

Betrachtungen zur Havariesituation bei der Lagerung radioaktiver Abfälle in einem Steinsalzbergwerk^{x)}

H. Franke⁺)

Zusammenfassung

Es wird eine Methode vorgestellt, nach der die Havariesituation bei der Lagerung radioaktiver Abfälle in einem Steinsalzbergwerk beurteilt werden kann. In diesem Zusammenhang werden die das Ersaufen von Gruben begünstigenden Faktoren diskutiert. Des weiteren werden Vorstellungen entwickelt über die Möglichkeiten einer Kontamination von in die Grube eindringenden Lösungen und des Abfließens derartiger Lösungen in grundwasserführende Horizonte. Dazu erweist es sich als notwendig, näher auf mögliche Zerstörungen am Grubengebäude infolge Salzauflösung einzugehen. Aus den angestellten Überlegungen kann geschlußfolgert werden, daß die Bergsicherheit einen wesentlichen Faktor für die Umgebungssicherheit eines Endlagers darstellen kann. Wenn auch eine Gefährdung der Umwelt als wenig wahrscheinlich anzusehen ist, können Betrachtungen zur Havariesituation nicht völlig umgangen werden.

1. Einleitung

Bisher durchgeführte Untersuchungen zur Lagerung radioaktiver Abfälle haben ergeben, daß unter den territorialen Bedingungen der DDR die Nutzung stillgelegter Bergwerksanlagen der Kali- und Steinsalzindustrie mit ökonomischen Vorteilen verbunden ist. Obwohl nachgewiesen ist, daß die Lagerung in Salzformationen eines der sichersten Verfahren der Endbeseitigung radioaktiver Abfälle darstellt, besteht aus bergmännischer Sicht als Voraussetzung für die Verwendung eines Bergwerks als Endlager für radioaktive Abfälle die Forderung nach der größtmöglichen Sicherheit der Schächte und des Grubengebäudes. Die Hauptbedingung besteht in einer isolierten Lagerung der Abfälle vom Biozyklus. Die Einhaltung dieser Forderung kann erschwert werden, wenn Wasser oder Salzlösungen während der Betriebsphase oder nach Stilllegung der Anlage in die Grube eindringen und gleichzeitig die Möglichkeit des Abfließens kontaminierter Lösungen aus der Grube nicht auszuschließen ist. Gerade hinsichtlich dieses Problems weisen ältere Gruben oft nicht zu unterschätzende Mängel auf.

Da es sich bei einem Endlager für radioaktive Abfälle, das in einem stillgelegten Bergwerk eingerichtet werden soll, sowohl um eine bergtechnische als auch eine kerntechnische Anlage handelt, sind bei der sicherheitsmäßigen Beurteilung der zur Auswahl stehenden Kali- und Steinsalzgruben die Belange und gesetzlichen Vorschriften beider Industriezweige zu berücksichtigen. Nach den Festlegungen in der Kernanlagen-Genehmigungsanordnung der DDR (1) sind deshalb u.a. Betrachtungen zu möglichen Auswirkungen von Havariefällen durchzuführen.

Das Ersaufen einer Grube, das durch ungünstige geologische, hydrologische und geomechanische Verhältnisse oder andere Ereignisse bedingt sein kann, stellt die größte Gefährdung der Umgebung durch die mögliche Kontamination des Grundwassers dar und bildet die Grundlage für eine Aussage hinsichtlich des „größtmöglichen anzunehmenden Unfalls“ im kerntechnischen Sinne.

^{x)} Diese Arbeit wurde im Auftrag der Staatlichen Zentrale für Strahlenschutz der DDR durchgeführt.

⁺) Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg

Da für den Kali- und Steinsalzbergbau seit jeher Wasser- und Salzlösungszuflüsse das Hauptgefahrenmoment darstellen, kommt im Rahmen einer Sicherheitsanalyse diesem Problem eine besondere Bedeutung zu. Deshalb sind bei einer derartigen Betrachtung Vorstellungen über den Ablauf des Ersaufens von Gruben und die dabei zu verzeichnenden Veränderungen am Grubengebäude zu erarbeiten, um daraus Aussagen über die Möglichkeit des Übertrittes kontaminierter Lösungen in den Biozyklus und dessen Folgeerscheinungen ableiten zu können.

Auf Grund der für den Bergbau in dieser Zielsetzung neuartigen Betrachtungsweise ergibt sich die Notwendigkeit, in Zusammenarbeit mit den staatlichen Genehmigungsbehörden eine Methodik zu erarbeiten, mit der eine Einschätzung der Sicherheit einer in Frage kommenden Grube vorgenommen werden kann oder notwendige Schlußfolgerungen über technische Maßnahmen für den Fall ungünstiger Vorhersagen gezogen werden können. Von ersten Ergebnissen derartiger Überlegungen soll in diesem Beitrag berichtet werden.

2. Voraussetzungen, Ablauf und Auswirkungen des Ersaufens von Kali- und Steinsalzgruben

2.1. Voraussetzungen

Das Betreiben eines Kali- oder Steinsalzbergwerkes, speziell eines Endlagers für radioaktive Abfälle in einem solchen Bergwerk, ist nur dann möglich, wenn ausreichend mächtige hängende oder liegende Schichten vorhanden sind, die einen Schutz gegenüber hydrologischen Gefahren bilden (mächtige Steinsalzbänke, Anhydritschichten und sonstige wasserundurchlässige Schichten). Zuflüsse in Gruben treten dann auf, wenn diese Schichten aus irgendwelchen Gründen ihre Eigenschaft als schützende Schichten verlieren. Voraussetzung dafür können bergtechnische oder andere äußere Einflüsse sein, die Störungen im Gebirgskörper hervorrufen, sowie ausschließlich hydrologische Vorgänge, die eine Zerstörung der vorhandenen Schutzschichten bewirken. Beide Arten von Einflußfaktoren sind nicht vollkommen voneinander zu trennen; sie können sich vielmehr gegenseitig bedingen bzw. den Ablauf des anderen Vorganges beschleunigen. Im Zusammenhang mit bereits vorhandenen Zuflüssen im Bereich eines Kali- und Steinsalzbergwerkes muß berücksichtigt werden, daß durch Austauschprozesse zwischen anstehendem Gestein und den der Grube zusitzenden Wässern und Lösungen Veränderungen auf den Zuflußwegen zu erwarten sind, die abhängen von dem Chemismus und der Menge der Zuflüsse sowie der Art des anstehenden Gesteins. Diese Vorgänge können Veränderungen in den Zuflußverhältnissen zur Folge haben und beim Vorliegen entsprechender Bedingungen die Voraussetzung bilden, daß die ursprünglich als harmlos angesehenen Zuflüsse nicht mehr beherrscht werden können und zum Ersaufen der Grube führen.

