

**Abdichtung und Verfestigung der konturnahen  
Auflockerungszone beim Errichten von Verschlussbauwerken im  
Carnallitgestein unter Verwendung von Kunststoffinjektionen**

Der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau

der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

**DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur  
(akademischer Grad)

Dr.-Ing.,  
(Kurzform)

Vorgelegt

von Dipl.-Ing Oleg Kaledin  
(akademischer Grad, Vorname, Name)

geboren am 10. November 1982 in Novokuznetsk, Russland

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla, Freiberg  
Prof. Dr.-Ing. habil. Frieder Häfner, Freiberg  
Prof. Doktor der Tech. Wis. (Rus.) Evgeniy Kuzmin, Moskau

Tag der Verleihung: 18. Januar 2008

# 1 Einleitung

Zur industriellen Entwicklung gehört in den wesentlichen Bereichen des Lebens eine verstärkte Gewinnung von natürlichen Ressourcen, deren Nutzung der Umwelt in einem immer stärkeren Maße Belastungen und Schäden zufügt. Zu diesen Umweltbelastungen gehören auch die bei den produzierenden und konsumierenden Prozessen entstehenden vielfältigen Abfälle der Industriegesellschaft. Unzweifelhaft ist, dass derzeit die umweltverträgliche Entsorgung chemisch-toxischer Abfälle den Menschen besondere Sorge bereitet. Die Schadstoffe müssen langfristig sicher und nachsorgefrei von der Biosphäre getrennt sein. Ein Weg dazu ist die Abfallentsorgung im Bereich der festen Erdkruste, d.h. in tiefen geologischen Formationen.

In dieser Forschungsarbeit handelt es sich um anwendungsbezogene Grundlagenforschung zur Sicherheit von Mensch und Umwelt auf dem Gebiet der untertägigen Entsorgung chemisch-toxischer Abfälle. Das Ziel ist, die Sicherheit vor langzeitlichen Gefährdungen durch diese Abfälle kontinuierlich zu erhöhen.

Zur Abfallbeseitigung in geologischen Formationen wurden weltweit verschiedene Konzepte vorgeschlagen und teilweise auch ausgeführt. Eine davon ist die Isolierung der Abfälle in Endlagern und Untertagedeponien in tiefen geologischen Formationen. Dabei gilt allerdings die Bedingung, dass Untertagedeponien/Endlager nur in hinreichend gering permeablen Gebirgsformationen errichtet werden dürfen, die in Verbindung mit ihrem geotektonischen Umfeld als grundsätzlich geologisch dicht zu charakterisieren sind. Weiterhin finden seit Jahrzehnten untertägige Hohlräume in Form von Speicherkavernen und Porenspeichern in ausgewählten geologischen Strukturen Anwendung. Dabei wurden Isolation, Dichtheit, Standsicherheit, Schutzwirkung und die geringe Wahrscheinlichkeit der Fremdeinwirkung nachgewiesen. Aus dem Betriebsverhalten dieser Anlagen kann grundsätzlich, zumindest für Zeiträume von Jahrzehnten, die Dichtheit geologischer Formationen gegenüber Fluidmigrationen, selbst unter technogenen Einwirkungen, belegt werden [1].

Zur Entsorgung in tiefen geologischen Formationen wird in Deutschland das Mehrbarrierenkonzept zugrunde gelegt. Dieses Konzept beruht auf dem Grundgedanken, dass eine Schadstofffreisetzung durch unabhängig voneinander wirkende Barrieren verhindert wird, welche die Schadstoffpartikel auf ihren Weg

zurück in die Biosphäre zu überwinden haben und die eine Remigration in unzulässiger Konzentration verhindern. Konkret werden zur Gewährleistung der nachsorgefreien langzeitsicheren Endlagerung der Abfälle folgende Barrierearten in Betracht gezogen:

- geologische Barrieren (Wirtsgestein und umgebende Formationen, Deckgebirge und Nebengebirge)
- geotechnische Barrieren (Streckendamm- und Schachtverschlussbauwerke (Querschnittsabdichtungen) und Versatz) bzw. Verfüllung
- technische Barrieren (langfristig geochemisch und mechanisch widerstandsfähige Abfallbehälter, Immobilisierung der Abfälle in schwer lösliche Stoffe).

Dabei wird das Ziel verfolgt, trotz unvermeidbarer und langfristig wirksamer Wechselwirkungen mit der geotechnischen Umgebung (z. B. Gebirgsdruck, wässrige Lösungen, Gasen), grundsätzlich einen vollständigen Einschluss der Abfälle im untertägigen Barrierensystem zu erreichen. [2]

In Deutschland werden für Radioaktive Abfälle speziell konzipierte Endlagerbergwerke oder umgerüstete ehemalige Mineralgewinnungsbergwerke als untertägige Anlagen für die Entsorgung chemisch-toxischer Abfälle genutzt.

Für alle Baumaterialien, die beim Bau von Endlagern verwendet werden, muss deren Langzeitstabilität nachgewiesen werden. Eines der größten Probleme der Wissenschaft beim Entsorgen der schädlichen Abfälle ist der Nachweis der Langzeitstabilität. Für die bisher angewendeten Materialien wurde auf direktem Wege die Langzeitstabilität durch natürliche Analogien nachgewiesen.

In den letzten Jahren wurde das Problem der Impermeabilisierung von Wegsamkeiten im Gebirge, insbesondere im unmittelbaren Konturbereich der Verschlussbauwerke erkannt.

Beim Vortrieb eines Hohlraumes entsteht im Konturbereich des Gebirgskörpers eine Ausbruchzone (ca. 50 cm), die eine höhere Durchlässigkeit und geringere Festigkeit als das ungestörte Gebirge hat. Im Kalisalzgestein z.B. im Carnalitit entsteht kurz nach dem Vortrieb wegen der Luftfeuchte eine Verwitterungszone, die unter anderen eine sehr hohe Durchlässigkeit hat. Dies wird von einer großen Affinität des Kalisalzgebirges zu

Wasser verursacht, besonders wenn das Gebirge hochhygroskopische Salze enthält (z.B. Tachyhydrit  $\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ). Das Gebirge nimmt die Feuchte aus der Luft auf, wodurch chemische Reaktionen in Gang gesetzt werden, die zum Verlust von Dichtheit und Festigkeit führen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Technologie zur Abdichtung des Konturbereichs bei der Errichtung von Verschlussbauwerken im Salz- und Kalisalzgestein unter Verwendung von Kunststoffen.

In dieser Arbeit werden zwei Hauptaufgaben gestellt:

- Prüfung der Tauglichkeit von Kunststoffinjektionsmaterialien zum Schutz der Auflockerungszone bei der Errichtung von Verschlussbauwerken und die Auswahl passender Materialien (aus Sicht der Langzeitbeständigkeit und Tauglichkeit zur Anwendung im Salzmedium),
- Entwicklung einer Technologie zur Durchführung von zusätzlichen Maßnahmen, die zur Abdichtung des konturnahen Bereiches führen. Diese Arbeiten werden zusätzlich zur Verwendung eines langzeitstabilen Dichtelementes durchgeführt.

## 2 Literaturlauswertung

### 2.1 Problemstellung

In untertägigen Grubenbauen, in denen toxische Abfälle eingelagert werden, sind als Barrieren verschiedene Querschnittsabdichtungen vorgesehen. In klassischen Schachtverschlüssen bzw. Querschnittsabdichtungen für unterirdische Speicher sind in horizontalen und vertikalen untertägigen Hohlräumen im Hartgestein und im Salinar in der Regel massive Dämme vorgesehen, die aus mehreren Schichten bestehen.

Den Konzepten liegt das Kriterium der technischen Dichtheit zugrunde, da eine absolute Dichtheit aufgrund der realen Permeabilitäten im ausbruchsnahen Gebirgsbereich sowie im Dichtmaterial nicht möglich ist [3,4]. Dies wird durch die nach den Vortriebsarbeiten folgende Entfestigung der konturnahen Zone verursacht. Das führt zur Erhöhung der Durchlässigkeit des konturnahen Bereiches und zum Verlust der Schutzeigenschaften des Gebirgsmassivs. Zugleich können auch die geotechnischen Schutzeinrichtungen (Dämme, Ausbau, etc.) herstellungsbedingte Risse, Fugen oder Strukturinhomogenitäten (Bereiche, in denen die Schutzeigenschaften der geotechnischen Bauwerke am geringsten sind) haben.

Beim Erstellen der Verschlussbauwerke im Kalisalzgestein (z.B. Carnallit – Tab.1) besteht die Gefahr der Verwitterung des Stoßes sofort nach dem Berauben. Die verwitterte Zone hat eine drastisch höhere Permeabilität und niedrigere Festigkeit im Vergleich mit dem intakten Gebirge. Die Ursache davon ist die Hygroskopizität einiger Mineralkomponenten des Gebirges (z.B. Tachyhydrit). Diese nehmen Feuchtigkeit aus der Luft auf, was zu weiteren chemischen Reaktionen führt.

Tabelle 1. Mineraliengehalt in Proben aus dem Bergwerk Teutschenthal [7]

Probe	Carnallit, %	Tachyhydrit, %	Kieserit, %	Hallit, %	Unlösbare Teile, %	Feuchte <sup>1</sup> , %
1	53,00	15,98	15,47	12,96	0,82	1,81
2	74,06	8,54	5,27	9,96	1,08	1,07
3	51,66	9,70	3,62	33,47	0,53	1,10
4	55,87	17,08	4,70	19,31	1,18	1,91
5	53,30	2,96	5,18	7,42	0,15	1,02
6	56,05	17,94	4,19	18,50	1,34	1,99

<sup>1</sup> Bestimmt sofort nach der Probeentnahme

Des Weiteren besteht die Gefahr, dass im Fall von Zuflüssen Schadstoffe durch die Risse und Störungen weit in der Erde verbreitet werden können. Auch wurde nachgewiesen, dass Flüssigkeiten (z.B. Grundwässer) in Mikroporen im konturnahen Bereich und Störungen im Strecken- und Schachtausbau wandern können. Sie bewegen sich von höher gelegenen wasserführenden Schichten zu den Formationen, in denen die Abfälle gelagert werden. Im Laufe der Zeit werden dann die kontaminierten Wässer vom Gebirgsdruck zurück in die wasserführenden Schichten gepresst. Dabei können Porenwässer die Schutzeinrichtungen (wie Dämme oder Verschlussbauwerke) umströmen, indem sie in der Auflockerungszone im konturnahen Bereich strömen [5,6]. In diesem Fall könnten Umweltgefährdungen nicht mehr sicher ausgeschlossen werden.

Im Laufe der aktuellen Untersuchungen [7,8] wurde festgestellt, dass die Auflockerungszone im Kalisalz- und Steinsalzgestein 5 bis ca. 20 cm beträgt. Die Entstehung der Auflockerungszone im Kalisalz- und Steinsalzgestein ist unterschiedlich. Wie bereits beschrieben, entstehen die Störungen im Steinsalzgestein beim Vortrieb, während im Kalisalzgestein die Zone durch Verwitterung zusätzlich beeinflusst wird. In beiden Fällen lassen sich die Klüfte nicht als Makrorisse betrachten. Im Steinsalzgestein bildet die Auflockerungszone einen porösen Körper mit einer Porengröße von 0,001-0,01 mm. Im Kalisalzgestein kann man die Verwitterungszone als poröses Medium [9] mit einzelnen Klüften (tiefere Verwitterung) betrachten. Die Tiefe dieser Zone hängt vom Gehalt des Tachyhydrits ab, weil Tachyhydrit die größte Affinität zur Luftfeuchtigkeit hat.

## **2.2 Stand der Forschungen zur Wasserabdichtung unterirdischer Konstruktionen.**

Traditionell werden zur Abdichtung von unterirdischen Konstruktionen und der Kontaktflächen zwischen dem Gebirge und dem Ausbau Zementsuspensionsinjektionen angewendet. In manchen Fällen ist die Anwendung solcher Injektionen wegen komplizierter geologischer oder technologischer Bedingungen (z.B. lange und stark verästelte Risse, zu kleine Rissöffnungsweiten oder das Fehlen der Adhäsion vom Injektionsmaterial zum Gebirge) unmöglich [10].

Deswegen ist es notwendig, eine Technologie zur Verbesserung der Schutzigenschaften des Verschlussbauwerkes zu entwickeln, die zur Anwendung unter solchen Bedingungen tauglich ist und die störungsfreie sowie sichere Funktionalität der

Wasserabdichtung im Laufe von 100-150 Jahren ohne zusätzliche Reparaturarbeiten und ständiger Beobachtung gewährleistet.

Die Frist 100-150 Jahre wurde ausgewählt, weil auf Grund der rheologischen Eigenschaften des Salzgebirges die Mikrorisse im Laufe der Zeit unter Einwirkung des Gebirgsdrucks zgedrückt werden. Dieser Vorgang ist unter dem Begriff „Selbsteilung des Salzes“ bekannt. [11]

In den letzten 10 Jahren wurden zwecks Erhöhung der Sicherheit und Einbaubarkeit der Verschlussbauwerke viele neue Materialien (z.B. spezielle Bitumen und Beton) und Technologien auf Eignung für die Anwendung unter salinaren Bedingungen untersucht.

Eines der Konzepte besteht darin, dass zur Anwendung sogenannter Solebeton getestet wurde. Solebeton ist ein Beton, für den beim Mischen statt Wasser hochkonzentrierte Salzlösung (gesättigte NaCl Lösung) verwendet wird. Auch wurde Beton mit Salz als Zuschlag (Salzbeton) eingesetzt. Dabei wurde von folgenden Gedanken ausgegangen: der konventionelle Beton löst durch das enthaltende Süßwasser die Oberschicht des Salzgesteins, wodurch keine feste Verbindung zwischen dem Beton und dem Gebirgsmassiv entsteht. Es wurde vermutet, dass mit Salzlösung angemischter Beton länger der Korrosion widerstehen könnte und dieser ein kleineres Schwindmaß beim Aushärten hat. Diese Vermutungen wurden aber nicht bestätigt [12].

Weiterhin gab es in den letzten Jahren einen Versuch zum Errichten eines horizontalen Verschlussbauwerkes mit Formsteinen aus einer Mischung von 50-60 % Bentonit und 40-50 % Sand. Diese sollten beim Flüssigkeitszufluss aufquellen und den Zutritt der Flüssigkeit auch bei sehr hohen hydrostatischen Drücken (10-12 MPa) unterdrücken. Leider haben die in-situ Experimente im Salzbergwerk Sondershausen die Effektivität dieser Anwendung nicht vollständig bestätigt. Das Bauwerk wurde über die Kontaktzone zwischen dem Bauwerk und Gebirge und das umliegende Gebirge umgeströmt, da der Quelldruck für eine Abdichtung des konturnahen Gebirgsbereiches zu gering war [13].

Zur Zeit zählen Bentonitgranulate verschiedener Größen zu den sichersten Materialien zum Erstellen von vertikalen Verschlussbauwerken. Ihre Effektivität in der Anwendung wurde durch eine Reihe erfolgreicher Experimente nachgewiesen [14].

Weiterhin wurden Mischungen aus Bentonit mit Zuschlägen eingesetzt. Die Anwendung solcher Mischungen hat, im Vergleich mit reinem Bentonit, einige

Vorteile: neben der Erhöhung der Tragfähigkeit des Bauwerkes und der Verbesserung der rheologischen Eigenschaften, führt ihre Anwendung zur Einsparung von Bentonit und zur dementsprechenden Verringerung der Kosten, was entscheidende Bedeutung beim Verfüllen von großen Hohlräumen hat. Allerdings haben diese Gemische einen geringeren Quelldruck als reiner Bentonit [15,16,17].

Mit der Benutzung von verschiedenen Stoffen und Materialien unterschiedlicher Kornverteilung als Zuschläge lassen sich die Eigenschaften des Endprodukts stark beeinflussen. Dadurch lassen sich Eigenschaften, wie die benötigte Dichte, Tragfähigkeit eines Dichtstoffes, oder auch bestimmte Quelldruckwerte beim Flüssigkeitszutritt erreichen [15].

Im Zeitraum von 1990 bis 1995 wurde die Möglichkeit zur Anwendung von Salzbriketts zur Einrichtung von Verschlussbauwerken im Salinarmedium untersucht [18]. Die Briketts hatten eine ähnliche Größe wie Ziegelsteine und bestanden aus einem unter dem Druck von 100-200 MPa gepressten feinkörnigen Steinsalz. Dem Konzept lag die Idee zu Grunde, als Material zum Bau der Verschlussbauwerke im Salzgestein ein homogenes Material, mit nachgewiesener Langzeitstabilität mittels natürlicher Analoga, einzusetzen. Bei Untersuchungen wurde festgestellt, dass das neue Material eine 15-fach größere Porosität im Vergleich zum natürlichen Salzgestein hat [19]. Dadurch wurde auch ein größerer Festigkeitsverlust bei der Befeuchtung erklärt [20]. Deshalb wurde die Verwendung dieser Brikett als Widerlagermaterial abgelehnt.

Ende der 90er Jahre wurde die Verwendung von Mauerwerken aus natürlichen Basaltblöcken (200x100x100 mm) für Streckenverschlüsse diskutiert [21]. Ihre Langzeitstabilität im Laufe von 1 Mio Jahren im Kontakt mit Salzgestein kann in der Natur beobachtet werden. Trotzdem wurde die Anwendung von diesen Materialien unter anderem wegen der enormen Materialkosten abgelehnt [22].

Die Anwendung von Schmelzbasalt als ein Baumaterial für Streckenverschlüsse ist ebenfalls interessant. Der Schmelzbasalt hat beim Einsatz für Verschlussbauwerke alle Vorteile des Naturbasalts, ist aber kostengünstiger. Schmelzbasalt hat eine hohe Beständigkeit gegenüber physikalischen und chemischen Einflüssen. Aus diesem Grund wird er schon lange Zeit in der Bau- und Maschinenbauindustrie eingesetzt, wo eine hohe Abrasionsbeständigkeit und Beständigkeit gegen aggressive chemische Medien benötigt wird [23]. Die Untersuchungen zum Nachweis der Tauglichkeit dieses Materials wurden von FLISS [22] durchgeführt.



Als günstig zur Errichtung von Verschlussbauwerken im Kalisalzgestein stellt sich Magnesium-Beton heraus [24]. In Experimenten wurde die optimale Zusammensetzung ermittelt, die sich am besten für die oben genannte Bedingungen eignet. Im Vergleich mit dem traditionellen CaO-Beton ist MgO-Beton wegen seines Chemismus unanfällig gegenüber Korrosion unter Einwirkung der  $Mg^{2+}$ - und  $SO_4^{2-}$ -haltiger Salzlösungen, hat eine hohe Festigkeit (entspricht der Klasse B80) und schwindet nicht beim Aushärten. Zu den Nachteilen kann man die intensive Wärmeentwicklung beim Abbinden zählen. Weiterhin ist er gegenüber Wasser und reiner NaCl-Lösung nicht stabil. Die gesamte Wärmemenge beim Abbinden ist zwar mit der Wärmemenge vom traditionellen Beton vergleichbar, aber bei MgO-Beton wird die Wärme in einer kurzen Zeit abgegeben, was zu einer deutlichen Erwärmung und einer entsprechenden Rissentwicklung führen kann. Zur Zeit werden die Experimente zur Entwicklung einer Betonier-Technologie und einer Technologie zur Wärmeabführung durchgeführt, die die Rissentwicklung beim Aushärten verhindern soll [94].

Eine Suspension auf MgO-Basis wurde auch als Injektionsmittel getestet. Für die Injektion feinsten Risse (Zielgröße 30  $\mu m$ ) ist handelsübliches MgO (Siebdurchgang 90% von 50 bis 60  $\mu m$ ) nicht geeignet. Durch Windsichten und selektives Mahlen (in einer Kugelschwingmühle) wurde ein Produkt mit Siebdurchgang 90% von ca. 10  $\mu m$  hergestellt und erprobt. Dazu wurde die Viskosität unterschiedlicher Suspensionen des ultrafeinen MgO in R-Lösung im Konzentrationsbereich von 1,6 bis 2,6 l/kg untersucht. Es zeigte sich, dass für eine gute Verpressbarkeit der Anteil R-Lösung mindestens 2,0 l/kg betragen sollte. Mit den Mischungen konnten erfolgreich Versuche in einem Spaltmodell bei einer Spaltbreite von 30  $\mu m$  durchgeführt werden. Die in-situ Versuche verliefen allerdings weniger positiv. Löseerscheinungen an Tachhyhydritbereichen konnten hierbei nicht ausgeschlossen werden, sie führten zu Veränderungen der Rissweiten und damit zu Instabilitäten. Versuche mit Suspensionen auf der Basis tachyhydritgesättigter  $CaCl_2$ - $MgCl_2$ -Lösungen führten nicht zu positiveren Ergebnissen [25].

Aus der Erfahrung vom Bau unterirdischer Öl- und Gasspeichern ist bekannt, dass eine Abdichtung der Kontaktfläche hergestellt werden kann, indem die Technologie des Hydroschlusses angewendet wird (Abb. 1) [26,27]. Die Idee besteht darin, dass im Einschnitt des Gebirges die unter Druck stehende Flüssigkeit alle Poren und Risse im Gebirge verfüllt. Der Kapillardruck in den Poren des Gebirges hindert dann das Öl oder

Gas am Austritt. Diese Methode hat ihre Effektivität bei der Nutzung von Gasspeichern, aber für die Endlagerung toxischer Abfälle ist die Methode nicht einsetzbar. Um die Abdichtung auf eine solche Weise funktionstüchtig zu erhalten, müsste immer der hydrostatische Druck in der Kammer aufrecht erhalten und beobachtet werden. Weiterhin wäre der Zufluss von Flüssigkeit aus der Kammer zu den Abfällen möglich.

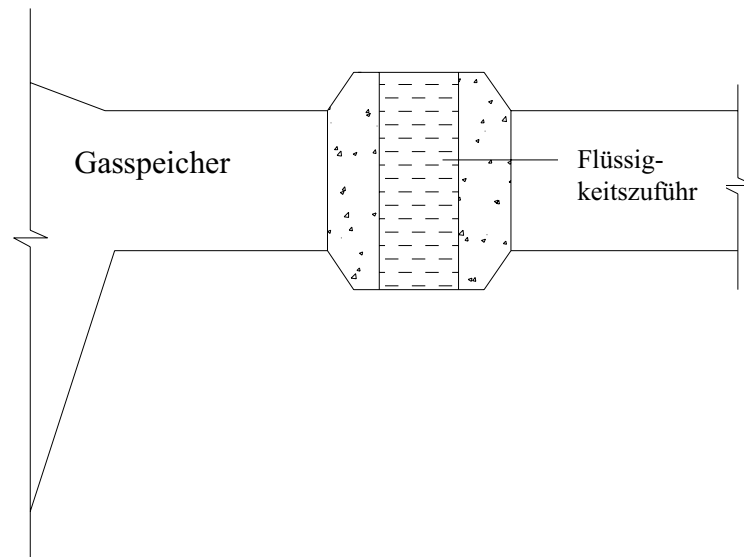


Abb. 1: Schema eines Verschlusses beim Gasspeicher im Salzgestein

Zur Zeit werden auch Untersuchungen zur Anwendung von Bitumen und Asphalten in langzeitstabilen Streckenverschlüssen durchgeführt, unter anderem auch sogenannte 2-Komponenten Bitumen [28]. Die Hauptvorteile von Bitumen sind das chemisch inerte Verhalten gegenüber dem Gebirge und wässrigen Lösungen, das rheologische Verhalten und damit die Fähigkeit, Risse und Klüfte abzudichten, sowie der Selbstheilungseffekt bzw. die Selbstabdichtung bei schnellen oder dynamischen Belastungen. Aus der Sicht der Langzeitstabilität eignet sich Bitumen ausgezeichnet für die Errichtung von Verschlussbauwerken, weil Bitumen ein natürlich vorkommender Stoff ist und daher der Nachweis der Langzeitsicherheit möglich ist. Andererseits ist der Zähflüssigkeitscharakter von Bitumen nachteilig [29].

Dabei stellt sich aber das Problem, dass konventionelles Bitumen nur bei Temperaturen über 160°C eingebaut werden kann, was zur Anwendung im Carnallit unzulässig ist. Bei solchen Temperaturen zerfällt Carnallit unter Freisetzung von HCl Dämpfen. Andererseits ist die Anwendung von Lösungsmitteln für die Verbesserung der Fließeigenschaften unerwünscht, weil dadurch ein erhöhtes Schwinden beim Aushärten durch das Ausdampfen von Lösungsmitteln verursacht werden kann.

Ein im Laufe der Forschung [29] entwickeltes Injektionsmaterial auf Bitumenbasis kann bei Umgebungstemperatur und ohne Zugabe von Lösungsmitteln verarbeitet und injiziert werden. Das Injektionsbitumen besteht aus 2 Komponenten. Die Erste Komponente ist ein speziell aufgemahltes Hartbitumen, während die zweite Komponente ein entaromatisierter Kohlenwasserstoff ist. Beide Komponenten werden kurz vor der Injektion vermischt und mittels herkömmlicher Injektionstechnik in das Gebirge oder den Baukörper verpresst, wobei dieses Anfangs niedrig viskose Injektionsmaterial mit Flüssigkeitscharakter sich zeitabhängig durch Viskositätssteigerung und Ausbildung einer Schubfestigkeit verfestigt und aushärtet. Vorhandene Wegsamkeiten, vor allem sehr kleine Risse, Spalten und Klüfte (z.B. Rissweiten  $< 0,1$  mm) können auf Grund der oben genannten speziellen Eigenschaften des Materials dauerhaft und langzeitstabil abgedichtet werden. Die besonderen Eigenschaften des Injektionsbitumens sind dadurch gekennzeichnet, dass es nach dem Injektionsvorgang in den verfüllten Rissen aushärtet und einen festen Dichtkörper bildet. Dieser feste Dichtkörper garantiert die Dauerhaftigkeit und Langzeitstabilität der mit diesem Material vorgenommenen Injektion. [30,42]

Eine andere Methode zur Abdichtung des umliegenden Gebirges ist das Einpressen von Kunststoffinjektionsmaterialien (Epoxyd- und Polyurethanharzen) ins umliegende Gebirgsmassiv vor dem Erstellen des Verschlussbauwerkes. [31,32]. Alternativ wäre es auch möglich, die Kunststoffe in die Kontaktfläche zwischen dem Verschlussbauwerk und dem Gebirgsmassiv (mikroskopische Hohlräume zwischen dem Bauwerk und dem Stoß) nach der Einrichtung des Bauwerkes zu injizieren. Dazu könnten zur Verhinderung von Kapillarströmungen im Gebirgsmassiv künstliche Schlitzlöcher hergestellt werden. Die Schlitzlöcher müssen auf der ganzen Tiefe möglicher Wegsamkeiten hergestellt und mit Kunststoff verfüllt werden. Diese Methode (Sägeverfahren) wurde oft im Hochbau zur Abdichtung der erdberührten Mauerwerke bei Kapillarwasserzuflüssen angewendet [32,33].

Die Anwendung von Kunststoffinjektionsmaterialien hat in den letzten Jahren eine starke Ausbreitung im Bergbau und Tiefbau erfahren und brachte erfolgreiche Ergebnisse im Bereich der Wasserabdichtung und Gebirgsverfestigung.

Von KUSMIN [34] wurden Methoden der Verfestigung des Gebirgsmassivs bei der untertägigen Kohlegewinnung mittels Kunststoffinjektionen diskutiert. Weiterhin wurde die Anwendung von Kunststoffen zur Befestigung von Ankern analysiert. Die in der

Arbeit untersuchte Anwendung von Polymerstoffen zur Wasserbekämpfung und Gebirgsstabilisierung hat gute Ergebnisse gezeigt [34].

Die Polyurethaninjektionsmaterialien wurden schon genutzt, um die Zuflüsse von Salzlösungen im Schacht im Carnallit zu bekämpfen. Dazu gibt es eine Referenz für das Bergwerk Werra [35] von 1992. Aus allen verwendbaren Injektionsmaterialien wurde ein Polymerstoff auf Polyurethan-Basis ausgewählt, weil er eine gute Adhäsion zum Gebirge, Elastizität beim Aushärten und gute Verarbeitungseigenschaften hat.

Im Laufe der letzten 15 Jahre nach der Durchführung der Injektionsarbeiten hat sich noch kein Wasserzufluss wieder eingestellt. Deswegen kann geschlussfolgert werden, dass dieses Material im salinaren Medium einsetzbar ist.

Weiterhin wurde 1982 ein Polyurethanharz im Schacht der Kaligrube Asse zum Schutz des Gebirgsmassivs vor Verwitterung angewendet. In diesem Fall wurde die Beschichtung des Gebirgsmassivs mit einem Mittel auf Polyurethanharz-Basis vorgenommen. Zur Beseitigung der lokalen Wasserzuflüsse wurden Injektionen mit Epoxydharz verwendet. [36]

Die Verarbeitungseigenschaften von Polymerstoffen lassen sich gut anpassen. Dadurch kann für jeden Fall ein Material mit genau passenden Eigenschaften für die Arbeitsaufgabe ausgewählt werden.

Kunststoffharze werden weltweit in großen Mengen mit sehr variablen Eigenschaften hergestellt (Viskosität, Dichte, Topfzeit u.s.w.), wodurch sich die Möglichkeit ergibt, ein Mittel mit genau angepassten Eigenschaften zu wählen. Sie werden oft in Bau- und Tiefbauindustrie angewendet. Circa 40 Prozent aller in der Welt produzierten Kunststoffe werden in der Bauindustrie eingesetzt, unter anderem zum Korrosionsschutz (Epoxyde und Polyurethane) und zur Fertigung verschiedener Bauelemente (Polyvinylchloride, Polyester) [37]. Zur Durchführung von Abdichtungsinjektionen werden vor allem niedrigviskose Polyurethanharze, Epoxydharze und Polyacrylate verwendet.

