

# 10 Jahre Schachtverwahrung im Südharz-Kalirevier - Erfahrungen aus Sicht von Planung und Ausführung

Dipl.-Ing. Jörg Bodenstern, Prokurist, ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, Erfurt

Dipl.-Ing. Joachim Leuschner, von der IHK Erfurt öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Bauten unter Tage und Schächte, Erfurt

Dipl.-Ing. Michael Seifert, Fachspartenleiter Bergbau, Schachtbau Nordhausen GmbH, Nordhausen

## Kurzfassung

Mit der Einstellung der Kaliproduktion im Südharz- und Unstrut-Kalirevier zu Beginn der 1990er Jahre war die nahezu gleichzeitige Stilllegung von insgesamt 6 Kalibergwerken verbunden. Im Hinblick auf die dauerhafte Sicherung der Tagesoberfläche bei Einstellung des Gewinnungsbetriebes entsprechend § 53 BBergG machte sich die kurzfristige Verwahrung der Mehrzahl der an die jeweiligen Grubenfelder angeschlossenen Tagesschächte erforderlich. Dabei waren sowohl die standortspezifischen geologisch-bergbaulichen Bedingungen jedes einzelnen Schachtes, als auch die im Einzelfall vorgesehene Nachnutzung des Bergwerkes zu beachten. Im Zeitraum 1989 bis 1999 wurden insgesamt 19 Tagesschächte auf der Grundlage geltender Richtlinien verwahrt. Anhand von Beispielen werden die auf der Basis veränderter methodischer Grundsätze und Richtlinien neu entwickelten und realisierten Verwahrungskonzepte erläutert. Dabei werden die bei der Planung und Ausführung von Schachtverwahrungsmaßnahmen gewonnenen Erfahrungen im Hinblick auf die Berücksichtigung standortspezifischer Rahmenbedingungen dargestellt.

## Allgemeines

Das Südharz-Kalirevier befindet sich südlich des Harzes und nördlich des Thüringer Beckens. Es wird im Nordwesten durch das Eichsfeld und im Osten vom Kyffhäuser begrenzt. Die zuzuordnenden Bergwerksfelder erstrecken sich vorwiegend von Nordwesten nach Südosten entlang der markanten Strukturen des Bode- und des Wippertales sowie nordöstlich von Mühlhausen entlang des Schlotheimer Grabens. Zusätzlich soll hier ein Teil des östlich angrenzenden Unstrut-Kalireviers betrachtet werden (Bild 1).

Bild 1. Übersicht der nach 1989 stillgelegten Bergwerke

Die gebräuchliche Abgrenzung des Lagerstättenbezirkes "Südharz" wird durch die Verbreitung der Kalisalze im Kaliflöz Stassfurt bestimmt. Danach bildet der durch Harz und Kyffhäuser sowie durch den Duderstädter und Leinefelder Sattel verursachte Salzhang die nördliche und westliche Begrenzung des Lagerstättenbezirkes. Die östliche Grenze wird seit FULDA, E. (1928) nach faziell-stratigraphischen Gesichtspunkten etwa an die Westgrenze des Kyffhäusers gelegt (1).

Die gesamte bergbaulich berührte Fläche beträgt etwa 3.000 km<sup>2</sup>. Bergmännisch erschlossen und abgebaut wurde das Kaliflöz Stassfurt, welches sowohl in Hartsalz- als auch in Carnallititaausbildung vorliegt.

Nachdem in der Mitte des 19. Jahrhunderts die Kalisalzförderung am Stassfurter Sattel aufgenommen worden war, folgte im Zeitraum zwischen 1888 (erste fündige Bohrung bei Kehmstedt) und 1896 (erster Tagesschacht bei Sondershausen) die Erschließung des Südharz-

Kalireviers. Seine Blütezeit erlebte das Kalirevier zwischen 1907 und 1914, als zahlreiche neue Schachtanlagen und Bergwerke entstanden sind (2). Die Gesamtzahl der im Betrachtungsgebiet niedergebrachten Tagesschächte kann mit 50 angegeben werden.

Im Jahr 1989 betrug die Gesamtförderung an Kalirohsalz im Südharz noch etwa 14 Mio. t. Nach der Wiedervereinigung Deutschlands wurde die Produktion an den bis dahin verbliebenen Standorten eingestellt. Gründe hierfür waren die weitgehende Erschöpfung der aufgeschlossenen Vorräte und der hohe Investitionsbedarf der Bergwerke, so dass eine konkurrenzfähige Produktion nicht möglich war.

Durch den damaligen Betreiber, die Kali Südharz AG, waren 6 Bergwerke an den Produktionsstandorten Sondershausen, Bleicherode, Sollstedt, Bischofferode, Volkenroda und Rossleben stillzulegen (Bild 1). Nachnutzungsmöglichkeiten für die untertägigen Anlagen wurden zunächst geprüft. So wurde zum Beispiel eine Konzeption entwickelt, das Grubengebäude Volkenroda-Pöthen als Gasspeicher zu nutzen. Die Bergwerke Sondershausen und Rossleben sowie ein Teil des Bergwerkes Sollstedt wurden auf ihre Eignung zur Einrichtung einer Untertagedeponie untersucht.

Ab 1992 wurden die Aufgaben durch die Gesellschaft zur Verwahrung und Verwertung von stillgelegten Bergwerksanlagen mbH (GVV) übernommen. Nach jeweils abschlägigen Entscheidungen in Bezug auf eine Nachnutzung galt es, die Bergwerke nach den Vorgaben des Bundesberggesetzes sicher zu verwahren. Für den Abschlussbetriebsplan mussten zunächst umfangreiche Gefährdungsabschätzungen sowie gutachterliche Untersuchungen vorgenommen werden.

Zwischen 1989 und 1999 wurden im Zusammenhang mit der Umsetzung des jeweiligen Abschlussbetriebsplanes 19 der insgesamt 30 angeschlossenen Tagesschächte verfüllt und abgedichtet (Bild 1). Die vorlaufende technische Planung der Maßnahmen erfolgte unter Beachtung der standortbezogenen Schutzziele sowie des Standes der Technik bei der Schachtverwahrung. Zahlreiche begleitende Untersuchungsarbeiten zur Präzisierung der Kenntnisse in Bezug auf die örtliche Situation wurden vorgenommen.

