Anbohren oder Schießen freiwerdenden kluftgebundenen Gase unter Druck. Neben Bläsern treten auch länger anhaltende Gasausströmungen (bis zu 2 bis 3 m³/min als Höchstmenge und 3 Wochen als längste Ausströmzeit) auf. Bei den austretenden Gasgemischen handelt es sich hauptsächlich um Stickstoffgase (60 bis 80 % N₂) mit 20 bis 30 % Kohlenwasserstoffen. Wenige Prozentgehalte an Wasserstoff und Sauerstoff treten häufig auf, Kohlendioxid seltener [16].

4.2. Geomechanische Verhältnisse

4.2.1. Beurteilung der Gebirgsschlaggefährdung

Im Bereich der Grube Bartensleben bildet entsprechend den Ausführungen im Abschnitt 3.1.2. der Schichtenkomplex "Kalisalzflöz 'Staßfurt' - Grauer Salzton - Hauptanhydrit" die Voraussetzung für das Zustandekommen von Gebirgsschlägen. Das Kalisalzflöz, das in der gesamten Westmulde und in der Schachtmulde im Bereich der oberen 3 Sohlen als Hartsalz vorliegt, ist im tieferen Teil der Schachtmulde teilweise, in der Haupt- und in der Ostmulde vorwiegend carnallitisch ausgebildet. In Richtung Westen wird es von den Hauptquerschlägen auf der 3. und 4. Sohle und in Richtung Osten auf allen Sohlen mehrmals durchörtert. In der Ostmulde ist das Flöz nur im Westteil durch die 1., 2. und 4. Sohle durch die Hauptquerschläge aufgeschlossen (Anlage 1).

In den ersten Betriebsjahren des Schachtes Bartensleben (1912 bis 1913) und zum Teil auch in den ersten Jahren nach dem zweiten Weltkrieg wurde vorwiegend das Kalisalzlager abgebaut, und zwar im sogenannten Firstenstoßbau. Dabei wurde das Lager von den Hauptquerschlägen aus ständig in streichender Richtung verfolgt, bis die Mächtigkeit einen wirtschaftlichen Abbau nicht mehr zuließ bzw. die Markscheide erreicht war. In Anlage 2 werden die Parameter der auf den einzelnen Sohlen in den verschiedenen Mulden vorhandenen Auffahrungen zusammengestellt. Einen Überblick über das angewandte Abbauverfahren vermittelt Anlage 3, wobei hauptsächlich die Anordnung der Abbaue in den dort bezeichneten Hartsalzlagern "B" und "C" interessiert. Hartsalzlager B ist identisch mit dem Ostteil der Schachtmulde, Hartsalzlager C mit dem Westteil der Hauptmulde.

In fast allen Bereichen, wo Bergbau im Flöz "Staßfurt" umging, ist dieses sowohl in streichender Richtung als auch im Einfallen annähernd vollständig, ohne Belassung von Pfeilern aus Kalisalzen, abgebaut. Des weiteren erforderte das angewandte Abbauverfahren eine weitestgehende Auffüllung der geschaffenen Hohlräume mit Versatzgut.

Schlußfolgernd aus den obigen Darlegungen und aus den Angaben der Anlage 2 ist anzunehmen, daß aufgrund folgender Faktoren eine Gefährdung der Grube Bartensleben mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann:

- Annähernd vollständiger Abbau der anstehenden Kalisalze in den Bereichen, wo Bergbau betrieben wurde. Damit kommt die Fähigkeit dieser Gesteine (Carnallitit !), größere Energiemengen zu speichern und unter entsprechenden Bedingungen wieder freizusetzen, nicht zum Tragen.
- Tiefe im Bereich der 4. Sohle ~ 500 m. Gebirgsschläge traten bisher in Teufen > 500 m auf.
- Steile Lagerung. Gebirgsschläge in solchen Lagerstätten waren bisher nur in einem Fall zu verzeichnen. Außerdem kann die einen Gebirgsschlag begünstigende Wirkung des an sich schlaggefährlichen Anhydrits hier ausgeschlossen werden, da die Durchbiegung des Hauptanhydrits bei steiler Lagerung nicht so groß sein dürfte wie bei flacher Lagerung.
- Geringe Baufeldgröße. Der Abbau des Carnallitits wurde im wesentlichen nur im unteren Teil der Schachtmulde und in der Hauptmulde betrieben.
- Versetzen der Abbaue. Dadurch finden die hangenden Schichten schnell eine neue Auflage.
- Einstellung des Gewinnungsbetriebes. Dadurch Vermeidung von Änderungen in der Belastungsgeschwindigkeit.

4.2.2. Allgemeine Standsicherheit des Grubengebäudes

Die Erfahrungen während des Betriebes der Steinsalzgrube Bartensleben sowie inzwischen durchgeführte theoretische Untersuchungen und Befahrungen der Grube deuten generell auf eine ausreichende Standsicherheit der vorhandenen Hohlräume hin. Die gebirgsmechanischen Auswirkungen des bis Ende des Jahres 1969 umgegangenen Bergbaus waren bisher unbedeutend. Sie beschränken sich im wesentlichen auf den

sogenannten Zentralteil, der die in unmittelbarer Nachbarschaft der Ostquerschläge in der Hauptmulde aufgefahren zahlreichen Kammern und Strecken umfaßt, und auf diejenigen Teile des Grubengebäudes, in denen bis in die jüngste Zeit hinein Abbau betrieben wurden. In den letztgenannten Fällen, in Gebieten des sogenannten Kämpferdruckes, wurden die Pfeiler wahrscheinlich infolge der Durchbiegung der im Hangenden anstehenden mächtigen Steinsalzbank über das zulässige Maß hinaus belastet, was sich durch Ribildung und Abschaltungen an den Stößen äußerte. Derartige Erscheinungen bilden jedoch keine prinzipielle Gefahrenquelle, da die Durchbiegung der Hangendschicht im Laufe der Zeit ausklingt. Ursprünglich waren vermutlich auch in solchen Grubenbereichen die erwähnten Erscheinungen zu beobachten, in denen derzeit augenscheinlich keine Verformungen mehr auftreten (Zentralteil). Zu dieser Aussage muß man gelangen, da der Zustand verschiedener Ausmauerungen und der Betonsohle im Zentralteil noch gut ist, Veränderungen sich aber an diesen Stellen zuerst zeigen würden [25].

Folgende Stellen des Grubengebäudes sind durch Gebirgsdruck besonders beeinflusst [26]:

- 1. Sohle, Hauptmulde, Nordfeld, Abbau 1, westlicher Stoß (Rib 1,5 - 2 cm, über 20 m lang); zum Zentralteil gehörend,
- 2. Sohle, Hauptmulde, SO-Feld, Pfeiler zwischen dem Abbau 14 und 15 a (Rib 0,5 - 1 cm, 5 m lang); zum Zentralteil gehörend,
- 2. Sohle, Hauptmulde, Nordfeld, Abbau 5 am Rolloch 5 (Rib 1,0 - 1,5 cm, über 15 m lang); wahrscheinlich Beeinflussung durch angrenzende Carnallitit-Abbaue in der Grube Marie

Laut Betriebsplan der Grube Bartensleben sind diese Schadensstellen unter ständiger Kontrolle zu halten.

Die Auswirkungen weiterer gebirgsmechanischer Vorgänge wurden bei Befahrungen der Grube festgestellt [22, 27]:

- 2. Sohle, Hauptmulde, SO-Feld, Abbau 11 südlich (Firstfall); verursacht durch falsche Abbauführung und Treiben des Rötensalztens,
- 4a - Sohle, Hauptmulde, Nordfeld, Bereich der Abbaue 3 bis 6 (z.Z. andauernde Riß- und Schalenbildungen in den Pfeilern); vermutlich Auswirkungen des Kämpferdruckes,
- 4. Sohle, Schachtmulde, Südfeld, Schrapperstand Rolloch 9 (Abschalungen und Rißbildungen); Zone des Kämpferdruckes.

Die allgemeine Standsicherheit der Grube Bartensleben kann aufgrund eines Gutachtens des Instituts für Bergbausicherheit [28] folgendermaßen eingeschätzt werden:

- Die im Kalisalzlager im Streichen angelegten Abbaue sind wegen ihrer unregelmäßigen Anordnung als isolierte Grubenbaue im gebirgsmechanischen Sinne zu betrachten.
- Die im Steinsalz in der Westmulde, in der Ostmulde sowie im Bereich der Hauptmulde nördlich Rolloch 3 und südlich Rolloch 16 aufgefahrenen Abbaukammern können ebenfalls als isolierte Einzelbaue im gebirgsmechanischen Sinne angesehen werden. Aussagen über die Hohlräume in der Schachtmulde werden nicht getroffen. Es kann aber angenommen werden, daß hier ähnliche Gesichtspunkte zutreffen, zumal vermutlich diese Grubenbaue durch die im Gutachten verwendete Bezeichnung "Westmulde" angesprochen werden sollen.
- Eine Stabilitätsberechnung für die einzelnen Grubenbaue und das gesamte Grubenfeld ist wegen der unregelmäßigen Anlage und Ausbildung ersterer nicht möglich.
- Aufgrund der relativ geringen Gesamtspannweite dieser Feldesteile und der etwa 90 m mächtigen Steinsalzbank scheint jedoch die Stabilität dieses Räume gewährleistet.
- Die im Rahmen von Stabilitätsbetrachtungen für den Zentralteil berechnete Biegespannung in der Steinsalzbank

ohne Berücksichtigung der tragenden Elemente im Grubenfeld (Pfeiler, Schweben) überschreitet die Biegezugfestigkeit von Steinsalz sehr wesentlich. Da es bisher zu keinen größeren Zerstörungen in dieser Schicht gekommen ist, müssen die Salzfesten an der Lastaufnahme beteiligt sein. Über ihre Beanspruchung lassen sich aufgrund ihrer unregelmäßigen Anordnung keine Aussagen treffen. Gegenüber anderen Gruben des Kali- und Steinsalzbergbaus scheinen jedoch keine höheren Belastungen vorzuliegen.

Da das gebirgsmechanische Verhalten der Tragelemente im Bereich des Zentralteiles nach dem derzeitigen Kenntnisstand nur ungenügend beurteilt werden kann, wird die Durchführung eines Meßprogramms als notwendig erachtet.

Um langzeitige Verformungen, die weitgehend von dem Belastungszustand des Gesamtsystems abhängen, an den Grubenbauen zu erfassen, müssen Präzisionsnivelllements über und unter Tage, Messungen der Horizontalkonvergenz in den Hauptquerschlägen, Extensiometermessungen in den Verbindungsstrecken und Pfeilerquerdehnungsmessungen auf der 4a-Sohle durchgeführt werden [29]. Zusätzlich wurden in das Meßprogramm Staudungsmessungen im Bereich der 4a-Sohle und Verformungsmessungen am Rolloch 9 auf der 4. Sohle aufgenommen [30].

Bei der Erarbeitung der zweckmäßigsten Einlagerungstechnologie für radioaktive Abfälle ist zu berücksichtigen, daß die Grubenräume im Zentralteil gänzlich gemieden werden sollten [25], da die gebirgsmechanischen Auswirkungen nicht zu vermeidender Veränderungen am Grubengebäude (Aufwältigungen, Neuauffahrungen geringeren Umfangs) nicht eingeschätzt werden können. Die Auslösung großräumiger Gruben-zusammenbrüche im Zentralteil infolge veränderter Spannungsverhältnisse wären dann nicht ausgeschlossen. Demzufolge wären auch Wasser- oder Salzlösungszuflüsse aus dem Bereich des Salzspiegels über Klüfte oder Spalten im Hauptanhydrit (siehe Abschnitt 4.3.1.) denkbar.

Derartige Erscheinungen dürften nicht mit den Firstenzusammenbrüchen in der Grube Schierstedt vergleichbar sein, da hier völlig andersartige Verhältnisse vorlagen (Abbauhöhe 5 - 7 m, söhlige Lagerung)..

Durch das Einbringen versatzartiger Abfallmaterialien (Zementation flüssiger radioaktiver Abfälle vor Ort) könnte die Stabilität dieses Grubenteiles wesentlich verbessert werden. Entsprechende Untersuchungen sowohl hinsichtlich der Stabilitätssteigerung als auch der Zementierungstechnologie müßten umgehend eingeleitet werden.

4.3. Hydrologische Verhältnisse

4.3.1. Zuflüsse aus dem Hangenden

Die in der Grube Bartensleben aufgefahrenen bergmännischen Hohlräume befinden sich alle in einer größeren Entfernung von potentiellen wasser- oder salzlösungsführenden Horizonten. So beträgt der Abstand zur nordöstlichen Flanke der Allertalstörungszone auf der 4. Sohle mindestens 300 m, da eine in diese Richtung gestoßene Bohrung die Nordrandspalte noch nicht antraf. Es wird sogar angenommen, daß noch eine etwa insgesamt 500 m mächtige Schichtenfolge des Zechsteins ansteht. Über die genaue Lage der Nordrandspalte liegen keine Angaben vor. Der Abstand des Grubengebäudes von der südwestlichen Flanke der Störungszone kann mit 150 - 200 m angenommen werden. Die Entfernung der im Niveau der 1. Sohle angelegten Grubenräume vom Salzspiegel beträgt vermutlich 90 - 100 m.

Damit scheint eine Gefährdung der Grube Bartensleben durch Zuflüsse aus dem Hangenden nicht gegeben. Diese Auffassung wird zunächst dadurch bekräftigt, daß keine Analogie zu den im Abschnitt 3.2.1. beschriebenen Gruben besteht, die durch den Abbau des Kainits in unmittelbarer Nähe grundwasserführender Schichten ersoffen sind.

Gegen eine derartige Erklärung sprechen jedoch die Lösungszuflüsse an verschiedenen Stellen des Grubengebäudes [26]:

- 1. Sohle, Hauptmulde, Abbau und Schrapperstand 1a; Zufluß seit September 1962; Messung der Menge aufgrund des geringen Zuflusses nicht mehr möglich; im Abbau abgedichtet.
- 1. Sohle, Hauptmulde, Abbaustrecke 5 nach SO, Vorbohrung, z.Z. kaum Lösungs- und Gasaustritt; abgedichtet.
- 2. Sohle, Hauptmulde, SO-Feld, Streckenvortrieb Querschlag 4, Anstehen von Salzlösung im Bohrloch, jedoch kein Austritt.

