

## Zusammenfassung

### *Modellvorstellungen zur Dynamik der Auslaugungsprozesse des Zechsteinsalzes in den Saxoniden der DDR*

Im Verlaufe der natürlichen Salzauslaugung entstehen Grundwasserreservoirs mit stagnierenden Salzlösungen, in denen sich die Flüssigkeit nur im oberen Bereich bewegt. Die Triebkräfte für das Aufrechterhalten des Auslaugungsprozesses sind als Diffusion aus der ruhenden Flüssigkeit zum strömenden Grundwasser zu verstehen. Daraus ergeben sich u. a. folgende Schlußfolgerungen: Die natürliche Salzauslaugung verläuft gegenwärtig so langsam, daß sie sich, von Resthohlräumen im Deckgebirge abgesehen, zeitlich und räumlich nicht durch Geländesenkungen auswirkt. Wird das hydrogeologische Regime gestört (Bergbauentwässerung), wird die Auslaugung intensiviert. Nach Einstellen der Wasserentnahme, wird der ursprüngliche Zustand erst nach längerer Zeit wiederhergestellt. Die Gipsauslaugung erfolgt fast nur im Niveau und oberhalb der Süß-/Salzwassergrenze.

## Summary

### *Model conceptions of the dynamics involved in the Zechstein salt leaching processes in the saxonites of the GDR*

Ground-water reservoirs with stagnant brine, where liquid moves in the top layer only, come into existence in the course of natural salt leaching. Diffusion from the dormant liquid towards the flowing ground-water has to be considered as the driving force for the continuance of the leaching process. The following conclusions can, among others, be drawn: The natural salt leaching proceeds at present so slowly that, apart from residual hollows in the overlying rock, there are no temporal or spatial consequences in the way of terrain subsidence. Leaching is intensified when the hydrogeological regime is disturbed (mining drainage). When drainage stops, the original state is restored after a major period only. Gypsum leaching proceeds almost exclusively at the level and above of the fresh-water/salt-water interface.

<sup>1</sup> Auszug aus einer von der Fakultät für Naturwissenschaften des Wissenschaftlichen Rates der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg genehmigten Dissertation, Referent Prof. (em.) Dr. HOHL.

## Modellvorstellungen zur Dynamik der Auslaugungsprozesse des Zechsteinsalzes in den Saxoniden der DDR<sup>1</sup>

*Mit 13 Abbildungen im Text*

### *Autor:*

Dr. JOSEF KNIESEL  
VEB Hydrogeologie Nordhausen  
55 Nordhausen  
Rothenburgstraße 12

---

Hall. Jb. f. Geowiss. Bd. 5

Seite 49...75

VEB H. Haack Gotha/Leipzig 1980

## Резюме

### *Модельные представления о динамике процессов выщелачивания цехштейновой соли в саксониях ГДР*

В течение естественного выщелачивания соли возникают резервуары грунтовых вод с застойными соляными растворами, в которых жидкость движется только в верхнем участке. Движущей силой функционирования процесса выщелачивания является диффузия из спокойной жидкости в текучую грунтовую воду. Отсюда вытекают следующие выводы: Естественное выщелачивание соли в настоящее время происходит так медленно, что оно исключая остаточные каверны в покрывающих породах не отражается опусканиями местности. При нарушении гидрогеологического режима (горный дренаж) интенсифицируется выщелачивание. После прекращения водозабора первоначальное состояние восстанавливается только через длительное время. Выщелачивание гипса происходит почти только на уровне и выше границы пресной и солёной воды.

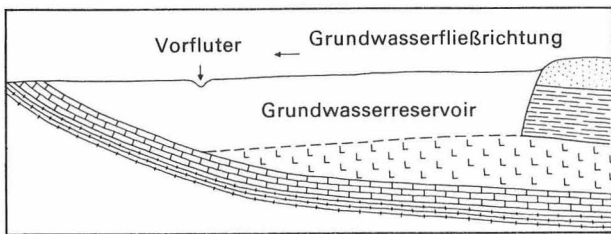
## 1. Einleitung

Die in den leicht löslichen Salzen des Zechsteins im saxonischen Raum der DDR verlaufenden natürlichen und die durch den Bergbau beeinflussten Auslaugungsvorgänge haben insbesondere in den letzten Jahrzehnten verstärkt die Aufmerksamkeit der Wissenschaftler hervorgerufen. Von verschiedener Seite war man bemüht, grundsätzliche Fragen der Auslaugungsprozesse zu klären. Es fehlen aber noch hinlänglich wissenschaftlich fundierte theoretische Vorstellungen über das Wesen und die Gesetzmäßigkeiten der Auslaugung. Mit der vorliegenden Arbeit wird aus hydrogeologischer Sicht ein Beitrag zur Klärung der Dynamik der Auslaugungsvorgänge vorgelegt. Um dieses Ziel zu erreichen, mußten modellmäßig unwesentliche Eigenschaften der Auslaugungsprozesse und -erscheinungen ausgesondert und nur die wesentlichen hervorgehoben werden. In diesem Sinne sieht der Autor die infolge der Salzauflösungsvorgänge entstandenen und für die sich vollziehende Auslaugung bestimmenden hydrogeologischen Verhältnisse.

## 2. Allgemeine hydrogeologische Situation in Auslaugungsgebieten

Im Auslaugungsgebiet hat sich eine Einsturzbekzie gebildet. Durch diese Auflockerung ist ein mehr oder weniger durchlässiger Wasserleiter entstanden, der die Verbindung zwischen Salzkörper und Grundwasser bis zur Erdoberfläche herstellt. In den meisten Fällen handelt es sich also um einen aus zerrüttetem Gips, Anhydrit, Ton- und Schluffstein sowie Sandstein bestehenden Leiter, in dem das Grundwasser bei ausreichendem Gefälle weithin frei zu fließen vermag. Der obere Teil des Wasserleiters kann aus quartären Kiessanden und schluffigen Tonen bestehen. Die Mächtigkeit der Einsturzbekzie und damit des Grundwasserleiters über dem Salzkörper nimmt mit fortschreitender Auslaugung zu.

Das Einsturzgebirge ist bei regulärer Auslaugung und Disgruenz der Phasen im Sinne von WEBER (1929 und 1930) über die gesamte Fläche

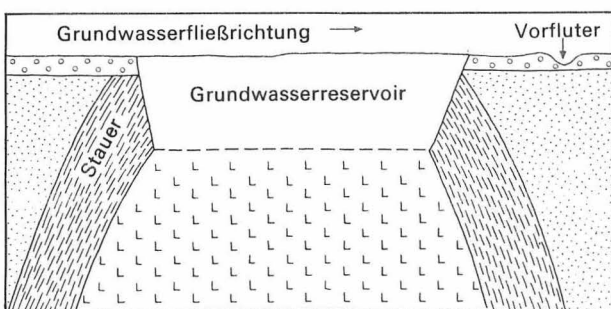


- Einsturzgebirge als gut durchlässiger Grundwasserleiter
- Mittlerer Buntsandstein in ungestörter Lagerung schichtweise als Grundwasserleiter ausgebildet
- Unterer Buntsandstein in ungestörter Lagerung im oberen Teil möglicherweise als Grundwasserleiter ausgebildet
- Leicht lösliche Salze (hauptsächlich NaCl) mit Anhydritschichten, wasserundurchlässig
- Kalkstein, Dolomit oder Anhydrit, möglicherweise örtlich wasserdurchlässig
- Schichten des Präzessionssteins als Grundwasserstauer oder Kluftwasserleiter ausgebildet
- Auslaugungsfläche

Abbildung 1  
Prinzipische Skizze zu den hydrogeologischen Verhältnissen bei Auslaugung mit Disgruenz der Phasen

zwischen ursprünglichem Ausgehenden und dem Innenrand der Auslaugungsfläche verbreitet. Es entstand so ein mit versalzene Grundwasser angefülltes Reservoir, dessen Tiefe entsprechend dem Schichteneinfallen in Richtung Salzkörper zunimmt (Abbildung 1). Die Ränder dieses Beckens sind im allgemeinen undurchlässig, sofern keine hydraulischen Verbindungen über tektonische Störungen und Klüfte oder angrenzende Wasserleiter mit benachbarten Gesteinskomplexen bestehen. Verschiedentlich ist jedoch mit solchen Kommunikationen durch Sandstein-

Abbildung 2  
Prinzipische Skizze zu den hydrogeologischen Verhältnissen bei Auslaugung mit Kongruenz der Phasen



- Grundwasserleiter aus tertiären und pleistozänen Sanden (weitere Zeichenerklärung s. Abbildung 1)

schichten im Buntsandstein (insbesondere im Unteren und Mittleren Buntsandstein) und Rotliegenden oder durch Quartärsedimente im oberen Bereich des Reservoirs zu rechnen. Das Auslaugungsgebiet gibt sich als Niederung mit Hang oberhalb des Innenrandes der Auslaugungsfläche zu erkennen, in der annähernd parallel zur Streichrichtung (bzw. zur Längserstreckung der Auslaugungsfläche) der Vorfluter verläuft. Das bedeutet, das Grundwassergefälle ist meist generell quer zur Auslaugungsfläche gerichtet. Oft befindet sich der Vorfluter nicht mehr unmittelbar über dem Salzkörper, sondern in gewisser Entfernung in Richtung Ausgehendes.

Bei Kongruenz (WEBER 1930) der Phasen ist die Verbreitung des Einsturzgebirges ausschließlich auf den Bereich unmittelbar über dem Salzkörper beschränkt (Abbildung 2). Sie wird im wesentlichen in dem Maße größer, wie sich die Auslaugungsfläche mit fortschreitender Salzauflösung entsprechend dem steilen Einfallen der Schichten in Richtung der Sattelflanken vergrößert. Beide Ränder der Längsbegrenzung des durch die Auslaugung geschaffenen Reservoirs sind sehr steil und verlaufen streng im Streichen der geologischen Struktur. Die das Auslaugungsgebiet kennzeichnende Senke wird oft durch steile Hänge abgeschlossen, sofern nicht infolge halokinetischer Vorgänge an den Sattelflanken Senken entstanden. Kommunikationsmöglichkeiten mit den angrenzenden Wasserleitern ergeben sich auf ähnliche Weise wie bei der Auslaugung mit Disgruenz der Phasen an den Rändern des Reservoirs. Die Vorfluter liegen meist in der Längserstreckung unmittelbar über oder außerhalb der Auslaugungsfläche. Auch hier ist mit einer generellen Grundwasserströmungsrichtung quer zur Streichrichtung zu rechnen.

Die irreguläre Auslaugung wird hier nicht speziell betrachtet, da sie als ein Spezialfall der Auslaugung mit Kongruenz der Phasen angesehen werden kann.

### 3. Die Dynamik des Salztransportes

Die Intensität und die Entwicklung der Auslaugungsprozesse werden ausschließlich durch die Bewegungsvorgänge beim Transport des gelösten



Abbildung 3  
Prinzipskizze zur inaktiven Auslaugung bei Abdichtung der Auslaugungsfläche (s. Abbildung 1)

Abbildung 3  
Prinzipskizze zur inaktiven Auslaugung bei Abdichtung der Auslaugungsfläche

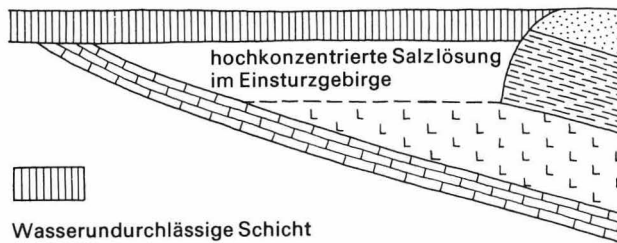


Abbildung 4  
Wasserundurchlässige Schicht (s. Abbildung 1)

Abbildung 4  
Skizze zur Veranschaulichung inaktiver Auslaugung bei Einsturzgebirge ohne hydraulische Verbindung zu fließendem Grundwasser

Salzes bestimmt. Deshalb soll im Folgenden den Fragen im Zusammenhang mit hydrogeologischen Vorgängen, insbesondere mit Grundwasserströmungsmöglichkeiten, breiterer Raum gewidmet werden. Dabei kommt es darauf an, die Haupttriebkraft in ihrer Wirkung und Bedeutung für die Auslaugung herauszustellen.

### 3.1. Betrachtungen über inaktive Auslaugung

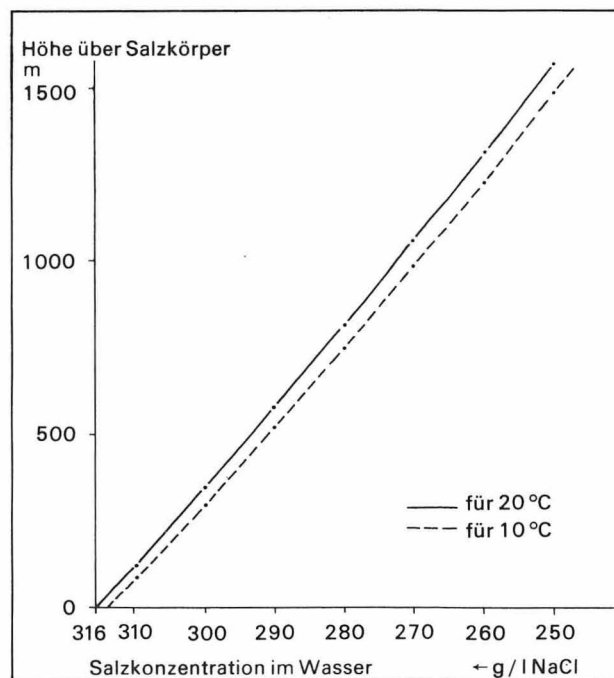
Wie verschiedene Autoren (LÖFFLER 1962 und FULDA 1923/24) annehmen, ist die Auslaugung an einigen Salzspiegeln (beispielsweise am Salzstock von Schönebeck und auf dem Bernburger Plateau) zur Ruhe gekommen. Für derartige Fälle müssen die hydrogeologischen Verhältnisse sich wie folgt verändert haben:

- Die frühere Auslaugungsfläche wurde vollständig durch Einsturzgebirge abgedichtet, so daß kein Wasser mehr an den Salzkörper gelangen kann (Abbildung 3), oder
- die gesättigte Sole über dem festen Salz hat jegliche hydraulische Verbindung zu dem fließenden Grundwasser verloren, eventuell infolge Überlagerung durch junge undurchlässige Sedimente (Abbildung 4).

Wenn dem Wasser der Kontakt mit dem Salz durch eine dichte, auch für den Diffusionsstrom undurchdringliche Decke verwehrt ist, findet keinerlei Salzauflösung mehr statt. Die über der wasserdichten Schicht befindliche restliche Salzlösung aus der Zeit aktiver Auslaugung wird bei Vorhandensein ausreichender Kommunikation und entsprechend hohem hydraulischem Gefälle

mit dem Grundwasserstrom mehr oder weniger schnell in die benachbarten Vorfluter transportiert, so daß dieser Bereich allmählich aussüßt. Wird hierbei die gesamte Flüssigkeit bis an die Basis hydraulisch bewegt, dann dürfte der Aussüßvorgang je nach den konkreten Bedingungen in Jahrzehnten oder ungünstigenfalls in Jahrhunderten abgeschlossen sein. Wenn jedoch im unteren Teil des Flüssigkeitsbeckens eine mächtigere, stagnierende, restliche Salzlösung vorhanden ist, kann der Transport des gelösten Salzes teilweise nur auf dem Wege der Diffusionsströmung

Abbildung 5  
Konzentration der Salzlösung in Abhängigkeit von der Höhenlage über der Auslaugungsfläche bei Inaktivität der Auslaugung (in Auswertung der Barometrischen Höhengleichung)



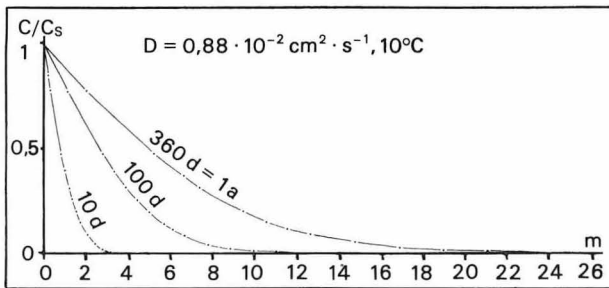


Abbildung 6  
Zeitlich-räumliche Ausbreitung des Diffusionsprozesses  
im freien Flüssigkeitsraum  
(in Auswertung der 2. FICKSchen Gleichung  
D Diffusionskoeffizient  
C<sub>s</sub> Sättigungskonzentration für NaCl)

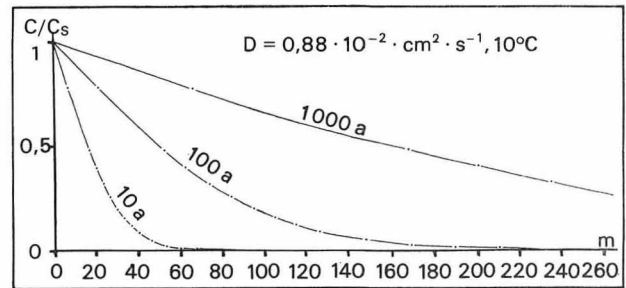


Abbildung 6a  
Zeitlich-räumliche Ausbreitung des Diffusionsprozesses  
im freien Flüssigkeitsraum

vor sich gehen. Bei solchen Verhältnissen muß man mit langen Aussüßungszeiten rechnen, die Jahrtausende betragen können. Sie werden verhältnismäßig kurz sein, wenn die Salzlösung nur geringmächtig ist und/oder das darüber fließende Grundwasser sich schnell bewegt. Infolge der Diffusion aus dem Salzwasser in den Bereich des aktiven Grundwassers bildet sich ein durchschnittliches Konzentrationsgefälle, das in Abhängigkeit von der Zeit nach der Unterbindung der Auslaugung immer flacher wird. Dabei nehmen die Salzgehalte in der stagnierenden Salzlösung von oben nach unten nicht linear, sondern mit zunehmender Teufe immer weniger zu, ohne die Sättigungskonzentration zu erreichen.