Auf Grund der bisherigen Erfahrungen sind die beschriebenen Erscheinungen prinzipiell im gesamten Bereich eines Grubengebäudes denkbar. Auch eine Lokalisierung der Zuflußwege sowie eine Voraussage der zu erwartenden Zuflußmengen und des Chemismus der Zuflüsse ist mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Für Ablaugungsvorgänge im Bereich des Salzspiegels dürften ebenfalls nur grobe Abschätzungen möglich sein. Das gleiche gilt für die erwähnten Veränderungen auf den Zuflußwegen. Eine Untersuchung aller Möglichkeiten und eine entsprechende Beurteilung der Auswirkungen solcher Schäden wäre mit hohem Aufwand verbunden und auf Grund der nur begrenzt für solche Betrachtungen zur Verfügung stehenden Daten kaum durchführbar. Es erscheint deshalb zweckmäßiger, bestimmte Ausgangssituationen als gegeben anzunehmen, die für ein Endlager als repräsentativ anzusehen sind, und so mögliche Schadensfälle modellmäßig zu entwickeln.

Einen weiteren Schwerpunkt in den Betrachtungen über die Möglichkeit des Ersaufens von Gruben stellt die Schachtröhre dar, die in jedem Fall wasser- oder salzlösungsführende Horizonte des Deckgebirges bzw. an der Grenze des Deckgebirges zum Salinar durchteuft. Bei einem Schacht können zwar mögliche Zuflußstellen auf Grund der Kenntnis über die durchteuften Gebirgsschichten meist besser lokalisiert werden als im übrigen Grubengebäude, doch können Aussagen über die zu erwartenden Zuflußmengen nur in begrenztem Umfang gemacht werden. Es erweist sich deshalb auch hier zweckmäßig,

ähnlich zu verfahren, wie oben bereits dargestellt.

Abschließend zu diesem Problem wird in Abb. 1 eine Übersicht über die Faktoren gegeben, die beim Ersaufen ehemaliger Gruben eine wesentliche Rolle gespielt haben. Aus dem Schema geht hervor, daß die entstandenen Schäden prinzipiell auf eine falsche Abbauführung bzw. Abbauplanung, eine unzureichende Dimensionierung der Stützelemente bzw. des Schachtausbaus oder auf eine fehlende Wartung bzw. Kontrolle der entsprechenden Einrichtungen zurückzuführen sind und damit in vielen Fällen vermeidbar gewesen wären.

2.2. Ablauf und Auswirkungen des Ersaufens

Aus den bisherigen Erfahrungen im Kali- und Steinsalzbergbau ergibt sich die Tendenz, daß die höher gelegenen Grubenbereiche bzw. Grubenteile, die in unmittelbarer Nähe wasser- bzw. lösungsführender Horizonte liegen, einen Schwerpunkt bezüglich des Auftretens von Zuflüssen darstellen. Das kann allein schon durch die gebirgemechanischen Auswirkungen der bergmännischen Tätigkeit auf die vorhandenen Schutzschichten begründet werden. Im Falle des Ersaufens von Gruben würden die Zuflüsse zunächst über vorgebildete Strömungskanäle (Strecken, Abbaue, Schächte usw.) in tiefer gelegene Horizonte abfließen und dort vorhandene Hohlräume, die als Sammelbecken zu bezeichnen sind, auffüllen. Im weiteren Verlauf wird der Flüssigkeitsspiegel ständig einem höheren Niveau zustreben. Über einen Schacht in das Grubengebäude gelangende Wasser oder Lösungen würden im Gegensatz dazu direkt über die tiefste am Schacht angeschlagene Sohle den Sammelbecken zufließen. Der weitere Verlauf der Hohlraumfüllung ist mit dem oben beschriebenen vergleichbar. Ähnliche Strömungsverhältnisse während des Ersaufens würden sich auch einstellen, wenn die Zuflußstelle in den unteren Bereichen des Grubengebäudes liegt.

Auf Grund der Löslichkeit der in einem Kali- und Steinsalzbergwerk anstehenden Gesteine kommt es beim Ersaufen zu Auflösungserscheinungen in den durchströmten Grubenteilen bzw. an den Stößen der Sammelbecken, wenn die Zuflüsse mit Süßwässern oder nichtgesättigten Lösungen identisch sind. Dabei ist besonders dort mit nachteiligen Auswirkungen auf die Standsicherheit des Grubengebäudes zu rechnen, wo tragende Elemente geschwächt werden.

Der Umfang eventueller Zerstörungen und die sich ergebenden Möglichkeiten des Übertritts der während des Ersaufens des Endlagers kontaminierten Lösungen in die Biosphäre können nur dann abgeschätzt werden, wenn sich das Ausmaß der Auflösungserscheinungen größenordnungsmäßig vorausberechnen läßt.

2.3. Zu erwartende Auflösungserscheinungen

Der Auflösung von Salzen in Wasser, insbesondere der Auflösung von Steinsalz, kann folgende fundamentale Gleichung zugrunde gelegt werden (2, 3):

$$dG = - \beta A (C_S - C) dZ \quad (1)$$

- dG — Menge des in Lösung gegangenen Salzes
- A — Lösefläche
- C_S — Sättigungskonzentration
- C — Konzentration im Lösungsmittel
- dZ — Zeitdauer der Auflösung
- β — Stoffübergangszahl

Die Ermittlung der Stoffübergangszahl war in der Vergangenheit Gegenstand umfangreicher Untersuchungen, deren Ergebnisse übereinstimmend zeigen, daß die Stoffübergangszahl für jede Salzart abhängig ist von der Temperatur des Lösungsmittels, vom Anteil der Nebenbestandteile und von der Strömungsgeschwindigkeit des Lösungsmittels bzw. von der Konzentration des Stoffes in der Lösung bei konvektiven Strömungsbedingungen. Der Einfluß der Temperatur wurde von KARSTEN (4) bestimmt. Über die Beeinflussung der Stoffübergangszahl durch Nebenbestandteile liegen nur wenige Untersuchungsergebnisse vor. Die Abhängigkeit der Stoffübergangszahl von der Strömungsge-

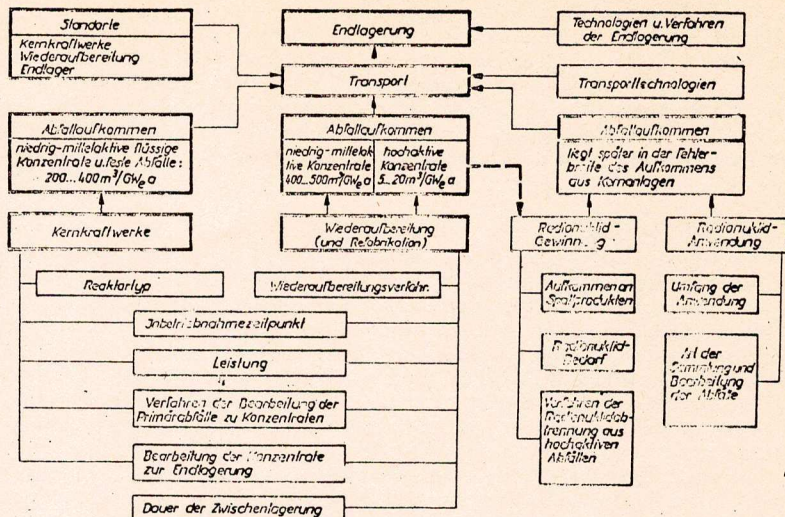


Abb. 1 Grabschema der Einflussfaktoren, die bei der Erarbeitung einer Konzeption der Beseitigung radioaktiver Abfälle zu berücksichtigen sind