Die bei Grubenbefahrungen [22, 27] angetroffenen weiteren "Laugen"-Ansammlungen bzw. Durchfeuchtungsstellen

- 2a-Sohle, Hauptmulde, SW-Kammer des ehemaligen IBN; Durchfeuchtung der Firste im NO-Teil, Tropfenbildung,
- 2a-Sohle, Hauptmulde, Nordfeld, Abbau 1a; Durchfeuchtung am Rolloch,
- 1. Sohle, Hauptmulde, Nordstrecke, zwischen Abbauen 1a und 7; Pfützen auf der Sohle,
- 1. Sohle, Hauptmulde, Nordstrecke, zwischen Abbauen 7a und 5; Anstauungen auf der Sohle bis 30 cm,
- 1. Sohle, Hauptmulde, Nordfeld, Abbau 5; Durchfeuchtung am nördlichen Ortsstoß.

sowie die im "Abriß der geologischen Verhältnisse" aufgeführten Salzlösungsaustritte [38, Anlage 137] haben vermutlich die gleichen Ursachen wie die oben beschriebenen Vorkommen bzw. können in allen anderen Fällen als Rückstände von Bohrarbeiten, Bewetterungslösungen oder Rest- und Metamorphoselösungen [31] angesehen werden.

Die im Jahre 1966 in der Abbaustrecke 5 nach SO auf der ersten Sohle beim Stoßen einer Verbokrung angetroffenen

Salzlösungen und Gase gaben den Anlaß für geophysikalische Untersuchungen des Kaliforschungsinstitutes Sondershausen. Damit sollten der Verlauf des Hauptanhydrits im Streichen und im Hangenden sowie dessen Klüftigkeit und Laugenführung ermittelt werden [26]. Über die Ergebnisse dieser Arbeiten liegen zur Zeit keine Informationen vor.

Aufgrund der Entwicklung der beschriebenen Zuflüsse im Bereich der Hauptmulde - anfänglich wurden insgesamt annähernd 1 l/min gemessen - wird in einem Gutachten des VEB Hydrogeologie Nordhausen [26] die Ansicht geäußert, daß die ursprünglich als Folge der tektonischen Beanspruchung im Hauptanhydrit vorhandenen Klüfte später durch Salzneubildungen wieder verheilt sein können, so daß die Zechsteinbildungen im Hangenden trotz der komplizierten Lagerungsverhältnisse wasserundurchlässig erscheinen und mit Zuflüssen aus dem Bereich des Salzspiegels und dem darüberliegenden, mit Salzlösung gefüllten Reservoir in den Residuen und stark zerrütteten Gesteinsschichten des Deckgebirges nicht zu rechnen ist.

Im Gegensatz dazu muß jedoch auch die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, daß der Hauptanhydrit im Bereich der Hauptmulde nicht, wie verschiedentlich angenommen, nach dem Hangenden nicht aushält, sondern bis zum Salzspiegel reicht [25]. Durch den im Nordfeld besonders auf der ersten Sohle betriebenen Abbau mit seinen gebirgsmechanischen Auswirkungen ist ein Aufreißen der vorgebildeten Zuflußwege denkbar, so daß auf diese Weise die im Nordfeld anzutreffenden Lösungen Zutritt zu den Grubenräumen gefunden haben könnten. Bezeichnenderweise reduzierten sich die Zuflußmengen, nachdem der Abbau in diesem Gebiet vollkommen eingestellt worden war. Es muß deshalb wieder mit einer Zunahme der Lösungszuflüsse gerechnet werden, sobald Neuauffahrungen im Bereich des Nordfeldes getätigt werden, selbst wenn diese nur im geringen Umfang notwendig sind.

Da andererseits die Zuflüsse auch Reservoirien entstammen könnten, deren Speichervermögen als erschöpft anzusehen ist - diese Annahme wird durch die Tatsache bestärkt, daß der Salzspiegel bei Bohrungen von über Tage und beim Schachtabteufen meist trocken angetroffen wurde [32] - oder bei denen aufgrund der geringen anstehenden und bewegten Mengen die Zuflußwege nicht erweitert wurden, sondern vielmehr wieder verheilen konnten, ist eine Klärung des Gesamtproblems erforderlich. Dazu können spezielle Untersuchungen an den Lösungszuflüssen (Chemismus, Altersbestimmungen) und eine genauere Erkundung des Verlaufs und der Eigenschaften des Hauptanhydrits beitragen. Zu erwähnen ist noch, daß die Grubenbaus in der Schachtaulde aufgrund der Ausbildung des Hauptanhydrits in ähnlicher Weise hydrologisch gefährdet sind [31] (Anlage 1). Außerdem ist die Möglichkeit von Wasser- oder Salzlösungszuflüssen in den peripheren Feldteilen nicht völlig auszuschließen. Besonders bei Neuauffahrungen können sich infolge veränderter Spannungsverhältnisse neue Verbindungswege zwischen den Grubenbauen und dem Salzspiegel bzw. Salzhang herausbilden. Dies betrifft vorwiegend die NO-Flanke der Störungszone, im geringeren Maße wahrscheinlich auch die SW-Flanke [25]. Für eine ausreichende Beurteilung der Grube Bartensleben hinsichtlich ihrer Gefährdung durch Zuflüsse aus dem Hangenden reicht der derzeitige Kenntnisstand nicht aus. Weitere Untersuchungen müssen deshalb folgende Komplexe beinhalten [33]:

- Beschreibung und Beurteilung historischer Zuflüsse,
- derzeitige Zuflußverhältnisse (Zuflußmengen, Chemismus und Alter der Zuflüsse, Zuflußwege, Reservoirie),
- Erkundung der Lage weiterer Reservoirie,
- mögliche Auswirkungen von Veränderungen am Grubengebäude auf die Zuflußverhältnisse.

4.3.2. Zuflüsse über die Schachtröhre

Der Schacht Bartensleben steht am südwestlichen Rand der Allertalstörungszone und durchteuft folgende Schichten bei

32,0 m	Mergel
69,0 m	blaue und rote Keuperletten
178,5 m	Keuper mit Gipsschnüren
186,0 m	grauer Sand
200,5 m	rote sandige Letten
231,0 m	blaue und rote Letten
250,0 m	Keuperletten mit Juraton
266,5 m	Gips
282,5 m	Keuperletten
ab 282,5 m	Steinsalz

Die angegebenen Teufen beziehen sich auf Schachtmitte. Bis auf den Mergel und die oberen blauen und roten Keuperletten haben die Schichten im Schachtbereich ein Einfallen von 30 bis 60° nach Westen.

Über die Eigenschaften dieser Schichten, besonders hinsichtlich ihrer Standfestigkeit und Wasserführung, liegen kaum Angaben vor. Bei einer im Oktober 1976 durchgeführten Schachtbefahrung wurde der obere Bereich des Schachtes (bis etwa 80 m) nicht trocken vorgefunden, so daß hier wahrscheinlich Grundwasser in den Schacht eintritt.

Der auch als Schwemmsand [34] angesprochene, bei 180 bis 186 m Teufe angetroffene graue Sand, der vermutlich mit dem Schiffsandstein (Mittlerer Keuper) identisch ist, hat offensichtlich eine ziemlich starke Wasserführung

- die Hauptzuflüsse treten bezeichnenderweise auch bei 180 bis 200 m Teufe auf - und steht unter hohem hydrostatischem Druck. Bei etwa 250 m Teufe verläßt der Schacht die Schichten des Mittleren Keupers und gerät in die Residualbildungen des Zechsteins (Gipshut) [20]. Die genaue Lage des Grenzhorizontes läßt sich wegen der stark miteinander vermengten Schichten (Einsturzbrekzie) nicht angeben. Obwohl der Salzspiegel beim Abteufen des Schachtes trocken vorgefunden wurde [32], muß auch in diesem Bereich mit Zuflüssen gerechnet werden.

In hydrologischen Gutachten des VEB Hydrogeologie /20/ wird eingeschätzt, daß die größte Gefahr für die Gruben in der Allertalstörungszone von den Schächten ausgeht. Bei einem weiteren unkontrollierten Zufluß der über dem Salispiegel anstehenden Wasser und Leckungen durch den jetzt schon teilweise undichten Schachtausbau besteht die Gefährdung in einer Erweiterung der Zulußstellen und als Folge davon in einer Zunahme der Zulußmengen.

Im Jahre 1964 wurden im Schacht Bartensleben Schacht-tropfwasser von 70 l/min registriert /20/. Aufgrund dieser relativ großen Lecks und anderer vorhandener Schäden wurde der VEB Schachtbau Nordhausen in den Jahren 1962 bis 1967 mit einer Schachtreparatur beauftragt. Dieser führte unter anderem folgende Arbeiten aus /20/:

- Festbohrungen durch den Ausbau zur Feststellung von Schäden und Auswaschungen hinter dem Ausbau. Die Bohrungen wurden im Teufenbereich von 10 bis 215 m im Abstand von 5 bis 10 m angesetzt. Die je Bohrlöcher zur Abdichtung verpreßte Menge an Zement betrug 50 bis 2.100 kg, im Teufenbereich von 168 bis 211 m wurde der Abstand auf 1 m verringert, der spezifische Zementverbrauch lag bei 25 bis 1.700 kg. Insgesamt wurden 32 t Zement und 7,8 t Chemikalien in 573 Bohrlöchern verpreßt. In der sogenannten Schwemmasandzone kam Chromolith (7295 l bei 48 Bohrlöchern) zum Einsatz.
- Reparatur des völlig zerstörten Schachtsumpfes. Durch die im Schachtsumpf gesammelten Tropfwasser wurde das Mauerwerk fast vollständig zerstört. Dadurch konnte sich hinter dem Ausbau ein keilförmiger Hohlraum von etwa 100 m durch Auslaugung des Steinsalzes bilden. Die Höhe des Hohlraumes betrug hinter der Schachtwandung maximal 5 m und der Keil reichte bis 10 m in das Gebirge hinein. Der Schachtsumpf wurde bis zu einer Höhe von 3,50 m neu aufgemauert und der Hohlraum teilweise mit Versatz gefüllt. Eine 80 cm starke Betenhinterfüllung verstärkt diesen Ausbau. Zum Schutz des Mauerwerkes gegen die im

Sumpfgesammelten Salzlösungen und zur Abdichtung wurde eine Bitumen-Latex-Emulsion aufgebracht und diese durch eine 1/2-steinige Blindmauer gegen mechanische Zerstörungen geschützt.

- Reparatur des Ausbaus in der sogenannten Druckzone im Bereich der 2. bis 4. Sohle. Die Arbeiten wurden zum Teil in Mauerwerk und zum Teil in Beton ausgeführt.

Über die Entwicklung der Zuflüsse aufgrund der Verpressungsarbeiten werden im Bericht [34] keine Angaben gemacht. Offensichtlich war jedoch ein Teilerfolg zu verzeichnen, da im Jahre 1968 nur noch Zuflüsse von 2 bis 10 l/min gemessen wurden.

Bei einer in jüngster Vergangenheit durchgeführten Schachtabklärung [35] wurde eingeschätzt, daß der derzeitige Zustand des Schachtausbaus den zukünftigen Aufgaben nicht vollaufgerecht wird. Folgende Maßnahmen und Arbeiten werden als notwendig erachtet:

- Erneuerung des Mauerwerkes im Hauptfördertrum im Bereich der Frostzone (bis 80 m Tiefe),

- Erneuerung des gesamten Mauerwerkes im Bereich der "Druckzone" (Steinsalz zwischen der 2. und 3. Sohle, bis ca. 450 m Tiefe),

- Einbau von Traufenbühnen zum Abfangen der Schachttropfwasser,

- Tiefbohrungen vom Fullort bis zur Hangebank einschließlich Verpressarbeiten.

Da keine weiteren Angaben zur Standsicherheit des Schachtes und über die hydrologischen Verhältnisse vorliegen, sind Untersuchungen zu folgenden Komplexen vorgesehen [33, 36]:

- Hydrologische Verhältnisse im Bereich des Schachtes Bartenleben,

- Aufnahme des Schachtzustandes,

- Gebirgsmechanische Verhältnisse im Schachtbereich,
- Notwendige Reparatur- und Unterhaltungsmaßnahmen,
- Entwicklung der Schachtsicherheit in größeren Zeiträumen,
- Maßnahmen für Kontrolle und Überwachung des Schachtzustandes,
- Maßnahmen der Schachtverwahrung.

4.3.3. Zuflüsse aus Nachbargruben

Eine unmittelbare Gefährdung des Grube Bartensleben durch Zuflüsse aus Nachbargruben besteht nicht, solange die derzeitig bekannten Zuflüsse im nordwestlich angrenzenden Grubenfeld und Schacht "Marie" beherrscht werden können. Bei einem Versagen dieser Anlage könnten allerdings Lösungen auf folgenden bergmännisch geschaffenen Verbindungswegen in das Grubenfeld Bartensleben gelangen [37]:

- Fluchtstrecke 3, Sohle von Bartensleben (-330 m NN), nach Schacht Marie,
- Strecke durch Kalibane der Anlage Marie im Niveau der 3. Sohle von Bartensleben; Strecke heute versetzt,
- Strecke 2, Sohle nördlich der Abbau 5 von Bartensleben (-290 m NN), heute aus wettertechnischen Gründen abgemauert,
- Wetterrolloch von 4. Sohle Bartensleben (-372 m NN) über 3. Sohle Bartensleben zu einer ca. 15 m höher gelegenen 450 m-Bausohle im Grubenfeld Marie,
- Wetterrolloch von 3. Sohle Bartensleben (Abbau 4) zur 450 m-Bausohle Grubenfeld Marie.

Des weiteren ist von der 4. Sohle des Grubenfeldes Bartensleben aus eine Horizontalbohrung in Richtung Grubenfeld Marie getrieben worden. Diese endet 7 m über der voll Länge stehenden 500 m-Sohle von Marie (-372 m NN).