An nähernd gleichzeitig mit der Bildung der die Auslaugung unterbindenden Deckschicht auch die Verbindung der Salzlösung mit dem fließenden Grundwasser zerstört wird, der Kontakt zwischen Sole und festem Salz aber erhalten bleibt. In diesem Falle muß man für das nun völlig abgeschlossene Reservoir mit einer fast gleichmäßigen Verteilung der NaCl-Gehalte im stagnierenden Grundwasser rechnen, die als Folge von Diffusionsprozessen je nach Mächtigkeit und ursprünglicher Konzentrationsverteilung im Verlaufe von Jahrhunderten und Jahrtausenden entsteht. In der Vertikalen bleibt als Endstadium eine geringe, kaum merkliche Konzentrationszunahme mit wachsender Teufe bestehen, die sich entsprechend der barometrischen Höhengleichung einstellt. Die Auslaugung hält nur so lange an, bis dieser Gleichgewichtszustand hergestellt ist und die gesamte Flüssigkeit in dem abgeschlossenen Becken Gehalte in Nähe

der Sättigungskonzentration angenommen hat (Abbildung 5). Die Versalzung verläuft zeitlich proportional zur Diffusionsfläche sowie in Abhängigkeit von der Wurzel aus dem Betrag der Mächtigkeit. Bis zu ihrer Beendigung können sehr lange Zeiten vergehen. Aus Abbildung 6 und 6a geht hervor, daß dazu bei größeren Mächtigkeiten selbst im freien Flüssigkeitsraum Jahrtausende erforderlich sind. Unter Berücksichtigung der im Gestein für den Diffusionsstrom vorhandenen Widerstände vervielfacht sich die Zeit bis zum Erreichen der annähernden Sättigungskonzentration in allen Teilen des Reservoirs. Die Auslaugungsintensität nimmt nach der Zerstörung der hydraulischen Verbindung zum aktiven Grundwasser in Abhängigkeit von der Zeit exponentiell ab, da die Diffusionsvorgänge anfangs noch verhältnismäßig schnell verlaufen, später aber mehr und mehr abklingen und sich letztlich dem Ruhezustand nähern.

### 3.2.

#### *Darlegung zur aktiven Auslaugung*

Es gibt bekanntlich gegenwärtig im humiden Klima Mitteleuropas keine Salzsichten mehr, die zutage treten und der Erosion zugänglich sind. Die meisten Salzvorkommen setzen in dem zu behandelnden Gebiet erst in einer Tiefe zwischen 100 und 300 m unter der Erdoberfläche ein und sind durch Grundwasser auflösbar. Für die nachfolgenden Betrachtungen ist es aus Gründen der Systematisierung und unterschiedlichen Beurteilung wichtig zu unterscheiden, ob sich die Aus-

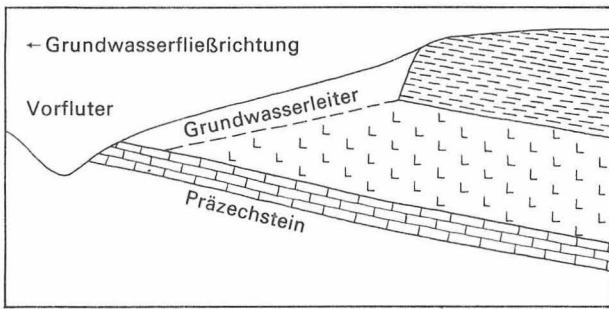


Abbildung 7  
Auslaugungsfläche in Position I bei Zunahme der Grundwassergeschwindigkeit in Richtung des Vorfluters (Zechstein- und Präzechsteinschichten unter den leicht löslichen Salzen sind in Nähe der Geländeoberfläche Grundwasserleiter)



Abbildung 8  
Auslaugungsfläche unterhalb der sie umrahmenden Grundwasserstauer (Position II)

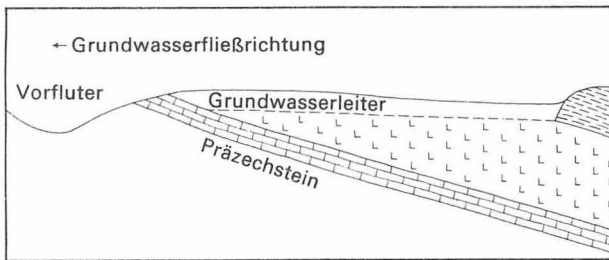


Abbildung 7a  
Auslaugungsfläche in Position I bei gleichbleibender Grundwassergeschwindigkeit

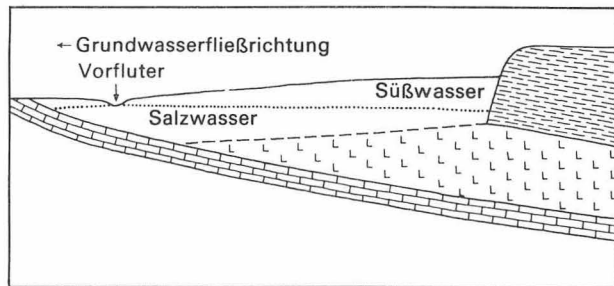


Abbildung 8a  
Auslaugungsfläche tiefer als das Vorfluterniveau (Position II)

laugungsfläche in einem Höhenniveau oberhalb der sie umrahmenden Grundwasserstauer entsprechend Abbildung 7 oder unterhalb bzw. tiefer als die Vorfluter (wie in Abbildung 8) befindet. In jedem Falle gilt jedoch, daß am festen Salz auf lange Sicht nur so viel aufgelöst wird, wie durch den Grundwasserstrom aufgenommen und in die Vorfluter weggeführt werden kann. Dabei spielen die kinetischen Eigenschaften der Salzlösung eine entscheidende Rolle. Die Salzauflösung hängt in bestimmendem Maße von den Diffusionsmöglichkeiten ab. Deshalb kann man die Auslaugungsprozesse nur dann mit ausreichender Präzision erklären, wenn man sie im Wechselspiel zwischen Diffusions- und Grundwasserströmung betrachtet.

### 3.2.1.

#### *Auslaugung im Höhenniveau oberhalb der umrahmenden Grundwasserstauer und der Vorfluter*

Ragt der feste Salzkörper im Untergrund noch über das oben genannte Niveau (im folgenden als Po-

sition I bezeichnet) heraus, kann die sich an der Auslaugungsfläche bildende schwere Sole zumindest teilweise ungehindert in Richtung Oberflächengewässer abfließen. Da der Lösungsvorgang durch die Diffusionsgeschwindigkeit bestimmt wird, geht die Auslaugung in Bereichen mit relativ hoher Grundwassergeschwindigkeit infolge guter Durchlässigkeit des Gesteins oder hohen hydraulischen Gefälles und bei kleinen Formationswiderständen besonders intensiv vor sich. So entsteht bei Inhomogenität des Wasserleiters eine unebene, mehr oder weniger stark in Richtung des Grundwassergefälles in Rinnen gegliederte Auslaugungsfläche. Diese Reliefbildung wird durch Zerrüttung im Salzkörper, durch tektonische Störungen u. dgl. begünstigt; denn die Auflösungsgeschwindigkeit ist u. a. auch der Oberfläche des Salzes direkt proportional. Auflockerungen des Salzgesteins bedeuten aber Vergrößerung der den Lösungsvorgängen ausgesetzten Oberfläche. Obwohl die genannten Inhomogenitäten und Faktoren in begrenztem Ausmaße eine unterschiedlich weit in die Tiefe fortschreitende Auflösung auf dem festen Salz bedingen, wirken sich diese Un-

regelmäßigkeiten im allgemeinen nicht so extrem aus, daß große Teile an der Oberfläche des Salzkörpers bei speziellen hydrogeologischen Verhältnissen (beispielsweise Überdeckung durch undurchlässige Schichten) von der Auslaugung für längere Zeit verschont bleiben. Aus dem Solbetrieb ist bekannt, wie sich die Salzauflösung in Gräben nach der Seite vorarbeitet, weil die nach unten sinkende hochkonzentrierte und schwere Sole die unteren Partien vor zu rascher Auslaugung zu schützen vermag. So wird auch bei den natürlichen Auslaugungsvorgängen in Position I früher oder später der gesamte Salzkörper an seiner Oberfläche ergriffen. Sobald sich das Einsturzgebirge gebildet hat, erfolgt eine Beschleunigung der Auflösung durch Kluftbildung auch an Stellen mit ursprünglich undurchlässiger Decke.

Entsprechend den chemischen und physikalischen Grundlagen läßt sich schlußfolgern, daß an jeder Stelle des festen Salzes nur so viel aufgelöst wird, wie auf dem Wege der Diffusion in das Grundwasser gelangen kann. Das bedeutet, der Grundwasserstrom transportiert bei Verlassen der Auslaugungsfläche diejenige Menge Salz in gelöstem Zustand weg, die er in der Zeit seit Erreichen des Salzkörperbereiches als Süßwasser über die Diffusion aufzunehmen vermochte. In welchem Ausmaße die Auslaugung dabei möglich ist, hängt entscheidend vom Abstand zwischen Süß-/Salzwassergrenze und der Auslaugungsfläche bzw. vom Konzentrationsgefälle ab. Wäre mit einer horizontalen Auslaugungsfläche zu rechnen, dann müßte die Süß-/Salzwassergrenze in homogenem Wasserleiter entsprechend dem 2. FICKSchen Gesetz bei vertikal und horizontal gleichbleibender Fließgeschwindigkeit über dem Salz einen mit der Grundwasserfließrichtung ansteigenden regelmäßig parabolischen Verlauf annehmen. Eine solche Situation kann jedoch nicht als beständig angesehen werden, weil dabei infolge Verringerung des Diffusionsgefälles in Bewegungsrichtung des Grundwassers die Salzauflösung abnehmen würde und eine räumlich und zeitlich zunehmende entgegengerichtete Neigung der Auslaugungsfläche entstände. Es muß vielmehr mit im wesentlichen stationären Verhältnissen unter Bedingungen gerechnet werden, die die weitere Zunahme dieser Neigung nicht mehr zulassen, d. h., in allen Teilen der Auslaugungsfläche lösen sich in der Zeiteinheit annähernd gleiche Salzmenge auf. Dieser Zu-

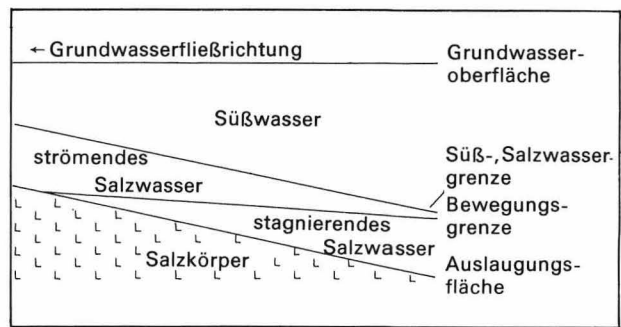


Abbildung 9  
Prinzipische Skizze zur Erläuterung der Auslaugungsverhältnisse in Position I

stand ist nur möglich, wenn in Fließrichtung die Grundwassergeschwindigkeit rasch zunimmt oder in umgekehrter Richtung das feste Salz mehr und mehr durch stagnierende hochkonzentrierte Salzlösung vor zu schneller Auflösung geschützt wird, so daß hier längere Diffusionswege bzw. kleinere Konzentrationsgefälle im Vergleich zu den oben geschilderten Bedingungen bei parabolischem Verlauf der Süß-/Salzwassergrenze vorhanden sind. Dabei bleibt der Abstand zwischen Süß-/Salzwassergrenze und Auslaugungsfläche bei konstanter Grundwassergeschwindigkeit und Homogenität des Salzgesteins über lange Zeiten in allen Teilen gleich groß. Selbstverständlich bewirken Unregelmäßigkeiten der Formationswiderstände, der Durchlässigkeit und des Grundwassergefälles ein variiertes, von dem geschilderten simplifizierten Zustand abweichendes Auslaugungsgeschehen. Auch im instationären Anfangsstadium können von den entwickelten Vorstellungen abweichende Bedingungen gelten. Für den stationären Auslaugungsvorgang in Position I jedoch darf man im allgemeinen annehmen, daß die Auslaugungsfläche und die Süß-/Salzwassergrenze generell entgegengesetzt zur Grundwasserfließrichtung einfallen und sich über dem Salzgestein hauptsächlich im tiefsten Teil stagnierende Sole befindet (Abbildung 9). Die Steilheit des Gefälles der Salzoberfläche und der Grenzfläche zwischen Süß- und Salzwasser wird weitgehend von der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers bestimmt, d. h., schnelle Grundwasserströmung bedingt hohe Neigung.

Eine im Ausnahmefall in Grundwasserfließrichtung einfallende Auslaugungsfläche läßt sich nur durch beträchtliche Zunahme der Grund-

wassergeschwindigkeit (beispielsweise bei ausgeprägtem Geländere relief in Nähe eines Vorfluters) erklären, so daß die lösungskinetisch bedingten Auslaugungsunterschiede nicht nur ausgeglichen werden können, sondern sich eine entgegengesetzte Tendenz bemerkbar macht.

Die über jedem Teil (Flächeneinheit) der Auslaugungsfläche im Grundwasser je Zeiteinheit weggeführte Salzmenge beträgt nach dem 1. FICKSchen Gesetz:

$$n = D' \cdot \frac{cs}{x}$$

x: Abstand zwischen Auslaugungsfläche mit der Sättigungskonzentration  $cs$  und Süß-/Salzwassergrenze,  $D'$ : Diffusionskoeffizient als Mittelwert aus den Werten verschiedener Konzentration unter Beachtung des Formationswiderstandes.

Das Grundwasser verläßt den Salzkörper mit einer Salzlaster von insgesamt  $v \cdot x \cdot c \cdot a$  je Längeneinheit der Breite des Grundwasserstroms, wenn  $v$  die Fließgeschwindigkeit,  $c$  die mittlere Konzentration der Lösung und  $a$  das Hohlräumvolumen bedeutet. Nach dem 2. FICKSchen Gesetz vergrößert sich der Diffusionsweg in Abhängigkeit vom Quadrat der Zeit. Für die Beurteilung der Auslaugungsprozesse in Position I bedeutet dies, daß unter sonst gleichen hydrogeologischen Bedingungen ein schmaler Salzkörper bei Überquerung durch den Grundwasserstrom schneller ausgelaugt wird als ein breiter. Je länger das Grundwasser zum Überfließen der Auslaugungsfläche benötigt, desto größer werden die durchschnittlichen Diffusionswege. Damit ergibt sich eine Verringerung der Auslaugungsintensität. Deshalb ist anzunehmen, daß auch die Lage der Grundwasserfließrichtung zur geometrischen Berandung der Auslaugungsfläche und das Einfallen der Salzsichten für die Einschätzung der Auflösungs geschwindigkeit von Bedeutung sind. In allen Fällen wird die kürzeste Überquerung die günstigsten Auslaugungsmöglichkeiten bieten.