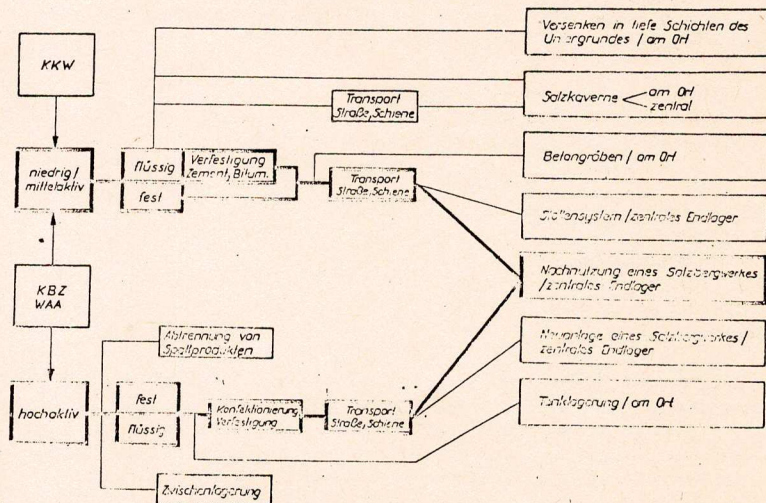


Abb. 2 Verfahren zur Beseitigung radioaktiver Abfälle

Variante I	Zentrale Endlagerung der Abfälle aller Kategorien im Salzbergwerk (stillgelegte Gruben, Feststoffe in Betrieb befindlicher Gruben, Schachtinanspruchnahme)
Variante II	Endlagerung der Abfälle aller Kategorien am Entstehungsort (niedrig-mittelaktive Abfälle in wassersalienierten Betongruben, hochaktiv in Behältern)
Variante III	Zentrale Endlagerung hochaktiver Abfälle im Salzbergwerk
	Endlagerung niedrig-mittelaktiver Abfälle in wassersalienierten Betongruben am Entstehungsort
	Zentrale Endlagerung hochaktiver Abfälle im Salzbergwerk
	Zentrale Endlagerung niedrig-mittelaktiver Abfälle in Stollensystemen
Variante IV	Zentrale Endlagerung niedrig-aktiver Abfälle im Salzbergwerk
	Zwischenlagerung hochaktiver Abfälle in Behältern
	Zentrale Endlagerung niedrig-mittelaktiver Abfälle in Stollensystemen
	Zwischenlagerung hochaktiver Abfälle in Behältern
Variante V	Endlagerung hochaktiver Abfälle im Salzbergwerk
	niedrig-mittelaktive feste Abfälle am Entstehungsort in Betongruben
	niedrig-mittelaktive flüssige Abfallkonzentrate in Salzkavernen

Abb. 3 Bewertete Hauptvarianten der Endlagerung radioaktiver Abfälle in der DDR

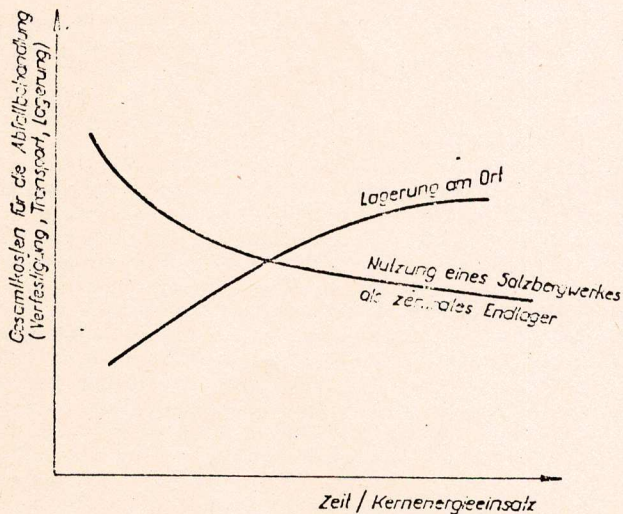


Abb. 4 Beispiel für den zeitlichen Verlauf der Kostenentwicklung der Abfallbeseitigung für zentrale und dezentrale Endbeseitigung

schwindigkeit ist für Steinsalz von verschiedenen Autoren untersucht worden, wobei sich jedoch die Ergebnisse teilweise widersprechen.

Die in Abb. 2 dargestellte Kurve zeigt den Verlauf der Stoffübergangszahl β über der Strömungsgeschwindigkeit nach KARSTEN (4). Die Kurve hat einen asymptotischen Verlauf und erreicht bei $w = 500 \text{ cm/s}$ einen Grenzwert von $\beta = \text{ca. } 35 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$. Im Bereich kleinerer Strömungsgeschwindigkeiten ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen von DANOVSIIJ (5), wie aus Abb. 3 zu ersehen ist.

Die von SIEBLER (3) ermittelten widersprüchlichen Stoffübergangszahlen für Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich von 0,5 bis 2,5 cm/s bzw. 10 cm/s lassen sich dagegen nicht ohne weiteres erklären. Vergleicht man die Werte mit den Ergebnissen von Auflösungsversuchen unter konvektiven Strömungsbedingungen, so ergeben sich noch größere Differenzen. Des weiteren wurden von SIEBLER (3) Untersuchungen bei Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich von 30 bis 90 cm/s vorgenommen, wobei folgende Beziehung gefunden wurde:

$$10^3 \beta = -1,442 + 0,155 w \text{ in cm/s} \quad (2)$$

Die mitunter erheblichen Unterschiede in den angeführten Werten lassen sich teilweise durch nicht vergleichbare Versuchsbedingungen erklären. Eine wesentliche Rolle spielt nach SIEBLER auch die Dauer der Auflösung, da mit einer Vergrößerung der ursprünglichen Lößfläche mit der Versuchszeit gerechnet werden muß. Eine Erklärung der sich widersprechenden Ergebnisse für Konvektion und aufgezogene Strömung ist jedoch nur durch qualitative Veränderungen im Lösungsmechanismus möglich, wenn vorausgesetzt wird, daß Fehler in der Versuchsdurchführung nicht die Ursache für derartige Meßergebnisse waren.

Bei der Beurteilung der Auswirkungen von Auflösungserscheinungen in einem Kali- oder Steinsalzbergwerk stellt das Maß der Lösetiefe an den tragenden Elementen des Grubengebäudes (Pfeiler, Schweben) die wesentlichste Ausgangsgröße dar. Die Lösetiefe kann nach folgender Beziehung (3) ermittelt werden:

$$h_t = \frac{\beta (C_s - C) Z}{t} \quad (3)$$

h_t — Lösetiefe

t — Dichte des Salzes

Zur Berechnung der Lösetiefe bezüglich der in einem Bergwerk zu erwartenden Strömungsarten wird vorgeschlagen, die aus der Literatur bekannten Stoffübergangszahlen differenziert anzuwenden. In Tabelle 1 wurde eine entsprechende Unterteilung vorgenommen. Bis zum Vorliegen weiterer Untersuchungsergebnisse können die dort angegebenen Abhängigkeiten für Überschlagrechnungen zur Ermittlung der Stoffübergangszahl als ausreichend angesehen werden.