Bei dem hier erbohrten Anstehenden soll es sich um den Hauptanhydrit handeln. Durch die Vielzahl der vorhandenen Verbindungen zwischen beiden Grubenfeldern wird im Falle des Ersaufens der Grube Marie das in der Fluchtstrecke auf einem 8 - 10 m höheren Niveau als das der 3. Sohle liegende, fast vollständig fertiggestellte, Dammtor wirkungslos bleiben. Ein sicherer Schutz der Grube Bartensleben wird dann wohl kaum zu erreichen sein. Deshalb ist bei Betrachtungen über die hydrologische Gefährdung der Grube Bartensleben die Grube Marie in der gleichen Wertigkeit mit einzubeziehen.

Derzeitig betragen die Zuflüsse über den Schacht Marie annähernd 25 l/min [22], nachdem bei einer im Jahre 1967 durchgeführten Reparatur der Schachtröhre der Ausbau und das Gebirge hinter dem Ausbau bis zu einer Tiefe von 250 m abgetastet und teilweise Verpreßarbeiten zur Abdichtung vorgenommen wurden. Die hauptsächlich in einer Tiefe von ca. 135 m eintretenden Wasser werden erfolgreich über Traufen abgeleitet. Der Schacht selbst ist nur noch bis zu einer Tiefe von 385 m befahrbar, da infolge eines unregelmäßigen Pumpbetriebes nach dem 2. Weltkrieg die 500 m-Sohle (- 372 m NN) mit Schachtwasser erfüllt ist [37]. Nähere Angaben über die Standsicherheit des Schachtes und des anstehenden Gebirges liegen nicht vor. Der Erhaltungszustand des Schachtausbaus wird als nicht so gut eingeschätzt wie der vom Schacht Bartensleben [31].

Die Möglichkeit von Zuflüssen im übrigen Grubengebäude läßt sich aufgrund der unbestimmten Anzahl von Bausohlen, besonders im Taufenbereich von 310 bis 500 m, und unbekannter Lage der Abbaue nur schwer beurteilen. In einem Fall wurde im Blauen Sylvinit bis 20 m an den Salzspiegel herangebaut, und als Folge davon waren Lösungszuflüsse zu verzeichnen. Es gelang allerdings, die Tropfstelle abzusichern [31].

Ein Übertritt von Salzlösungen von der nordwestlich gelegenen Schachtanlage Walbeck erscheint ausgeschlossen. Nach dem zweiten Weltkrieg wurde der Schacht Gerhard dieser Schachtanlage gesprengt. Das bedingte vermutlich ein Ersaufen dieser Grube. Bei der am 5.12.1968 durchgeführten Lotung im zu diesem Grubenfeld gehörigen Schacht Buchberg wurde der Spiegel der Salzlösung bei - 262 m NN angetroffen. Da der Abstand der Schächte Marie und Buchberg 5,8 km beträgt und vom Schacht Marie aus in nordwestlicher Richtung bis annähernd an die Markscheide abgebaut und vom Schacht Buchberg aus in südöstlicher Richtung etwa 550 m Strecke auf der 2. Sohle (- 313 m NN) aufgefahren wurden, hat der bestehende Sicherheitspfeiler eine Stärke von ca. 2,5 km. Nach den Erfahrungen, die beim Ersaufen der Gruben am Staßfurter Sattel gesammelt wurden (Abschnitt 3.2.3.), ist eine derartige Breite des Sicherheitspfeilers als völlig ausreichender Schutz gegen Lösungsübertritte anzusehen. Der Sicherheitspfeiler gegen den in südöstlicher Richtung liegenden, 2,1 km vom Schacht Bertensleben entfernten Schacht Alleringersleben, der im Jahre 1914 während des Abteufens bei - 242 m NN wegen starker Lösungszuflüsse aufgegeben werden mußte, beträgt aufgrund der im SO-Feld der Grube Bertensleben in 1,3 km Entfernung von den Hauptquerschlägen getätigten Auffahrungen nur 800 m. Dieser Abstand dürfte ebenfalls ausreichend sein, um einen Lösungsübertritt in das Grubenfeld Bertensleben zu verhindern, zumal die anstehenden Gesteinsschichten durch den Schacht Alleringersleben gebirgsmechanisch nur unwesentlich beansprucht sein dürften. Unter Berücksichtigung der dargelegten Gesichtspunkte wird es in diesem Zusammenhang lediglich als notwendig erachtet, die hydrologische Gefährdung des Grubenfeldes Bertensleben durch die Schachtanlage Marie zu untersuchen [33, 36] 7.

4.3.4. Zuflüsse aus dem Liegenden

Hinsichtlich der Zuflüsse aus dem Liegenden, wie sie im Abschnitt 3.2.4. beschrieben wurden, besteht in der Grube Bartensleben keine Analogie zu dem Südharz-Kalirevier. Die für das Südharz-Kalirevier typischen Speichergesteine fehlen hier (Hauptdolomit) oder stehen erst in sehr großer Tiefe an. Des weiteren haben diese Horizonte hier keine Verbindung zum Ausgehenden. Da die Grubenbaue vorwiegend im Jüngeren Steinsalz aufgeföhren wurden, stellen der Hauptanhydrit, der Graue Salzton, das Kalilager und das Ältere Steinsalz das geologische Liegende dar (Anlage 1), so daß ein sicherer Abschluß gegen eventuell tiefer liegende wasser- oder salzlösungs-führenden Horizonte gegeben zu sein scheint. Der aufgrund der Lagerungsverhältnisse unter Umständen als Gefährdungsmoment anzusehende Hauptanhydrit als unmittelbare Liegend-schicht des Jüngeren Steinsalzes wurde bereits in Abschnitt 4.3.1. behandelt.

4.4. Gasvorkommen

Im Grubenfeld Bartensleben wurden bisher bei bergmännischen Arbeiten in fast allen geologischen Horizonten Gase angetroffen (Abschnitt 4.1.6. und Anlage 4). Die auftretenden Gasmengen sind dabei in wesentlichen von der Stärke der vorhandenen Kluftzonen und der Intensität der Kulissenfaltung in den einzelnen Grubenfeldern abhängig. Bei fast allen Gasaustritten war in bestimmten Zeiträumen ein ständiger Rückgang der freiwerdenden Gasmengen zu verzeichnen, so daß bei guter Bewetterung keine wesentlichen Gefahren zu erwarten sind [38]. Allerdings besteht bei älteren Abbauen, die von jeglicher Wetterführung abgeschlossen sind, im Laufe der Zeit die Möglichkeit von Gasansammlungen mit brennbaren Bestandteilen, die bei fehlenden Sicherheitsvorkehrungen die Ursache für Schlagwetterexplosionen sein können.

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen kann jedoch angenommen

werden, daß die Grube Bartensleben im derzeitigen Ausbauzustand keiner wesentlichen Gefährdung durch Gasaustritte oder Gasausbrüche ausgesetzt ist, zumal hinsichtlich der Gasvorkommen keine Analogie zu den ausbruchsgefährdeten Revieren im Südharz- und Werra-Gebiet besteht. Bei Neuauffahrungen dürften durch vorausgehende Erkundungsarbeiten und bei Einhaltung der einschlägigen Sicherheitsvorschriften Gasausbrüche weitgehend zu vermeiden sein.

4.5. Brandgefährdung

Eine Gefährdung von Belegschaft und Ausrüstungen in der Grube Bartensleben durch Brände ist im wesentlichen nur durch elektrische Anlagen gegeben, soweit Schlagwetterexplosionen bei Gasansammlung ausgeschlossen werden. Die Auswirkungen des Übergreifens von Bränden auf den Grubenausbau können als unbedeutend angesehen werden, da dieser in der Vergangenheit nur vereinzelt in Form von Türstockausbau in den Hauptquerschlägen und Richtstrecken nach dem Durchhörtern des Kaliflözes und des Grauen Salztones eingebracht wurde.

Insgesamt betrachtet besteht somit in der Grube Bartensleben keine höhere Brandgefährdung als in jeder anderen Grube des Kali- und Steinsalzbergbaus.

5. Ablauf und Auswirkungen von Katastrophen bei der Einlagerung radioaktiver Abfälle in Salzbergwerken

Als Katastrophe ist ein folgenschweres unglückliches Ereignis, also ein Unglücksfall großen Ausmaßes zu bezeichnen [39]. Bei einem zentralen Endlager für radioaktive Abfälle ist das der Fall, wenn radioaktives Material unkontrolliert aus dem Bereich des Endlagers in die Biosphäre gelangt.

Bei der Nutzung von Salzbergwerken wird beim Eintritt einer derartigen Katastrophe mit großer Wahrschein-

lichkeit mit folgendem Ablauf der Ereignisse zu rechnen sein:

Aufgrund großräumiger gebirgsmechanischer Zerstörungen im Grubengebäude oder bereits vorhandener Zuflußstellen im Bereich des Schachtes oder der übrigen Grubenbaue kommt es zu einem Ersaufen einzelner Grubenfelder bzw. des gesamten Endlagers. Schon während des Stadiums des Ersaufens und später bei vollständig mit Salzlösung gefüllter Grube werden die Einlagerungskörper von der Flüssigkeit umspült bzw. bei loser Lagerung in Form von Schüttkegeln von dieser durchdrungen. Dadurch können Radionuklide in Lösung gehen und mit dem Lösungsstrom abtransportiert werden. Je nach Einlagerungsvariante, Abfallart und Lage der Einlagerungsräume ergeben sich unterschiedliche Bedingungen für den Übertritt von Nukliden in die Lösung und damit eine verschieden große Kontamination der abfließenden Salzlösung. Bei entsprechenden Voraussetzungen gelangen die kontaminierten Salzlösungen in andere geologische Schichten und unter Umständen auch in die Biosphäre.

Die Größe der sich daraus für die Umwelt ergebende Gefahr ist abhängig von der im Endlager aufgenommenen Menge an Radionukliden, von der Verdünnung der kontaminierten Lösungen durch Grundwasser und von der Fähigkeit der durchflossenen Bodenschichten, Radionuklide zu absorbieren.

Von der Vielzahl der möglichen Varianten des Ersaufens des Endlagers und des Übertritts kontaminierter Salzlösungen in die Biosphäre bildet die Variante mit der voraussichtlich größten Gefährdung der Umwelt, der sogenannte maximale Katastrophenfall, die Grundlage für eine Beurteilung der Eignung der ausgewählten Grube als zentrales Endlager und für die Ableitung entsprechender Maßnahmen zur Verringerung der Auswirkungen im Katastrophenfall. Aufgrund der Vielfältigkeit der zu berücksichtigenden Einflußfaktoren wird es als zweckmäßig erachtet, die Zusammenhänge beim Ersaufen und bei der Ausbreitung von Radionukliden in einem modellartigen Schema darzustellen.

Dadurch kann eine größere Übersicht über das Gesamtproblem erreicht werden. Außerdem kann ein derartiges Modell als Hilfsmittel bei der Entscheidungsfindung hinsichtlich der noch durchzuführenden Untersuchungen dienen. Als Darstellungsform wurde eine Art problemorientierter Programmablaufplan gewählt (Anlage 5), um schon von vornherein die Voraussetzungen für ein später zu erarbeitendes Rechenprogramm zu schaffen.

5.1. Modellmäßige Darstellung der Voraussetzungen, des möglichen Ablaufs und der Auswirkungen des Ersauens eines zentralen Endlagers

Der Prozeß des Ersauens eines als zentrales Endlager für radioaktive Abfälle genutzten Salzbergwerkes und der Übertritt von Radionukliden aus dem Grubenbereich in die Biosphäre wurde in dem als ersten Entwurf vorliegenden Modell (Anlage 5) in sechs Komplexen behandelt:

- Faktoren, die das Zustandekommen von Zuflüssen wesentlich beeinflussen,
- Wechselwirkungen zwischen Zuflüssen und untertägigen Einrichtungen,
- Zusammenhänge beim Ersaufen von Salzbergwerken,
- Strömungsverhältnisse in dem ersoffenen Endlager,
- Probleme des Übertritts von Radionukliden in die Salzlösung,
- Zusammenhänge beim Übertritt kontaminierter Salzlösungen vom Endlager in geologische Schichten des Deckgebirges und der Biosphäre.

Die Voraussetzungen für eine Beurteilung der Wahrscheinlichkeit des Zustandekommens und der Auswirkungen von Katastrophen bildet eine genaue Kenntnis der geologischen, hydrologischen, geomechanischen und seismologischen Verhältnisse im Bereich des künftigen Endlagers. Bei den in dieser Hinsicht durchzuführenden Untersuchungen müssen auch die bisher bei der Beobachtung und Bekämpfung von

Wasser- und Salzlösungszuflüssen gesammelten Erfahrungen genutzt werden, um bei eventuell vorhandener Analogie entsprechende Schlußfolgerungen für das Verhalten derzeitig auftretender oder aufgrund veränderter Verhältnisse zustande kommender Zuflüsse ziehen zu können.

Zunächst ist deshalb eine Erfassung der geologischen Verhältnisse im Bereich des Endlagers erforderlich (Anlage 5, Blatt 1). Des weiteren müssen die Parameter historischer Zuflüsse und die Gründe für deren Versiegen ermittelt werden. Nachdem auch die Ursachen und die wichtigen Parameter der z.Z. vorhandenen Zuflüsse bekannt sind, wird geprüft, ob aufgrund analoger Bedingungen mit ihren Versiegen zu rechnen ist. Fällt der Test positiv aus und sind aufgrund weiterer Einflußfaktoren keine Veränderungen in den Zuflußverhältnissen zu erwarten, können die Untersuchungen abgebrochen werden. Das ist auch der Fall, wenn derzeitig weder Zuflüsse vorhanden noch zu erwarten sind. Bei negativem Testergebnis wird noch geprüft, ob weitere Faktoren, z.B. geomechanische und seismologische, eine Veränderung in den hydrologischen Verhältnissen hervorrufen. Danach können die Parameter der Zuflüsse gespeichert werden.

Die Wechselwirkung zwischen den Zuflüssen und untertägigen Einrichtungen ist in Anlage 5, Blatt 2, dargestellt. Dabei werden drei Fälle unterschieden:

- $k = 0$ - Die Zuflüsse gelangen nur über den Schacht in das Grubengebäude.
- $k = 1$ - Die Zuflüsse treten im Grubengebäude selbst auf.
- $k = 2$ - Sowohl im Schacht als auch im Grubengebäude sind Zuflüsse zu verzeichnen.