### **2.3 Übersicht zum Stand der Forschungen zur Langzeitstabilität von Kunststoffen**

Zur Errichtung eines langzeitstabilen Wasserabdichtungssystems dürfen beim Bau nur die Materialien angewendet werden, für die die Langzeitbeständigkeit während der gesamten Einsatzdauer nachgewiesen ist [4, 38]. Der Hauptvorteil von Kunststoffen als Injektionsmittel und Beschichtungsmittel ist das chemisch inerte Verhalten gegenüber dem Gebirge und wässrigen Lösungen und damit die Fähigkeit, Risse und Klüfte abzudichten. Nachteilig ist die Problematik des Nachweises der Langzeitbeständigkeit von Kunststoffen, da es sich nicht um Naturprodukte handelt und die Kunststoffe nur in den letzten 50 Jahren eingesetzt wurden. Deshalb erfordert der Einsatz von Kunststoffen in Verschlussbauwerken im Salinar spezielle Untersuchungen des Langzeitverhaltens. Es gibt umfangreiche wissenschaftliche Erfahrungen, welche es ermöglichen, das Langzeitverhalten in bestimmten Bedingungen zu ermitteln.

Die Probleme der Langzeitstabilität von Kunststoffbauteilen wurden weitgehend in den 60iger bis 80iger Jahren untersucht. Die führenden Fachspezialisten in Deutschland auf diesem Gebiet zu diesen Zeiten waren DOLEZEL, MENGES [39,97]. In den USA hat sich ALLARA mit diesen Problemen beschäftigt [98]. Zur Zeit arbeiten auf diesem Gebiet in Deutschland EHRENSTEIN, BLAESE, SCHMACHTENBERG und andere [47,41,99]. In Russland befassen sich mit den Problemen der Prognostizierung der Lebensdauer von Kunststoffwasserabdichtungen SHILIN, STEPANOVA, ROSENTHAL und andere [31,100].

Die Langzeitbeständigkeit hängt von vielen Faktoren ab, z.B.: Schrumpfen beim Aushärten, Einbauqualität, Art und Zusammensetzung des Polymerstoffes, lokale Bedingungen bzw. verschiedenen Einwirkungen äußerer Faktoren wie beispielsweise Strahlung [31].

Aus diesem Grund sind genaue Prognosen der Betriebsdauer von Wasserabdichtungen unter verschiedenen Bedingungen unmöglich. Es besteht aber die Möglichkeit, die Beständigkeitsdauer durch verschiedene Labormethoden unter genau definierten Bedingungen einzuschätzen. Die Einwirkung verschiedener kritischer Faktoren auf die Zerstörung des Materials und somit die Dauerbeständigkeit von Kunststoffabdichtungen kann man durch Extrapolation der Versuchsergebnisse auf längere Zeiträume bestimmen.

In dem gegebenen Fall versteht man unter Langzeitstabilität die Beständigkeit eines Materials zur Einwirkung bestimmter Einflussfaktoren des Arbeitsmediums, die zur Verkürzung seiner Betriebslebensdauer führen könnten. [41]

Die Veränderung (Zerstörung) der Struktur des Polymerwerkstoffs kann durch verschiedene Einwirkungen verursacht werden: u.a. Sonnenstrahlung, Radioaktivität, mechanische oder chemische Einwirkungen, Temperatur- oder Feuchtigkeitsschwankungen [39,40].

Unter Zerstörung versteht man die irreversible Veränderungen der Struktur oder Zusammensetzung des Polymers [39,47].

Eine der Untersuchungsmethoden für die Dauerbeständigkeit der Kunststoffbauelemente ist die künstliche Alterung. Bei dieser Methode wird ein Probekörper unter Einwirkung von Zerstörungsfaktoren gestellt, deren Intensität mehrfach größer ist, als bei der natürlichen Alterung. Dabei werden die Veränderungen der Eigenschaften des Probekörpers im Laufe der Zeit beobachtet. So kann man die Alterung (Verschlechterung der Eigenschaften) 5 bis 25-fach schneller durchführen. Danach ist es möglich, die Ergebnisse durch die speziellen Methoden auf die natürliche Alterung umzurechnen, wodurch man die Veränderung der Eigenschaften des Werkstoffs in einem Zeitraum einschätzen kann. [43,52]

Im Bereich der Gebäudetechnik wurden Untersuchungen durchgeführt, wobei die Langzeitstabilität der Klebeverbindungen geprüft wurde (Klebstoffe auf Basis von Epoxyd- und Polyurethanharzen) [44]. Die Experimente haben die Beständigkeit der Stoffe gegen realen Umwelteinwirkungen innerhalb von 30 Jahren nachgewiesen. Bei den Experimenten wurden die Proben folgenden Einflüssen unterworfen: höhere Feuchtigkeit, stark-wechselnden zyklischen Temperatureinflüsse, hochintensiver UV-Strahlung und dem Einfluss von oberflächenaktiven Stoffen, die Reinigungsmittel simulieren.

In der Maschinenbaubranche [45] wurden ebenfalls Versuche zur Langzeitstabilität von Maschinenbauelementen aus mit Glasfasern und Kohlefasern armierten Duroplasten (Epoxydharzen und Polyetherharzen) durchgeführt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das Versagen der Probekörper eine Folge der Diffusion der aggressiven Lösungen in das Material war. Die aggressiven Lösungen haben auf die Verstärkungsfasern und die Grenzverbindungen zwischen den Fasern und Polymermatrix eingewirkt. Dies

föhrte zur Entwicklung von Mikrorissen, welche ein noch tieferes Eindringen der L6sungen in den Probek6rper verursachte und im Endeffekt zur kompletten Zerst6rung der Matrix geföhrt hat.

Die Experimente und die Analyse der zerst6rten Faser haben gezeigt, dass die Zerst6rung der faserverstärkten Probek6rper nach den gleichen GesetzmäBigkeiten wie die Zerst6rung der einzelnen Faser geschieht. Daraus kann man folgern, dass die Bauteile aus homogenen Polymerstoffen weniger empfindlich sind, als die faserverstärkten Polymerbauteile unter gleichen Bedingungen.

Schon seit längerer Zeit werden Polyurethan- und Epoxydharze zum Schutz von Stahl- und Betonbauwerken vor Umwelteinwirkungen eingesetzt. Die Beschichtungen aus Kunststoffen zeigen eine hohe Beständigkeit gegenüber klimatischen und schwach chemischen Einflüssen [46]. Die Beständigkeit der Kunststoffbeschichtungen gegenüber verschiedenen Einflussfaktoren (hauptsächlich UV-Strahlung) wurde innerhalb von 10-15 Jahren durch Einsatzerfahrung nachgewiesen.

Im Zeitraum 1994 - 2000 wurde von BLAESE [41] eine Untersuchung der Alterungsmechanismen in Polymerstoffen und eine Einschätzung der Beständigkeitsdauer von Kunststoffelementen von Bauwerken unter der komplexen Einwirkung von schädlichen Umwelteinwirkungen durchgeföhrt. Als Ergebnis wurde eine Reihe von Methoden zur Ermittlung der Betriebsdauer von Polymerbaustoffen vorgeschlagen. Durch diese Methoden kann die Produktionstechnologie der Kunststoffbauelemente modernisiert werden, was dazu föhrt, dass die Dimensionierung verringert werden kann, ohne dem Sicherheits- und Langzeitverhalten des Bauwerks zu schaden.

Die Einwirkung von chemisch-aktiven Medien föhrt zu verschiedenen Veränderungen der Eigenschaften eines Polymers – u.a. Auflockerung, Verminderung der Elastizität, Quellen, was im Endeffekt unter zusätzlicher mechanischer Einwirkung zur Rissentwicklung und zum Verlust der Tragfähigkeit föhren kann. MICHLER [48] hat Rissentwicklungsprozesse in Polymerstoffen untersucht, die zum Versagen einer Konstruktion föhren. Dabei wurde die Rissentwicklung in Kunststoffbauelementen unter Einwirkung des Betriebsmediums durch energetische Ansätze beschrieben.

Die Alterungsprozesse in Schaumpolymerstoffen wurden von BÜTZER [49] analysiert. Es wurden die M6glichkeiten untersucht, Kunststoffschäume im Interieurdesign und in

der Kunst anzuwenden (u.a. zur Möbelherstellung). Dabei wurden Methoden zum Schutz und zur Restaurierung der Werke aus Polyurethanschäumen und Polyestern diskutiert. Als Ergebnis wurden verschiedene Kunststoffbeschichtungen (elastische Beschichtungen auf Polyurethanbasis) zum Schutz vor Einwirkung verschiedener Medien und vor mechanischen Einwirkungen, als auch Reparatur- und Restaurierungsmethoden für Gegenstände aus Kunststoffschäumen vorgeschlagen.

Untersuchungsmethoden für die Korrosionsprozesse in Kunststoffen wurden von EHRENSTEIN beschrieben [37,47]. Der Autor diskutiert einige Analyseverfahren, welche bei Belastungen und Veränderungen in Kunststoffen bei der Einwirkung verschiedener aggressiver Medien angewendet werden können. Auch werden Methoden zur Bestimmung der Zerstörungsgeschwindigkeit von Polymerstoffen in Abhängigkeit von der Intensität verschiedener Einflussfaktoren und der Eigenschaften des Materials gegeben. Dabei wurden Methoden der künstlichen Alterung der Materialien und Methoden zur Bewertung der Ergebnisse von Alterungsuntersuchungen auf mikroskopischem Niveau entwickelt. Durch die Anwendung der entwickelten Methoden kann die Lebensdauer eines Kunststoffes unter definierten Bedingungen abgeschätzt werden.

Im Schwedischen Nationalen Institut der Prüfung und Untersuchung (SP Swedish National Testing and Research Institute) wurden im Auftrag der Firma DeNeef (Belgien) Untersuchungen der Langzeitbeständigkeit eines Polymerinjektionsmaterials in gesättigter NaCl-Lösung bei der Temperatur von 7°C durchgeführt. In den Experimenten der künstlichen Alterung konnte nachgewiesen werden, dass die Polymerinjektionsmaterialien unter Einwirkung von Salzlösung ihre Eigenschaften innerhalb von 110 Jahren gewährleisten können [50].

Als Resümee kann festgestellt werden, dass nach den meisten durchgeführten Untersuchungen, der schädlichste aller Einflussfaktoren für die Polymerstoffe das Sonnenlicht ist [39]. Für den Fall, dass die Polymerinjektionsstoffe zur Wasserabdichtung in Verschlussbauwerken in großer Tiefe genutzt werden, findet von allen obengenannten Zerstörungsfaktoren nur die chemische Einwirkung bei konstanter Temperatur statt. Bei der Anwendung von Kunststoffabdichtungen von Schacht- und Streckenverschlüssen in Salz- und Kalisalzgestein, steht der Kunststoff unter Einwirkung von hochkonzentrierten Salzlösungen aus NaCl, MgSO<sub>4</sub>, MgCl<sub>2</sub>, KCl.



Es gibt verschiedene Meinungen über die Verwendung von Polymerstoffen (u.a. Acryllaten, Polyurethan- und Epoxydharzen) zum Aufbau einer langzeitstabilen Wasserabdichtung von Verschlussbauwerken im Salzgestein. Einerseits bezieht sich die Anwendung von Kunstharzen beim Abdichten darauf, dass die Polymerharze allgemein eine hohe chemische Beständigkeit haben [51]: sie sind nicht durch verdünnte Säuren und Laugen lösbar. Andererseits geschieht, laut verschiedenen Literaturquellen [39,53,54], das Versagen der Wasserabdichtungsmembran aus Polymerstoffen unter Einwirkung der Grundwässer durch die Diffusion von Molekülen der aggressiven Lösungen in den Polymerwerkstoff. Die Verbindungen zwischen den großen Molekülen des Polymers werden dann zerstört. Die Folgen dieses Prozesses sind die Bildung von Rissen und der Verlust der Abdichtungseigenschaften des Materials.

Die Probleme der Langzeitstabilität von Polymerstoffen (insbesondere Injektionsmitteln) bei der Anwendung im Spezialtiefbau, und zwar bei der Anwendung als Wasserabdichtungsmittel bei Verschlussbauwerken (mit einer Lebensdauer von mehr als 100 Jahren) wurden bisher nicht diskutiert. Im Kommuntaltiefbau und Tunnelbau ist eine solche Betriebsdauer für Wasserabdichtungssysteme nicht vorgesehen. Damit war der Nachweis der Langzeitbeständigkeit für solche Materialien nicht notwendig.

Aus den Erfahrungen der Anwendung von Polymerinjektionsmaterialien im Untertagebergbau kann man ableiten, dass eine so langfristige Abdichtung und Verfestigung des Gebirges wegen der hohen Abbaugeschwindigkeiten der Lagerstätten nicht nötig war. In diesem Fall war es wichtiger, dass die Materialien günstig sind, um größere Mengen injizieren zu können. Die genaue Untersuchung des zu verfestigenden Gebirgsmassivs war meistens unmöglich. Ein solcher Mangel an Ausgangsdaten sollte kompensiert werden, indem größere Mengen von Injektionsmaterialien eingepresst wurden. In diesem Zusammenhang wurde die Langzeitbeständigkeit von Polymerinjektionsmitteln nicht diskutiert. Statt dessen wurde mehr auf die Kosten geachtet.

Wie oben beschrieben, wird bei Anwendung der Polymerinjektionsmaterialien unter der Einwirkung von aggressiven chemischen Medien der Polymerstoff infolge von Diffusionsprozessen ~~zwischen dem Medium und dem Werkstoff~~ zerstört. Die Geschwindigkeit von solchen Prozessen hängt von der Temperatur, der Konzentration der Chemikalien und dem Art der Chemikalien (Molekülgröße) und des Polymerstoffes

ab [51,54,55]. Es gibt einige Methoden, die diese Zerstörungsprozesse mathematisch beschreiben können [39,54].

In Laborbedingungen wurden durch die Methoden der künstlichen Alterung von Polymerwerkstoffen [41,56,59] die Diffusionsgeschwindigkeit der aggressiven Lösungen in den Polymerwerkstoff eingeschätzt und die Tiefe des Eindringens der Lösungsmoleküle in die Abdichtung innerhalb der gesamten Betriebsdauer des Verschlussbauwerkes prognostiziert. Ausgehend davon, dass die Eindringtiefe bekannt ist, kann man die Stärke der Schutzschicht des Polymerinjektionsmittels so auswählen, dass die Erstreckung der Polymerschuttschicht bedeutend größer, als die Eindringtiefe der aggressiven Lösungen auch bei der langen Einwirkung von Grundwässern ist.

Der Einfluss des Salzgesteins auf die Alterung des Polymerstoffs an der Grenzfläche zwischen dem Gestein und Injektionsmittel ohne Wasserzufluss kann genauso wie die Langzeitstabilität des von Salzlösungen nicht beeinflussten Materials untersucht werden. [39]

Zur Tauglichkeit für Anwendung in solchen Fällen sind vor allem die Injektionsmaterialien auf Polymerbasis von führenden europäischen Erzeugern zu prüfen.

#### **2.4 Übersicht des Standes der Forschungen im Bereich der Modellierung von Strömungsvorgängen im Gesteinsmassiv**

Zur Bestimmung der Injektionsparameter zur Schaffung einer gleichmäßigen Abdichtung im Kontaktbereich von Verschlussbauwerken wird ein mathematisches Modell über die Verbreitung des Injektionsmittels in der Fuge und im Gebirgskörper benötigt. Das Modell muss die Inhomogenität des Gebirgskörpers darstellen und einen Sicherheitsbeiwert berücksichtigen.

Injektionen ins Gebirgsmassiv zwecks Verbesserung seiner Eigenschaften wurden schon am Anfang 19. Jahrhunderts in Frankreich eingesetzt [57]. Danach hat sich diese Technologie in die ganze Welt verbreitet und es wurden viele Methoden zum Einpressen sowie die dazu gehörigen Injektionsmaterialien entwickelt. In der letzten Zeit wird immer öfter das Einpressen von verschiedenen Materialien (überwiegend synthetisch) in den Beton zur Sanierung von Betonkonstruktionen eingesetzt.

Bis in die jüngste Vergangenheit wurden die technologische Parameter und die Art des Injektionsmittels bei der Durchführung von Injektionsarbeiten aus Erfahrungswerten angenommen. Dieser Fakt ist gleichermaßen für das Bauwesen, das Sanierungsbauwesen, sowie für Tiefbau und Geotechnik zutreffend [57,58].

Die Strömungsmodelle wurden dabei überwiegend für die Ingenieurgeologie und Bodenmechanik entwickelt.

Die existierenden Modelle der Kluftströmung im Gebirgsmassiv oder im Beton kann man in 3 Hauptgruppen aufteilen:

- Dreidimensionale Modelle in einem porösen Medium (analog zu weichen Böden) [60]
- Zweidimensionale Modelle für flachen Klüfte, die in dreidimensionale Modelle umgewandelt werden können
- Eindimensionale Modelle von Strömungsprozessen in Kanälen oder in Röhren, die in 2- oder 3- dimensionalen Netze umgeformt werden können

Eine der ersten Veröffentlichungen im Bereich der Bestimmung von Injektionsparameter beim Einpressen von verschiedenen Materialien in den Boden erschien 1953 von JAHDE [61]. Dabei wurden die Wasseraufnahmekapazität und Wasserabgabefähigkeit des Gebirges bestimmt. Ausgehend von diesen Daten wurde die Durchlässigkeit des Massivs für verschiedene Arten von Flüssigkeiten bestimmt. Dabei wurden die Eigenschaften der einzelnen Teile des Gebirgsmassivs und die Injektionsparameter nicht berücksichtigt

Fragen zur Ermittlung der Parameter von Strömungsprozessen in Böden und klüftigen Gestein wurden von LOMIZE im Jahr 1961 behandelt [62]. Der Autor entwickelte eine mathematische Beschreibung der Filtrationsprozesse in körnigen Böden bzw. radial-symmetrischen Strömungsprozessen in glatten und rauen Klüften. Als Ergebnis wurde das Gesetz des hydraulischen Widerstandes in rauen Rissen aufgestellt. Auch wurde eine Methode zur Ermittlung von Strömungsparametern in verschiedenen Arten von Rissen entwickelt.

POLUBARINOVA-KOCHINA hat in ihrer Veröffentlichung „Zur Theorie der Grundwasserwanderung“ [63] im Jahre 1962 die Grundwasserströmungsgesetze und die Druckverteilung bei verschiedenen Arten vom Strömungen beschrieben.

Später hat LOUIS in seiner Arbeit „Strömungsvorgänge im klüftigen Medien“ [64] von 1967 die vorher beschriebenen Ansätze zur Strömungsmodellierung in verschiedenen Rissarten vertieft.

Eine weitere Veröffentlichung auf diesem Gebiet ist „Zur Theorie der Injektionen“ von MÜLLER-KIRCHENBAUER [65]. Der Autor hat die Strömungsvorgänge beim Einpressen von viskosen Flüssigkeiten in körnige Böden untersucht. Dort wurden theoretische Ansätze zur Parameterbestimmung beim Einpressen für verschiedene Injektionstechnologien bzw. verschiedenen Arten von Flüssigkeiten und Böden gegeben.

RISSLER [66,67] hat 1977 die mathematische Beschreibung der Strömung in Makrorissen, bzw. die Methoden der Abschätzung der Wasserdurchlässigkeit von klüftigem Fels und einzelnen Rissen veröffentlicht. In der Arbeit wurden laminare als auch turbulente Strömungen bzw. Änderungen des Strömungsverlaufs betrachtet. Weiterhin wurde eine Methode zur Bestimmung der Rissöffnungsweite mit einem Wassereinpressversuch entwickelt.

Im Jahr 1985 hat KOPPELBERG [68] Methoden der Parameterbestimmung für Klufftströmungen bzw. Methoden der Abschätzung von hydrologischen Parametern von klüftigem Felsgestein durch einen Reihe von Wassereinpressversuchen diskutiert. Die theoretischen Ansätze beruhen auf den Gesetzen von Lomize, Louis, Blasius und Nikuraze. Weiterhin wurden in der Arbeit Hinweise zur Modellierung von Strömungsprozessen gegeben.

Eine der ersten Untersuchungen, die sich mit der praktischen Nutzung, zur Auswahl und Analyse von Injektionstechnologie und Parameterbestimmung befasste, wurde 1987 von HAESSLER durchgeführt [70]. In dieser Arbeit wurden Fragen der Modellierung von Injektionsprozessen bzw. Prozesse, die im Gebirgsmassiv während der Injektion geschehen, diskutiert.

LEGE und KOLDITZ [60] haben 1996 die Prozesse der Verbreitung von Schadstoffen im Boden und im Felsgestein untersucht. Die Durchlässigkeit des Gebirgsmassivs wurde nicht als Durchlässigkeit von einzelnen Klüften, sondern als eine integrale Durchlässigkeit des Massivs mit einer ermittelten Zahl an Klüften pro Volumeneinheit betrachtet. Dadurch wurde die Durchlässigkeit des klüftigen Felsgesteins, analog zu porösen Böden, als integraler Wert bestimmt.

Weiterhin hat KOLDITZ 1997 in „Stoff- und Wärmetransport“ [71] die Berechnungsmethoden für die Permeabilität von klüftigen Felsgestein, bzw. Methoden, wie die Parameter von einzelnen Klüften in der Berechnung durch die integralen Permeabilitätswerte eines 3D Massivs zu ersetzen sind, beschrieben.

Im Jahre 1992 wurden von GEMMEL [72] die Eigenschaften von Injektionsmitteln und ihr Einfluss auf die Effektivität der Gebirgsverfestigung untersucht. Während den Versuchen wurden die Injektionsarbeiten zur Verfestigung des Gebirgsmassivs im Übergangsbereich zwischen der Strecke und dem Streb bei der untertägigen Kohlegewinnung durchgeführt. Als Ergebnis wurden einige empirische Gesetze entwickelt, bzw. wurden neue analytische Kriterien zur Abschätzung der Effektivität der Gebirgsverfestigung aufgestellt. Die wichtigsten Eigenschaften, von denen die Effektivität der Gebirgsverfestigung abhängt (Eindringfähigkeit, Adhäsion zum Gebirge und Elastizität – Fähigkeit eines Mittels den Deformationen des Gebirgsmassivs zu folgen, ohne die Festigkeit des Systems – Gebirge/Injektionsmaterial zu verringern) wurden gesondert untersucht.

In der Veröffentlichung von BOLESTA und ZUSK [58] wurden auch Methoden zur Auswahl von Injektionsmitteln und technologische Parameter von Injektionsarbeiten bei der Verfestigung des Gebirgsmassivs im Übergangsbereich zwischen der Strecke und dem Streb bei der untertägigen Kohlegewinnung analysiert. Es wurde eine Methode entwickelt und Experimente durchgeführt, welche die Eindringfähigkeiten mineralischer und synthetischer Injektionsmittel bestimmen. Während der Untersuchungen wurde ein Versuchsstand gebaut, der zur Prüfung von Injektionsmöglichkeiten ins Gebirgsmassiv mit bestimmten Rissöffnungsweiten dient.

Im Jahre 1988 begann eine Arbeitsgruppe unter der Leitung von WILDMAN die Untersuchungen zur theoretischen Beschreibung von Injektionsarbeiten im Felsgestein und Beton durchzuführen [73]. Dabei wurde ein Modell zur Ermittlung der Injektionsparameter beim Einpressen unter niedrigem Druck veröffentlicht [74]. Das Injektionsmittel wurde als Bingham'sche Flüssigkeit betrachtet (scheinbare Viskosität). Mit dem Modell kann man die Parameter der radial-symmetrischen Strömung bestimmen, ausgehend von Kenntnissen über Parameter des Injektionsmittel und den Gesteinseigenschaften. Die Strömung wurde dabei als laminar angenommen. In Experimenten zeigte das Modell eine gute Übereinstimmung für verschiedenen Arten von Injektionsmitteln bei niedrigen Drücken.

Im Rahmen dieser Arbeitsgruppe wurde vom GEYMAYR die Strömung der Flüssigkeit im Felsgestein bei Hochdruckinjektionen (80 - 120 bar) untersucht. In Folge der Experimente wurde der Einfluss des Drucks auf die Rissausbreitung während der Injektionsarbeiten beobachtet. Es wurde Zusammenhänge formuliert, die den Maximalwert des Injektionsdrucks beschreiben, bei dem die Risse stabil bleiben und sich nicht erweitern. Das gemeinsam mit BABAN entwickelte iteratives Modell [75] beschreibt die Klufftströmung und die Druckverteilung im Injektionsmittel, bzw. die mit dem Einpressen verbundenen Divergenzen des Gebirgsmassivs und die Umverteilung des Drucks bei geringen Divergenzen.

In einer Arbeit von KONIETZKY [76] wurden mechanisch-hydraulische Vorgänge im Klüftgestein diskutiert. Es wurde eine komplexe Methode zur Modellierung von mechanisch-hydraulischen Prozessen im klüftigen Gestein vorgeschlagen. Diese Methode erlaubt 2D und 3D Darstellungen der Prozesse im Gestein, bei der alle mikroskopische Änderungen während dieser Vorgänge berücksichtigt werden.

Anweisungen zur Bestimmung von hydraulischen Parametern im Gebirgsmassiv wurden von RIESSLER und KUTZNER [67, 77] veröffentlicht. Allerdings beruhen diese Methoden auf Wassereinpressversuchen. Deswegen ist es unmöglich, diese Methoden bei geringen Durchlässigkeiten anzuwenden. Weiterhin bekommt man als Ergebnis einen mittleren integralen Wert, der keine Informationen über die realen Risscharakteristika gibt. Solche Methoden sind effektiv für Injektionsarbeiten größerer Volumina in hochdurchlässigen Böden, aber uneffektiv für kleinere Volumina und Gebirge mit geringer Durchlässigkeit.

In der Arbeit von KRAKAU [69] wurde das Eindringvermögen von verschiedenen viskosen Flüssigkeiten ins Gebirgsmassiv untersucht. Die Autorin hat einige Zusammenhänge zur Berechnung der Eindringparameter von Bitumen in Klüfte hergeleitet. Allerdings wurde die Rauigkeit von Klüften nicht berücksichtigt. Zudem ist die Methode für feine Risse nicht anwendbar.

Verschiedene Untersuchungen [5, 79] zeigen, dass Salzgestein mit feinen Rissen im konturnahen Bereich und der verwitterte Carnallitstoß als poröses Medium zu betrachten sind. Es ist in diesem Fall schwer, die Strömungsvorgänge als Strömung in einer einzelnen Kluft zu beschreiben, um danach eine solche eindimensionale Strömung in ein 3D-Netz umzuwandeln. Eine bessere Korrelation zeigt die Modellierung des Gebirgsmassivs, mit einer großen Anzahl von regelmäßig verteilten feinen Rissen, als

ein poröses Medium mit einer anisotropen Durchlässigkeit. Diese Betrachtungsweise setzt sich bei der Modellentwicklung immer mehr durch, weil ein solches Modell weniger unbekannte Ausgangsparameter enthält, welche aus den Vorversuchen bestimmt werden müssen. Alle Parameter des Massivs werden in einem integralen Wert zusammengefasst – der Permeabilität. Mit diesem Wert und den geometrischen Strömungsparametern, kann die Geschwindigkeit und die Reichweite der Strömung bestimmt werden.

WITTKÉ [5] betrachtet den konturnahen Bereich des Salzgesteins als poröses Medium mit konstanter Porosität. In seinen vorgestellten Modell werden der Einfluss der Kapillarität, die Deformation der Gesteinsmatrix und der Porenluftwiderstand während der Strömung in Betracht genommen. Das Modell bestimmt die Ausbreitung der Flüssigkeit im Salzgestein unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Flüssigkeit, dem Druck und den gebirgsmechanischen Parametern des Gebirges.

Auf analogen Prinzipien basieren auch einige weitere Modelle [78,80,81]. Alle diese Modelle betrachten das Gesteinsmassiv als poröses Medium, wobei verschiedene Gruppen von Strömungswiderständen berücksichtigt werden (Elastizität der Kapillarwände, Benetzung, hydraulischer Widerstand usw.).

Einerseits vereinfacht eine solche Betrachtungsweise die Parameterbestimmung eines quasistationären Vorgangs bei großen Strömungsvolumina, andererseits wird dadurch die Genauigkeit der Berechnung von Strömungen in kleinen Volumina stark beeinflusst. Das ist auf die unbekannte Größe der durchströmten Fläche zurückzuführen.

Alle oben beschriebenen Modelle und Berechnungsmethoden (Modellierung als Klüftströmung, bzw. als poröses Medium) betrachten die Strömungsvorgänge als quasistationären Prozess. Diese Annahmen sind im Fall des Einpressens von kleinen Mengen des Injektionsmittels in die Auflockerungszone zwischen dem Gebirgsmassiv und dem Bauwerk nicht absolut zutreffend, da es sich in diesem Fall um eine Bewegung der Verbreitungsfront der Flüssigkeit in Abhängigkeit von der Zeit handelt. Weiterhin gibt es bei allen obengenannten Methoden bestimmte Schwierigkeiten, die Parameter der zu injizierenden Risse und des Gebirges zu bestimmen.

In der vorliegenden Arbeit sollen die Parameter der Strömungsvorgänge mit einem neuen Modell bestimmt werden, welches auf den Methoden der Modellentwicklung physikalischer Prozesse, die von VENIKOV, NASONOV, SEDOV, GUCHMAN [82],

LOMIZE, LOUIS, RIESSLER, MÜLLER-KIRCHENBAUER entwickelt wurden [65], bzw. auf Erfahrungen der mathematischen Modellierung im Bergbau basieren [83].

## **2.5 Stand der Forschung über die konturnahe Auflockerungszone im Salz- und Kalisalzgestein**

Im Jahr 2004 wurden in Kalisalzbergwerk Asse [8] komplexe Untersuchungen der konturnahen Zone des Gebirgsmassivs durchgeführt. Im Laufe der Untersuchungen wurden geoelektrische Tests, Gasdurchlässigkeitsmessungen in verschiedenen Tiefen, bzw. gebirgsmechanischen Tests von Gesteinsproben aus dem konturnahen Bereich durchgeführt.