Die oben behandelten Probleme betreffen lediglich die Auflösung von Steinsalz in Wasser bzw. in Salzlösungen. Auf die Auflösung von anderen Salzen, wie z.B. Carnallit, Hartsalz usw., wurde nicht eingegangen, da diesbezüglich wenig Untersuchungsergebnisse vorliegen. Zum anderen besteht dafür auch keine dringende Notwendigkeit, da diese Salzarten in einem künftigen Endlager für radioaktive Abfälle nur in geringem Umfang anstehen und somit eine größere Beeinträchtigung der Standfestigkeit der Grube im Zusammenhang mit der Auflösung dieser Salzarten nicht zu erwarten ist.

Die Form des durch die Auflösung entstandenen Hohlraumes ist im wesentlichen abhängig von der Strömungsart. So werden bei horizontaler Strömung die Stöße der Grubenräume und der Pfeiler vermutlich „unterspült“, so daß ein Schram entsteht, dessen Tiefe von der Zeitdauer der Auflösung und dessen Höhe von der Lage des Flüssigkeitsspiegels über der Sohle beeinflußt werden. Mit größeren Auflösungserscheinungen an der Sohle ist bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten zu rechnen. In diesem Fall wird sich der Schram in vertikaler Richtung vertiefen; allerdings verringert sich dadurch das Maß der Auflösung in horizontaler Richtung. Ähnlich dürften die Verhältnisse für den Bereich der Strömungsgeschwindigkeiten von 30 bis 90 cm/s liegen.

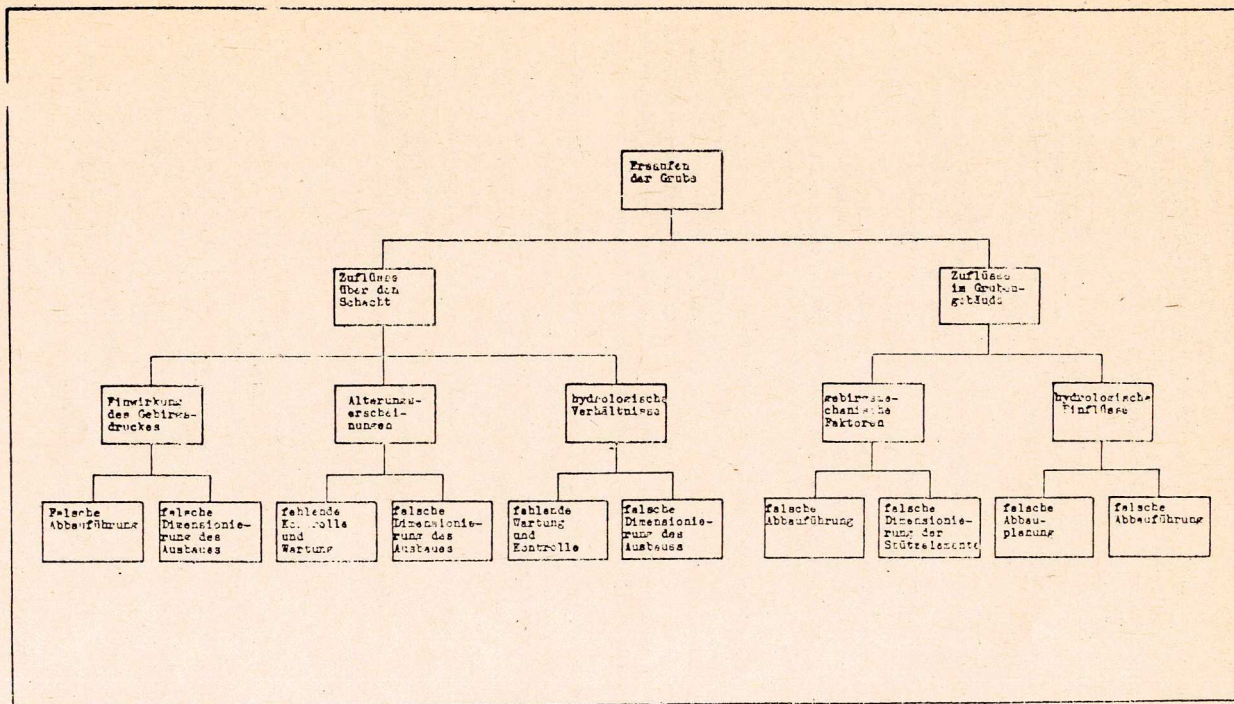


Abb. 1 Ursachen für den Eintritt eines Katastrophenfalles aus bergtechnischer Sicht

Beim Durchströmen horizontaler Grubenbaue mit anschließendem Herabstürzen der Wassermassen bzw. Salzlösungen durch einen saigeren Grubenbau (Schacht, Überbau, Rolloch) entsteht wahrscheinlich ein vertikaler Schram, der sich ständig tiefer in den Salzkörper einschneidet und entgegen der Strömungsrichtung fortschreitet (rückwärtsschreitende „Erosion“), wenn Teile des Lösungsstromes auch auf den entgegen der horizontalen Strömungskomponente liegenden Salzstoß auftreffen.

Bei konvektiven Strömungsbedingungen ist in Abhängigkeit von der Füllzeit der Reservoirs mit unterschiedlichen Auflösungserscheinungen zu rechnen. Bei geringen Zuflussmengen werden die Stöße des Raumes ihre vorher innegehabte Neigung beibehalten, so daß lediglich eine Parallelverschiebung in Richtung Pfeilermitte oder Unverritztes eintritt.

Anders liegen die Verhältnisse, wenn eine kurzzeitige Füllung des Reservoirs eintritt. Da mit zunehmender Konzentration der Lösung die Salzauflösung vornehmlich in den oberen Bereichen der Grubenräume stattfindet, ergibt sich im Niveau des Flüssigkeitsspiegels eine Löstiefe, die etwa den doppelten Betrag erreicht, wie er nach Beziehung (3) ermittelt wird. In Sohlennähe findet keine wesentliche Auflösung statt.

Eine Besonderheit stellt in diesem Zusammenhang ein Zufluß in Sohlennähe eines Reservoirs dar. Es ist damit zu rechnen, daß die Stöße des Grubenraumes stark „unterspült“ werden und somit örtlich wesentlich größere Lösungstiefen zu erwarten sind, als sie nach Beziehung (3) errechnet werden.

Die Kenntnis der beim Ersaufen und nach dem Ersaufen am Grubengebäude auftretenden Veränderungen durch Salzauflösung ist die Voraussetzung für sich anschließende geomechanische Berechnungen zur Beurteilung der Stabilität einzelner Grubenbaue bzw. der gesamten Grube. Die Erfahrungen des Kali- und Steinsalzbergbaues zeigen, daß beim Vorliegen entsprechender Bedingungen größere Schäden durch Salzauflösung nicht ausgeschlossen werden können. Darauf wird später noch eingegangen.

