



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH

Untersuchung von
Altversatz als Analo-
gon zur Konvergenz
und Kompaktierung
versetzter unter-
tägiger Hohlräume
im Salz über lange
Zeiträume - Phase I



**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

**Untersuchung von Altversatz
als Analogon zur Konver-
genz und Kompaktierung
versetzter untertägiger
Hohlräume im Salz über
lange Zeiträume - Phase I**

Abschlußbericht

**Jürgen Brenner
Hans-Karl Feddersen
Hermann Gies
Rüdiger Miehe
Tilman Rothfuchs
Richard Storck**

März 1999

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrunde-
liegenden Arbeiten wurden mit
Mitteln des Bundesministeriums für
Bildung, Wissenschaft, Forschung
und Technologie (BMBF) unter
dem Förderkennzeichen 02E
8996-3 gefördert. Die Arbeiten
wurden von der Gesellschaft für
Anlagen- und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH durchgeführt. Die Ver-
antwortung für den Inhalt dieser
Veröffentlichung liegt allein bei
den Autoren.

Deskriptoren:
Endlagerung, Technische Barriere, Salz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung.....	1
2	Anforderungen an den Versatz in einem Endlagerbergwerk.....	2
3	Grundvorgänge und Einflußgrößen der Volumenänderung von salinarem Versatzmaterial	4
3.1	Parameter.....	4
3.2	Stoffgesetz-Modellierung.....	5
3.3	Experimente	6
4	Anforderungen an Untersuchungsobjekte aus geotechnischer Sicht	9
4.1	Anforderungen an den Standort.....	10
4.2	Erforderliche Informationen zum Zeitpunkt der Verfüllung.....	12
4.2.1	Ausgangszustand und Zusammensetzung des Materials	12
4.2.2	Ausgangszustand und Geschichte des Abbaufeldes	13
4.2.3	Geologie des Abbaufeldes	13
5	Auslegungsrechnungen für die Auswahl geeigneter Untersuchungsobjekte.....	14
5.1	Konvergenzansatz.....	14
5.2	Porositätsverlauf des Versatzes	19
6	Ermittlung und Auswahl geeigneter Untersuchungsobjekte.....	21
6.1	Kontaktaufnahme und Ergebnis der Gespräche mit Bergwerksbetreibern	21
6.1.1	Versatzsituation im GSF-Versuchsbergwerk, Asse	21
6.1.2	K-UTEC, Kali-Umwelttechnik (frühere Mitteldeutsche Kaliwerke).....	23
6.1.3	Südwestdeutsche Salzwerke AG, Heilbronn	24

6.1.4	Kali und Salz GmbH, Kassel	24
6.1.4.1	Kalibergwerk Sigmundshall	27
6.1.4.2	Ehemaliges Kali- und Salzbergwerk Niedersachsen-Riedel	29
6.1.4.3	Ehemaliges Kalibergwerk Salzdetfurth	30
6.1.5	Steinsalzbergwerk Sotolvina, Westukraine.....	31
7	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen.....	32
7.1	Zusammenfassung	32
7.2	Schlußfolgerungen	38
8	Literatur.....	40
	Tabellenverzeichnis	44
	Abbildungsverzeichnis und Abbildungen	45

1 Einleitung und Problemstellung

Die Funktion des intakten Salzgebirges als wichtigste Endlagerbarriere wird für einen begrenzten Zeitraum durch die Anlage eines Endlagerbergwerkes gestört. Dieser Eingriff wird durch die, die Konvergenz der Hohlräume im Bergwerk bedingende, viskoelastische Verformbarkeit des Salzes wieder ausgeglichen. Um diesen Effekt zu unterstützen und den für die Konvergenz bedingte Schließung der Hohlräume anzusetzenden Zeitraum auf ein Minimum zu begrenzen, müssen die verbliebenen Hohlräume verfüllt werden. Dadurch wird gleichzeitig eine wesentliche Verminderung des im Falle eines Lösungszutritts verfügbaren Hohlraumvolumens erreicht. Diese und weitere Aufgaben von Salzversatz, ebenso wie die Möglichkeiten seiner Durchführung und Optimierung, beschrieb der damalige Fachausschuß Thermische Simulation der Streckenlagerung in seinem Positionspapier 'Notwendige FuE-Arbeiten zum Thema Versatz in einem Endlager im Salinar' (1995).

Aufgrund ihres hohen Zeitbedarfs entziehen sich die gesteinsmechanischen Vorgänge in ihrer Vollständigkeit dem Experiment. Daher kommt der Untersuchung entsprechender analoger Objekte bzw. Situationen eine besondere Bedeutung zu. Geeignete Analoga stellen in Kombination mit Labor- und In-situ-Versuchen ein wertvolles Mittel dar, die Modelle und Daten zur Konvergenz von Steinsalz und der Kompaktion von Salzgrusversatz über längere Zeiträume abzusichern. Sie leisten dadurch einen wichtigen Beitrag die Aussagekraft von Langzeitsicherheitsanalysen zu erhöhen und führen darüber hinaus zu einem vertieften Verständnis der kombinierten Wirkung wichtiger Prozesse über lange Zeiträume.

Der Expertenkreis 'Natürliche Analoga', des Projektträgers Entsorgung (PTE), hat die Problematik diskutiert und eine Reihe von Einzelvorkommen als wünschenswerten Untersuchungsbedarf formuliert. Hierzu gehört auch das Thema 'Altversatz', dessen Bearbeitung in einer vorbereitenden Phase 1 Gegenstand des nachfolgenden Berichts ist. Das spezielle Ziel dieser Phase war es zum einen zu definieren, welche Anforderungen vorzuschlagende Untersuchungsobjekte erfüllen müssen. Zum ande-

ren sollten die im deutschen und mitteleuropäischen Salzbergbau sich bietenden Möglichkeiten untersucht und bewertet werden. Das Ergebnis sollte ein Vorschlag von zwei (evtl. drei) Lokalitäten sein, die für eine Untersuchung als (technisches) Analogon in Betracht kommen. Hierfür wurden im Rahmen von zwei Arbeitspaketen sechs Teilaufgaben festgelegt.

Es ist vorgesehen, die Hohlräume in einem Endlagerbergwerk im wesentlichen mit dem bei der Auffahrung der Endlagerstrecken und -kammern anfallenden Haufwerk zu verfüllen. Dieses Salz wird mit Streckenvortriebsmaschinen, teilweise aber auch mittels Bohren und Schießen gelöst werden und, nach einer eventuellen Zwischenlagerung unter Tage, unmittelbar als Versatzmaterial für Strecken und Querschläge dienen.

Für einen wesentlichen Teil des Endlagerbergwerks und insbesondere den Einlagerungsbereich kann von trocken eingebrachtem Steinsalzversatz ausgegangen werden, für den allerdings, wie zu zeigen sein wird, die Chancen einer möglichst frühen Stützwirkung, bedingt durch eine entsprechende Eigenkompaktion, am geringsten sind. Die Wirkung einer von außen forcierten Versatzverdichtung aufgrund einer Auflast, ist nur in Bereichen genügend großer Konvergenz des festen Steinsalzes zu erwarten.

2 Anforderungen an den Versatz in einem Endlagerbergwerk

In produzierenden Kali- und Steinsalzbergwerken mit besonderen geologischen Verhältnissen im Umfeld der leeren Abbauhohlräume dient die Einbringung von Versatzmaterialien im allgemeinen der Stützung des Gebirges, um unkontrollierte Gebirgsbewegungen und demzufolge Bergschäden über Tage aufgrund des hohen Durchbaugrades des Gebirges zu vermeiden. In Endlagerbergwerken sind die aufgefahrenen Hohlraumvolumina deutlich geringer, so daß dieser Aufgabe eine geringere Bedeutung zukommt. Hier hat das Versatzmaterial ein wesentlich breiteres Aufgabengebiet wie

- die Ableitung von Zerfallswärme in das umgebende Gebirge,
- die Bereitstellung von Speichervolumen zur Aufnahme entstehender Gase,
- die Stützung des Gebirges zur Vermeidung von Auflockerungen und damit der Bildung von Wegsamkeiten,
- die Reduzierung des Hohlraumvolumens für den Fall eines Laugenzutritts,
- die Behinderung von Laugenbewegungen bei einem Laugenzutritt,
- die Rückhaltung von Schadstoffen beim Transport kontaminierter Laugen,
- die vollständige Isolation der eingelagerten Abfälle im Gebirge.

Der Bedarf für die genannten Aufgaben hängt deutlich vom Endlagerkonzept und den lokalen Verhältnissen, insbesondere aber von den spezifischen Anforderungen an den Versatz im jeweiligen Teilbereich des Endlagers ab. So wird ein Versatz im direkten Umfeld der eingelagerten Abfallgebände hinsichtlich der Wärmeabfuhr, der Hohlraumminimierung und der Isolation der Abfälle in der Gesteinsmatrix ausgelegt werden. Ein Versatz zur Aufnahme entstehender Gase wird hinsichtlich einer größtmöglichen Stützwirkung bei gleichzeitig hohem Porenvolumen ausgewählt werden. Ein Versatz in Strecken dient gegebenenfalls der Behinderung von Laugenzutritten und der Rückhaltung von Schadstoffen beim Transport kontaminierter Laugen sowie der Isolation der Abfälle in der Gesteinsmatrix.

Das Versatzmaterial im Endlager sollte möglichst trocken eingebracht werden, da Lösungen beim Kontakt mit Abfällen zu Schadstoffmobilisierungen und zur Erzeugung von Gasen führen können. Andererseits kann eine geringe Feuchtigkeitsmenge u.a. in der Anfangsphase auch die Stützwirkung des Versatzes erhöhen und somit diesbezügliche Eigenschaften verstärken.

Spülversatz als besondere Versatztechnik - sich absetzender Feststoff aus einer Lösung, die die aufgeschlossenen Salze nicht mehr angreift - ist bei genügendem Alter in den oberen Partien in der Regel gut verfestigt und getrocknet bis auf einen Restfeuchtegehalt von ca. 3 - 5 % (Erfahrungen des Kalibergbaus!). Allerdings sammelt

sich am Fuße des Versatzes der Rest der eingetragenen Flüssigkeit und tritt gegebenenfalls über lange Zeit aus. Bei höherem Alter und inzwischen erfolgter Verfestigung sollten „nasse Füße“ eines Versatzkörpers für Fragestellung ohne Bedeutung sein.

3 Grundvorgänge und Einflußgrößen der Volumenänderung von salinarem Versatzmaterial

Für die Suche, Auswahl und Bewertung potentieller Objekte für eine Untersuchung als Analogon sind sowohl die grundlegenden Mechanismen als auch wichtigsten Einflußgrößen des Verhaltens von Salzversatz zu betrachten. Dies muß auch bereits geschehen im Hinblick auf die in einem eventuell nachfolgenden Untersuchungsprogramm durchzuführenden Messungen.

3.1 Parameter

Die Untersuchung von Versatzmaterial in jahrzehnte-alten Bergwerken geht von der Annahme aus, daß dessen über einen langen Zeitraum erfolgte Kompaktierung zu einer signifikanten Reduzierung des Porenraums im Versatz geführt hat, was gleichzeitig eine erhöhte Stützwirkung desselben gegenüber der Konvergenz der Hohlräume bedingt. Die heutigen Eigenschaften des Altversatzes sind das Ergebnis seiner Ausgangszusammensetzung und der davon abhängigen Kompaktion, wie auch des Konvergenzverlaufes des Gebirges. Die Anwesenheit von Flüssigkeitsanteilen (3-6 % beim "trockenen" Rückstand, bis 100 % beim Spülversatz) kann die Kompaktionsgeschwindigkeit nicht unwesentlich beeinflussen und durch Umlösungen zur Veränderung der Permeabilität führen. Allerdings sind diese Einflüsse oft nicht homogen im Material repräsentiert und verstärken so nicht selten die bereits primär gegebenen Inhomogenitäten. Einem besseren Verschuß durch höhere Dichtigkeit auf der einen Seite stehen dann lösungsbedingte Hohlräume und damit eine vorerst erhöhte Wegsamkeit auf der anderen Seite gegenüber.

Zur Entwicklung eines physikalisch begründeten Stoffgesetzes für Salzgranulat unterscheidet /HEI 91/ reversible und irreversible Verformungen. Die elastischen Konstanten werden für den reversiblen Anteil von denen des festen Salzes abgeleitet. Die irreversiblen Verformungen beruhen nach ihm zuerst auf einer schnell erfolgenden Kurzzeitkompaktierung und nachfolgend einer noch länger ablaufenden Kriechkompaktierung. Von Bedeutung für ein Stoffgesetz sind auch die Kornverschiebung, die sowohl zur Verdichtung als auch Auflockerung des Materials führen kann sowie die Kornverformung, die ausschließlich zur Versatzverdichtung führt. Die theoretischen Überlegungen werden verglichen mit den Ergebnissen von Manteldruckversuchen, was zu einer befriedigenden Voraussage der Kurzzeitkompaktierung von definierten Granulaten führt.

Eine Erweiterung in der Zahl der Einflußgrößen erfährt das Versatz-Stoffgesetz noch durch /ZHA 93/. Nach ihm beruht die Kompaktion von Salzgrus auf mehreren physikalischen Mechanismen - Kornzertrümmerung, Korngrenzgleiten, Kornverformung durch Versetzungsgleiten, Druckauflösung sowie Rekrystallisation und Umlösung - die ihrerseits abhängig sind von den jeweiligen Spannungs- und Temperaturbedingungen und der Anwesenheit einer flüssigen Phase. Die generelle Bedeutung der letzteren für die Aktivierung der Kriecheigenschaften von festem Steinsalz wurde in jüngerer Zeit auch durch die Arbeiten von O. Schulze, BGR /HUN 96/ herausgestellt.

3.2 Stoffgesetz-Modellierung

Für die von den verschiedenen Bearbeitern bisher durchgeführte Entwicklung eines Stoffgesetzes für Salzversatz /SPI 89/, /ZHA 93/, /HEI 91/ könnte nach /PRI 95/ die folgende Form als allgemein gültig angesehen werden:

$$\dot{\epsilon}_v = A \cdot f(T) \cdot g(\sigma) \cdot h(\phi) \quad (1)$$

mit:

- $\dot{\epsilon}_v$ = Kompaktionsrate
- A = Strukturparameter
- σ = Spannung
- T = Temperatur
- ϕ = Porosität

Im Gegensatz zur Annahme eines ausschließlichen hydrostatischen Spannungszustandes im Salzgrus /SPI 93/, /ZHA 93/ jedoch berücksichtigt /HEI 91/ einen deviatorischen Spannungszustand im Versatzmaterial.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = A \cdot f(T) \cdot (h_1 p^2 + h_2 q^2)^2 \cdot (1 / 3 h_1 p \delta_{ij} + h_2 s_{ij}) \quad (2)$$

mit:

- $\dot{\epsilon}_{ij}$ = Tensor der Dehnungsrate
- p = hydrostatische Spannungsinvariante
- A = Fließfaktor
- q = deviatorische Spannungsinvariante
- δ_{ij} = KRONECKER-Symbol; $\delta_{ij} = 1$ wenn $i = j$, andernfalls 0
- s_{ij} = Tensor der Deviatorspannung
- h_1, h_2 = porositätsabhängige Materialparameter

3.3 Experimente

Unter Zugrundelegung des Stoffgesetzes von /ZHA 93/ hat /STÜ 95/ Oedometer-Versuche mit trockenem Salzgrus zweier unterschiedlicher Körnungen bei Temperaturen zwischen 50 °C und 200 °C durchgeführt. Der Vergleich der Ergebnisse von Experiment und Rechnung erbrachte gute Übereinstimmung über den gesamten Kompaktierungsbereich.

Zur Aufstellung und Absicherung eines viskoplastischen Stoffgesetzes führte /KOR 96a/ experimentelle Untersuchungen an trockenem Salzgrusversatz mittels ei-

ner speziell hierfür entwickelten Triaxialpresse durch. Bei Drücken zwischen 2 und 20 MPa sowie Temperaturen von 21,5 bis 150 °C erhielt er Porositäten zwischen 25 und 3,7 % bei Konsolidierungsraten von 10^{-6} bis $5 \cdot 10^{-4}$ /s. Er konnte feststellen, daß sowohl hydrostatische als auch deviatorische Spannungszustände zufriedenstellend mit dem von Hein aufgestellten Stoffgesetz beschrieben werden können.

Der Einfluß von Wasser auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Salzgrus wurde gleichfalls erstmals von /KOR 96b/ im Experiment untersucht. In der bereits erwähnten triaxialen Meßeinrichtung wurden bei teils hydrostatischen teils deviatorischen Spannungsbedingungen zwischen 2 und 7,5 MPa ein Salzgrus mit 1 % H₂O untersucht und dabei folgende Beobachtungen gemacht:

- Die beobachteten Kompaktierungsraten sind 60 bis 600fach größer als beim trockenen Salzgrus unter gleichen Versuchsbedingungen.
- Der Spannungsexponent ist wesentlich kleiner (ca. 2 gegenüber 5 beim trockenen Material).
- Die aus der deviatorischen Phase (bei einer Porosität von 22,9 %) abgeleitete effektive Querdehnungszahl entspricht den am trockenen Material gemessenen.

Die Bedeutung weiterer Parameter geht sowohl aus Labor- als auch In-situ-Untersuchungen hervor. So wurde die Abhängigkeit der Versatzkompaktion von der Art der Einbringung und der dadurch erreichten Anfangsschüttdichte sowie der Korngröße des Materials auch bereits von /KAP 86, 88/ sowie /FIS 87/ in umfangreichen Labor- und In-situ-Messungen ermittelt, während /BRÜ 93/ das Verdichtungsverhalten von trockenem und feuchten Steinsalzhaufwerk unter gefügemäßigen Aspekten untersuchte.