Die Analyse hat die Existenz einer durchlässigen Zone mit geringerer Festigkeit gezeigt. Die Zone beträgt bis zu 1,5 m in der Sohle und bis zu 0,5 m in den Stößen bzw. der Firste. Dieser Effekt wird von Mikrorissen im Gebirge verursacht.

Die Permeabilitätswerte in dieser Zone betragen  $10^{-16}$  -  $10^{-15}$  m<sup>2</sup>, was die Zone stark vom Gesteinsmassiv im ursprünglichen Zustand mit der Permeabilität  $10^{-21}$  m<sup>2</sup> unterscheidet. Es ist anzumerken, dass an den Stellen, wo während des Vortriebs eine starke Erwärmung des Gebirges geschah, die Rissbildung stärker ausgeprägt ist und dementsprechend die Durchlässigkeit erhöht ist.

Eine andere Untersuchung wurde in der konturnahen Zone einer im Jahr 1914 in 700 m Teufe aufgefahrenen Strecke durchgeführt. Die Strecke war mit Guß-Tübbingem ausgebaut. Permeabilitätsmessungen haben eine Verringerung der Durchlässigkeit auf  $10^{-18}$  -  $10^{-20}$  m<sup>2</sup> gezeigt. Auch diese Werte sind gegenüber den ursprünglichen Werten erhöht. Die mikroskopische Untersuchung der Proben aus diesem Gesteinsmassiv hat gezeigt, dass die Verringerung der Durchlässigkeit durch das Zudrücken der Risse durch den Gebirgsdruck verursacht wurde. [95]

Die Änderung der Festigkeitsparameter des Salzgesteins im konturnahen Bereich wurde auch von Spezialisten im Bereich des Baus unterirdischer Gasspeicher durchgeführt. Im Jahr 1999 haben BOCHKAREVA und SMIRNOV [84] Gesteinsproben aus vielen Gasspeichern verschiedener Bauart untersucht. In Gasspeichern, die durch Auslaugen errichtet wurden, hat sich die Durchlässigkeit des Gebirges im Konturbereich um das 10 bis 100 fache erhöht. Bei Sprengarbeiten erhöht sich die Durchlässigkeit um das  $10^5$ - bis  $10^6$ - fache.



Im April 2004 wurden von der Firma IBEWA (Freiberg) Messungen in der konturnahen Zone im Kalisalz der Grube Teutschenthal durchgeführt. Die Analyse zeigte die Zunahme der Durchlässigkeit von  $10^{-20}$  -  $10^{-22}$  m<sup>2</sup> (ungestörtes Gebirge) auf  $10^{-13}$  m<sup>2</sup> im konturnahen Bereich. Die Mächtigkeit der Auflockerungszone betrug 5 cm bis 100 cm. Den größten Einfluss auf die Bildung der Auflockerungszone hatte dabei die Verwitterung des Carnallitits. Kurz nach dem Berauben des Stoßes bildete sich die Auflockerungszone wieder aus. Die Mächtigkeit der Auflockerungszone bleibt aber dann lange Zeit konstant (die Messungen nach 3 bzw. 90 Tage zeigten die gleichen Ergebnisse). [103]

Die von K-UTEC GmbH (Sondershausen) durchgeführten Laboruntersuchungen der Kontaktfläche zwischen MgO-Beton und Carnallit (Gasdurchlässigkeitsmessungen, Scher- und Zugversuche) haben ergeben, dass der relativ feste Verbund doch durchlässig ist. In den Kontaktflächen wurden mit Gaseinpressversuchen Permeabilitäten von  $10^{-13}$  m<sup>2</sup> gemessen. [85]

Laut den in den Jahren 2002 bis 2003 in Teutschenthal durchgeführten Untersuchungen der IFG GmbH (Leipzig), nimmt die Durchlässigkeit bis zur Tiefe von 0,7 m von  $10^{-16}$  auf  $10^{-20}$  m<sup>2</sup> ab. Danach bleibt sie konstant. [86]

Die Beobachtung der Verwitterung des Carnallitits hat ergeben, dass zuerst Tachyhydrit, der am sensibelsten zur Luftfeuchtigkeit ist, zerfließt [87]. Der Zusammenhang zwischen der kritischen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur von Tachyhydrit ist in der Abb.2 a dargestellt. Beim weiteren Erhöhen der Luftfeuchtigkeit zerfließt dann der Carnallit (Abb.2 b). Die Temperatur-Feuchtigkeitsbedingungen in der Kaligrube Teutschenthal, wo die Abdichtungstechnologie geprüft wird, liegen bei 22-28°C bei 40-60% relativer Feuchtigkeit. Unter diesen Bedingungen ist das Zerfließen von Tachyhydrit nicht zu vermeiden. Die weitere Auflockerung passiert wegen chemischer Reaktionen im Gebirge infolge der Befeuchtung durch den zerfließenden Tachyhydrit. Dementsprechend steht die Intensität der Auflockerung im Zusammenhang mit dem Tachyhydritgehalt des Gebirges.

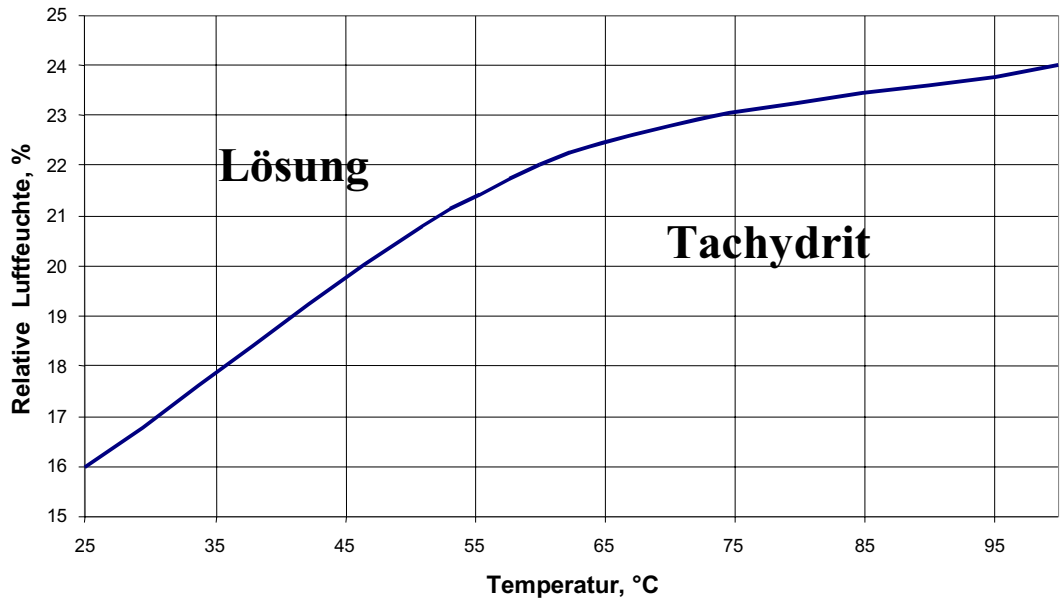


Abb. 2 a Sättigungsfeuchten von Tachydril [87]

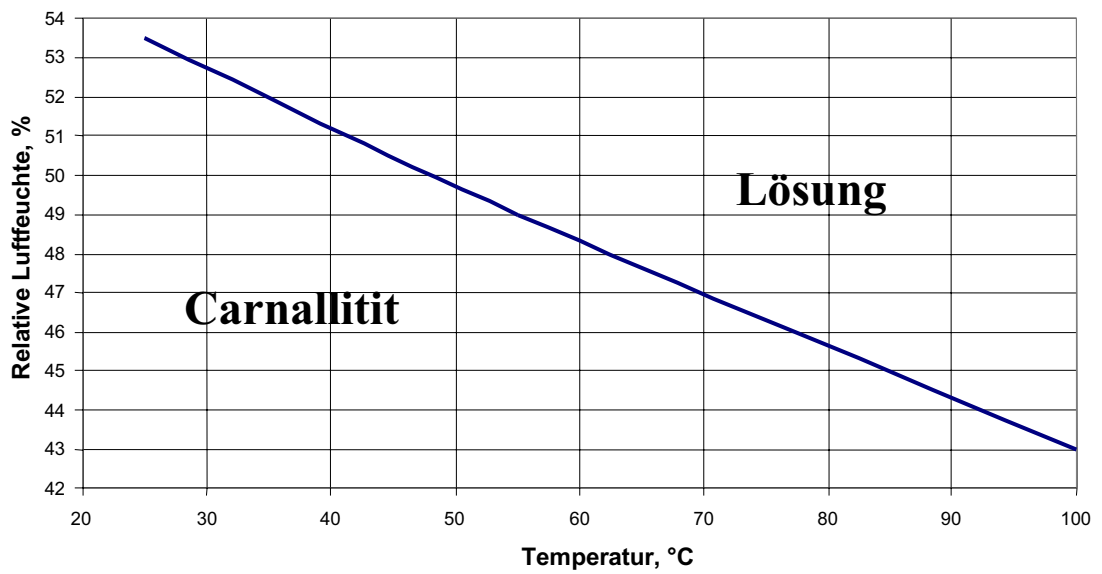


Abb. 2 b Sättigungsfeuchten von Carnallit [87]

## 2.6 Hauptaufgaben der Forschung

Auf Basis der Literaturrecherche für das Thema der Dissertationsarbeit stellen sich die folgenden wesentlichen Forschungsaufgaben:

- Entwicklung einer Technologie von zusätzlichen Maßnahmen zur Verstärkung der Isolierungseigenschaften eines Verschlussbauwerkes in Salz- oder Kalisalzgestein durch Kunststoffinjektionen;
- Begründung der Materialauswahl zur Durchführung der Injektionsarbeiten; Untersuchung der Eigenschaften der Kunststoffinjektionsmaterialien zur Auswahl der geeigneten Mittel für Injektionen bei kleinen Rissöffnungsweiten (<0.3 mm) unter Einwirkung von hochkonzentrierten Salzlösungen;
- Entwicklung von Methoden zur Prognose der Lebensdauer der Wasserabdichtung eines Verschlussbauwerkes;
- Untersuchung der Strömungsverhältnisse eines Injektionsmittels in der Fuge zwischen MgO-Beton (Verschlussbauwerk) und Carnallit; Mathematische Modellierung der Verbreitung eines Injektionsmittels;
- Entwicklung von Maßnahmen zum Schutz des Gebirgsmassivs vor dem Bau des Verschlussbauwerkes;
- Optimierung der komplexen Technologie des Baus eines Verschlussbauwerkes unter Berücksichtigung zusätzlicher Maßnahmen für den vorläufigen Schutz des Gebirges und nachfolgender Abdichtungsmaßnahmen;

Als Ergebnis der Arbeit werden Vorschläge zur Optimierung der Bautechnologie von Verschlussbauwerken im Salz- und Kalisalzgestein erarbeitet.

### 3 Übersicht von Methoden zur Abdichtung der Auflockerungszone - Vorläufige Untersuchungen.

#### 3.1 Übersicht von Methoden zur Abdichtung der Auflockerungszone

Allgemein kann folgendes Schema der Hohlräume zur Endlagerung von Abfällen verwendet werden (Abb.3).

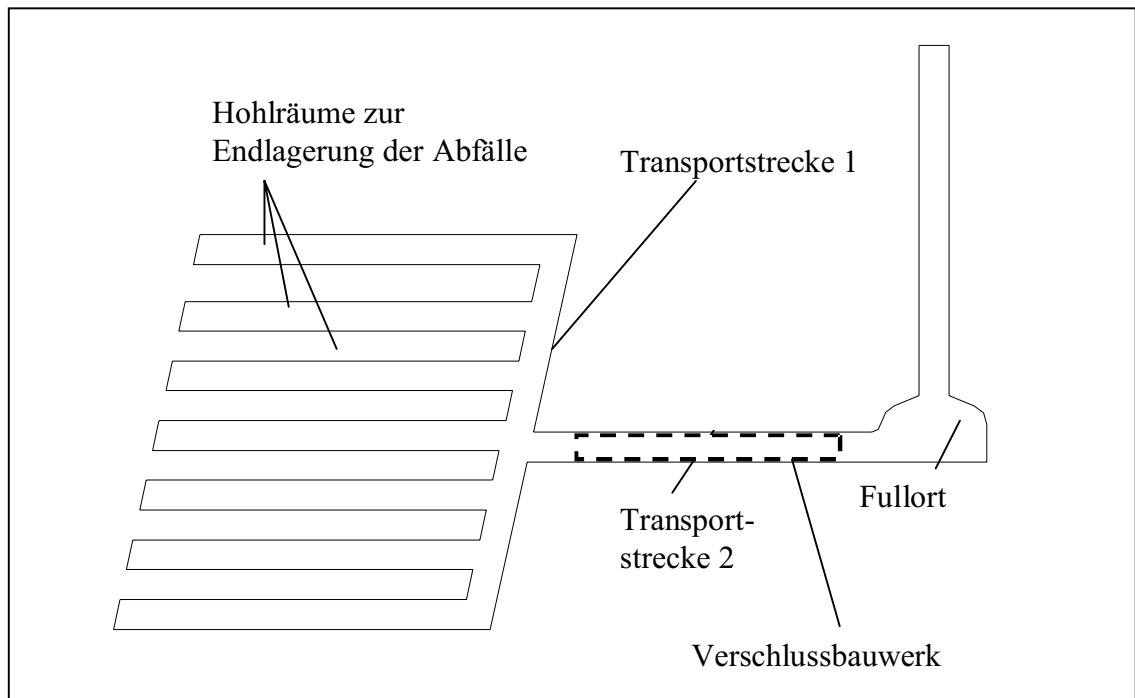


Abb.3: Schema der Hohlräume zur Endlagerung von Abfällen

Am besten zur Abdichtung der Endlagerung wäre der Bau des Verschlussbauwerkes in der Transportstrecke 2 (nach der Verfüllung aller Hohlräume und der Transportstrecke 1).

Aus der Literaturrecherche wurde festgestellt, dass die Mächtigkeit der Auflockerungszone in kurzer Zeit zunimmt und dann lange Zeit konstant bleibt. Diese Erscheinung wird auch durch die Hygroskopizität der Kalisalze im Gebirge (z.B. Grube Teutschenthal) verursacht, welche die Luftfeuchtigkeit aufnimmt. Dies verursacht weitere chemischen Reaktionen.

Die Maßnahmen, die in dieser Arbeit untersucht werden, sollen an einem Teil eines mehrschichtigen Verschlussbauwerkes aus Magnesia-Beton angewendet werden.

Die Betonierung wird als Ortbeton oder Spritzbeton eingebracht. Das Spritzbetonverfahren verlangt zwar mehr Zeit zur Betonierung, ermöglicht aber eine gleichmäßigere Wärmeentwicklung und damit geringere Temperaturen an der Gebirgskontur.

Alle Methoden zur Abdichtung der Auflockerungszone können prinzipiell in zwei Gruppen eingeteilt werden:

1) Maßnahmen zum Schutz und zur Abdichtung des Gebirges vor dem Bau des Verschlussbauwerkes:

- Steuerung der Temperatur- und Feuchtigkeitsparameter des Grubenwetters zum Verhindern des Zerfließens des Carnallitits
- Verwendung von Schutzbeschichtungen zur Verzögerung der Wasseraufnahme des Gebirges
- Einpressen von Injektionsmitteln zur Verfestigung und Abdichtung des Gebirgsmassivs vor dem Bau des Verschlussbauwerkes (Abb. 4 a)
- Verhinderung der Kapillarströmung durch den Einbau von Schlitzten und Einschnitten (Abb. 4 b)

2) Maßnahmen zur Abdichtung der relativ hochdurchlässigen Zone im Kontaktbereich zwischen dem Gebirgsschoss und dem Bauwerk nach dem Bau des Verschlussbauwerkes:

- Abdichtung der Fuge zwischen dem Gebirge und Bauwerk, bzw. der Auflockerungszone durch Injektionen von Polymerstoffen (Abb. 4 c)

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden alle diese Methoden untersucht.

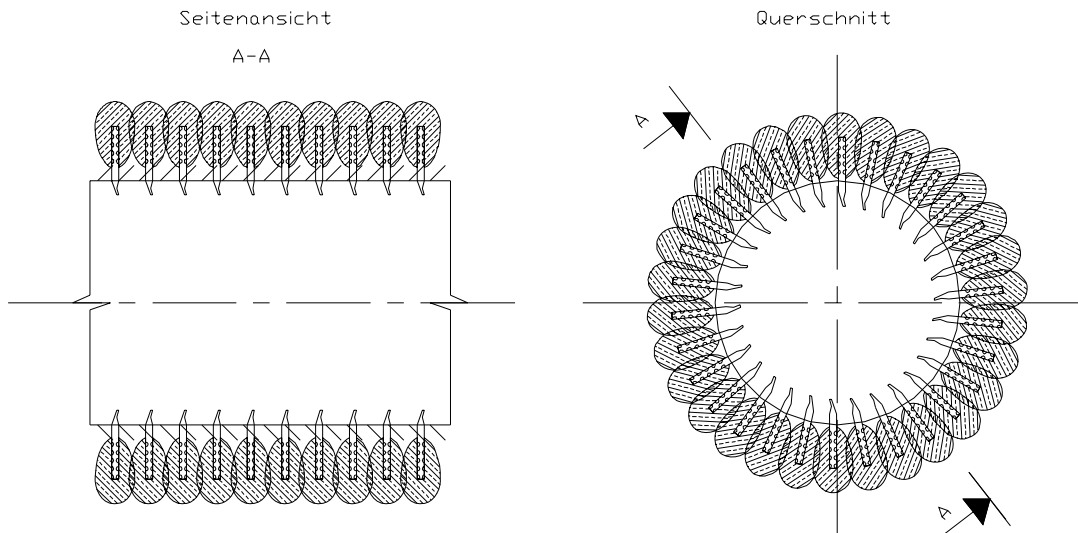


Abb. 4 a: Einpressen von Injektionsmitteln zur Verfestigung und Abdichtung des Gebirgsmassivs vor dem Bau des Verschlussbauwerkes

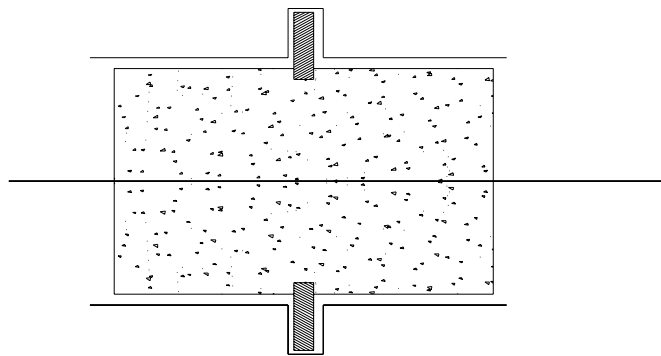


Abb. 4 b: Verhinderung von Kapillarströmungen durch die Erstellung von Schlitzen und Einschnitten

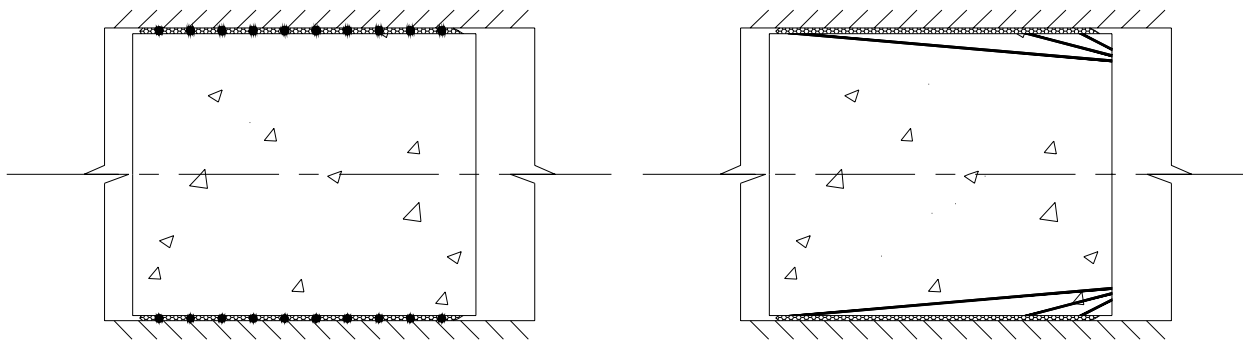


Abb. 4 c: Abdichtung der Fuge zwischen dem Gebirge und Bauwerk, bzw. der Auflockerungszone durch Injektionen von Polymerstoffen

### **3.2 Experimente zur Verbesserung der Eigenschaften des Gebirges vor dem Bau des Verschlussbauwerkes**

#### **3.2.1 Einpressen von Injektionsmitteln zur Verfestigung und Abdichtung des Gebirgsmassivs vor dem Bau des Verschlussbauwerkes**

Im Januar 2005 wurden die Einpressversuche des niedrigviskosen Polymerinjektionsmittels „MC-2300NV“ (Fa. MC-Bauchemie) in die Auflockerungszone des Carnallitmassivs in der Grube Teutschenthal durchgeführt. Das Einpressen wurde mit einem Druck von 10 bis 120 Bar durchgeführt. Zum Einpressen wurde ein 10 cm langer metalischer Packer verwendet. Die Bohrlöcher zum Einpressen wurden 20 cm tief gebohrt. Daher wurde das Einpressen ins Gebirgsmassiv im Abschnitt des Bohrlochs in 10-20 cm Tiefe durchgeführt. (Abb.5)



Abb.5: Bohrlöcher zum Einpressen des Injektionsmittel

Im Laufe des Versuchs wurde der Druck bis zu einem bestimmten Wert erhöht und dann der Druckdruckabfall im Bohrloch gemessen.

Während des Versuchs wurde bei einem Druck unter 40 Bar keine Druckänderung (also kein Eindringen des Injektionsmittels ) beobachtet. Beim Erhöhen des Drucks gab es mehrmals einen raschen Druckabfall, was auf Hydrofrackerscheinungen zurückzuführen ist. Dabei geschah entweder eine Zerstörung des Gebirgsmassivs senkrecht zum Boden oder ein Abreißen von einem konturnahen Teil des Gebirges von der darunterliegenden Schicht.

Die Versuchsergebnisse zeigten offensichtlich, dass das Problem der Abdichtung durch Einpressen von Polymerinjektionsmitteln ins Gebirge (in poröse Körper des Gesteins in der Auflockerungszone) konventionell (wie bei der Bodenverfestigung oder Betonsanierung) nicht zu lösen ist.

Wie schon in der Literaturlauswertung beschrieben, sind die Risse in der Auflockerungszone des Salz- der Kalisalzgesteins nicht als Makrorisse zu betrachten, weil die Auflockerungszone ein dichter Körper mit einer großen Zahl an Mikrorissen (Öffnungsweite 0,001-0,01 mm ) ist. In diesem Fall können die Strömungsvorgänge in diesem Bereich wie im porösen Medium beschrieben werden [5,78]. Wie schon früher beschrieben, ist die Permeabilität in der Auflockerungszone ca.  $10^{-14}$  -  $10^{-15}$  m<sup>2</sup>. Unter solchen Bedingungen ist das Einpressen auch von niedrigviskosen Materialien (dynamische Viskosität ca. 40 - 70 mPa·s) ins Gebirgsmassiv nicht möglich, weil bei einer so geringen Permeabilität die Filtration sehr langsam passiert. Deswegen ist es unmöglich, eine verfestigte Schicht (wie auf Abb.4) herzustellen.

### **3.2.2 Steuerung der Temperatur-Feuchtigkeitsparameter des Grubenwetters zum Verhindern des Zerfließens der hygroskopischen Salze**

Die Lagerungsversuche in der Klimakammer haben gezeigt, dass es sogar bei der Lagerung in einem geschlossenen Raum ohne durchgehende Belüftung schwer ist, die richtigen Bedingungen einzuhalten, um Tachydril im unzersetzten bzw. trockenen Zustand zu halten.

Der Versuch wurde im Labor von IFG GmbH (Leipzig) durchgeführt. Bei einer Temperatur von +60 - +70°C wurde eine relative Feuchtigkeit von 22-23% erzeugt.



Dabei waren kleine Schwankungen der klimatischen Parameter wegen der Undichtheit des Raumes zulässig.

Nach einem Monat der Lagerung entstand auf den Proben eine offensichtliche Porosität wegen des Überganges des Tachydrites in den flüssigen Zustand.

Diese Versuche haben gezeigt, dass die Anpassung des Grubenwetters in einer Strecke mit durchgehender Bewetterung nicht möglich ist, da dort die relative Feuchtigkeit im Bereich von 15 - 20% nicht eingehalten werden kann.

Aufgrund dessen wurde entschieden, weitere Versuche zum Schutz des Gebirgsmassivs durch die Anwendung von Kunststoffbeschichtungen in Kombination mit der Anpassung der Grubenwetter durchzuführen.

Dabei können die Wetterparameter nur in engen Bereichen beeinflusst werden, weil ein starke Veränderung dieser Werte sehr hohe Kosten verursachen würde. Die Maßnahmen zur Erwärmung und Entfeuchtung der Wetter würden einen enormen Energieaufwand verursachen, weil diese Maßnahmen während der ganzen Betriebsdauer (ab 1 Jahr) der zu schützenden Strecke durchgeführt werden müssten.

### **3.2.3 Anwendung der Schutzbeschichtungen**

In den Experimenten konnte die Effektivität der untersuchten Schutzbeschichtungen nachgewiesen werden.

Zur Vereinfachung der Prognostizierung der Betriebsdauer der Abdichtung unter Einwirkung von salinaren Medien wurde entschieden, das gleiche Injektionsmittel zum Beschichten und Einpressen anzuwenden. Diese Entscheidung ist dadurch verursacht, dass die Materialkombinationen den Nachweis der Langzeitstabilität erschweren.

Im Laufe der Experimenten wurden Injektions- und Beschichtungsmittel von führenden europäischen Herstellern getestet.

Da die Verschlussbauwerken in einer Richtstrecke eingebaut werden, die das Feld mit den Einlagerungskammern verbindet, ist die Strecke vor den Baumaßnahmen lange Zeit im Betrieb. Als Maßnahmen zum Schutz der konturnahen Zone vor Verwitterung wurden zwei Varianten für den Schutz der Stoßoberfläche erarbeitet:

- Beschichtung des Stoßes zum Schutz des Gebirges im Laufe der ganzen Betriebsdauer der Strecke
- Berauben des Stoßes vor dem Einrichten des Verschlussbauwerkes auf 50 – 70 cm Tiefe und nachfolgende Beschichtung mit einem Polymermaterial zum Schutz für die kurze Zeit, bevor das Verschlussbauwerk errichtet wird.

Aus diesen zwei Varianten wurde die Stoßberaubung ausgewählt, da bei dieser Methode sich das Gebirge beim gleichen Aufwand besser und sicher schützen lässt.

Da zur Durchführung der Injektionsarbeiten und zur Beschichtung die gleichen Materialien verwendet werden, werden die Injektionsmittel der führenden Hersteller (MC-Bauchemie, DeNeef, Tricosal, Carbotech-Minova) als Beschichtung getestet.

Die Untersuchungen der Materialien wurden unter Laborbedingungen (bei normalen Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen) als auch in situ (in der Grube Teutschenthal) durchgeführt.

### **In-situ Versuche**

Zum Testen der Schutzeigenschaften der Materialien wurde in der Grube Teutschenthal in einer Versuchsstrecke an den Stößen eine Fläche 50x50 cm beraubt, dabei wurden 5-7 cm verwittertes Gestein mit einem Abbauhammer entfernt (Abb.6). Zur Durchführung der Untersuchungen wurde ein Bereich mit großem Tachydrithalt (>10%) ausgewählt.

Auf einem Teil der Oberflächen wurden die Beschichtungsmaterialien sofort nach dem Berauben aufgetragen. Die andere Oberflächen wurden erst nach 24 Stunden mit den Polymerstoffen beschichtet.

Beim Auftragen der Beschichtungsmittel wurden folgende Effekte beobachtet:

- alle Mittel (außer Tricosal IH81) haben eine geringe Viskosität, so dass sich die Materialien auch mit einem Zerstäuber luftlos auftragen lassen;
- die Materialien von MC-Bauchemie brauchen in Berührung mit Salz eine längere Zeit zur Polymerisierung, als im Labor;
- die hydroaktiven Materialien von DeNeef bilden sehr schnell eine Schaumschicht, wobei sie die Feuchte aus dem Gebirge und der Luft ziehen;

- das stärker viskose Material Tricosal IH81 hat frühere als die anderen, nicht-hydroaktiven Materialien, polymerisiert und eine feste Schicht gebildet;



Abb.6: In-situ Prüfung der Beschichtungen

Die Sichtkontrolle nach 2 Wochen brachte folgende Ergebnisse: siehe Tab. 2.1. und 2.2.