3. Einfluß des Einlagerungsmediums und der Strömungsverhältnisse auf die Kontamination der in einem ersoffenen Endlager anstehenden Lösungen

Bei einem ersoffenen Steinsalzbergwerk, in dem radioaktive Abfälle gelagert werden, muß zunächst von der Tatsache ausgegangen werden, daß ein Kontakt der Abfälle mit Salzlösungen und damit deren Kontamination nicht auszuschließen ist. Die Kontamination der in der Grube anstehenden Lösungen wird im wesentlichen durch das Auslaugverhalten der Abfälle, die Strömungsverhältnisse in der Grube, die Zeitdauer, in der bereits ein Kontakt bestanden hat, und die geometrische Anordnung der Einlagerungsräume im Grubengebäude beeinflußt. Das Auslaugverhalten der Abfälle ist abhängig von ihrer Art und Zusammensetzung, der Verpackungsart und der Größe der Oberfläche, an der Salzlösung angreifen kann. Als weitere Einflußfaktoren kommen Lagerungstechnologie, Konzentration und Chemismus der Salzlösungen sowie Strömungsgeschwindigkeit des Lösungsmittels im Bereich der Abfälle in Frage. Da auswertbare Kenntnisse über das Auslaugverhalten nur von verfestigten radioaktiven Abfällen vorliegen und zum anderen die zu berücksichtigenden Einflußfaktoren sehr vielgestaltig sind, erscheint es zweckmäßig, ausgehend von der Art der Abfälle und der Verpackungsart, folgende verfahrenstechnisch und vom Standpunkt der Sicherheit begründete Einteilung der Abfälle vorzunehmen und auf dieser Grundlage eine zumindest qualitative Einschätzung des Auslaugverhaltens der Abfälle zu geben. Es wird unterteilt in:

- flüssige Abfälle in direkter Lagerung in speziell angelegten Hohlräumen
- feste Abfälle, unverpackt bzw. mit gegenüber Salzlösung unbeständiger Verpackung
- feste Abfälle, mit gegenüber Salzlösung beständiger Verpackung
- mit Zement verfestigte Flüssigabfälle
- in Bitumen fixierte Flüssigabfälle
- in Glas eingeschmolzene Abfälle.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, daß die Kontamination der Lösungen mit steigender Abfallmenge, mit größer werdender spezifischer Aktivität der Abfälle, mit wachsendem Anteil langlebiger Spaltprodukte und mit der Unbeständigkeit der Verpackung zunimmt. Hinsichtlich der o.g. Abfallkategorien ergibt sich folgendes Bild:

Im Rahmen der Betrachtungen zu Havariesituationen muß bei der Lagerung flüssiger Abfälle angenommen werden, daß schon nach sehr kurzer Zeit eine Vermischung der Abfalllösungen mit einem großen Teil der anstehenden Salzlösungen stattgefunden hat. Wie später zu sehen sein wird, stellt die gleichmäßige Verteilung der in die Lösung übergegangenen Aktivität den ungünstigsten Fall dar.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei der Lagerung unverpackter Abfälle bzw. bei der Verwendung von Verpackungsarten, die nicht beständig gegenüber Wasser oder Salzlösung sind. Hierzu zählen z.B. Verpackungen aus Pappe und handelsüblichen Plastfolien. Rollreifenfässer bieten gegenüber der Auslaugung nur so lange einen ausreichenden Schutz, wie sie nicht durch Korrosion zerstört werden. Dahingehende Erfahrungen lassen erwarten, daß bei Verwendung der bisher üblichen Blechstärken (= ca. 1,5 mm) schon nach weniger als einem halben Jahr die Zerstörung von in Salzlösung lagernden Fässern beginnt.

Sonstige in Frage kommenden Verpackungsarten — denkbar wären z.B. mit Bitumen oder Kunststoffen ausgekleidete Rollreifenfässer —, die der Gruppe der salzlösungsbeständigen Verpackungen zuzuordnen sind, lassen sich gegenwärtig hinsichtlich ihres Auslaugungsverhaltens kaum beurteilen. Es ist jedoch zu erwarten, daß sie in ihrer Widerstandsfähigkeit gegen Auslaugung der Zementierung bzw. sogar der Bituminierung gleichzusetzen sind.

Für die drei genannten Methoden der Verfestigung flüssiger Abfälle stellt die sogenannte Auslaugrate ein Maß für die Widerstandsfähigkeit der „Verpackung“ gegenüber einem Lösungsmittel dar. Bei Kontakt mit Wasser liegen die Auslaugraten (6) bei

Zementierung	in der Größenordnung von 10^{-2} g/cm ² d
Bituminierung	in der Größenordnung von 10^{-4} g/cm ² d
Einschmelzung in Glas	in der Größenordnung von 10^{-6} g/cm ² d

Es ist jedoch möglich, daß sich die Auslaugarten bei einem Kontakt der Abfälle mit Salzlösung ändern. Besonders das Verhalten von Beton gegenüber „aggressiven Wässern“ läßt dies erwarten (7). Ähnliches gilt auch für in Bitumen und in Glas fixierte Abfälle, wenn auch auf Grund deren hoher chemischer Beständigkeit keine so großen Unterschiede gegenüber den Auslaugarten bei einem Kontakt mit Wasser zu erwarten sind.

Bei allen Abfall- und Verpackungsarten kann eine Kontamination der in einem Endlager anstehenden Lösungen vermieden oder vergrößert werden, wenn es gelingt, durch entsprechende bauliche Maßnahmen die Lagerräume gegen Zuflüsse abzuriegeln. Da jedoch ein solches Problem im Zusammenhang mit den oben beschriebenen Auflösungserscheinungen gesehen werden muß, erscheint eine derartige Lösung nicht sehr erfolgversprechend.

Einen zusätzlichen und wirksamen Schutz gegenüber der Auslaugung von in Glas eingeschmolzenen hochaktiven Abfällen stellt dagegen die bei der derzeit konzipierten Einlagerungsform auch technologischen und sicherheitstechnischen Gründen erforderliche Salzbank über den in der Sohle der Lagerräume versenkten Abfallstäbe dar, wenn vorausgesetzt wird, daß die Strömungsgeschwindigkeit der Salzlösungen klein ist.

Der Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit des Lösungsmittels auf die Auslaugung radioaktiver Abfälle kann auf Grund der Erfahrungen mit Beton (7, 8) zunächst nicht unberücksichtigt bleiben. Eine tiefergehende Behandlung dieses Problems ist jedoch nicht zweckmäßig, solange keine quantitativen Angaben über das Auslaugverhalten radioaktiver Abfälle in strömenden Medien vorliegen. Die in einer ersoffenen Grube vorherrschenden Strömungsverhältnisse sind außerdem ein wesentlicher Einflußfaktor hinsichtlich der Ausbreitung der in die Lösungen übergehenden Radioaktivität. In diesem Zusammenhang wird unterschieden in:

- Ausbreitung durch Diffusion
- Ausbreitung durch Konvektionsströmungen
- Ausbreitung durch Strömung infolge eines äußeren Druckgefälles.

Mit Konvektionsströmungen kann in einem ersoffenen Endlager für radioaktive Abfälle auf Grund vorhandener Temperaturgefälle oder des Anstehens von Lösungen unterschiedlicher Dichte — bedingt durch die Auflösung unterschiedlicher Salzarten — ge-

rechnet werden. Mit Sicherheit sind Strömungsvorgänge zu verzeichnen, wenn zwischen der mit Salzlösungen gefüllten Grube und wasserführenden Horizonten im Deckgebirge bzw. im Liegenden hydraulische Verbindungen bestehen. Schlußfolgernd kann eingeschätzt werden, daß in einem ersoffenen Endlager eine Verbreitung der in Lösung gehenden Radionuklide über das gesamte Grubengebäude zu erwarten ist, die zeitlich nicht durch Diffusionsvorgänge bestimmt wird.