Bei allen zu betrachtenden Zuflußvarianten wird zunächst geprüft, ob die Auslaugung auf den Zuflußwegen fortschreitet. Ist das nicht der Fall, kann angenommen werden,

daß die Zuflüsse in ihrer Menge konstant bleiben und damit beherrschbar sind. Eine weitere Untersuchung des gesamten Problems kann dann unterbleiben. Wird dagegen eine aktive Auslaugung auf den Zuflußwegen festgestellt, können Maßnahmen zur Reparatur des Schachtes bzw. zur Abdichtung von Zuflußstellen innerhalb des Grubengebäudes eingeleitet werden. Bei erfolgreicher Abdichtung oder Verminderung der Zuflüsse und Vermeidung weiterer Auflösungserscheinungen kann der Programmablauf ebenfalls gestoppt werden. Führen die erwähnten Maßnahmen nicht zu dem gewünschten Ergebnis, kommt es früher oder später zum Ersaufen der Grube. Größte Bedeutung ist bei dieser Betrachtung der künftigen Entwicklung der Zuflüsse beizumessen, da dies bezüglich Fehlurteile schwerwiegende Folgen mit sich bringen können. Den Abschluß dieses Komplexes bildet eine Speicherung der Zuflußparameter mit ihren zeitlichen Veränderungen.

Die beim Ersaufen der Grube ablaufenden Vorgänge werden in Anlage 5, Blatt 3, wiedergegeben. Nachdem zunächst untersucht wurde, ob bestimmte Feldesteile gegen Zuflüsse abgeriegelt werden können, läßt sich der Algorithmus für den Ablauf des Ersaufens der einzelnen Grubenteile angeben, indem die Reihenfolge der Füllung der Hohlräume sowie der durchflossenen Strecken und Kammern festgelegt wird.

Danach wird die Berechnung des Lösungsvorganges in den einzelnen Teilsystemen vorgenommen. Dabei können zwei Etappen unterschieden werden, die jeweils eine Nebenlinie des Programmablaufplanes bilden:

- Lösungsprozeß in den während des Ersaufens durchströmten Teilen des Grubengebäudes. Hier sind folgende Einflußfaktoren von Bedeutung: Strömungsgeschwindigkeit, anstehende Gesteinsschichten und Stoffübergangszahl. Letztere ist wiederum von mehreren Faktoren abhängig (Abschnitt 6). Aus der berechneten Konzentrationsänderung der Salzlösung beim Durchfließen eines be-

traachteten Teilabschnittes läßt sich auf die Veränderungen am Grubengebäude schließen. Haben diese auch Veränderungen in den Zuflußverhältnissen zur Folge, muß dies bei der weiteren Berechnung berücksichtigt werden. Kommt die Salzlösung auch mit eingelagertem radioaktiven Material in Berührung, ist außerdem die Größe der Kontamination der aus solchen Räumen abfließenden Lösung zu berechnen.

- Lösungsprozeß in einem "Sammelbecken". Die das Grubengebäude durchströmenden Lösungen fließen zunächst einem größeren Hohlraum zu und lösen dort bis zu ihrer Endkonzentration weiteres Salz der anstehenden Schichten. Hier gilt es wieder, die veränderten gebirgsmechanischen Verhältnisse und die eventuelle Aufnahme von Radionukliden zu berücksichtigen.

Nachdem in diesem Zusammenhang alle Teilsysteme betrachtet wurden, müssen die Strömungsverhältnisse in der ersoffenen Grube geklärt werden, da vorausgesetzt werden muß, daß laufend Salzlösungen mit unterschiedlicher Konzentration an Salzen und Radionukliden zu- und abfließen. Von Bedeutung ist hier die Anzahl der Zufluß- und Abflußstellen im Grubengebäude. Ist nur eine Zuflußstelle vorhanden, die nach dem Ersaufen die einzige Verbindung zu den grundwasserführenden Schichten darstellt, beschränken sich aufgrund des fehlenden Druckunterschiedes ($\Delta P = 0$) die Strömungsvorgänge zunächst nur auf den Dichteaussgleich in der Lösung. Nachdem eine vollständig gesättigte Lösung ansteht, kann ein Nuklidtransport nur durch Diffusion aufrecht gehalten werden. Bei zwei hydrologischen Schadstellen im Grubengebäude sind jedoch schon Strömungsvorgänge möglich, wenn $\Delta P \neq 0$ ist. Deshalb ist zu prüfen, ob sich durch gebirgsmechanische Vorgänge weitere derartige Zufluß- bzw. Abflußstellen herausbilden können. Besteht zwischen diesen und der Biosphäre keinerlei Verbindung, können die Untersuchungen abgebrochen werden. Anderenfalls werden in einem Unterprogramm die Strömungsverhältnisse in der Grube berechnet, nachdem das

entsprechende Berechnungsverfahren ausgewählt wurde. Als Ausgangsgrößen müssen das Druckgefälle, der Durchflußkoeffizient, die Reichweite, die technologische Variante bei der Einlagerung der radioaktiven Abfälle und die geometrischen Verhältnisse im Grubengebäude bekannt sein. Als Ergebnis der Rechnung liegen die Gesamtdurchflußmenge und ihre Verteilung über die gesamte Grube vor. Da weitere Auflösungserscheinungen nicht zu vermeiden sind, muß abschließend geprüft werden, ob eine Veränderung der zugrunde gelegten Verhältnisse zu erwarten ist. Die Parameter der betrachteten Teilströme werden wieder gespeichert.

In Anlage 5, Blatt 5, werden einige Gesichtspunkte dargelegt, die bei der Berechnung der in Lösung gehenden Radionuklide zu berücksichtigen sind. Besteht die Möglichkeit, die Einlagerungsräume vor Lösungszuflüssen abzuriegeln, können die Untersuchungen abgebrochen werden. Anderenfalls wird auf der Grundlage der geometrischen Lage der Einlagerungsräume im Strömungsfeld und anhand der Parameter der mit den radioaktiven Abfällen in Berührung kommenden Salzlösung die Berechnung des Auslaugungsprozesses in einem Unterprogramm vorgenommen. Dabei werden die drei Fälle des Übertritts von Nukliden in die Lösung bei aufgezwungener Strömung, bei teilweiser Diffusion und bei reiner Diffusion unterschieden. Berücksichtigung findet eine eventuelle Änderung im Aufnahmevermögen der Lösung. Eine Berechnung der in der aus dem Grubengebäude abfließenden Salzlösung konzentrierten Radionuklide schließt diesen Komplex ab.

In Anlage 5, Blatt 6, sind kurz die Zusammenhänge beim Übertritt kontaminierter Salzlösung vom Grubengebäude in Schichten des Deckgebirges und in die Biosphäre skizziert. Um die Änderung der Konzentration der Radionuklide in den Lösungen beim Durchfließen der Bodenschichten im Deckgebirge ermitteln zu können, müssen die entsprechenden Parameter der Bodenschichten und die Strömungsverhältnisse in

diesen Schichten bekannt sein (Bodenart, Durchflußmenge, Durchflußgeschwindigkeit, durchströmter Querschnitt und durchströmte Länge, Absorptionseigenschaften der Böden), und zwar durch Berechnung in Unterprogrammen. Die Bedingungen für den Übertritt kontaminierter Lösungen oder Wasser in die Biosphäre sollen in einem besonderen Unterprogramm untersucht werden. Die ermittelten Parameter hinsichtlich der Kontamination und der Strömungsverhältnisse werden gespeichert. In einem weiteren Unterprogramm sollen die Strömungsverhältnisse in den grundwasserführenden Schichten der Biosphäre berechnet werden. Eine Konzentrationsänderung der Radionuklide in den übertretenden Lösungen und Wässern ist wieder von den Eigenschaften der Bodenschichten und den Strömungsverhältnissen abhängig (Unterprogramm). Zur Beurteilung der von dem kontaminierten Grundwasser ausgehenden Gefahren für die Umwelt sind außerdem der Entnahmekort und die Nutzungsart des Grundwassers von Bedeutung. Nachdem ein Vergleich aller Varianten durchgeführt ist und die entsprechenden Parameter fixiert worden sind, kann das Ausmaß aller möglichen Katastrophen eingeschätzt und somit der maximal mögliche Katastrophenfall herausgestellt werden.

Liegen die Konzentrationswerte für Radionuklide bei allen untersuchten Varianten des Ersaufens der Grube unter den gesetzlich zulässigen, kann nicht von einem Katastrophenfall gesprochen werden.

5.2. Einige Bemerkungen zu notwendig werdenden Untersuchungen hinsichtlich der in dem Modell dargelegten Probleme

Die Untersuchungen zu den in der Anlage 5, Blatt 1, dargelegten Problemen sind zweckmäßigerweise schon objektgebunden für die als zukünftiges Endlager vorgesehene Grube durchzuführen. Die Schwerpunkte derartiger Arbeiten wurden bereits im Abschnitt 4. herausgestellt. Es handelt sich dabei vorwiegend um die Beurteilung der hydrologischen Verhältnisse sowie der Standsicherheit der Schächte und

des Grubengebäudes unter berg- und sicherheitstechnischen Aspekten. In Bearbeitung befinden sich z.Z. ein entsprechendes gebirgsmechanisches, hydrologisches und seismologisches sowie ein Schachtgutachten über die beiden Schachtnalagen Bartensleben und Marie. Das schließt jedoch nicht aus, daß in einigen speziellen Fällen weitere Betrachtungen angestellt werden müssen. Ein diesbezüglicher Entscheid wird aber erst nach dem Vorliegen der Ergebnisse der Gutachten möglich sein. Die Notwendigkeit dafür kann sich unter Umständen auch erst im Laufe späterer Untersuchungen herausstellen. Ähnlich verhält es sich bei den in Anlage 5, Blatt 2, dargestellten Zusammenhängen. In dem Schachtgutachten sollen die Auswirkungen von Zuflüssen über die Schachtröhre sowie die betreffs einer Schachtreparatur notwendigen Maßnahmen beurteilt und deren Wirkung eingeschätzt werden. Die Auswirkungen von Zuflüssen im Grubengebäude sind Gegenstand des hydrologischen Gutachtens. Darauf aufbauend sind dann die Möglichkeiten der Abriegelung der Zuflüsse zu prüfen. Außerdem ist zu prüfen, ob sowohl die Zuflüsse über die Schachtröhre als auch die sonstigen Zuflüsse durch geeignete Maßnahmen beherrscht werden können. Abschließend kann dann die Wahrscheinlichkeit des Ersaufens der gesamten Grube bzw. von einzelnen Feldesteilen beurteilt werden.

Auf dieser Grundlage muß für die einzelnen Möglichkeiten des Ersaufens der Algorithmus des Füllvorganges in den Grubenräumen ermittelt werden, um die sich als Folge von Auflösungserscheinungen ergebenden Veränderungen am Grubengebäude erfassen zu können. Der Prozeß der Auflösung von Salzen in Wasser kann als geklärt angesehen werden. Derzeitig wird geprüft, ob einschlägige Untersuchungsergebnisse vorliegen, mit deren Hilfe die Ablösungsbeträge in den durchströmten Strecken und in den Teilen des Grubengebäudes berechnet werden können, in denen sich die Salzlösung sammelt. Im Abschnitt 6. wird auf dieses Problem näher eingegangen.

Daran anschließend müssen die Auswirkungen der Veränderungen auf die Standfestigkeit der Grubenräume eingeschätzt werden. Unter Umständen ist ein "gelenktes" Ersaufen der Grube in Erwägung zu ziehen. Eine Klärung der dafür notwendigen Voraussetzungen muß dann ebenfalls herbeigeführt werden.

Nachdem die Anzahl und die geometrische Lage der möglichen Zufluß- und Abflußstellen bekannt ist, sollten für jeden speziellen Fall die jeweiligen Strömungsverhältnisse in der ersoffenen Grube ermittelt werden. Entsprechende Berechnungsgrundlagen liegen derzeit nicht vor. Das betrifft sowohl das anzuwendende Berechnungsverfahren als auch die zu berücksichtigenden Randbedingungen. Hinsichtlich der Verteilung der Gesamtdurchflußmenge über das Grubengelände liegen ebenfalls keine Untersuchungen vor. Zur Beurteilung der sich fortsetzenden Auflösungserscheinungen in den Strecken und Lagerräumen - hier ergeben sich ähnliche Probleme wie beim Ersaufen der Grube - sind die Ergebnisse der Berechnung der Strömungsverhältnisse als bekannt vorauszusetzen. Die Klärung der Bedingungen, unter denen kontaminierte Salzlösungen aus dem Grubengebäude abfließen, wäre Aufgabe eines weiteren hydrologischen Gutachtens.

Bereits beim Ersaufen der Grube und besonders im ersoffenen Stadium können Salzlösungen mit den eingelagerten radioaktiven Abfällen in Berührung kommen. Deshalb werden Untersuchungen zu dem Problem des Übertritts der Radionuklide in Salzlösungen erforderlich, wobei mehrere Einflußfaktoren, wie Art der Abfälle, Verpackungsart und Einlagerungstechnologie, zu berücksichtigen sind. In diesem Zusammenhang sind außerdem die Auswirkungen verschiedener Strömungsparameter auf die Kontamination der abfließenden Lösungen zu klären.

Weitere Untersuchungen werden notwendig zu Fragen der Absorption ^{der} Radionuklide bei der Bewegung kontaminierter Lösungen durch grundwasserführende Schichten des Deckgebirges und der Biosphäre. Von wesentlichem Einfluß dürften

hier die Bodenart, die Durchflußmenge, die Durchflußgeschwindigkeit, der Durchflußquerschnitt und die durchflossene Länge sein. Spezielle Betrachtungen hinsichtlich der hydrologischen Verhältnisse, die Aussagen über den Grundwasserstrom in diesen Schichten und über die Voraussetzungen für das Eindringen kontaminierter Wasser in die Biosphäre einschließen, bilden zusätzliche Schwerpunkte. Hier lassen sich unter Umständen Berechnungsgrundlagen aus der Wasserwirtschaft bzw. solcher, die für die Entwässerung bei Tagebauen gültig sind, anwenden.