Beschichtungsmittel	Abtrennbarkeit der Beschichtung	Beschaffenheit des Stoßes nach dem Versuch	Anmerkungen
Tricosal IH20	Nicht abtrennbar	feucht*	das Mittel ist nicht fest geworden
MC-Bauchemie MC-2300 Plus	schwer abtrennbar (als ein fester Film)	feucht	
MC-Bauchemie MC-2300 NV	sehr schwer abtrennbar, in kleinen Teilchen	feucht	
Tricosal IH81	sehr schwer abtrennbar, in kleinen Teilchen	trocken	
DeNeef Denepox 40	sehr dünne Schicht, nicht abtrennbar	feucht	
DeNeef HA Soil	schwer abtrennbar, in kleinen Teilchen	feucht	
DeNeef HA Cut CFL	leicht abtrennbar als ein fester Film	feucht*	

\* - unter der Beschichtung bleiben kleine gelbe Flecken. Das weist darauf hin, dass Tachydrit nicht verwitterte

Tab. 3.1: Sofort nach der Beraubung aufgetragene Beschichtungen

<b>Beschichtungsmittel</b>	<b>Abtrennbarkeit der Beschichtung</b>	<b>Beschaffenheit des Stoßes nach dem Versuch</b>	<b>Anmerkungen</b>
Tricosal IH20	- leichtabkratzbar mit der Oberflächenschicht des Gebirgstoßes - die Härte des Gebirge ist stark abgenommen.	feucht	Die Zusammensetzung ist nicht hart geworden
MC-Bauchemie MC-2300 Plus	schwer abkratzbar, nur in kleinen Teilen	trocken	
MC-Bauchemie MC-2300 NV	leicht abtrennbar als ein fester Film	feucht	
Tricosal IH81	leicht abkratzbar, teilweise abtrennbar als ein Film	feucht	
DeNeef Denepox 40	nicht abtrennbar, schwer abkratzbar	feucht	Der Stoß hat die Härte behalten, das Mittel ist Tief eingedrungen
DeNeef HA Soil	schwer abtrennbar, in kleinen Teilchen	trocken	
DeNeef HA Cut CFL	leicht abtrennbar als ein fester Film	wenig feucht	

Tab 3.2: Auf den nassen Stoß (24 Stunden nach der Beraubung) aufgetragene Beschichtungen

Die Feuchtigkeit des Stoßes kann dadurch verursacht werden, dass einige Komponenten der Polymermaterialien oder Reaktionsprodukte ins Gebirge eindringen. Weiterhin wurde bemerkt, dass unter der Schicht von Tricosal IH81 die Oberfläche trocken geblieben ist. Das könnte darauf hinweisen, dass die Verwitterung und Befeuchtung der Oberfläche geschah, bevor die Materialien polymerisierten.

### **Laborversuche**

Im nächsten Versuch zur Quantifizierung der Schutzeigenschaften (Fähigkeit den Zutritt von Luftfeuchte zum Gebirge zu verhindern) verschiedener Materialien wurde die Intensität der Wasseraufnahme von Proben mit verschiedenen Beschichtungen bestimmt. Die beschichtete Proben wurden bei bestimmten Klimabedingungen gelagert und die Gewichtsänderung im Laufe der Zeit wurde gemessen.

Aus Bohrkernen wurden scheibenförmige Probekörper von 15 mm Höhe und 70 mm Durchmesser angefertigt. Die Probekörper wurden mit verschiedenen Polymerstoffen beschichtet (Abb. 7). Danach wurde regelmäßig zwei Mal täglich über eine längere Zeit die Gewichtsänderung kontrolliert.



Abb. 7: Lagerungsversuche bei den beschichteten Probekörper (links – unbeschichtet, rechts – beschichtet mit Denepox 40 nach der Lagerung innerhalb von 7 Tage)

Die relative Gewichtsänderung der mit verschiedenen Materialien beschichteten Proben bei verschiedenen klimatischen Bedingungen ist in der Abb. 8-10 dargestellt.

Wie in Abb.8 und Tabelle 2.3 zu sehen ist, wurden die Proben am Anfang bei einer Temperatur von 15°C, und einer relativen Feuchtigkeit von 35 – 50 % gelagert. Unter solchen Bedingungen zerfließt Tachydrit, während Carnallit fest bleibt. Danach wurden die Lagerungsbedingungen auf eine Temperatur von 10 - 11°C, und eine relative Feuchtigkeit von 55 – 60 % verändert. In diesem Fall begann das Zerfließen von Carnallit, was durch die Erhöhung der Intensität der Wasseraufnahme verursacht ist.

Weiterhin wurde ein Experiment durchgeführt, bei dem die Schutzbeschichtungen auf schon verwitterte Probekörper (nach 24 Stunden Lagerung bei einer Temperatur 10 - 11°C, und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 55 – 60 %) aufgetragen wurden. Die

Messergebnisse für die Wasseraufnahme der beschichteten Probekörper bei einer Temperatur von 10 – 11°C, und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 55 – 60 % sind in der Abb. 9 und Tab. 2.4 dargestellt. In der Abb. 9 ist dabei ein Bereich zu sehen, wo die relative Wasseraufnahme abnimmt. Das ist auf die drastische Verringerung der relativen Luftfeuchtigkeit auf bis 45% zurückzuführen. Unter solchen Bedingungen beginnt der Carnallit, die Feuchtigkeit in die Luft abzugeben.

Weiterhin wurde ein Versuch zur vorläufigen thermischen Behandlung der Probekörper durchgeführt, um danach die Beschichtungen auf eine trockene Oberfläche aufzutragen. Während der thermischen Behandlung wurden die Probekörper auf 90 – 100°C aufgeheizt. Die Erwärmung wurde bis zum Austrocknen der Oberfläche durchgeführt.

Der Vergleich der Messergebnisse der Wasseraufnahme von behandelten und nicht-behandelten Probekörpern ist in der Abb. 10 dargestellt. Die Werte für die Wasseraufnahme der behandelten Probekörper sind in Tabelle 2.5 angegeben.

Wie aus den Tabellen zu sehen ist, hat die relative Wasseraufnahme bei wärmebehandelten Proben um das ca. 3-fache zugenommen. Infolgedessen kann diese Methode nicht zum Schutz des Gebirge vor Verwitterung angewendet werden. Die Wärmebehandlung kann daher auch nicht als Vorbereitung zur Beschichtung verwendet werden.

Abweichend dazu wurde von SITZ [101] ein Verfahren vorgeschlagen, nachdem durch eine Erwärmung des Carnallitstoßes auf ca. 250°C die Haftung von Bitumen verbessert werden sollte. Dieser Effekt beruht auf einer schnellen Entwässerung und oberflächlichen Zerstörung des Carnallitits mit der Bildung von HCl und einer Oberflächenschicht aus MgO. Dieses Verfahren ist allerdings für dauerhafte Beschichtungen nicht geeignet, da die MgO-Schicht ungleichmäßig oder durchlässig sein kann.

Bei diesen Versuchen wurden die besten Ergebnisse beim Auftragen auf trockene und naße Probekörper mit den Injektionsmitteln Denepox 40 (Fa. DeNeef) und MC-2300 von MC-Bauchemie erzielt.

Lagerungsfrist, h	Datum	Tricosal IH20	MC-2300 Plus	MC-2300 NV	Tricosal IH81	Denepox 40	DeNeef HA Soil	HA Cut CFL	Unbeschichtet
0	03.03.2006	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
17	04.03.2006	0,10%	0,15%	0,11%	0,01%	0,03%	0,12%	0,02%	0,08%
24	04.03.2006	0,13%	0,28%	0,23%	0,02%	0,07%	0,20%	0,04%	1,48%
46	05.03.2006	0,26%	0,45%	0,38%	0,04%	0,10%	0,32%	0,07%	1,48%
62	06.03.2006	0,39%	0,63%	0,43%	0,05%	0,11%	0,43%	0,08%	2,17%
65	06.03.2006	0,52%	0,84%	0,57%	0,20%	0,15%	0,58%	0,10%	2,98%
83	07.03.2006	0,52%	0,84%	0,57%	0,20%	0,15%	0,58%	0,10%	3,06%
84	07.03.2006	0,52%	0,84%	0,57%	0,20%	0,15%	0,58%	0,10%	3,61%
90	07.03.2006	0,83%	1,11%	0,71%	0,45%	0,33%	0,94%	0,28%	3,75%
111	08.03.2006	0,96%	1,21%	0,82%	0,64%	0,45%	1,08%	0,30%	4,44%
116	08.03.2006	0,79%	1,06%	0,74%	0,55%	0,39%	1,01%	0,33%	4,41%
134	09.03.2006	0,96%	1,21%	0,85%	0,64%	0,47%	1,08%	0,35%	4,79%
141	09.03.2006	0,87%	1,11%	0,78%	0,64%	0,41%	1,16%	0,35%	6,29%
161	10.03.2006	1,31%	1,48%	1,06%	0,99%	0,65%	1,55%	0,53%	6,11%
230	13.03.2006	2,45%	2,85%	1,84%	2,38%	1,53%	3,00%	0,98%	6,48%
234	13.03.2006	2,75%	3,17%	2,06%	2,58%	1,58%	3,22%	1,03%	7,39%
250	14.03.2006	4,19%	4,59%	3,05%	4,11%	2,36%	4,74%	1,59%	8,56%
256	14.03.2006	3,89%	4,22%	2,91%	3,87%	2,23%	4,37%	1,46%	14,20%
279	15.03.2006	4,19%	4,54%	3,19%	4,26%	2,42%	4,66%	1,54%	14,89%
300	16.03.2006	5,28%	5,80%	3,93%	5,50%	3,01%	5,68%	1,87%	15,85%
328	17.03.2006	6,81%	7,02%	4,89%	6,89%	3,76%	6,94%	2,45%	16,75%
399	20.03.2006	14,37%	13,25%	11,24%	17,34%	8,22%	12,69%	4,62%	19,96%
423	21.03.2006	15,94%	14,51%	12,48%	19,47%	9,02%	13,99%	5,07%	21,69%
444	22.03.2006	17,64%	15,99%	13,82%	21,61%	9,99%	15,26%	5,65%	24,53%

Tab. 2.3: Relative Wasseraufnahme von trockenbeschichteten Probekörper bei der Lagerung unter Laborbedingungen

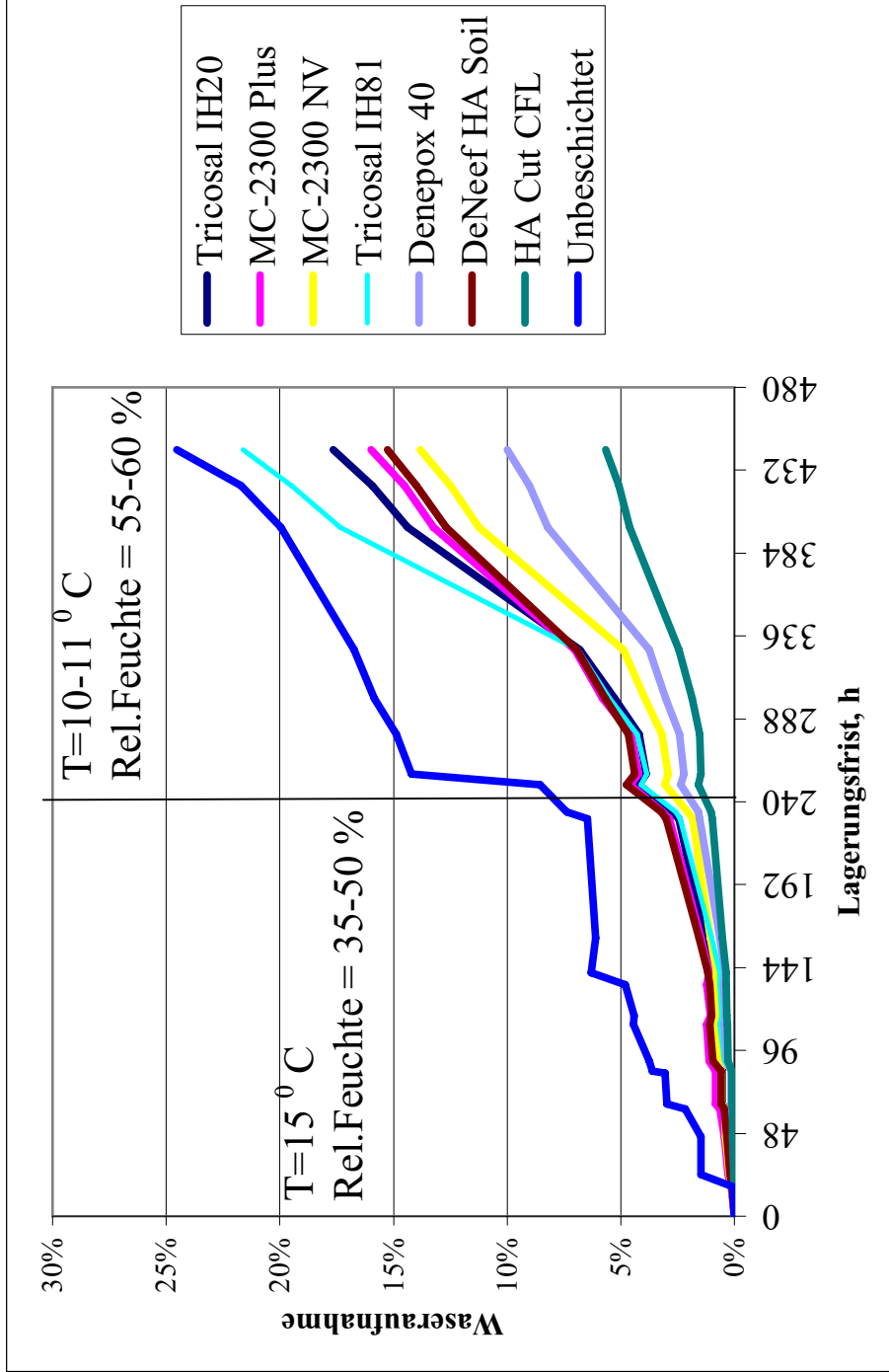


Abb. 8: Relative Wasseraufnahme von trockenbeschichteten Probekörper bei der Lagerung unter Laborbedingungen



Lagerungsfrist, h	Datum	Tricosal IH20	MC-2300 Plus	MC-2300 NV	Tricosal IH81	Denepox 40	DeNeef HA Soil	HA Cut CFL
0	09.03.2006	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
27	10.03.2006	1,43%	1,12%	1,19%	1,01%	0,96%	0,91%	0,70%
51	11.03.2006	1,74%	1,55%	1,61%	1,41%	1,44%	1,09%	0,99%
65	12.03.2006	2,05%	1,98%	2,02%	1,80%	1,92%	1,28%	1,28%
76	13.03.2006	2,36%	2,42%	2,44%	2,20%	2,40%	1,46%	1,56%
91	13.03.2006	2,59%	2,59%	2,61%	2,34%	2,52%	1,68%	1,69%
100	14.03.2006	3,52%	3,42%	3,60%	2,85%	3,25%	2,50%	2,38%
114	15.03.2006	3,37%	3,76%	3,60%	1,89%	3,12%	2,31%	2,43%
125	16.03.2006	3,94%	3,94%	4,35%	2,07%	3,46%	2,38%	2,96%
140	17.03.2006	4,11%	3,59%	5,01%	2,28%	3,46%	3,01%	3,83%
154	18.03.2006	4,12%	3,95%	6,06%	2,35%	3,24%	3,46%	4,62%
168	19.03.2006	4,12%	4,30%	7,10%	2,41%	3,02%	3,91%	5,41%
182	20.03.2006	4,13%	4,66%	8,15%	2,48%	2,79%	4,37%	6,19%
196	21.03.2006	2,48%	3,63%	6,82%	1,70%	2,19%	2,50%	4,36%
207	22.03.2006	1,87%	2,20%	7,25%	1,75%	1,29%	2,89%	3,92%
218	23.03.2006	1,28%	1,65%	7,59%	1,77%	0,41%	2,48%	3,54%
232	24.03.2006	1,93%	2,23%	8,23%	2,17%	0,89%	-	4,01%
246	27.03.2006	4,23%	4,70%	11,23%	4,04%	3,17%	-	3,13%
260	28.03.2006	5,83%	6,26%	13,38%	5,26%	4,59%	-	7,44%
274	29.03.2006	7,30%	7,74%	15,06%	6,43%	5,90%	-	8,91%
288	30.03.2006	8,78%	9,22%	16,74%	7,59%	7,21%	-	10,37%

Tab. 2.4: Relative Wasseraufnahme von naßbeschichteten Probekörper bei der Lagerung unter Laborbedingungen

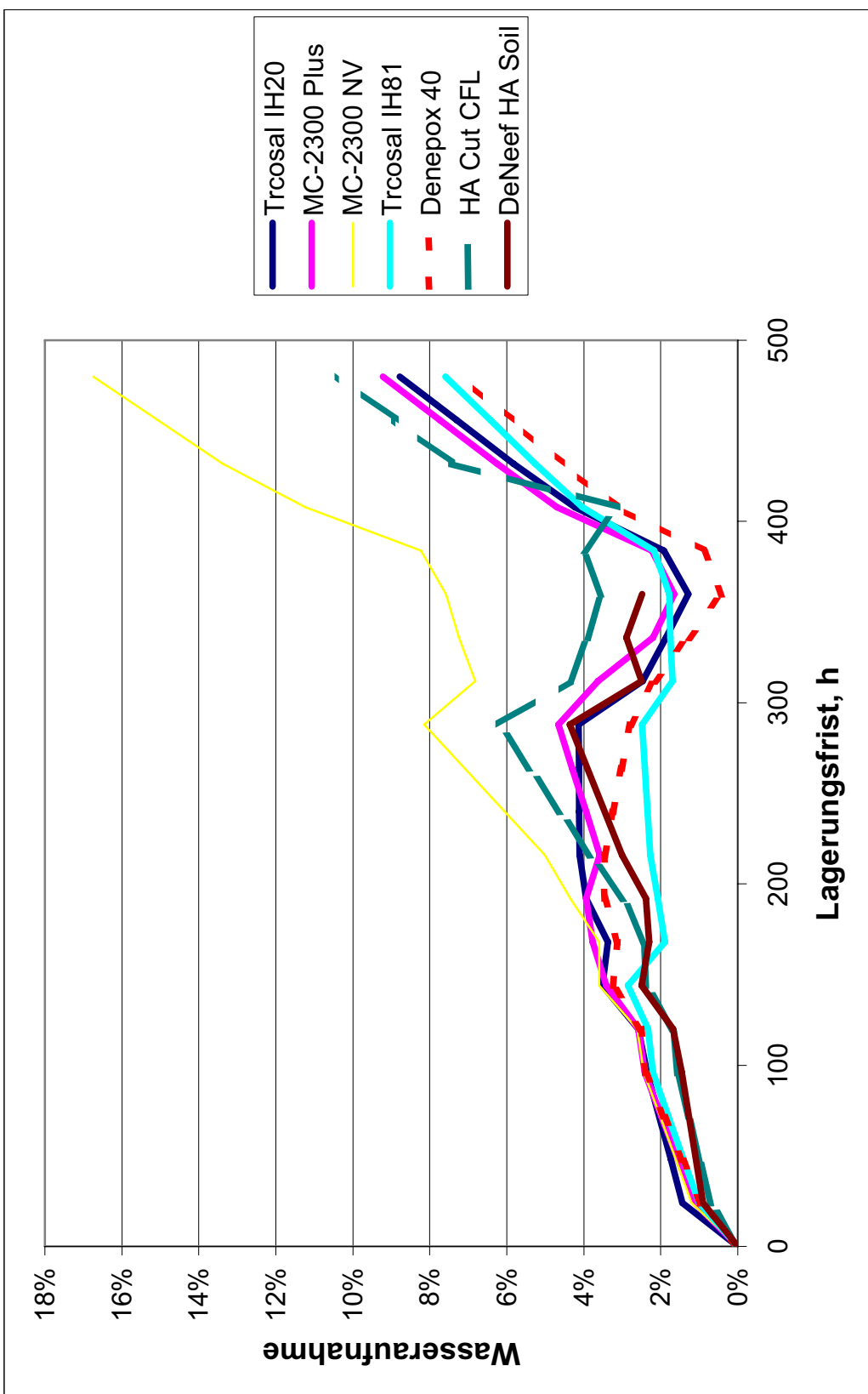


Abb. 9: Relative Wasseraufnahme von naßbeschichteten Probekörper bei der Lagerung unter Laborbedingungen

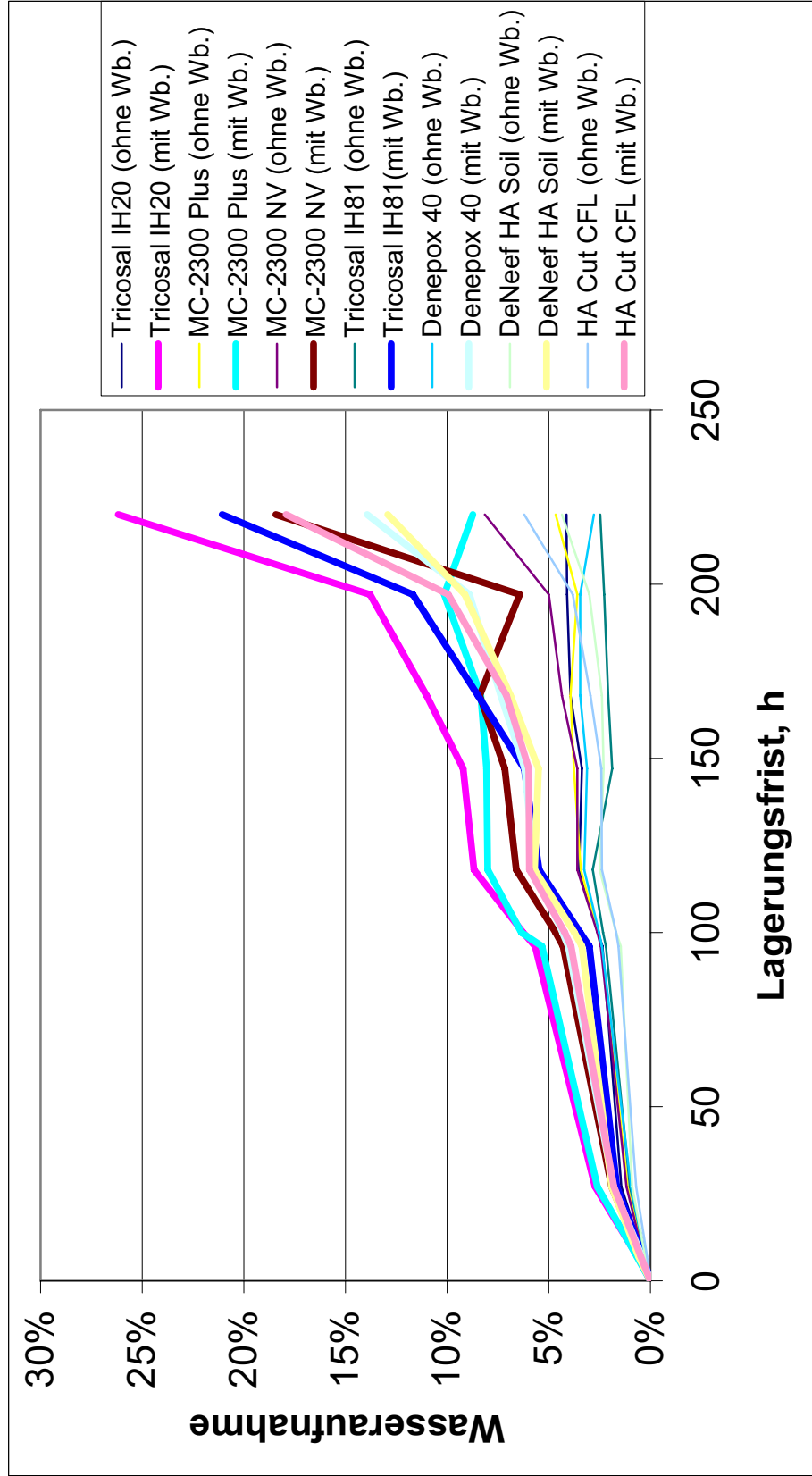


Abb. 10: Vergleich der relativen Wasseraufnahmen von Probiotikern, die nach der Wärmebehandlung beschichtet wurden und die ohne Wärmebehandlung beschichtet wurden

Lagerungsfrist, h	Datum	Tricosal IH20 (ohne Wärme behandlung)	Tricosal IH20 (mit Wärme behandlung)	MC-2300 Plus (ohne Wärme behandlung)	MC-2300 Plus (mit Wärme behandlung)	MC-2300 NV (ohne Wärme behandlung)	MC-2300 NV (mit Wärme behandlung)	Tricosal IH81 (ohne Wärme behandlung)	Tricosal IH81 (mit Wärme behandlung)	Denepox 40 (ohne Wärme behandlung)	Denepox 40 (mit Wärme behandlung)	DeNeef HA Soil (ohne Wärme behandlung)	DeNeef HA Soil (mit Wärme behandlung)	HA Cut CFL (ohne Wärme behandlung)	HA Cut CFL (mit Wärme behandlung)
0	09.03.2006	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
27	09.03.2006	0,33%	0,65%	0,31%	0,31%	0,34%	0,52%	0,23%	0,37%	0,25%	0,43%	0,25%	0,59%	0,17%	0,47%
41	10.03.2006	1,43%	2,73%	1,12%	1,12%	1,19%	1,92%	1,01%	1,65%	0,96%	1,84%	0,91%	1,90%	0,70%	1,79%
52	13.03.2006	2,36%	5,67%	2,42%	2,42%	2,44%	4,31%	2,20%	3,00%	2,40%	4,04%	1,46%	3,38%	1,56%	3,89%
67	13.03.2006	2,59%	6,27%	2,59%	2,59%	2,61%	4,67%	2,34%	3,45%	2,52%	4,33%	1,68%	3,73%	1,69%	4,21%
76	14.03.2006	3,52%	8,67%	3,42%	3,42%	3,60%	6,59%	2,85%	5,47%	3,25%	5,70%	2,50%	5,69%	2,38%	5,96%
90	15.03.2006	3,37%	9,21%	3,76%	3,76%	3,60%	7,16%	1,89%	6,22%	3,12%	6,17%	2,31%	5,51%	2,43%	6,00%
101	16.03.2006	3,94%	11,01%	3,94%	3,94%	4,35%	8,41%	2,07%	8,47%	3,46%	7,36%	2,38%	6,88%	2,96%	7,09%
116	17.03.2006	4,11%	13,79%	3,59%	3,59%	5,01%	6,43%	2,28%	11,69%	3,46%	8,91%	3,01%	9,13%	3,83%	9,93%
130	20.03.2006	4,13%	26,17%	4,66%	4,66%	8,15%	18,42%	2,48%	21,06%	2,79%	13,92%	4,37%	12,92%	6,19%	17,91%

Tab. 2.5: Relative Wasseraufnahmen von Probekörpern

### **3.2.4 Verhinderung von Kapillarströmungen durch Einbau von künstlichen Schlitzten und Einschnitten.**

Zur Verhinderung von Kapillarströmungen wurde oft bei der Sanierung von erdberührenden Bauteilen das Sägeverfahren mit nachfolgender Verfüllung der Schlitzte mit undurchlässigen Stoffen und Zement zur Prävention von Divergenzen angewendet [32].

In dem vorgestellten Fall können die Kapillarströmungen im konturnahen Bereich dadurch abgewendet werden, dass rund um die Strecke ein Schlitz gebaut und dann mit Kunststoff verfüllt wird (Abb.11).

Dabei sind folgende Verfahren möglich:

- Sägeverfahren;
- Hydrofrackverfahren;

Das Erzeugen eines Schlitzes durch das Hydrofrackverfahren wurde wie folgt geplant (Abb. 12). Am Anfang wurde geplant die senkrechten Abschnitte der Frackrissen zu erzeugen und dann durch das Einpressen die senkrechten Abschnitte der Frackrissen zu machen durch das Einpressen eines Polymerstoffs in jede 2 benachbarten Bohrlöcher. Danach wurde geplant die Eckformige Abschnitte der Schlitzten zu errichten. Zur Verhinderung des Abreißens der konturnahen Schicht von tieferliegenden Schichten wurde geplant einen Stahlträger als Widerlage einzusetzen (er muss während der Versuche am Stoß verankert werden) (Abb.13).

In Hydrofrackbohrlöcher sollte eine Betonschalung eingebaut werden, um die Abströmung des Polymers bei niedrigem Druck ins Gebirge zu verhindern, bevor der Druck so groß wird, dass ein Hydrofrackriss entsteht.