4. Möglichkeiten des Übertrittes kontaminierter Salzlösungen in den Biozyklus

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, daß größere Auflösungserscheinungen innerhalb des Grubengeländes in der Phase des Ersaufens und sogar nach dem Ersaufen einer Anlage nicht vermieden werden können. Damit ergibt sich prinzipiell die Möglichkeit der Zerstörung von Hangend- und Deckgebirgsschichten, die im ursprünglichen Zustand als Schutzschichten gegenüber wasserführenden Horizonten anzusehen waren. In dem hier betrachteten Zusammenhang sind von Bedeutung:

- Großräumiges, zerstörungsfreies Absenken der Firste infolge Biegebeanspruchung der hangenden Schichten
- großräumige, weit nach oben greifende Zerstörung der Hangendschichten und Herinbrechen großer bis sehr großer Gesteinskörper in die mit Salzlösung gefüllten Grubenräume.

In beiden Fällen werden anstehende und u.U. kontaminierte Salzlösungen in vorhandene Hohlräume, z.B. in den Schacht, oder in neu entstandene Hohlräume verdrängt. Füllt sich dadurch die Schachtröhre über dem Niveau der Bruchstelle vollständig mit Salzlösung und sinkt der hereinbrechende Gesteinskomplex weiter ab, so wird so lange Lösung aus dem Schacht austreten und oberirdisch dem nächsten Vorfluter zufließen, bis das Gestein eine endgültige Auflage gefunden hat. Die dem Vorfluter zufließenden Flüssigkeitsmengen könnten theoretisch einen Wert von $10^3 \text{ m}^3/\text{min}$ und mehr erreichen. Die Gesamtabflußmenge ist abhängig vom Umfang der Zerstörungen. Es muß allerdings hinzugefügt werden, daß bei der größten Anzahl der in Frage kommenden Gruben Gesteinsschichten in Mächtigkeiten von mehr als 100 m hereinbrechen müßten, bis derartige Auswirkungen zu erwarten wären. Dies ist nach bisherigen Erfahrungen jedoch sehr unwahrscheinlich.

Ein Abfluß von kontaminierten Salzlösungen in grundwasserführende Schichten ist auch denkbar, wenn der Flüssigkeitsspiegel im Schacht über dem Niveau derartiger Horizonte liegt. Die Infiltrationsleistung ist dann abhängig von der Durchlässigkeit des Schachtausbaus.

In dem hier betrachteten Zusammenhang interessiert auch die allmähliche Herausbildung eines sogenannten Tagesbruches über der ersoffenen Grube. Es wird vorausgesetzt, daß der Tagesbruch durch mehrere Einzelbrüche in größeren Zeitabständen zustande kommt und die Salzlösungen durch den Nachfall von Gesteinsmassen in immer höher liegende Niveaus verdrängt werden. Bei der endgültigen Entstehung des Tagesbruches kann es beim Einbrechen der obersten Gesteinsschichten zu einem kurzzeitigen „Überlaufens“ des entstehenden Oberflächengewässers kommen, wobei spezifische Abflußmengen in der gleichen Größenordnung wie beim Schacht zu erwarten wären. Allerdings dürfte die Gesamtabflußmenge wesentlich geringer sein. Sie hängt ab von der Größe des Tagesbruches und des aus der Grube verdrängten Flüssigkeitsvolumens. Die hier geschilderte Art des Abflusses von Lösungen ist jedoch sehr unwahrscheinlich, da ähnliche Vorgänge bei Tagesbrüchen bisher nicht bekannt geworden sind.

Kontaminierte Lösungen können auch aus dem Grubengebäude abfließen, wenn mindestens zwei Verbindungsstellen zu Wasser- oder Salzlösungsreservoirien im Deckgebirge oder im Liegenden mit unterschiedlichen Druckverhältnissen bestehen. In diesem Fall wird die Größe der in der Zeiteinheit aus einer ersoffenen Grube abfließenden Flüssigkeitsmenge im wesentlichen durch das Druckgefälle und den Strömungswiderstand auf den Zu- und Abflußwegen und im Grubengebäude bestimmt. Gegenwärtig sind jedoch keine Methoden und Verfahren bekannt, die eine Berechnung des vorliegenden Problems möglich erscheinen lassen. Ein Näherungswert kann erhalten werden, wenn man davon ausgeht, daß die Abflußmengen nicht größer sind als die beim Ersaufen der Grube

gemessenen. Geht man weiter davon aus, daß sich die Durchflußmengen wie die Quadratwurzeln der dazugehörigen Druckverhältnisse verhalten, so reduzieren sich die zu erwartenden Abflußmengen auf Grund des vermutlich geringeren Druckgefälles gegenüber den ursprünglichen Zuflußmengen erheblich.

Hinsichtlichen eines konvektiven Lösungsaustausches sind auf Grund der nicht ausreichend bekannten Einflußgrößen kaum Aussagen möglich. Es ist jedoch zu vermuten, daß die bewegten Flüssigkeitsmengen wesentlich niedriger liegen werden als bei den oben geschilderten Fällen.

Abschließend kann eingeschätzt werden, daß im Falle des Ersaufens eines Endlagers für radioaktive Abfälle ein Übertritt kontaminierter Lösungen in die Biosphäre infolge eines ständigen Druckgefälles auf Grund bisheriger Erfahrungen im Kali- und Steinsalzbergbau als am wahrscheinlichsten anzusehen ist.

5. Einfluß der Strömungsverhältnisse im Deckgebirge auf die Aktivität der aus dem Endlager abfließenden Lösungen

Die Verringerung der spezifischen Aktivität der aus einem ersoffenen Endlager für radioaktive Abfälle abfließenden kontaminierten Lösungen ist bis zu ihrem Eintritt bzw. nach ihrem Eintritt in die Biosphäre durch

- Verdünnung mit Grund- und Oberflächenwässern und
 - Sorption von Radionukliden in den durchflossenen Gesteinsschichten
- denkbar.

Infolge radioaktiven Zerfalls ist weiterhin die Zeitdauer von Einfluß, die bis zum Eintritt einer Havarie seit Beginn der Abfalleinlagerung vergangen ist. Dieser Faktor spielt auch dann eine gewisse Rolle, wenn kontaminierte Lösungen in tiefliegende Grundwasserhorizonte eintreten und auf Grund sehr geringer Filtergeschwindigkeiten erst nach größeren Zeiträumen in den Biozyklus gelangen. Der Zeitfaktor kann unabhängig von den oben genannten Möglichkeiten einer „Dekontamination“ der Salzlösungen wirksam und durch gesonderte Berechnungen berücksichtigt werden.

Während die Ermittlung der Verdünnung oberirdisch abfließender Lösungen anhand der Wasserführung des Vorfluters leicht möglich ist, gestaltet sich dies für den Eintritt kontaminierter Salzlösungen in grundwasserführende Horizonte wesentlich schwieriger. Da die Menge der abfließenden Lösungen in starkem Maße von den Strömungsverhältnissen im Grundwasserleiter und den herrschenden Randbedingungen abhängt, ist eine allgemeine Behandlung dieses Problems auf Grund der Vielfalt der örtlichen Gegebenheiten nicht möglich. Die Lösung einer speziellen Aufgabe ist jedoch bei Kenntnis der Randbedingungen mit Hilfe analytischer und modelltechnischer (Analogrechner) Verfahren der Grundwasserhydraulik denkbar.