## **Verwahrte Schachtanlagen**

### **Bergwerk Rossleben**

Das Bergwerk Rossleben, im engeren Sinne dem Unstrut-Kalirevier zuzuordnen, ist das östlichste Bergwerk im Betrachtungsgebiet.

Nach der Stilllegung des Bergwerkes war die Möglichkeit einer Teilverwahrung der Schächte mit dem Ziel, den Zugang zur Lagerstätte für eine spätere Nutzung zu erhalten, geprüft worden. Es wurde die Entscheidung getroffen, das Bergwerk endgültig zu verwahren. Für die 4 an das Grubenfeld angeschlossenen Schächte bestand somit die Aufgabe der Verfüllung und Abdichtung. Als Schutzziele galten:

- die Vermeidung unzulässig großer Senkungen der Tagesoberfläche,
- die Verhinderung einer Grundwasserversalzung,
- der Schutz der Lagerstätte.

In der Folge wurden die Schächte Georg und Unstrut in den Jahren 1994/1995 verwahrt. Die ehemals als Hauptschächte genutzten Schächte Rossleben I und Rossleben II wurden im Jahr 1998 endgültig verfüllt und abgedichtet.

## **Bergwerk Volkenroda**

Das sich entlang des Höhenzuges der Hainleite erstreckende Bergwerk Volkenroda mit den Grubenfeldern Volkenroda und Pöthen besaß mit Schachteufen bis zu 1.051 m die tiefsten Kalischächte in Europa. Dabei schlossen die Schächte Pöthen I und Pöthen II unter anderem die Salinarröt-Folge des Buntsandstein auf. Als eine weitere Besonderheit des Bergwerkes ist das Vorhandensein von Erdölvorkommen im Liegenden zu nennen, welche teilweise aufgeschlossen und gefördert worden sind.

Nach der Stilllegung entschied sich der Betreiber auf der Grundlage von gutachterlichen Untersuchungen zur Verwahrung des Grubengebäudes durch Flutung. Dabei sollten die am Standort niederschlagsbedingt anfallenden und gefassten Salzlösungen der Kalirückstandshalde als Flutungsmedium genutzt werden. Da die Salzlösungen über eine spezielle Flutungsbohrung in das Bergwerk verbracht werden, konnten die Tagesschächte bereits verwahrt werden. Diese besonderen Bedingungen berücksichtigend, folgte das gewählte Verwahrungskonzept folgenden Schutzziele:

- Verhinderung des Eindringens von Süßwasser in das Grubengebäude,
- Vermeidung des Aufstiegs von Salzlösungen in die grundwasserführenden Horizonte.

Die unmittelbar benachbarten Schächte Pöthen I und Pöthen II wurden im Jahr 1997 endgültig verwahrt. Die Verwahrungsarbeiten am Schacht Volkenroda wurden im Jahr 1999 beendet.

## **Bergwerk Sondershausen**

Das Bergwerk Sondershausen im Wippertal ist das älteste noch zugängliche Bergwerk im Südharz-Kalirevier. Es entstand aus dem Verbund mehrerer Einzelschachtanlagen bzw. Gewerkschaften.

Bei der Stilllegung wurden verschiedene gebirgsmechanische Gefährdungspotentiale festgestellt, die insbesondere aus dem intensiven Abbau carnallititischer Lagerstättenteile resultierten. Zur Abwehr von Gefährdungen für die Tagesoberfläche wurde für mehrere Feldesteile eine Versatzpflicht ausgesprochen. Seit Übernahme des Bergwerkes durch die Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH (GSES), Sondershausen, als Betreiber wird die Versatzpflicht durch Verwertung bergbaufremder Abfälle als Versatzmaterial erfüllt. Die sich daraus ergebenden besonderen Anforderungen an die Schachtverwahrung waren bei der Planung zu berücksichtigen. Zur Gewährleistung des vollständigen Einschlusses der im Versatzmaterial enthaltenen Schadstoffe ist der Schachtverschluss als geotechnische Barriere auszubilden, die folgende Anforderungen erfüllt:

- Verhinderung des Eindringens von Süßwasser in das Grubengebäude,
- Verhinderung des Aufstiegs von schadstoffbehafteten Salzlösungen in die Grundwasserhorizonte.

Entsprechend der Konzepte des Betreibers zur Durchführung der Pflichtversatzmaßnahmen wurden die Schächte Glückauf II und Glückauf III im Jahr 1994 verfüllt und abgedichtet. Die endgültige Verwahrung der Schächte Glückauf IV und Glückauf VI erfolgte in den Jahren 1997 bzw. 1999.

## **Bergwerk Bleicherode**

Das Bergwerk Bleicherode nördlich und östlich der Bleicheröder Berge umfasst die Grubenfelder Bleicherode und Kleinbodungen. Strukturell war dem Bergwerk die Schachanlage Hain I / II der ehemaligen Nordhäuser Kaliwerke, zu der keine durchschlägige Verbindung bestand, zugeordnet.

Auch hier wurden nach der Stilllegung gebirgsmechanische Gefährdungspotentiale identifiziert und Versatzmaßnahmen veranlasst. Zur Erfüllung der Pflichtversatzaufgaben werden durch den Betreiber, die NDH-Entsorgungsbetreibergesellschaft mbH (NDHE) mit Sitz in Bleicherode, bergbaufremde Abfälle verwertet. Somit waren bei der Ausbildung der Schachtverschlüsse die bereits für das Bergwerk Sondershausen genannten Schutzziele zu berücksichtigen.

In den Jahren 1992 bis 1993 wurden die Schächte Hain I und Hain II als erste Tagesschächte nach den neuen Richtlinien verfüllt und abgedichtet. Es folgte die Verwahrung der Schächte Kleinbodungen II und Kraja I im Jahr 1994.

## **Bergwerk Sollstedt**

Das Bergwerk Sollstedt entstand aus dem Zusammenschluss mehrerer, ehemals selbständiger Bergwerke und Einzelschachanlagen. Die durchschlägig verbundenen Grubenfelder Sollstedt, Haynrode, Gebra/Lohra und Neusollstedt erstrecken sich entlang des Wippertales südlich der Bleicheröder Berge. Angeschlossen sind weiterhin die Schächte der bereits seit mehreren Jahrzehnten ersoffenen und unterhalb der derzeitigen Füllörter abgedämmten Grube Bernterode.