6. Grundlagen zur Berechnung der Auflösungserscheinungen bei Wasser- und Salzlösungszuflüssen in einen Salzbergwerk

6.1. Klassifizierung der Strömungsverhältnisse in den Grubenräumen

In der Literatur [40, 41] werden grundsätzlich zwei Arten der Auflösung von Salzen in Wasser oder Salzlösung unterschieden:

- Auflösung bei erzwungener Strömung,
- Auflösung bei freier Lösung (Konvektion).

Die beim Ersaufen eines Salzbergwerkes auftretenden Strömungen lassen sich aufgrund der geometrischen Anordnung der Grubenbaue nicht immer eindeutig einer dieser beiden Strömungsarten zuordnen. In der größten Anzahl der Fälle wird es sich vielmehr um Lösungsvorgänge handeln, bei denen sowohl Merkmale der erzwungenen als auch der freien Strömung auftreten.

Wasser- und Salzlösungszuflüsse sind im Kali- und Steinsalzbergbau in der Regel im Bereich höher gelegener Sohlen zu verzeichnen. Ihr Weg vom Ort des Eintritts in das Grubengebäude bis zur endgültigen Sammelstelle, zunächst auf tiefsten Niveau der Grube, führt über mehr oder weniger horizontale Grubenbaue (Strecken und Abbaukammern) sowie über steile oder seigere Grubenbaue (Schächte, Ubornauen, Rolllöcher). Dabei ändern die Lösungen durch Auflösung der anstehenden Salzgesteinsschichten ständig ihre Konzentration an Salzen und zwar in Abhängigkeit von mehreren Faktoren (Durchflußvolumen, Temperatur des Lösungsmittels, Lösungsfläche am Gestein, Anfangskonzentration der Lösung, Strömungsgeschwindigkeit).

Zur Berechnung der Auflösungserscheinungen durch Wasser oder Salzlösungen in den durchströmten Grubenbauen muß die Strömungsgeschwindigkeit und das Niveau des Flüssigkeitsspiegels über der Sohle der Strecken oder Abbaue bekannt sein.

Die Geschwindigkeit w einer turbulenten Strömung in Kanälen kann nach Brahms-Chézy [42]

$$w = k \sqrt{R I} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

berechnet werden.

Der Strömungsbeiwert k kann nach Kutter [42] überschläglich

$$k = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,0055}{I}}{1 + \frac{(23 + \frac{0,0055}{I}) n}{\sqrt{R}}} \quad (2)$$

ermittelt werden.

Der äquivalente hydraulische Radius bei Kanälen ist

$$R = \frac{F}{U}$$

F - durchströmter Querschnitt in m^2

U - benetzter Umfang in m

Bei Kanälen mit senkrechten Wänden ergibt sich F als Produkt der Kanalbreite a und der Höhe des Flüssigkeitsspiegels über der Kanalsohle b . Der benetzte Umfang ist $U = 2b + a$.

I - Gefälle des Flüssigkeitsspiegels

Der Rauigkeitsbeiwert n beträgt für Wandungen aus rohen Bruchsteinen 0,020 und für "ganz unregelmäßige" Wandungen 0,040 [42].

Da angenommen werden kann, daß sich die Strömungsverhältnisse in den untertägigen Grubenräumen und in Kanälen gleichen, bilden die Beziehungen (1) und (2) die Grundlage für die Berechnung der Strömungsparameter beim Ersaufen von Gruben.

Der Rechnungsausgang wird allerdings dadurch erschwert, daß zunächst das sich einstellende Niveau des Flüssigkeitsspiegels unbekannt ist. Es muß deshalb zu Beginn ein Schätzwert zugrunde gelegt und nach Beziehung (1) ein erster Näherungswert für w ermittelt werden.

Dann wird die sich aufgrund der Zuflußmenge

$$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$$

ergebende Strömungsgeschwindigkeit

$$w = \frac{Q}{F} \text{ [m/s]} \quad (3)$$

mit dem Näherungswert verglichen. Ist keine Übereinstimmung vorhanden, muß für einen neu zu wählendes α der Rechengang wiederholt und so die Lösung durch Iteration gefunden werden.

Damit ist die Strömungsgeschwindigkeit in den direkt durchflossenen Strecken und Abbaukammern hauptsächlich abhängig von dem Gefälle des Flüssigkeitsspiegels, dem hydraulischen Radius sowie der Rauigkeit der Sohle und den seitlichen Begrenzungsflächen. Als Strömungsarten sind in diesen Grubenbauen laminare und turbulente Strömung sowie alle Übergangsstadien zwischen beiden möglich. Die Salzauflösung in unmittelbar angrenzenden Hohlräumen, die mit den durchströmten Strecken oder Abbauen in Verbindung stehen, dürfte im wesentlichen durch Diffusionsvorgänge gekennzeichnet sein. Für die Berechnung der Verhältnisse in steilen Grubenbauen kann turbulente Strömung zugrunde gelegt werden. In Abbaukammern, denen Salzlösungen zufließen, wird die Lösung von Salzen unter konvektionen Bedingungen ablaufen.

6.2. Die Auflösung von Salzen in Wasser oder Salzlösung

Für die Zusammenhänge bei der Auflösung von Natriumchlorid in Wasser gilt folgende Beziehung [40, 41]:

$$dm = -B F (C_s - C) dt \text{ [g]} \quad (4)$$

dm - gelöste Masse [g]

F - Oberfläche des zu lösenden Stoffes [cm²]

C_s - Sättigungskonzentration des zu lösenden Stoffes

[g/cm³]

C - Konzentration der Lösung zum Zeitpunkt t [g/cm³]

dt - Zeitdauer $[s]$

B - Stoffübergangszahl $[cm/s]$, auch mit σ bezeichnet

$B = \frac{D}{\delta}$, wobei D - Diffusionskonstante $[cm^2/s]$

δ - Dicke der Diffusionsschicht $[m]$

Nach Integration und Bestimmung der Integrationskonstanten erhält man eine Beziehung für den Verlauf der Konzentration der Lösung in Abhängigkeit von der Zeit.

$$C = C_s - (C_s - C_0) \exp\left(\frac{B \cdot F}{V} t\right) \quad [g/cm^3] \quad (5)$$

C_0 - Konzentration der Lösung zu Beginn des Auflösungsprozesses $[g/cm^3]$

V - Volumen des Lösungsmittels $[cm^3]$

Für Salzkörper, die nur an einer ebenen Fläche gelöst werden, wie das in durchflossenen Strecken unter gewissen Einschränkungen der Fall ist, kann man zu einer vereinfachten Beziehung gelangen $[41]$.

Da

$$dm = dh \cdot F \cdot \gamma \quad [g] \quad (6)$$

dh - Zunahme der Losetiefe senkrecht zur Lösefläche $[cm]$

γ - Dichte des Salzes $[g/cm^3]$

gilt, ergibt sich beim Einsetzen von (6) in (4)

$$dh \cdot \gamma = -B (C_s - C) \cdot dt \quad [g \cdot cm^3] \quad (7)$$

Integriert lautet die Beziehung:

$$h \gamma = -B (C_s - C) t \quad [g/cm^3] \quad (8)$$

Es kann angenommen werden, daß Beziehung (8) auch für andere Salzarten Gültigkeit besitzt. Damit läßt sich bei konstanten und bekannten Werten für die Konzentration der Lösung und für die Stoffübergangszahl die Ablösungstiefe an Salzkörpern berechnen. Die Schwierigkeiten liegen in der Bestimmung der Stoffübergangszahl B , da diese eine Funktion der Temperatur, der Strömungsgeschwindigkeit und der Nebenbestandteile ist. Für die Verhältnisse beim Ersaufen von Gruben kann unge-

nommen werden, daß sich bei konstanter Zuflußmenge die Temperatur generell und die Strömungsgeschwindigkeit in einem begrenzten Teilabschnitt nur in geringen Grenzen ändern. Eine Beeinflussung der Stoffübergangszahl durch Nebenbestandteile ist bereits ab 20 g / dm^3 meßbar [40]. Im Folgenden bleibt jedoch diese Tatsache unberücksichtigt, da diesbezüglich kaum Untersuchungsergebnisse vorliegen. Wie die Ergebnisse von Modellversuchen zur Ermittlung des Löseverhaltens von Salzpfeilern zeigen [41], ist je nach Art des Salzgesteins mit wesentlichen Veränderungen in der Größe der Lösungsfläche zu rechnen. Dieser Einfluß wurde in Beziehung (8) durch Bezug auf eine Einheitsfläche eliminiert.

6.2.1. Auflösung unter erzwungener Strömung

Zur Beurteilung der Vorgänge beim Ersaufen von Salzbergwerken müssen besonders die Abhängigkeiten zwischen der Stoffübergangszahl und der Strömungsgeschwindigkeit bekannt sein. Zu diesem Zweck wurden Modellversuche durchgeführt [41], bei denen die Stoffübergangszahl durch Bestimmung des Ablösebetrages pro Zeiteinheit bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten auf der Basis der umgestellten Beziehung (8) ermittelt wurde.

$$B = \frac{h_t}{(C_s - C)} t \quad [\text{cm/s}] \quad (9)$$

Die Versuche wurden mit Wasser bei Strömungsgeschwindigkeiten von 0 bis $2,5 \text{ cm/s}$ durchgeführt. Die in der Literatur auch für diesen Bereich geringer Strömungsgeschwindigkeiten angegebene starke Abhängigkeit der Stoffübergangszahl von der Strömungsgeschwindigkeit konnte dabei nicht nachgewiesen werden. Es muß daher angenommen werden, daß die starke Aufrauhung an den Lösflächen, die sich im Verlauf der Versuche einstellte, das Strömungsfeld wesentlich beeinflusste. Zur Eliminierung dieses Effektes wurden deshalb kurzzeitige Löseversuche mit oberflächenpolierten Salzplatten durchgeführt, wobei

die Strömungsgeschwindigkeiten in den Grenzen zwischen 0 und 10 cm/s variiert wurden. Obwohl der Einfluß der Aufrauhung im Korngrenzenbereich blieb, ergaben sich noch geringere Absolutbeträge für den Stoffübergang als bei den Modellversuchen und lediglich eine geringfügige Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit. Offensichtlich herrscht somit an den Löseflächen trotz der hohen, im Bereich der turbulenten Strömung liegenden Reynoldszahlen eine laminare Strömung vor, die durch die hohe Viskosität der Lösung im Grenzschichtbereich unterstützt wird. Der Stoffübergang in einer laminaren Strömung hängt nur im geringen Maße von der Strömungsgeschwindigkeit ab [41].

Die für die verschiedenen Salzarten ermittelten Abhängigkeiten lassen sich durch die empirisch gefundene allgemeine Beziehung

$$10^4 B = a_1 + b_1 w \quad [\text{cm/s}] \quad (10)$$

ausdrücken, wobei w die Strömungsgeschwindigkeit in cm/s darstellt.

Es wird vermutet, daß bei der Auflösung natürlicher Salzgesteine die Einflußfaktoren Strömungsgeschwindigkeit und Aufrauhung gegeneinanderwirken, indem sich selbst bei einem turbulenten Strömungskern eine laminare Grenzschicht ausbildet. Der erhöhte Stoffübergang läßt sich demzufolge nur durch eine Vergrößerung der Lösefläche erklären.

Deshalb wird der Begriff der Aufrauhung A definiert, der aufgrund der durchgeführten Versuche durch die Beziehung

$$A = a_2 \cdot t^{b_2} \quad (11)$$

ausgedrückt werden kann. t ist die Lösedauer in Stunden. Damit ergibt sich die Lösetiefe am Salzgestein zu

$$h_t = \frac{(B+A)(C_s - C) \cdot t}{\gamma} \quad [\text{cm}] \quad (12)$$

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, daß nicht eindeutig nachgewiesen ist, ob allein die Vergrößerung der Lösefläche diesen Effekt bedingte.

Bei den Versuchen konnte die wahre Größe dieser Fläche aufgrund der Vielfältigkeit der Aufrauhungen nicht erfaßt werden. Es wäre daher auch denkbar, daß durch die Aufrauhung in stärkerem Maße Turbulenzerscheinungen hervorgerufen werden. Des weiteren wurde in der Beziehung (11) nicht berücksichtigt, daß, wenn auch nur in geringem Umfang, eine Abhängigkeit des Stoffüberganges von der Strömungsgeschwindigkeit besteht und somit auch die Aufrauhung strömungsabhängig ist.

Bei den durchgeführten Modellversuchen [41] bildete sich im Verlauf der Auflösung der Probekörper an deren unteren Teil eine Böschung heraus mit einem vom Probenrand (Stoß) zur Probennitte immer stärker werdenden Salzfuß sowie einer von oben nach unten an Mächtigkeit zunehmenden Rückstandsschicht. Sowohl der Salzfuß als auch die Rückstandsschicht haben einen für jedes Salz spezifischen Böschungswinkel. Während sich die Lösefläche F_L am freien Lösestoß bei genügend breiten Pfeilern oder nach Erreichen der Pfeilermite bis auf Null verringerte, vergrößerte sich die Lösefläche F_B der Böschung. Der Stoffübergang am Böschungsfuß ist infolge des abgelagerten Rückstandes und durch die Abschirmung der nach unten abfließenden annähernd gesättigten Lösung weit geringer als an der freien Lösefläche. Die Auflösung wird hier im wesentlichen nur durch Diffusion aufrecht erhalten und ist in erster Linie abhängig von der Mächtigkeit der Rückstandsschicht und von der Salzart.

Insgesamt wurden Modellversuche mit Probekörpern bestehend aus folgenden Salzgesteinen durchgeführt:

- Jüngeres Steinsalz
- Älteres Steinsalz
- Carnallitit, ungeschichtet
- Carnallitit, geschichtet
- Trümmern carnallitit
- Hartsalz

In Tabelle 4 sind die für die Salzarten ermittelten Faktoren a_1 , a_2 , b_1 und b_2 der Beziehungen (10) und (11) sowie die Böschungswinkel α_s des Salzfußes und der Rückstandsschicht α_r zusammengestellt.