Im Zusammenhang mit der Ausbreitung eines kontaminierten Grundwasserstroms ist auch die Sorption von Radionukliden am Gestein zu sehen, die im wesentlichen auf dem Austausch von Ionen zwischen dem strömenden Medium und den Gesteinskörnern beruht. Aus bisherigen Untersuchungen auf diesem Gebiet ist abzuleiten, daß die Art des durchflossenen Gesteins und die Art der im Grundwasser enthaltenen Radionuklide als die wesentlichsten Einflußfaktoren bei der „Dekontamination“ des Grundwassers angesehen werden müssen. Aus dieser Erkenntnis heraus ergibt sich die Notwendigkeit, in jedem speziellen Fall Kenntnisse über das Sorptionsvermögen der in Frage kommenden Gesteinsarten in salzreichen Grundwässern zu erlangen.

6. Schlußfolgerungen

Die Lagerung radioaktiver Abfälle in einem Steinsalzbergwerk ist auf Grund der hervorragenden Eignung von Salzlagerstätten im allgemeinen als sicheres Verfahren anzusehen. Eine Gefährdung der Umwelt kann vor allem dann eintreten, wenn infolge des Ersaufens des Bergwerkes radioaktives Material in genutztes Grundwasser gelangt. Deshalb ist es notwendig, entsprechende Sicherheitsbetrachtungen anzustellen und die Auswirkungen möglicher Havariesituationen einzuschätzen. Für den Bergbau waren Betrachtungen in dieser Richtung bisher nicht notwendig, so daß entsprechende Ausgangsgrößen und Erfahrungen fehlen. Im vorliegenden Beitrag wurde versucht, wesentliche Gesichtspunkte,

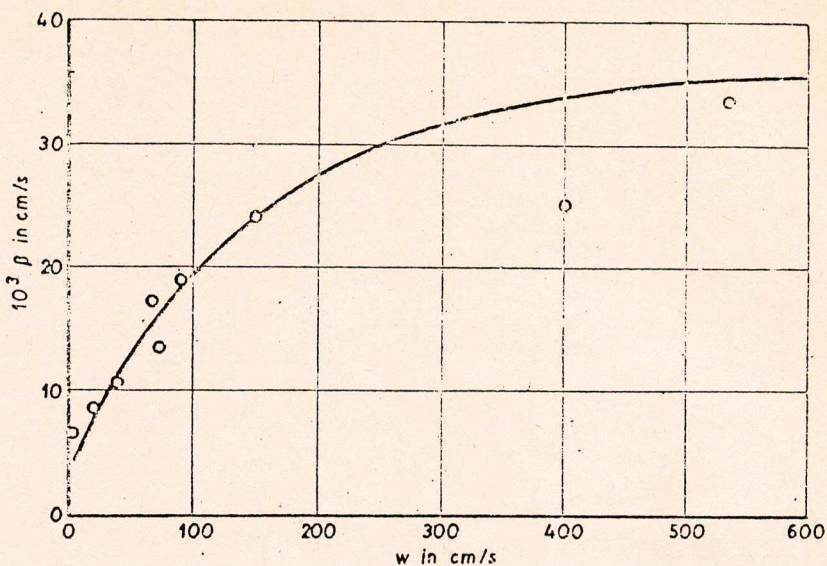


Abb. 2 Abhängigkeit der Stoffübergangszahl β von der Strömungsgeschwindigkeit w bei der Auflösung von Steinsalz in Wasserstrahl

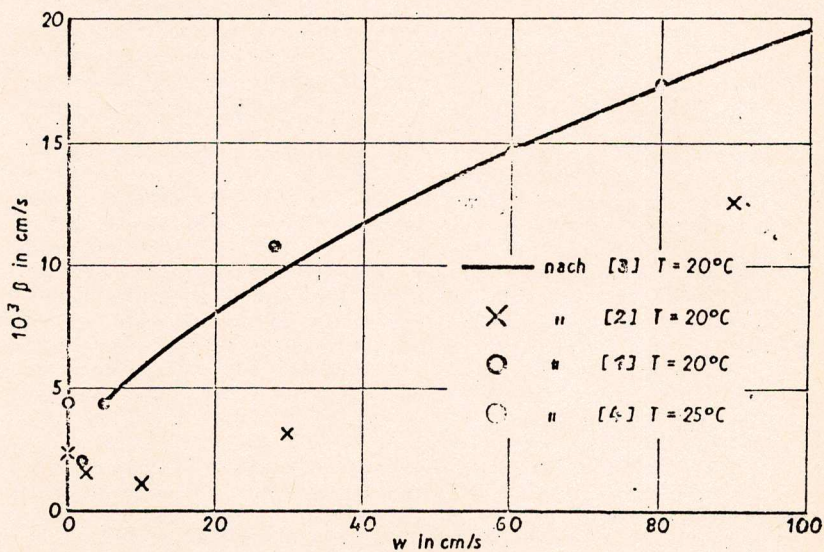


Abb. 3 Abhängigkeit der Stoffübergangszahl β von der Strömungsgeschwindigkeit w bei der Auflösung von Steinsalz in Wasser

die für die Beurteilung der Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle in einem Steinsalzbergwerk im Zusammenhang mit Havarietrachtungen von Bedeutung sind, herauszuarbeiten. Des weiteren wurden die Faktoren diskutiert, die den Ablauf von Havarie hauptsächlich beeinflussen können.

Die durchgeführten Überlegungen haben einen allgemeingültigen Charakter und stellen eine methodische Anleitung für die sicherheitsmäßigen Einschätzungen von zu bewertenden Anlagen dar. Ein auf dieser Grundlage abgeleitetes vereinfachtes Modell (Abb. 4) bildet die Basis für näher zu untersuchende Havariesituationen und deren Ablauf in einem Endlager für radioaktive Abfälle.

Aus den bisherigen Untersuchungen läßt sich ein Bild über den Ablauf des „maximal möglichen Unfalles“ entwickeln, das im folgenden kurz umrissen wird:

- Nicht beherrschbare Wasser- oder Salzlösungszuflüsse im Endlager für radioaktive Abfälle,
- vollständige Füllung der Grube mit Salzlösung,
- Kontamination der anstehenden Lösungen durch gelagerte Abfälle,
- Auflösungserscheinungen an Salzfesten,
- Zusammenbruch von Grubenteilen,
- Austritt größerer Mengen kontaminierter Lösungen aus dem Grubenbereich,
- Eintritt der abfließenden Lösungen in Grund- und Oberflächenwässer,
- Gefährdung größerer Personengruppen durch direkte oder indirekte Nutzung des Grund- und Oberflächenwassers.

Die durchgeführten Betrachtungen über mögliche Havariesituationen bei der Lagerung radioaktiver Abfälle in einem Steinsalzbergwerk unterstreichen die Tatsache, daß die Bergsicherheit ein wesentliches, jedoch nicht das alleinige Kriterium für die Gewährleistung des Strahlenschutzes in der Umgebung einer Anlage und für deren sicherheitstechnische Bewertung darstellt. Ähnliches gilt auch hinsichtlich des maximal möglichen Unfalles.