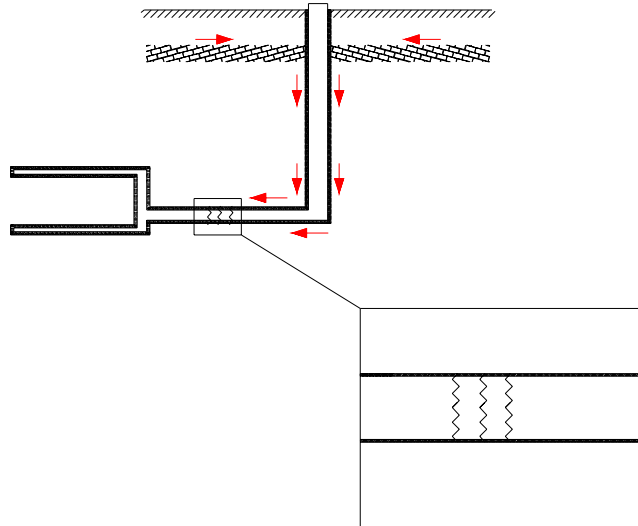


Abb. 11: Kapillarströmungsverhinderung durch Einrichtung von künstlichen Schlitzen

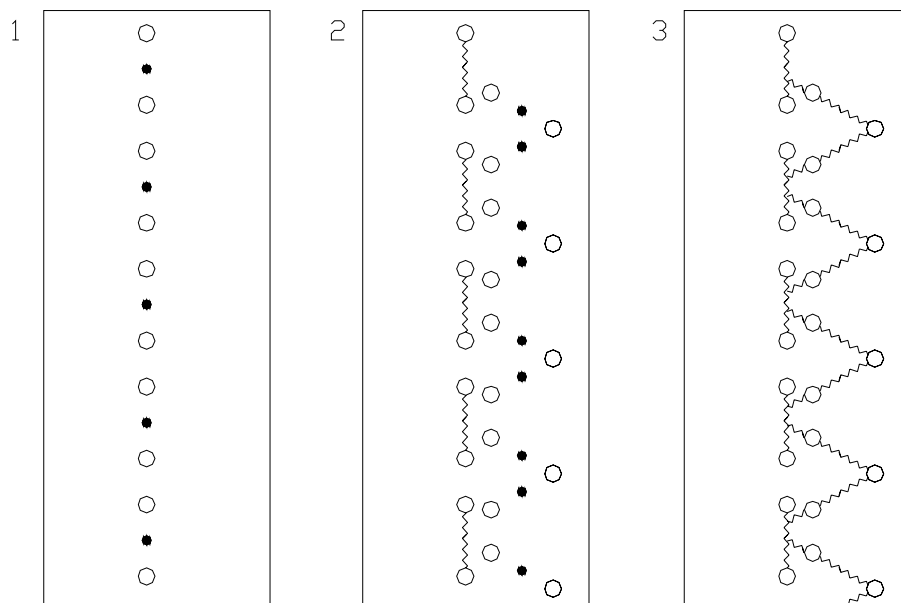


Abb.12: Einrichtung von künstlichen Schlitzen durch das Hydrofracverfahren

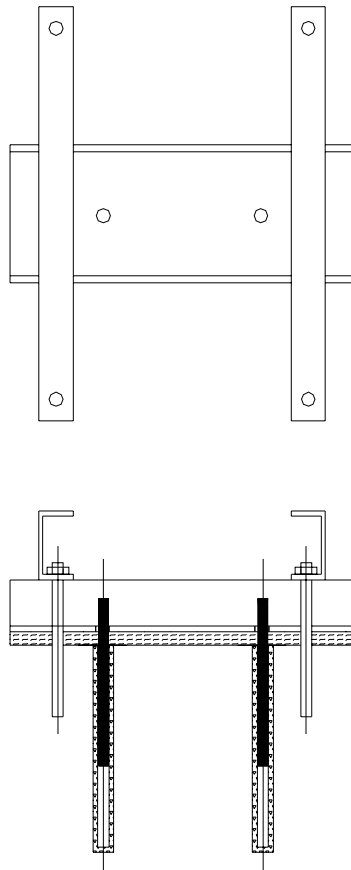


Abb.13: Widerlager beim Hydrofracverfahren

Zur Erprobung dieser Methode wurden in der Grube Teutschenthal in einer Versuchsstrecke 8 Bohrlöcher mit einem Durchmesser von 20 mm und 300 mm Tiefe gebohrt. In den Bohrlöchern wurde die Betonschalung aus Magnesia-Beton eingebaut, so dass der Innendurchmesser 14 mm betrug (Abb. 13). Danach wurde in die Bohrlöcher paarweise das Injektionsmittel mit einer Viskosität von 120 mPa·s eingepresst. Das Einpressen wurde 24 Stunden nach der Betonierung durchgeführt. Laut Untersuchungen sollte der Beton zu diesem Zeitpunkt eine Druckfestigkeit von 60 MPa und eine Zugfestigkeit von 5 MPa haben. Trotz der Benutzung des Trägers als Widerlage, verlief der Riss nur bei einem von vier Versuchen wie geplant. In den anderen Fällen wurde die konturnahe Schicht von den tieferliegenden Schichten abgerissen. Des Weiteren war der entstandene Riss zu schmal (kleiner als 1 mm), um die Diffusionsbeständigkeit der Abdichtungsmembran zu gewährleisten. Zudem ist diese Methode sehr arbeitsaufwändig und die zerstörungsfreie Kontrolle des Risses ist nicht möglich. (Abb. 14-17)



Abb. 14: Versuch zum Errichten von künstlichen Schlitzen durch Hydrofrackverfahren



Abb. 15: Hydrofrackerscheinungen im Bohrloch





Abb. 16: Bohrkern aus dem gefrackten Gebirge



Abb. 17: Bohrkern aus dem gefrackten Gebirge

Die Experimente haben die Verwendungsmöglichkeit dieser Methode nicht bestätigt. Deshalb wird diese Methode von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Zur Verhinderung von Kapillarströmungen wurde ebenfalls die Errichtung von Schlitzern durch Sägeverfahren (Kries- oder Kettensäge) betrachtet.

Die Kreissägen haben gegenüber Kettensägen folgende Vorteile:

- größere Leistung
- bessere Sicherheitsverhältnisse, weil die Halterung und Verstellung der Säge auf einer Schiene geschieht
- die Kosten für Verbrauchsmaterialien sind geringer als bei den Kettensägen

Die Anschaffungspreise sind aber vielfach (bis zu 10-fach) höher. Mit Rücksicht auf die enormen Arbeitsvolumina und die Notwendigkeit, nicht nur die Wände sondern auch

die Firste zu schlitzen, wurde entschieden, eine Kreissäge mit einem Durchmesser von 60 - 80 cm zu verwenden. Dabei wurde auch die Erstellung größerer Einschnitte mit einer Teilschnittmaschine in Betracht gezogen.

Zur Erhöhung der wasserabdichtenden Fähigkeiten dieser Maßnahmen wird in den Einschnitt ein Ring aus einem festen wasserundurchlässigen und alterungsbeständigen Material eingebaut (wie in der Abb. 4 b)

Als Material für diesen Ring wurden einige Varianten diskutiert: Tetrafluorethylen, Titan und speziellen Bronzelegierungen. Korrosionsbeständige Bronze wird weit verbreitet im Schiffbau, im chemischen Maschinenbau und in Einrichtungen verwendet, wo die Materialien unter Einwirkung von Meerwasser stehen. Dadurch kann man die speziellen Bronzelegierungen unter Einwirkung von hochkonzentrierten Salzlösungen als relativ langzeitstabile Materialien einzuordnen [23].

Polyethylen zeigt ebenfalls eine gute Beständigkeit gegen chemische Einflüsse [39,40], wobei es am leichtesten in der Verarbeitung und am billigsten aller diskutierter Materialien ist.

Zwar ist Titan am stabilsten von allen betrachteten Materialien, jedoch ist der hohe Preis nachteilig.

Aufbauend auf diesem Auswahlverfahren aufgrund der Literaturrecherche und der Analyse von Erfahrung beim Bau verschiedener Konstruktionen, die unter Einwirkung von chemisch-aktiven Medien stehen, und auch aus Gedanken der Wirtschaftlichkeit wurde entschieden, den Ring aus Polyethylen zu bauen.

Die Konstruktion des Rings wird in Kapitel 5 beschrieben.

Das vorgestellte Konzept wurde in einem Modell unter in-situ Bedingungen getestet. Der Versuch wurde ebenfalls in der Grube Teutschenthal durchgeführt. Zum Testen der Funktionsfähigkeit der Abdichtungsmethode wurde am Stoß über eine Fläche von 500 x 500 mm ein Oberflächenpacker einbetoniert. Der Stoß wurde vor dem Betonieren beraubt. In den Ecken dieser Fläche wurden Anker installiert (Abb. 17), welche die Schalung beim Betonieren halten. Im Zentrum der Fläche wurde ein Schlitz mit einer quadratischen Grundfläche von 200 x 200 mm, und einer Tiefe von 100 mm geschnitten. In diesen Schlitz wurde ein Injektionsschlauch verlegt. Auf diesen

Injektionsschlauch wurde ein Ring aus Edelstahl gelegt. Die Dimensionen des Rings waren: 200 x 200 x 120 mm. In der Mitte der Konstruktion wurde ein Bohrloch mit einem Durchmesser von 25 mm mit einer Tiefe von 20 mm gebohrt. In dieses Loch wurde ein Stahlröhrchen eingebaut. Dieses Röhrchen wird zur Messung der Permeabilität während eines Lufteinpressversuchs verwendet. Danach wurde diese Oberfläche zubetoniert.

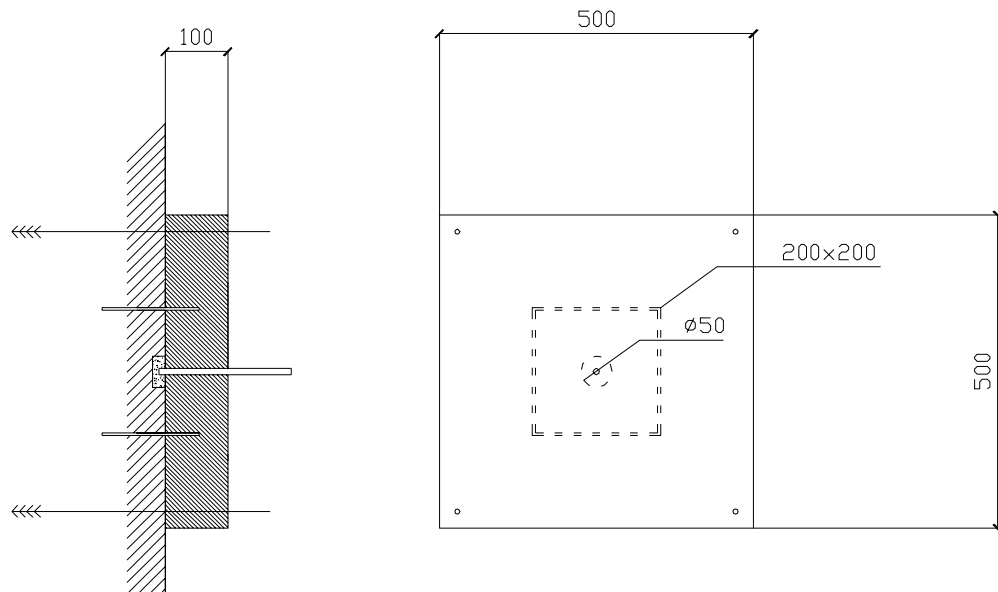


Abb. 18: Schema zum Versuch zur Anwendung des Rings aus einem festen Material mit nachfolgender Verfüllung der Hohlräume mit Kunststoffe.

Laut [82] lassen sich mit diesem Modellversuch die Strömungsprozesse im Gestein modellieren, da dieser Prozess analog zum Einpressen in die Auflockerungszone zwischen dem Bauwerk und dem Karnallitit verläuft und sich nur durch die Dimensionen unterscheidet.

Zur Permeabilitätsmessung nach dem Erhärten des Betons wurde durch das Röhrchen im Zentrum des Oberflächenpackers Gas eingepresst und der Druckabfall im Laufe der Zeit gemessen. Danach wurde das niedrig viskose Injektionsmittel Denepox 40 durch den Injektionsschlauch gepresst. Nach dem Erhärten des Injektionsmaterials wurde die Gasdurchlässigkeit des Systems noch ein mal gemessen. Nach den Injektionsarbeiten hat der Druckabfall eine längere Zeit gedauert, was darauf schliessen lässt, dass die Durchlässigkeit abgenommen hat. Die quantitative Auswertung des Versuches ist im Kapitel 5 beschrieben. Durch die oben beschriebenen Fakten kann die vorgeschlagene

Methode zu den effektiveren gezählt werden, was weitere Untersuchungen dieser Methode rechtfertigt.

### **3.2.5 Schlußfolgerung zur Verfestigung und Abdichtung der Kontaktzone zwischen dem Bauwerk und dem Karnallitstoß nach dem Bau des Verschlussbauwerkes**

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, wurden die Kunststoffinjektionen als grundlegende Methode zur Abdichtung und Verbesserung der Schutzeigenschaften des Verschlussbauwerkes ausgewählt. Laut den Untersuchungen der IFG GmbH (Leipzig) [85] ist die Verbindung zwischen dem Magnesia-Beton und dem Carnallit sehr fest, aber auch durchlässig (Scherfestigkeit von 1,56 MPa, Scherwinkel 50°, Zugfestigkeit von 0,5 - 0,6 MPa, wobei die Bruchfläche nicht an der Kontaktfläche, sondern 0,5 - 1 cm tief im Carnallit liegt). Laut den oben beschriebenen Untersuchungen liegt die Gasdurchlässigkeit der Kontaktzone im Bereich von  $10^{-18}$  bis  $10^{-14}$  m<sup>2</sup>. Die Durchlässigkeit der Verbindungen hängt im starken Maßen von der Verwitterung ab.

Zur Verfüllung der Fuge zwischen dem Beton und Carnallit werden zwei technologische Verfahren diskutiert:

- die Verfüllung wird durch Bohrlöcher ausgeführt
- die Verfüllung wird durch vorher gelegten Injektionsschläuche durchgeführt

Nach der detaillierten Analyse beider Methoden, vor allem davon ausgehend, dass Lücken bei der Injektion unbedingt zu vermeiden sind, der Arbeitsaufwand zu vermindern ist sowie aus Anwendungserfahrungen der Injektionsschläuche, wurde entschieden, die Einpresstechnologie mit Hilfe von Injektionsschläuchen zu verwenden.

Diese Methode lässt, im Gegensatz zur Verfüllung über Bohrlöcher die unterbrechungsfreie Wasserabdichtung in ganzen Umfang des Bauwerkes zu. Weiterhin verspricht diese bohrlose Methode bessere Einpressmöglichkeiten, weil beim Bohren der Übergangsbereich zwischen dem Bohrloch und der Fuge durch Bohrstaub oder Wärmeeinfluß verstopft werden könnte.

Zur Bestimmung der Injektionsparameter und der Abstände zwischen den Injektionsschläuchen wird ein mathematisches Modell zur Strömung des Injektionsmittels im Kontaktbereich erarbeitet.

Als Ergebnis der vorläufigen Versuche wurde zur Abdichtung des Kontaktbereiches komplexe Maßnahmen ausgewählt, die aus folgenden Verfahren bestehen:

- vorläufiger Schutz des Gebirgsmassivs vor Verwitterung durch Kunststoffbeschichtungen;
- Erstellung von künstlichen Schlitz (Einschnitten) mit der Verstärkung durch einen Ring aus einem festen langzeitstabilen Material sowie nachfolgender Verfüllung der Hohlräume mit Kunststoff;
- Verfüllung der Kontaktzone mit niedrig viskosen Kunststoffinjektionsmaterialien durch die vorher gelegten Injektionsschläuche.

## **4 Auswahl geeigneter Kunststoffdichtmaterialien ( -injektionsmaterialien) für saline Bedingungen.**

### **4.1 Auswahl geeigneter Injektionsmittel**

Die allgemeinen Materialanforderungen für eine langzeitstabile Abdichtung gegenüber Salzlösungen, sind folgende:

- keine chemische Reaktionen zwischen dem Dichtmaterial und den salinaren Komponenten (insbesondere Salzlösungen);
- keine Porosität des erhärteten Materials;
- kein oder sehr geringes Schwindmaß;
- keine freien Lösungsmittel in der Zusammensetzung (Verflüchtigung der leichten Fraktionen der Lösungsmittel);

Im Fall der Anwendung von Polymerinjektionsmaterialien zur Abdichtung von Mikrorissen können zu diesen Anforderungen noch weitere Anforderungen hinzugefügt werden: lange Topfzeit (über 1 Stunde) und niedrige Viskosität.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Eignung verschiedener Injektionsmaterialien (Epoxydharze, Polyurethanharze und Akryllat-Gele führender europäischer Hersteller: MC-Bauchemie, Tricosal, De Neef PC) für den Einsatz im Kali- und Steinsalzbergbau untersucht.

Aus der Produktionsreihe dieser Hersteller wurden die Produkte (Epoxydharze, Polyurethanharze und Akryllat-Gele) mit den geringsten Viskositäten ausgewählt. Die Anfangsviskosität der ausgewählten Materialien liegt im Bereich 70-250 mPas.

Zuerst wurde die Polymerisationsfähigkeit aller Materialien unter salinaren Bedingungen geprüft. Dafür wurden folgende Versuche durchgeführt: Zylindrischen Bohrkern aus Steinsalz (Dimensionen: H=100 mm, R=50 mm) wurden in 2 gleiche halb-zylindrische Teile durchgesägt. Dann wurden zwischen diesen Teilen 3 mm dicke Trennelemente eingefügt und beide Teile in speziellen Halterungen fixiert. Danach wurde der Raum zwischen beiden Teilen mit den verschiedenen Kunststoffen verfüllt. Nach 24 Stunden wurde eine Sichtkontrolle der Proben durchgeführt. (Abb.19) Die Ergebnisse der Sichtkontrolle sind in der Tabelle 4.1 zu sehen.

Diese Versuche haben gezeigt, dass sich die Akryllat-Gele zur Anwendung unter Salinarbedingungen nicht eignen. Diese Materialien benötigen zur Reaktion der Polymerisierung Wasser. Da jedoch das benötigte Wasser vom angrenzenden Salz aufgenommen wird, stört das den Lauf der Polymerisierung.



Abb.19: Probekörper zur Eignungsprüfung von Polymerinjektionsmitteln im Kontakt mit Salzgestein

<b>Bezeichnung des Mittels</b>	<b>Ergebnisse der Sichtkontrolle</b>
Tricosal Multigel 850 (Acrylat-Gel)	keine Verbindung, das Mittel ist nicht polymerisiert
Tricosal IH20 (2K-PUR)	gute Verbindung, sehr elastisch
Tricosal IH81 (2K-PUR)	gute Verbindung
MC-Bauchemie MC-2300 Plus (2K-PUR)	gute Verbindung, sehr elastisch
MC-Bauchemie MC-2300 NV (2K-PUR)	gute Verbindung
DeNeef HA Cut CFL (1K-PUR)	das Mittel ist nur an den Rändern polymerisiert, in der Mitte ist es flüssig geblieben
DeNeef HA Soil (1K-PUR)	das Mittel ist nur an den Rändern polymerisiert, in der Mitte ist es flüssig geblieben
DeNeef Denepox 40 (Epoxyd)	sehr feste Verbindung, geringe Elastizität

Tabelle 4.1: Anwendung der Polymerinjektionsmitteln im Kontakt mit Salzgestein.

Weiterhin hat das Experiment gezeigt, dass die untersuchten ein-komponentigen aufschäumenden Polyurethane sich zum Einsatz im Salzgestein nicht eignen. Dies ist dadurch bedingt, dass die ein-komponentigen aufschäumenden Polyurethane bei externer Feuchtigkeit (Luftfeuchtigkeit oder Zuflüsse) nicht polymerisieren können. Das kann dazu führen, dass das Material nur teilweise polymerisiert, und die Abdichtung somit nicht lückenlos wird. Dadurch kann kein sicherer Schutz gegen druckhaft zutretende Flüssigkeiten erreicht werden. Weiterhin kann beim Einpressen in die Fuge zwischen Beton und dem Gebirgsstoß durch das Aufschäumen der weitere Injektionsvorgang behindert werden.

Weiterhin wurden die von den Herstellern angegebenen Haupteigenschaften (Viskosität, Adhäsion, Druckfestigkeit des erhärteten Mittels) der Injektionsmittel verglichen. Der Vergleich hat gezeigt, dass eine kraftschlüssige Verbindung nur Materialien auf Epoxydbasis gewährleisten können (Zugfestigkeit – 3-5 N/mm<sup>2</sup>) [90].

Die Polyurethane bauen eine elastische Verbindung auf, die aber eine geringere Zugfestigkeit hat (0,5-1,5 N/mm<sup>2</sup>) [91]. Weiterhin haben die erhärteten Epoxydharzen eine höhere Druckfestigkeit, als die Polyurethane.



Die Viskosität aller betrachteten Injektionsmaterialien liegt im Bereich von 70 bis 250 mPas, was alle diese Materialien für die Injektionsarbeiten bei der Rissöffnungsweite von 0,01-0,1 mm geeignet erscheinen lässt.

Es muss in Betracht gezogen werden, dass während aller Experimente die Topfzeit aller Mittel bei Berührung mit Salzgestein länger als im Labor war.

Als Schlussfolgerung ergibt sich, dass zur Anwendung unter Salinarbedingungen sich am besten die Materialien eignen, die selbst keinen Wasseranteil haben, ohne Zugang von Wasser oder Feuchtigkeit polymerisieren und nicht aufschäumen. Die Topfzeit muss fürs Einpressen von großen Volumen und für längere Eindringprozesse reichen, also darf die Topfzeit nicht kürzer als 40 Minuten sein. Von allen untersuchten Materialien erschienen die 2-komponentigen Polyurethanharze und die 2-komponentigen Epoxydharze als am besten zu diesem Zweck geeignet.

#### *Beständigkeit im Kontakt mit Steinsalz*

Im nächsten Versuch wurde die Fähigkeit der Injektionsmitteln geprüft, ihre Schutzeigenschaften im Kontakt mit dem Salzgestein zu bewahren. Zur Beschleunigung der möglichen chemischen Prozesse wurden die Versuche bei erhöhter Temperatur durchgeführt.

Die Probekörper wurden bei der maximal möglichen Temperatur gelagert, die aber nicht zu irreversiblen Prozessen im Polymer führt (60<sup>0</sup> C – für Polyurethane und 80<sup>0</sup> C für Epoxyde).

Unter solchen Bedingungen wurden die Probekörper (verklebte Halbzylinder) (Abb. 18) 2 Monate lang gelagert. Nach der Lagerung wurde eine Sichtkontrolle durchgeführt. Die Ergebnisse der Sichtkontrolle stehen in der Tabelle 4.2.

#### *Beständigkeit unter Einwirkung von hochkonzentrierten Salzlösungen*

Weiter wurde unter Einwirkung von hochkonzentrierten Salzlösungen die Fähigkeit der Injektionsmittel geprüft, ihre Schutzeigenschaften zu bewahren.

Für diesen Versuch wurden als Probekörper dünne Platten (50x50x3) mm angefertigt. Die Probekörper wurden dann in die heiße hochkonzentrierte Salzlösung<sup>1</sup> eingelagert.

---

<sup>1</sup> Hochkonzentrierte Salzlösung KCl\*MgCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O (Carnallit) und KCl\*MgSO<sub>4</sub>\*2,75H<sub>2</sub>O (Kainit)  
251 g/l MgCl<sub>2</sub>  
25 g/l MgSO<sub>4</sub>  
28 g/l KCl  
18 g/l NaCl  
Die Zusammensetzung entspricht einer Q-Lösung

Die Lagerungszeit betrug 2 Monate bei einer Temperatur von 60<sup>0</sup> C. Die Ergebnisse der Sichtkontrolle stehen in der Tabelle 4.3.

<b>Bezeichnung des Mittels</b>	<b>Ergebnisse der Sichtkontrolle nach 2 Monaten Lagerung</b>
<b>Polyurethanharze</b>	
Tricosal IH20	Keine sichtbaren Veränderungen
Tricosal IH81	Das Mittel ist dunkler geworden, die Verbindung ist fest geblieben. Die Farbenveränderung ist wahrscheinlich durch die Hochtemperatureinwirkung verursacht.
MC-Bauchemie MC-2300 Plus	Keine sichtbaren Veränderungen
MC-Bauchemie MC-2300 NV	Keine sichtbaren Veränderungen
<b>Epoxydharze</b>	
DeNeef Denepox 40	Keine sichtbaren Veränderungen, das Material ist härter geworden

Tabelle 4.2: Sichtkontrolle der Probekörper nach der Lagerung im Kontakt mit Salzgestein bei erhöhter Temperatur.

<b>Bezeichnung des Mittels</b>	<b>Ergebnisse der Sichtkontrolle nach 2 Monaten Lagerung</b>
<b>Polyurethanharze</b>	
Tricosal IH20	Keine sichtbaren Veränderungen
Tricosal IH81	Das Mittel ist dunkler geworden, weiterhin ist das Material hart und spröde geworden
MC-Bauchemie MC-2300 Plus	Keine sichtbaren Veränderungen
MC-Bauchemie MC-2300 NV	Keine sichtbaren Veränderungen
<b>Epoxydharze</b>	
DeNeef Denepox 40	Keine sichtbaren Veränderungen

Tabelle 4.3: Sichtkontrolle der Probekörper nach der Lagerung in Salzlösung bei erhöhter Temperatur.

Die Schlussfolgerung aus diesen Experimenten ist, dass einige der untersuchten Kunststoffinjektionsmaterialien in kurzer Zeit sogar unter erhöhter Temperatur nicht zerstört oder aufgelöst wurden. Das bestätigt die These aus der Literaturrecherche (siehe Abschnitt 3.3, Kapitel 3), dass geeignete Kunststoffe (Epoxyd- und PUR-Harze) keine bedeutende Eigenschaftsveränderungen durchmachen. Daraus lässt sich vermuten, dass die betrachteten Kunststoffe auch unter langzeitiger Einwirkung im Salinar stabil sein werden. Deshalb sind weitere Untersuchungen zur Langzeitstabilität sinnvoll.

Das Protokoll der Beobachtung zur Veränderung der Probekörper von der Lagerung von Proben aus Epoxydharz „Denepox 40“ (Fa. DeNeef) in der hochkonzentrierten Salzlösung bei der Temperatur 60<sup>0</sup> C ist in Anlage 1 beigelegt.

Nach den durchgeführten Untersuchungen werden zur Abdichtung der Auflockerungszone eines Verschlussbauwerkes unter Salinarbedingungen folgende Materialien als geeignet angesehen:

- Fa. MC-Bauchemie: MC-2300 NV und MC-2300 Plus;
- Fa. Tricosal: IH20
- Fa. DeNeef: Denepox 40.

#### **4.2 Auswahl geeigneter Beschichtungsmaterialien**

Die vielseitigen Untersuchungen der gegebenen Materialien als Schutzbeschichtung wurde im Kapitel 2 beschrieben. Ziel der Untersuchungen war, die Eignung der vorliegenden Materialien für eine Beschichtung des Salzstoßes gegen Verwitterung zu untersuchen.

Als am besten wirkende Materialien werden Denepox 40 (Fa. DeNeef) und MC-2300 von MC-Bauchemie angesehen.

#### **4.3 Zur Prognostizierung der Langzeitstabilität von Kunststoffen unter salinaren Bedingungen.**

In dieser Arbeit wird als Langzeitstabilität eine Beständigkeit eines Kunststoffmaterials innerhalb von 100-150 Jahre bezeichnet. Traditionell versteht man bei Endlagerforschungen unter „Langzeitstabilität“ eine Beständigkeit eines Materials innerhalb von einigen Millionen Jahren. Bei Durchführung von

Abdichtungsmaßnahmen im Salzgestein ist wichtig, dass ein Injektionsmaterial seine Schutzigenschaften solange hält, bevor die Mikrorisse durch sogenannten „Selbsteffekt des Steinsalzes“ unter Einwirkung des Gebirgsdrucks zuge drückt werden. Dies sollte innerhalb von 100-150 Jahre erfolgen.

Die Fragen der Langzeitstabilität der Kunststoffe wurden ausführlich in der Literaturlauswertung diskutiert (siehe Abschnitt 2.3, Kapitel 2).

Die Langzeitbeständigkeit der Abdichtung hängt von vielen Faktoren ab: u.a. Rissbildung aufgrund der Schwindung bei der Aushärtung, Einbauqualität, Art und Zusammensetzung des Polymers, bzw. verschiedene Einwirkungen äußerer Faktoren oder Strahlung. [39,41,45]. Die genaue Einwirkungszeit unter verschiedenen Bedingungen ist zur Zeit nicht zu bestimmen. Es gibt aber die Möglichkeit, die Beständigkeitsdauer durch verschiedene Labormethoden unter genau definierten

Bedingungen einzuschätzen. Die Einwirkung verschiedener kritischer Faktoren auf die Zerstörung des Materials und somit die Dauerbeständigkeit von Kunststoffabdichtungen kann man durch Extrapolation der Versuchsergebnisse auf längere Zeiträume bestimmen.

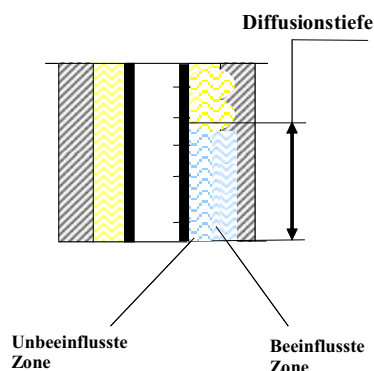
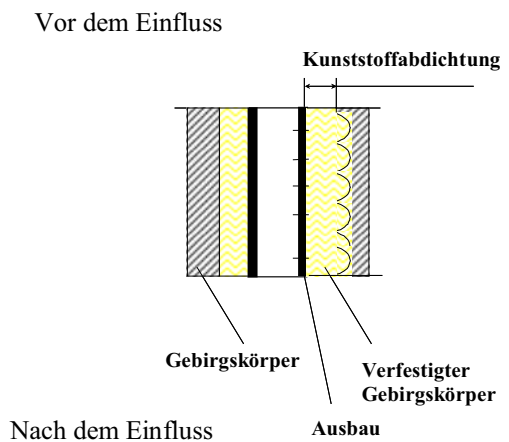


Abb.20: Zeitliche Veränderung der Eigenschaften der Kunststoffe unter Einwirkung von Salzlösungen

Die Kunststoffmaterialien auf Basis von Epoxyd- und PUR-Harzen werden von verdünnten Säure und Laugen nicht ausgelöst und gehen auch keine chemische Reaktionen mit ihnen ein. [39,47]

Laut [48,51] geschieht die Zerstörung der EP- und PUR- Harzen unter Einwirkung der wässrigen Lösungen durch die Diffusion der Moleküle der aggressiven Lösungen in den

Polymerwerkstoff – dadurch, dass die Verbindungen zwischen den großen Molekülen des Polymers zerrissen werden. Die Folgen dieses Prozesses sind Sprödigkeit, Rissbildung oder Erweichung und Verlust der Abdichtungseigenschaften.

Die Geschwindigkeit der Zerstörung in diesem Fall kann durch die Bestimmung der Diffusionsgeschwindigkeit der Moleküle der aggressiven Lösungen in den Polymerwerkstoff prognostiziert werden.

Unter Laborbedingungen wird durch die Methoden der künstlichen Alterung von Polymerwerkstoffen [45] die Diffusionsgeschwindigkeit der aggressiven Lösungen in den Polymerwerkstoff und damit die Tiefe des Eindringens der Lösungsmoleküle in die Abdichtung eingeschätzt.