Da zunächst die Konzeption bestand, die hier ebenfalls anstehenden Pflichtversatzaufgaben durch Verwertung von bergbaufremden Abfällen zu realisieren, waren auch die Schachtverwahrungsmaßnahmen konzeptionell auf die bereits o.g. besonderen Anforderungen auszurichten.

Die Schächte Lohra und Gebra wurden bereits in den Jahren 1991 bis 1992 verwahrt. 1993 folgte die Verwahrung des Schachtes Kraja II. Der Schacht Neusollstedt wurde im Jahr 1995 verfüllt und abgedichtet.

## **Konzeption und Planung**

### **Schutzziele und Lösungsprinzipien**

Ausschlaggebend für die Konzeption einer Schachtverwahrung sind die zu beachtenden Schutzziele.

So besteht bei einem luffertfüllt zu belassenden Grubengebäude das Schutzziel neben der Sicherung der Tagesoberfläche wegen des löslichen Anstehenden darin, den Zutritt von Wässern aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude zu verhindern und gleichzeitig das Grundwasserstockwerk in sich abzuschließen.

Bei einer planmäßig zu flutenden Grube hingegen sind Tagesoberfläche und Grundwasserstockwerk zusätzlich vor einem Austritt des Flutungsmediums aus dem Grubengebäude zu schützen.

Sollen Abfälle nach dem Prinzip des vollständigen Einschlusses in das Grubengebäude verbracht werden, so sind Maßnahmen umzusetzen, die ein Aufsteigen von Schadstoffen über

die Schachtröhre sicher verhindern, um eine Beeinträchtigung des Grundwassers bzw. der Biosphäre auszuschließen.

Die im Südharz-Kalirevier seit 1989 realisierten Schachtverwahrungsmaßnahmen können prinzipiell zu folgenden Gruppen zusammengefasst werden (Bild 2):

- (A) Totalverfüllung in Form einer geschichteten Verfüllsäule, Dichtungen im Topbereich des Salinars und unterhalb des wasserdichten Ausbaues, Lagesicherung der Dichtungen durch Widerlager
- (B) Totalverfüllung in Form einer geschichteten Verfüllsäule mit integrierten Dichtungen einschließlich Reservevolumina
- (C) Teilverfüllung mit geschichteter Verfüllsäule auf Widerlager, Dichtungen analog (A)
- (D) Totalverfüllung in Form einer geschichteten Verfüllsäule, Dichtungen wie (A) zusätzlich Dichtung gegen aufsteigende Medien

#### Bild 2. Verwahrungsprinzipien

Neben dem Schutz des Salinars durch eine Dichtung in dessen Topbereich wird das Grundwasserstockwerk durch eine weitere Dichtung vom übrigen Bereich des Deckgebirges getrennt. Sollen Schadstoffe im Grubengebäude zurückgehalten werden, so wird entsprechend Bild 2 - D unterhalb der Dichtung-Widerlager-Kombination im Salinartop und oberhalb der Schachtabgänge jeweils eine zusätzliche Dichtung vorgesehen.

Zur Gewährleistung der oben genannten Schutzziele kommt dem qualifizierten Verschluss der Schächte eine besondere Bedeutung zu. Deshalb sollte nur in Ausnahmefällen auf eine Totalverfüllung der Schachtröhre verzichtet und eine Teilverfüllung entsprechend Bild 2 - C vorgesehen werden.

Um Setzungen der geschichteten Verfüllsäulen zu minimieren, sind die Einbauten zu rauben. Da erfahrungsgemäß auf die Aussagen der Bestandsunterlagen nicht in jedem Falle Verlass ist, werden in den Schachtröhren jene Bereiche, in denen Dichtungen und Widerlager positioniert werden sollen, vor Beginn der eigentlichen Verwahrungsmaßnahmen näher erkundet (abgetastet).

Der bisherigen Planung von Verwahrungsarbeiten in Tagesschächten des Kali- und Steinsalzbergbaus lagen die nachfolgend beschriebenen Vorschriften bzw. Richtlinien zu Grunde.

a) "Grundsätze für die Verwahrung von Tagesschächten", IfB Leipzig vom 25.05.1977 auf der Grundlage folgender Gesetze, Verordnungen:

- Berggesetz der DDR vom 12.05.1969 einschließlich der 1. DVO
- Anordnung über die Verwahrung unterirdischer, bergbaulicher Anlagen (Verwahrungsanordnung) vom 19.10.1971

b) ab Juli 1992: "Gebirgsmechanische und geotechnische Empfehlungen und Grundsätze zur sicheren Verwahrung von Tagesschächten des Salzbergbaus im Südharz-Kalirevier", IfG Leipzig, GSF Braunschweig vom 05.07.1992 auf der Grundlage folgender Gesetze, Verordnungen:

- BBergG (anfangs BBergG für ehemalige DDR) vom 13.08.1980, nebst Durchführungsbestimmungen des Bundes und der Länder

- Allgemeine Bergverordnung, Clausthal-Zellerfeld 1986
  - Richtlinie für die Verfüllung und Abdeckung von Tagesschächten, Clausthal-Zellerfeld vom 22.02.1990, jedoch mit der Einschränkung, dass bei der Schachtverwahrung im Südharz von einem primär luftgefüllt belassenen Grubengebäude ausgegangen wird.
- c) TA Abfall vom 01.04.1991, für den Fall, dass es sich um Schächte handelt, die in Verbindung mit Grubengebäuden stehen, in denen der TA Abfall unterliegende Maßnahmen ausgeführt wurden.

## Dichtungsaufbau

Unter Berücksichtigung der genannten Schutzziele werden in die geschichtete Verfüllsäule Dichtungen integriert. Diese sind in jedem Fall an das Unverritzte anzulegen. Dazu sind sowohl der Schachtausbau als auch eine definierte Auflockerungszone gebirgsschonend zu rauben. Die Dichtungskontur wird durch Spitzarbeiten hergestellt. Der ausgewählte Dichtungshorizont ist zuvor geologisch zu bemustern.

Das Grundprinzip des Dichtungsaufbaus besteht darin, durch geeignete Materialauswahl und Dimensionierung Barrieren herzustellen, die den an der Einbaustelle vorhandenen natürlichen Bedingungen möglichst nahe kommen. Dabei ist ein  $K_f$ -Wert  $\leq 5 \cdot 10^{-10}$  m/s einzuhalten.