Bei Zutritt von Laugen ist zusätzlich deren Chemismus von großer Bedeutung. Werden zum Beispiel Lösungen eingebracht, die noch an Mg untersättigt sind, führt dies einerseits zur weiteren Auflösung von Mg-Salzen, in erster Linie Carnallit, mit entsprechender Hohlräumbildung, andererseits aber auch zur Auskristallisation von NaCl, wodurch vorhandener Porenraum verschlossen wird.

In einer umfangreichen Studie zur „Alteration von Haldensalz und seiner Verwendbarkeit als Versatzmaterial“ hat das GSF-Institut für Tief Lagerung im Auftrag des BfS die Bedeutung der Wasserbindung als Kristallwasser von Hydratmineralen im Versatz bei Aufhaldung über Tage, insbesondere durch die Reaktion Anhydrit \leftrightarrow Gips, herausgestellt. Bei Einbringung in untertägige Grubenräume wird dieses Wasser aufgrund erhöhter Temperaturen (≥ 38 °C) und einer veränderten NaCl-Salinität wieder freigesetzt und stellt neben dem Haftwasser eine beträchtliche Quelle für Lösungen dar, die sich, als anfänglich reines H_2O , auch noch durch eine besonders starke Lösefähigkeit auszeichnet /GIE 89/. Diese Auswirkungen sind in unterschiedlichem Maße im Versatzmaterial dokumentiert, wie auch entsprechende Aufschlüsse im Altversatz der 750-m-Sohle der Asse gezeigt haben.

Der seit mehr als fünf Jahren in der Asse laufende Erhitzerversuch (VVS früher TSS) hat bislang als ein wichtiges Ergebnis eine gegenüber den rechnerischen Voraussagen langsamere Konvergenz und Kompaktion ergeben /ROT 95/.

Eine potentielle Fehlerquelle könnte in einer ungenügenden Parameterbestimmung in den Laborversuchen zu sehen sein. Diese bedürfen deshalb der Weiterführung und Absicherung, allerdings unter Berücksichtigung der sich auch aus der Untersuchung analoger Beispiele ergebenden Hinweise auf weitere Einflußgrößen.

Als eine solche wird für den Fall des Versetzens von Abbauhohlräumen im produzierenden Kalibergbau von /BLA 89/ auch die weitergehende Hydratisierung von Kiese-ritbeimengungen genannt. Bei trocken eingebrachtem normalen Steinsalzgrus ist dieser Fall nur selten gegeben, bei der Verwendung von Fabrikrückständen dagegen ist er die Regel. Laboruntersuchungen an Flotationsrückständen aus der Kaligewinnung in Zielitz ergaben eine maximale Versatzfestigkeit bei 1,5 % Lauge /FAH 95/.

Die Bedeutung unterschiedlicher Feuchte des eingebrachten salinaren Versatzmaterials wird auch offensichtlich im produzierenden Bergwerk. Die später noch vorzustellenden steinsalzversetzten Abbaue der Kali und Salz GmbH auf den Bergwerken Sigmundshall und Niedersachsen - Riedel zeigen in allen Fällen, unabhängig von der Tiefe ein standfestes Salzhaufwerk, während trockener Salzgrus in Teufen zwischen

1400 und 1500 m auch 15 Jahre nach seiner Einbringung noch rieselfähig ist. Dazu beigetragen haben dürfte u.a. auch die Tatsache, daß die Konvergenz des Gebirges nach Beendigung des Abbaus in aller Regel nur noch Restbeträge aufweist. /BLA 89/ haben gezeigt, daß in allen untersuchten Fällen die Konvergenzgeschwindigkeit unmittelbar nach Beendigung der Abbautätigkeit deutlich abnimmt, noch bevor der Versatz überhaupt eine Stützwirkung entfalten kann. In diesem Zusammenhang wird eine Kurve der in einem Feldestell des Kalibergwerks Bergmannsseggen - Hugo gemessenen Konvergenzraten als repräsentativ angesehen (Abbildung 3.1 - /BLA 89/).

Sowohl /BLA 89/ als auch /OCH 95/ haben durch umfangreiche Extensometer- u.a. Messungen nachgewiesen, daß das Gebirge auf eine Hohlraumerstellung spontan bis zu einer Entfernung von 50 m von den Hohlräumen mit Spannungsumlagerung reagiert und auch Abbauaktivitäten bis zu einer Entfernung von 500 m noch nachweisbar sind. Die großräumige Bewegung des Salzgebirges in Richtung Abbau hält über Jahre an (Messungen über einen Zeitraum von 16 Jahren!) und klingt allmählich ab /OCH 95/.

Als ein weiteres Ergebnis der Messungen am Versatz wird von den Autoren auch herausgestellt, daß für die Verringerung der Versatzporosität, d.h. die Erhöhung der Versatzdichte, nicht nur die Höhe der Belastung, sondern auch deren Dauer von entsprechendem Einfluß ist. Eine nennenswerte Lastaufnahme des Salzversatzes erfolgt erst nach einer Verdichtung um wenigstens 15 %. Gleichzeitig aber wird auch betont, daß eine entsprechend hohe Konvergenz bei den durchgeführten Messungen bisher in keinem Fall festgestellt wurde.

4 Anforderungen an Untersuchungsobjekte aus geotechnischer Sicht

Während die Versatzeinbringung in produzierende Kalibergwerke im wesentlichen von der Notwendigkeit diktiert wird, durch die Stützwirkung desselben die Konvergenz der Grubenräume langfristig zu reduzieren, hat der Versatz in Endlagerbergwerken generell noch weitere Aufgaben. Diese bestehen in wärmebelasteten Endlagerbereichen in

einer verbesserten Ableitung der Zerfallswärme und weiterhin in einer Reduzierung des Hohlraumvolumens, als wichtigem Parameter im Falle des Eindringens von Lauge.

Für die Verfüllung wesentlicher Teile eines Endlagerbergwerkes ist von trockenem, lediglich mechanisch verändertem Steinsalz-Versatz auszugehen. Zu untersuchender Altversatz, der als repräsentativ für ein zukünftiges Endlager angesehen werden kann, sollte demnach eine Reihe von Anforderungen erfüllen, die zugleich Kriterien für Art und Umfang einer späteren Untersuchung darstellen. In diesem Sinne wurden bereits in dem diesem Projekt zugrundeliegenden Antrag für die Auswahl geeigneter Objekte folgende Kriterien als vorrangig herausgestellt:

- Es sollte sich weitgehend um Steinsalz handeln,
- das Korngrößenspektrum sollte endlagerrelevant (<60 mm) sein,
- die Versatzeinbringung sollte mehr als 10 Jahre zurückliegen und
- sie sollte möglichst trocken erfolgt sein.

Mögliche und notwendige Kompromisse in der einen oder anderen Anforderung wären von Fall zu Fall für die konkreten Objekte zu prüfen.

4.1 Anforderungen an den Standort

An den Standort bzw. das Untersuchungsobjekt 'Altversatz' werden auch aus geotechnischer Sicht Anforderungen gestellt, die erfüllt sein müssen, damit die Untersuchungsergebnisse Relevanz für ein Endlager im Salinar besitzen.

Als erstes wird vorausgesetzt, daß sich das Untersuchungsobjekt (eine versetzte Kammer oder Strecke) im Salinar befindet, da bei anderen Gesteinen die zur gleichmäßigen Kompaktion des Versatzes notwendige Fließfähigkeit nicht vergleichbar ausgeprägt ist. Dabei ist es für die Repräsentativität der Untersuchungsergebnisse unerheblich, ob es sich um einen Salzstock oder um söhlig gelagertes Salz handelt. Entscheidend ist, daß der Versatz im Laufe der Zeit nach seiner Einbringung eine genügend hohe Kompaktion erfahren hat, damit überhaupt Aussagen über das Kom-

paktionsverhalten gemacht werden können. Damit aber scheiden Hohlräume mit sehr geringer Konvergenzrate, wie sie zum Beispiel im ERAM typisch sind, und erst vor kurzer Zeit verfüllte Hohlräume als mögliche Untersuchungsobjekte aus.

Weitere Anforderungen betreffen den Zustand des Versatzes bei seiner Einbringung. Ein Wassergehalt von Bergwerksversatz, der durch den Aufbereitungsprozeß, die Aufhaltung oder den Mineralgehalt begründet ist, ist nicht repräsentativ für einen mit Teilschnittmaschinen gewonnenen Endlagerversatz, da größere Umlösungsvorgänge nicht auszuschließen sind und die Dichtfunktion des Versatzes gegen Lauge damit nicht gewährleistet ist. Bei anhydrithaltigem Salzgrus beispielsweise führt der mineralgebundene Wassergehalt aufgrund einer übertägigen Aufhaltung zur Umbildung des Anhydrits in Gips. Nach der Einbringung des Versatzes in den untertägigen Hohlraum findet dann aufgrund der höheren Temperatur eine Rückumwandlung in Anhydrit statt, wobei das im Gips gebundene Wasser freigesetzt wird (s. Kapitel 2).

Eine letzte Anforderung betrifft die Lage des Untersuchungsobjektes innerhalb des Grubengebäudes. Um sicherzustellen, daß die Gebirgsspannung in der Umgebung des versetzten Hohlraums nicht zu stark durch umliegende Abbaue gestört wird, ist ein ausreichender Abstand zu diesen notwendig. Eine signifikante Beeinflussung des Spannungsfeldes ist bei unverfüllten Abbauen bis zu einer Entfernung von fünf bis sechs Abbauradien zu erwarten /ERZ 78/.

Damit würden sich insgesamt aus geotechnischer Sicht die folgenden Anforderungen an das Untersuchungsobjekt ergeben:

- Wirtsgestein Steinsalz,
- Restporosität des Versatzes geringer als Schüttgutporosität (< 40 %),
- geringer Wassergehalt und keine großen Laugebewegungen in den Versatz,
- ausreichender Abstand zu anderen Abbauen.

4.2 Erforderliche Informationen zum Zeitpunkt der Verfüllung

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt bei der Untersuchung von Altversatz besteht darin, Zustand und Eigenschaften des Versatzes rückblickend zu betrachten. Ziel des Vorhabens ist es daher, den Kompaktionsgrad des Versatzes zu bestimmen und daraus seine Dicht- und Stützwirkung abzuleiten. Dafür sind Kenntnisse zum Zeitpunkt des Beginns der Verfüllmaßnahme über

- den Ausgangszustand und die -zusammensetzung des Verfüllmaterials,
- die Art der Einbringung,
- die Geschichte des versetzten Hohlraums seit der Verfüllung sowie
- die Geologie seines Umfeldes allgemein

erforderlich, da davon der Ist-Zustand des Versatzes entscheidend abhängt.

Dabei muß auch das reale, sich im Laufe der Zeit verändernde Konvergenzverhalten des Gebirges, in dem sich der zu verfüllende Hohlraum befindet, in Betracht gezogen werden. Wichtige Informationen für zukünftiges Verhalten sind auch dadurch zu erhalten, daß ein realistischer Verfüllvorgang zurückverfolgt und die Dicht- und Stützwirkung des Versatzes nach langer Zeit untersucht wird.

4.2.1 Ausgangszustand und Zusammensetzung des Materials

Kenntnisse über den Ausgangszustand und die Anfangszusammensetzung des Materials sind deshalb so wichtig, weil sie maßgebend den Endzustand und den Zeitpunkt, wann dieser Endzustand erreicht wird, beeinflussen. Je besser man über die nachfolgenden Punkte Bescheid weiß, um so besser wird man den anzutreffenden Ist-Zustand des Versatzmaterials beurteilen können.

Diese Punkte sind:

- Mineralogische Zusammensetzung des Materials,
- Anzahl und Art der Komponenten, aus denen das Material besteht,

- Korngröße der Bestandteile, sowie des gebrochenen Materials,
- Feuchtigkeitsgehalt,
- chemische Zusätze,
- Art der Einbringung,
- Anfangsporosität.

4.2.2 Ausgangszustand und Geschichte des Abbaufeldes

Der Zustand eines vor längerer Zeit eingebrachten Versatzes hängt auch von den Vorgängen im Bereich des Abbaufeldes ab, die nach der Verfüllung stattgefunden haben. Dabei sind zu diesem nicht nur der Versatz, sondern auch der Kontaktbereich zwischen Versatz und Gebirge, der Resthohlraum oberhalb des Versatzes, die Auflockerungszone und der Gebirgsnahbereich mit evtl. vorhandenen Strecken und Kammern zu rechnen. Es wird zwar in der Regel sehr schwierig sein, alle erforderlichen Informationen über die erwähnten Feldesteile und deren Geschichte zu erhalten, aber je mehr Informationen vorhanden sind, um so größer ist die Chance für eine umfassende Beurteilung der Wirkung des Versatzes.

4.2.3 Geologie des Abbaufeldes

Wenn keine genauen Messungen des Spannungsfeldes und seines zeitlichen Verlaufs vorliegen, so müssen gebirgsmechanische Modellrechnungen diese Lücke schließen. Eine wichtige Grundlage für die modellmäßigen Spannungsfeldberechnungen sind die geologisch-tektonischen Verhältnisse des Abbaufeldes. Die Eigenschaften des Versatzes hängen von seiner Kompaktion ab, die durch die Konvergenz des Gebirges aufgrund des Spannungsgradienten verursacht wird. Auch letztere wird, wie alle Konvergenzuntersuchungen in Salzbergwerken zeigen, durch die gering verfestigende Wirkung nicht kriechfähigen Gesteins, wie z. B. Anhydrit, ganz wesentlich negativ beeinflusst.

Die geologische Aufnahme kann auch nachgeholt werden, da sich die geologisch-tektonischen Verhältnisse im Verlaufe der relativ kurzen Zeit seit der Verfüllung kaum geändert haben dürften.

5 Auslegungsrechnungen für die Auswahl geeigneter Untersuchungsobjekte

Das intakte Salzgebirge wird bei der Anlage eines Endlagerbergwerkes für die Verwahrung von Abfällen gestört. Die notwendigen Auffahrungen bedeuten somit eine Störung des Salzgebirges als Endlagerbarriere. Das viskoplastische Verhalten des Salzgebirges führt zu einem Ausgleich der Störungen. Für die Minimierung des Zeitraumes der Störung durch die untertägigen Auffahrungen werden die Hohlräume verfüllt.

Untersuchungen an natürlichen Objekten, die Teile eines Endlagersystems repräsentieren, können als wertvolles Mittel herangezogen werden, die Modellvorstellungen zur Konvergenz und Kompaktion von versetzten Hohlräumen in einem Endlagerbergwerk abzusichern. Dabei sind insbesondere die Faktoren Langzeitverhalten und Zusammenwirken unterschiedlicher Einflußgrößen zu berücksichtigen, die im Experiment nicht vollständig nachgebildet werden können.

Mit dem in den Langzeitsicherheitsanalysen bisher verwendeten Konvergenzansatz werden im folgenden die zeitlichen Anforderungen an vorzuschlagende Untersuchungsobjekte für die Kompaktion von Altversatz unter Berücksichtigung verschiedener Einflußgrößen eingegrenzt.

5.1 Konvergenzansatz

Die viskoplastische Verformbarkeit von Salzgestein unter äußerem Druck bewirkt das Kriechen von Salzgestein. Dieser Vorgang bedingt die Konvergenz der Hohlräume im Grubengebäude. Die Gebirgskonvergenz ist ein wesentlicher Effekt zum Erreichen des sicheren Einschusses von Abfällen in einem Endlager im Salinar. Der Konver-

genzprozeß führt zu einer fortschreitenden Verkleinerung der Resthohlräume in den offenen und versetzten Bereichen.

Die Geschwindigkeit des Konvergenzprozesses wird von verschiedenen Einflußfaktoren bestimmt. Diese sind der Spannungszustand und das Temperaturfeld im Salzgebirge und die mechanische Stützwirkung des Versatzmaterials.

Der Konvergenzprozeß ist von langfristiger Natur. Die Druck- und Temperaturverhältnisse ändern sich nur langsam (quasistationäres Systems). Das Langzeitverhalten des Gebirges und das des Versatzmaterials wird als sekundärer Kriechprozeß behandelt. Die Konvergenzrate für mit Salzgrus verfüllte Hohlräume kann nach /HOS 85/ als Produkt von Funktionen beschrieben werden. Jede Funktion beschreibt die Abhängigkeit der Konvergenzrate von den oben genannten Einflußgrößen - Spannungszustand, Temperaturfeld, Stützwirkung. Die Abbildung 5.1 gibt eine anschauliche Darstellung der Problematik.

Die relative Volumenänderung $\dot{V}(t)/V(t)$ eines beliebigen Volumens $V(t)$ wird als Konvergenzrate K bezeichnet. Die Konvergenzrate K ist das Produkt der Funktionen der Einflußfaktoren Gebirgsdruck p_G , Gebirgstemperatur T_G und Porosität ϕ des Versatzmaterials. Die Stützwirkung des Versatzmaterials ist eine Funktion des Konvergenzfortschrittes und wird durch die Porosität ϕ des Versatzmaterials quantifiziert.