Tabelle 4: Parameter des Stoffüberganges und Böschungswinkel bei der Auflösung von Modellpfeilern aus Salzgestein

Salzgestein	a_1	b_1	a_2	b_2	α_s [°]	α_r [°]
Jüngeres Steinsalz	9,35	0,17	6,48	0,0895	25,0	23,6
Alteres Steinsalz	10,36	0,23	5,65	0,2217	31,6	28,2
ungeschichteter Carnallit	20,45	0,16	22,07	0,0173	34,3	30,1
geschichteter Carnallit	13,56	0,52				
-der Grube Teutschenthal 1.)			15,71	0,0909	33,4	23,2
-der Grube Staßfurt 1.)			16,14	0,0313		
-der Grube Teutschenthal 2.)			11,75	0,360	33,0	24,7
Trümmer-Carnallit			13,52	0,157	33,7	23,4
Hartsalz	8,22	0,23	8,78	0,117	34,8	25,0

1.) kieserithaltig

2.) mit überwiegenden Steinsalzanteil

Der Stoffübergang an mit Rückstand bedeckten Pfeilerrest läßt sich nach

$$B_B = \frac{D \cdot C_s}{\delta_s - \delta} \cdot \frac{1}{m} \quad \text{[cm/s]} \quad (13)$$

ermitteln, wobei m die Rückstandsmächtigkeit darstellt.

Von Einfluß sind außerdem das Korngefüge des Rückstandes sowie dessen zeitliche Veränderung, so daß der allgemeine Ausdruck lautet:

$$S = \frac{B \cdot Q_s}{Q_s + Q} \cdot m \cdot d \quad [cm/s] \quad (14)$$

Es wurden folgende empirischen Werte ermittelt, wobei der Ausdruck $\frac{B \cdot Q_s}{Q_s + Q}$ als konstant anzusehen ist. Als Lösungsmittel wurde Wasser verwendet.

	Konstante	n
Jüngeres Steinsalz	2,67	1,38
Älteres Steinsalz	1,26	0,54
Harzsalz	2,38	0,92
ungeschichteter Carnallit	4,75	1,06
geschichteter Carnallit Teutobenthal	1,99	0,80
geschichteter Carnallit Staßfurt	1,27	0,89

Für alle untersuchten Salzgesteine schwanken die Werte für $S \cdot 10^4$ zwischen 0,007 und 3,0 cm/s. Die gemessene Rückstandsmächtigkeit betrug maximal 70 mm. Schon ab 50 mm Rückstandsmächtigkeit könnte der Stoffübergang gegenüber der Ablösung an vertikalen Flächen vernachlässigt werden (maximal 0,1 cm/s).

Den durchgeführten Modellversuchen [41] wurde ein mittlerer Zufluß von $5 \text{ m}^3/\text{min}$ bei einem Abbaquerschnitt von $12,5 \times 12 \text{ m}^2$ zugrunde gelegt und vorausgesetzt, daß der gesamte Querschnitt auch als Durchflußquerschnitt genutzt wird. Damit ergibt sich eine Strömungsgeschwindigkeit von $w = 0,05 \text{ cm/s}$, was in diesem Fall einer Reynoldszahl von 8326 entspricht. Zur Einhaltung der Modellmaßstäbe mußte für die Untersuchungen teilweise eine Strömungsgeschwindigkeit von $1,37 \text{ cm/s}$ gewählt werden. Die Strömungsgeschwindigkeit bei den Kurzzeitversuchen betrug maximal 10 cm/s . Somit sind die ermittelten Stoffübergangszahlen auch nur für diese Bereiche gültig.

Beim Ersaufen von Salzbergwerken können jedoch wesentlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten auftreten, da sich im

Gegensatz zu der bei den Modelluntersuchungen getroffenen Annahme der vollständigen Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Abbauquerschnittes als Strömungsquerschnitt praktisch bedeutend kleinere Strömungsquerschnitte einstellen werden. Auf der Grundlage der im Abschnitt 6.1. angegebenen Beziehungen (1) bis (3) errechnet sich z.B. die Strömungsgeschwindigkeit in einer Strecke mit 2 m Sohlenbreite zu ~ 30 cm/s bei einem Niveau des Flüssigkeitsspiegels über der Sohle von 15 cm. Die entsprechenden Werte bei einer Kammerbreite von 12,5 m lauten ~ 15 cm/s und 5 cm. Als Rauigkeitswert wurde $n = 0,020$ angesetzt, der einer Wandung aus rohen Bruchsteinen entspricht. Als Gefälle des Flüssigkeitsspiegels wurden $1^\circ/00$ angenommen.

Damit ergeben sich aber völlig neue Gesichtspunkte für den Ablösungsmechanismus an Salzgesteinsschichten. Einmal kommen dadurch die bei der sogenannten Aufräumung wirkenden Faktoren der ablagerungsbedingten Schichtung, der Wechsellagerung von Salzen unterschiedlicher Lösungsgeschwindigkeit und der Kluftigkeit des Salzgesteins [41] weniger zum Tragen, zum anderen werden die Stöße lediglich in der Art eines Schrammes unterspült. Außerdem würde die Auflösung, nachdem die Böschung mit der Rückstandsschicht den Flüssigkeitsspiegel erreicht hat und somit keine freie Lösungsfläche mehr vorhanden ist nur noch durch Diffusion aufrecht erhalten. Eine Übertragung der bei den Modellversuchen gefundenen Abhängigkeiten auf die Verhältnisse beim Ersaufen von Gruben ist somit nicht ohne weiteres möglich.

6.2.2. Die Auflösung unter konvektiven Bedingungen

Die Ermittlung der Stoffübergangszahl bei der Auflösung von Salzgestein unter konvektiven Bedingungen läßt sich nach der umgestellten Beziehung (5) vornehmen [40]:

$$S = \frac{V}{F \cdot t} \ln \frac{C_s - C_0}{C_s - C} \quad [m/h] \quad (15)$$

Im Ergebnis von Untersuchungen zur untertägigen Gewinnung von Steinsalzsole (Älteres Steinsalz) läßt sich folgende Beziehung aufstellen [40]:

$$B = B_0 \left(\frac{C_s - C}{C_s} \right)^{0,75} \quad [m/h] \quad (15),$$

wobei B_0 die Stoffübergangszahl bei der Konzentration $C = 0$ ist. B_0 für $20^\circ C$ wird mit $0,158 m/h$ ($43,8 \cdot 10^{-4} cm/s$) angegeben.

Abweichende Ergebnisse zeigten Modellversuche an Salzkörpern unter Verwendung von Wasser als Lösungsmittel [41]. Für die Stoffübergangszahl B_0 ergab sich ein Wert von $24,6 \cdot 10^{-4} cm/s$, und der Exponent in Beziehung (15) lautet $0,656$. Zunächst ist damit aber nachgewiesen, daß die Stoffübergangszahl eine von Konzentration abhängige Veränderliche ist. Die Abweichung von den in Solorten erhaltenen Werten läßt sich folgendermaßen erklären:

- In Solorten ergeben sich aufgrund der sich öfters wiederholenden Prozesse und damit längeren Standzeiten größere Lösflächen infolge ungleichförmiger Auflösung an den Stößen.
- In Solorten sind auch hangende Flächen an der Auflösung beteiligt, die einen wesentlich höheren Stoffübergang aufweisen.

Für den einmaligen Prozeß des Ersaufens von Grubenräumen gelten deshalb die aus den Modellversuchen erhaltenen Werte. Der Stoffübergang für mit Lösungsrückstand bedeckte Flächen läßt sich mit Beziehung (14) berechnen.

Für die verschiedenen Salzarten wurden folgende Werte für B_0 und den Exponenten b in Beziehung (15) ermittelt [41] (Tabelle 5):

Tabelle 5: Werte für B_0 und den Exponenten b bei verschiedenen Salzgesteinen

	$10^4 \cdot B_0 [cm/s]$	Exponent b
Steinsalz	24,6	0,656
Carnallitit, ungeschichtet	34,6	2,122
Carnallitit, geschichtet	26,1	1,315

Die Lösetiefe kann in Abhängigkeit von der Zeit nach Beziehung (8) errechnet werden, indem diese umgestellt wird. Die jeweiligen Werte für die Konzentration erhält man aus

$$C = C_s - \frac{(C_0 - C_s) \sqrt{D t}}{b} \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] \quad (17)$$

Diese Beziehung (17) gilt exakt nur für Steinsalz. Bei Carnallit werden nur anfangs alle Bestandteile gelöst. Nach Überschreiten der Sättigungskonzentration von KCl , NaCl und Mg SO_4 löst sich nur der Bestandteil $\text{Mg Cl}_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$, auf den sich die in Tabelle 5 angegebene Stoffübergangszahl bezieht. Es wird somit zunächst eine scheinbare Lösetiefe h_z errechnet, die entsprechend zu korrigieren ist.

$$h = h_z \cdot \frac{\gamma_c}{p} \cdot 100 \quad [\text{cm}] \quad (18)$$

Es bedeuten

$$p = p_0 \cdot f \cdot \gamma_s$$

p_0 - Prozentsatz des Gehaltes an Carnallit im Carnallitgestein [%]

f - Umrechnungsfaktor zwischen Carnallit und $\text{Mg Cl}_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$ (0,7313)

γ_s - Dichte des Carnallitgesteins $[\text{g}/\text{cm}^3]$

γ_c - Dichte des $\text{Mg Cl}_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$ (1,56 g/cm^3)

Durch die Beziehung (18) wird der Effekt erfaßt, daß die nicht gelösten Bestandteile des Carnallits die weitere Auflösung behindern.

Abschließend kann eingeschätzt werden, daß die gefundenen Abhängigkeiten [41] als Grundlagen zur Berechnung der Auflösungserscheinungen in mit Salzlösung gefüllten Hohlräumen gut geeignet sind.

6.2.3. Der Einfluß der Klüftigkeit des Salzgesteins auf den Löseprozeß

Unter konvektion Strömungsbedingungen ergeben sich für Klüfte im Steinsalz die in Tabelle 6 angegebenen Relationen

gegenüber dem Stoffübergang an einer senkrechten Fläche [41],

Tabelle 6: Größe des Stoffüberganges an Klüftflächen
(Steinsalz)

Art der Klüftfläche	$10^4 \cdot B$ [cm/s]	Verhältnis zu B bei senkrechter Lösungsfläche
senkrecht	14,47	1,00
60° geneigt, hangend	21,22	1,47
60° geneigt, liegend	5,79	0,40
15° geneigt, hangend	24,11	1,67
15° geneigt, liegend	0,96	0,07
horizontal, hangend	24,11	1,67
horizontal, liegend	0,43	0,03
druckbelastete Probe	28,94	2,00

Daraus geht hervor, daß bei Klüften stets mit einem erhöhten Stoffübergang zu rechnen ist.

Des weiteren wurden Versuche an Probekörpern bei erzwungener Strömung durchgeführt, und zwar bei Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 30 und 90 cm/s.

Folgende Erscheinungen waren zu beobachten:

- Aufgrund des Einflusses der Turbulenz wird eine Aufrauhung der Oberfläche vermieden.
- Unlösliche Bestandteile werden durch die Strömung abtransportiert, so daß sich keine Böschung ausbilden kann.
- Alle Klüftflächen, auch die liegenden, erweitern sich gleichmäßig.
- Angeströmte Teile des Probekörpers gehen schneller in Lösung.

Für den oben angegebenen Bereich der Strömungsgeschwindigkeit wurden auch Versuche an Probekörpern ohne Klüfte ausgeführt. Die bereits im Abschnitt 6.2.1. erläuterten Faktoren a_1 und b_1 nehmen hier folgende Größe an [41]:

	a_1	b_1
Steinsalz	14,42	1,55
Hartsalz	12,13	1,36

Zur Berechnung der Auflösung von Salzgestein mit zerklüfteten Bereichen wird vorgeschlagen, einen Proportionalitätsfaktor f zu verwenden, der identisch mit der auf einer Einheitsfläche vorhandenen Zahl erkennbarer Klüfte ist (Kluftdichte).

Literatur

[1]

Berggesetz der Deutschen Demokratischen Republik vom 12.5.1969
Gesetzblatt der Deutschen Demokratischen Republik 1969, Teil I, Nr. 5, S. 29

[2]

Erste Durchführungsverordnung zum Berggesetz der Deutschen Demokratischen Republik
Gesetzblatt der DDR 1969, Teil II, Nr. 40, S. 257

[3]

Arbeitsschutz- und Brandschutzanordnung 12o/1 Technische Sicherheit im Bergbau (TSB) - v. 25.1.1963, In der Fassung der Anordnung Nr. 1 zur Änderung der Arbeitsschutz- und Brandschutzanordnung 12o Technische Sicherheit im Bergbau (TSB) - v. 14.7.1967, Gesetzblatt der DDR, Sonderdruck Nr. 555

[4]

Verordnung über den Schutz vor der schädigenden Einwirkung ionisierender Strahlung - Strahlenschutzverordnung -
Gesetzblatt der DDR 1969, Teil II, Nr. 99 S. 627

[5]

Anordnung über die Erteilung der Strahlenschutzgenehmigung für Kernanlagen - Kernanlagen-Genehmigungsanordnung -
Gesetzblatt der DDR 1969, Teil II, Nr. 102, S. 695

[6]

Erste Durchführungsbestimmung zur Strahlenschutzverordnung v. 26.11.1969
Gesetzblatt der DDR 1969, Teil II, Nr. 99, S. 635

[7]

Ginn, W.

Kali- und Steinsalzbergbau, Band I, Aufschluß und Abbau von Kali- und Steinsalzlagerstätten
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1968

[8]

Höfer, K.H.

Eine neue Erklärung über die gebirgsschlag-ähnlichen Erscheinungen auf dem Kaliwerk Klein-Schierstedt
Bergakademie (1958) H 8, S. 419 - 425

[9]

Ginn, W.
Pforr, H.

Gebirgsschläge im Kalibergbau unter Berücksichtigung von Erfahrungen des Kohlen- und Erzbergbaus
Freiberger Forschungshefte, A 173 (1961)

[10] Piort, H.