Die bisher geplanten Dichtungen bestehen aus einer Tonpackung unterschiedlicher Ausbildung und zumeist aus einer druckseitig angeordneten Asphaltenschicht. Der widerlagerseitige Bereich der Tonpackung wird mit Sand abgemagert.

Folgende Dichtungsausbildungen kamen bisher bei der Verwahrung im Südharz-Kalirevier zum Einsatz:

- Im Deckgebirge mit sofortiger Flüssigkeitsbelastung wird plastisches Material eingebaut. Für die Herstellung der Ton- bzw. Ton-Sand-Packung können sowohl Tonmehl als auch Granulat oder Rohton eingesetzt werden. Ton-Sand-Gemische lassen sich bei Verarbeitung von Tonmehl an der Einbaustelle oder aus werkseitig gemischtem Rohton, wie er als Grundstoff der Feuerfestindustrie verwendet wird, herstellen.
- Im Salinartop kommt bei Verwendung von Tonmehl NaCl-Sole als Anmachflüssigkeit zum Einsatz. Bei Verwendung von Rohton (mit Staubsalz gemischt) oder Granulat werden die Stöße mit aufgespritztem Soleton behandelt. Oberhalb der Tonpackung kann der Einbau einer Asphaltenschicht erfolgen (Bild 3 - A). Dem heiß eingebauten Asphalt wird eine sofortige Dichtfunktion zugeordnet. Selbst bei langfristig denkbarem Abwandern der quasiflüssigen Bitumenphase (10 bis 15 %) erfolgt keine Beeinträchtigung des Gesamtsystems, da das Stützgerüst aus Splitt und Sand erhalten bleibt. Die langzeitsichere Dichtfunktion übernimmt der durch die auflaufende Konvergenz zusätzlich kompaktierte Ton.
- Für den hypothetischen Fall des Lastangriffs aus dem Grubengebäude werden unterhalb des Widerlagers entsprechend Bild 3 - B trocken eingebaute Mineralgemische (Kies, Sand und Tonmehl) vorgesehen. Diese Dichtung wird durch einen Vorpfpfen lagestabil gehalten.
- Wird im Zusammenhang mit dem Dichtungseinbau entsprechend Bild 3 - C gänzlich auf ein Widerlager verzichtet, muss eine nahezu setzungsfreie Verfüllung vom Schachtsumpf über die Füllörter bis zum Dichtungshorizont vorgenommen werden. Je nach Höhe der unterlagerten Verfüllsäule kann es notwendig sein, dass über die aktive Dichtungshöhe hinaus ein Reservevolumen vorzusehen ist.

### Bild 3. Dichtungsaufbau

Alle Arbeiten zum Dichtungseinbau erfordern eine ständige Qualitätsüberwachung der lagenweise einzubauenden und zu verdichtenden Materialien.

Der Übergang von der Dichtung zum Verfüllmaterial wird durch in der Körnung gestaffelte Filterschichten vorgenommen. Sollte oberhalb des Dichtungshorizontes noch Salzgestein anstehen, kann dessen Auflösung oder Zersetzung durch un- oder teilgesättigte Lösungen mit Hilfe eines geochemischen Puffers verhindert werden. Zu diesem Zweck wird in das Verfüllmaterial entweder Staubsalz oder gesättigte Steinsalzsole integriert.

## Widerlagerausbildung

Je nach den angetroffenen geogenen und technogenen Bedingungen kommen verschiedene Widerlagerformen zur Aufnahme der erwarteten Belastungen und zur Lagestabilisierung der Dichtungen zum Einsatz.

Folgende Lastfälle müssen für die Auslegung der Dichtung-Widerlager-Kombination im Topbereich des Salinars berücksichtigt werden:

- LF 1 Belastung mit hydrostatischem Druck aus dem Deckgebirge zuzüglich Eigenlastanteil der aufgehenden Verfüllsäule.
- LF 2 Belastung mit hydrostatischem Druck aus dem Grubengebäude. (Hypothetischer Lastfall, bedingt durch das Ersaufen der Grube über Hangendzuflüsse, also beim Vorhandensein eines offenen Systems).
- LF 3 Belastung mit petrostatischem Druck aus dem Grubengebäude. (Dieser Lastfall kann durch Konvergenz eines gefluteten und nach außen hydraulisch dichten Grubengebäudes auftreten).

Das Bild 4 stellt die Grundvarianten der im Südharz-Kalirevier eingesetzten statisch tragenden Widerlager bei einer Belastung von oben dar.

Bei einem kohäsiven Verfüllabschnitt gemäß Bild 4 - A ist die Belastungsrichtung unmaßgeblich. Sofern eine zusätzliche Belastung von unten berücksichtigt werden muss, ist gegebenenfalls eine weitere Dichtung unterhalb des Widerlagers vorzusehen. Gleitfähige Widerlager können mehrfach kegelstumpfförmig, wie auf Bild 4 - B dargestellt, ausgebildet werden. Verzahnte Widerlager weisen prinzipiell eine ähnliche Form bei entgegengesetzter Belastungsrichtung auf.

### Bild 4. Widerlagerformen

Die Entscheidung bezüglich der zu wählenden Widerlagerform wird maßgeblich durch den für ein Widerlager zur Verfügung stehenden Teufenabschnitt bestimmt. Das Verhältnis Bauhöhe zu Schachtradius beträgt bei einem gleitfähig ausgebildeten Widerlager  $L/r = 3...4$  und bei einem kohäsiven Verfüllabschnitt  $L \geq 20 \times r$ .

Da die bergmännischen und bautechnischen Arbeiten beim gleitfähig ausgebildeten Pfropfen erheblich sind, wird diese Widerlagerart nur dort eingesetzt, wo die Platzverhältnisse den Einbau einer Dichtung-Widerlager-Kombination möglichst geringer Bauhöhe notwendig machen.

Die Herstellung eines gleitfähigen Widerlagers erfordert prinzipiell folgende Leistungen:

- Abfangen des Schachtmauerwerks oberhalb der Einbaustelle entweder im Bereich eines Mauerfußes oder durch Anankern,
- Rauben des Schachtmauerwerkes,
- Schonender Nachriss der Auflockerungszone und der Widerlagerkontur,
- Einbau eines Vorpfropfens,
- Herstellen der Gleitfuge. Hierfür kommen Ton, Kunstharze und Emulsionen in Frage. Dabei

stellt der Ton das natürlichste, da in der anstehenden geologischen Formation enthaltene Material dar, so dass mit Rücksicht auf die Langzeitstabilität eine Gleitfuge aus aufgetragenem Ton favorisiert wird.