### 3.2.2.

#### *Auslaugung unterhalb der umrahmenden Grundwasserstauer oder des Vorfluterniveaus*

Wesentlich komplizierter verlaufen die Auslaugungsprozesse, wenn der Salzkörper bereits weit unter das Vorfluterniveau oder die Grundwasserstauer der Umrandung des Beckens (im folgenden

als Position II bezeichnet) aufgelöst worden ist. Daß an den meisten bis in größere Tiefe ausgelaugten Salzsichten auch heute noch Lösungsvorgänge stattfinden, darüber besteht kein Zweifel. Da es sich in fast allen Auslaugungsgebieten der Zechsteinsalze um diesen Typ handelt, bemüht sich der Verfasser nachfolgend, insbesondere die entsprechenden Prozesse zu analysieren und seine Ansichten darüber darzulegen.

### 3.2.2.1.

Vorstellungen über die Kräfte für den Transport des gelösten Salzes

Vielfach wird angenommen, die Flüssigkeit bewege sich infolge hydraulischen Druckes unmittelbar an dem Salzkörper vorbei, löse diesen durch dauernde Zufuhr von Süßwasser mehr oder weniger stetig auf und fließe dann als Salzlösung zur Quelle oder zu einem Vorfluter. Wir wollen nun zu klären versuchen, unter welchen Bedingungen dies möglich ist. Dabei soll davon ausgegangen werden, daß die Salzzufuhr in gelöstem Zustand letztlich von Diffusionsvorgängen geregelt wird und bei gleichbleibenden Verhältnissen stationär verläuft.

Wenn man annimmt, bei der Auslaugung fließe das Grundwasser direkt an dem festen Salz vorbei, dann muß irgendwo am Salzrand oder über dem Salzkörper grundwasserstromaufwärts Süßwasser bis in das Höhenniveau der Auslaugungsfläche vordringen. Diese Schlußfolgerung ergibt sich, wenn man bedenkt, daß die Diffusionsströmung keinesfalls ausreicht, um selbst bei langsamer Grundwasserbewegung und längeren Zeiten dies zu verhindern. Wie bei Betrachtung der Abbildung 6 zu erkennen ist, verläuft die Diffusion im freien Flüssigkeitsraum beispielsweise nur mit folgenden Geschwindigkeiten:

1 Jahr ca. 20 m

10 Jahre ca. 80 m

100 Jahre ca. 240 m

Die hier aus Abbildung 6 entnommenen Werte beziehen sich auf äußerst geringe Konzentrationen bzw. sehr hohe Diffusionsgefälle. Höhere Salzgehalte sind in den angegebenen Entfernungen vom festen Salz erst viel später zu erwarten. Unter Berücksichtigung der Formationswiderstände muß eine weitere beachtliche Verringerung der Diffusionsgeschwindigkeit angenommen werden. Die



Versalzung des bewegten Grundwassers in der beschriebenen Situation ist also selbst bei kleinsten Strömungsgeschwindigkeiten und beträchtlichen Kontaktzeiten nur bis zu einer Entfernung von der Auslaugungsfläche im Dezimeter- bis Meterbereich möglich und muß zu Beginn (am Anfang des Kontaktes zwischen Süßwasser und Salz) gleich Null sein.

Wenn die Flüssigkeit unmittelbar am festen Salz entlangfließt, hat sie sich hauptsächlich in ihrem untersten Teil bis zum Erreichen des stromabwärts gelegenen Bereichs des Salzkörpers stark mit gelöstem Salz angereichert und stellt an der Basis eine hochkonzentrierte bis annähernd gesättigte Lauge dar. Um die Bewegung der Flüssigkeit an der Auslaugungsfläche aufrecht erhalten zu können, muß diese schwere Lauge (Dichte rd. 1,2) bis in das Niveau oberhalb der das Reservoir umrandende Grundwasserstauer bzw. der Vorfluter gehoben werden. Welche Voraussetzungen sind dafür gegeben? Um diese Frage detaillierter beantworten zu können, stelle man sich die Entwicklung der Strömungsverhältnisse beim Absinken der Auslaugungsfläche in die Position II vor. Im Vergleich zur Position I ist mit folgenden Veränderungen zu rechnen:

a) Die Mächtigkeit des Wasserleiters wird größer, und es erweitert sich die Durchflußfläche mit zunehmender Teufenlage des festen Salzes.

b) Infolge der Vergrößerung der Durchflußfläche verringert sich bei gleichbleibenden Niederschlags- bzw. Grundwasserneubildungsmengen das Grundwassergefälle.

c) Gefälleabnahme bedeutet Verlangsamung des Grundwasserstromes und Verlängerung der Diffusionszeit. Folglich nimmt die Höhe der Zone hochkonzentrierter Salzlösung in Nähe der Auslaugungsfläche geringfügig zu.

d) Dadurch ist eine relative Zunahme der Viskosität im unteren Teil des Grundwasserstromes und eine abermalige Verringerung des hydraulischen Gefälles und Verlangsamung bedingt.

e) Es muß eine vom Salzkörper bis zum unter- oder oberirdischen Abfluß im Vorfluterniveau oder bis über die Obergrenze der undurchlässigen Umrandung reichende, in ihrer Mächtigkeit zeitlich zunehmende Säule schwerer (Dichte rd. 1,2) Lauge bewegt werden.

Von entscheidender Bedeutung für das Grundwasserverhalten in den tiefsten Partien des Reser-

voirs sind die unter e) genannten Bedingungen. Dazu vergegenwärtige man sich den gedachten Grundwasserstrom, der in Oberstrom mit Süßwasser bis an den Salzkörper heranreicht und Unterstrom fast gesättigte Sole bewegen müßte. Sobald die Auslaugungsfläche nur um einen geringen Betrag unter die Umrandung oder das Vorfluterniveau hinabsinkt, wird die am unteren Rande des Reservoirs befindliche Flüssigkeitssäule infolge Zunahme an hochkonzentrierter Salzlösung schwerer. Das bedeutet, für die gleichbleibende Bewegung auch der tiefsten (hochkonzentrierten) Teile des Grundwassers wird eine Erhöhung des hydraulischen Gefälles erforderlich. Gelangt die Auslaugungsfläche um  $a$  Meter unter das genannte Niveau, müßte sich die bis nahe an das Salz reichende Süßwassersäule im Oberstrom um rd.  $1,2 a$  Meter erhöhen, wenn die untersten Partien der Flüssigkeit mit gleichbleibender Geschwindigkeit in Bewegung bleiben sollen. Die Erhöhung des Grundwassergefälles ist aber bei sonst im wesentlichen unveränderten hydrogeologischen Verhältnissen nur infolge Zunahme der Niederschlags- bzw. Grundwasserneubildungsmenge möglich. Wie wir oben sahen, verursacht der Auslaugungsvorgang selbst weitere Gefällever-schlechterungen, die ebenfalls kompensiert werden müßten. Da mit ausreichenden Niederschlags-änderungen nicht zu rechnen ist, können geologisch kurzzeitige und anhaltende Gefälleverbesserungen nicht erwartet werden. Alle Überlegungen führen vielmehr zu der Schlußfolgerung, daß sehr bald nach Erreichen der Position II die schwere Salzlösung im unteren Teil der Flüssigkeit zur Ruhe kommt. Die unter a) bis d) geschilderten Veränderungen wirken alle in diesem Sinne. Sie modifizieren und beschleunigen den Beruhigungsablauf. Beispielsweise genügt ein  $a$  von 10 m bereits, um bei angenommener horizontaler 1 000 m breiter Auslaugungsfläche und dem Grundwassergefälle von 2% die Salzlösung im unteren Teil zur Stagnation zu bringen.

Diese Vorstellung läßt sich auch eindeutig durch Betrachtungen über die Dynamik der gleichzeitigen Bewegung von süßem und salzhaltigem Grundwasser im Zusammenhang mit den Diffusionsmöglichkeiten als Regler des Salznachschubs beweisen. Ausgehend von hydraulischen Grundlagen kann man feststellen, daß das Gefälle  $\left(\frac{dz}{dx}\right)$  der

Süß-/Salzwassergrenze bei Ruhe des salzhaltigen Grundwassers einer bestimmten Konzentration am größten ist und mit Bewegung des Salzwassers bis zum Erreichen der größtmöglichen Geschwindigkeit  $\left(\frac{dz}{dx} = 0\right)$  abnimmt. Für die hochkonzentrierte Salzlösung bedeutet dies, die Trennfläche muß bei Strömung flacher als  $\frac{dz}{dx} = 5 \frac{dhf}{dx}$ , also mit geringerer Neigung als das Fünffache des Grundwassergefälles verlaufen. Bei einem hydraulischen Gefälle des Süßwassers von beispielsweise 2/1000 ist dann  $\frac{dz}{dx} < \frac{10}{1000}$  d.h., 1000 m vom Vorfluter entfernt liegt die Süß-/Salzwassergrenze weniger als 10 m unter dem Vorfluterniveau. Nur wenn diese Voraussetzungen gegeben sind, läßt sich ein solches hydrodynamisches System erhalten. Sobald die Diffusionsmöglichkeiten nach der 2. FICKSchen Gleichung nicht mehr ausreichen, die entsprechenden Druckverhältnisse aufrecht zu erhalten, können also die hochkonzentrierten Salzlösungen nicht mehr gehoben werden und kommen zur Ruhe. Die Diffusionsbedingungen sind in dieser Hinsicht aber als sehr ungünstig anzusehen. Wie auf Abbildung 6 zu erkennen ist, muß der Salztransport zur Aufrechterhaltung des hydrodynamischen Systems bzw. als Ersatz für abfließende Salzlösungen bei geringem Konzentrationsgefälle (hochkonzentrierte Lauge bis zur Süß-/Salzwassergrenze) außerordentlich klein veranschlagt werden. Nimmt man an, in Grundwasser oberstrom wirke eine Salzlösung mit größeren Konzentrationsunterschieden, dann müßte zur Erhaltung der Druckverhältnisse eine höhere Salzwassersäule (flacherer Verlauf der Süß-/Salzwassergrenze) vorhanden sein. Für diesen Fall verlängert sich der Diffusionsweg, so daß der Salztransport auch hier nicht beschleunigt und der hydraulische Druck im Vergleich zu Unterstrom nicht erhöht wird. Außerdem könnte diese Salzwassersäule, wie wir oben bereits feststellten, in fließendem Grundwasser günstigenfalls mit einer Höhe im Meterbereich entstehen und somit lediglich kurzzeitig beim Übergang der Auslaugungsfläche zur Position II im Sinne der Erhaltung der geschilderten Druckverhältnisse betrachtenwert beitragen.

Unter Beachtung aller physikalischen und chemischen Gesichtspunkte läßt sich feststellen, daß

der normalerweise in Position I vorhandene Bereich stagnierender Lauge mit abnehmender Grundwassergeschwindigkeit immer größer wird und sehr bald nach Erreichen der Position II die gesamte Auslaugungsfläche einnimmt, wobei sich die Neigung der Salzoberfläche verringert, aber zunächst ihre Richtung beibehält.

Gegen die Annahme der Grundwasserbewegung in Nähe des festen Salzes bei Position II sprechen zusammengefaßt folgende Fakten:

a) Es fehlen das hydraulische Gefälle für die Hebung der Salzlösung und das Diffusionspotential zur Erhaltung des erforderlichen Druckes.

b) Das Vorhandensein von Salzspiegeln im Sinne von FULDA (1923/24) in einer Anzahl von Auslaugungsgebieten läßt die Vorstellung aktiven Grundwassers an der Auslaugungsfläche nicht zu, da infolge des nahen Kontaktes mit dem Süßwasser grundwasserstromaufwärts ein Salzhang entstanden sein müßte.

c) Entsprechend der oben beschriebenen, sich durch die Auslaugungsprozesse einstellenden hydrogeologischen Situation würde als Auslaugungsfläche bei Disgruenz der Phasen ein in Richtung des Schichteneinfallens geneigter Salzhang (FULDA 1923/24) gebildet worden sein. Wie wir sahen, fließt das Grundwasser heute meist quer zur Auslaugungsfläche in Richtung des Zechsteinausgehenden. Die am tiefsten fortgeschrittene Salzauslaugung müßte also bei nahem Kontakt mit Süßwasser am Innenrand des festen Salzes deutlich werden. Die bekannten Salzhänge haben aber Neigungen in entgegengesetzter Richtung.

d) Bei Grundwasserbewegung in der gesamten Mächtigkeit des Reservoirs würde auch hochkonzentrierte Sole gehoben und irgendwo als Quelle oder unterirdischer Zufluß in oberflächennahes Grundwasser bzw. offenes Gewässer austreten. Derartig schwere strömende Salzlösungen wurden jedoch bisher in so hohem Niveau nicht festgestellt.

Da das hydraulische Potential für den Transport der hochkonzentrierten Sole nicht ausreicht, breitet sie sich infolge ihrer hohen Dichte an der Basis des gesamten Reservoirs mit mehr oder minder großer Mächtigkeit aus (Abbildung 8). Der obere, fließende Teil des Grundwassers nimmt jedoch in seinen unteren Partien ständig durch die Diffusion ergänzte Salzlösung von im allgemeinen relativ geringem Gehalt mit.

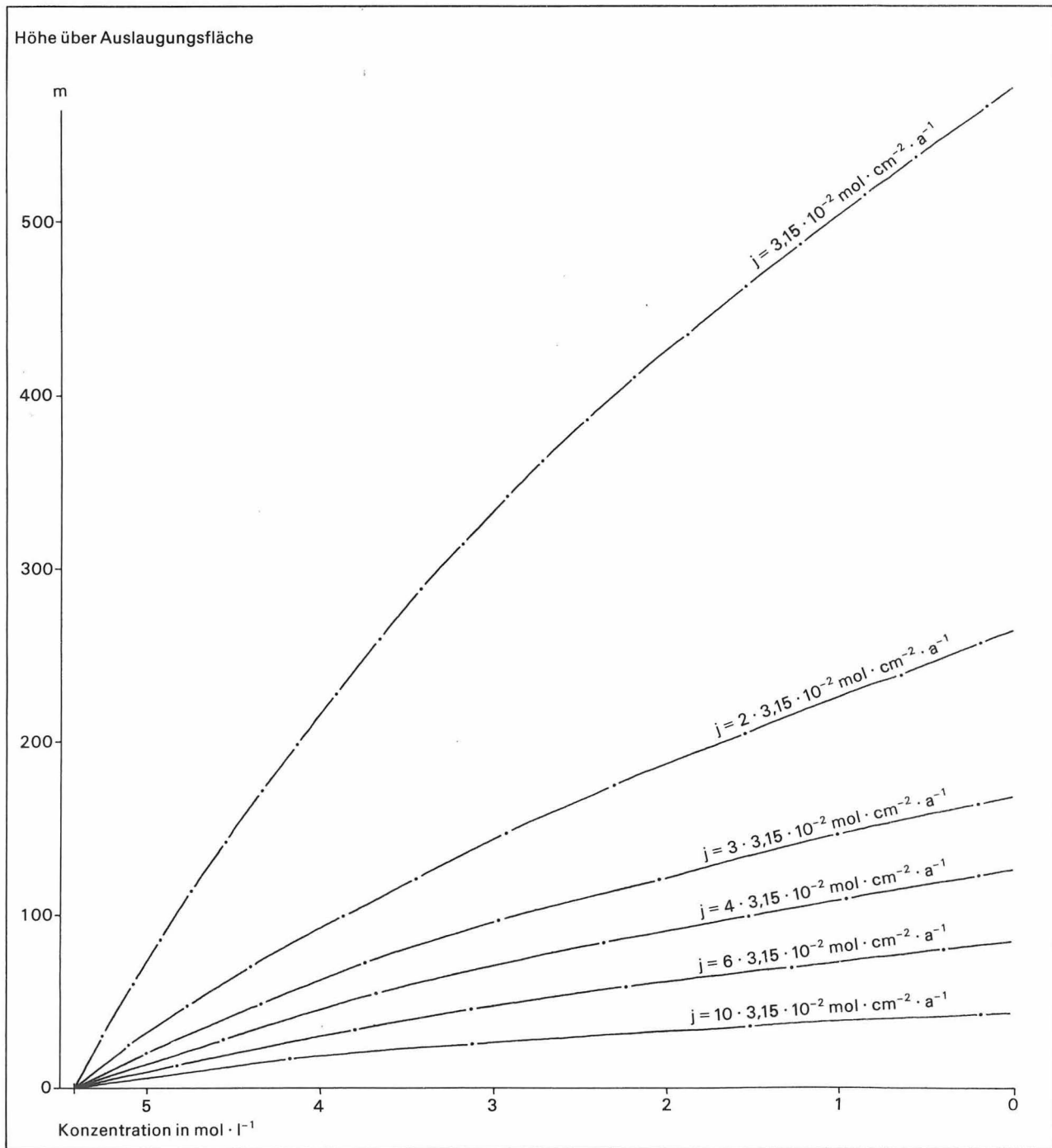


Abbildung 10  
 Konzentrationsverlauf über der Auslaugungsfläche für freien Flüssigkeitsraum unter Beachtung der Wirkung der Schwerkraft (vgl. BECKER 1955) und der Veränderlichkeit des Diffusionskoeffizienten mit der Temperatur und der Konzentration  
 $j$  = Diffusionsstrom