Die mathematische Formulierung der Konvergenzrate ist in Analogie zu Kapitel 3.2 gegeben durch:

$$\frac{\dot{V}(t)}{V(t)} = -K(T_G, p_G, \phi) \quad (3)$$

$$K(T_G, p_G, \phi) = K_r \cdot f_{T_G} \cdot f_{p_G} \cdot f_{\phi} \quad (4)$$

Die Konvergenzrate wird auf eine Teufenlage z bezogen. Diese Teufenlage wird als Referenzteufe z_r bezeichnet. Die in dieser Teufe gemessene Konvergenzrate wird die

Referenzkonvergenzrate K , genannt. Die Funktionen f_{T_0} und f_{p_0} beschreiben dann die Teufenabhängigkeit der Gebirgstemperatur und des Gebirgsdrucks.

$$f_{T_0} = \exp\left\{-\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T_G(z)} - \frac{1}{T_G(z_r)}\right)\right\}, \quad \text{mit } f_{T_0} = 1 \text{ für } z = z_r, \quad (5)$$

$$f_{p_0} = \left(\frac{p_G(z)}{p_G(z_r)}\right)^{m_0}, \quad \text{mit } f_{p_0} = 1 \text{ für } z = z_r, \quad (6)$$

$$R = 8,314 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \quad (7)$$

Der temperaturabhängige Verformungsprozeß des Salzes wird durch einen Arrhenius-Ansatz mit der Aktivierungsenergie Q beschrieben. Die Aktivierungsenergie kann als Maß für die Temperaturempfindlichkeit des Kriechens angesehen werden. R ist die universelle Gaskonstante. In der Druckfunktion ist der Exponent m_0 ein Maß für die Spannungsabhängigkeit des Salzgebirges.

Der Gebirgsdruck läßt sich aus der Mächtigkeit der Deckgebirges und des Salzgebirges errechnen. Der teufenabhängige Temperaturverlauf ergibt sich aus dem geothermischen Gradienten. Die Teufenlage wird ausgehend von der Basenhängebank angegeben.

$$p_G(z) = g \cdot \rho \cdot z \quad (8)$$

$$T_G(z) = T_G(z_r) - (z - z_r) \cdot \nabla T \quad (9)$$

$$\text{mit } g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \text{und } \nabla T = ,033 \frac{\text{K}}{\text{m}} \quad (10)$$

Die thermomechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins werden entsprechend den oben formulierten Ansätzen mit den Funktionen f_{T_0} und f_{p_0} beschrieben. Diese sind

für viele Materialien gültig und somit nicht vom Salztyp abhängig. Die Unterschiede im Verhalten des Wirtsgesteins ergeben sich durch die Bestimmung der Parameter.

Für eine Beurteilung der Einflußgrößen zum thermomechanischen Verhalten des Gebirges werden die Angaben zur Gebirgstemperatur T_g und dem Gebirgsdruck p_g in einer Referenzteufe z_r sowie die Spannungsempfindlichkeit m_g benötigt. Die Abhängigkeit vom Salztyp oder von großräumigen geologischen Gegebenheiten werden hier durch die Konvergenzrate K_r beschrieben.

Die Tabelle 5.1 stellt einen Datensatz für drei Gebirgsverhältnisse zusammen. Durchziehen stützende Anhydritschichten (GA) das Salzgebirge, ist mit langsamen Konvergenzraten zu rechnen. Eine homogene Steinsalzformation (GS) führt zu einer mittleren, eine kriechfähige Mischsalzformation (GM) zu einer schnellen Konvergenzrate.

Mit den Daten aus Tabelle 5.1 sind in der Abbildung 5.2 die Abhängigkeiten der Funktionen f_{T_g} und f_{p_g} und das Produkt der Funktionen gegen die Teufenlage dargestellt. Für die Referenzteufe ist der Wert der Funktionen gleich eins. Über den Bereich der Teufenlage von 600 m bis 1000 m variiert das Produkt der Funktionen um einen Faktor 20. Mit zunehmender Teufe wachsen der Gebirgsdruck und die Temperatur. Dies führt zu einer höheren Kriechgeschwindigkeit des Salzes.

Tab. 5.1 Daten zum Verhalten des Gebirges

Thermomechanische Parameter	Konvergenzrate
Referenzteufe	Stützende Anhydritschichten (GA)
$z_r = 800 \text{ m}$	$K_r = 0,01\% / \text{a}$
Gebirgsdruck	Steinsalzformation (GS)
$p_g = 18,0 \text{ MPa}$	$K_r = 1,0\% / \text{a}^{1)}$
Gebirgstemperatur	Mischsalzformation (GM)
$T_g = 330 \text{ K}$	$K_r = 5,0\% / \text{a}$
Spannungsexponent	
$m_g = 4$	

¹⁾ für offene Grubenräume

Die Abhängigkeit der Konvergenzrate über die Teufenlage für einen unverfüllten Hohlraum ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Für die drei Gebirgsformationen GA, GS und GM verschieben sich die Kurven entsprechend der gewählten Konvergenzraten K_c .

Die Konvergenz des Gebirges verringert die Hohlräume und damit die Porosität des in einem Hohlraum eingebrachten Versatzmaterials. Diese Abhängigkeit wird durch die Stützfunktion f_ϕ des Versatzmaterials beschrieben /HOS 85/.

$$f_\phi = \phi \left(1 - \frac{\phi}{\phi_r} \right) \left(\left(1 - \frac{\phi}{\phi_r} \right)^2 + \left(\phi \left(1 - \frac{\phi}{\phi_r} \right) \right)^{\frac{1}{m_v}} \right)^{-m_v} \quad (11)$$

$$f_\phi = 1 \quad \text{für} \quad \phi \geq \phi_r$$

In der Anfangsphase nach der Verfüllung eines Hohlraumes ist die Porosität ϕ des Versatzmaterials u. a. von der Einbringtechnik abhängig. Oberhalb einer für das Versatzmaterial charakteristischen Stützporosität ϕ_r kann davon ausgegangen werden, daß die Konvergenz des umgebenden Gebirges ungestört verläuft. Bei Erreichen der Stützporosität ϕ_r ist aufgrund anfänglicher Spannungsumlagerungen im Versatz zunächst mit einer geringeren Stützwirkung des Versatzmaterials zu rechnen. Bei kleiner werdender Porosität wird der Konvergenz ein wachsender Widerstand entgegengesetzt. Der Parameter m_v ist analog zum Spannungsverhalten des Salzgebirges (m_σ) als Maß für die Spannungsabhängigkeit des Versatzmaterials zu verstehen.

Die Funktion f_ϕ hat die zwei Parameter m_v und ϕ_r zur Anpassung des Stützverhaltens eines Versatzmaterials. Die Tabelle 5.2 stellt die Daten für zwei grundsätzlich unterschiedlich wirkende Versatzmaterialien zusammen. Weniger stützender Versatz wird durch einen kleinen Spannungsparameter und eine kleine Stützporosität beschrieben. Dies entspricht etwa einem Versatzmaterial aus feuchtem Mischsalz (VM). Bei stützendem Versatz ist dagegen mit höheren Werten für den Spannungsparameter und die Stützporosität zu rechnen. Diese Eigenschaften werden etwa durch ein Versatzmaterial aus trockenem Steinsalz (VS) charakterisiert.

Tab. 5.2 Parameter für unterschiedliche Versatzeigenschaften

Feuchtes Mischsalz (VM)	Trockenes Steinsalz (VS)
Spannungsexponent	Spannungsexponent
$m_v = 2$	$m_v = 4$
Stützporosität	Stützporosität
$\phi_s = 0,2$	$\phi_s = 0,3$

Die Abbildung 5.4 zeigt den sich mit den Parametern aus Tabelle 5.2 ergebenden Kurvenverlauf der Stützfunktion f_ϕ in Abhängigkeit von der Porosität des Versatzmaterials. Eine Stützwirkung setzt erst dann ein (d. h. $f_\phi < 1$), wenn die Stützporosität ϕ_s erreicht ist. Mit abnehmender Porosität erhöht sich die Stützwirkung des Versatzes kontinuierlich. Erreicht die Porosität des Versatzes die Porosität des umgebenden Gesteinskörpers ($\phi \approx 0,001$), kompaktiert der Versatz nicht weiter und die Stützfunktion kommt dem „gewachsenen“ Salz gleich.

5.2 Porositätsverlauf des Versatzes

Mit den im vorangegangenen Abschnitt erörterten Einflußgrößen auf das Kompaktionsverhalten einer mit Versatz gefüllten Strecke in einem Grubengebäude wird hier eine Übersicht des Porositätsverlaufs des Versatzes gegeben. Die Gesteinseigenschaften der in Tabelle 5.1 genannten Formationen werden mit den in Tabelle 5.2 genannten Eigenschaften einer verfüllten Strecke kombiniert - GM, GS, GA mit VM und GM, GS, GA mit VS.

Das Ergebnis ist ein Porositätsverlauf in Abhängigkeit von der Zeit. Das Kompaktionsverhalten des Versatzes wird für drei Teufenlagen von 600 m, 800 m und 1000 m untersucht und über einen Zeitraum von 50 Jahren berechnet. Das Versatzmaterial wird mit einer Porosität von 40 % eingebracht.

In Abbildung 5.5 ist der Porositätsverlauf für die Kombination VS in GS gezeigt. Diese Kombination entspricht dem Verhalten einer mit Steinsalz gefüllten Strecke in einer Steinsalzlagerstätte. In einer Teufe von 600 m wird innerhalb von 50 Jahren die Stützporosität nicht erreicht, während die Stützwirkung in einer Teufe von 1000 m

schon nach 5 Jahren beginnt. Merkliche Porositätsänderungen sind hier erst in großen Teufenlagen zu beobachten.

Die Abbildung 5.6 zeigt den Porositätsverlauf für die Kombination VM in GM. Diese Kombination entspricht den Randbedingungen von gering stützendem Versatz in gering stützendem Gebirge. Sie stellt somit eine extreme mögliche Parameterkonstellation Versatz/Gebirge dar. Hier wird selbst in geringeren Teufenlagen die Stützporosität nach 29 Jahren erreicht. In der Teufenlage von 1000 m erreicht theoretisch das Versatzmaterial nach 20 Jahren sogar die Porosität des umgebenden Gebirges.

Die Tabelle 5.3 gibt für drei Teufenlagen den Zeitpunkt an, bei dem eine versetzte Strecke eine Porosität von 10 % erreicht. Die schattierten Bereiche der Tabelle grenzen die Kombinationen ein, die innerhalb von 50 Jahren auf 10 % Versatzporosität kompaktieren. Für einen Versatz aus Steinsalz (VS) in einer Steinsalzlagerstätte (GS) ist dies nur für eine Strecke in einer Teufe von 1000 m zu erwarten. Liegen versetzte Strecken (VM, VS) z. B. in einer Gebirgsformation mit stützenden Anhydritschichten (GA), ist mit einer nennenswerten Kompaktion nicht zu rechnen.

Tab. 5.3 Zeitpunkte in Jahren bei Erreichen der Versatzporosität von 10 %

Versatz	Gebirge	Teufe		
		600 m	800 m	1.000 m
VM	GM	5	1	1
	GS	252	52	15
	GA	25 169	5 054	1 372
VS	GM	97	20	6
	GS	473	97	26
	GA	47 219	9 583	2 518

Die schattierten Flächen in der Tabelle 5.3 grenzen schematisch modellhaft das erforderliche Alter von Altversatz als lohnenswertes Untersuchungsobjekt ein. Zu untersuchender Altversatz sollte mindestens in einer Teufe von 800 m, besser noch von 1000 m, liegen. Hier ist mit Konvergenzraten zu rechnen, die eine angemessene Kompaktion des Versatzes erwarten lassen. Die Unterschiede in den Zeithorizonten für stützenden und weniger stützenden Versatz liegen etwa bei einem Faktor 2. Für

den untersuchten Zeitrahmen von 50 Jahren ist der Einfluß der Ausgangszusammensetzung des Versatzmaterials wichtig.

6 Ermittlung und Auswahl geeigneter Untersuchungsobjekte

Gewisse Vorstellungen über die eventuell gegebenen Möglichkeiten geeignete Untersuchungsobjekte zu finden, bestanden bereits bei Aufnahme des Projekts. Sie konzentrierten sich, verständlicherweise, auf den norddeutschen Raum, erfuhren allerdings auch mit dem Fortgang der Arbeiten eine nicht unwesentliche Einschränkung durch die hinsichtlich notwendiger Teufe, Konvergenz des Gebirges und Alter des eingebrachten Versatzes durchgeführten Auslegungsrechnungen (s. Kapitel 5).

6.1 Kontaktaufnahme und Ergebnis der Gespräche mit Bergwerksbetreibern

Im Rahmen der Suche und Identifizierung von geeigneten Objekten konnten Kontakte zu den nachfolgenden Bergwerksbetreibern und Institutionen aufgenommen werden:

- GSF-Versuchsbergwerk Asse
- Fa. K-UTEC; frühere Mitteldeutsche Kaliwerke, Sondershausen
- Südwestdeutsche Salzwerke AG, Heilbronn
- Kali und Salz GmbH, Kassel
- Geologisches Institut der Nationalen Akademie der Wissenschaften der Ukraine, Kiew

6.1.1 Versatzsituation im GSF-Versuchsbergwerk, Asse

Eine systematische Versatzeinbringung in die offenen Abbaue des früheren Salzbergwerks Asse erfolgt erst seit wenigen Jahren, weshalb die hiervon betroffenen

Abbaue für eine Untersuchung unter dem Gesichtspunkt „Altversatz“ nicht in Frage kommen.

Die in der Mitte der 80er Jahre mit Steinsalzhaufwerk aus dem Tiefenaufschluß verfüllten und auch meßtechnisch überwachten Großabbaue 1 - 4 zwischen der 658-m- und 679-m-Sohle haben eine vergleichsweise geringe Teufe und damit auch Konvergenz. /KAP 88/ hat an diesem, mittels Teilschnittmaschine gelösten Material umfangreiche Laboruntersuchungen unter bodenmechanischen Gesichtspunkten durchgeführt und wichtige Kennwerte ermittelt.

In noch geringerer Teufe als die Großabbaue liegt die Anfang 1987 abschließend verfüllte, umfangreich instrumentierte Kammer 8a auf der 532-m-Sohle /SCH 89/. Daten von Setzungsmessungen lagen 1989 vor über einen Zeitraum von knapp 5 Jahren und schwankten zwischen 150 und 225 mm. Ein Kraftschluß zwischen Versatz und Gebirge war noch nicht erreicht.

Extensometermessungen im Versatz des Carnallitabbaus 3 auf der 750-m-Sohle mußten 1988 aus sicherheitstechnischen Gründen beendet werden. Die zuletzt gemessenen horizontalen Verformungsraten an ca. 60 Jahre altem Versatz lagen zwischen 1,5 und 1,1 mm/a, die Konvergenzen im Streckenstummel betragen 27 mm/a vertikal und 23 mm/a horizontal.

Eines der bekanntesten Beispiele für durch Konvergenz kompaktierten Streckenversatz liefern die beiden Streckenstummel im Hauptquerschlag der 750-m-Sohle der Asse (Abbildung 6.1). Allerdings liegen diese im Bereich des Carnallit-Flözes (K_2C) direkt angrenzend an das Leine-Steinsalz (Na_3), d. h. unter tektonischem Ausfall von Grauem Salzton (T3) und Hauptanhydrit (A3).

Die ehemals eingebrachte Verfüllung ist äußerst heterogen, d. h. sie besteht neben sallnarem Material auch aus Bauschutt und Asche. Der umgebende Carnallit ist aufgrund der Konvergenz der Streckenstöße sehr deutlich in Richtung Streckenhohlraum deformiert, wodurch auch der eingebrachte Versatz eine Verdichtung erfahren hat, die er aufgrund bloßer Eigenkompaktion nie hätte erreichen können (Abbildung 5.2a,b,c).

In mehreren Gesprächen mit der Leitung des Versuchsbergwerks wurden die Möglichkeiten diskutiert, welche die Asse für eine Untersuchung im Rahmen „Altversatz“ bieten könnte, darunter auch die zuletzt genannte.

Während in allen anderen Fällen unzureichende Teufe und damit auch Konvergenz oder ein zu geringes Alter des eingebrachten Versatzes zum Ausschluß führten, schieden die beiden Streckenstummel auf der 750-m-Sohle aus, weil die Bergwerksleitung, nach Rücksprache mit der Bergbehörde und aufgrund eines in Vorbereitung befindlichen speziellen Sicherungskonzeptes für die Südflanke der Asse, jeden weiteren bergmännischen Aufschluß vermeiden möchte.

Damit aber stand fest, daß die Asse keine Möglichkeit bietet für die Untersuchung eines technischen Versatz-Analogons.

6.1.2 K-UTEC, Kali-Umwelttechnik (frühere Mitteldeutsche Kaliwerke)

Bei der heutigen Firma K-UTEC in Sondershausen verfügt Herr Dr. Steubert, Leiter der Abteilung für Versatz, Verfüllung und Entsorgung, über umfassende Kenntnisse der gesamten Versatz- und Verfüllsituation im Bereich der früheren Mitteldeutschen Kaliwerke. In zwei Telefongesprächen im Frühjahr '97 erhielten wir von ihm jedoch nur die Auskunft, daß es Steinsalz-versetzte Abbaue und Strecken genügender Teufe und ausreichenden Alters nicht gebe, zumal dann nicht, wenn diese auch noch zugänglich sein sollten.