- Betoneinbau. Während im Vorpfpfropfen eine hohe Frühfestigkeit angestrebt wird, muss im eigentlichen Widerlager ein Zement mit möglichst geringer Hydratationswärmeentwicklung verwendet werden. Darüber hinaus ist mit möglichst niedrigem Wasser-Zement-Wert zu arbeiten.

Die Arbeiten in der Schachtröhre beschränken sich bei Einbau eines kohäsiven Verfüllabschnittes auf folgende Leistungen:

- Abfangen des Schachtmauerwerks
- partielles Rauben des Schachtmauerwerks
- Herstellen von Abweichungen von der Kreisform des Schachtquerschnittes über die statistisch verteilten vorhandenen Abweichungen hinaus. Diese Imperfektionen sind Grundlage für den Lastabtrag kohäsiver Verfüllabschnitte. Die künstlich hergestellten Imperfektionen ergeben gegenüber den statistisch verteilten eine größere Sicherheit bezüglich der Tragfähigkeitsreserven.
- Betoneinbau unter Verwendung von Bindemitteln geringer Hydratationswärmeentwicklung.

Für die statisch tragenden Widerlager kommt grundsätzlich ein pumpfähiger Beton zum Einsatz. Während bei gleitfähigen Konstruktionen ein Baustoff mit mindestens 20 N/mm<sup>2</sup> Normfestigkeit einzusetzen ist, kann in kohäsiven Widerlagern nach Erfordernis ein Beton geringerer Festigkeit verwendet werden.

Im Deckgebirge und innerhalb des verbleibenden Ausbaus kann Normalbeton verwendet werden.

Dagegen treten bei direktem Anlegen des Betons an salinares Gebirge Verhältnisse auf, die mit den "normalen" übertägigen Bauarbeiten nicht vergleichbar sind.

Diesem Umstand Rechnung tragend, wird bei Betonarbeiten im Salinar Solebeton (Kies, Zement, gesättigte NaCl-Sole) teilweise mit Bewehrung eingesetzt.

Dieser Baustoff ist neben dem Magnesiabeton (Rohsalz, Magnesit und MgCl<sub>2</sub>-Sole) unter den speziellen Bedingungen eines "löslichen Baugrundes" langjährig erprobt und stellt den Stand der Technik im Salzbergbau dar.

Besonders geeignet für Verwahrungsmaßnahmen im Salzgebirge erscheint darüber hinaus der Einsatz von Salzbeton, bestehend aus Steinsalz als Zuschlagstoff, Zement und NaCl-Sole. Als Widerlagerbaustoff kann er kurzfristig Lasten übernehmen.

Langfristig ist durch das mit dem Gebirge vergleichbare Elastizitätsverhalten unter Wirkung der Konvergenz ein "Verheilungseffekt" in Bezug auf die saline Schutzschicht zu erwarten. In Verbindung mit den eingebauten mineralischen Dichtungen, die im Salzton angeordnet werden, könnte durch eine derartige Materialkombination die Schutzfunktion von Steinsalz und Salzton wiederhergestellt werden.

Weiterführende Untersuchungen in Bezug auf Salzbeton werden als zweckmäßig angesehen, da derzeit weder Baustoff, noch Baugrund in ein vorhandenes Vorschriftenwerk des Ingenieurbaus passen.

## **Widerlagerdimensionierung**

Die Dimensionierung gleitfähiger Widerlager wurde nach der FE-Methode auf der Grundlage der Berechnungsansätze nach OELLERS und SITZ (3) bzw. nach SITZ (4) vorgenommen. In die Berechnung geht neben der Belastung und der Geometrie das Elastizitätsverhalten von Baustoff und Gebirge ein.



Es sind folgende Eingangswerte notwendig:

- Belastung
- Geometrie des Widerlagers  
L/r, L1/r, Flankenwinkel  $\alpha$
- E-Modul des Gebirges
- E-Modul des Baustoffes

Auf Bild 5 - A sind die Randbedingungen zusammengefasst. Die Belastung wird durch definierte räumliche Stützgewölbe in das Gebirge abgetragen.

#### Bild 5. Widerlagerbemessung

Sofern die Bedingungen im Schacht den Einbau eines kohäsiven Verfüllabschnittes entsprechend Bild 5 - B erfordern, muss als Voraussetzung für die Tragfähigkeit der Haftverbund zwischen Gebirge und verbleibendem Ausbau nachgewiesen sein. Die Berechnung erfolgt nach HÜLSMANN u.a. (5) und basiert auf der Tatsache, dass in jeder Schachtröhre statistisch verteilte Abweichungen vom kreisrunden Querschnitt (Imperfektionen) vorhanden sind. Dadurch verspannt sich der hydraulisch abgebundene Widerlagerbaustoff an Verengungen und bildet Gewölbebrücken.

Zur Verbesserung der Tragwirkung können die unteren und oberen Abschnitte des Widerlagers direkt an das Gebirge angelegt werden. Neben dieser Maßnahme erhöht sich die Sicherheit gegenüber einem Versagensfall dadurch, dass im Zusammenhang mit den in der Schachtröhre ohnehin notwendigen Arbeiten das Schachtmauerwerk partiell geraubt wird.

Die so hergestellten Imperfektionen gewährleisten gegenüber den statistisch verteilten eine größere Sicherheit bei den Annahmen für die Nachweise. Der Tragfähigkeitsnachweis erfolgt maßgeblich in Bezug auf die Scherspannungen in den Gewölbebrücken.

#### Massenverfüllung

Außerhalb der Dichtungs- und Widerlagerbereiche werden die Schachtröhren und die schachtnahen Grubenbaue mit Lockermassen verfüllt. Der auf Bild 2 mit "a" bezeichnete Bereich erstreckt sich im Steinsalz und im Hartsalz über 25 m. Sofern in einem Schachtabgang Carnallit ansteht, ist die Länge der Verfüllung auf 50 m zu vergrößern. Die Füllortkanten sind zu brechen.