Im folgenden seien zunächst ideale Verhältnisse angenommen. Wir wollen von einem Reservoir mit hydraulisch und bezüglich des Diffusionsgeschehens homogenem Wasserleiter gleichbleibender Mächtigkeit ausgehen, der sich nur bis zu den Rändern einer horizontalen Auslaugungsfläche erstreckt. Unter solchen Bedingungen würde in

dem stationär verlaufenden Diffusionsstrom zwischen festem Salz und Grenzfläche eine stetige Konzentrationsänderung vorhanden sein, die hinsichtlich der Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten von der Temperatur und der Konzentration der Salzlösung sowie der Wirkung der Schwerkraft variiert wäre. Könnte man mit einem von der

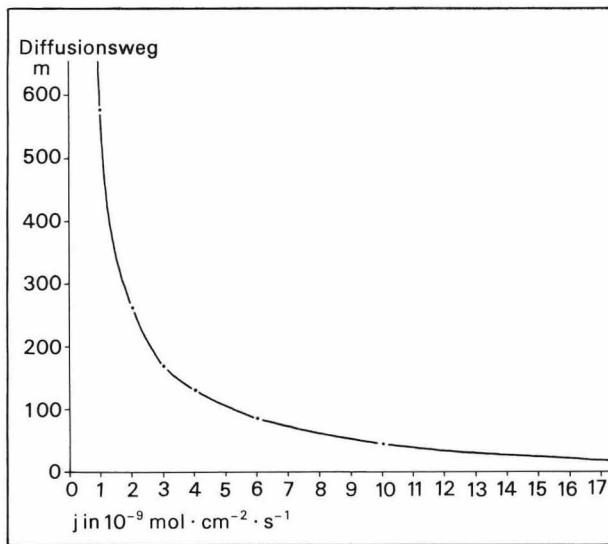


Abbildung 11  
Diffusionsstrom in Abhängigkeit vom Diffusionsweg zwischen Auslaugungs- und Grenzfläche (Süß-/Salzwassergrenze) für freien Flüssigkeitsraum

Konzentration unabhängigen Diffusionskoeffizienten rechnen, wären bei im wesentlichen gleichbleibender Temperatur und nur kleinen Unterschieden des Einflusses der Schwerkraft mit der Tiefe fast linear zunehmende Salzgehalte zu verzeichnen. Da jedoch solche Voraussetzungen nicht oder nur für kleine Strecken des Diffusionsstromes annähernd gegeben sind, erlauben derartige Betrachtungen lediglich ein Erkennen von Tendenzen. Bei Feststellungen über den Konzentrationsverlauf im Salzwasserreservoir muß man vielmehr folgende Zusammenhänge berücksichtigen:

- Mit zunehmender Tiefenlage der Auslaugungsfläche wird der Diffusionskoeffizient infolge Temperaturerhöhung für die Lösung in Nähe des Salzkörpers größer.

- Diese Entwicklung bedingt eine ständig wachsende Diffusionsgeschwindigkeit an der Basis des Reservoirs im Vergleich zu den oberflächennahen Teilen.

- Dadurch vollzieht sich im unteren Bereich des Beckens eine stetige Verringerung des Konzentrationsgefälles zur Erhaltung des annähernd stationären Zustandes, indem die Gehaltsunterschiede je Meter Entfernung immer mehr abnehmen. Diese Verringerung tritt zusätzlich zu der sich durch den wachsenden Abstand zwischen der genannten Grenzfläche und Auslaugungsfläche in höherem Maße ergebenden Verkleinerung des Diffusionsgefälles auf. Eine weitere Folge davon ist die Er-

höhung der Diffusionsgeschwindigkeit im oberen Teil des Beckens, so daß, bezogen auf die Gesamtlänge des Diffusionsstromes, ein höherer durchschnittlicher Salztransport als bei räumlich gleichbleibender Temperatur zustande kommt.

Ausgehend vom Barometrischen Höhengesetz in Verbindung mit den FICKSchen Gesetzen wurden diese Verhältnisse für den freien Flüssigkeitsraum unter Beachtung des Einflusses der Schwerkraft in Abbildung 10 dargestellt. Dabei lag eine geothermische Tiefenstufe von 25 m zugrunde. Die Kurven sind durch stufenweises Verändern der Temperatur und der Diffusionskoeffizienten entsprechend der Salzkonzentration und der Temperatur gewonnen worden, d. h., im Höhenabstand von ca. 25 m wurden jeweils andere Werte eingesetzt.

Abbildung 10 verdeutlicht die bereits dargelegten Feststellungen über den Konzentrationsverlauf. Sie veranschaulicht weiterhin, daß die Diffusionsmenge mit wachsendem Diffusionsweg exponentiell abnimmt. In Abbildung 11 ist zu erkennen, wie sich bis zu einem Diffusionsweg von ca. 150 m die Diffusionsmenge rasch mit Abnahme des Konzentrationsgefälles verringert, bei größeren Entfernungen jedoch nur noch allmählich ändert.

Bei Untersuchungen bezüglich des Diffusionsverhaltens im Gestein muß der Formationswiderstand  $F$  berücksichtigt werden. Die Werte für  $j$  in den Abbildungen 10 und 11 sind beispielsweise unter Annahme eines  $F$  von 100 auf ein Hundertstel zu reduzieren.

### 3.2.2.2.

Die Bewegungsgrenze und die Süß-/Salzwassergrenze

Die Grenze zwischen ruhendem und bewegtem Grundwasser (im folgenden als Bewegungsgrenze bezeichnet) stellt sich als Strömungslinie im Sinne des darüber fließenden Salzwassers ein. Sie steigt bis zur Höhe des Vorfluters oder der Oberkante der undurchlässigen Umrandung in Fließrichtung an. Über ihre Neigung erhält man eine Vorstellung bei Berücksichtigung der hydraulischen Zusammenhänge. Danach besteht folgende Beziehung:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{dh_f}{dx} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f}$$

Allerdings muß in diesem Zusammenhang  $\rho_f$  (Dichte der leichteren Flüssigkeit) als Mittelwert unter Einbeziehung des strömenden Salzwassers der Übergangszone und des Süßwassers sowie  $\rho_s$  (Dichte der schwereren Flüssigkeit) als durchschnittliche Dichte der stagnierenden Flüssigkeit angesehen werden. Aus der Formel ist zu erkennen, daß die Neigung der Bewegungsgrenze bei kleinem

Grundwassergefälle  $\frac{dh_f}{dx}$  ebenfalls gering wird, durch Verringerung des Unterschiedes zwischen  $\rho_f$  und  $\rho_s$  aber zunimmt. Es vergrößert sich  $\rho_s$  mit dem Absinken der Auslaugungsfläche in Position II. Im Zuge fortschreitender Auslaugung werden auch die Diffusionsmöglichkeiten in die Übergangszone ungünstiger. Diese Feststellungen gestatten die allgemeine Schlußfolgerung, daß die Neigung der Bewegungsgrenze mit der Zeit abnimmt. Da man für  $\rho_s$  rd. 1,1 und für  $\rho_f$  bei verhältnismäßig tief liegender Auslaugungsfläche nur unwesentlich mehr als 1,0 annehmen kann, beträgt die Neigung unter solchen idealisierten Voraussetzungen etwa das Zehnfache des hydraulischen Gefälles. Wenn  $\frac{dh_f}{dx}$  und die verschiedenen

Dichtewerte bekannt sind, läßt sich (ausgehend vom Vorfluter) mit Hilfe der Neigungsberechnung auch die örtliche Lage der Bewegungsgrenze bestimmen. Bei derartigen Ermittlungen wird deutlich, daß die Tiefenlage bzw. die sie bestimmenden Druckverhältnisse in entscheidendem Maße auch von der Gestalt des Beckens und dem Abstand der Vorfluter von der Auslaugungsfläche in horizontaler Richtung abhängen. Diese Feststellung ist nicht nur durch die hydraulischen Bedingungen, sondern insbesondere durch Überlegungen zu den Diffusionsvorgängen begründbar. Als Grundbedingung für ein stationäres System muß an jeder Stelle der Bewegungsgrenze ein Diffusionsgefälle vorhanden sein. Sobald solche Voraussetzungen infolge veränderter Diffusionsströmung nicht mehr gegeben sind, müssen sich die hydraulischen Verhältnisse neu einstellen. Es besteht eine unmittelbare Wechselbeziehung zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes zwischen Diffusions- und Grundwasserströmung. Auf diese Zusammenhänge ist bei Betrachtung eines Reservoirs mit Verbreitung des Wasserleiters über die Ränder des Salzkörpers hinaus unbedingt zu achten. In einem solchen Becken nimmt die Konzentration der

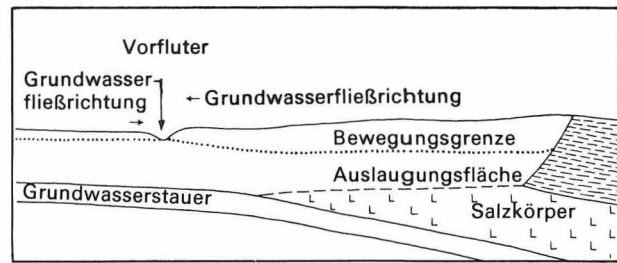


Abbildung 12  
Prinzipische Skizze zur Veranschaulichung der Neigung der Bewegungsgrenze in Position II und bei Disgruenz der Auslaugungsphasen

stagnierenden Flüssigkeit nicht nur in der Vertikalen, sondern auch mit wachsender Entfernung vom festen Salz in horizontaler Richtung ab. Das bedeutet unter hydraulischen Gesichtspunkten, daß die Tiefenlage der Bewegungsgrenze u. a. von der Verteilung und Mächtigkeit der außerhalb der Auslaugungsfläche vorhandenen Teile des Wasserleiters bestimmt wird. Danach muß die Bewegungsgrenze die relativ höchste Lage in Gebieten mit Salzauflösung bei Kongruenz der Phasen haben, insbesondere dann, wenn der Vorfluter sich über der Auslaugungsfläche befindet. Die irreguläre Auslaugung ist in dieser Beziehung ähnlich zu beurteilen. Unter Berücksichtigung der Diffusions- und hydraulischen Möglichkeiten kann man bei Disgruenz der Phasen (Abbildung 12) mit folgendem Verlauf der Oberfläche des ruhenden Flüssigkeitsteiles rechnen (vorausgesetzt, das Grundwassergefälle ändert sich räumlich nur unwesentlich):

- flache Neigung entgegengesetzt dem hydraulischen Gefälle im außerhalb der Auslaugungsfläche und in Oberstrom befindlichen Gebiet,
- steileres gleichgerichtetes Einfallen über dem festen Salz,
- steile Neigung bei Beibehaltung der Richtung in Unterstrom und außerhalb der Auslaugungsfläche liegenden Teilen bis zum Vorfluter und
- verhältnismäßig flaches Gefälle in umgekehrter Richtung, entgegengesetzt der Grundwasserfließrichtung, in Bereichen außerhalb des Salzkörpers und getrennt durch einen Vorfluter als hydraulische Grenze.

Die Süß-/Salzwassergrenze liegt oberhalb der Bewegungsgrenze. Sie ist obere Grenzfläche der durch Diffusionsvorgänge bedingten Übergangszone vom Salzwasser- zum Süßwasserbereich. Ihr

Einfallen verläuft generell etwas steiler als die Neigung der Bewegungsgrenze. Ihre Entfernung vom stagnierenden Flüssigkeitsbereich hängt entsprechend den Beziehungen der 2. FICKSchen Gleichung von den Diffusionsmöglichkeiten und der Grundwassergeschwindigkeit ab. Die Mächtigkeit dieser Zone nimmt in Fließrichtung des Grundwassers zu. In welchem Ausmaße dies geschieht, wird von der Länge des vom Grundwasser im Salzwasserreservoir durchströmten Weges, von den Hohlraumverhältnissen des Gesteins und sinngemäß von den Bedingungen der in Abschnitt 3.2.1. genannten Beziehung bestimmt. In jedem Falle reicht die Süß-/Salzwassergrenze in ihrem oberen Teil bis in das Niveau der Vorfluter bzw. bis über die undurchlässige Umrandung des Beckens und fällt an ihrem Beginn mit der Bewegungsgrenze zusammen. Da die Diffusionsgeschwindigkeiten nur sehr klein sind, kann auch der Abstand zwischen den beiden Grenzflächen nur Dezimeter oder wenige Meter betragen. Er nimmt mit fortschreitender Auslaugung bzw. mit Verringerung des Salzgehaltes an der Bewegungsgrenze ab.

Die gesamte am festen Salz aufgelöste Salzmenge entspricht der dem Grundwasser an der Bewegungsgrenze durch Diffusion für den Transport in der Übergangzone zum Vorfluter übertragenen Stoffmenge.

#### *Auswirkungen von Inhomogenitäten auf den Verlauf der Grenzflächen*

In der Natur ist selten die beschriebene Idealsituation anzutreffen. Infolge ungleichmäßiger Mächtigkeit und Inhomogenität des Gesteins können sich die verschiedensten Variationen bezüglich Neigung und Tiefenlage der Trennflächen im Rahmen des generellen Verlaufs einstellen. Deshalb sei im folgenden auf einige Veränderungs-möglichkeiten prinzipieller Art eingegangen.

Treten bedeutende, durch verschiedenes Höhenniveau des Reservoirbodens bedingte Mächtigkeitsunterschiede im angenommenen homogenen Wasserleiter auf, so können diese Ursache folgender Entwicklung im Vergleich zum Idealzustand sein:

a) Nimmt die Mächtigkeit über der Auslaugungsfläche in Richtung des Grundwassergefälles ab, ist mit geringer und im umgekehrten Falle mit zunehmender Neigung der Grenzfläche als Folge

der Veränderung des Konzentrationsgefälles und der Druckverhältnisse zu rechnen.

b) Verringert sich die Mächtigkeit außerhalb der Auslaugungsfläche in Vorfluterichtung, wird die Durchflußfläche für den Diffusionsstrom und damit letztlich auch der Salznachschub kleiner. Ein teilweiser Ausgleich hierfür zum Aufrechterhalten des erforderlichen Verhältnisses zwischen Konzentration über dem festen Salz und außerhalb dessen Verbreitung läßt sich nur erreichen, wenn die gesamte Bewegungsfläche höher liegt, d. h., die Neigung dieser Trennfläche verläuft im gesamten Becken flacher. Andernfalls müßten sich Konvektionsvorgänge einstellen, da das Diffusionsgefälle nicht mehr für alle Teile der Bewegungsgrenze gegeben wäre. Im beschriebenen Abschnitt ist mit relativ steiler Neigung zu rechnen.

c) Wenn die Mächtigkeit nach Oberstrom und außerhalb des Salzkörpers abnimmt, hat die Bewegungsgrenze aus den genannten Gründen bezüglich des Diffusionstransportes ein geringeres Einfallen. Entsprechende Feststellungen treffen für Bereiche jenseits vom Vorfluter zu.

d) Da der Verlauf der Süß-/Salzwassergrenze von der Lage der Bewegungsgrenze abhängt, erfährt auch sie entsprechende Auswirkungen.

e) In der Horizontalen sind im stagnierenden Bereich raschere Konzentrationsänderungen zu verzeichnen.