In einem nochmaligen Gespräch während der Erstellung dieses Abschlußberichts erwähnte Herr Dr. Steubert allerdings die Tatsache, daß im Kalibergwerk Sollstedt Gebirgsdruckverhältnisse herrschen, die in ca. 820 m Teufe zu Konvergenzraten von einigen Millimetern pro Tag führen und eine entsprechende Wirkung auf die Kompaktion eingebrachter Versatzkörper hätten. Diese bestehen aus Spülversatz, der inzwischen eine beträchtliche Verdichtung erfahren hat. Er wurde von ihm selbst in Zusammenarbeit mit der Bergakademie Freiberg auf Laugendurchlässigkeit sowie auf Festigkeit mittels Hydrofrac untersucht (BMBF/PTE 02 C 0496). Aufgrund der Krite-

rien, die an den Altversatz gestellt werden, scheidet jedoch eine weitere Betrachtung dieses Spülversatzes als Untersuchungsobjekt aus.

6.1.3 Südwestdeutsche Salzwerte AG, Heilbronn

Der Südwestdeutsche Steinsalzbergbau in Württemberg, Raum Heilbronn, hat aufgrund der geologischen Gegebenheiten nur relativ geringe Teufen aufzuweisen. Trotzdem wurde an die Geschäftsführung der Salzwerte, Herrn Bergwerksdirektor Dr. Ing. Bohnenberger die schriftliche Anfrage gerichtet, nach eventuell vorhandenen Möglichkeiten für eine Altversatz-Untersuchung. Der Bescheid war jedoch, wie erwartet, negativ.

6.1.4 Kali und Salz GmbH, Kassel

Der wichtigste Bergwerksbetreiber und Produzent von Kalisalzen in Mitteleuropa ist die Kali und Salz GmbH in Kassel. Von besonderer Bedeutung für das Anliegen dieses FuE-Projektes ist jedoch die Tatsache, daß die Gesellschaft in Norddeutschland im Bereich der steilen Lagerung (Salzstöckel) noch Bergwerke betreibt, von denen zwei - Sigmundshall und Niedersachsen-Riedel - mit rund 1400 m bzw. 1500 m die weltweit größte Teufe für Salzbergwerke erreicht haben.

Herr Bergwerksdirektor Busche erklärte sich auf unsere Anfrage hin bereit, entsprechende Situationen auf den Kaliwerken Sigmundshall und Niedersachsen-Riedel sowie dem Steinsalzbergwerk Braunschweig-Lüneburg in Grasleben prüfen zu lassen.

Für Sigmundshall führte dies schließlich zu den in Tabelle 6.1 genannten drei Möglichkeiten, welche in einer gemeinsamen Befahrung eingehender in Betracht gezogen wurden, woran neben Herrn Busche auch Herr Gerland, Leiter der Produktion unter Tage, Herr Dierkes, Grubenobersteiger sowie der Vermessungsfahrsteiger Herr Tinnefeld, teilnahmen. Dabei ergaben sich die in der Tabelle genannten weiteren Kriterien, was dazu führte, daß der trotz eines Alters von ca. 20 Jahren noch immer riefähige Steinsalzversatz des Lagers 14710 für eine Untersuchung ausschied. Die

beiden anderen Lokalitäten kamen in Betracht und sind nachfolgend eingehender zu beschreiben.

Die von Kali und Salz gleichfalls eröffneten Möglichkeiten auf dem stillgelegten Kali-bergwerk Niedersachsen-Riedel, südlich Celfe wurden mit dem Leiter der nunmehr in Vorbereitung befindlichen Deponie Herr Glienke sowie seinem Stellvertreter, Herrn Küster diskutiert und in zwei Befahrungen näher in Augenschein genommen. Grundsätzlich in Frage kamen die in Tabelle 6.2 genannten Bereiche.

Während der Abfassung dieses Berichts ergab sich aufgrund eines Hinweises von Herrn Bergwerksdirektor Busche die Gelegenheit, das gleichfalls stillgelegte Kali-bergwerk Salzdelfurth in die Suche nach geeigneten Untersuchobjekten mit einzubeziehen.

Tab. 6.1 Kalibergwerk Sigmundshall, Altversatz-Abbaue

Lager	Teufe	Material	Einbringung	Bemerkungen
14710	~ 720 m	Steinsalz, gebrochen Höhe des Versatzkörpers ca. 200 m	~ 1977 trocken	Versatz noch rieselnd!
1398	~ 870 m	Steinsalz, gebrochen eingbracht über Band Versatzhöhe ca. 185 m H ₂ O: 1-2, max 3 %; unregelmäßig!	~ 1991	Versatzstoß senkrecht stehend, Material schräg geschichtet
1391	~ 870 m	trocken	~ 1979	Aufschluß fehlt!

Tab. 6.2 Kalibergwerk Niedersachsen - Riedel, Altversatz-Abbaue

Lager	Teufe	Material	Einbringung	Bemerkungen
4 Süd V	1060-m-Sohle	Fabrikrückstände feucht!	~ 1984	Gebirgsmechanisches Meißprogramm
1 Süd V	1260-/1275-m- Sohle	Fabrikrückstände 3 - 4 % Restfeuchte (vom Fabrikprozeß)	~ 1985	Versatz gut verfestigt
1/2 Süd VI	1405-m-Sohle	Steinsalz, gebrochen trocken	~ 1987	Versatz noch weitgehend rieselfähig

6.1.4.1 Kalibergwerk Sigmundshall

Lager 14710

Die nach Aussage der Werksleitung trockene Einbringung dieses Versatzkörpers, mit einer Gesamthöhe von ca. 200 m, wurde 1971 begonnen und war im Jahre 1977 abgeschlossen (Abbildung 6.3). Trotz dieses vergleichsweise hohen Alters erwies sich das eingebrachte Material in dem befahrenen Ort, einem Durchhieb in etwa 725 m Teufe, noch als ausgesprochen locker und rieselfähig.

Lager 1398

Dieser gleichfalls im Seigerriß in Abbildung 6.3 enthaltene Versatzkörper hat gegenüber dem benachbarten, gleichfalls versetzten Abbau 1391 ein deutlich niedrigeres Alter. Trotzdem steht das eingebrachte, meist feinkörnige Steinsalzmaterial in dem vom Bergwerksbetrieb freigeräumten und geglätteten Bereich in einem auch jetzt noch mehr oder weniger senkrechten Stoß (Abbildung 6.4), so daß eine Probenahme mittels Kernbohrung oder anderer Methoden als durchaus möglich erschien und deshalb auch mit der Bergwerksleitung vereinbart wurde.

Die Gewinnung eines Bohrkerns schied allerdings wegen des Fehlens einer entsprechenden Energieversorgung in dem seit längerem schon abgeworfenen Feld aus. Möglich und auch erfolgreich war die Entnahme von insgesamt sechs größeren plattigen Proben, verteilt über den gesamten Aufschluß von ca. 3 x 3 m, zur Anfertigung von Lackabzügen für eine formale und auch quantitative Erfassung des Porenraums. Die entsprechenden planimetrischen Untersuchungen selbst werden jedoch im Laufe dieser nunmehr abgeschlossenen Projektphase 1 nicht mehr erfolgen können. Die erzielten Ergebnisse wären zu vergleichen mit den Daten, welche mit den klassischen Methoden der Porositätsbestimmung an Bohrkernen im geotechnischen Labor gewonnen werden.

Lager 1391

Der im Seigerriß (Abbildung 6.3) gleichfalls erfaßte Abbau 1391 bietet in den unteren Teufen, in denen er auch grundsätzlich noch zugänglich wäre, heute keinen Aufschluß des Versatzkörpers mehr, der es in irgendeiner Weise erlauben würde, Informationen über den derzeitigen Zustand des trocken eingebrachten Materials zu gewinnen. Es wurde mit der Werksleitung die Möglichkeit diskutiert, einen entsprechenden Aufschluß zu schaffen. Der Abstand von ca. 60 m zwischen nächstgelegener Strecke und Versatzkörper (Abbildung 6.5) wäre ohne weiteres mit einer horizontalen Kernbohrung zu überbrücken. Es ist jedoch sehr ungewiß, ob bei einem noch nicht ausreichend kompaktierten Versatzmaterial überhaupt die notwendigen Informationen zu erhalten wären, da in einem nur teilweise verfestigten Versatz der gewünschte Kern sehr leicht vom Bohrer zerstört wird. Es kommt hinzu, daß wegen der erst wieder zu schaffenden Infrastruktur am Bohrplatz auch eine Bohrung mit nicht unbedeutlichen Kosten verbunden wäre.

Demgegenüber hätte eine noch aufzufahrende Untersuchungsstrecke bis zum Versatzkörper die Möglichkeit, denselben von der Ortsbrust aus mit kürzeren Bohrungen auch in größerer Tiefe zu untersuchen. Von Kali und Salz wurden für die Auffahrung einer solchen Strecke jedoch Kosten von 136 TDM ermittelt. Dieser Aufwand könnte sich bei Erreichen des Versatzes innerhalb kürzester Zeit als vergeblich erweisen, sollte das trocken eingebrachte Material auch nach ca. 20 Jahren noch nicht verfestigt sein, wie dies in dem zuerst beschriebenen Lager 14710 der Fall ist.

Ein besonderer Umstand verleiht allerdings gerade dem Lager 1391 noch zusätzliche Attraktivität. Es ist die Tatsache, daß gegen den Abbau und Versatzkörper, wie in Abbildung 6.5 gezeigt, 1977 horizontale Bohrungen erstellt und in dieser Extensometer zur Untersuchung des Konvergenzverhaltens installiert wurden. Die seitdem und auch weiterhin - registrierten Konvergenzmeßwerte wurden von /OCH 95/ zusammenfassend berichtet und mit anderen Untertagebereichen verglichen. Die Entwicklung der Konvergenzraten zeigt das in Abbildung 6.6 (vergl. Abbildung 3.1) beschriebene Verhalten, d. h. maximale Dehnungsraten einer Abbaufanke von

~55 mm/100 d noch während des Abbaus, danach aber Rückgang auf Werte um wenig über 0. Damit aber lägen hier, anders als an den meisten übrigen Orten, eindeutige Konvergenzdaten vor und wären auch weiterhin noch zu erwarten.

6.1.4.2 Ehemaliges Kali- und Steinsalzbergwerk Niedersachsen-Riedel

Für die stillgelegte und derzeit in der Vorbereitung als Deponie befindliche, frühere Werksanlage Riedel in Hänigsen, wurden von Kali und Salz gleichfalls drei Bereiche unter Tage für eine eventuelle Untersuchung als Analogon in Betracht gezogen (s. Tabelle 6.2).

Lager 4 Süd V - 1060-m-Sohle

Nach Teufenlage und Einbringungsalter (1984) könnte dieses Lager (Abbildung 6.7) für eine Altversatz-Untersuchung durchaus interessant sein. Es läuft hier jedoch bereits ein gebirgsmechanisches Untersuchungsprogramm des IfG-Instituts für Gebirgsmechanik, Leipzig im Rahmen der vorbereitenden Arbeiten für einen möglichen Deponiestandort; diese Messungen sollen vorerst noch nicht gestört werden.

Lager 1 / 2 Süd VI - 1405-m-Sohle

Dieser Abbau (Abbildung 6.8) in der größten, überhaupt in Betracht gezogenen Teufe, enthält als Versatz relativ trocken eingebrachte Fabrikrückstände, die, wie auch bereits für Sigmundshall beschrieben, noch immer rieselfähig, d. h. zumindest in dem von der begleitenden Strecke aus sichtbaren Teil noch nicht verfestigt sind. Dies aber schließt, zumal auch größere Steinsalzbrocken mit in den Versatz gestürzt wurden, aus Sicherheitsgründen jegliche Untersuchungsarbeiten und Probennahmen aus.

Lager 1 Süd V - 1260 / 1275-m-Sohle

Dieses Kalilager (Abbildung 6.9) wurde nach seinem Abbau bis 1985 mit Fabrikrückständen wieder verfüllt, für die bei Einbringung ein Feuchtigkeitsgehalt von 3 - 4 % genannt wird. Da das Versatzmaterial, zwar gleichfalls tagig und schräg geschichtet,

eine gute Festigkeit zeigte, war auch die Werksvertretung der Meinung, daß hier die Gewinnung eines Bohrkerns erfolgreich sein könnte. Es kommt hinzu, daß in den Jahren 1985 - 90 insgesamt sieben Druckmeßkissen in dem Versatzmaterial installiert wurden und auch arbeiteten, dann jedoch, aufgrund des Abscherens der Meßleitungen bei Versatzkompaktierung, ausfielen.

Nach entsprechendem Angebot und Auftrag wurde in der ersten Oktoberwoche von Kall und Salz für uns ein Kern aus dem Versatz erbohrt, mit einem Durchmesser von 300 mm und einem unerwartet homogenen und gut verfestigten Versatzmaterial (Abbildung 6.10a,b).

Auch von diesem Kern (zwei je ca. 1 m lange Teilkern) wurden vier Endstücke abgesägt und für Lackabzüge bereitgestellt (Abbildung 6.11a,b). Sie wurden, ebenso wie diejenigen an den sechs Proben aus Sigmundshall - Lager 1398, inzwischen fertiggestellt und liegen vor; die weitergehenden Untersuchungen zur Erfassung des Porenraumes stehen jedoch noch aus.

Im geotechnischen Labor des GRS-Fachbereichs 40 in Braunschweig wurden Dichtemessungen zur Ermittlung der Porosität durchgeführt. Die je drei würfelförmigen Probenkörper lieferten für den vorderen Bereich (Bohrlochmund!) Porositäten von im Mittel 31,8 %, für den des Bohrlochtiefsten dagegen nur 28 %.

In Übereinstimmung hiermit stehen die gleichfalls gemessenen Ultraschallwellengeschwindigkeiten, die für den stärker verdichteten bohrlochtiefsten Bereich höher sind als am Bohrlochmund.

6.1.4.3 Ehemaliges Kalibergwerk Salzdetfurth

Bei einer Befahrung mit Herrn Illner, dem Betriebsleiter des Bergwerkes Salzdetfurth - Schacht III konnten im April 1998 zwei Lokalitäten in Augenschein genommen werden, die als zukünftige Untersuchungsobjekte in Frage kommen.

Abbau 760/6

Im Niveau der 730-m-Sohle besteht Zugang zum versetzten Abbau 760/6 mit einer Überdeckung von etwa 40 m. Derselbe Abbau ist im Niveau 754 m mit einer Überdeckung von ca. 64 m zugänglich.

Abbau 964/ö

Im Bereich der 900-m-Sohle besteht Zugang zum Abbau 964/ö, der in den 50er Jahren mit Fabrikrückständen (Steinsalz und Kieserit) verfüllt wurde und eine Überdeckung von ca. 130 m aufweist. Der Versatz ist bei einer Porosität von ca. 16 % bereits erheblich kompaktiert.

6.1.5 Steinsalzbergwerk Solotvina, Westukraine

Auf Vorschlag und Vermittlung von Herrn Professor Dr. D. Khrushchov, Kiew konnte im Rahmen einer Reise in die Ukraine im Sommer 1997 auch das Steinsalzbergwerk Solotvina besucht und befahren werden.

Der Ort Solotvina, mit den Steinsalzschnitten Solotvina 1 - 9, liegt im westlichsten Teil der Ukraine, d. h. im Transkarpatengebiet, unmittelbar an der Ostgrenze von Rumänien (Abbildung 6.12). In diesem morphologisch wie paläogeographisch als Vor-Karpatenbecken (Transsilvanisches Becken) zu bezeichnenden Raum kam es im Tertiär (Torton = Obermiozän) zur Ablagerung von mächtigen Steinsalzen. Diese drangen in Form von Salzstöcken bis zur Oberfläche auf und bildeten in der geologischen Vergangenheit wohl auch Salzgletscher (Abbildung 6.13). Heute ist das Gebiet durch größere Auslaugungs- und Erdfallerscheinungen gekennzeichnet.

Der ehemals umfangreiche Steinsalzbergbau ist inzwischen beschränkt auf die Schachtanlagen Solotvina 8 und 9. Von insgesamt vier Sohlen aus wird das Steinsalz mit teilweise 99,5 % NaCl im Kammer-Strossenbau abgebaut (Abbildung 6.14). Die Bauhöhe der zunächst leerstehenden Abbaue beträgt im Durchschnitt 60 m. Dies

entspricht dann auch der Höhe des später eingebrachten Versatzes. Nichtverfüllung bzw. verspätete Verfüllung resultierte z. T. in Tagesbrüchen auf dem Zechengelände.

Von Kiew aus hatte man uns die Information übermittelt, daß Steinsalzversatz entsprechender Mächtigkeit und größeren Alters vorhanden sei. Dies traf auch zu; es stellte sich jedoch heraus, daß die größte derzeit erreichte Teufe bei 400 m lag. Verfüllte Abbaue, mit einer Mächtigkeit des eingebrachten Steinsalzmaterials von durchschnittlich 60 m, sind mehrfach vorhanden; das Alter des von uns befahrenen Abbaukörpers betrug ca. 60 Jahre. Die geringe Teufe führt jedoch dazu, daß der problemlos zu befahrende Resthohlraum über dem Versatzkörper (Abbildung 6.15) auch über den genannten Zeitraum ohne wesentliche Konvergenzerscheinungen offen blieb. Daß eine geringe Konvergenz vorhanden ist, zeigt die Abbildung 6.16. Es gibt, da sie für die Sicherheit dieses Bergbaus in relativ geringer Teufe kaum von Bedeutung sind, offenbar auch keine exakten Konvergenzdaten.

Die im übrigen sehr desolaten Verhältnisse der gesamten Anlage lassen gleichfalls Solotvina als ein mögliches Objekt für Altversatz-Untersuchungen ausscheiden.