Wenn die Eindringtiefe der Lösungsmoleküle in die Abdichtung bekannt ist, kann man eine Abdichtung so errichten, dass die Mächtigkeit der Abdichtung in Diffusionsrichtung wesentlich größer wird, als die Eindringtiefe infolge Diffusion. So kann die erforderliche Mächtigkeit der Abdichtung in Diffusionsrichtung bestimmt werden, so dass ein Teil innerhalb von 100-150 Jahre unter den genannten Einwirkungen seine Schutzeigenschaften behalten wird.

Auf solche Weise kann ein Teil der Abdichtung seine Schutzeigenschaften sogar unter der langzeitigen Einwirkung aggressiver Lösungen behalten. (Abb. 20)

Der Mechanismus der Durchführung von Experimenten der künstlichen Alterung und eine Methode der Auswertung der Ergebnisse ist detailliert in der russischen Norm GOST 9.707-81 [43] und in der DIN [88,89] beschrieben.

Für die Durchführung der Versuche durch die Methode der künstlichen Alterung ist es notwendig, die Änderung der Eigenschaften der Proben im Laufe einer langen Zeit zu beobachten. Durch verschiedene Methoden der Verstärkung des Einflusses des Prüfmediums kann die Alterung um das 5-10-fache beschleunigt werden. Um die richtigen Ergebnisse zu bekommen, müssen die Beobachtungen regelmäßig in längeren Zeitabschnitten durchgeführt werden.

Für die meisten Polymerstoffe wurden die Diffusionsgeschwindigkeiten für Wasser untersucht. Wegen der kleineren Molekülgrößen ist die Diffusionsgeschwindigkeit für Wasser höher als die Geschwindigkeit für gelöste Kationen und Anionen. Weiterhin

geht die Diffusion von Ionen gleichmäßiger zur Oberfläche, als im Fall mit Wasser. (Abb. 21)

Aufgrund der geringeren Diffusionskoeffizienten der gelösten Ionen im Vergleich mit dem Diffusionskoeffizient für Wasser, ergibt sich im Falle der Salzlösungseinwirkung eine geringere Einwirkung bzw. eine Sicherheitsreserve.

Somit muss zum Schutz des Gebirgsmassivs vor Verwitterung vor der Errichtung des Bauwerkes und zur Durchführung der nachträglichen Injektionen das gleiche Mittel verwendet werden, weil die Inhomogenität der Abdichtungsmembrane die Diffusionsgeschwindigkeit beeinflussen kann und dies zur Rissbildung unter dem Einfluss von Salzlösungen führen kann.

Bei einer vom Fa. Deneef durchgeführten Untersuchung wurde bei Lagerung innerhalb von 550 Tage die Gewichts- und Volumenveränderung von Probekörper von 0,5 % festgestellt. Die Untersuchungen wurden nach der Norm JIS K 6258-1993 durchgeführt. Laut [96] hat das Injektionsmittel einen Diffusionskoeffizient von  $6,7 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ . Bei solcher Diffusionskonstante ist bei  $20^\circ\text{C}$  mit einer Eindringtiefe von ca. 0,2 cm/Jahr zu rechnen.

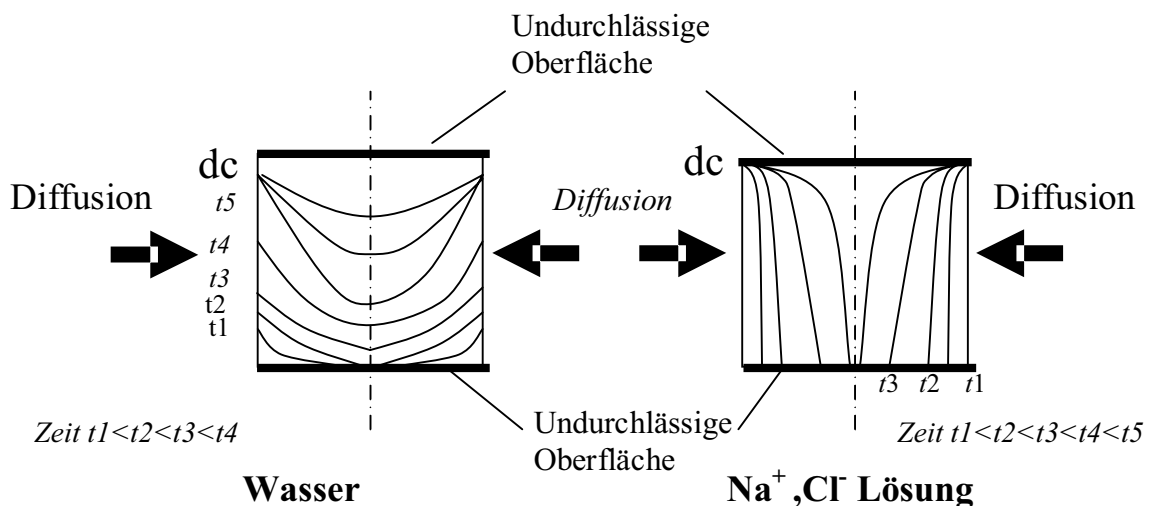


Abb. 21: Zunahme der Konzentration des Wassers und der Salzlösung im Probekörper eines Polymerstoffes bei der Diffusion von den Seiten.

Aus den durchgeführten Versuchen (siehe Abschnitt 4.1, 4.2) ist zu sehen, dass die Injektionsmaterialien auf Epoxydbasis bessere Voraussetzungen zur Anwendung unter

Salinarbedingungen haben, als die Polyurethan-Stoffe. Von den betrachteten Polymerinjektionsmitteln ist hinsichtlich der Stabilität unter Einwirkung der Salze und Salzlösungen, hinsichtlich der Luftfeuchteundurchlässigkeit und weiterer technischer Parameter (niedrige Viskosität, hohe Adhäsionsfähigkeit, hohe Bruchfestigkeit) das Injektionsmittel auf Epoxydbasis Denepox-40 Fa. DeNeef am besten geeignet.

Zur Errichtung einer kontinuierlichen Wasserabdichtungsschicht ist es notwendig, die genau passenden Injektionsparameter zu wählen. Zur Auswahl der Injektionsparameter wird ein Mathematisches Modell eingesetzt. Mit dem in der Arbeit vorgeschlagenen Modell lässt sich das Strömungsverhalten eines Injektionsmittels in Abhängigkeit vom Injektionsdruck und den Viskositätseigenschaften der Flüssigkeit beschreiben.

## **5 Mathematische Modellierung der Strömung des Injektionsmittels in der Fuge zwischen Gebirgsmassiv und Bauwerk.**

### **5.1 Einführung**

Zur Einschätzung des Verbreitungsradius in der Auflockerungszone zwischen Bauwerk und Gebirgsmassiv wird ein mathematisches Modell der Strömung eingesetzt, das die Strömungsparameter und die Druckverteilung in der Fuge beinhaltet.

Das Gesetz der Strömung in der Fuge beruht sich auf den Strömungsgesetzen für klüftigen Fels (in Makrorissen). Die Fuge im Modell wird als eine raue Kluft mit konstanter Öffnungsweite dargestellt. Dabei werden die beide Oberflächen, die die Strömung begrenzen als absolut undurchlässig angenommen.

Die fehlenden Werte (Kluftöffnungsweite, Durchlässigkeit) werden durch die zusätzlichen Versuche bestimmt.

Das Modell beruht auf Vorstellungen, dass das Injektionsmaterial eine Newton'sche Flüssigkeit ist, und die Strömung nach Darcy-Gesetz erfolgt. Das Modell berücksichtigt nicht die Strukturviskosität des strömenden Mediums (die Viskosität hängt nicht von der Fließgeschwindigkeit ab) [103].

Die Injektionszeiten sind im Vergleich mit den Topfzeiten des injizierenden Mittels zu gering, deswegen werden Veränderungen der Viskosität wegen der Polymerisierung nicht berücksichtigt.

In dem Modell wird die Strömung als eine Reihe von aufeinander folgenden stationären Zuständen vorgestellt.

#### **Vereinfachungen:**

1. Die Strömung ist laminar.
2. Die Oberflächen, zwischen denen die Strömung erfolgt, sind nicht deformierbar.
3. Die Flüssigkeit ist inkompressibel.
4. Die Strömung ist isotherm.



## 5.2 Mathematisches Modell zur Berechnung der Ausbreitung des strömenden Mediums in der Fuge zwischen Gebirge und Bauwerk

Zur Ermittlung der maximalen Ausbreitung des Injektionsharzes im Riss wird die Druckverteilung im Riss bestimmt.

Nach der Darcy-Gleichung

$$v = -k_f \frac{dP}{dr} \quad (1)$$

wobei

$\frac{dP}{dr}$  - Druckabfall auf r-Koordinate

$v$  - Geschwindigkeit der Strömung

Um die maximale Ausbreitung zu bestimmen, muss die Druckverteilung bekannt sein.

Das Modell wird zur Anwendung von Injektionsschläuchen angepasst.

Jede Quelle (Ausflusspunkt) des Injektionsmaterials wird einzeln betrachtet.

Zur Vereinfachung der Berechnungen ersetzen wir jeden Ausflusspunkt vom Injektionsschlauch durch das Bohrloch mit der äquivalenten Durchflussmenge und dem Anfangsdruck. (Siehe Abb. 23)

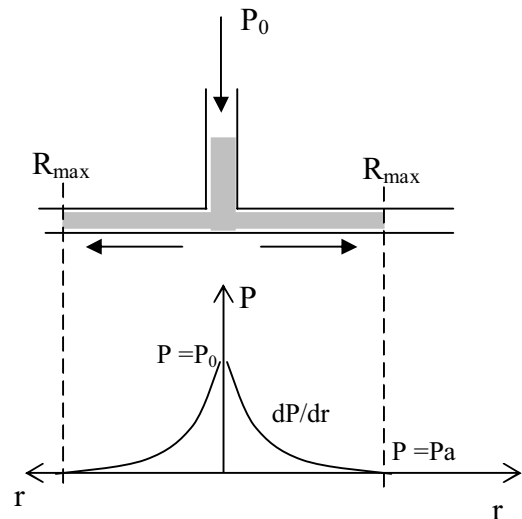


Abb. 22: Druckabfall im Riss (Radialsymmetrische Strömung)

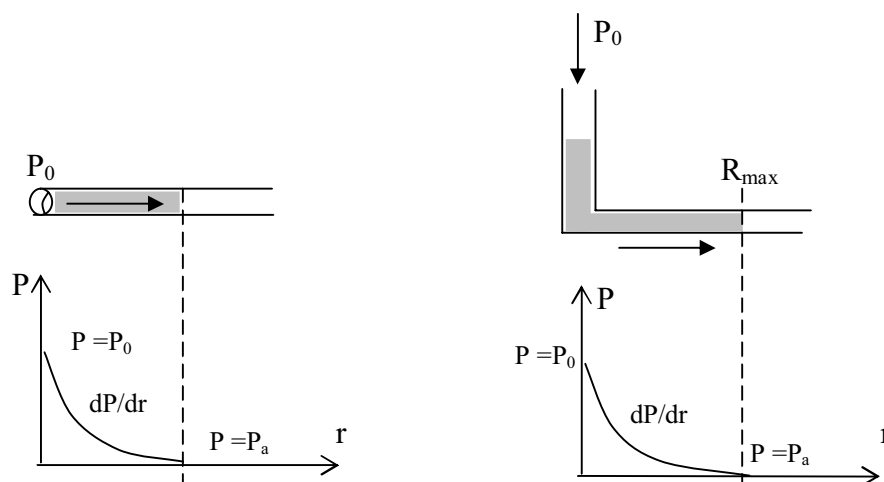


Abb.23 a: Rechnungsschema beim Einpressen durch den Injektionsschlauch (Seitenansicht)

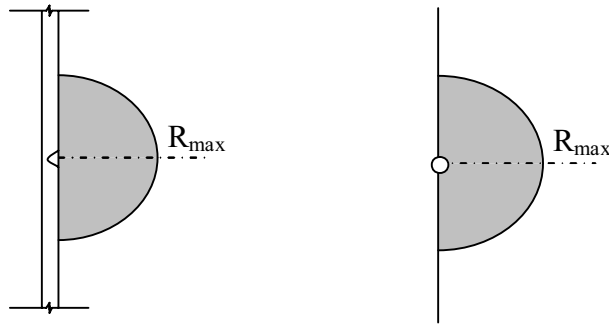


Abb.23 b: Rechnungsschema beim Einpressen durch den Injektionsschlauch (Draufsicht)

$R_{\max}$  – der maximale Radius der Ausbreitung

Der Fließwiderstand in einer Kluft ist viel höher als der Fließwiderstand im Schlauch, deswegen wird angenommen:

$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_n$  und die gesamte Durchflussmenge (an der Pumpe):  $Q = \sum_{i=1}^n Q_i$

Aus dem gleichen Grund  $P_i = \text{const} = P_0$  (Abb. 24).

Die Durchflussmenge  $Q_v$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]:

$$Q_v = v(r) \cdot A(r) \quad (2)$$

wobei  $v(r)$  – Strömungsgeschwindigkeit [ $\text{m/s}$ ]

$A(r)$  – Durchströmte Fläche [ $\text{m}^2$ ]

Dann ist die Geschwindigkeit der Strömung in der Fuge:

$$v(r) = \frac{Q_v}{\pi \cdot r(t) \cdot h} \quad (3)$$

wobei  $h$  – Rissöffnungsweite

$r$  – Radius der Ausbreitung

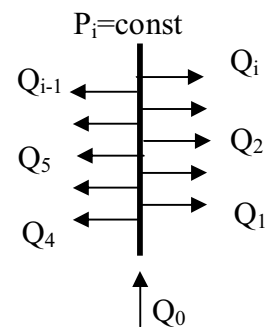


Abb. 24: Druck und Durchflüssmengen Verteilung im Injektionsschlauch

Die Rahmenbedingungen für die Modellierung:  $P(r_0)=P_0=\text{const}$ ,  $P_0$  - Einpressdruck

$P(R_{\text{max}})=P_a$ ,  $P_a$  - Luftdruck

$Q(r, t_i)=\text{const}$ ,  $Q(t) \neq \text{const}$ ,  $Q$  - Durchflussmenge,  $r$  - Radius

Wie schon in der Einleitung zu diesem Kapitel erläutert wurde, wird im Model die Strömung als eine Reihe von aufeinander folgenden stationären Zuständen vorgestellt

Nach [60,65,68,75] werden Energieverluste  $I$  (Druckabfall wegen Reibung Abb. 22) in Leitungen beliebigen Querschnitts durch die Darcy-Weisbach-Gleichung beschrieben:

$$I = \frac{dP}{dr} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{D_h} \cdot \lambda \cdot v^2 \quad (4)$$

wobei

$\frac{dP}{dr}$  - Druckabfall auf  $r$ -Koordinate

$\lambda$  - Widerstandsbeiwert

$v$  - Geschwindigkeit der Strömung [m/s]

$\rho$  - Dichte der Flüssigkeit [N/m<sup>3</sup>]

$D_h$  - Hydraulischer Durchmesser ( $D_h = 4 \cdot \frac{A_0}{U}$ ,  $A_0$  - durchströmte Fläche,  $U$  - Umfangslänge), für radialsymmetrische Strömung  $D_h = 4 \cdot \frac{2 \cdot r \cdot \pi \cdot h}{2(2r\pi + h)} \approx 2 \cdot h$ ,  $h$  - Rissöffnungsweite [m].

Diagramm zum Auswahl des Strömungsgesetzes siehe Abb.25 [65]

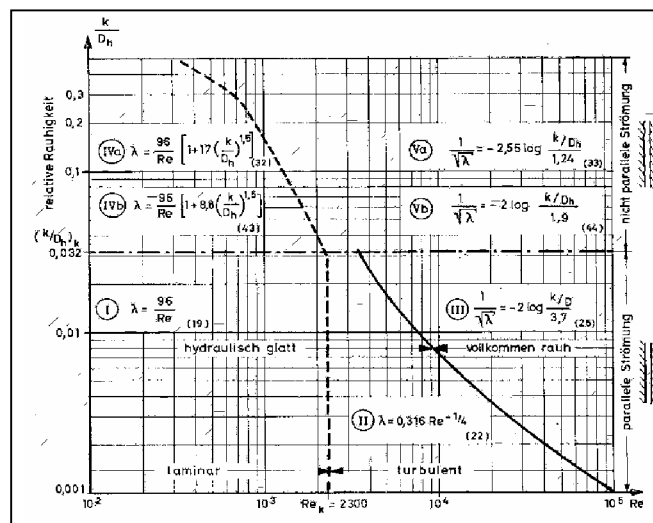


Abb.25: Diagramm zum Auswahl des Strömungsgesetzes

Nach [60,64,65]: für die laminare Strömung im glatten Spalt nach Poisseuille ist der Widerstandbeiwert:

$$\lambda = \frac{96}{\text{Re}} \cdot c \quad (3)$$

wobei C bei kleinen Öffnungsweiten von Rissen, bzw. sehr großer relativer Rauigkeit ist nach [3,5]:

$$c = 1 + 17 \cdot \left( \frac{W}{h} \right)^{1,5} \quad (5)$$

$W$  - Rauigkeit [m],  $h$ - Rissöffnungsweite [m]

Reynoldszahl:

$$\text{Re} = \frac{D_h \cdot V}{\nu} \quad (6)$$

wobei  $\nu$ - kinematische Viskosität,  $V$  - Strömungsgeschwindigkeit

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

$\eta$  - dynamische Viskosität des Fluids

$\rho$  - Dichte des Fluids

$$\text{Re} = \frac{D_h \cdot V \cdot \rho}{\eta} = \frac{2 \cdot Q \cdot \rho}{\pi \cdot r \cdot \eta} \quad (7)$$

Nach dem Einsetzen von (3), (5), (6), (7) in (4):

$$\frac{dP}{dr} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{2 \cdot h} \cdot \frac{96}{2 \cdot Q \cdot \rho} \cdot c \cdot \frac{Q^2}{\pi^2 \cdot r^2(t) \cdot h^2} \quad (8)$$

$$\frac{dP}{dr} = 12 \cdot c \cdot \frac{Q(t) \cdot \eta}{\pi \cdot r(t) \cdot h^3} \quad (9)$$

$$dP = 12 \cdot c \cdot \frac{Q(t) \cdot \eta}{\pi \cdot r(t) \cdot h^3} dr \quad (10)$$

$$\int_{P(R_0)}^{P(R_{MAX})} dP = \int_{R_0}^{R_{MAX}} 12 \cdot c \cdot \frac{Q(t) \cdot \eta}{\pi \cdot h^3} \cdot \frac{1}{r(t)} dr \quad (11)$$

$$P(R_{MAX}) - P(R_0) = 12 \cdot c \cdot \frac{Q \cdot \eta}{\pi \cdot h^3} \cdot (\ln R_{MAX}(t) - \ln R_0) \quad (12)$$

$$Q(r) = \frac{P(R_{MAX}) - P(R_0)}{\ln\left(\frac{R_{MAX}(t)}{R_0}\right)} \cdot \frac{\pi \cdot h^3}{12 \cdot c \cdot \eta} \quad (13)$$

Aus den Bedingungen der Kontinuität:

$$\frac{\pi}{2} \cdot (R_{MAX}^2 - R_0^2) \cdot h = \int_0^{t_{R_{max}}} Q(t) dt \quad (14)$$

Nach dem Differenzieren:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\pi}{2} \cdot (R_{MAX}^2 - R_0^2) \cdot h \right) = \frac{d}{dt} \left( \int_0^{t_{R_{max}}} Q(t) dt \right) \quad (15)$$

$$\frac{\pi}{2} \cdot h \cdot \frac{dR_{MAX}^2}{dt} = Q(t) \quad (16)$$

Dann aus (13) und (16):

$$\frac{\pi}{2} \cdot h \cdot \frac{dR_{MAX}^2}{dt} = \frac{P(r) - P(R_0)}{\ln\left(\frac{r(t)}{R_0}\right)} \cdot \frac{\pi \cdot h^3}{12 \cdot c \cdot \eta} \quad (17)$$

$$R_{MAX} \cdot \frac{dR_{MAX}}{dt} = \frac{P(R_{MAX}) - P(R_0)}{\ln\left(\frac{R_{MAX}(t)}{R_0}\right)} \cdot \frac{h^2}{12 \cdot c \cdot \eta} \quad (18)$$

$$\frac{dR_{max}}{dt} = \frac{P(R_{max}) - P(R_0)}{R_{max}(t) \cdot \ln\left(\frac{R_{max}(t)}{R_0}\right)} \cdot \frac{h^2}{12 \cdot c \cdot \eta} \quad (19)$$

Dann kann der Strömungsvorgang folgendes dargestellt werden (siehe Abb.26):

- Die Strömung beginnt im Punkt  $r=R_0$ .
- Der Front der Strömung befindet sich im Punkt  $r= R_{max}^{(i)}$ .
- Abstand zwischen den Punkten  $R_{max}^{(i)}$  und  $R_{max}^{(i+1)}$ :

$$\Delta R_{max} = R_{max}^{(i+1)} - R_{max}^{(i)} = \text{const}, \Delta R_{max} \ll R_{max}^{(i)}$$

- Die Zeit, die das strömende Medium Braucht, um aus einem Punkt  $r=R_{max}^{(i)}$  in einen Punkt  $r=R_{max}^{(i+1)}$  zu kommen ist gleich  $\Delta t_i$ .

- Der Front der Strömung befindet sich im Punkt  $r = R_{\max}^{(i)}$  zum Zeitpunkt  $t^{(i)} = \sum_1^i \Delta t^{(i)}$

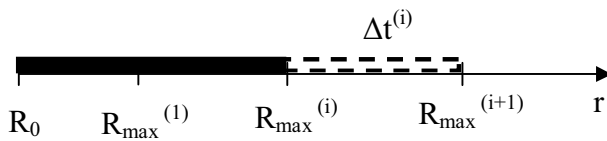


Abb.26: Schema zur Berechnung der Strömungsparameter

$$\frac{dR_{\max}}{dt} = v(R_{\max}) \quad (20)$$

$v(R_{\max})$  - Strömungsgeschwindigkeit im Punkt  $r = R_{\max}$

Dann aus (20) folgt:

$$\Delta t^{(i)} = \frac{\Delta R_{\max}}{v(R_{\max}^{(i)})} \quad (21)$$

Aus diesen Formeln können die Parameter der Strömung zu jedem Zeitpunkt numerisch bestimmt werden.

Weitere Besonderheit bei der Anwendung der Injektionsschläuche ist, dass die Strömungsbereiche im Riss sich überlappen. Um dies zu beachten, muss man folgendes berücksichtigen:

wenn die Reichweite kleiner als der Abstand zwischen den Ausflussspunkten ist (Abb. 27(a)), läuft die Strömung nach den oben beschriebenen Gesetze. Nach dem die Reichweite  $R_{\max}$  größer als der Abstand zwischen den Ausflussspunkten ist (Abb. 27(b)) erfolgt die Strömung nicht mehr radialsymmetrisch, sondern konzentrisch.

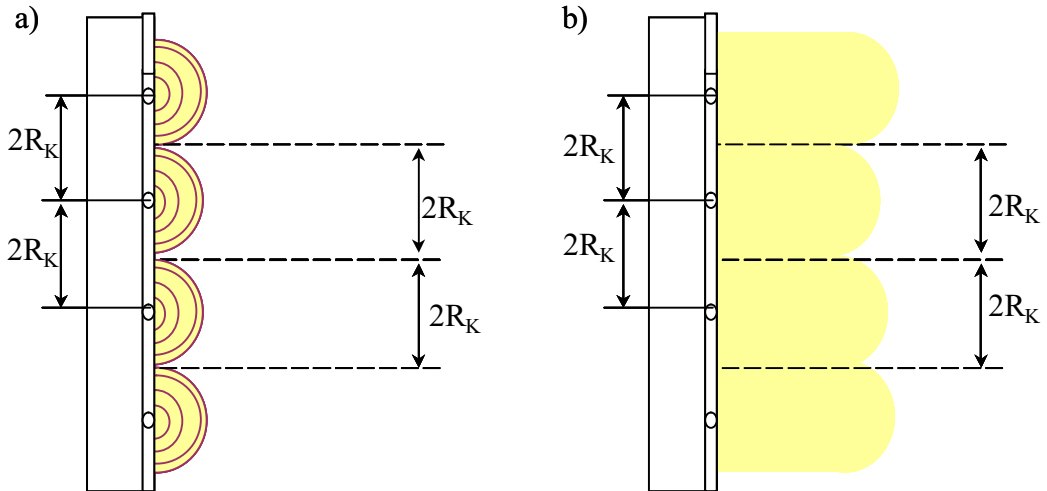


Abb. 27: Schema der Strömung beim Einpressen durch den Injektionsschlauch

Dann kann die Geschwindigkeit der Strömung in der Fuge folgendes bestimmt werden:

$$Q_V = v(r) \cdot A(r) \quad (22)$$

$A(r)$  – durchströmte Fläche [ $\text{m}^2$ ]

$$v(r) = \frac{Q_V}{A(r)} \quad (23)$$

$$A(r) = l(r) \cdot h = 2 \cdot \frac{\arcsin \frac{R_K}{r}}{\pi} \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad (24)$$

wobei  $l(r)$  – Länge der durchströmten Fläche  $l(r) = 2 \cdot \frac{\arcsin \frac{R_K}{r}}{\pi} \cdot \pi \cdot r$ ,

$h$  – Rissöffnungswerte

$2R_K$  – Abstand zwischen den Ausflusspunkten

$$v(r) = \frac{Q_V}{2 \cdot \arcsin \frac{R_K}{r} \cdot r} \quad (25)$$

Analog zu dem Fall der radialsymmetrischen Strömung:

$$I = \frac{dP}{dr} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{D_h} \cdot \lambda \cdot v^2 \quad (26)$$

$$D_h = 4 \cdot \frac{S_0}{U} = 4 \cdot \frac{2 \cdot R_K \cdot h}{2 \cdot (2 \cdot R_K + h)} = 2 \cdot h \quad h \ll 2R \quad (27)$$

$$\lambda = \frac{96}{\text{Re}} \cdot c \quad (28)$$

$$c = 1 + 17 \cdot \left( \frac{W}{h} \right)^{1.5} \quad (29)$$

$$\text{Re} = \frac{D_h \cdot v \cdot \rho}{\eta} = \frac{2 \cdot h \cdot v \cdot \rho}{\eta} \quad (30)$$

$$\frac{dP}{dr} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{2 \cdot h} \cdot \frac{96}{2 \cdot h \cdot v \cdot \rho} \cdot c \cdot v^2 = \frac{12 \cdot \eta}{h^2} \cdot c \cdot v \quad (31)$$

$$dP = \frac{12 \cdot \eta}{h^2} \cdot c \cdot v \cdot dr \quad (32)$$

$$\int_{R_0}^{R_{\max}} dP = \int_{R_0}^{R_{\max}} \frac{12 \cdot \eta}{h^2} \cdot c \cdot v \cdot dr \quad (33)$$

$$P(R_0) - P(R_{\max}) = \frac{12 \cdot \eta}{h^2} \cdot c \cdot \int_{R_0}^{R_{\max}} v \cdot dr \quad (34)$$

Dann aus (25), (3) und (34) folgt

$$P(R_0) - P(R_{\max}) = \frac{12 \cdot \eta}{h^3} \cdot c \cdot \left( \int_{R_0}^{R_K} \frac{Q}{\pi \cdot r} \cdot dr + \int_{R_K}^{R_{\max}} \frac{Q}{2 \cdot \arcsin \frac{R_K}{r}} \cdot dr \right) \quad (35)$$

$$P(R_0) - P(R_{\max}) = \frac{12 \cdot \eta \cdot Q}{h^3} \cdot c \cdot \left( \frac{\ln \left( \frac{R_K}{R_0} \right)}{\pi} + \int_{R_K}^{R_{\max}} 2 \frac{1}{\arcsin \frac{R_K}{r}} \cdot dr \right) \quad (36)$$

$$Q = \frac{P(R_0) - P(R_{\max})}{12 \cdot \eta \cdot c} \cdot \frac{h^3}{\frac{\ln \left( \frac{R_K}{R_0} \right)}{\pi} + \int_{R_K}^{R_{\max}} \frac{1}{2 \cdot \arcsin \frac{R_K}{r}} \cdot dr} \quad (37)$$

Aus den Bedingungen der Kontinuität:



$$A(r) \cdot h = \int_0^{r_{\max}} Q(t) dt \quad (38)$$

$$A(r) = r^2 \cdot \arcsin \frac{R_K}{r} + R_K \sqrt{r^2 - R_K^2} \quad (39)$$

$$Q(t) = \frac{d}{dt} (A(r)) \cdot h \quad (40)$$

$$Q(t) = h \cdot \frac{d}{dt} \left( r^2 \cdot \arcsin \frac{R_K}{r} + R_K \sqrt{r^2 - R_K^2} \right) = \frac{\arcsin \frac{R_K}{r} \cdot dr^2}{dt} + \frac{r^2 \cdot d \frac{R_K}{r}}{dt \cdot \sqrt{1 - \frac{R_K^2}{r^2}}} + R_K \sqrt{r^2 - R_K^2} \cdot d(r^2 - R_K^2) \quad (41)$$

$$Q(t) = h \cdot 2r \cdot \arcsin \frac{R_K}{r} \cdot \frac{dr}{dt} + \frac{R_K r + 4R_K}{2 \cdot \sqrt{1 - \frac{R_K^2}{r^2}}} \cdot \frac{dr}{dt} \quad (42)$$

$$Q(t) = h \cdot \frac{dr}{dt} \cdot \left( 2r \cdot \arcsin \frac{R_K}{r} + \frac{R_K r + 4R_K}{2 \cdot \sqrt{1 - \frac{R_K^2}{r^2}}} \right) \quad (43)$$

$$\frac{P(R_0) - P(R_{\max})}{6 \cdot \eta \cdot c} \cdot \frac{h^3}{\frac{\ln \left( \frac{R_K}{R_0} \right)}{\pi} + \int_{R_K}^{R_{\max}} \frac{1}{\arcsin \frac{R_K}{r} \cdot r} \cdot dr} = h \cdot \frac{dr}{dt} \cdot \left( 2r \cdot \arcsin \frac{R_K}{r} + \frac{R_K r + 4R_K}{2 \cdot \sqrt{1 - \frac{R_K^2}{r^2}}} \right) \quad (44)$$

Analog zur Gleichung (19) für den Fall der radialsymmetrischen Strömung, ist in dem Fall der konzentrischen Strömung:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{P(R_0) - P(R_{\max})}{6 \cdot \eta \cdot c} \cdot \frac{h^2}{\frac{\ln \left( \frac{R_K}{R_0} \right)}{\pi} + \int_{R_K}^{R_{\max}} \frac{1}{2 \cdot \arcsin \frac{R_K}{r} \cdot r} \cdot dr} \cdot \frac{1}{\left( 2r \cdot \arcsin \frac{R_K}{r} + \frac{R_K r + 4R_K}{2 \cdot \sqrt{1 - \frac{R_K^2}{r^2}}} \right)} \quad (45)$$

### 5.3 Ermittlung der Rissöffnungsweite beim Lufteinpressversuch

#### 5.3.1 Theoretische Berechnung des Massenauslaufs beim Lufteinpressversuch

Die Rechnungsschema in diesem Fall wird zur Modellierung der radialsymmetrischen Lüftströmung beim Einpressen durch ein Bohrloch.