Zur Beurteilung der Wirkung von Inhomogenitäten des Gesteins muß man grundsätzlich folgende Varianten unterscheiden:

1. In der ruhenden Flüssigkeit befindet sich a) die Schicht mit kleinem unter einer mit großem Formationswiderstand und b), es ist eine umgekehrte Situation gegeben.

2. Die Inhomogenität ist im stagnierenden Bereich durch Zunahme des Formationswiderstandes in der Horizontalen a) außerhalb des Salzkörpers, b) über der Auslaugungsfläche bedingt.

3. Im fließenden Salzwasser treten unterschiedliche Permeabilitäten und Hohlraumvolumina wie folgt auf: a) untere Schicht mit hohem Quotienten  $\frac{k}{a}$  (Durchlässigkeitskoeffizient  $k$  durch Hohlraumvolumen  $a$ ) bei im Regelfall laminarem Fließen, oben ungünstiger; b) in der oberen Schicht bessere Werte für  $\frac{k}{a}$  als unten; c) Wechsel in der Horizontalen.

Diese Unterschiede der Gesteinseigenschaften haben zur Folge:

Zu 1a) In der Flüssigkeit der unteren Schicht erfolgt eine starke Anreicherung des gelösten Salzes, sofern diese unmittelbaren Kontakt zum Salzkörper besitzt. Die Konzentrationsabnahme in der Vertikalen ist nur gering, das Gefälle also nur so groß, daß der in der oberen Schicht verlaufende langsame Diffusionsstrom genährt werden kann. Zwischen den beiden Gesteinspartien unterschiedlichen Formationswiderstandes stellt sich die Schichtgrenze auch als verhältnismäßig markante Konzentrationsgrenze dar.

Zu 1b) Eine scharfe Konzentrationsgrenze bildet sich nicht. Es muß steiles Konzentrationsgefälle in der unteren Schicht entstehen, um für die günstige Diffusionsstromdichte über ihr den entsprechenden Salznachschub zu gewähren.

Zu 2a) Liegt die für Diffusionsvorgänge gut geeignete Partie beispielsweise im Kontakt mit dem Salzkörper und das Gestein mit größerem Formationswiderstand außerhalb der Auslaugungsfläche, so kann eine markante Konzentrationsgrenze an der Gesteinsgrenze auftreten. Auch die übrigen Merkmale sind ähnlich wie bei Variante 1a). Die Neigung bzw. die Höhenlage der Bewegungsgrenze und der Süß-/Salzwassergrenze wird im Vergleich zur idealen Situation je nach Mächtigkeitsverhältnis und Wiederholung des Wechsels der verschiedenartigen Gesteinsbildungen verändert. Diesbezüglich können sich die unterschiedlichsten Formen bilden; in jedem Falle jedoch bleibt die generelle Neigungsrichtung der Trennfläche erhalten. Zum Entstehen von Konzentrationsprüngen kommt es nur (auch bei Variante 1), wenn der Salznachschub in die Partie mit kleinem Formationswiderstand schneller erfolgt als der Abtransport aus ihr, d. h. bei mehrfachem Wechsel muß das im Diffusionsstrom vor ihr liegende Gestein günstiger für den Diffusionstransport sein als das hinter ihr befindliche. Für die Beurteilung der Auswirkungen von Inhomogenitäten mit vertikalen Grenzen ist von entscheidender Bedeutung, ob diese in Unterstrom oder in Oberstrom außerhalb der Auslaugungsfläche sich befinden. In ersterem Falle bedeutet ein relativ geringes horizontales Konzentrationsgefälle eine Verflachung und in letzterem ein Ansteigen des Gefälles der Bewegungsgrenze. Auch in durch Vorfluter hy-

draulisch getrennten Teilen des Reservoirs ist an solchen Stellen steilere Neigung zu erwarten.

Zu 2b) Die Ungleichartigkeiten führen in dieser Position dazu, daß allgemein in der Horizontalen Konzentrationsprünge an den jeweiligen Gesteinsgrenzen entstehen. Es entwickelt sich auch ein horizontaler Diffusionsstrom aus den Teilen kleiner Formationswiderstände in die andersartigen Bereiche. Die Trennflächen verlaufen in und über den für die Diffusion gut geeigneten Partien mit geringerem Gefälle als in deren Umgebung.

Zu 3a und 3b) Je nach dem Verhältnis zwischen dem Formationswiderstand und dem Quotienten  $\frac{k}{a}$  der einzelnen Schichten bildet sich eine breitere oder schmalere bewegte Salzwasserzone. Während bei Unterlagerung durch gut durchlässiges bis zur Bewegungsgrenze reichendes Gestein in dem weniger permeablen über ihm verhältnismäßig durchgehende Versalzung entsteht, können sich im umgekehrten Falle (insbesondere bei klüftigem Wasserleiter als Liegendes) stark horizontal unterschiedliche Salzgehalte einstellen. Aus der Literatur sind viele Beispiele bekannt, wonach über Klüfte und Verwerfungen eine örtlich erhöhte Versalzung in den über dem Festgestein lagernden Lockersedimenten festzustellen ist. BAECKER (1952) hat sich speziell mit solchen Problemen beschäftigt und auf hydrochemischem Wege Störungen nachgewiesen.

Zu 3c) In weniger durchlässigen Partien hat die Süß-/Salzwassergrenze eine geringere Neigung als in benachbarten Schichten mit besserer Permeabilität. Dies kann man durch die kleine Grundwassergeschwindigkeit und sich entwickelnde seitliche Diffusionsströmung erklären. Inhomogenitäten solcher Art bzw. kombiniert mit der Variante 3b) sind auch die Ursache für die in der Literatur (KELLER 1956) beschriebene Kuriosität des Vorkommens salzigen Grundwassers über Süßwasser im oberen Grenzbereich des Salzwasserreservoirs.

Die geschilderten Ungleichartigkeiten des Gesteins können in ihrer Vielgestaltigkeit wesentlich das Auslaugungsgeschehen variieren und ihre Auswirkungen in verschiedenartigster Überlagerung mitteilen. In diesem Zusammenhang sind die vielfältigsten Möglichkeiten vorstellbar. Auch die in der Vertikalen auftretenden Inhomogenitäten beeinflussen je nach Mächtigkeit und Verbreitung

der einzelnen Schichten die hydraulischen und physikochemischen Vorgänge mehr oder weniger stark.

#### 4. Zur Gestalt der Salzauslaugungsfläche

Nur in seltenen Fällen bildet sich eine Auslaugungsfläche, die in allen Teilen horizontal und eben verläuft. Ein idealer Salzspiegel im Sinne von FULDA (1923/24) ist in der Natur nur vereinzelt anzutreffen. Häufig entstehen entgegengesetzt dem Schichteneinfallen geneigte Salzhänge. Diese treten insbesondere bei Disgruenz der Auslaugungsphasen und irregulärer Auslaugung auf. Weiterhin sind Buckel, sanft wellige Flächen, tiefe Gräben und andere von der Horizontalen abweichende Formen als Oberfläche des Salzkörpers bekannt. Bei regulärer Auslaugung und Kongruenz der Phasen ist am Rande des Salzspiegels meist ein allmähliches Einfallen nach der Salzflanke zu beobachten. An Salzsätteln sind die an den Flanken liegenden geringmächtigen Salze der Leineserie bis in größere Tiefe ausgelaugt als die Staßfurtsalze des Sattelkerns. Unter besonderen Bedingungen bleiben Steinsalzrestkörper in einem Höhenniveau weit über der Auslaugungsfläche erhalten.

Man muß bei der Deutung der Unebenheiten der Salzkörperoberfläche davon ausgehen, daß aus lösungskinetischen Gründen unter allen Voraussetzungen die Auflösung des festen Salzes von den Diffusionsmöglichkeiten abhängig ist. Wie wir bereits sahen, treffen für die Auslaugungsvorgänge bei einem Salzkörper an der Basis der Flüssigkeit insbesondere die Formeln der Diffusionsbeziehungen zu. Das bedeutet, mit der 1. FICKschen Gleichung läßt sich bestimmen, welche Salz mengen in der Zeiteinheit je Flächeneinheit aufgelöst werden, und mit der 2. Beziehung von FICK erhält man die Mächtigkeitszunahme der Salzwasserzone über dem festen Salz bzw. über der Bewegungsgrenze der Flüssigkeit. Schlußfolgernd aus diesen allgemeinen Grundlagen kann man feststellen, daß die Geschwindigkeit des Salztransportes bzw. die Auslaugungsintensität gemessen in Metern des Absinkens der Auslaugungsfläche mit

– dem Durchlässigkeitskoeffizienten des Gesteins in dem Bereich des strömenden Grundwassers,

– dem Grundwassergefälle, also u. a. auch den in Gebieten außerhalb der Auslaugungsfläche befindlichen, für den Wasserleiter des Gesamtreservoirs wirksamen Grundwasserneubildungsmöglichkeiten und

– der Weglänge des Grundwasserstromes zwischen Erreichen und Verlassen des Salzwasserreservoirs und der Mächtigkeit des Wasserleiters in Bereichen außerhalb des Salzkörpers zunimmt, aber mit dem

– hydraulisch aktiven Hohlraumvolumen des Gesteins in dem Teil mit Grundwasserbewegung,

– dem Formationswiderstand,

– dem Abstand des festen Salzes von der Bewegungsgrenze der Flüssigkeit bzw. von der Süß-/Salzwassergrenze,

– der geothermischen Tiefenstufe

– und der Breite der Auslaugungsfläche in Richtung des Grundwasserstromes abnimmt.

Bei Betrachtung über die Neigungsrichtung und die Neigung der Auslaugungsfläche muß man von den Verhältnissen bezüglich der Bewegungs- und Süß-/Salzwassergrenze ausgehen. Es kommt in diesem Zusammenhang darauf an, die entscheidend für die Entstehung der Oberflächenform des festen Salzes wirkenden Faktoren herauszustellen, d. h., der in der stagnierenden Flüssigkeit durch die Wechselwirkung zwischen Druck- und Diffusionsverhältnissen entstandene Ausgleichszustand ist hinsichtlich der örtlich gegebenen Diffusions- bzw. Salzauflösungsmöglichkeiten zu untersuchen. Da die Bewegungsvorgänge als kurzzeitig stationär angesehen werden können, muß man annehmen, daß über eine bestimmte Dauer an allen Stellen der Auslaugungsfläche die aufgelöste Salzmenge in der Zeiteinheit annähernd gleichbleibt. Folglich ändert sich die Neigung der Salzoberfläche räumlich und zeitlich nur langsam.

Unter Berücksichtigung aller Grundlagen und Zusammenhänge sollen nachfolgende Ausführungen über die Gefällemöglichkeiten der Auslaugungsfläche nach Auslaugungstypen unterschieden werden.

Zunächst sei kurz auf die Salzoberfläche in Position I eingegangen. Wie schon festgestellt wurde, handelt es sich bei im wesentlichen regional



gleichbleibendem hydraulischem Gefälle um eine entgegengesetzt der Grundwasserfließrichtung einfallende Auslaugungsfläche, die im Frühstadium verhältnismäßig steile Neigung aufweist, mit weiterem Absinken jedoch flacher wird. Auch durch bedeutendere Inhomogenitäten im Gestein kann sich diese Situation nicht generell ändern.

Beim Übergang der Auslaugungsfläche in die Position II behält die Neigung unter den Bedingungen der Kongruenz der Phasen ihre Richtung in bezug auf die Grundwasserströmung bei, wird aber mit weiterem Fortschreiten der Auslaugung ebenso wie die Bewegungsgrenze flacher. Wie wir wissen, handelt es sich um ein sehr schmales Reservoir, das sich fast vollständig über dem festen Salz befindet. Durch diese Besonderheit ist eine flache Bewegungs- bzw. Süß-/Salzwassergrenze bedingt. Das bedeutet aber auch, daß ein horizontales Konzentrationsgefälle im stagnierenden Grundwasser kaum vorhanden sein kann. Somit muß bei homogenem Gestein in der Vertikalen an allen Stellen des Reservoirs etwa gleiches Diffusionsgefälle mit gleichen Diffusionswegen erwartet werden. Also befindet sich die Auslaugungsfläche in allen Teilen annähernd gleichweit von der Süß-/Salzwassergrenze entfernt, d. h., sie besitzt deren geringe Neigung. Es ist verständlich, daß bei so geringer Neigung, die, wie wir oben sahen, nur ungefähr das Zehnfache des Grundwassergefälles beträgt, von einem Salzspiegel gesprochen wird (Höhenunterschied auf 100 m = 1 m bei hydraulischem Gefälle von 2/1 000).

Beim Auslaugungstyp mit Disgruenz der Phasen sind die Auslaugungsvorgänge infolge der außerhalb des Salzkörpers vorhandenen Beckenteile und der dadurch bedingten horizontalen Konzentrationsgefälle wesentlich vielgestaltiger und komplizierter. Trotzdem kann man in diesem Falle allgemein feststellen, daß nach Übergang in Position II zunächst eine in Richtung des Grundwasserfließens ansteigende Auslaugungsfläche besteht. Das Tempo ihrer weiteren Entwicklung mit Fortschreiten der Salzauflösung hängt u. a. von folgenden Bedingungen ab:

- Ausdehnung des Beckens außerhalb der Auslaugungsfläche, weil damit das Konzentrationsgefälle horizontal über dem Salzkörper im stagnierenden Bereich abnimmt;

- Lage des Vorfluters bezüglich der Auslaugungsfläche und der Teile des Beckens außerhalb

des festen Salzes, da sich danach das Gefälle der Bewegungsgrenze und auch das horizontale Konzentrationsgefälle einrichten.

Wenn man von der modellmäßigen Vereinfachung der hydrogeologischen Verhältnisse ausgeht, wonach der Vorfluter entweder über der nur einseitig (Ausgehendes) von einem außerhalb liegenden Beckenteil begrenzten Auslaugungsfläche oder über dem seitlich befindlichen Teil des Reservoirs vorhanden ist, ergeben sich hinsichtlich der Neigung der Salzoberfläche für den homogenen Wasserleiter folgende Schlußfolgerungen:

Da grundsätzlich in Richtung Ausgehendes ein Konzentrationsgefälle besteht, sind die Diffusionsmöglichkeiten bei gedachter horizontaler Auslaugungsfläche in Nähe des äußeren Salzrandes günstiger. Der Gleichgewichtszustand ist erst dann erreicht, wenn das vertikale Konzentrationsgefälle in allen Bereichen über dem festen Salz gleichgroß wird. Das setzt aber längere vertikale Diffusionswege am Außenrand des Salzes voraus. Bei bestimmten hydraulischen Bedingungen muß folglich die Auslaugungsfläche in Richtung Konzentrationsgefälle (Ausgehendes) einfallen. Diese Ansicht hat BRÜCKNER (1961) experimentell erhärtet. Die Neigung wird mit Abnahme der Konzentrationsunterschiede, also mit Vergrößerung des gesamten Reservoirs kleiner. Selbstverständlich wird das Einfallen von der verschiedenen Lage der Bewegungsgrenze oder den die Trennfläche bedingenden Faktoren variiert. Dabei bedeuten entgegengesetzt dem Konzentrationsgefälle geneigte Trennflächen Gefälleminderung oder bei umgekehrter Richtung Versteilung der Auslaugungsfläche. Die generelle Neigungsrichtung muß jedoch bestehen bleiben. Für den Auslaugungstyp mit Disgruenz der Phasen kann man allgemein schlußfolgern, daß zu Beginn der Salzauflösung in Position II ein Salzhang entsteht, der später einer mit dem Salzspiegel vergleichbaren Auslaugungsfläche zustrebt.

In der Natur sind die geschilderten idealen Verhältnisse nicht oder höchstens sehr selten anzutreffen. Generell ist vielmehr damit zu rechnen, daß in Richtung des Vorfluters durch Grundwasserneubildung verursachte Gefälle- und Grundwassergeschwindigkeitszunahme wirksam wird. Solche Veränderungen sind insbesondere in den breiten Becken bei Auslaugung mit Disgruenz der Phasen zu berücksichtigen. Aber auch diese

Einflüsse vermögen die festgestellte Neigungsrichtung der Auslaugungsfläche nicht umzukehren.