Sowohl die Erläuterungen über Tage als auch während der Befahrung gab der Grubenbetriebsführer Sergej Ivanovic, Mining engineer (Krivoj Rogl).

7 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

7.1 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zur Ermittlung und Bestätigung geeigneter Objekte für eine Altversatz-Untersuchung wurden in zwei größeren Schritten und Arbeitspaketen durchgeführt. Während das erste sich mit der Beschreibung der wichtigsten Einflußgrößen, d. h. der Ermittlung und Definition der für die Auswahl der Objekte zugrundezulegenden Kriterien befaßte, galt das zweite der direkten Suche nach geeigneten Objekten bei verschiedenen Bergwerksbetreibern.

Die Beschreibung und Diskussion der grundlegenden Mechanismen der Versatzkompaktion endete ganz wesentlich in der Feststellung, daß neben einer Reihe bekannter Einflußgrößen die Anwesenheit von Wasser, meist in einer Menge von 3 - 4 % Restfeuchte, zwar durch Umkristallisation zu einer frühen Verfestigung führt, bei weitgehendem Erhalt der primären Porosität. Andererseits weist dieser Versatz aber nur eine sehr begrenzte Festigkeit auf und hat damit auch nur eine entsprechend geringe Bedeutung für die Verzögerung der Konvergenz.

Die Festlegung von Anforderungen und Kriterien für das auszuwählende Untersuchungsobjekt umfaßt neben den oben bereits genannten reinen Versatzeigenschaften auch das geologische Umfeld und die Notwendigkeit des Vorliegens und der Ermittlung entsprechender Konvergenzdaten. Dies geschieht bereits mit klarem Bezug auf das für ein konkretes Objekt zu planende und sodann auch durchzuführende Untersuchungs- und Meßprogramm.

Der zweite Teil des Projektes galt der Suche und Festlegung geeigneter Untersuchungsobjekte. Hierzu wurden alle sich sinnvollerweise bietenden Möglichkeiten untersucht, was durch eine entsprechende Kontaktaufnahme mit den jeweiligen Bergwerksbetreibern geschah. Dabei schied das GSF-Versuchsbergwerk Asse leider aus, weil einerseits versetzte Abbaue genügenden Alters nicht vorhanden sind, zum anderen aber die beiden bekannten Streckenstummel auf der 750-m-Sohle, mit sehr stark kompaktiertem Versatz und deutlich durch die Konvergenz verformten Streckenstößen, im Rahmen des Sicherheitskonzeptes der Südflanke keine weiteren bergtechnischen Eingriffe zulassen.

Für die Bergwerke der Südwestdeutschen Salzwerke bei Heilbronn erübrigt sich wegen der relativ geringen Teufe (190 - 236 m) und einem entsprechend niedrigen Gebirgsdruck eine Versatzeinbringung.

Ähnliches gilt für den Bergwerksbereich der früheren Mitteldeutschen Kaliwerke in Thüringen und Sachsen-Anhalt. Erst sehr spät im Laufe des Projekts wurde noch eine eventuelle Möglichkeit für eine Altversatzuntersuchung auf dem stillgelegten Kalibergwerk Sollstedt im Südharz bekannt. Dort laufen bereits gleichfalls vom BMBF

geförderte Untersuchungsarbeiten der Firma K-UTEK, Sondershausen zusammen mit der Bergakademie/TU Freiberg. Die Tatsache, daß der Versatz als Spülversatz eingebracht wurde, schließt allerdings eine weitere Betrachtung als untersuchungswürdiges Analogon aus.

Außerhalb der deutschen Landesgrenzen verfügt das Steinsalzbergwerk Solotvina in der Westukraine zwar über mehrere ca. 60 m hohe und auch 60 - 80 Jahre alte Versatzkörper, jedoch nur in einer sehr geringen Teufe zwischen ca. 40 und 400 m.

Fehlanzeige für Versatz wurde im übrigen auch auf eine entsprechende Anfrage an die Berg- und Hüttenakademie Krakau, Herrn Prof. Dr. A. Garlicky, für das südpolnische Salzrevier gegeben.

Somit aber blieben vorerst im wesentlichen nur die Möglichkeiten, welche sich im norddeutschen Bergwerksbereich des größten deutschen Kaliproduzenten, der Kali und Salz GmbH, Kassel bieten, an welche sich auch von vornherein die größten Hoffnungen geknüpft hatten.

Sowohl für das produzierende Kalibergwerk 'Sigmundshall' als auch das inzwischen stillgelegte Bergwerk 'Niedersachsen-Riedel' wurden von Kali und Salz jeweils mehrere versetzte Abbaue für eine Auswahl als 'Altversatz'-Objekte vorgeschlagen und in gemeinsamen Gesprächen und Befahrungen näher in Betracht gezogen.

Dies führte für Sigmundshall zur Auswahl von zwei versetzten Lagerteilen in praktisch gleicher Teufe von ca. 860 m in benachbarten, ca. 200 m hohen Versatzkörpern der Kallager 1398 und 1391.

Der Versatz des Lagers 1398 ist trotz eines Alters von nur sieben Jahren wegen seines Feuchteanteils von 3 - 4 % bereits gut verfestigt. Ein für die Bewertung vorbereiteter Zugang zum Abbau 1398, der mit Steinsalz-Fabrikrückstand versetzt ist, steht als senkrechter Stoß von ca. 3 m Höhe und Breite im Versatz. Der Aufschluß zeigt einen lagigen Aufbau mit Schrägschichtung. Da eine Probenahme aus dem gut verfestigten Versatzmaterial mittels Kernbohrung wegen der zu treffenden Sicherheits-

maßnahmen zu teuer geworden wäre, wurden von dem Bergwerksbetrieb sechs platige Proben aus dem Stoß entnommen. Von diesen wurden sodann, nach entsprechender Glättung, von der Firma YTTER, Rotenburg a. d. Wümme mittels eines Acrylharzes sogenannte Lackabzüge hergestellt; diese liegen vor. Die nunmehr notwendige planimetrische Auswertung - formale Beschreibung und quantitative Erfassung des Porenraums - stehen jedoch noch aus.

Der Versatz des Lagers 1391 wurde bereits vor 17 Jahren eingebracht, jedoch mehr oder weniger trocken. Das Lager 1391 und der eingebrachte Versatzkörper stellen eine besondere Situation dar. Einerseits wird dieser seit 1985 durch horizontal liegende und auch heute noch arbeitende Extensometer überwacht, die wichtige Daten zum Konvergenzverlauf der Abbaufanken geliefert haben. Andererseits jedoch besitzt der Versatz derzeit keinen Aufschluß mehr, so daß über dessen Konsistenz und den erreichten Grad der Verfestigung mit entsprechender Reduzierung des Porenraums keine Aussagen gemacht werden können. In Analogie zu vergleichbaren Aufschlüssen auf Sigmundshall wie auch anderer Bergwerke (z. B. Riedel) könnte sich eine mit hohen Kosten (136 TDM) verbundene Auffahrung nach Erreichen des Versatzkörpers als vergeblich erweisen, falls das Versatzmaterial noch rieselfähig ist.

Die in der Umwandlung zur Deponie befindliche, ehemalige Werksanlage Riedel, als weltweit tiefster Bergwerksaufschluß in einem Salinar, bietet nach entsprechender Begutachtung, vor allem für den Versatz des Lagers Süd V 1260/1275-m-Teufe eine Möglichkeit für eine weitergehende Altversatz-Untersuchung. Das auch bereits im Untertageaufschluß recht feste Material - Steinsalz als Fabrikrückstand nach der Kalisalzabtrennung - erwies sich in dem erbohrten 300-mm-Ø-Kern als überraschend homogen und sehr fest, so daß es sich auch problemlos präparieren ließ sowohl für die Herstellung von Lackabzügen als auch für zylindrische Probenkörper zur Messung der Porosität im geotechnischen Labor.

Im stillgelegten Kalibergwerk Salzdetfurth stehen zwei weitere Lokalitäten zur Verfügung, an denen versetzte Abbaue mit Überdeckungen von ca. 40 m, 64 m und 130 m vorhanden sind. Aufgrund der unterschiedlichen Überdeckungshöhen wäre in

diesen Abbauen eine Untersuchung der Versatzkompaktion bei verschiedenen Druckbedingungen als natürliches Analogon für den Versatz im Endlager möglich.

Zusammenfassend können die in Tabelle 6.3 genannten Untertage-Lokationen als interessanteste Objekte für eine Altversatz-Untersuchung angesehen werden. Die Objekte in Sigmundshall scheiden jedoch, wie oben bereits erwähnt, aus Kostengründen aus, so daß nur die Standorte Salzdetfurth und Riedel für ein weiterführendes Untersuchungsprogramm vorgeschlagen werden.

Insgesamt stehen demnach vier Untersuchungsobjekte zur Verfügung: ein Objekt im Kali- und Steinsalzbergwerk Niedersachsen-Riedel mit einer Überdeckung von ca. 200 m sowie drei weitere Objekte im Kalibergwerk Salzdetfurth mit Überdeckungen von ca. 40 m, 64 m und 130 m.

Tab. 6.3 Mögliche Objekte für Altversatz-Untersuchungen

Bergwerk	Ort: untertage	Teufe	Versatzmaterial	Bemerkung
Sigmundshall Lager 1398	2. Teilsohle über 940-m-Sohle Ortsbrüst im Versatzstoß	~ 860 m	Fabrikrückstand (Steinsalz mit 3 - 4 % Restfeuchte)	verfestigt (Lackabzüge!)
Lager 1391	2./3. Teilsohle oberhalb der 940-m-Sohle	~ 840 m	Fabrikrückstand (Steinsalz, trocken eingebracht)	kein Aufschluß, unklar ob verfestigt Extensometer seit 1985!
Riedel Lager 1 Süd V	Durchblick zum Versatzkörper	1260/ 1275 m	Fabrikrückstand (Steinsalz mit Restfeuchte)	gut verfestigt 300 mm-Ø-Kern erbohrt!
Salzdefurth Abbau 760/6	aus der Wendel 961	730 m 754 m	Fabrikrückstand (mit Restfeuchte)	Alter: 26 Jahre kompaktiert
Abbau 964/6	900-m-Sohle	900 m	Steinsalz	Alter: 40 Jahre kompaktiert

7.2 Schlußfolgerungen

Übergeordnetes Ziel weiterer Untersuchungen am Altversatz ist es, den Zustand von kompaktiertem Versatzmaterial zu ermitteln, bei dem der Kompaktionsvorgang unter realen Bedingungen und bei geringer Kompaktionsgeschwindigkeit erfolgt ist. Die Kompaktion des Versatzes wird bei guter Anbindung desselben an das Gebirge vorwiegend durch die Konvergenz des versetzten Hohlraumes bewirkt. Die Eigenlast des Versatzes, die von der Überdeckungshöhe des Versatzes am entsprechenden Ort abhängt, trägt jedoch ebenfalls zur Kompaktion bzw. Verdichtung bei. Prinzipiell kann eine Kompaktion des Versatzes durch seine Eigenlast als repräsentativ für eine konvergenzbedingte Kompaktion angesehen werden, da der Kompaktionsdruck für den Vorgang entscheidend ist.

Bei allen potentiellen Untersuchungsobjekten wurde die Verdichtung des Versatzes ausschließlich durch seine Eigenlast erreicht. Es konnte kein Altversatz ermittelt werden, bei dem die Versatzkompaktion durch Konvergenz erfolgte. Im Rahmen eines weiteren Untersuchungsprogrammes kann daher die Versatzkompaktion nicht als Funktion des Konvergenzdruckes, sondern ersatzweise nur als Funktion seiner Eigenlast untersucht werden. Diese Untersuchungen sind im Hinblick auf die Versatzkompaktion allerdings als äquivalent anzusehen.

Es wird ein Folgeprojekt vorgeschlagen, bei dem die Versatzkompaktion als Funktion des Kompaktionsdruckes bei verschiedenen Überdeckungshöhen untersucht wird. Als Untersuchungsobjekte stehen die genannten vier natürlichen Analoga an den Standorten Niedersachsen-Riedel und Saizdetfurth zur Verfügung.

Ein orientierendes Untersuchungsprogramm zur Charakterisierung des Versatzmaterials sollte zumindest die Bestimmung der wichtigsten hydraulischen, petrophysikalischen, gesteinsmechanischen und chemisch-mineralogischen Parameter umfassen. Für die Gewinnung des erforderlichen Probenmaterials wären Kernbohrungen in den Versatz erforderlich.

Auf der Basis vorhandener Stoffansätze für Versatz sollten unter Zugrundelegung der ermittelten Parameter begleitende Simulationsrechnungen durchgeführt werden, um den Kompaktionsprozeß des Altversatzes an den verschiedenen Orten nachzuvollziehen. Die vergleichende Bewertung der Modellrechnungen und experimentellen Ergebnisse trägt maßgeblich zur Absicherung des Modellansatzes für die Stützwirkung von Salzgrusversatz bei.

Der Nachweis, daß die im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen verwendeten Stoffansätze in der Lage sind, die vorgefundenen natürlichen Verhältnisse zu beschreiben, würde einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der allgemeinen Akzeptanz von Sicherheitsanalysen leisten.

8 Literatur

- /BLA 89/ Blase, G.; Potthoff, A.; Ochs, F.; Uhlenbecker, F.:
Gebirgsmechanische Beobachtungen in Salzstöcken Norddeutschlands,
Kali und Steinsalz, Glückauf GmbH, Essen, Band 10, Heft 6, 1989
- /BRÜ 93/ Brüge, B.:
Das Verdichtungsverhalten von Steinsalzhaufwerk aus dem Salzbergwerk
Asse - Eine gefügeanalytische Studie - Diplom-Arbeit, TU Braunschweig,
1993
- /ERZ 78/ Erzanor, Z. S.; Bergmann, E. J.; Arschinov, G. A.; Menzel, W.; Weber, D.;
Schreiner, W.:
"Festigkeits- und Verformungsverhalten von Steinsalz und Grundlagen der
Berechnung des Spannungs- und Verformungszustandes des Salzgebir-
ges um untertägige Hohlräume", Freiburger Forschungshefte A 598, VEB
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1978
- /FAH 95/ Fahibusch, M.:
Grundlagenuntersuchungen an festen Rückständen des Kalibergbaus im
Hinblick auf eine untertägige Verwertung in Entsorgungsbergwerken. Dis-
sertation TU Clausthal, 1995
- /FIS 87/ Fischle, R.; Bode, W.; Fleck, H.; Hänzel, W.; Köchling, M.; Manchen, P.;
Sander, W.; Schmidt, M. W.; Schwieger, K.; Starke, C.; Wallmüller, R.:
Verfüllen und Verschließen von Bohrlöchern, Kammern und Strecken in
einem Endlager, Jahresbericht 1987, GSF - Gesellschaft für Strahlen- und
Umweltforschung GmbH, München, 1987
- /GIE 89/ Gies, H.; Bode, W.; Herbert, H.-J.; Sander, W.:
Zur Alteration von Haldensalz und seiner Verwendbarkeit als Versatzmate-
rial. Kali und Steinsalz, Glückauf-Verlag, Band 10, Heft 4/5, 1989

- /HEI 91/ Hein, H.-J.:
Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgranulat. Dissertation TH Aachen, 1991
- /HOS 85/ Hossain, S.; Podtschaske, T.; Rimkus, D.; Stelle, N.; Storck, R.; Weber, P.:
Einzeluntersuchungen zur Radionuklidfreisetzung aus einem Modellsalzstock. Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Fachband 15. Berlin, Januar 1985
- /HUN 96/ Hunsche, U.; Schulze, O.:
Effect of humidity and confining pressure on creep of rock salt. - In: the Mechanical Behavior of Salt III; Proc. Third Conf. Palaiseau (France) 1993. S. 237 - 248, Trans Tech Publications, Clausthal
- /KAP 86/ Kappel, G.:
Das Verdichtungsverhalten von Steinsalzhaufwerk. GSF-Bericht 5/86, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, München, 1986
- /KAP 88/ Kappel, G.:
Ermittlung bodenmechanischer Eigenschaften von Salzhaufwerken als mögliche Versatzmaterialien in einem untertägigen Endlager, GSF-Bericht 1/88, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung GmbH, München, 1988
- /KOR 96a/ Korthaus, E.:
Consolidation and Deviatoric Deformation Behaviour of Dry Crushed Salt at Temperatures up to 150 °C, 4th Conference of the Mechanical Behaviour of Salt, Montreal, June 17-18, 1996
- /KOR 96b/ Korthaus, E.:
Untersuchungen zum Kompaktierungsverhalten von Versatzmaterial. Ergebnisbericht über Forschung und Entwicklung 1996. Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt, Wissenschaftliche Berichte, S. 182