Nach [60,65,68,75] werden die Energieverluste (Druckabfall wegen Reibung Abb. 27) in Leitungen beliebigen Querschnitts durch Darcy-Weisbach-Gleichung beschrieben:

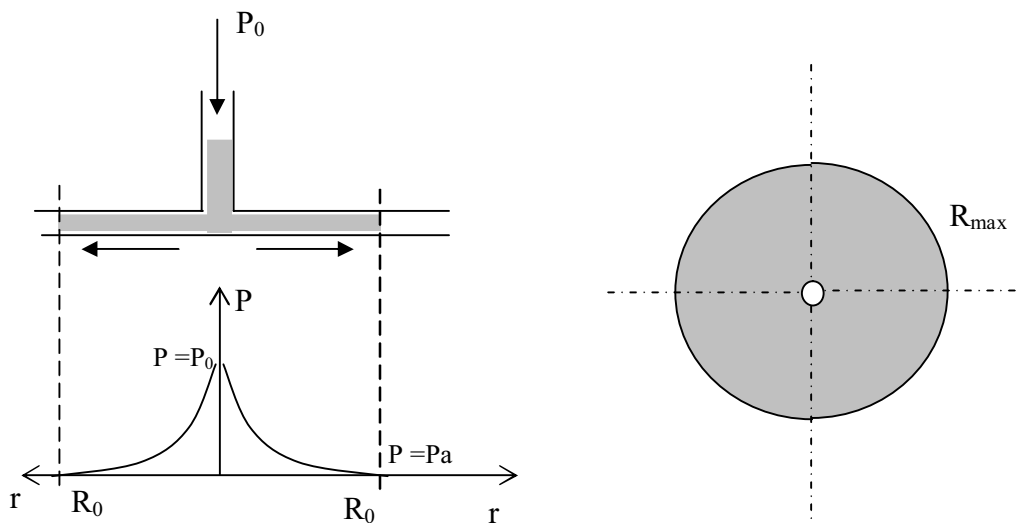


Abb. 27: Druckabfall im Riss. Rechnungsschema zur Modellierung des Lufteinpressversuchs

$$I = \frac{dP}{dr} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{D_h} \cdot \lambda \cdot v^2 \quad (4)$$

wobei

$\frac{dP}{dr}$  - Druckabfall auf  $r$ -Koordinate

$\lambda$  - Widerstandsbeiwert

$v$  - Geschwindigkeit der Strömung

$D_h$  - Hydraulischer Durchmesser

$\rho$  - Dichte des strömenden Mediums

Nach [60,64,68]: für die laminare<sup>1</sup> Strömung im glatten Spalt nach Poiseuille ist der Widerstandbeiwert:

$$\lambda = \frac{96}{\text{Re}} \cdot c, \text{ wobei bei kleinen Öffnungsweiten von Rissen, bzw. sehr großer relativer}$$

Rauhigkeit nach [60,62]:

$$c = 1 + 17 \cdot \left( \frac{W}{h} \right)^{1,5}$$

$\frac{W}{h}$  - Relative Rauhigkeit, W – Rauhigkeit [m], h – Rissöffnungsweite [m].

Durchflussmenge im Riss bei radialsymmetrischer Strömung:

$$Q_v = V \cdot 2\pi \cdot r(t) \cdot h$$

Massenauslauf:

$$Q_m = Q_v \cdot \rho = V \cdot 2\pi \cdot r(t) \cdot h \cdot \rho \quad (46)$$

Dichte des strömenden Mediums in Abhängigkeit vom Druck:

$$\rho = \frac{\rho_0}{P_0} \cdot P \quad (47)$$

$\rho_0$  - Dichte des Gases beim normalen Atmosphärendruck  $P_0$  bei 20°C

Geschwindigkeit der Strömung im Riss bei radialsymmetrischer Strömung:

$$V = \frac{Q_m}{2\pi \cdot r(t) \cdot h \cdot \rho} \quad (48)$$

Hydraulischer Durchmesser aus (27):

$$D_h = 2 \cdot h$$

Nachdem Einsetzen von (47), (48) in (4):

---

<sup>1</sup> Nachweis der Laminarität der Strömung:

Der Übergang der Strömung von laminar zu turbulent geschieht beim kritischen Wert der Reynoldszahl. In kleinen rauen Klüften ist die kritische Reynoldszahl gleich 230.

$$\text{Re} = \frac{D_h \cdot V}{\nu}$$

Aus dieser Formel folgt, dass bei einer Rissöffnungsweite bis 10 Mikrometer die Reynoldszahl den kritischen Wert nur bei einer Geschwindigkeit von 1 m/s erreicht. Solche Geschwindigkeiten sind im vorliegenden Fall nicht erreichbar. Damit findet im Spalt immer laminare Strömung statt.

$$\frac{dP}{dr} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{2 \cdot h} \cdot \frac{96}{\text{Re}} \cdot c \cdot \left( \frac{Q_m}{2\pi \cdot r(t) \cdot h \cdot \rho} \right)^2 \quad (49)$$

Nach dem Einsetzen von (47) in (49):

$$\frac{\rho_0}{P_0} \cdot P \cdot \frac{dP}{dr} = \frac{96}{\text{Re}} \cdot c \cdot \frac{Q_m^2}{16\pi^2 \cdot r^2(t) \cdot h^3} \quad (50)$$

Reynoldszahl: aus (6)

$$\text{Re} = \frac{D_h \cdot V}{\nu}$$

wobei  $\nu$ - kinematische Viskosität des Gases  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

$\eta$  - dynamische Viskosität des Gases

$$\text{Re} = \frac{D_h \cdot \nu \cdot \rho}{\eta} = \frac{2 \cdot h \cdot Q_m}{2\pi \cdot r \cdot h \cdot \eta} = \frac{Q_m}{\pi \cdot r \cdot \eta}$$

(51)

Dann aus (50) und (51):

$$\frac{\rho_0}{P_0} \cdot P \cdot \frac{dP}{dr} = \frac{96}{\frac{Q_m}{\pi \cdot r \cdot \eta}} \cdot c \cdot \frac{Q_m^2}{16\pi^2 \cdot r^2(t) \cdot h^3} \quad (52)$$

$$\frac{\rho_0}{P_0} \cdot P \cdot \frac{dP}{dr} = 6 \cdot \eta \cdot c \cdot \frac{Q_m}{\pi \cdot r(t) \cdot h^3} \quad (53)$$

$$P \cdot dP = 6 \cdot \eta \cdot c \cdot \frac{Q_m}{\pi \cdot r(t) \cdot h^3} \cdot \frac{P_0}{\rho_0} \cdot dr \quad (54)$$

Nach der Integration

$$\int_{P(R_0)}^{P(R_{MAX})} P \cdot dP = \int_{R_0}^{R_{MAX}} 6 \cdot \eta \cdot c \cdot \frac{Q_m}{\pi \cdot r(t) \cdot h^3} \cdot \frac{P_0}{\rho_0} \cdot dr$$

(55)

$$P^2(r) - P^2(R_0) = 12 \cdot \eta \cdot c \cdot \frac{Q_m}{\pi \cdot h^3} \cdot \frac{P_0}{\rho_0} \cdot (\ln R_{MAX} - \ln R_0) \quad (56)$$

Dann Massenauslauf:

$$Q_m = \frac{P^2(R_{MAX}) - P^2(R_0)}{\frac{12 \cdot \eta \cdot c}{\pi \cdot h^3} \cdot \frac{P_0}{\rho_0} \cdot \ln \frac{R_{MAX}}{R_0}}$$

(57)

Wobei  $c = 1 + 17 \cdot \left(\frac{W}{h}\right)^{1,5}$ , dann:

$$Q_m(t) = \frac{P^2(R_{MAX}(t)) - P^2(R_0)}{\frac{12 \cdot \eta}{\pi} \cdot \frac{1 + 17 \cdot \left(\frac{W}{h}\right)^{1,5}}{h^3} \cdot \frac{P_0}{\rho_0} \cdot \ln \frac{R_{MAX}(t)}{R_0}} \quad (58)$$

Aus dieser Gleichung kann der Massenauslauf der eingepressten Luft bestimmt werden. Die Masse der Luft, die noch in der Kammer bleibt, kann auf folgende Weise bestimmt werden:

$$m_{rest}(t) = M_0 - \int_0^t Q_m(t) dt \quad (59)$$

Wobei  $M_0$  – Anfangsmasse der eingepressten Luft.

Die Rissöffnungsweite  $h$  ist nicht bekannt. Diese Variable muss dann aus dem Vergleich vom experimentell gemessenen Massenauslauf und vom durch diese Gleichungen ermittelten Massenauslauf bestimmt werden.

### 5.3.2 Auswertung der Daten aus dem Lufteinpressversuch

Beim Gaseinpressversuch wird der Druckabfall (P) im Laufe der Zeit gemessen.

Aus der Zustandsgleichung für Gase:

$$P \cdot V_0 = \frac{m}{\mu} RT \quad (60)$$

$V_0$  – Volumen der Kammer und der Messeinrichtung, entspricht dem Anfangsvolumen des Gases  $V_0 = \text{const}$

T – Temperatur,  $T = \text{const}$

$R^U$  – universelle Gaskonstante

m – Masse des Gases

$\mu$  – Molarmasse des Gases

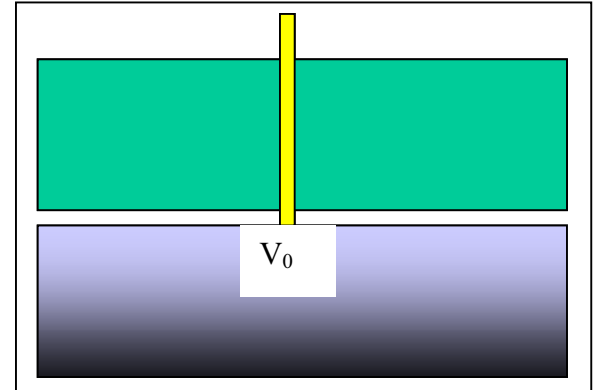


Abb. 24: Schema des Modells

Aus (60) folgt:

$$m = \frac{P \cdot V_0 \cdot \mu}{R^U T} \quad (61)$$

Die Masse der Luft ( $M(t)$ ), die noch in diesem Volumen ( $V_0$ ) bleibt kann aus der Messung des Druckabfalls ermittelt werden.

$$M_{\text{exp}}(t) = \frac{P(t) \cdot V_0 \cdot \mu}{R^U T} \quad (62)$$

### 5.3.3 Ermittlung von Kluftöffnungsweite

Bei der Auswertung von der Messungsergebnisse wird eine Grafik  $M_{\text{exp}}(t)$  dargestellt. Danach werden die Grafen  $m(t)$  bei verschiedenen Öffnungsweiten nach den ermittelten Werten gezeichnet. Aus diesen ermittelten Kurven muss die Kurve ausgewählt werden, die am besten mit den gemessenen Daten übereinstimmt.

## 5.4 Experimentelle Überprüfung des Modells

### 5.4.1 Laboruntersuchungen

Zur Validierung des Modells wurden Laboruntersuchungen mit einem Versuchstand (Spaltmodell) durchgeführt. Der Versuchstand ist ein physikalisches Modell einer Kluft mit 2 parallelen Oberflächen mit einstellbarer Öffnungsweite. (Abb.28, Abb.29)

Der Stand besteht aus 2 Scheiben mit einem Durchmesser von 50 cm. Eine Scheibe ist aus Plexiglas (25 cm hoch) und die andere aus Stahl (8 cm hoch). Die Breite des Spaltes kann durch die Einlage eines kalibrierten Fugebandes eingestellt werden.

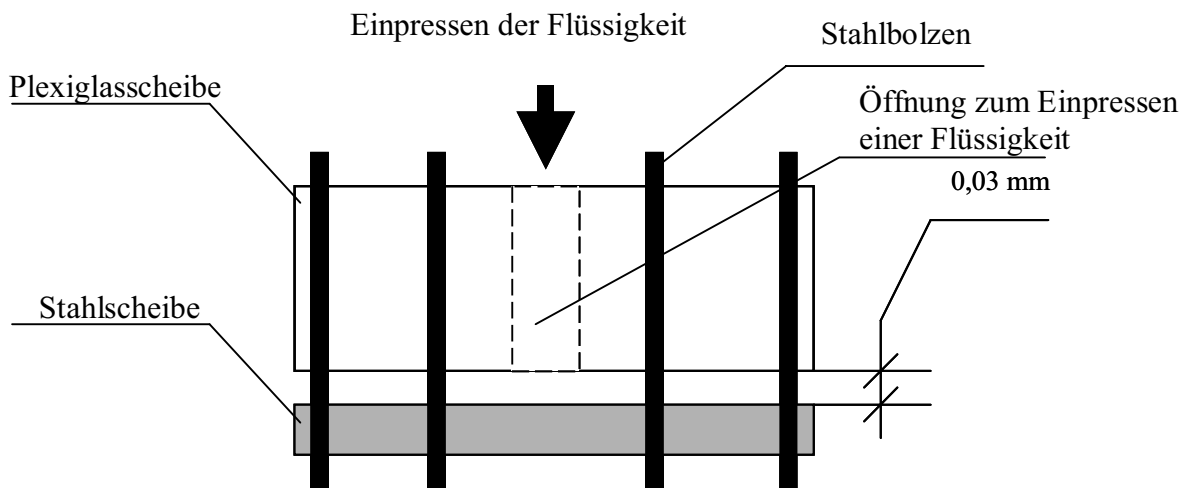


Abb.28: Das Schema des Versuchstandes zur Prüfung des Modells



Abb.29: Der Versuchstand zur Prüfung des mathematischen Modells der Kluftströmung.

Zum Verhindern der Veränderung der Spaltbreite wurden die Scheiben mit 10 M12 Bolzen fixiert. Das Einpressen der Flüssigkeit erfolgt durch eine Öffnung mit einem Durchmesser von 26 mm in der Plexiglasscheibe. Zur Durchführung der Versuche wurde die minimale einstellbare Spaltbreite ausgewählt, die 0,03 mm betrug.

Im Laufe der Experimente wurde geplant das Einpressen von 3 Arten von Flüssigkeit durchzuführen:

- Wasser (dynamische Viskosität 1 mPas)
- Glycerin (dynamische Viskosität 90 mPas)
- Hydroseal – Produkt der Ölverarbeitung, Lösungsmittel für Bitumen (dynamische Viskosität 40 mPas)
- Olivenöl (dynamische Viskosität 70 mPas)

Das Einpressen wurde unter Wirkung des Eigengewichtes der Flüssigkeitssäule durchgeführt. Beim Einpressdruck über 2 bar läuft die Verbreitung der Strömungsfront zu schnell (die Verbreitung der am dickflüssigsten Flüssigkeit – Glycerin läuft innerhalb von 2 s durch) – dies schließt die Möglichkeit aus, Messungen durchzuführen.

Zu beachten ist, dass die Strömung bei solchem geringen Druck durch die Kapillarität beeinflusst wird. Dabei war dieser Einfluss im Versuch mit Hydroseal so stark, dass die Verbreitung der Strömungsfront auf 20 cm in 14 s geschah (Einpressdruck in dem Fall war fast gleich dem Atmosphärdruck). Aus diesem Grund wurde auf weitere Versuche mit dieser Flüssigkeit verzichtet.

Zum Ausschließen des Einflusses der Kapillarität auf die Rechnungen wurden für andere Flüssigkeiten Versuche durchgeführt, bei denen der Flüssigkeitstransport nur unter Einwirkung der Benetzungskräfte erfolgt. Dabei wurden die Diagramme der Strömung erfasst und die Daten nach dem Modell zurückgerechnet, um den Einfluss der Benetzungskräfte durch den äquivalenten Einfluss des Einpressdrucks in den Rechnungen zu ersetzen. So wurde ein äquivalenter Wert des Kapillardrucks bestimmt.

Die Diagramme der Strömung des Glycerins im Spalt und die Diagramme des Kapillardrucks sind auf den Abb.30 und Abb.31 dargestellt.



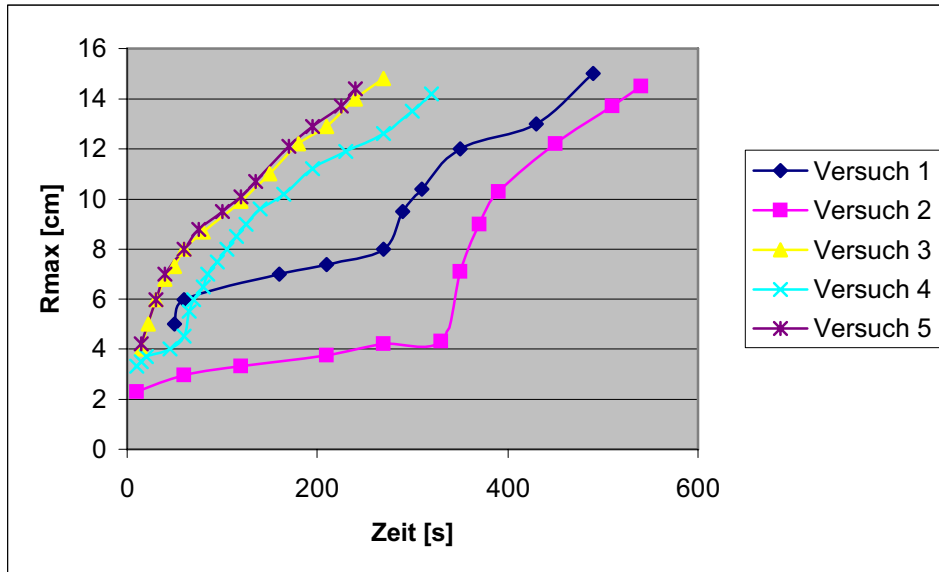


Abb. 30: Strömung des Glycerins im Versuchsstand

In Versuchen 3 und 5 wurde der Behälter von Anfang an voll gemacht, in den anderen Versuchen wurde am Anfang nur sehr wenig Flüssigkeit eingeschüttet und dann, wenn die Strömung unter Einwirkung von Kapillarität aufgehört hatte, wurde die Säule voll gemacht.

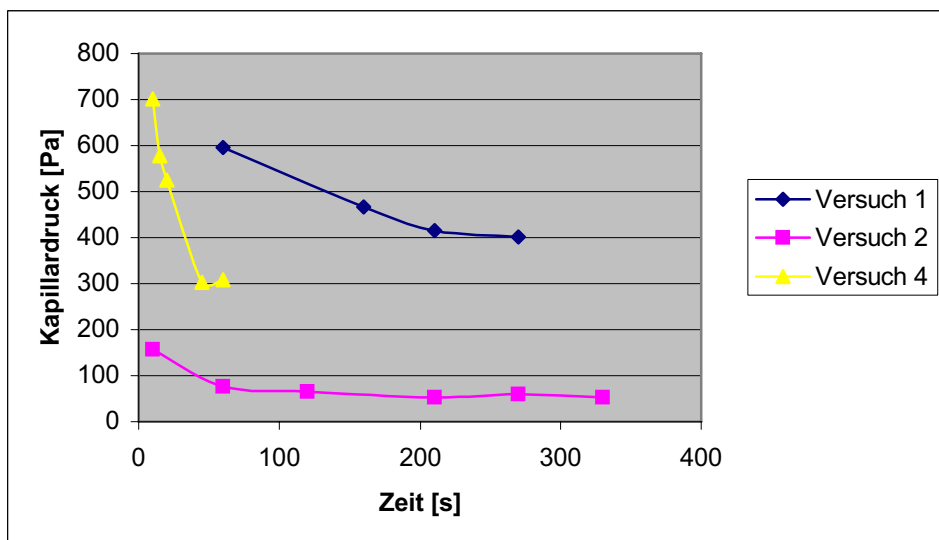


Abb. 31: Berechtigter Kapillardruck bei der Strömung im Versuchsstand

Aus den Diagrammen des Kapillardrucks ist zu sehen, dass im Laufe der Zeit der Kapillardruck zu einer Konstante wird. Der Unterschied zwischen den Werten ist von den verschiedenen Flüssigkeitsmengen in der Säule verursacht (und dementsprechend hat der hydrostatische Druck der Säule unterschiedliche Werte). Die extrem hohen Werte des Drucks an Anfang des Versuchs können sowohl durch die Wirkung der

Energie der fallenden Flüssigkeit (dynamischer Druck), als auch durch die Toleranzen bei der Messung am Anfang infolge der hohen Strömungsgeschwindigkeit in den ersten Sekunden erklärt werden. Die Werte des Kapillardrucks (Abb. 31) wurden nach dem Modell Kap.5.2 (Gleichungen 19-21) aus den gemessenen Daten des Strömungsverlaufs zurückgerechnet. In diesem Fall wurde die Geschwindigkeit der Strömung aus der Gemessenen Daten zu jedem Zeitpunkt gerechnet, und dann wurde ein zu der berechneten Geschwindigkeit passender Druck ( $P_0$ ) für jeden Zeitpunkt bestimmt.

Nach dem Modell wurden die Strömungsparameter beim kompletten Auffüllen der Säule am Anfang der Strömung bestimmt. Das Strömungsdiagramm nach dem Modell (gemäß Gleichungen (19-21)) und der Vergleich der berechneten Daten mit den gemessenen sind in der Abb.32 dargestellt. Dabei wurde eine relative Rauigkeit von 0,16 angenommen. Die Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs in diesen Experimenten sind im Anhang 1 (Punkt 2) zu finden.

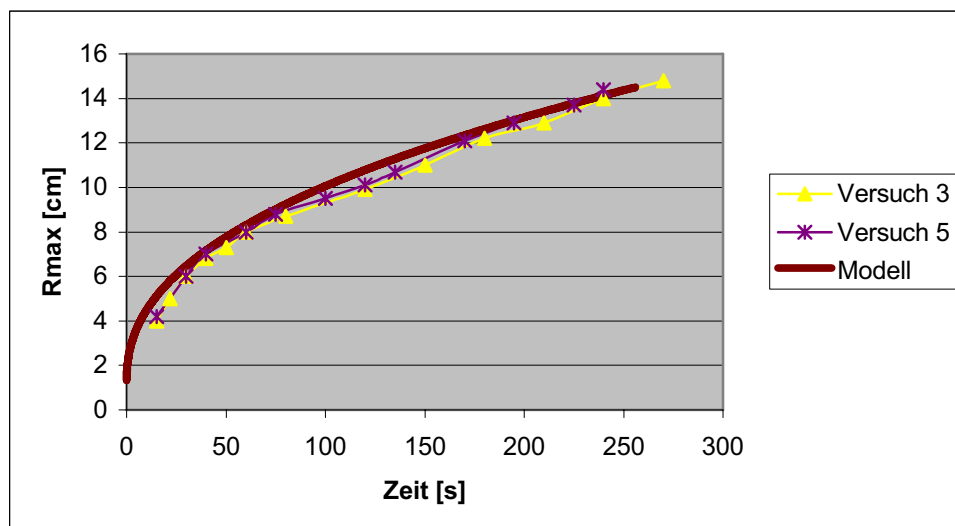


Abb.32: Strömungsdiagramm nach dem Modell und der Vergleich der berechneten Daten mit den gemessenen

Für jeden Versuch, bei dem sich die Flüssigkeit am Anfang unter Einwirkung der Benetzungskräfte bewegt hatte, wurden ebenfalls die Strömungsparameter berechnet. Dafür wurde am Anfang der Strömung der Druck gleich dem Kapillardruck aus der Abb. 31 angenommen.

Die Strömungsdiagramme nach dem Modell (gemäß Gleichungen (19-21)) und der Vergleich der berechneten Daten mit den gemessenen für die Versuche 1, 2, 4 sind in der Abb.33 dargestellt.

Wie es aus den Diagrammen zu sehen ist, haben die berechneten Strömungsparameter gute Übereinstimmung mit den Messdaten gezeigt.

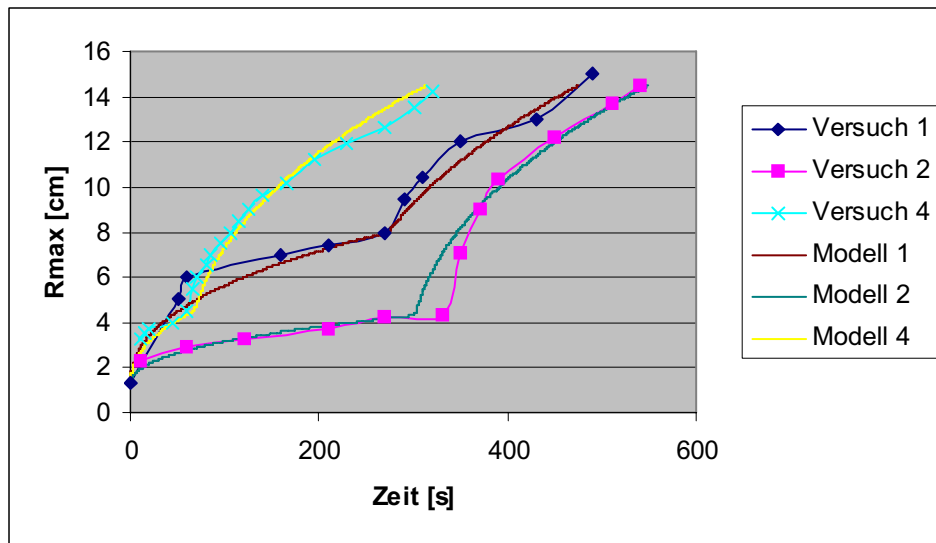


Abb.33: Strömungsdiagramm nach dem Modell und der Vergleich der berechneten Daten mit den gemessenen

#### 5.4.2 In-situ Versuche

Zur Eignungsprüfung des Einpressens eines Polymerstoffes in die Auflockerungszone, der Möglichkeit der Beobachtung der Verbreitung des Injektionsstoffes in der Fuge und zur Prüfung der Dichtheit der Abdichtung aus Polymerstoffen wurden folgende in-situ Versuche durchgeführt:

##### 5.4.2.1 Versuche mit Oberflächenpackern

#### Versuchskomplex 1

##### Versuch 1.

Am Stoß wurde eine Fläche von (500x500) mm mit einer Stärke von 10 cm zubetoniert. (Abb. 34) Der Stoß wurde vor der Betonage 10 cm tief beraubt. Danach wurde im Zentrum dieser Fläche ein Loch mit 20 mm Durchmesser und 20 mm tief gebohrt. In den Ecken der Fläche wurden die Anker installiert, die später die Schalung halten werden und zusammen mit der Stahlplatte die Deformationen beim Einpressen des

Kunststoffs verhindern werden. In der Mitte der Oberfläche wurde ein Stahlröhrchen für die Permeabilitätsmessung mit Luft einbetoniert (Abb. 35).



Abb. 34: Oberflächenpacker

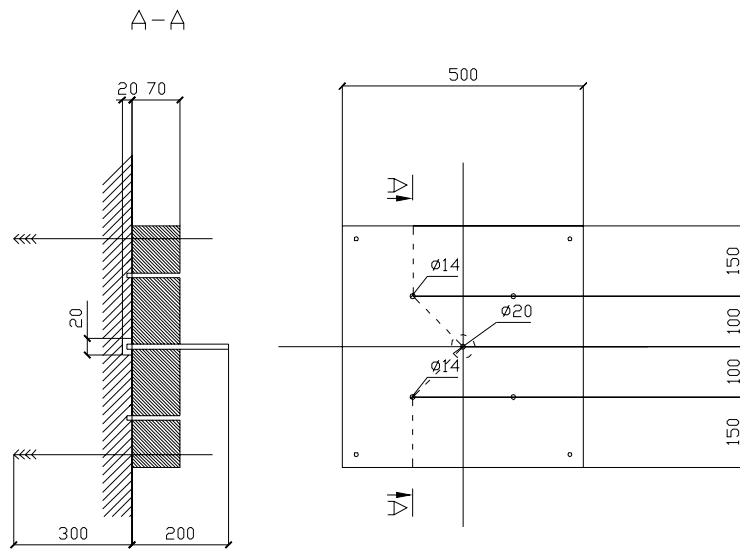


Abb. 35: Schema des Oberflächenpackers

Nach dem Erstarren des Betons wurde durch das Stahlröhrchen Luft eingepresst und der Druckabfall in Abhängigkeit von der Zeit kontrolliert. Das Diagramm zur Berechnung der Spaltöffnungsweite ist in der Abb. 36 dargestellt. Die Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite sind im Anhang 1 (Punkt 3.1, 3.2) zu finden. In der Abb.36 ist der Vergleich der verbleibenden Masse der Luft in der Versuchskammer (siehe Kap. 5.3, Abb. 24), die aus den Messdaten gerechnet wurde, und der verbleibenden Masse der Luft in der Versuchskammer, die nach dem Modell (gemäß Gleichungen (58-59)) bei einer Rissöffnungsweite von 0,0018 mm gerechnet wurde, angegeben.