Als weitere Ursachen für örtliche Unebenheiten in der Salzoberfläche kommen in Frage:

– Inhomogenität hinsichtlich der Durchlässigkeit, der Formationswiderstände und des hydraulisch wirksamen Hohlraumvolumens des Gesteins;

– Inhomogenität des Salzkörpers bezüglich chemisch-mineralogischer Zusammensetzung, Klüftigkeit und Dichte;

– Zusammensetzung des Grundwassers (Lösungsgenossen, Konzentration usw.).

Je nach Lage, Richtung und Zusammenwirken der genannten Unregelmäßigkeiten können die verschiedensten Erscheinungsformen in der Auslaugungsfläche entstehen. Dabei muß bei der Betrachtung unterschieden werden, ob es sich um Wechsel in vertikaler oder horizontaler, quer oder längs zum Verlauf des Salzkörpers handelt. Hier kann nicht für jeden Einzelfall ein Beispiel beschrieben werden, weil durch Kombination der verschiedenen Faktoren eine unüberschaubare Anzahl von konkreten Bedingungen vorstellbar sind. Im Rahmen der vom Verfasser beabsichtigten Modellvorstellungen sei jedoch allgemein festgestellt:

– Horizontaler Wechsel zu größerer Durchlässigkeit, kleinerem Formationswiderstand oder kleinerem Hohlraumvolumen bedingt bei sonst gleichen Bedingungen intensivere Auslaugung von Salz.

– Hohe Klüftigkeit (große Oberfläche) und geringe Dichte des Salzes begünstigen ebenfalls die Auslaugung.

– Lösungsgenossen im Grundwasser setzen die Auflösungs geschwindigkeit im allgemeinen herab.

Insbesondere die im Wasserleiter und im Salz vorhandenen Inhomogenitäten können nicht allein durch Neigungsänderung der Trennflächen in der Flüssigkeit ausgeglichen werden. Sie wirken sich meist auch sehr deutlich formbildend auf die Auslaugungsfläche aus, indem beispielsweise tief eingeschnittene rinnenartige Gebilde auf der sonst verhältnismäßig ebenen Salzoberfläche entstehen.

Das allmähliche Einfallen der Auslaugungsfläche nach der Flanke der Salzsättel kann durch geringfügige Ausweitung des Reservoirs über dem Salzkörper nach oben und die dadurch bedingte

Verbesserung der Diffusionsmöglichkeiten erklärt werden. In einigen Fällen (beispielsweise Staßfurtserie) mag die Neigung aber auf die schnellere Löslichkeit der Kalisalze am Rande der Auslaugungsfläche zurückzuführen sein.

Im Zusammenhang mit der Entstehung von Salzhängen muß man auch die unterschiedliche Zerstörung der Deckschichten bei Disgruenz der Phasen beachten. Es ist anzunehmen, daß die Zerklüftung des Einsturzgebirges in Richtung Ausgehendes und in irregulären Auslaugungsbereichen nach dem Zentrum stärker wird. Diese unterschiedliche Gesteinsbeschaffenheit hat die Bildung von Salzhängen begünstigt.

Für die größere Auslaugungstiefe der Leinesalze an den Flanken einiger Salzsättel im Vergleich zu den im Sattelkern liegenden Staßfurtsalzen können folgende Ursachen erwogen werden:

– Die Staßfurtsalze waren lange Zeit durch überlagernde Ton- und Anhydritschichten vor dem Grundwasser geschützt, so daß die Auslaugung erst später einsetzte.

– Es erfolgte Salzaufstieg durch Halokinese hauptsächlich im Sattelkern.

– Infolge der schmalen Auslaugungsfläche des Leinesalzes bestehen bei gleichem Grundwassergefälle entsprechend der 2. FICKSchen Gleichung unter Beachtung des Zeitfaktors und der hydraulischen Verhältnisse günstigere Auslaugungsbedingungen.

Diese Feststellungen treffen allerdings nur dann uneingeschränkt zu, wenn nicht aus einem Reservoir das Salzwasser in das benachbarte zu fließen vermag, oder sogar für alle Auslaugungsflächen ein einheitliches Becken mit ausgeprägten hydraulischen Verbindungen besteht.

Der in der Literatur vertretenen Ansicht, die intensivste Salzauslaugung sei an den höchsten Stellen der Auslaugungsfläche zu verzeichnen, kann man sich nur anschließen, wenn infolge tektonischer oder halokinetischer Vorgänge unregelmäßige Veränderungen am Salzkörper bedingt sind. Lassen sich derartige Einflüsse ausschließen, gibt es keinerlei Begründung für die genannte Annahme. Die Gestalt der Auslaugungsfläche stellt einen bestimmten hydraulischen und physikochemischen Zustand dar, in dem die Hochlage der Salzoberfläche gerade geringe Auslaugungsmöglichkeiten widerspiegelt. Deshalb läßt sich die erwähnte Ansicht nur für den Fall vertre-

ten, daß die Auslaugungsfläche ausnahmsweise an Stellen guter Diffusionsbedingungen relativ gehoben wird.

Wenn über der Auslaugungsfläche ein abgeschlossenes Flüssigkeitsreservoir entstanden ist, das nicht mit dem oberflächennahen Grundwasser kommuniziert und die Beendigung der Salzauflösung ermöglicht, erfolgt über längere Zeiten der Konzentrationsausgleich aufgrund von Diffusions- und Konvektionsvorgängen. Im Zuge des Entstehens dieses hydrostatischen Gleichgewichtes wird als Ergebnis des Endstadiums der Auslaugung bei ausreichender Größe des Beckens der Salzspiegel gebildet. Der nun entstandene Zustand entspricht den Experimentbedingungen von BRÜCKNER (1961), bei denen in stehendem Wasser die Auflösung von Salzstücken erfolgte und sich ebenfalls eine horizontale Auflösungsfläche einstellte.

5.

## Vorstellungen zur Entwicklung der Auslaugungsprozesse in geologischen Zeiträumen

Für die Auslaugung des Zechsteinsalzes bis zum Erreichen des heutigen Zustandes wird verschiedentlich die Zeit seit dem Kreidesystem (mindestens 60 Millionen Jahre) angenommen. Dabei herrscht in der Literatur die Auffassung vor, der gesamte Auslaugungsprozeß habe episodisch stattgefunden. So sollen sich in der Tertiärzeit die Salzauflösungsvorgänge mit besonderer Intensität vollzogen haben und später langsamer verlaufen sein, während sie gegenwärtig, da von ihrer Auswirkung allgemein wenig zu merken ist, im wesentlichen abgeklungen sein.

Nach der Auffassung des Verfassers handelt es sich um einen mehr oder weniger kontinuierlichen Prozeß, der durch das Wechselspiel zwischen Grundwasser- und Diffusionsströmung bestimmt wird. Die Intensität der Salzauflösung vergrößert sich mit Zunahme des Grundwassergefälles bzw. der Niederschlagsmenge, weil damit die Erhöhung des Salztransportes durch Diffusion folgt. So dürfte während des Tertiärs bei erheblichen mitt-

leren jährlichen Niederschlägen im *Eozän und Oligozän* (SCHWARZBACH 1961) zeitweise die Salzauflösung durchaus um das Vielfache schneller erfolgt sein als heute. Im Pleistozän hingegen wird sie mit weitgehender Unterbindung der Grundwasserbewegung in den Kaltzeiten sehr langsam bis zum Konzentrationsausgleich im Becken verlaufen sein. Selbstverständlich verringert sich die Auslaugungsintensität mit zunehmender Tiefe, wobei Veränderungen der klimatischen und hydrogeologischen Verhältnisse modifizierend wirken. Es gibt jedoch keine Gründe für die Annahme, die Auslaugung sei zur Ruhe gekommen.

Wie die Grundwasserversalzungen in vielen Gebieten deutlich erkennen lassen, dauern die Auflösungs Vorgänge auch gegenwärtig noch an und dürften auch in Zukunft selbst in großer Tiefe weiter wirken. Allerdings sind nur noch relativ geringe Auslaugungsbeträge festzustellen.

Von großer Bedeutung für die Voraussage der Entwicklung der Salzauslaugung ist eine modellmäßige Betrachtung der Diffusionsverhältnisse. Nimmt man ein Reservoir mit horizontaler Ausdehnung bis zu den Rändern der Auslaugungsfläche und einer sich zeitlich nicht ändernden Homogenität des Wasserleiters an, können die in Abbildung 10 und 11 dargestellten Ergebnisse ausgewertet werden. In diesem Becken sind homogene hydrogeologische Verhältnisse bei Kongruenz der Auslaugungsphasen anzunehmen. Unter solchen Bedingungen verläuft die Salzauflösung in der Position II anfangs bei einem geringen Diffusionsweg sehr rasch und klingt in ihrer Intensität schnell ab. Befindet sich die Auslaugungsfläche tiefer als ca. 150 m unterhalb der Süß-/Salzwassergrenze, ist ein Stadium erreicht, in dem zwar in der Zeiteinheit nur noch relativ wenig ausgelaugt wird, die Auslaugungsintensität aber mit der Teufe lediglich langsam abnimmt. Während im Stadium des raschen Absinkens der Auslaugungsfläche bei einer Zunahme des Diffusionsweges von rd. 150 m die Salzauflösung auf ein Zehntel zurückgeht, verringert sich die Auslaugungsintensität später mit einer Teufendifferenz von 600 m auf etwa ein Drittel. Diese Feststellungen werden hier zur Verdeutlichung der Wirksamkeit der physikalischen und chemischen Gesetzmäßigkeit für idealisierte hydrogeologische Verhältnisse getroffen. Ihre Bedeutung wird dadurch jedoch in keiner Weise herabgemindert. Die

physikochemischen Beziehungen sind für die Entwicklung der Auslaugung aller Typen wichtig. Selbstverständlich können auch in diesem Zusammenhang räumliche und zeitliche Änderungen der Beschaffenheit des Gesteins, des hydraulischen Gefälles oder der Ausdehnung des Reservoirs Beschleunigungen oder Verzögerungen hervorrufen. Die starke Auslaugungsintensität im Tertiär ist aber nicht nur durch die hohen Niederschläge, sondern insbesondere auch durch günstige physikochemische Verhältnisse bedingt. Da das Deckgebirge mit fortschreitender Auslaugung vermutlich immer stärker aufgelockert wird, muß man eine Begünstigung der Salzauflösung im Vergleich zum Idealzustand annehmen. Eine weitere Verbesserung der Diffusionsmöglichkeiten ist in der ständigen Vergrößerung des Grundwasserbeckens bei Disgruenz der Auslaugungsphasen zu sehen, so daß unter sonst gleichen Bedingungen hier die Auslaugungsfläche in größerer Teufe als bei Auslaugungskongruenz anzutreffen sein muß.

Es mag vielleicht der Eindruck entstehen, daß die beschriebenen Diffusionsströme zu langsam verlaufen, um die Auslaugung bis in die heutige Tiefe bewirkt zu haben. Der Verfasser versucht deshalb im folgenden, an einem Beispiel zu zeigen, wie sich der Salztransport durch Diffusion durchaus in einer realen Größenordnung im Vergleich mit der langen Zeit seit Beginn der Auslaugung darstellt. Legt man die von ihm 1968 geschilderten hydrogeologischen Verhältnisse mit der extremen Auslaugungstiefe von 600 m zu Grunde und rechnet mit einem Diffusionsweg zwischen Auslaugungsfläche und Erdoberfläche, so erhält man für den durchschnittlichen Salztransport nach Abbildung 10 und 11 eine Menge von rd.  $2,9 \cdot 10^{-9} \text{ mol/cm}^2 \cdot \text{s}$  (entspricht  $1,45 \text{ mal } 10^{-2} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{d}$  oder  $5,20 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{a}$ ). Unter der Voraussetzung, die Durchflußfläche für den Diffusionsstrom sei nur ebenso groß wie die Auslaugungsfläche selbst, beträgt also der Salztransport auf einem Zentimeter Querschnitt im freien Raum  $3,1 \cdot 10^8 \text{ g}$  in 60 Millionen Jahren. Das entspricht auf den Salzkörper (Dichte 2,16) bezogen einer Auflösung von rd.  $10^6 \text{ m}$ . Da es sich aber um Diffusion im Gestein handelt, müßte der Formationswiderstand berücksichtigt werden, der jedoch nicht bestimmt worden ist. Er könnte in unserem Falle noch einen Wert von ca. 1600 haben, damit eine Auslaugungstiefe von 600 m

verständlich bliebe. Wenn man weiterhin bedenkt, daß alle angenommenen Parameter sehr ungünstig gewählt wurden, läßt sich feststellen: Der Salztransport durch Diffusion hat eine durchaus reale Größenordnung. Daran ändern auch Betrachtungen über die Unterbrechung der Auslaugung in den pleistozänen Kaltzeiten nichts.

## 6. Schlußfolgerungen

In den vorhergehenden Abschnitten wurde durch Abstraktion versucht, unwesentliche Teile der Auslaugungsprozesse auszusondern und die wesentlichen hervorzuheben. Es bestand die Aufgabe, auf diese Weise eine Modellvorstellung zu erarbeiten, die versucht, allen Auslaugungsgebieten und -vorgängen des Untersuchungsraumes gemeinsame Unveränderlichkeiten in bezug auf die bestimmenden Ereignisse herauszustellen. Um zu einem ausreichenden Überblick zu gelangen, war es erforderlich, die Untersuchungsobjekte mit Eigenschaften auszustatten, die in Wirklichkeit nur angenähert vorhanden sind. Dabei wurde jedoch die Verhaltensweise bzw. die Struktur der wirklichen Objekte beibehalten. Durch diese Abstraktion war es möglich, auf theoretischer Grundlage die Ursachen, den Wirkungsmechanismus und den Zusammenhang der Salzauflösungsprozesse aufdecken zu helfen. Es wäre nun bei der praktischen Anwendung von Fall zu Fall zu prüfen, inwieweit man die getroffenen Feststellungen verallgemeinern darf.

### 6.1. *Bedeutung der Genese von Tiefenwässern in Auslaugungsgebieten*

Die Klärung der Entstehungsgeschichte von Grundwasser, das am allgemeinen Wasserkreislauf nicht teilnimmt, ist in verschiedener Hinsicht von Interesse im Zusammenhang mit paläohydrogeologischen, stratigraphischen, tektonischen und unter bestimmten Bedingungen selbst lagerstätten genetischen Fragen. Auch die Erkenntnisse über

die Genese der Tiefenwässer in Auslaugungsgebieten lassen neben stratigraphischen insbesondere tektonische Schlußfolgerungen zu.

Gegenwärtig gibt es über das Alter der Auslaugung in den meisten Gebieten nur wenige fundierte Angaben. Die in der Literatur enthaltenen Ausführungen sind spärlich und mit vielen Einschränkungen versehen. Man könnte jedoch einen entscheidenden Schritt weiterkommen, wenn man von den Modellvorstellungen des Verfassers über die Entstehung der Salzwässer in Auslaugungsgebieten ausgeht.

Wie dargestellt wurde, liegt es in der Natur der Salzauslaugung, daß sich schon nach geologisch kurzer Zeit im unteren Teil ein Salzwasserreservoir mit stagnierendem Grundwasser bildet. Kennt man das Alter dieses Wassers, kann man über den Beginn der Auslaugung mit hinreichender Genauigkeit Aussagen machen. Gelingt es, in der Nähe der Auslaugungsfläche eine horizontierte Probe von der Salzlösung zu entnehmen und das Alter des Wassers exakt festzulegen, läßt sich in den meisten Fällen auch auf die Auslaugungsdauer schließen. Zu beachten ist dabei, daß eine solche Probe möglichst aus größter Tiefe des ungestörten Reservoirs gewonnen wird, weil das Alter des Wassers in Richtung auf die Bewegungsgrenze abnimmt und in höher liegenden Bereichen nicht mehr den Beginn, sondern erst spätere Phasen des Auslaugungsvorganges anzeigt.

Da die Auslaugung ursprünglich durch epigenetische und halokinetische Bewegung vorbereitet wurde, können durch eine Altersdatierung auch Rückschlüsse auf die entsprechenden tektonischen bzw. salztektonischen Prozesse gezogen werden. So ließe sich die zeitliche Abfolge der Entstehung der Saxoniden analysieren.