- /OCH 95/ Ochs, F.:**
 Untersuchungen von Gebirgsbewegungen in Abbaubereichen steiler Kallagerstätten. Das Markscheidewesen 102, Nr. 1, 1995
- /PRI 95/ Prij, J.; Graefe, V.; Rothfuchs, T.; Vons, L.H.:**
 Modelling of the Thermo-Mechanical Behaviour of Solid Rocksalt and Crushed Salt. EU-Workshop on „Testing and Modelling of THM-Properties of Host Rocks“, Brüssel, 12. und 13. Januar 1995
- /ROT 95/ Rothfuchs, T.; Droste, J.; Feddersen, K.-H.:**
 Spezielle Sicherheitsaspekte der Streckenlagerung. Der TSS-Versuch. Abschlußveranstaltung des Forschungsprojektes Direkte Endlagerung, Karlsruhe, 7. und 8. Dezember 1995
- /SPI 89/ Spiers, C. J.; Peach, C. J.; Brzesowsky, R. H.; Schutjens, P. M. T. M.; Liesenberg, J. L.; Zwart, H. J.:**
 Long-term Rheological and Transport Properties of Dry and Wet Salt rocks. Nuclear Science and Technology, EUR 11848 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 116 pp., 1989
- /SPI 93/ Spiers, C. J.; Brzesowsky, R. H.:**
 Densification Behaviour of Wet Granular Salt: Theory versus Experiment. Seventh Symposium on Salt, Vol I 83-92, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam 1993
- /SCH 89/ Schmidt, M. W.; Wallmüller, R.; Kappel, G.:**
 Untersuchungen zum Versatz und Verschuß von Kammern und Strecken in einem Endlager im Salz. 2. Halbjahresbericht 1988 zum Vertrag Nr. FI-1W-0059-D (B) mit der Kommission der Europäischen Gemeinschaft im Rahmen des Programms Bewirtschaftung und Lagerung radioaktiver Abfälle. Abteilungsbericht IFT 1/89. GSF, Neuherberg, 1989

- /STÜ 95/ Stührenberg, D., Zhang, C.:
Results of Experiments on the Compaction and Permeability Behavior of
Crushed Salt. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources,
Hannover, 1995
- /ZHA 93/ Zhang, C.; Schmidt, M. W.; Staupendahl, G.; Heemann, U.:
Entwicklung eines Stoffansatzes zur Beschreibung des Kompaktionsver-
haltens von Salzgrus. Bericht Nr. 93-73 aus dem Institut für Statik der TU
Braunschweig. Gemeinsame Veröffentlichung mit dem Institut für Tieflage-
rung Braunschweig, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit
München, Braunschweig, 1993

Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1	Daten zum Verhalten des Gebirges	17
Tab. 5.2	Parameter für unterschiedliche Versatzeigenschaften	19
Tab. 5.3	Zeitpunkte in Jahren bei Erreichen der Versatzporosität von 10 %	20
Tab. 6.1	Kalibergwerk Sigmundshall, Altversatz-Abbaue	26
Tab. 6.2	Kalibergwerk Riedel, Altversatz-Abbaue	26
Tab. 6.3	Mögliche Objekte für Altversatz-Untersuchungen	37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1:	Kalibergwerk Bergmannsseggen-Hugo, Feldestell Friedrichshall: Konvergenzraten im Abbau S 12/BLA 89/.....	47
Abbildung 5.1:	Verfüllte Strecke in einem Grubengebäude in der Teufe z.....	48
Abbildung 5.2:	Abhängigkeit der thermomechanischen Funktionen von der Teufenlage, bezogen auf eine Referenzteufe von $z_r =$ 800 m.....	48
Abbildung 5.3:	Abhängigkeit der Konvergenzrate eines unverfüllten Hohlraumes von der Teufenlage und der Gebirgs- formation.....	49
Abbildung 5.4:	Abhängigkeit der Stützfunktion von der Porosität.....	49
Abbildung 5.5:	Porositätsverlauf für die Kombination VS/GS.....	50
Abbildung 5.6:	Porositätsverlauf für die Kombination VM/GM.....	50
Abbildung 6.1:	Ausschnitt aus dem Sohlenriß der 750-m-Sohle des Versuchsbergwerkes Asse im Bereich des Haupt- querschlag nach Süden.....	51
Abbildung 6.2a, b:	Streckenkonvergenz und Versatzkompaktion zweier sehr heterogen verfüllter Streckenstummel.....	52
Abbildung 6.2c:	wie 6.2a, jedoch südlicher Streckenstoß.....	53
Abbildung 6.3:	Seigerriß durch zwei versetzte Lagerteile des Kali- bergwerks Sigmundshall mit Lage der beiden möglichen Untersuchungspunkte der Lager 1398 und 1391.....	54
Abbildung 6.4:	Verfestigter Steinsalz-Versatz im Lager 1398 von Sigmundshall mit Schrägschichtung (links) und herabgeriesetem Material am Kontakt zum festen Steinsalz (rechts).....	55
Abbildung 6.5:	Söhliger Riß des Lagers 1391, Kalibergwerk Sigmunds- hall mit eingebrachtem Versatzkörper und Spur des seit 1977 messenden Extensometers.....	56

Abbildung 6.6:	Abbau 1391 Sigmundshall - Dehnungsrate der Nordflanke (mm/100 Tage).....	57
Abbildung 6.7:	Söhliger Riß (Ausschnitt) der 1060-m-Sohle von Riedel mit Versatzkörper und Ort (s. Pfeil!) der gebirgsmechanischen Messungen des Leipziger IfG.....	58
Abbildung 6.8:	Sohlenriß der 1405-m-Sohle von Riedel mit Durchhieben zum Versatz, der trotz beträchtlicher Teufe noch unverfestigt / rieselfähig ist	59
Abbildung 6.9:	Versatzkörper im Bereich der 1260-/1275-m-Sohle von Riedel mit Ort der durchgeführten 300-mm-Ø-Kernbohrung.....	60
Abbildung 6.10a, b:	Teilstücke des 300-mm-Ø-Versatzkörpers der 1260-/1275-m-Sohle von Riedel.....	61
Abbildung 6.11a, b:	Abgesägte Endstücke des 300-mm-Versatzkerns zeigen die gute Homogenität und Verfestigung des Materials.....	62
Abbildung 6.12:	Lage der Ukrainischen Salzbergwerke im Transkarpaten-Raum	63
Abbildung 6.13:	Schematisches Profil durch den Sařinar-Bereich von Solotvina, Westukraine	64
Abbildung 6.14:	Seigerriß und Abbauzeiten des Steinsalzbergwerkes Solotvina 8 (Maßstab ~ 1 : 2000).....	65
Abbildung 6.15:	Resthohlraum über ca. 60 m mächtigem Versatzkörper (Solotvina 8, 80-m-Sohle)	66
Abbildung 6.16:	Konvergenzüberwachung im Restraum oberhalb eines 60-m-Versatzkörpers (Teufe ca. 80 m) von Solotvina 8	67

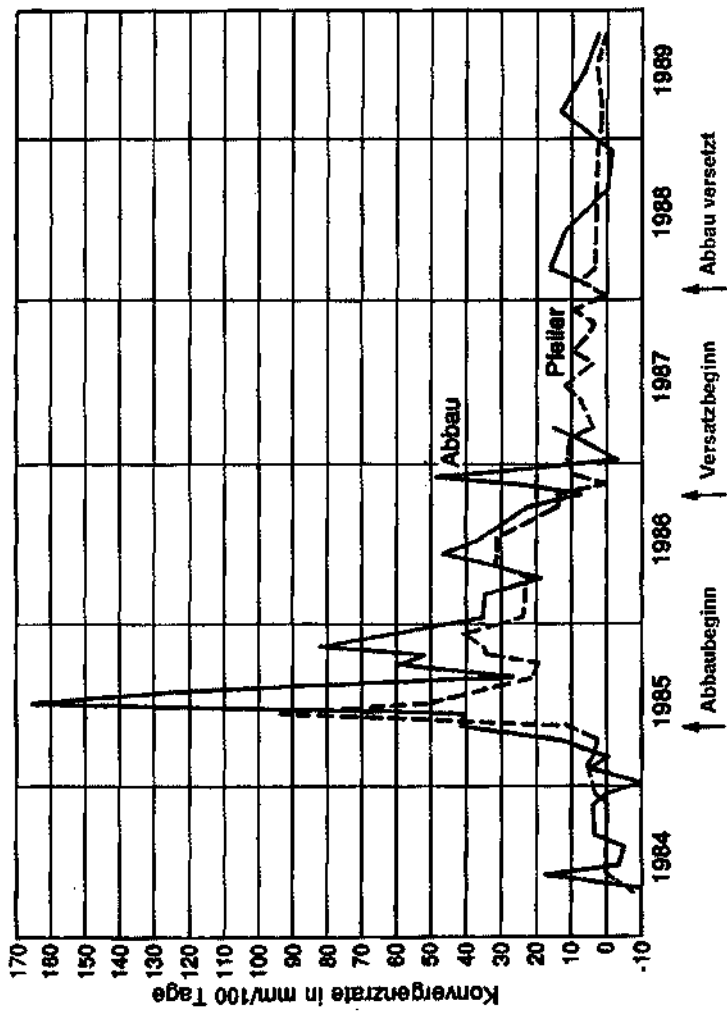
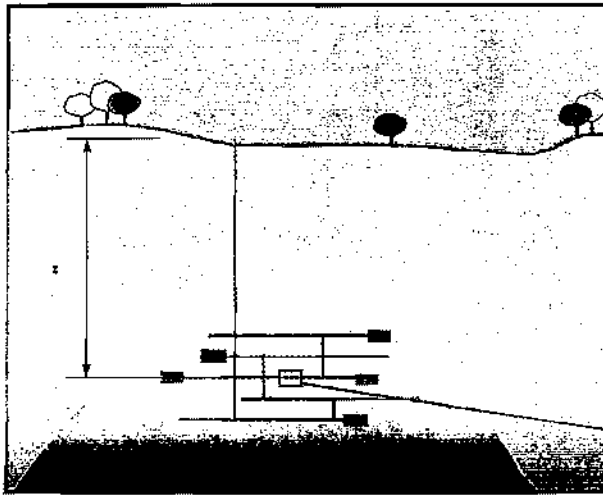


Abb. 3.1 Kalibergwerk Bergmannsseggen-Hugo, Feldsteil Friedrichshall: Konvergenzraten im Abbau S 12 /BLA 89/



Einflußgrößen auf eine verfüllte Strecke:

- Gebirge:
 - Konvergenzrate
 - Temperatur
 - Druck
- Versatz:
 - Stützfunktion

Abb. 5.1 Verfüllte Strecke in einem Grubengebäude in der Teufe z

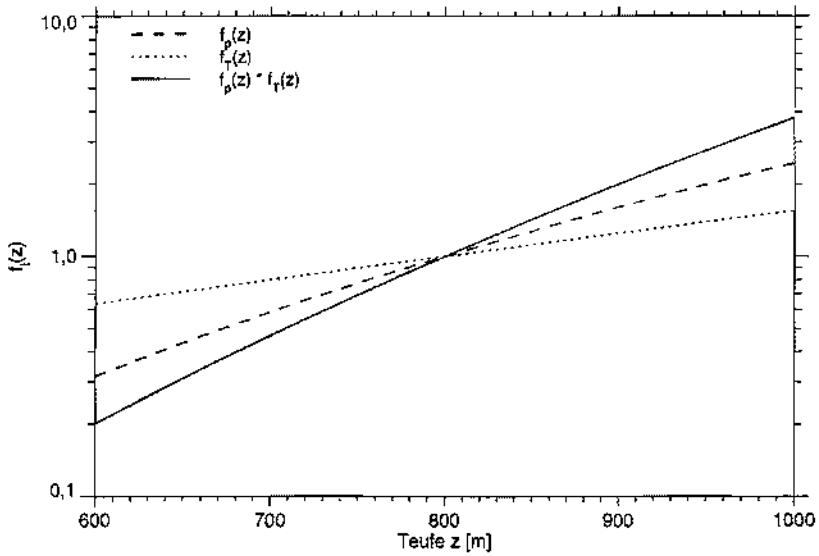


Abb. 5.2 Abhängigkeit der thermomechanischen Funktionen von der Teufenlage, bezogen auf eine Referenztiefe von $z_r = 800$ m

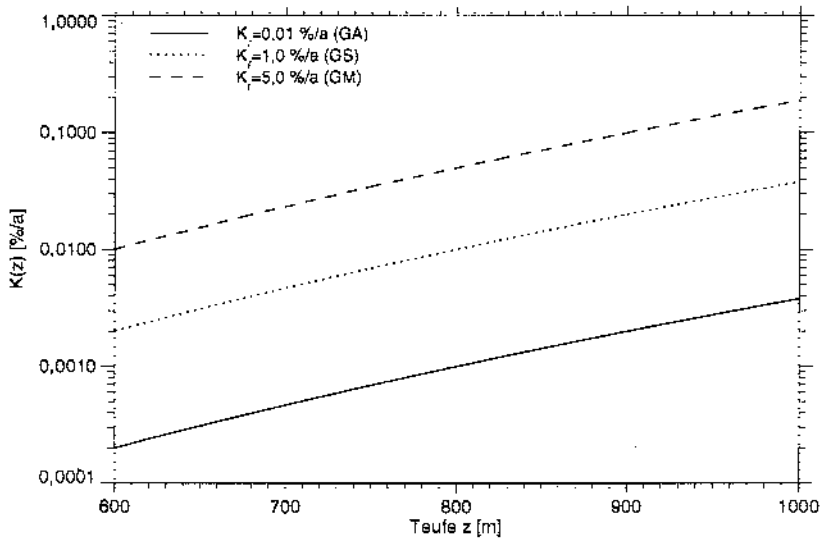


Abb. 5.3 Abhängigkeit der Konvergenzrate eines unverfüllten Hohlraumes von der Teufenlage und der Gebirgsformation