In diesem Zusammenhang spielen die Wahrscheinlichkeit des Eintritts der verschiedenen Einzelereignisse und die Wirkungsweise der beschriebenen Einflußgrößen eine wesentliche Rolle. Sie bilden die eigentliche Grundlage für eine begründete Gesamtaussage über die Havariesituation in einer bestimmten Grube und sind Voraussetzung für prophylaktische Sicherheitsmaßnahmen. Eine inzwischen vorgenommene erste Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit der genannten Einzelereignisse bekräftigt die hohe Sicherheit der Lagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen. Sie entbindet jedoch nicht von der Aufgabe, im Rahmen der für Kernanlagen notwendigen Havarieanalyse auf der Grundlage der erarbeiteten Methodik eine Bewertung von nicht völlig auszuschließenden Havarien vorzunehmen.

Literatur

- /1/ Anordnung über die Erteilung der Strahlenschutzgenehmigung für Kernanlagen — Kernanlagen-Genehmigungsanordnung — vom 4. Dezember 1969, GBl. II Nr. 102 S. 697
- /2/ BRÜCKNER, G.
Beitrag zu den Grundlagen der untätigen Gewinnung von Steinsalzsole durch Auflösen am festen Stoß in freier Strömung, Freiburger Forschungshefte A 418
- /3/ SIEBLER, P.
Untersuchungen über die Auflösung natürlicher Salze als Beitrag zur Erfassung der Zerstörung an Pfeilern beim Ersaufen von Kali- und Steinsalzgruben
Bergakademie Freiberg, Dissertation 1970
- /4/ KARSTEN, O.
Lösungsgeschwindigkeit von Natriumchlorid, Kaliumchlorid und Kieserit in Wasser und in wässrigen Lösungen, Z. Anorg. Allgem. Chem. 276 (1954) 247-266
- /5/ ZDANOVSKIJ, A.B.
Lösungskinetik natürlicher Salze bei aufgezwingener Strömung
Veröffentlichung d. Allunions-Forschungs-Inst. f. Halurgie, Bd. 33, Leningrad 1956
- /6/ KÖRNER, W.; DAGEN, A.
Sicherheitstechnische Untersuchungen zur Bituminierung radioaktiver Abfälle, SZS-8 (1971)
- /7/ Beton-Kalender 1956, Berlin: Verl. Wilhelm Ernst 1956
- /8/ DDR-Standard D 11357, Berlin, 1962
Beton in aggressiven Wässern; Beurteilung d. Wassers, Bauausführung

Tabelle I

Zusammenstellung der Beziehungen zur Ermittlung der Stoffübergangszahl für die Auflösung von Steinsalz bei 20° C

Strömungsart	Art der Lösefläche	w cm/s	Beziehung zur Berechnung des Stoffüberganges (B in cm/s)
horizontale Strömung	längs angeströmt	0-30	$B = \max (B(1); B(2); B(3)) (10^3 B(3) = 2,170 + 0,0223 w)$
	direkt angeströmt	0-5	$B = \max (B(1); B(2))$
		5-30	$B = 3,015 \cdot 10^{-3} w^{0,4}$
		0-5	$B = K m^{-n} \cdot 10^{-4}$
	Sohle	5-30	$B = \max (B(1); B(2); B(3))$
horizontale bis verti- kale Strö- mung	längs angeströmt	30-90	$10^3 B(1) = -1,442 + 0,155 w$
	direkt angeströmt	30-90	$B = 3,015 \cdot 10^{-3} w^{0,4}$
	Sohle	30-90	$10^3 B = -1,442 + 0,155 w$
Vertikal- strömung	direkt angeströmt	7500	$B = 35 \cdot 10^{-3}$
Konvektion	Flüssigkeitsspie- gel ansteigend	0	$B = 6,89 \cdot 10^{-3} \ln (1 - \frac{C_S - C}{C_S})$
	Flüssigkeitsspie- gel konstant	0	$B(2) = 2,165 \cdot 10^{-3} (\frac{C_S - C}{C_S})^{0,668} (\frac{V}{A})^{0,277}$

Anmerkung: In beiden Fällen besser

$$h_t = \frac{V(C_S - C_0)}{A} \quad \text{in cm}$$

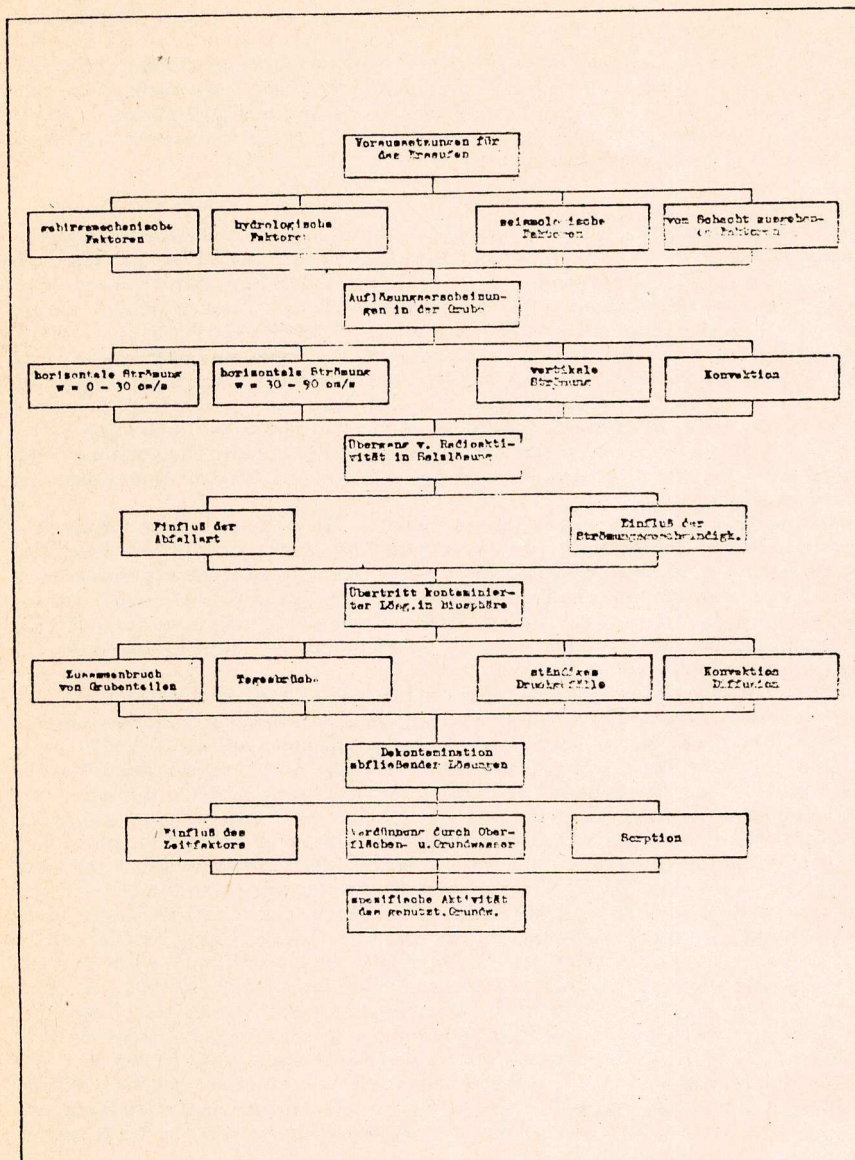


Abb. 4 Modell zur phänomenologischen Beschreibung eines Katastrophenfalles