6.2.

### *Auswertung für die Montanhydrogeologie und die Solegewinnung*

Sobald eine hydraulische Verbindung zwischen dem Grubengebäude des Bergbaues und dem Grundwasserreservoir über der Salzauslaugungsfläche entstanden ist, hat sich die Wasserhaltung der Grube entsprechend den hydrogeologischen

Gegebenheiten des postsalinaren Deckgebirges in Auslaugungsgebieten einzurichten. Durch den künstlichen Abfluß hochkonzentrierter Salzlösungen aus dem Becken wird der vorhandene, im Wechselspiel zwischen Diffusion und Grundwasserströmung gebildete natürliche stationäre Zustand gestört. Dabei sind bezüglich der durch den Bergbau verursachten Veränderungen im hydrogeologischen Regime und der dadurch bedingten Prozeßabläufe Vorgänge während der Wasserhaltung, beim Ersaufen der Grube und nach dem Ersaufen zu unterscheiden. Der Verfasser will versuchen, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Bedingungen die für die Praxis wesentlichen Merkmale für den jeweiligen Zustand der Grundwasserbewegung und -versalzung herauszuarbeiten.

Mit jeder Entnahme höher konzentrierter Salzlösung aus dem Reservoir stellt sich im Prinzip folgende Situation ein:

– Es bildet sich nach den Gesetzen der Hydraulik ein Absenkungstrichter, innerhalb dessen die Flüssigkeit aus allen Richtungen mit zunehmender Geschwindigkeit bei Annäherung an die Entnahmestelle zufließt.

– Falls noch Salzwasser in den natürlichen Vorfluter oder in einzelne Quellen gelangt, so sind dessen Menge und Konzentration vermindert.

– Die Süß-/Salzwassergrenze nimmt entweder einen steileren Verlauf als ursprünglich oder verschwindet bei Unterbindung des Oberflächenabflusses in große Tiefe.

In allen Fällen sind bei Beginn der Veränderung der natürlichen Bedingungen die höchsten Salzgehalte zu verzeichnen, die bis zum Erreichen eines neuen, weitgehend stationären Zustandes mit einer durch folgende Faktoren bestimmten Geschwindigkeit abnehmen:

– Höhenlage der Wasseraustrittsstelle aus dem Grundwasserreservoir im Vergleich mit der Lage der Salzauslaugungsfläche;

– horizontale Entfernung der Wasseraustrittsstelle von der Oberfläche des Salzkörpers;

– Geschwindigkeit des der Grube aus dem Reservoir zufließenden Grundwassers (Menge in Zeiteinheit);

– Größe des Salzwasserreservoirs und Höhenlage der ursprünglichen Bewegungsgrenze über der Auslaugungsfläche.

Für die Anfangskonzentration der zuzitzenden Grubenwässer ist, soweit man von zusätzlicher Salzauflösung im Grubengebäude des Salzbergbaus absieht, die Lage der Wasseraustrittsstelle aus dem Salzwasserbecken entscheidend. Liegt sie hoch über der Auslaugungsfläche, kann mit verhältnismäßig niedrigen Konzentrationen gerechnet werden. Andernfalls wird man annähernd gesättigte Sole als Zufluß in der Grube registrieren.

Die veränderten hydraulischen Verhältnisse sind in groben Zügen folgende:

In Abhängigkeit von der Lage der Austrittsstelle der Sole aus dem Becken wird die Bewegungsgrenze steiler, teilweise in ihrer Neigungsrichtung umgekehrt oder vorübergehend völlig beseitigt. Sie bleibt nur bestehen, wenn die Auslaugungsfläche tiefer als irgendein Teil der mit der Entnahmestelle vorhandenen hydraulischen Verbindung liegt. Unter anderen Bedingungen findet sich die gesamte Flüssigkeit des Reservoirs in Bewegung und zwar

– bei vollständiger Entnahme des sich erneuernden Grundwassers ausnahmslos auf die Entnahmestelle gerichtet;

– bei teilweise künstlichem Abfluß nur unten (hochkonzentrierte Lösung) zur Entnahmestelle und oben zum natürlichen Vorfluter.

Dabei verläuft die Grenze zwischen den beiden Grundwasserströmen um so tiefer, je mehr aus dem unteren Strom abfließt. Auch hier gelten grundlegend die Beziehungen entsprechend den Formeln der Hydraulik und Diffusion.

Die Auswirkungen solcher Eingriffe durch den Bergbau in das natürliche Regime der Auslaugungsvorgänge sind im wesentlichen folgende:

– Je nach Entnahme durch die Wasserhaltung des Bergbaues im Vergleich zu der Menge des sich erneuernden Grundwassers wird die Auslaugung infolge der Beschleunigung der Diffusionsvorgänge entscheidend intensiviert.

– Sie kann bei vollständigem künstlichem Abfluß der Neubildungsmenge Beträge erreichen, die vorher im Auslaugungsgeschehen nur möglich waren als der Salzkörper noch in Oberflächennähe anstand.

– Durch die hohe, meist mehr oder weniger punktförmige Wasserentnahme bilden sich in ihrer Nähe auf der Auslaugungsfläche bevorzugte Richtungen besonders schneller Grundwasserbewegungen heraus, die sowohl selbst als auch

verstärkt durch vorhandene Inhomogenitäten des Gesteins zu beträchtlichen Unebenheiten auf der Salzoberfläche und unregelmäßigen Geländesenkungen führen.

– Endet die hydraulische Verbindung der Grube direkt in der Auslaugungsfläche, entsteht an dieser Stelle entsprechend den Geschwindigkeitsverhältnissen im Grundwasserabsenkungstrichter eine besonders tiefe „Auskoklung“ im Salzkörper, die an der Eintrittsstelle (im Zentrum) am tiefsten ist und deren Boden nach außen zunehmend flacher verläuft.

Wird die Wasserhaltung eingestellt und die Grube dem Ersaufen preisgegeben, „schichtet“ sich die Lauge im Bergwerk nach der Dichte. Dabei dringt, entsprechend den hydraulischen Möglichkeiten, so lange die schwerste Salzlösung aus dem Becken ein, bis die weniger konzentrierte Flüssigkeit nach oben verdrängt worden ist. Im Endzustand kommt die Laugenströmung in der Grube zur Ruhe. Die Flüssigkeit zeigt dann in der Vertikalen und Horizontalen nur noch geringe Konzentrationsunterschiede, die jedoch je nach Diffusionsmöglichkeit an den Verbindungen mit dem Grundwasserreservoir in etwas erhöhtem Maße aufrechterhalten werden können.

Wenn die Grubenbaue nach Einstellen der Wasserhaltung völlig mit Flüssigkeit höchstmöglicher Salzkonzentration gefüllt sind, beginnt sich der ursprüngliche, natürliche Zustand im Grundwasserreservoir wiederherzustellen. Damit kommt die sich allmählich mehr und mehr anreichernde schwere Sole im unteren Teil des Beckens zur Ruhe und nimmt an Mächtigkeit zu. Es entsteht erneut eine Bewegungsgrenze, die sich im Verlaufe der Zeit bis zum Erreichen der natürlichen stationären Verhältnisse nach oben verschiebt. Die früheren Salzwasserquellen werden wieder aktiv bzw. ihr Salzgehalt nimmt zu, die Versalzung des oberflächennahen Grundwassers wird infolge des Ansteigens der Süß-/Salzwassergränze ständig deutlicher bemerkbar. Allerdings ist festzustellen, daß diese Vorgänge sehr langsam verlaufen und sich über Hunderte und Tausende von Jahren erstrecken können. Da es sich im wesentlichen um eine Funktion der Diffusion handelt, ist der zeitliche Verlauf dieser Prozesse hauptsächlich abhängig von der Entfernung der Auslaugungsfläche zur ursprünglichen Bewegungsgrenze, der Verbreitung des Reservoirs (insbesondere der Aus-

laugungsfläche) und dem Formationswiderstand. Auch die Auslaugungsintensität verringert sich in Abhängigkeit von diesen Parametern nur allmählich. Während durch die Förderung des Bergbaues bei Entnahme hochkonzentrierter Lauge verhältnismäßig schnell der alte Zustand zerstört wird und die Auslaugung sehr rasch Bedingungen zu ihrer Beschleunigung erhält, dauert es lange, bis die normalen, für die Salzauflösung ungünstigen Diffusionsmöglichkeiten wieder erreicht sind. Die Auslaugung verläuft nach dem Ersaufen der Gruben weiter sehr rasch und klingt etwa mit dem Quadrat der Zeit ab.

Bei Entnahme von Sole für den Salinebetrieb gehen prinzipiell die gleichen Veränderungen im hydraulischen Regime vor sich wie bei der Wasserhaltung des Bergbaues. Allerdings befindet sich hier die Entnahmestelle meist in nicht so großer Tiefe im Vergleich zur Lage der Auslaugungsfläche, und auch die Fördermengen sind im allgemeinen geringer. Diese Solegewinnung begünstigt zwar die Salzauflösung, hat aber nicht so weitreichende Folgen wie der Bergbau.

### 6.3.

#### *Zur hydrogeologischen Kartierung, Grundwasserentnahme und -speicherung*

Die Aufgabe der hydrogeologischen Kartierung besteht darin, das jeweilige Gesamtwissen über die hydrogeologischen Verhältnisse und Prozesse eines bestimmten Gebietes graphisch zum Ausdruck zu bringen. Es kommt dabei nicht nur darauf an, eine Vielzahl von Fakten mehr oder weniger systematisch nebeneinander zu reihen, sondern die Zusammenhänge kenntlich zu machen. In einer modernen hydrogeologischen Karte müssen in der Darstellung die Gesetzmäßigkeiten und Beziehungen berücksichtigt werden. Daher darf man nicht nur von Einzelbeobachtungen ausgehen oder Wechselbeziehungen erkennen, sondern es sollten die Gesamtheit der Relationen, ihr Charakter, ihr Maß und die Wirkungskräfte erfaßt werden. Dies gilt insbesondere für hydrogeologische Karten in Auslaugungsgebieten, dabei vor allem für hydrochemische, in unserem Falle für die Karten der Chloridwerte.

Besonders in Auslaugungsgebieten wird man nur dann aussagefähige Formen der graphischen Darstellungen finden und Kartenbilder richtig deuten können, wenn man die gegebenen Zusammenhänge richtig zu beurteilen vermag.

Ausgehend von den theoretischen Vorstellungen über die Verbreitung der Grundwasserversalzung schließt sich der Verfasser der Meinung von HOHL (1969) an, wonach eine flächenhafte Darstellung der Hydrochemie den Nachteil größerer Unexaktheit und geringeren Aussagewertes hat. Er ist ebenfalls der Ansicht, daß eine Karte der Chloride nur dann zweckentsprechend auswertbar ist, wenn sie durch Isohalinen die Beziehungen zwischen Versalzung und den übrigen hydrogeologischen Verhältnissen zu erkennen gibt. Bei der Auswertung der Unterlagen für die Chloridkarte müssen in jedem Falle insbesondere die Dichte versalzener Wässer und die Diffusionsmöglichkeiten Beachtung finden. In dieser Hinsicht haben auch Isohalinen nur dann einen Sinn, wenn dabei auf die Entnahmetiefe der Wasserproben geachtet worden ist. Die Darstellung beispielsweise von Isohalinen aus Chloridwerten verschiedener Tiefe des gleichen Wasserleiters kann bei höheren Salzgehalten zu einem völlig verwirrenden Kartenbild führen. Man muß deshalb bei solchen Betrachtungen berücksichtigen, in welchem Tiefenniveau man sich befindet und welche hydraulischen und physikalischen Verhältnisse gegeben sind.

Mit jeder Grundwasserentnahme in Auslaugungsgebieten wird der bestehende natürliche stationäre Zustand hinsichtlich der hydraulischen und Diffusionsbedingungen in bestimmter Weise gestört und verändert. Für die Hydrogeologie ist dabei von besonderem Interesse, mit welcher Geschwindigkeit und in welchem Ausmaße solche Veränderungen vor sich gehen und welche Auswirkungen sie für die Gestaltung der Auslaugungsfläche haben. Um diese Frage zu klären, sind spezielle Kenntnisse über die Lage und den Verlauf der Süß-/Salzwassergrenze, der Bewegungsgrenze und über die Struktur der Salzwässer erforderlich. Ohne Beachtung der Spezifik des Reservoirs, seiner Parameter einschl. der genannten Grenzen in der Flüssigkeit werden alle Schlußfolgerungen für eine langfristige Voraussage der Entwicklung des gesamten hydraulischen Systems in Abhängigkeit von der Grundwasserentnahme unzulänglich bleiben.

Die Auswirkungen auf die Veränderung des natürlichen Regimes sind je nach Lage der Entnahmestelle in bezug auf die Auslaugungsfläche und je nach Umfang der Entnahmemenge im Vergleich zur Grundwasserneubildung des Reservoirs unterschiedlich.

Was die Entnahmemenge anbelangt, hat man zu unterscheiden, ob mehr oder weniger als das gesamte sich neu bildende Grundwasser aus dem Reservoir gefördert wird. In ersterem Falle stellt sich unter den neuen Bedingungen kein neuer stationärer Zustand ein. Die Versalzung des Wassers in der Fassung steigt zunehmend an. Damit ist die weitere Förderung im gewünschten Umfang und der geforderten Qualität nicht mehr möglich. Das Grundwassergefälle verläuft in jedem Teil des Reservoirs in Richtung der Entnahmestelle. In Abhängigkeit davon hat sich der Verlauf der Süß-/Salzwassergrenze und der Bewegungsgrenze verändert. Diese Trennflächen steigen bis zur Fassung an.

Wird nur ein Teil des sich neu bildenden Grundwassers gefördert, bildet sich um die Entnahmestelle eine hydraulische Senke, innerhalb derer sich für die Süß-/Salzwassergrenze und die Bewegungsgrenze ebenfalls Richtungs- und Gefälleänderungen ergeben. Die Trennflächen ändern an dem der natürlichen Grundwasserfließrichtung gelegenen Rand des Absenkungstrichters ihre Gefällerichtung.

Die durch das Schaffen hydraulischer Senken vor sich gehenden Veränderungen an der Süß-/Salzwassergrenze und der Bewegungsgrenze haben auf lange Sicht auch Auswirkungen auf das Relief der Auslaugungsflächen, wenn diese auch in ihrer Wirkung nicht denen bei Soleförderung vergleichbar sind. Trotzdem sollen sie nicht unerwähnt bleiben. Im Absenkungstrichter wird mit Annäherung an den Fassungsbereich die Strömungsgeschwindigkeit und damit auch die Diffusionsgeschwindigkeit rasch größer. Dadurch bedingt, besteht am Salzkörper die Möglichkeit örtlicher intensiverer Auslaugung und der Reliefbildung. Dabei hängt die Steilheit der entstehenden Unebenheiten auf der Auslaugungsfläche von

- der Form und Eindringtiefe der hydraulischen Senke,

- der Lage der Entnahmestelle bzw. des Absenkungstrichters in bezug auf die Auslaugungsfläche (vollständig über ihr oder in Fließrichtung

des Grundwassers oder entgegengesetzt teilweise oder völlig versetzt),

- der vertikalen und horizontalen Entfernung der Entnahmestelle vom festen Salzkörper und

- den zwischen Auslaugungsfläche und Bewegungsgrenze vorhandenen Formationswiderstandes ab.

Wie bereits beschrieben wurde, hat jede Beschleunigung der Grundwasserströmung ein Absinken der Bewegungsgrenze und damit, wenn auch nur lokal, eine Intensivierung der Auslaugung zur Folge. So kann auch bei der Grundwasserspeicherung durch künstliche Wasserzugabe über Schluckbrunnen oder sonstige Maßnahmen ähnlicher Wirkung eine Erhöhung des Grundwassergefälles und eine Verbesserung der Diffusionsbedingungen hervorgerufen werden. Zwischen Eingabe- und Entnahmestelle kommt es dann in Höhenlage der Süß-/Salzwassergrenze ungünstigenfalls zum Transport höher mineralisierter Wässer, als dies im natürlichen Zustand der Fall wäre. Daher sollte bei Grundwasserspeicherung in Auslaugungsgebieten besonders darauf geachtet werden, die Eingabe so einzurichten, daß die Strömungsveränderung hauptsächlich in der Nähe der Grundwasseroberfläche (weit entfernt von der Süß-/Salzwassergrenze) verläuft und unerwünschte Versalzungen vermieden werden.