Untersuchungen zur Gebirgsschlagge-
fährlichkeit von Gesteinen des Kali-
bergbaus
Freiberger Forschungshefte, A 332, 1965

[11]

Studie "Untersuchungen zur Nutzung von
Salzbergwerken zur Endlagerung radio-
aktiver Abfälle"
Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg
DBI - E - 5 - 8

[12] Kühnel, W.

Kalifachkunde
Fachbuchverlag GmbH, Leipzig 1953

[13] Junghans, R.

Lehrbuch der Sicherheitstechnik, Band I,
Grubensicherheit
VEB Deutscher Verlag für Grundstoff-
industrie, Leipzig 1969

[14] Hatzfeld, K.

Handbuch der Grubensicherheit, Teil IV
VEB Deutscher Verlag Technik, Berlin 1955

[15]

Taschenbuch für den Bergmann, Band II,
Allgemeines bergmännisches Fachwissen
VEB Deutscher Verlag für Grundstoff-
industrie, Leipzig 1961

[16] Löffler, J.

Die Kali- und Steinsalzlagerstätten des
Zechsteins in der DDR
Teil III. Sachsen-Anhalt
Freiberger Forschungsheft C 97/III 1962

[17] Voigt, D.O.

Mineralogisch-petrographische Unter-
suchung der Salzabfolge des Zechsteins
III und IV auf dem Grubengelände des
VEB Steinsalzbergwerkes Bartensleben
und der Schachthanlage Marie, Allertal
Diplomarbeit am Mineral. Institut
Jena 1963

[18] Hemmann, M.

Zur Ausbildung und Genese des Leine-
stein-salzes und Hauptanhydrits (Zech-
stein 3) im Ostteil des Subherzynen
Beckens.
Dissertation an der Mathematisch-
Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Bergakademie Freiberg 1963

[19] Krzywicki, E.

Die Geologie des Kali- und Steinsalz-
bergwerkes Bartensleben / Allertal
Unveröff. Gutachten der Staatlichen
Geologischen Kommission, Berlin 1949

[20]

Hydrologisches Gutachten für drei Gruben
des VEB Kaliwerk Staßfurt (Neustaßfurt
VI/VII, Brefeld-Tarthun II und Bartens-
leben)
VEB Hydrogeologie Nordhausen
Objekt-Nr.: 11 218 00 14

[21]

Autorenkollektiv

Grundriß der Geologie der Deutschen Demo-
kratischen Republik, Band I - Geologische
Entwicklung des Gesamtgebietes -
Akademie-Verlag 1968,
454 Seiten mit Anlagenmappe

[22]

Protokoll zur Befahrung der Grube Bartens-
leben am 13. - 14. Jan. 1970
Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg
Jan. 1970

[23, 24]

Vorratsberechnung des VEB Steinsalzberg-
werkes Bartensleben
Stand 1.1.1962

[25]

Niederschrift über die Auswertung der Be-
fahrung der Steinsalzgrube Bartensleben
durch das DBI Freiberg
Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg
3.2.1970

[26]

Studie "Technologische Untersuchung zur
Einlagerung niedrig bis mittelaktiver Ab-
fälle in der Steinsalzgrube Bartensleben"
Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg
Dez. 1970

[27]

Bericht über die Befahrung der Grube
Bartensleben v. 12. bis 22.5.70
Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg
(Manuskript)

[28]

Gebirgsmechanisches Gutachten über die
Standisicherheit der Gruben Neustaßfurt VI/
VII, Brefeld-Tarthun II und Bartensleben
Institut für Grubensicherheit Leipzig
April 1969

[29]

Meßprogramm zur Überwachung der Stand-
festigkeit der Grube Bartensleben
Wirtschaftsvertrag Deutsches Brennstoff-
institut Freiberg - Institut für Bergbau-
sicherheit Leipzig
Vertragsnummer DBI/ Vt 2/4/69

[30]

Aktennotiz über die Besprechung zwischen
dem IfB Leipzig und dem DBI Freiberg am
15.9.1970
Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg
Sept. 1970

[31]

Protokoll der Beratung zu Sicherheitsproblemen der Steinsalzgrube Bärtensleben zwecks evtl. Nachnutzung als zentrales Endlager für radioaktive Abfälle am 21.5.69 im Institut für Grubensicherheit Leipzig Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg 23.7.1969

[32]

Gimm
Reuter
Kockert

Stellungnahme zum Hydrologischen Gutachten für drei Gruben des VEB Kaliwerk Staßfurt vom 29.10.1968 Bergakademie Freiberg, Sektion Geotechnik und Bergbau

[33]

Pflichtenheft zum Wirtschaftsvertrag Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg - VEB Hydrogeologie Nordhausen Vertragsnummer DBI: Vf.3/4/69

[34]

Abschlußbericht der Schachtvinstandsetzungsarbeiten im VEB Steinsalzbergwerk Bärtensleben (vom 17.2.1962 - 2.9.1967) VEB Mansfeldkombinat "Wilhelm Pieck", Betriebsdirektion Schachtbau Nordhausen

[35]

Aktennotiz über die am 28.10.1970 mit Vertretern des VEB Mansfeldkombinat "Wilhelm Pieck", Betriebsdirektion Schachtbau Nordhausen, geführte Aussprache VEB Kernkraftwerk Rheinsberg - Betriebsteil Bärtensleben

[36]

Entwurf des Pflichtenheftes zur Anfertigung eines Gutachtens über die Schächte "Bärtensleben" und "Marie" Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg Juni 1970

[37]

Studie "Einlagerung hochaktiver Abfälle in ein Salzbergwerk" Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg DBI - E - 7 - 17

[38]

Abriß der geologischen Verhältnisse im Grubenfeld Bärtensleben Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg DBI - E - 8 - 18

[39]

Meyers Neues Lexikon

[40]

Brückner, G. Beitrag zu den Grundlagen der untertägigen Gewinnung von Steinsalzsole durch Auflösen an festen Stoß in freier Strömung Freiburger Forschungshefte, A 413, (1967)

[41] Siebler, P.: Untersuchungen über die Auflösung
natürlicher Salze als Beitrag zur
Erfassung der Zerstörung an Pfeilern
beim Ersaufen von Kali- und Steinsalz-
gruben
Dissertation 1970; Bergakademie Freiberg

[42] Hütte III, Bautechnik, S. 1009,
28. Auflage
Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin 1956

Zwischenbericht zur Studie

"Sicherheitstechnische Untersuchungen zur Einlagerung
radioaktiver Abfälle in der Steinsalzgrube Bartensleben"

Teil A: Probleme der Sicherheit bei der Endlagerung
radioaktiver Abfälle in Salzbergwerken

- Anlagen -

Verzeichnis der Anlagen

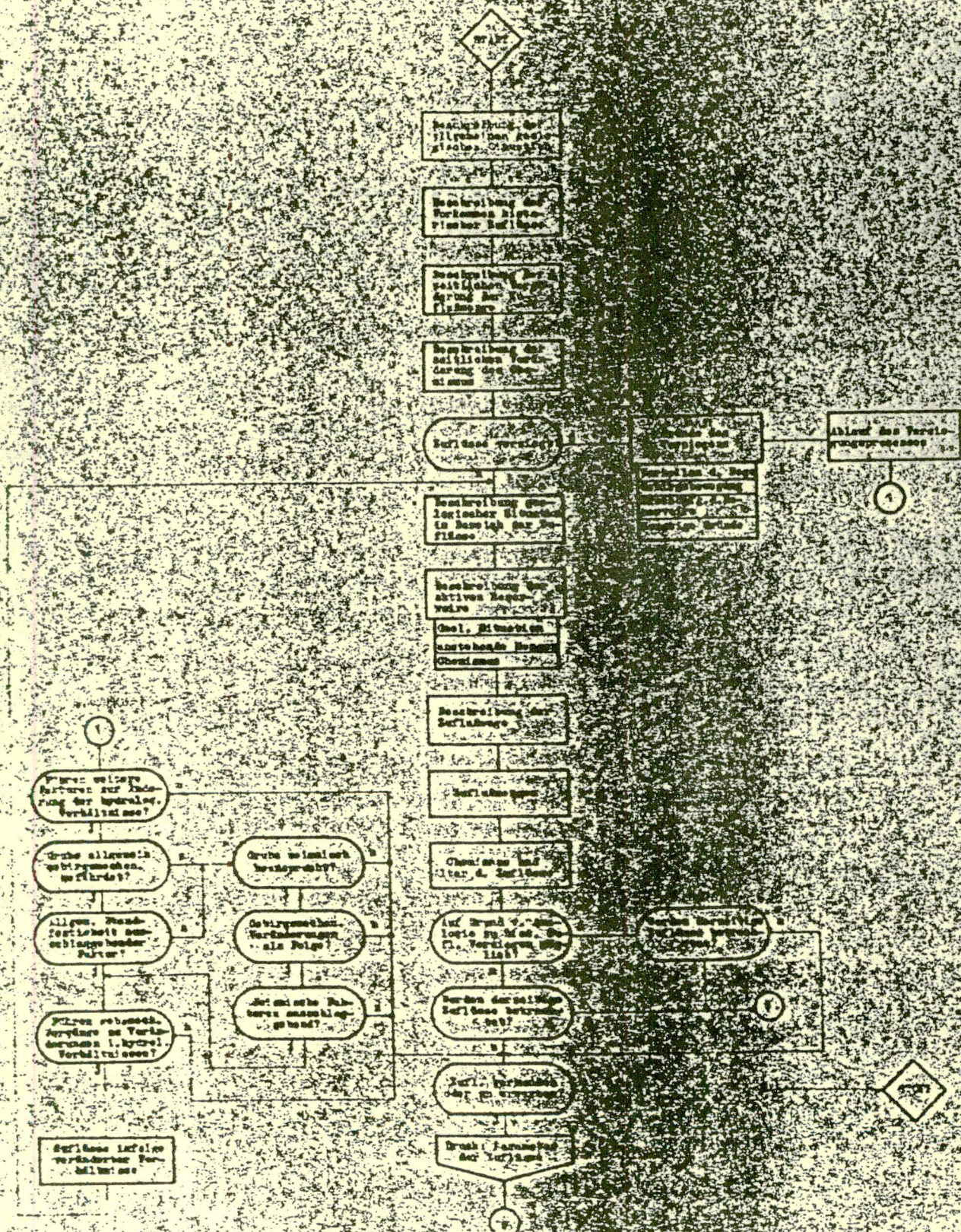
- Anlage 1 Geologischer Schnitt vom Grubenfeld
Bartensleben im Bereich der Ostquerschläge
- Anlage 2 Auffahrungen im Kalisalzflöz "Steißfurt"
- Anlage 3 Salzbergwerk Bartensleben,
Schnitt im Bereich der Hauptquerschläge
- Anlage 4 Verzeichnis der Gasvorkommen im Gruben-
feld Bartensleben
- Anlage 5 Modell zur Beschreibung und Beurteilung
des Ablaufs von Katastrophen in einem
zentralen Endlager für radioaktive Ab-
fälle

(Entwurf)

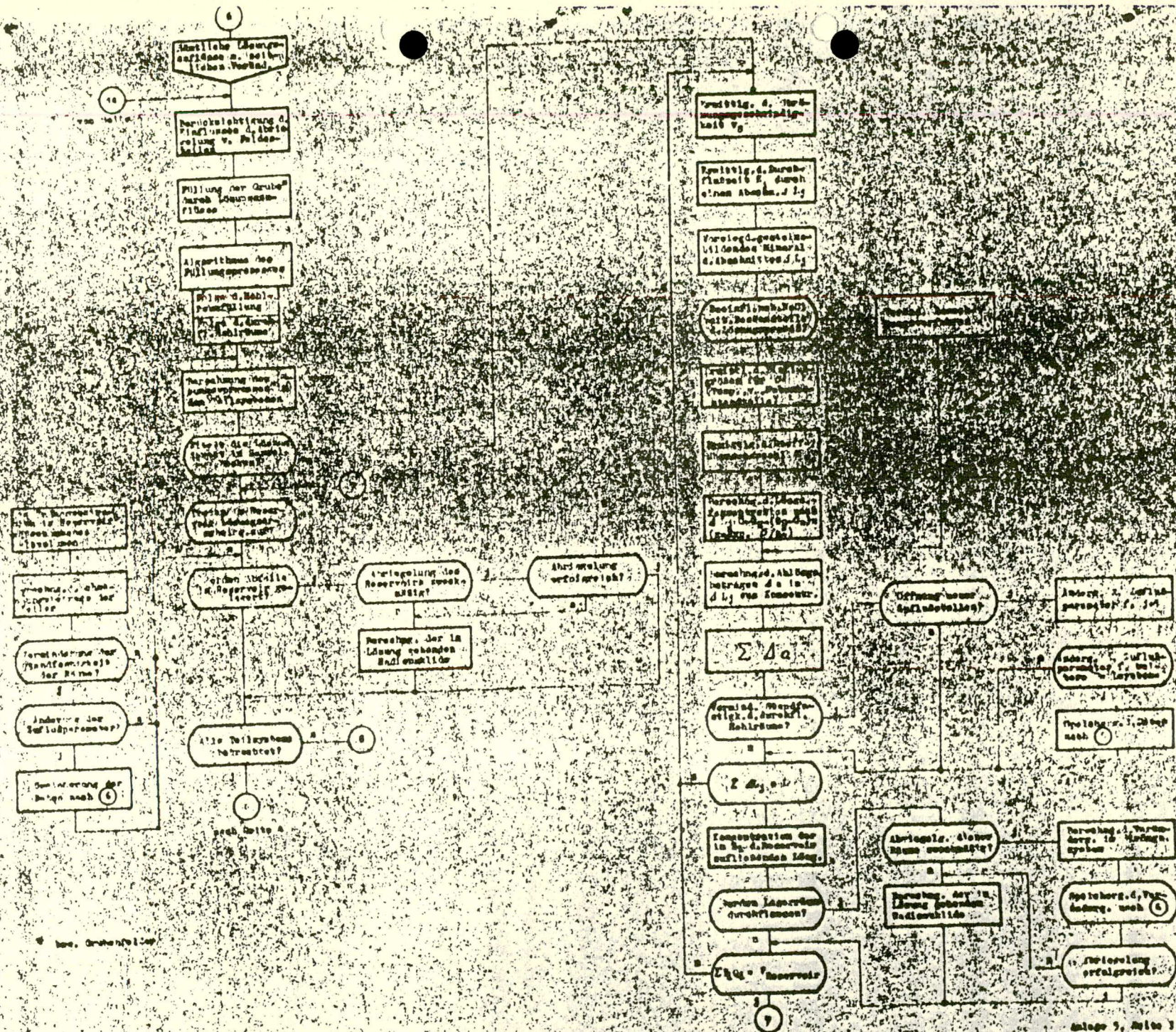
Verzeichnis der Gasvorkommen im Grubenfeld Bartensleben 723, 247