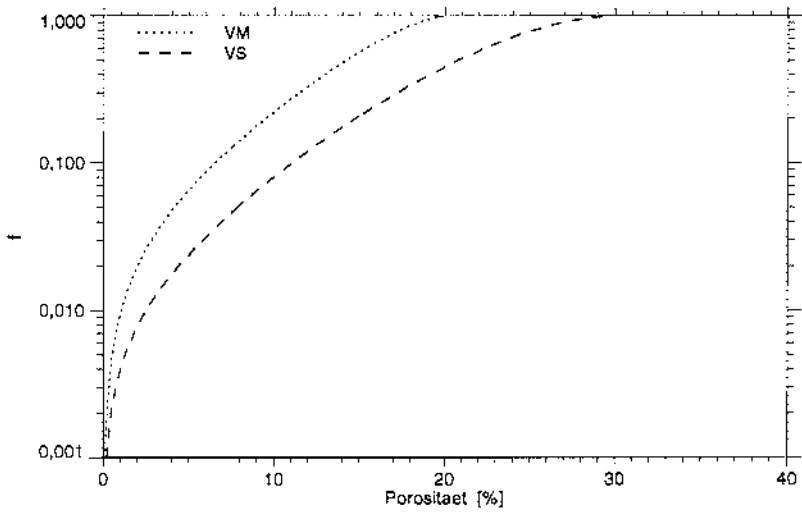


Abb. 5.4 Abhängigkeit der Stützfunktion von der Porosität

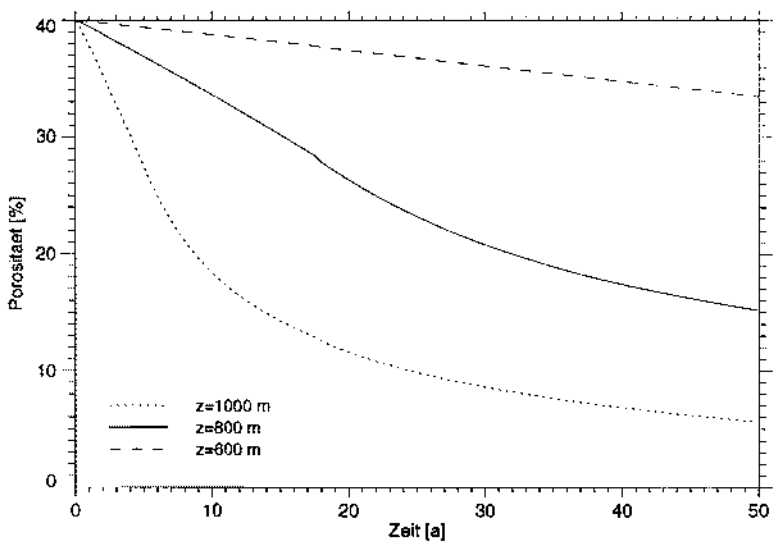


Abb. 5.5 Porositätsverlauf für die Kombination VS/GS

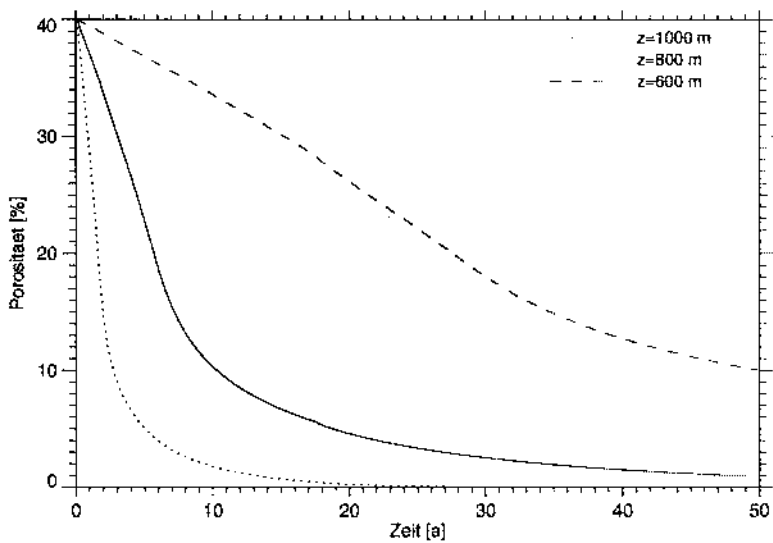


Abb. 5.6 Porositätsverlauf für die Kombination VM/GM

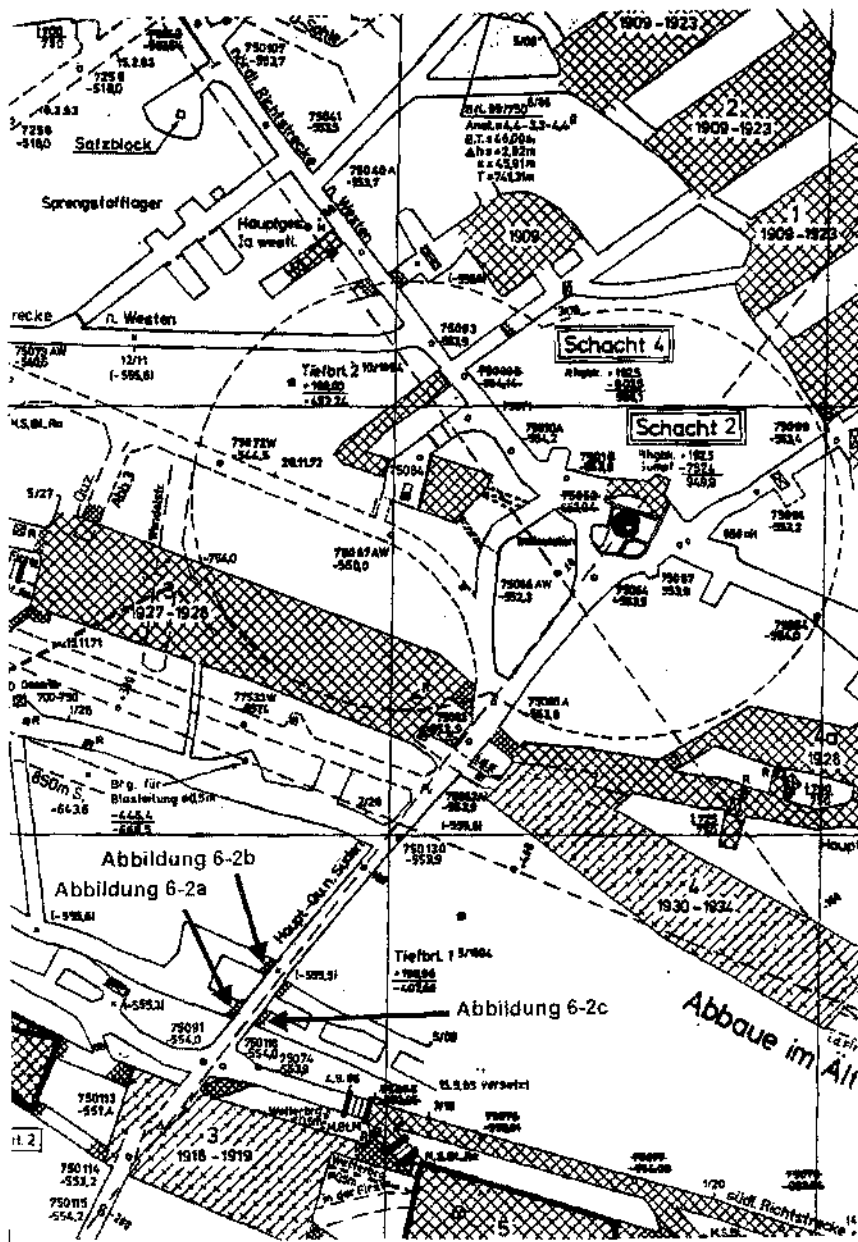


Abb. 6.1 Ausschnitt aus dem Sohlenriß der 750-m-Sohle des Versuchsbergwerkes
 ASSE im Bereich des Hauptquerschlages nach Süden



Abb. 6.2a, b Streckenkonvergenz und Versatzkompaktion zweier sehr heterogen verfüllter Streckenstummel

(s. Pfeile in Abbildung 6.1) im Hauptquerschlag der 750-m-Sohle der Asse, nördlicher Stoß

a) Trümmercarnallit des Hangendbereichs des Flözes Staßfurt

b) ungeschichteter Carnallit = liegender Teil des Flözes



Abb. 6.2c wie 6.2a, jedoch südlicher Streckenstoß

(s. Pfeil in Abbildung 6.1) - angrenzend (rechte Bildseite) an das Kaliflöz hinter der Aufschiebung mit Resten des Grauen Salziens/T3), das Leine-Steinsalz (Na3)

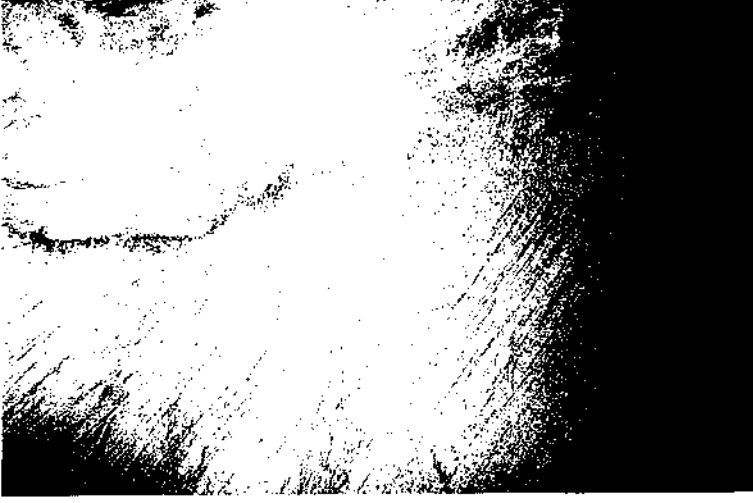
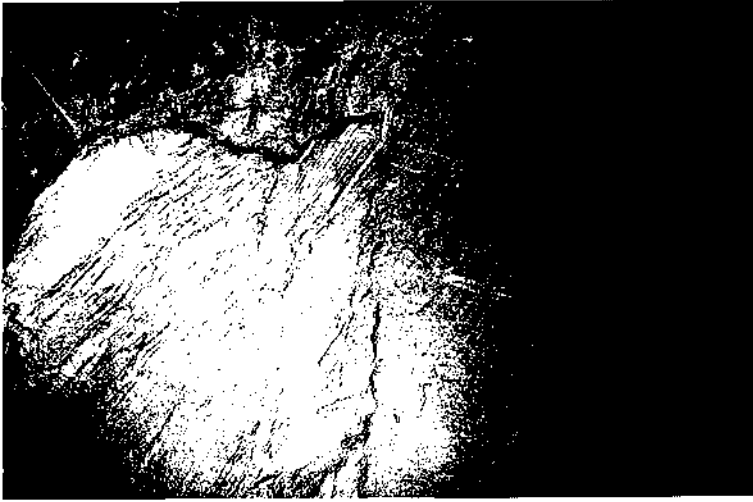


Abb. 6.4 Verfestigter Steinsalz-Versatz im Lager 1398 von Sigmundshall mit Schrägschichtung (links) und herabgerieseltem Material am Kontakt zum festen Steinsalz (rechts)

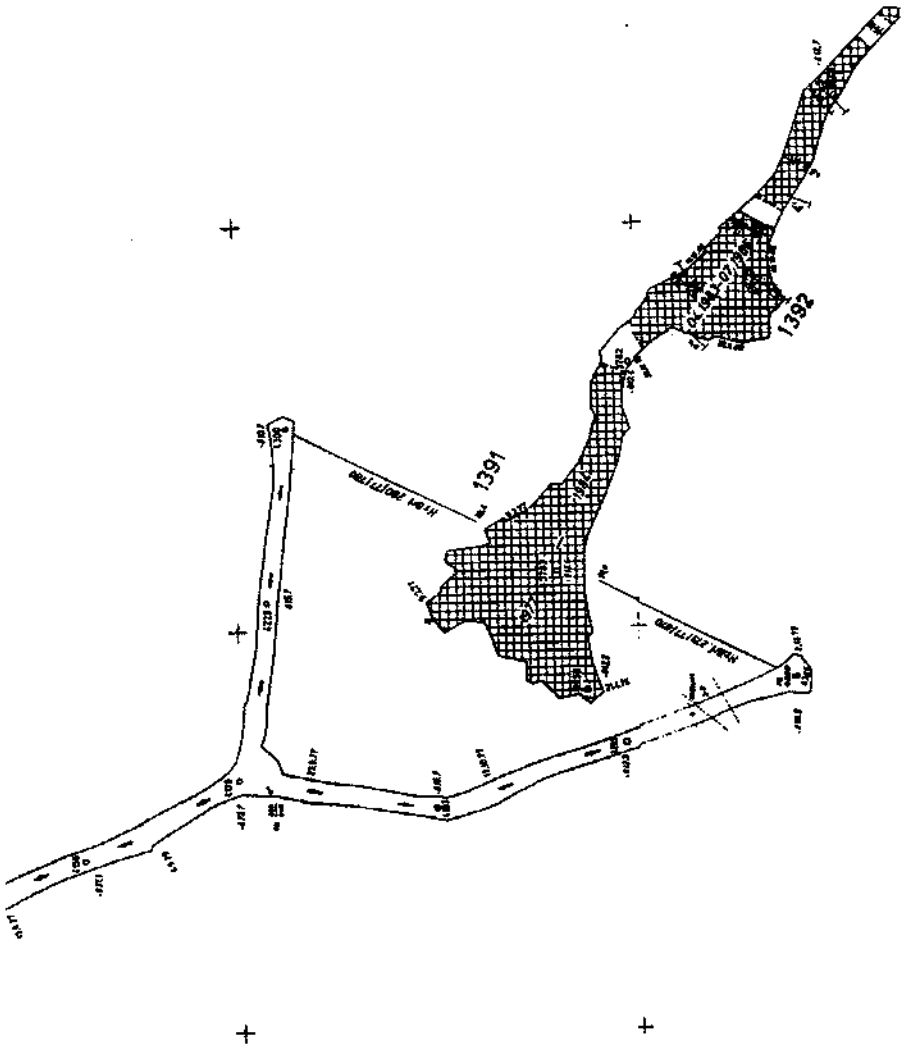


Abb. 6.5 Söhliger Riß des Lagers 1391, Kalibergwerk Sigmundshall mit eingebrachtem Versatzkörper und Spur des seit 1977 messenden Extensometers

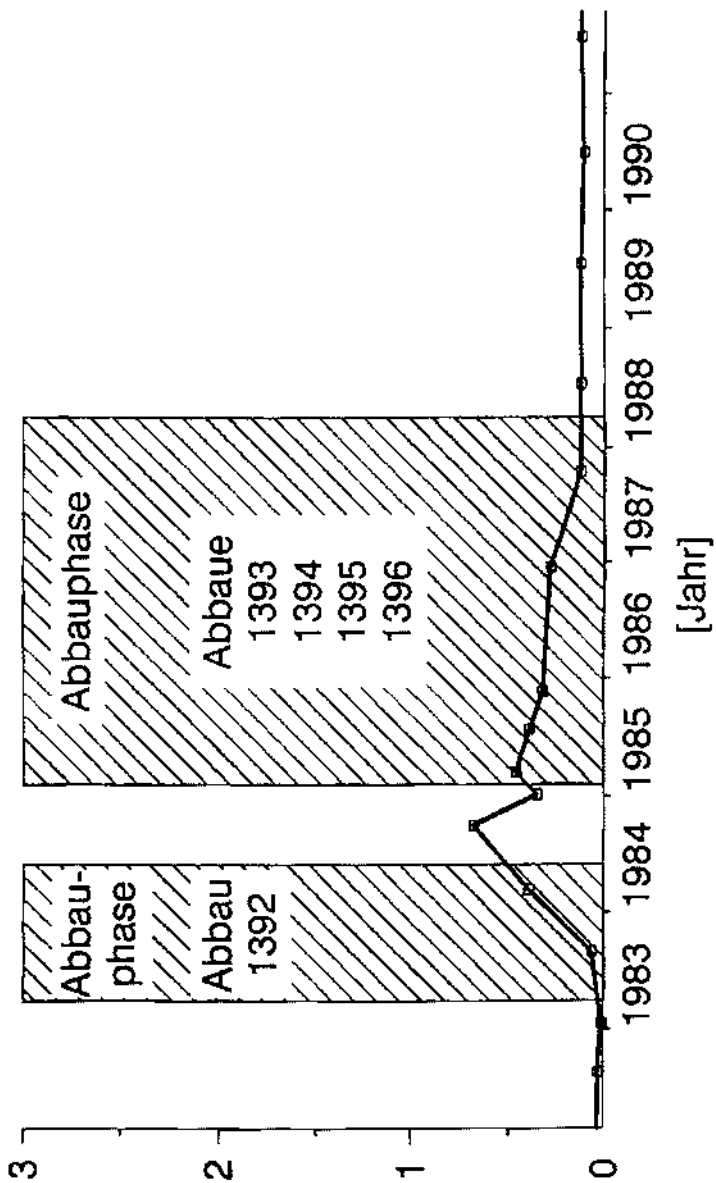
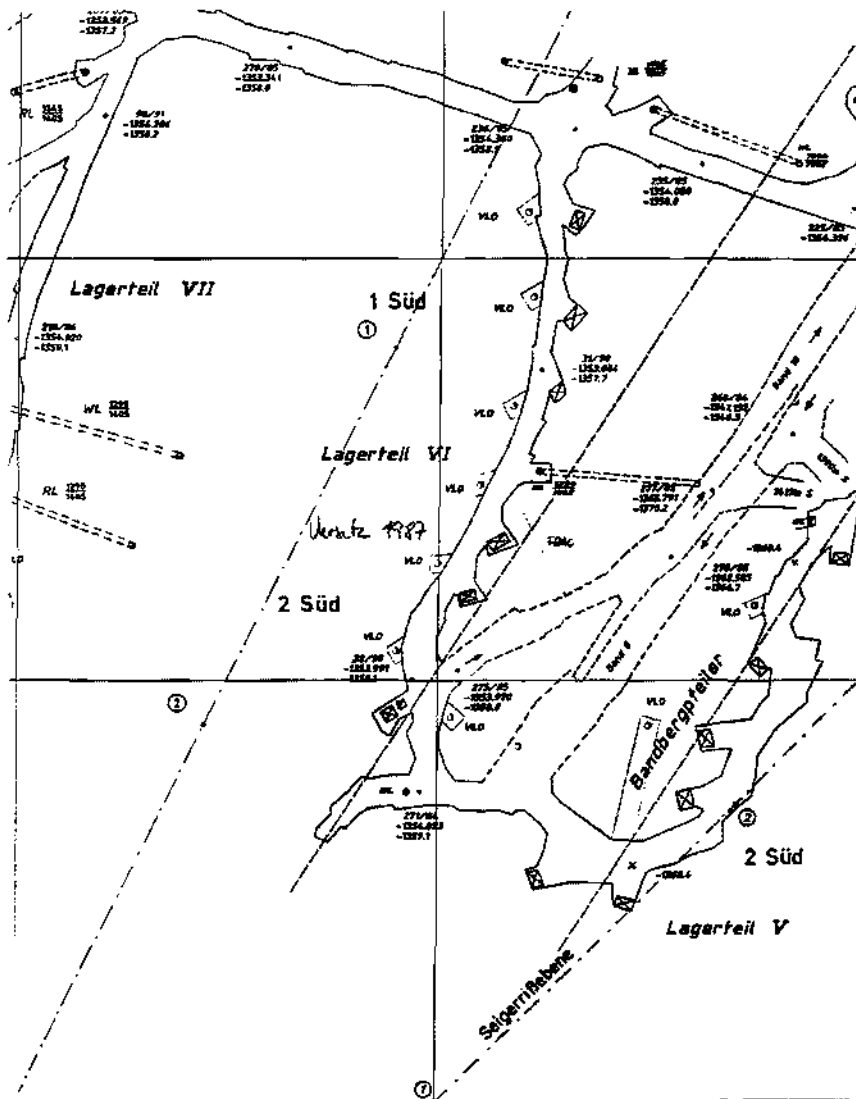


Abb. 6.6 Abbau 1391 Sigmundshall - Dehnungsrate der Nordflanke (mm/100 Tage)



Kali- und Steinsatzwerk
Niedersachsen - Riedel
1405 m Sohle

Abb. 6.8 Sohlenriß der 1405-m-Sohle von Riedel mit Durchhieben zum Versatz, der trotz beträchtlicher Tiefe noch unverfestigt / rieselfähig ist