Im Schachttiefsten bis zur untersten Dichtung kommt vorrangig Hartgesteinschotter zum Einsatz. Die besonderen Bedingungen bei der Verwahrung von luffertfüllt belassenen Grubengebäuden lassen einen Versturz der Verfüllmassen über größere Höhen nicht zu. Somit sind Schotter oder andere Verfüllmaterialien über Rohrleitungen oder mit einer Förderung im Schacht bis zur Einbaustelle zu transportieren.

Gegenüber dem erheblichen Verschleiß beim Transport des Schotters über Versturzeleitungen kann alternativ der Einbau von hydraulisch abbindenden Versatzmaterialien innerhalb der Schachtröhre von Vorteil sein.

Oberhalb der Dichtungen kommt Kies unterschiedlicher Sieblinien zum Einsatz. Aber auch verschiedene Schlacken, bei Nachweis der Eignung, und kleinstückig hereingewonnene Abbruch- oder Nachrissmassen aus der Herstellung der Widerlager- und Dichtungskontur können in das Versatzmassiv integriert werden.

Im Bereich des Grundwasserstockwerkes sollen Wechsellagerungen von Kies und bindigem Sand eine Vertikalzirkulation im hydraulisch nicht dichten Schachtquerschnitt behindern.

## **Abdeckplatte**

Als übertägiger Abschluss wird eine Abdeckplatte errichtet. Die als Stahlbetonkonstruktion ausgebildete Abdeckplatte wird bei Schächten mit Totalverfüllung auf das Schachtkopfmauerwerk aufgelegt. Da Setzungen der Verfüllsäule während des Betoniervorganges nicht auszuschließen sind, erfolgt zuvor der Einbau einer Schalungsbühne. Wenn keine anderen Forderungen erhoben werden, wird eine derartige Platte für eine Belastung von 20 kN/m<sup>2</sup> ausgelegt.

In die Platte wird eine Kontroll- und Nachfüllöffnung integriert und durch einen Kanal-Schachtdeckel verschlossen.

Die Betondeckung ist reichlich ausgelegt. Die Platte erhält eine abgezogene Oberfläche mit 2 % Gefälle zum Rand. Zum Schutz vor Witterungseinflüssen wird ein Anstrich auf Bitumenbasis vorgesehen.

## **Ausführung**

Die Ausführung der Verwahrungsarbeiten war für jeden einzelnen Bergwerksstandort und zum Teil für jeden einzelnen Schacht neu zu konzipieren und erforderte von den ausführenden Unternehmen ein enormes Potential an Ausrüstungen, Know-how und geschultem Personal. Gleichwohl können für alle bisherigen Verwahrungen die erforderlichen Arbeiten in 7 Hauptabschnitte unterteilt werden.

## **Einrichten der Verwahrungsbaustelle**

Die Ausgangssituationen an den jeweiligen Schächten haben sich deutlich unterschieden. So gab es Standorte, an welchen durch jahrzehntelangen Stillstand nahezu jede Infrastruktur fehlte (Schächte Hain I und II) und wo neben der Montage eines Schachtgerüsts und der erforderlichen Winden auch die Medienversorgung neu errichtet werden musste (Bild 6).

Bild 6. Baustelleneinrichtung in der Aufbauphase

An Standorten, wo zu Beginn der 1990-er Jahre die Förderung eingestellt und die Verwahrung unmittelbar folgend realisiert wurde, waren zunächst die Seile abzulegen und die Fördergefäße auszubauen. Nachfolgend bestand entweder die Möglichkeit der Einbindung der zu errichtenden Seilfahrtsanlage in die bestehenden Fördergerüste (Schächte Pöthen II und Volkenroda) oder es wurden zunächst durch umfangreiche Abrissarbeiten Gerüst, Schachtgebäude und umgebende Bebauung entfernt, so dass wiederum Schachtgerüst und die gesamte Baustelleninfrastruktur für die Verwahrungsmaßnahme (Schächte Neusollstedt und Pöthen I) neu errichtet werden mussten (Bild 7).

Bild 7. Situation Baustelleneinrichtung (Beispiel)

Ebenso notwendig war im Rahmen der Baustelleneinrichtung der Aufbau einer Druckluftversorgung, einer ausreichend dimensionierten Wasserhaltung und der entsprechenden Sonderbewetterungsanlage. So mussten allein am Schacht Volkenroda Möglichkeiten geschaffen werden, um nach der Außerbetriebnahme der über viele Jahrzehnte in 743 m Teufe betriebenen Schachtwasserhaltung Zuflüsse in der Größenordnung von etwa 100

l/min bei ständig abnehmender Teufe zu fassen und so nach Übertage zu bringen, dass ein jederzeit qualitätsgerechter Dichtungseinbau gewährleistet werden konnte. Zu diesem Zweck wurde ein System aus Traufenrinnen, fliegenden Traufenbühnen und Zwischenpumpbehältern installiert.

Eine ähnlich große Herausforderung stellten die nicht unerheblichen CH<sub>4</sub>-Belastungen im Schacht Volkenroda dar. Diese waren bedingt durch den Wetterverschluss zur Grube Pöthen sowie durch die beginnende Flutung des Grubenfeldes Volkenroda und konnten in Abhängigkeit vom Luftdruck kurzzeitig bis zu 5% im Füllortbereich erreichen. Hierzu musste die Sonderbewetterungsanlage so bemessen werden, dass eine Verdünnung der Wetter auf der Sohle auf unter 1% CH<sub>4</sub> verlässlich erreicht werden konnte. Allerdings musste in den Zeiten, als keine Gasgefährdung vorhanden war, die Möglichkeit der Umstellung der Bewetterung von saugend auf blasend gegeben sein, da zum die Wetter Schutz der Tübbingsäule vorgeheizt wurden.

Resümierend kann eingeschätzt werden, dass die Einrichtung einer Verwahrungsbaustelle mit Errichtung der Seilfahrts- und Arbeitsbühnenanlage, der Lieferung aller erforderlichen Sonderkonstruktionen, Seile und Kabel, dem Betreiben von Wasserhaltungs- und Bewetterungsanlagen sowie dem Vorhalten der allgemeinen Baustellenausrüstung einen Umfang erreichen konnte, der in finanzieller Hinsicht mit bis zu 35 % der Gesamtmaßnahme zu beziffern ist.