<u>Örtlichkeit</u>	<u>geol.Horizont</u>	<u>Menge</u>	<u>Zusammensetzung</u>
2. Sohle Ostquerschlag (1942)	Anhydrit		
3. Sohle Vorbohrung (1913)	Grenze Steinsalz/ Anhydrit	120 - 150 1/min	65,6% Methan 34,4% Stickstoff
3. Sohle Südostfeld südl. Rolloch 17, UT VI B/60	Hauptanhydrit	Bläser	
4. Sohle Südostfeld, Richtstrecke UT I B 58/59	Hauptanhydrit	Bohrloch steht heute noch unter Gas- druck	12,2% Methan 0,4% Kohlendioxid 13,4% Sauerstoff 74,0% Stickstoff
4. Sohle Südostfeld Richtstrecke UT VII B/60			0,1% Kohlendioxid 21,9% Sauerstoff 70,0% Stickstoff
4. Sohle Südostfeld Richtstrecke Rolloch 19 zur 3.Sohle	Hauptanhydrit	Bläser	
4. Sohle Ostquerschlag (1949)	Anhydrit	anfangs ca. 2-3m min	71,0% Stickstoff 26,1% Methan 2,0% Wasserstoff 0,9% Kohlendioxid
4. Sohle Nordstrecke UT-Bohrung östlich (1953)		anfangs 6m ³ /min (17.7.53) Ende 0,03m ³ /min (8.9.53)	ca. 2% Methan
4. Sohle Nordstrecke UT-Bohrung westlich (1953)			
4. Sohle Ostmulde	Hauptanhydrit	gering	

Modell zur Beschreibung und Beurteilung des Ablaufs von Katastrophen
einem zentralen Endlager für radioaktive Abfälle



2) haw. unter veränderter Bedingung
aktiv wurde: 10. Bourgeois



Druckverteilung
durch Dichtungs-
bis Lötlage-
regulation

Berechnung der in
Längs. gebundenen
Rohrabschnitte

Berechnung d. Längs-
abschnitte an
Rohrabschnitten

Nach Dichtungs-
der Maßstäbe
durch Diffusion

Berechnung d. Rohre
in den Abschnitten des
Deckgebirges

10

nach Seite 4

Durch geb.-meh.
Vorgänge weitere
Lockstellen mög-
lich?

$P = 1.0$

$P = 2.0$

$P > 2.0$

Durch geb.-meh.
Vorgänge weitere
Lockstellen mög-
lich?

$\Delta P = 0.0$

Einfluss von Gruben-
wasser in geolog.
Schichten des
Deckgebirges

Besteht Verbin-
dung zw. den
Schichten u. Ma-
gma?

Durch geb.-meh.
Vorgänge Verbin-
dung möglich?

NEIN

Berechnung der
Verbindungsverhältnisse

Ableitungsweg-
geleitungen an
Grubenabschnitten

Anweisung von Ge-
bäuden

Veränderung der
Strömungsver-
hältnisse?

Bruch: Strömungs-
verhältnisse in ver-
schied. Teilabschn.
oben, 2. Teilabschnitt
Anfangsabschnitt, an
reduziert, Rohre

12

nach Seite 5

$P = 0.0$

$P = 1.0$

$P = 2.0$

Zahl der Verrech-
nungsverfahren

Bestimmung der
Verbindungsverhältnisse

Grubenabschn.
Durchfluss-
koeffizienten
Schichtweite
Mächtigkeit, GWT
(GWT, GWT)
Geolog. Verhältnisse
Geometrie, Ab-
stände, Grube

Berechnung d. Gesamt-
durchflüsse

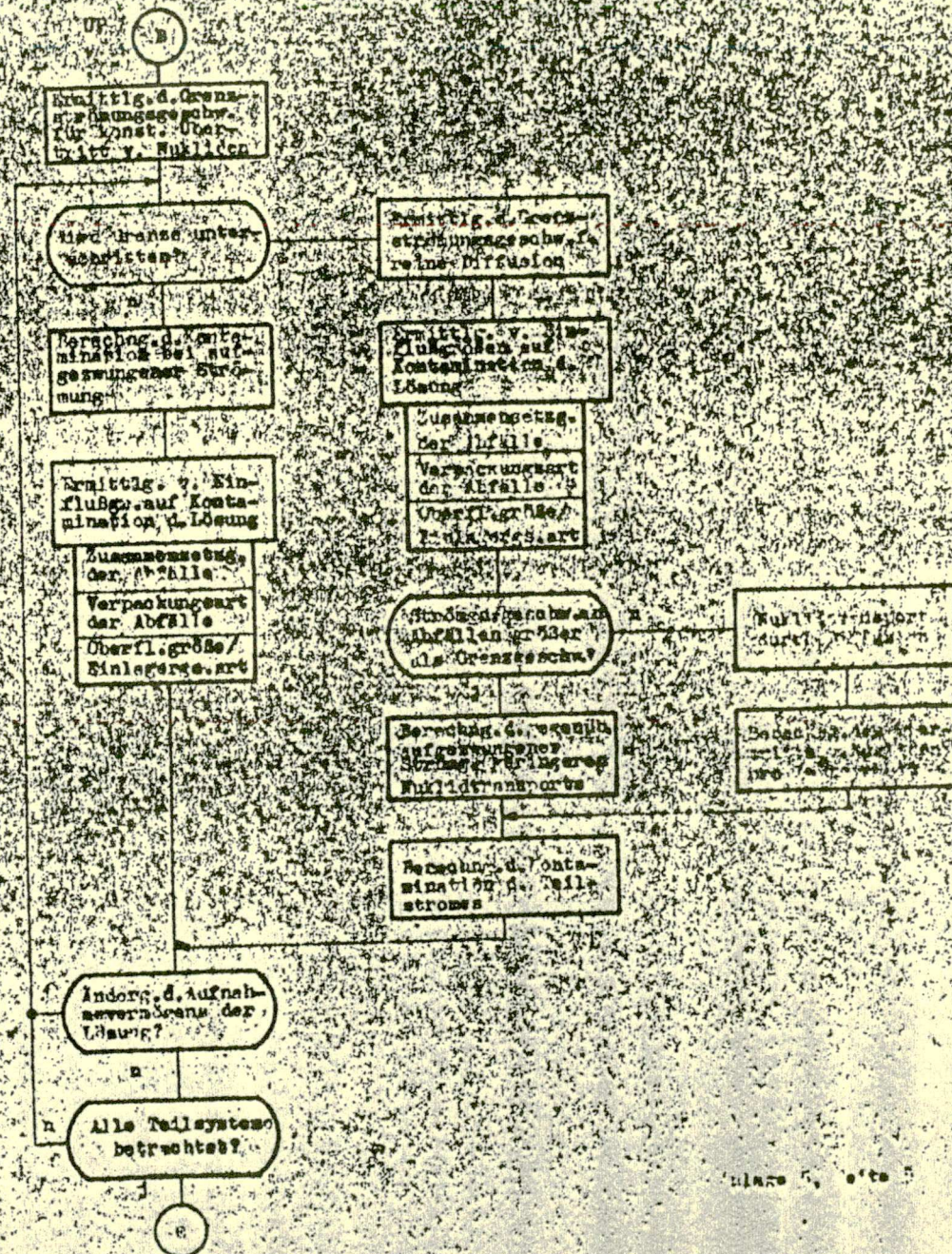
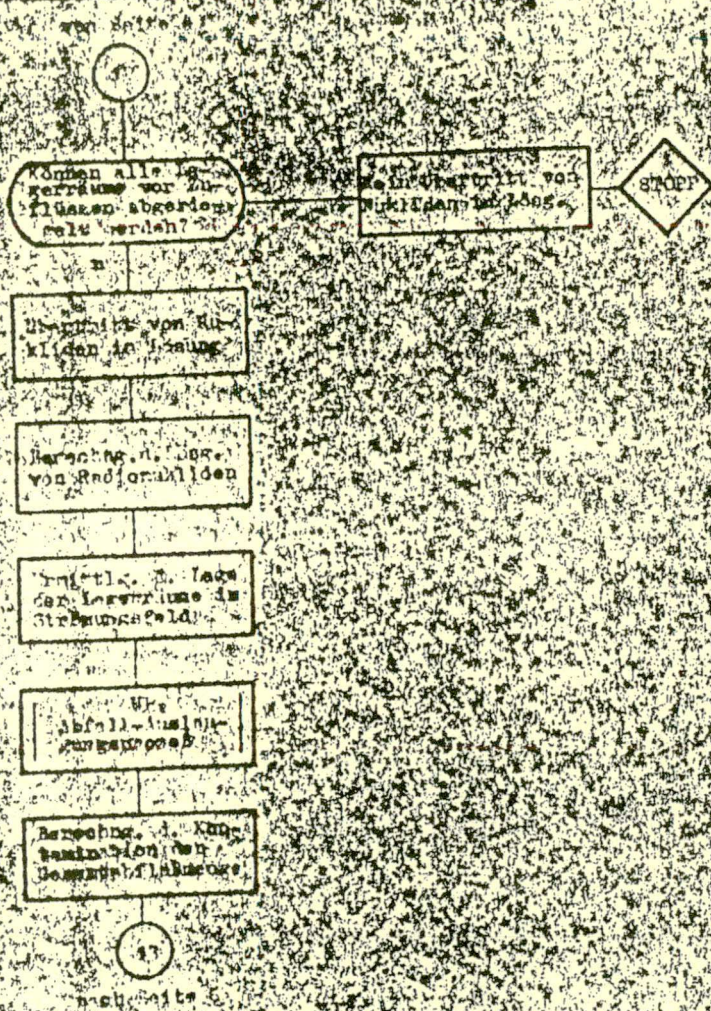
Verteilung d. Durch-
flüsse über den
Grubenquerschnitt

Chemische Zusam-
mensetzung der
Fluide

13

Anlage 3, Seite 4

P = Anzahl der Zufuhr- oder
abfuhrstellen
q = 0 gesperrter Grundwasserleiter (GWT)
q = 1 freier " " "
q = 2 teilw. gesp. " " "



1. Die Aufgabenstellung

2. Die Aufgabenstellung

3. Die Aufgabenstellung

4. Die Aufgabenstellung

5. Die Aufgabenstellung

6. Die Aufgabenstellung

7. Die Aufgabenstellung

8. Die Aufgabenstellung

9. Die Aufgabenstellung

10. Die Aufgabenstellung

11. Die Aufgabenstellung

12. Die Aufgabenstellung

13. Die Aufgabenstellung

14. Die Aufgabenstellung

15. Die Aufgabenstellung

16. Die Aufgabenstellung

17. Die Aufgabenstellung

18. Die Aufgabenstellung

19. Die Aufgabenstellung

20. Die Aufgabenstellung

21. Die Aufgabenstellung

22. Die Aufgabenstellung

23. Die Aufgabenstellung

24. Die Aufgabenstellung

25. Die Aufgabenstellung

26. Die Aufgabenstellung

27. Die Aufgabenstellung

28. Die Aufgabenstellung

29. Die Aufgabenstellung

30. Die Aufgabenstellung

Anlage 2

Auffahrungen im Kaliflöz "Staßfurt"

anstehendes Gestein	abgebaute Länge nach S. m	streichende Länge nach N. m	max. anstehen- de Breite m	max. Stärke der angebau- ten Schicht m	Restpfeiler- querschnitt m ²	Be- merkungen
I. Sohle Westmulde						nicht angefahren
Schachtmulde Westteil *		140	6	1	ohne	
Ostteil	Hartsalz 370	170	16	4	ohne	z.T. auch Rest- hohlraum versetzt
Hauptmulde Westteil		260	45	7	75	z.T. auch Rest- hohlraum versetzt
Ostteil	Carnallitit 110	130	12	4	ohne	Resthohlraum größtenteils ver- setzt
Ostmulde	Carnallitit					nicht abgebaut
II. Sohle Westmulde						nicht angefahren
Schachtmulde Westteil		110	5	-	ohne	nördl. Teil des Resthohlraumes versetzt
Ostteil	Hartsalz 410	170	9	1	ohne	130 m des Resthoh- raumes im süd. Te versetzt

Hauptmulde Westteil	Carnallitit	350	220	35	15	125	Abbaue fast voll- ständig versetzt
Ostteil		140	250	16	4	40	vollkommen ver- setzt
Ostmulde	Carnallitit	70	25	15	12	ohne	
III. Sohle Westmulde	Hartsalz	130	150	15	8	ohne	
Schachtmulde Westteil	Hartsalz	500	85	10	4	ohne	nicht abgebaut
Ostteil							Resthohlraum zum größten Teil ver- setzt
Hauptmulde Westteil	Carnallitit					ohne	
Ostteil	Hartsalz	350	130	30	10		
	Carnallitit	160	100	18	7		z.T. Resthohlraum versetzt
IV. Sohle Westmulde	Hartsalz	120	300	70	25	940	Resthohlraum zum größten Teil versetzt
Schachtmulde Westteil	Hartsalz						nicht abgebaut
Ostteil	Hartsalz						teilweise Rest- hohlraum versetzt
	Carnallitit	850	110	20	5	ohne	

Hauptmulde Westteil	Hartsalz	180	100	100	22	1150	Resthohlraum fast vollständig versetzt
Ostteil	Carnallitit	300	400	20	5		Resthohlraum vollständig ver- setzt
Ostmulde	Carnallitit	180	220	15	5		

* Die Grubenbaue im "Westteil" der Mulden liegen südwestlich, die Grubenbaue im "Ostteil" der Mulden nordöstlich der Hauptquerschläge.