#### 6.4.

### *Ingenieurgeologische Auswertung*

Bei der Bewertung der Eignung eines bestimmten Geländeabschnittes in Auslaugungsgebieten für die Bebauung oder sonstige Nutzung durch den Menschen kommt es darauf an, den zeitlichen Senkungsverlauf in der Vertikalen und insbesondere die regionalen Senkungsunterschiede vorauszusagen. Für beide Fragestellungen ergeben sich aus der geschilderten Modellvorstellung Schlußfolgerungen.

Es bedarf keiner weiteren Ausführungen, daß überall dort, wo die Voraussetzungen für Grundwasserströmung in unmittelbarer Nähe des festen Salzes gegeben sind, eine verhältnismäßig rasche Salzauflösung vor sich geht, die entsprechende Folgen für das Deckgebirge nach sich zieht. Der Verfasser hat versucht darzustellen, unter welchen



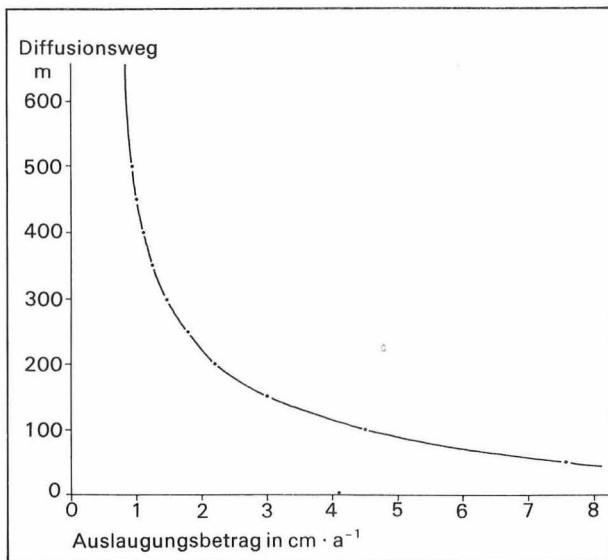


Abbildung 13  
Auslaugungsbeträge für freien Flüssigkeitsraum in  
Abhängigkeit vom Diffusionsweg

Bedingungen dies möglich wird. In den meisten Fällen jedoch ist die Auslaugungsfläche beträchtlich von der Bewegungsgrenze und der Süß-/Salzwassergrenze entfernt. Man kann sogar feststellen, daß es in der Natur eines geologischen Auslaugungsvorganges liegt, kurzzeitig solche Verhältnisse entstehen zu lassen.

Infolge dieser Gegebenheiten vollzieht sich die Auslaugung sehr langsam und hat im natürlichen Grundwassersystem keine bedrohlichen Auswirkungen hinsichtlich des Absinkens der Deckschichten und der Veränderungen an der Erdoberfläche. In Auswertung der Ergebnisse der Abbildung 11 sind die Auslaugungsbeträge in Abbildung 13 dargestellt. Hier wird von folgenden vereinfachenden, in unserem Sinne ungünstigen Annahmen ausgegangen:

- Die Diffusion finde im freien Wasser und nicht im Gestein statt.
- Das Deckgebirge sei homogen.
- Der Auslaugungsvorgang ereigne sich gleichmäßig über der gesamten Auslaugungsfläche.
- Die Dichte von Steinsalz betrage  $2,16 \text{ g/cm}^3$ .
- Das Reservoir über der Salzoberfläche erstrecke sich nicht über die Salzränder hinweg.

Mit einer größeren Auflösungs menge in der Zeiteinheit ist bei Disgruenz der Phasen zu rechnen, da das Grundwasserbecken weitere Ausdehnung besitzt und die Diffusion sich folglich mehrseitig

vollzieht bzw. die Fläche senkrecht zum Diffusionsstrom breiter als die Auslaugungsfläche angesetzt werden muß. Aber auch dadurch wird die Auslaugungsintensität ungünstigenfalls lediglich verdoppelt oder verdreifacht, in ihrer Größenordnung jedoch nicht verändert.

Die bisherige Betrachtung der Diffusionsvorgänge im Zusammenhang mit dem Salztransport durch Diffusion hat den Gesteinswiderstand außer acht gelassen. In dem sog. Formationswiderstand ist ein Faktor zu sehen, der die Fortbewegung des gelösten Salzes erheblich zu verringern vermag und je nach Beschaffenheit und Zusammensetzung des Einsturzgebirges unterschiedlich sein wird. Selbst bei der vorsichtigen Annahme, das Deckgebirge bestände aus Sand und Kies, müßten die berechneten Werte der Abbildung 13 auf mindestens ein Drittel reduziert werden. In Wirklichkeit sind Formationswiderstände von 100...1 000 zu erwarten.

Für die meisten Auslaugungsgebiete können bei der natürlichen Auflösung der Zechsteinsalze keine bedrohlichen Folgen für den Menschen entstehen, sofern die Auslaugung flächenhaft gleichmäßig vor sich geht und nicht an manchen Stellen intensiver erfolgt bzw. in „Einkolkung“ vorausseilt. Es sei denn, durch Entstehung von Resthohlräumen im Deckgebirge wird zunächst eine Einsturzverzögerung und dann ein plötzliches Einsinken verursacht. Diese Erscheinung ist ein Problem der Gebirgsmechanik. Dazu soll hier nicht Stellung genommen werden.

Wie sind nun die Gefahren infolge Schaffens von Unebenheiten in der Auslaugungsfläche und dadurch bedingten unregelmäßigen Geländesenkungen einzuschätzen? Durch Inhomogenitäten im Deckgebirge und im Salzkörper selbst können sich zweifellos örtlich verschiedene schnelle Auflösungen am Salzkörper ergeben. Aber auch die schnellsten Salztransporte werden durch die Diffusion gesteuert und haben nur die oben aufgezeigte Größenordnung, so daß sich Ungleichheiten dem Menschen kaum in bemerkbarem Ausmaße mitteilen. Außerdem wirken sich die Inhomogenitäten mit zunehmender Tiefenlage der Salzoberfläche immer geringer reliefbildend auf die Auslaugungsfläche aus, da die allseitig verlaufende Diffusion horizontale Unterschiede der Diffusionsgeschwindigkeit mehr und mehr mit Verlängerung der Diffusionsstrecke ausgleicht und somit die

ungleichmäßige Auslaugung dämpft. Der Verfasser vertritt die Meinung, daß bei Auslaugung in Position II auch unter Bedingungen ungleichmäßiger Salzauflösung die dadurch hervorgerufenen Unterschiede bei der Geländesenkung in ingenieurgeologischer Hinsicht keine Bedeutung haben. Plötzlich entstehende lokale Geländesenkungen deutet er als zeitlich und räumlich ungleichförmiges Nachbrechen des Deckgebirges. Kann man beispielsweise auf geophysikalischem Wege nachweisen, daß im Untergrund keine größeren Hohlräume bestehen, ist Sicherheit gegeben.

In der Literatur findet man vielfach die Vorstellung, jeder stärkeren Auslaugung sei insbesondere an den Salzsätteln eine Salzhebung vorausgegangen. Dieser Ansicht kann hydrogeologisch nur dann zugestimmt werden, wenn die Salzhebung episodisch abgelaufen ist und die Auslaugungsfläche um entscheidende Beträge der Erdoberfläche nähergebracht hat. Sollte die Auslaugung jedoch das Salz zumindest in dem Ausmaße auflösen, wie es angehoben wird, hat die genannte Feststellung keine Berechtigung. In diesem Falle handelt es sich um so unbedeutende Salzwanderungen, daß sie für den Ingenieurgeologen ohne Interesse sind. Dies dürfte für die Gegenwart generell zutreffen.

Im Abschnitt 6.2. ging der Verfasser auf die Veränderungen des natürlichen Grundwassersystems und die dadurch bedingte Erhöhung der Auslaugungsintensität durch die Bergbauentwässerung ein. Für den Ingenieurgeologen sind diese Eingriffe von besonderer Bedeutung, weil sie die Ursache von raschen Senkungen gleichmäßiger, vielfach auch ungleichmäßiger Art sein können und in einer Reihe Bergbaugebieten in mehr oder weniger großem Ausmaße auch geworden sind.

## 6.5.

### *Die Bedeutung für die Beurteilung der Gipsauslaugung*

Bei Begutachtung von Geländesenkungen in Gebieten, die der Auslaugung unterliegen, hat die Gipsauslaugung eine hervorragende Bedeutung. Dabei interessiert für die Voraussage der Ausdehnung von Senkungsmulden und den gebirgs-

mechanischen Ablauf des Nachsinkens der Schichten über Hohlräumen insbesondere die Tiefenlage der Auflösungsprozesse im Gipsgestein. Gegenwärtig ist man sich über die Tiefenreichweite der Gipsauslaugung noch nicht im klaren. Es gibt Vorstellungen, wonach die Auflösung bis weit unter das Vorfluterniveau hinabreicht (KOCKERT 1972). Nach anderen Meinungen kann mit einer Verkarstung im Gips nur an der Grundwasseroberfläche gerechnet werden (KEMPE 1970).

Soweit es sich um Verhältnisse mit einem salzwassererfüllten Reservoir über einer Auslaugungsfläche handelt, versucht der Verfasser, in den folgenden Darlegungen zur Klärung beizutragen. Zunächst müssen dafür einige Gesetzmäßigkeiten der Kinetik der Gipsauflösung erläutert werden.

Wie der Arbeit von SDANOWSKI (1958) zu entnehmen ist, erfolgt die Auflösung des Gipses, ebenso wie die des Halites diffusionsabhängig. Das bedeutet, die Geschwindigkeit des Lösungsvorganges steht in unmittelbarer Beziehung mit der Geschwindigkeit und der Strömungsrichtung des Lösungsmittels und wächst also mit der Verbesserung der Diffusionsmöglichkeiten. Der Koeffizient der Auflösungsgeschwindigkeit (d.h. die Stoffmenge, die sich je Zeit- und Oberflächeneinheit im Lösungsmittel auflöst) beträgt für Halit das Fünffache des Wertes für Gips (SDANOWSKI 1956). Danach muß auch der Diffusionskoeffizient von Gips wesentlich kleiner sein als der von NaCl. Für den Transport des gelösten Gipses und damit die Auslaugungsgeschwindigkeit bei bestimmter Diffusionsstrecke spielt die Sättigungskonzentration eine ausschlaggebende Rolle. Sie beträgt bei 10 °C 0,1925 g/100 g Wasser, bei 20 °C 0,2036 g/100 g Wasser. Die Löslichkeit von Gips erhöht sich durch Zusatz fremder Ionen und erreicht in NaCl-Lösungen bei mittleren Konzentrationen ihre höchsten Werte (BRAITSCH 1962).

Ausgehend von diesen lösungskinetischen Daten läßt sich für die Gipsauslaugung in Verbindung mit der NaCl-Auflösung schlußfolgern:

– In dem Salzwasserreservoir unterhalb der Bewegungsgrenze kann nur die kleine Menge Gips aufgelöst werden, die durch das stagnierende Wasser in den Grundwasserstrom zu diffundieren vermag.

– Infolge des kleinen Diffusionskoeffizienten und des kleinen Konzentrationsgefälles zwischen der Sättigungskonzentration und den geringen

CaSO<sub>4</sub>-Gehalten in Nähe der Erdoberfläche ist der Diffusionsstrom im Vergleich zu dem des NaCl von außerordentlich geringer Wirksamkeit auf den CaSO<sub>4</sub>-Transport aus größerer Tiefe.

– Eine Gipsauslaugung in der Größenordnung der Steinsalzauflösung an der Auslaugungsfläche ist nur in unmittelbarer Nähe der Bewegungsgrenze bzw. in größerem Ausmaße über ihr vorstellbar.

Daher ergibt sich, daß Hohlräume als Ursache für Geländesenkungen oder Erdfälle infolge Gipsauflösung höchstens bis wenige Meter unterhalb der Bewegungsgrenze entstehen können. Somit bestehen für die reguläre Auslaugung mit Disgruenz der Phasen im Bereich der in größerer Tiefe liegenden Auslaugungsfläche, über der sich auf den Gips- und Anhydritschichten mächtige Ablagerungen des Buntsandsteins befinden, keine Gefahren durch Gipsauflösung. Bei dieser Position läßt sich mit Sicherheit voraussagen, daß weder die Salz- noch die Gipsauslaugung größere unangenehme Folgen verursachen können. Schwieriger zu beurteilen sind hingegen solche Gebiete, in denen Gips in Oberflächennähe durch Süß- oder Salzwasser geringer Gehalte durchflossen wird und somit für eine Verkarstung die günstigsten Verhältnisse gegeben sind.

## Literatur

BAECKER, P.:

Über hydrochemische Untersuchungsmethoden als Hilfsmittel der Lagerstättenforschung. – In: Bergbau- und Bergbauwissenschaften. – Essen. – 4(1952), 12.

BECKER, R.:

Theorie der Wärme. – Berlin [West]; Göttingen; Heidelberg: Springer-Verlag, 1955.

BRAITSCH, O.:

Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten. Mineralogie und Petrographie in Einzeldarstellungen. Bd. 3. – Berlin [West]; Göttingen; Heidelberg: Springer-Verlag, 1962.

BRÜCKNER, G.:

Zur Entstehung der Salzspiegel. – In: Bergakademie. – Berlin. – 13 (1961), 6, S. 407...410.

FULDA, E.:

Salzspiegel und Salzhang. – In: Zeitschr. d. Dt. Geol. Ges. – Berlin und Stuttgart. – (1924), Bd. 75, S. 10 bis 14.

FULDA, E.:

Salzauslaugungen. – In: Jb. des halleischen Verbandes. – Halle. – 4 (1923/24), S. 369...379.

HOHL, R.:

Zur Methodik der hydrogeologischen Spezialkartierung im Festgesteinsbereich. – In: Wiss. Zeitschr. der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. – Halle. – XVIII, 69 M (1969), S. 641...683.

KELLER, G.:

Grundwasserversalzung im saxonischen Faltungsfeld Niedersachsens. – In: Geotekton. Symposium. – Stuttgart. – (1956), S. 425...440.

KEMPE, St.:

Beiträge zum Problem der Speläogenese im Gips unter besonderer Berücksichtigung der Unterwasserphase. – In: Die Höhle. – Wien. – 21 (1970), 3, S. 126.

KNIESEL, J.:

Hydrogeologische Folgerungen aus der Gewinnung natürlicher Sole in Halle (Saale). – In: Zeitschr. angew. Geol. – Berlin. – 14 (1968), 12, S. 644...648.

–: Modellvorstellungen zur Dynamik der Auslaugungsprozesse des Zechsteinsalzes in den Saxoniden der DDR. – Halle: Dissertation A (unveröffentlicht), 1975.

KOCKERT, W.:

Höhlenbildungen im Zechstein der DDR und einige grundsätzliche Bemerkungen zur Karsthydrologie der Zechsteinschichten. – In: Ber. dt. Ges. geol. Wiss. – Berlin. – A 17 (1972), 2, S. 261...272.

LÖFFLER, J.:

Die Kali- und Steinsalzlagerstätten des Zechsteins in der DDR. Teil III, Sachsen-Anhalt. – In: Freiburger Forsch.-H. – Berlin. – (97/III 1962).

SCHWARZBACH, M.:

Das Klima der Vorzeit. Eine Einführung in die Paläoklimatologie. – 2. vollst. Neubearb. u. erw. Aufl. – Stuttgart: Enke, 1961.

SDANOWSKI, A. B.:

Die Lösungskinetik der Natursalze unter Bedingungen einer gelenkten Konvektion. – In: Arbeiten des Allunions-Forschungsinstit. f. Halurgie. – 33 (1956).

–: Gesetzmäßigkeiten in der Kinetik der Salzauflösung. – In: Freiburger Forsch.-H. – Berlin. – A 123 „Symposium 1958“ (1958), S. 257...268.

WEBER, H.:

Geomorphologische Studien in Westthüringen. – In: Forsch. Dt. Landes- und Volkskunde. – Stuttgart. – 27 (1929), 3.

–: Zur Systematik der Auslaugungen. – In: Zeitschr. d. Dt. Geol. Ges. – Berlin. – 82 (1930), S. 179...186.