### **Rauben aller im Schacht befindlichen Einbauten**

Das Rauben der im Schacht befindlichen Einbauten erfolgte stets von oben nach unten von der mehretagigen Arbeitsbühne aus. Dabei wurden neben den Spurlatten die zumeist hölzernen Einstriche bündig am Stoß abgeschnitten aber auch nach dem Rückbau aller Rohrleitungen und Kabel die entsprechenden Halterungen vollständig geraubt. Zumeist kamen Druckluftkettensägen zum Einsatz, die jedoch bei dem mit getränkter Dachpappe und Folie bespannten Wetterscheider im Schacht Pöthen II an ihre Grenzen stießen. Alle geraubten Materialien wurden nach Übertage gebracht und dort fachgerecht entsorgt. Allein am Schacht Volkenroda waren nahezu 700 m<sup>3</sup> Holzeinbauten zu rauben und einer entsprechenden Verwertung zuzuführen.

Als Vorteil erwies sich, bereits in der Phase des Raubens der Schachteinbauten größte Aufmerksamkeit auf die volle Funktionsfähigkeit des wasserdichten Ausbaus zu legen. Bei Erfordernis konnten so durch Abdichtarbeiten im Bereich des Tübbingausbaus alle Voraussetzungen für einen später reibungslosen Dichtungseinbau geschaffen werden. Von ebenso großer Bedeutung war die Feststellung der in statischer Hinsicht vollen Funktionsfähigkeit des gusseisernen Tübbingausbaus in Bereichen leichtlöslicher Gesteinsformationen. Die Erfahrungen im Rötalszbereich der Schächte Pöthen I und II haben gezeigt, dass Auswaschungen von mehreren 100 m<sup>3</sup> die Standfestigkeit der Tübbingsäule in solchen Bereichen erheblich mindern können, und folglich vor den eigentlichen Verfüllarbeiten verlässlich ausgeschlossen oder aber bei Vorhandensein entsprechend verfüllt und stabilisiert werden müssen.

### **Ausbruch der Widerlager- und Dichtungsbereiche**

Das Herstellen der Widerlagerbereiche erfuhr sowohl in geometrischer als auch technologischer Hinsicht in den 10 Jahren Schachtverwahrung einige Veränderungen. Anfangs wurde der Ausbruch für die komplizierten, mehrfach konischen Scherpfropfen in einer Kombination aus Bohr- und Sprengarbeit mit anschließender manueller Spitzarbeit hergestellt (Bild 8).

## Bild 8. Ausbruch der Widerlagerkontur

Die Erkenntnis, dass auch bei Anwendung schonendster Sprengverfahren eine Beeinträchtigung der hoch sensiblen Saumzone im Dichtungsbereich nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, führte letztlich zum ausschließlich sprenglosen Herstellen der Widerlagerkonturen. Dabei kamen neben den rein manuellen Spitzarbeiten vor allem im Mauerwerksbereich auch hydraulische Spaltgeräte zur Anwendung. Je nach zeitlichem Ablauf einer Verwahrungsmaßnahme hat es sich durchaus bewährt, unmittelbar nach Herstellung der Dichtungskontur den Stoß mit einer schützenden Spritzbetonschale zu versehen, welche im Zuge des Einbaus der Dichtungsmaterialien wieder geraubt wird. Auf diese Weise können sowohl Konvergenzeinflüsse als auch Beeinträchtigungen von Tonbereichen durch Luftfeuchtigkeit minimiert werden.

Heute geht man mehr und mehr dazu über, vor allem die Dichtungsbereiche in zwei voneinander getrennten Abschnitten herzustellen. Zunächst wird im Zuge des Raubens der Schachteinbauten das Schachtmauerwerk im späteren Dichtungsbereich geraubt und am angetroffenen Gebirgsstoß durch geeignete Maßnahmen Kopfsicherheit hergestellt. Mit der aufgehenden Verfüllung wird zu einem späteren Zeitpunkt eine Saumzone von ca. 50 - 70 cm Schritt für Schritt hereingewonnen und das Dichtungsmaterial ohne jegliche Verzögerung eingebaut. Die so erreichten optimalen Einbauverhältnisse erfordern ein Höchstmaß an Flexibilität und Qualitätsbewusstsein der eingesetzten Mannschaft, da der Einbau hochwertiger Dichtungsbaustoffe und das Hereingewinnen von taubem Gestein in ständigem Wechsel erfolgen.

## Einbau der statischen Widerlager

Grundsätzlich wurde bei allen Verwahrungsmaßnahmen eine Totalverfüllung der Schachtröhre und der unmittelbar angrenzenden Grubenräume angestrebt. Hierzu wurden, im Schachttiefsten beginnend, lastabtragende Hartgesteinschottersäulen eingebaut, die je nach geometrischer Form und Größe der Schachtabgänge bis zu 50 m in die Füllörter hineinragten (Bild 9).

## Bild 9. Abgang der Versturzsleitung im Füllort

So wurden allein im Füllort der 2. Sohle des Schachtes Roßleben II mehr als 11.000 m<sup>3</sup> Hartgesteinschotter eingebaut. Der Versturz des Schotters erfolgte über eine im Zuge des Raubens der Schachteinbauten mitgeführte Rohrleitung, welche während des Massenversturzes sukzessive zurückgebaut wurde und die freie Fallhöhe des Schotters auf maximal 25 m begrenzte. Bei den Rohrleitungen handelte es sich um hochverschleißfeste Flanschrohrleitungen von 150 - 250 mm Durchmesser. Aufgrund der hohen Abrasivität des Schotters kam dem absolut lotrechten Einbau der Versturzsrohrleitung besondere Bedeutung zu. Nicht selten mussten an besonders exponierten Stellen im Schacht einzelne Rohre mehrfach ausgetauscht werden.

Da bei den schon erwähnten großen Mengen der Hartgesteinschotter auch einen enormen Kostenfaktor darstellt, gab es Versuche, diesen durch geeignete aber kostengünstigere Baustoffe zu ersetzen. Die dabei mit einem Kupferschlackegemisch im Technikumsversuch erzielten positiven Ergebnisse konnten während eines Probeversturzes im Schacht nicht bestätigt werden. Ein über Tage aufgegebenes Kornspektrum 32/65 war auf der Verfüllsohle im Schacht bestenfalls noch mit etwa 0/2 festzustellen, so dass eine Eignung gänzlich ausgeschlossen werden musste.