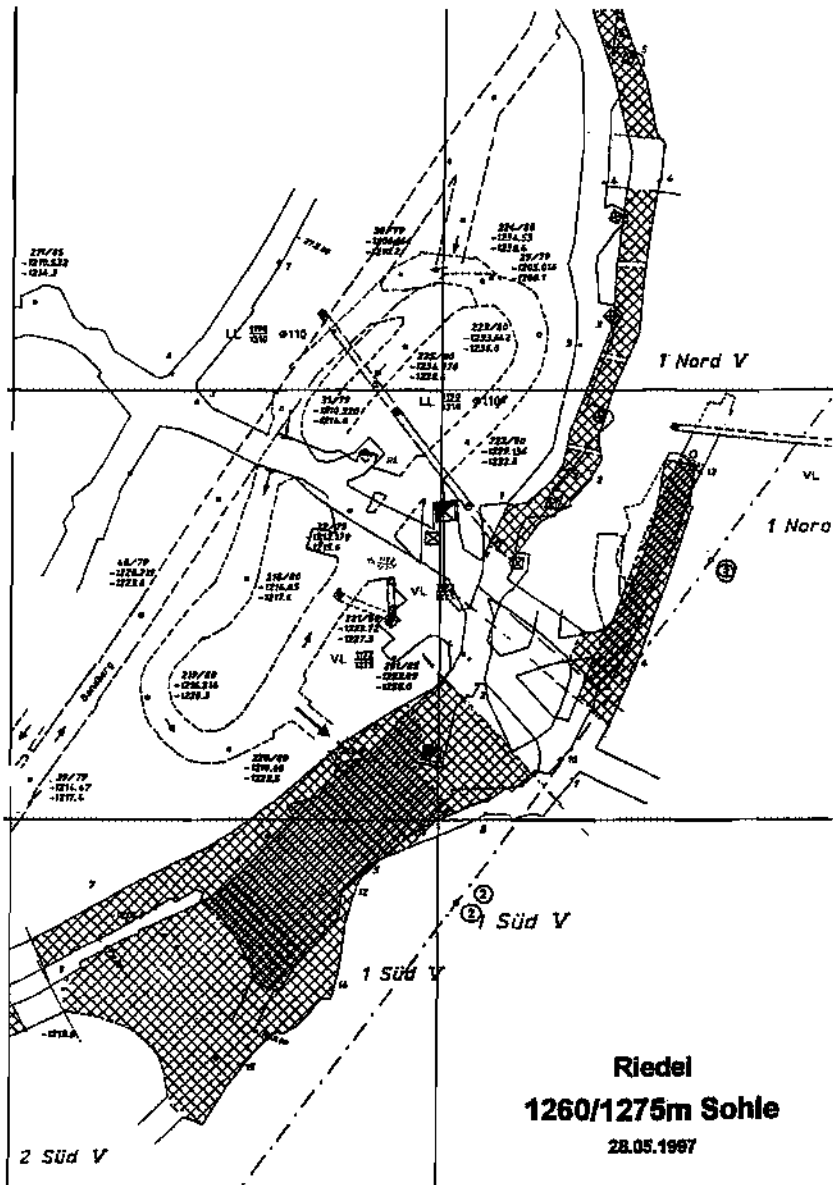


Abb. 6.9 Versatzkörper im Bereich der 1260-/1275-m-Sohle von Riedel mit Ort der durchgeführten 300-mm-Ø-Kernbohrung

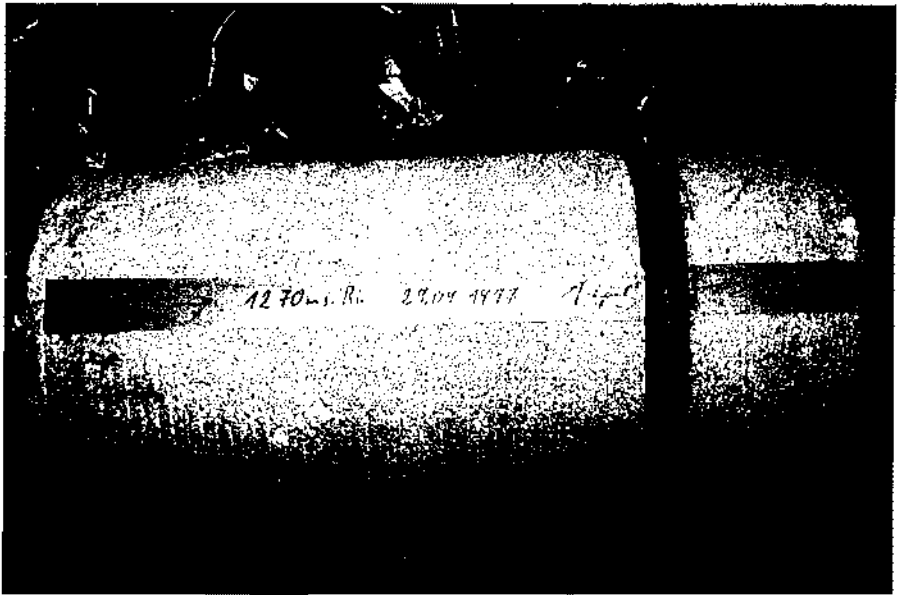
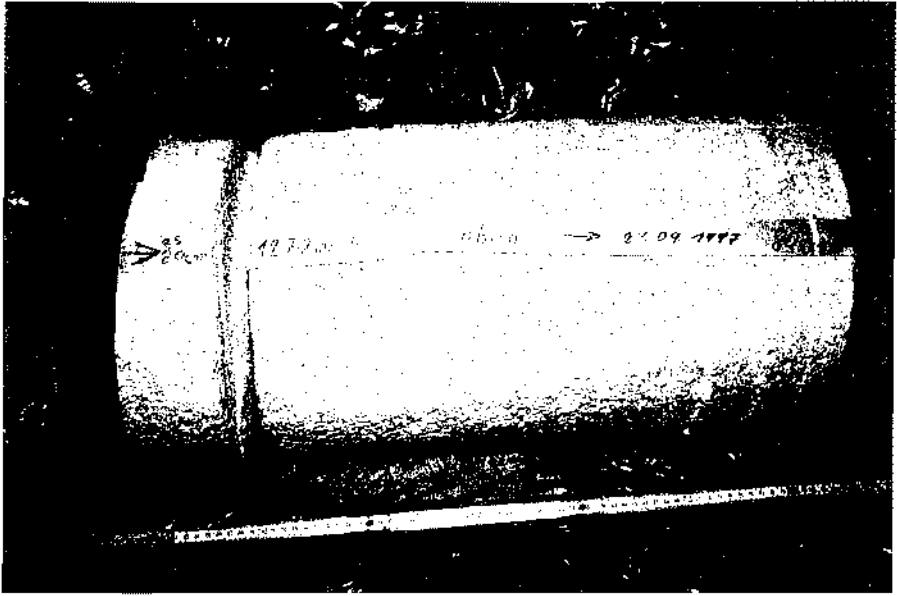


Abb. 6.10a, b Teilstücke des 300-mm- \varnothing -Versatzkörpers der 1260-/1275-m-Sohle von Riedel



Abb. 6.11a, b Abgesägte Endstücke des 300-mm-Versatzkerns zeigen die gute Homogenität und Verfestigung des Materials

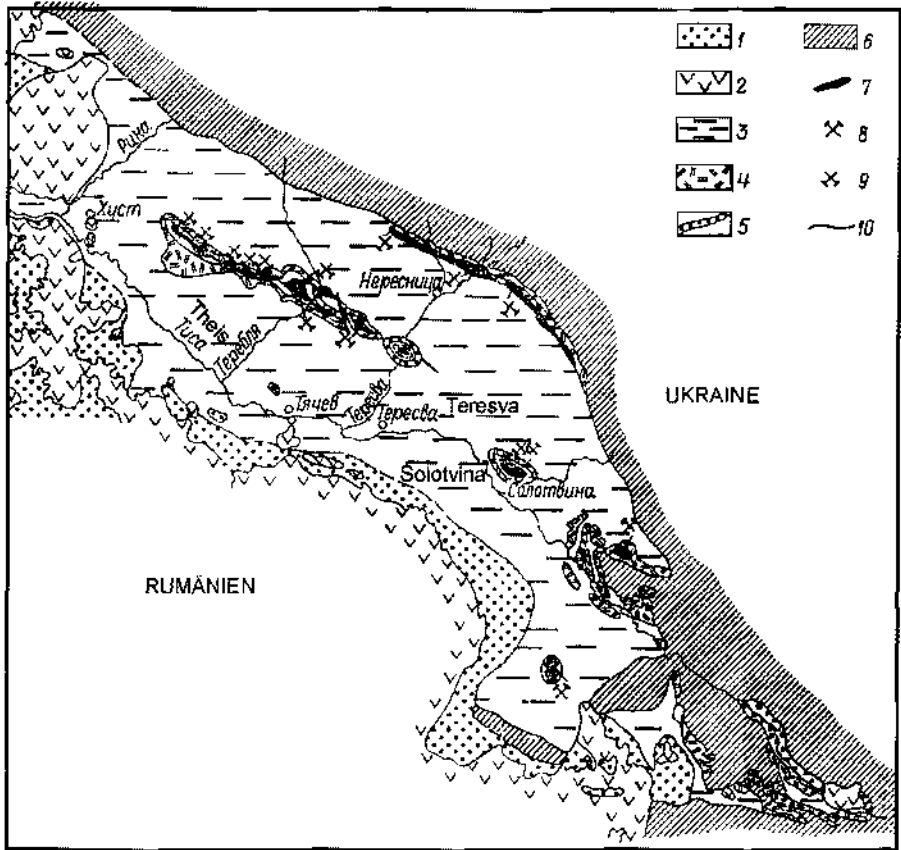
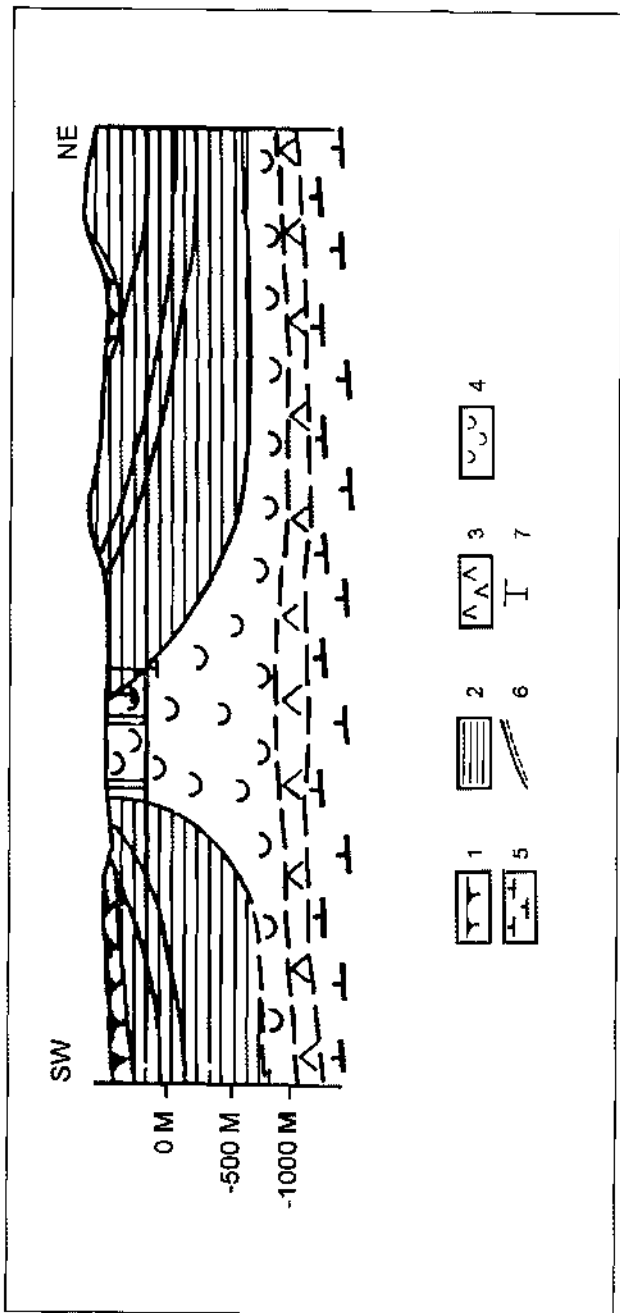


Abb. 6.12 Lage der Ukrainischen Salzbergwerke im Transkarpaten-Raum



Schematisches Profil durch den Salinar-Bereich von Soltovina, Westukraine

- 1 - Quaternary, Neogene; 2 - overlapping Tortonia deposits (Sotovina, Teresva and Baskhev suites); 3 - Low Tereblia member, Low Torton;
- 4 - Upper Tereblia member rock salt; Low Torton; 5 - Novoselitsa suite (gelvetian); 6 - dislocations; 7 - prospecting boreholes

Abb. 6.13 Schematisches Profil durch den Salinar-Bereich von Soltovina, Westukraine

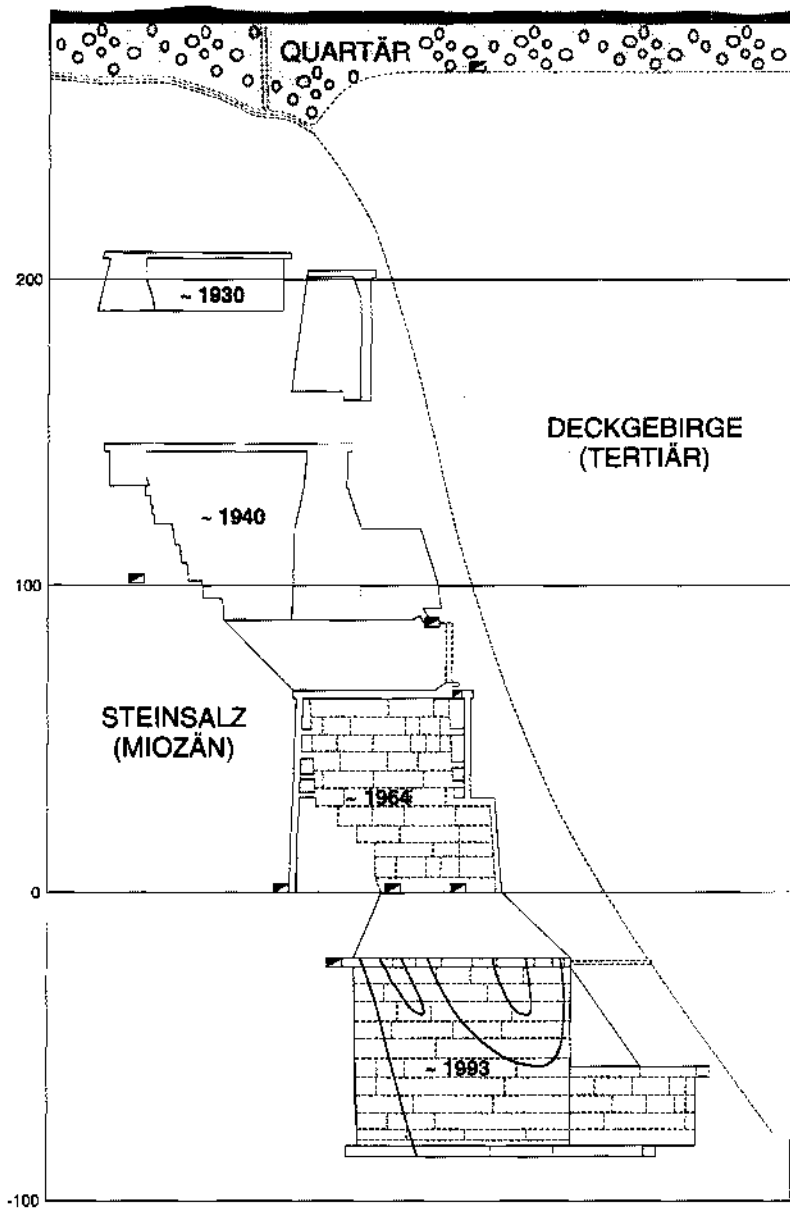


Abb. 6.14 Seigerriß und Abbauzeiten des Steinsalzbergwerkes Solotvina 8
(Maßstab ~ 1 : 2000)

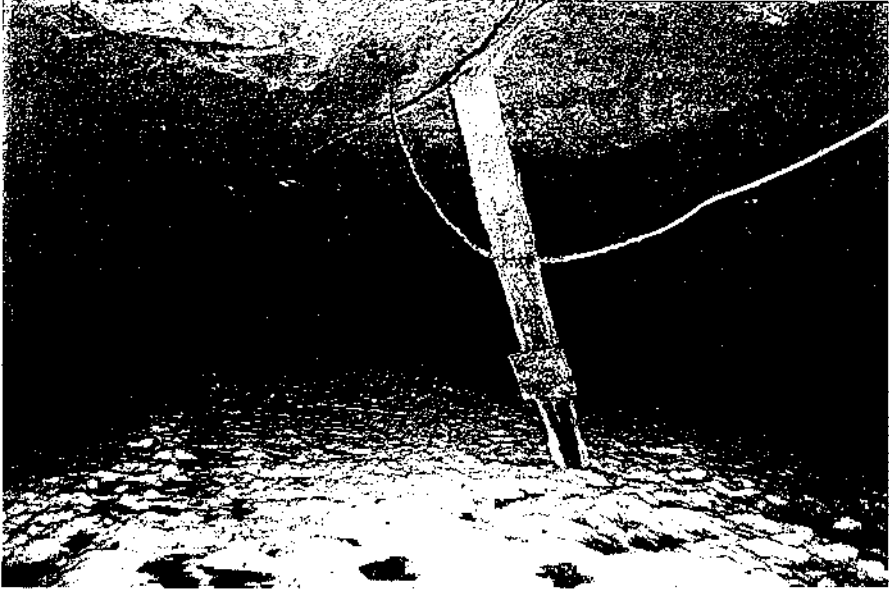


Abb. 6.15 Resthohlraum über ca. 60 m mächtigem Versatzkörper
(Solotvina 8, 80-m-Sohle)



Abb. 6.16 Konvergenzüberwachung im Restraum oberhalb eines 60-m-Versatzkörpers (Teufe ca. 80 m) von Solotvina 8

**Schwertnergasse 1
50667 Köln**
Telefon (02 21) 20 68-0
Telefax (02 21) 20 68-888

**Forschungsgelände
85748 Garching b. München**
Telefon (0 89) 3 20 04-0
Telefax (0 89) 3 20 04-599

**Kurfürstendamm 200
10719 Berlin**
Telefon (0 30) 8 85 89-0
Telefax (0 30) 8 85 89-111

**Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig**
Telefon (0531) 80 12-0
Telefax (0531) 80 12-200