Wurden allerdings im Schacht Verhältnisse angetroffen, die aus technischen Gründen eine im

Schachttiefsten fußende Schottersäule nicht zuließen (Schächte Hain I und Hain II), kamen die schon erwähnten statischen Widerlager in Form mehrfach verzahnter Scherpfropfen zur Anwendung. Die auf einer zuvor eingebauten Schalungsbühne gegründeten Pfropfen wurden in den Schächten Hain I und Hain II auch wegen ihrer Lage im jüngeren Steinsalz als reine Salzbetonpfropfen ausgeführt. Die nachgewiesenen Festigkeiten von  $> 35 \text{ N/mm}^2$  sowie die guten Verarbeitungseigenschaften dieses Baustoffes schließen eine weitere Verwendung im Rahmen von Schachtverwahrungsmaßnahmen im Salinar nicht aus.

Eine weitere Voraussetzung für den Einbau der lastabtragenden Schottersäulen bestand in der restlosen Entfernung aller Sumpfeinbauten. War dies aber aufgrund großer Konvergenzerscheinungen (Schachtsumpf Schacht Volkenroda in 1016 m Teufe) sicherheitlich nicht zu vertreten, wurden die Sumpfbereiche zunächst mit einem fließfähigen Dammbaustoff hohlraumfrei verfüllt und mit dem Aufbau der Schottersäule im Füllort begonnen. Als Anmachflüssigkeit für den Dammbaustoff kam gesättigte NaCl-Lauge zur Anwendung.

### **Einbau der Dichtungen**

Die in der geschichteten Verfüllsäule integrierten Dichtungen wurden in jedem Fall direkt an das Gebirge angelegt. Hierzu wurden die verschiedenen Dichtungsbaustoffe über die schon erwähnten Versturzleitungen zur Schachtsohle verürzt und dort je nach Anforderung weiterverarbeitet.

Die vornehmlich aus Tonmineralen bestehenden Baustoffe wurden entweder als Soletongemisch (Tonmehl mit NaCl-Lauge) mittels Spritzmaschinen eingebaut oder aber als Tongranulat oder Mineralgemisch lagenweise auf der Schachtsohle verteilt und mit Kleingeräten des Erdbaus entsprechend verdichtet. Die dabei erreichten  $K_f$ -Werte lagen im Bereich von  $5 \cdot 10^{12} \text{ m/s}$  bei Verdichtungsgraden von 98 % der Proctordichte.

Neben den Verhältnissen im Schacht waren für das Erreichen dieser Qualitätsparameter auch der übertägige Transport und die schachtnahe Lagerung der Materialien von großer Bedeutung. Ebenso erfolgte der Einbau der einzelnen Dichtungsabschnitte ohne jegliche zeitliche Unterbrechung, so dass neben einem regulären 3-Schicht-Betrieb teilweise auch Wochenendarbeit notwendig war.

Die Asphaltabschnitte der Dichtungen wurden mittels Gussasphalt realisiert. Hierzu wurde der etwa  $225 \text{ °C}$  heiße Baustoff über die vorhandene Kübelförderung in das Einbauniveau gebracht und dort über entsprechende Vorrichtungen verkippt. Auch diese Arbeiten erfolgten stets in einem Zuge.

Während der Errichtung der zum Teil 25 m mächtigen Dichtungskomplexe wurde größte Aufmerksamkeit auf die Einhaltung der geforderten Qualitätsparameter gelegt. So wurde neben der übertägigen reinen Materialkontrolle vor allem beim Einbau eine ständige Fremdüberwachung durch ein Baustoffprüflabor ermöglicht, wodurch geringste Qualitätsabweichungen sofort behoben werden konnten (Bild 10).

Bild 10. Qualitätsprüfung beim Dichtungseinbau

### **Schachtverfüllung**

Der überwiegende Teil aller Schachtröhren wurde entsprechend der jeweiligen Konzeption mit Lockermassen verfüllt. Hier kamen neben dem reinen Hartgesteinschotter auch Kiese und bindige Sande zum Einsatz. Teilbereiche wurden aber auch mit Dammbaustoffen oder unterschiedlichen Betonen verfüllt.

In jedem Fall waren diese Massenverfüllungen Herausforderungen in logistischer Hinsicht. Allein im Schacht Volkenroda mussten ca. 2.200 t Dämmen, 6.500 m<sup>3</sup> Beton und 40.000 t Schotter und Kies eingebaut werden. Alle Materialien wurden über die Schachtversturzung verstrützt und ihre freie Fallhöhe auf die schon erwähnten 25 m begrenzt (Bild 11).

Bild 11. Rückbau der Versturzung- und Versorgungsleitungen

### **Errichtung der endgültigen Schachtabdeckung**

Der überträgige Abschluss der Schachtverfüllung erfolgte in aller Regel durch eine auf das nochmals sanierte Schachtkopfmauerwerk aufgelegte endgültige Schachtabdeckung (Bild 12). Diese Stahlbetonkonstruktion erhält neben der obligatorischen Kontroll- und Nachfüllöffnung auch eine gusseiserne Tafel mit den wichtigsten Schachtdaten. So bleibt ein nahezu unscheinbares Bauwerk möglicherweise einziges Zeugnis für eine meist 100-jährige Bergbaugeschichte. Nicht ohne Wehmut bildeten diese Arbeiten sowohl das Ende einer jeden Verwahrungsmaßnahme als zum Teil auch die letzten bergmännischen Aktivitäten in einstmaligen großen Salzbergbaurevieren.

Bild 12. Endgültige Schachtabdeckung

### **Quellennachweis**

1. Fulda, Ernst: *Das Kali, II. Teil*. Stuttgart: Verlag v. F. Enke, 1928.
2. Hauske, Karl-Hermann; Fulda, Dietrich u.a.: *Kali - Das bunte, bittere Salz*. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1990.
3. Oellers, Thomas; Sitz, Peter: *Entwurf und Berechnung gas- und flüssigkeitsdichter Schachtverschlüsse*. Schacht- und Tunnelbaukolloquium, 1985.
4. Sitz, Peter: *Querschnittsabdichtungen untertägiger Hohlräume durch Dämme und Pfropfen*. Freiburger Forschungshefte A 643, Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1982.
5. Hülsmann, Karl Hermann; Schmidt-Schleicher, Hermann; Schorn, Harald: *Teilverfüllung von Tagesschächten mit kohäsiven Verfüllsäulenabschnitten*. Bochum: DMT-Publik Heft 10, 1991