Auf Basis dieser Daten wurde die Durchlässigkeit des Gesamtsystems bestimmt. Danach wurden in den Packer die Bohrlöcher eingebracht. Durch diese Bohrlöcher wurde mit Injektionspackern der niedrigviskose Kunststoff eingepresst. Der Abstand zwischen den Bohrlöchern wurde aus der Berechnung der Reichweite der Injektion in der Auflockerungszone ausgewählt. Die Diagramme zur Berechnung der Reichweite der Injektion laut dem obenbeschriebenen Modell der Spaltströmung (gemäß Gleichungen (19-21)) sind in der Abb. 37 dargestellt. Die Berechnung beruht auf den Daten, die aus dem Lufteinpressversuch (Abb.36) bekommen wurden.

Die Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs sind im Anhang 1 (Punkt 3.3) zu finden.

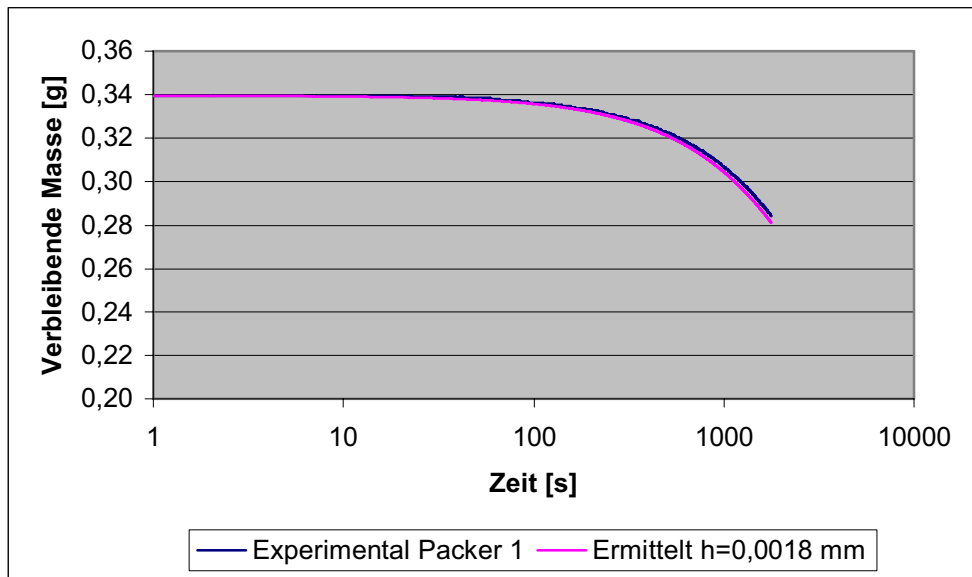


Abb.36: Messergebnis und Berechnungsergebnis der Spaltöffnungsweite vom Packer 1

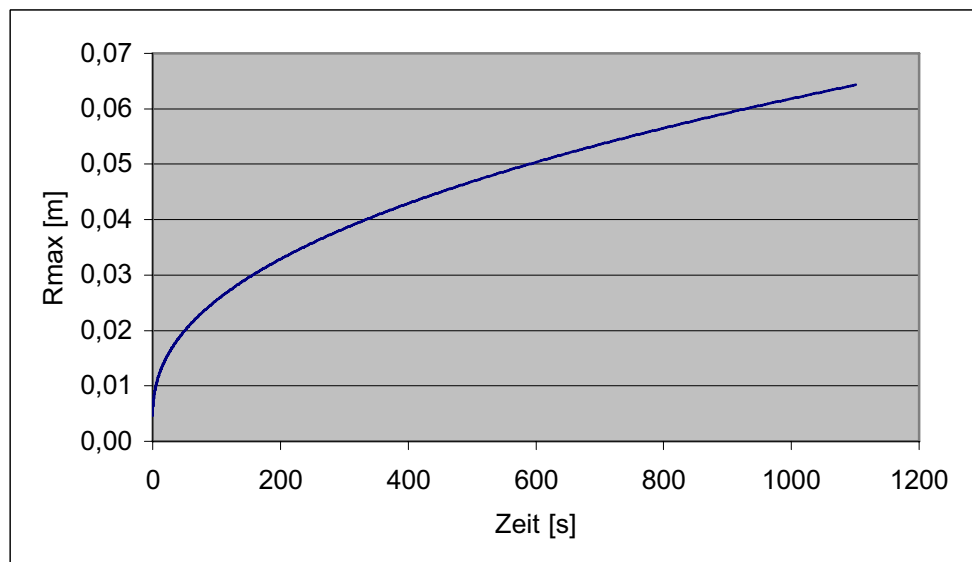


Abb.37: Berechnung der Injektionsreichweite vom Packer 1

Nach dem Erhärten des Polymerstoffes in der Fuge zwischen dem Beton und dem Bauwerk wurde in das Stahlröhrchen wieder Luft eingepresst und der Druckabfall beobachtet. Die Daten des Druckabfalls sind im Anhang 1(Punkt 3.4) zu finden.

Die Lufteinpressversuche haben folgende Werte vor und nach der Injektion gezeigt (Tabelle 5.4.1):

Tabelle 5.4.1: Vergleich der Permeabilitätswerte vor und nach der Injektion [104]

Bezeichnung des Versuchs	Gemessene Permeabilität	
	Vor der Injektion	Nach der Injektion
Oberflächenpacker 1	$8 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$	$6 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$

In dieser Tabelle und aus den Daten des Druckabfalls ist zu sehen, dass nach der Injektion die Gesamtdurchlässigkeit sich erhöht hat. Das ist sowohl auf die Besonderheiten des Messverfahrens, als auch auf das Abdichtungsverfahren zurückzuführen. Durch einen Lufteinpressversuch wird eine Integrale Durchlässigkeit bestimmt. Beim Bohren wird der gesamte Strömungsverlauf geändert. Dadurch, dass die Durchlässigkeit der Betonplatte verringert wird, wird die Durchlässigkeit der Fuge erhöht. Dieser Versuch konnte deshalb nicht als repräsentativ angenommen werden. Für zukünftige Untersuchungen wurde beschlossen, ein Verfahren ohne Bohrungen zum Abdichten zu verwenden.

## Versuch 2

Das Experiment wurde analog zum Versuch 1 durchgeführt, aber vor der Betonage wurde der Stoß mit dem Polymerstoff auf Epoxyd-Basis (Denepox 40) beschichtet. Die Betonage wurde 24 Stunden nach der Stoßberaubung und Beschichtung durchgeführt. Die weiteren Schritte waren identisch mit dem Verlauf des Experimentes 1. Das Diagramm zur Berechnung der Spaltöffnungsweite ist in Abb. 38 dargestellt. Die Daten des Druckabfalls sind im Anhang 1(Punkt 4.1, 4.2) zu finden. In der Abb.38 ist der Vergleich der verbleibenden Masse der Luft in der Versuchskammer (siehe Kap. 5.3, Abb. 24), die aus den Messdaten gerechnet wurde, und der verbleibenden Masse der Luft in der Versuchskammer, die nach dem Modell (gemäß Gleichungen (58-59)) bei einer Rissöffnungsweite von 0,0033 mm gerechnet wurde, angegeben.

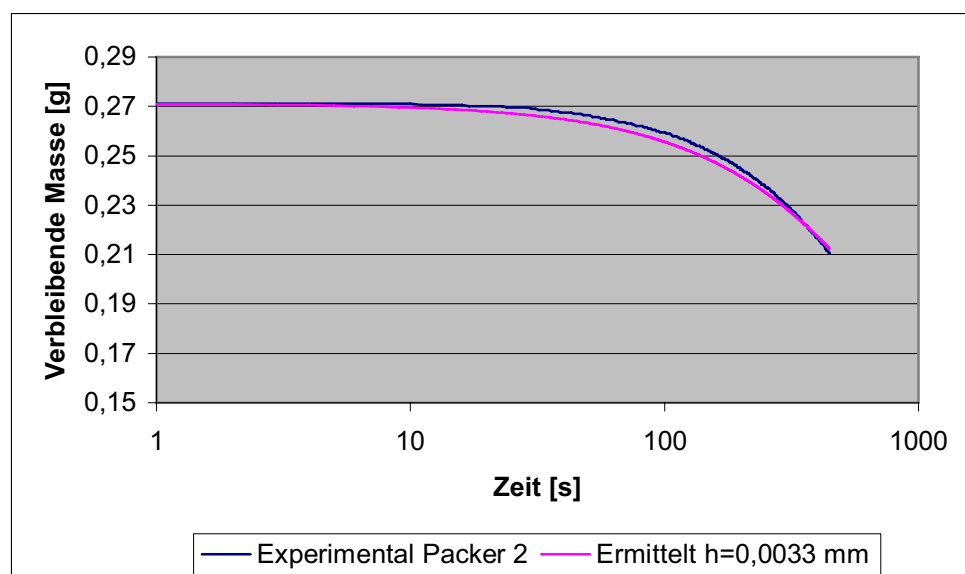


Abb.38: Messergebnis und Berechnungsergebnis der Spaltöffnungsweite vom Packer 2

Das Experiment hatte die gleichen Ergebnisse, wie das vorherige (Tabelle 5.4.2).

Tabelle 5.4.2: Vergleich der Permeabilitätswerte vor und nach der Injektion [104]

Bezeichnung des Versuchs	Gemessene Permeabilität	
	Vor der Injektion	Nach der Injektion
Oberflächenpacker 2	$7 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$	$1,5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$

Die Daten aus dem Lufteinpressversuch nach dem Bohren und der Injektion sind im Anhang 1 (Punkt 4.4) zu finden.

### Versuch 3.

Das Experiment wurde analog zum Versuch 2 durchgeführt. Nach der Stoßberaubung wurde aber im Zentrum der Oberfläche ein 4-eckiger Einschnitt eingebracht (Abb. 39). Die Abmessungen des Einschnittes sind (200x200) mm, die Tiefe beträgt 10 mm. In den Einschnitt wurde ein Injektionsschlauch eingelegt. Ein Schlauchende wurde mit einem Nippel auf der Oberfläche des Packers einbetoniert. Auf den Schlauch in den Einschnitt wurde ein Ring aus Edelstahl aufgelegt. Die Abmessungen des Rings sind (200x200x120) mm. Danach wurde die Oberfläche zubetoniert. Das Diagramm zur Berechnung der Spaltöffnungsweite (Laut dem Modell Kap. 5.1) aufgrund der Daten aus dem Lufteinpressversuch ist in Abb. 40 dargestellt. Die Daten des Druckabfalls sind im Anhang 1 (Punkt 5.1, 5.2) zu finden.

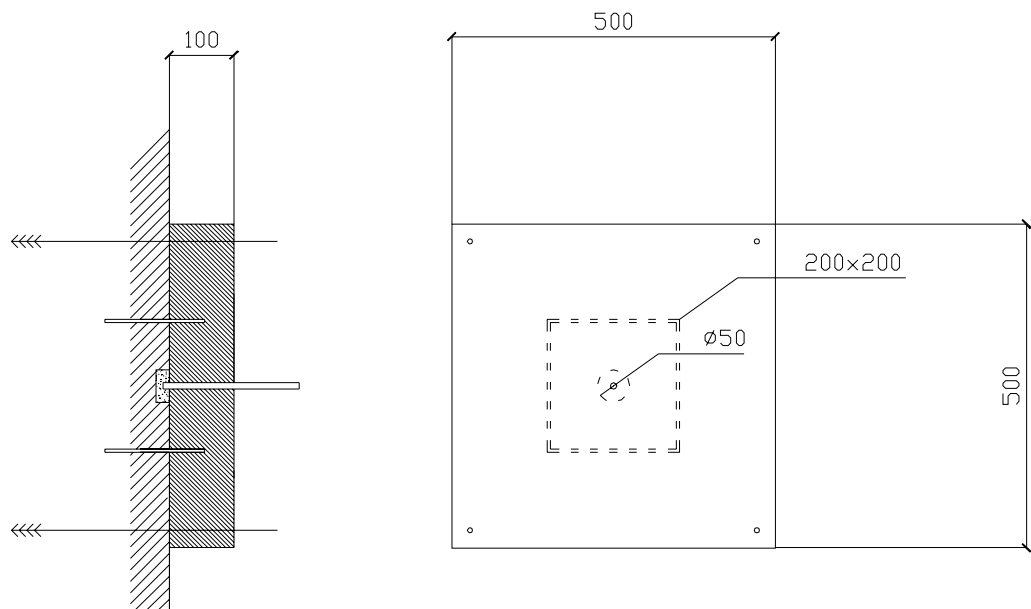


Abb.39: Oberflächenpacker 3 mit dem Stahlring



In der Abb.40 ist der Vergleich der verbleibenden Masse der Luft in der Versuchskammer (siehe Kap. 5.3, Abb. 24), die aus den Messdaten gerechnet wurde, und der verbleibenden Masse der Luft in der Versuchskammer, die nach dem Modell (gemäß Gleichungen (58-59)) bei einer Rissöffnungsweite von 0,0205 mm gerechnet wurde, angegeben.

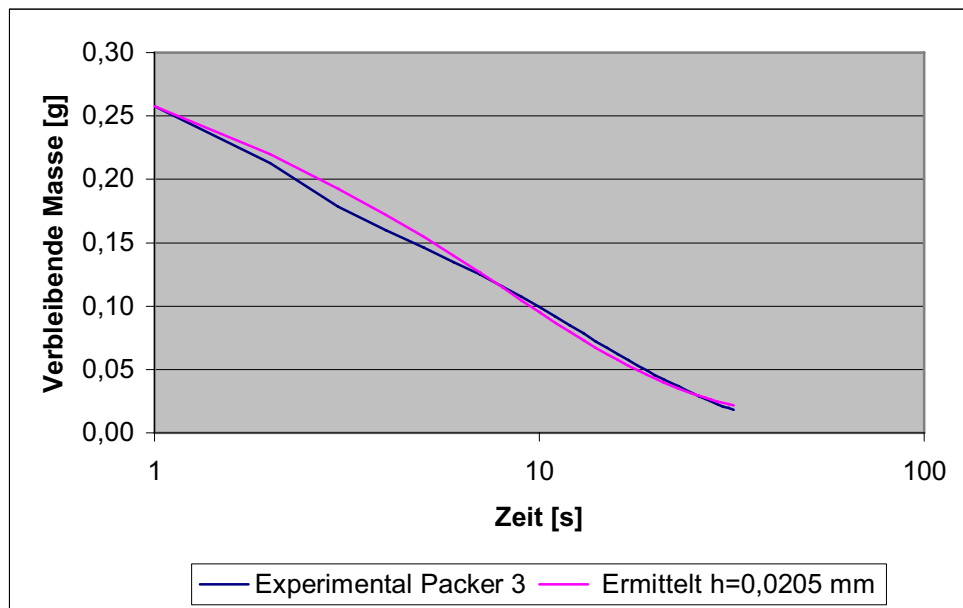


Abb. 40: Messergebnis und Berechnungsergebnis der Spaltöffnungsweite vom Packer 3

Danach wurde durch den Injektionsschlauch der niedrigviskose Polymerstoff eingepresst.

Nach dem Aushärten wurde noch mal die Durchlässigkeit gemessen. Das Diagramm zur Berechnung der Reichweite der Injektion (Laut dem Modell Kap. 5.2 (gemäß Gleichungen (19-21))) ist in der Abb. 41 dargestellt. Die Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs sind im Anhang 1 (Punkt 5.3) zu finden.

Im Gegensatz zu den vorherigen Versuchen wurde in diesem Experiment eine Verminderung der Durchlässigkeit nach der Injektion festgestellt. (Siehe Tabelle 5.4.3)

Tabelle 5.4.3: Vergleich der Permeabilitätswerte vor und nach der Injektion [104]

Bezeichnung des Versuchs	Gemessene Permeabilität	
	Vor der Injektion	Nach der Injektion
Oberflächenpacker 3	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$	$3 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$

Das spricht dafür, dass bei der Abdichtung nur Verfahren ohne Bohrungen angewendet werden sollen.

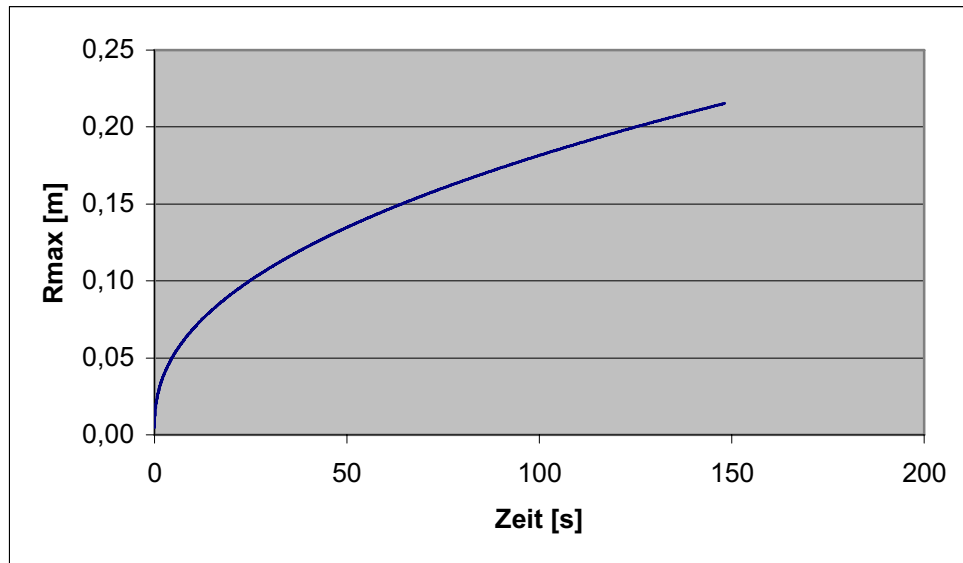


Abb.41: Berechnung der Injektionsreichweite vom Packer 3

## Versuchskomplex 2

Im Versuchskomplex 2 wurden vier Oberflächenpackerversuche (OP-4, OP-5, OP-6, OP-7) und zwei Bohrlochversuche (BL-1, BL-2) durchgeführt. Das Schema des Versuchskomplexes 2 ist in Abb. 42 und Abb. 43 dargestellt.

### Versuche 4, 5

Die Experimente wurden analog zum Versuch 2 durchgeführt. Der Stoß wurde beraubt und für 7 Tage so belassen. Danach wurden die Injektionsschläuche am Stoß befestigt und in den bestimmten Stellen die Anker eingebaut (um später die Schalung zu halten). Danach wurde die Schalung eingerichtet und die Oberflächenpacker betoniert (Abb. 44 a, b). 7 Tage nach dem Einrichten wurden die Permeabilitätswerte bei jedem Packer gemessen. Nach dieser Messung wurde das Injektionsmaterial eingepresst und dabei die Seitenausstritte am Rand des Packers beobachtet. In 7 Tagen wurden die Permeabilitätswerte bei jedem Packer wieder gemessen und mit den vorherigen Werten verglichen.

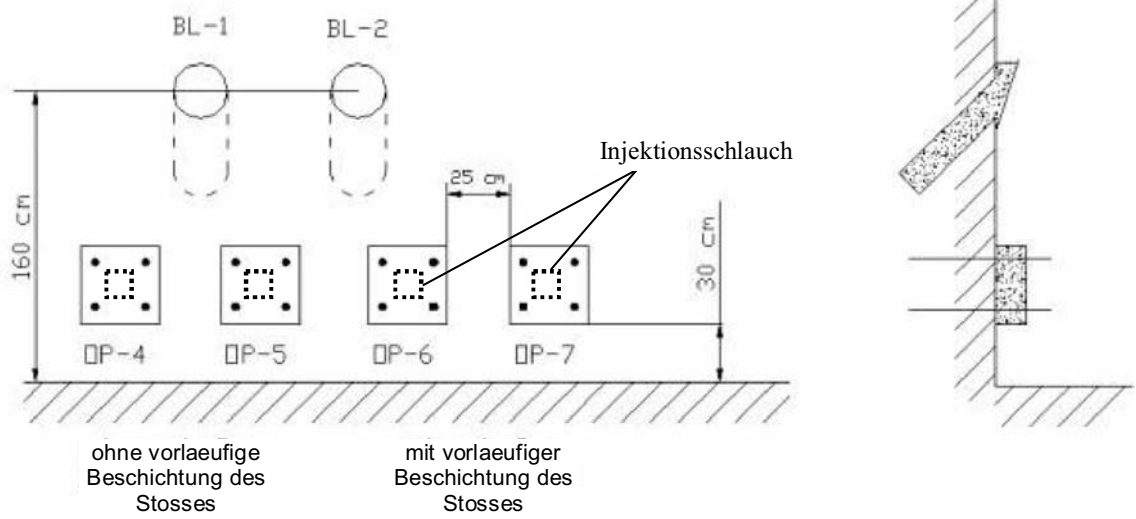


Abb.42: Schema des Versuchskomplexes 2



Abb.43: Versuchskomplex 2

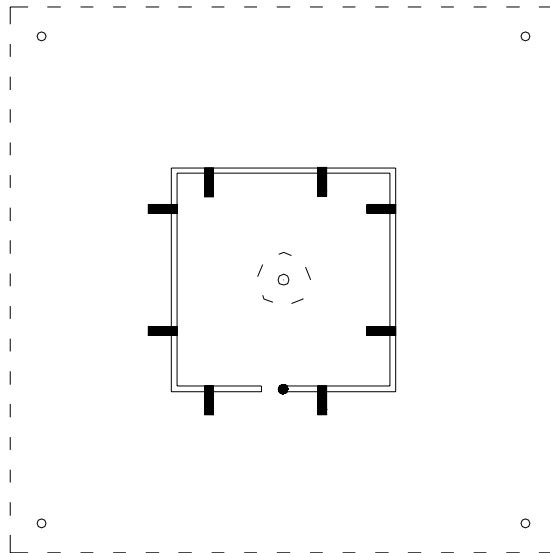


Abb. 44 a.: Befestigung des Injektionsschlauches am Stoß

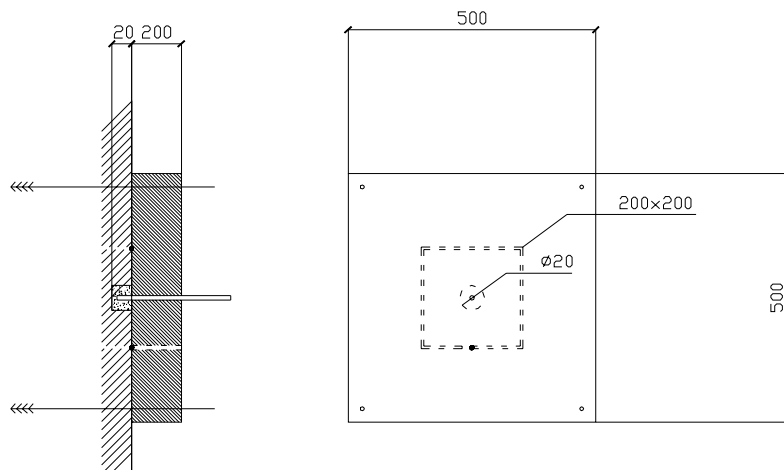


Abb.44 b: Schema der Versuche 4 und 5. Oberflächenpacker mit Injektionsschlauch.

Die Messungen vor dem Verpressen haben eine Permeabilität von  $6,5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  beim OP4 und  $7 \cdot 10^{-16}$  beim OP5 gezeigt. In den Abb. 45 a, 45 b ist der Vergleich der verbleibenden Masse der Luft in der Versuchskammer (siehe Kap. 5.3, Abb. 24), die aus den Messdaten gerechnet wurde, und der verbleibenden Masse der Luft in den Versuchskammern, die nach dem Modell (gemäß Gleichungen (58-59)) bei Rissöffnungsweiten von 0,01 mm und 0,013 mm gerechnet wurde, angegeben. Die Daten zur Berechnung der Rissöffnungsweiten sind im Anhang 1 (Punkt 6.2 und 7.2) zu finden.

Das Diagramm zur Berechnung der Reichweite der Injektion beim Packer 4 (Laut dem Modell Kap. 5.2 (gemäß Gleichungen (19-21))) ist in der Abb. 46a dargestellt. Die

Daten zur Berechnung der Reichweite sind im Anhang 1 (Punkt 6.3) zu finden. Das Diagramm zur Berechnung der Reichweite der Injektion beim Packer 5 (Laut dem Modell Kap. 5.2 (gemäß Gleichungen (19-21))) ist in der Abb. 46b dargestellt. Die Daten zur Berechnung der Reichweite sind im Anhang 1 (Punkt 7.3) zu finden.

Danach wurde durch den Injektionsschlauch bei jedem Packer der niedrigviskose Polymerstoff eingepresst. Nach dem Aushärten wurde noch mal die Durchlässigkeit gemessen. Die Daten des Druckabfalls bei den Lufteinpressversuchen nach der Injektion sind im Anhang 1 (Punkt 6.4, 7.4) zu finden.

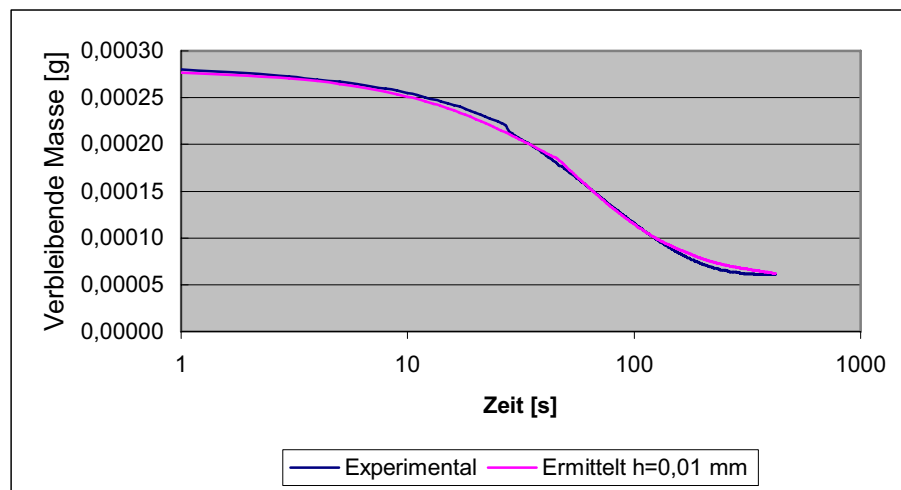


Abb.45 a: Messergebnis und Berechnungsergebnis der Spaltöffnungsweite vom Packer 4

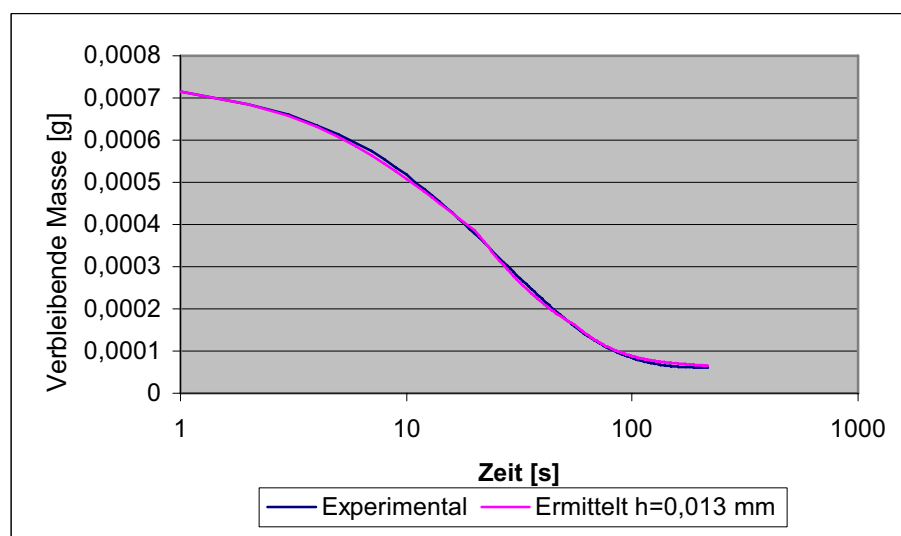


Abb.45 b: Messergebnis und Berechnungsergebnis der Spaltöffnungsweite vom Packer 5

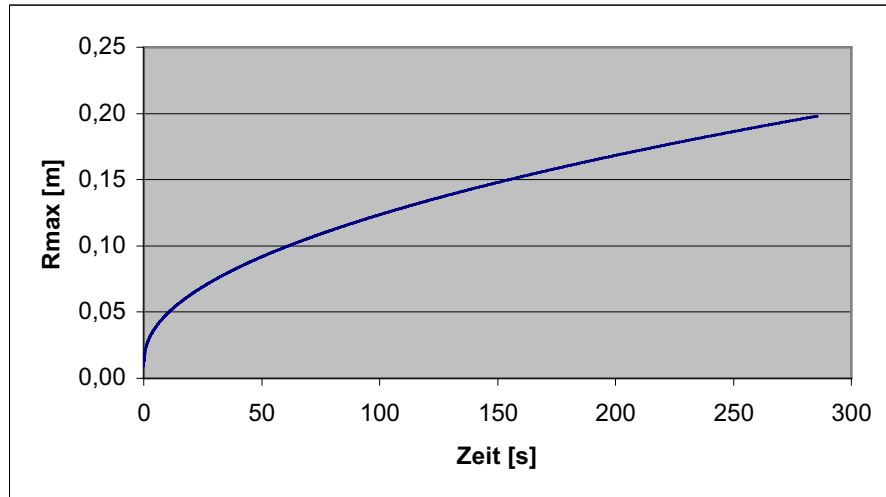


Abb.46 a: Berechnung der Injektionsreichweite vom Packer 4 beim Injektionsdruck von 20 bar

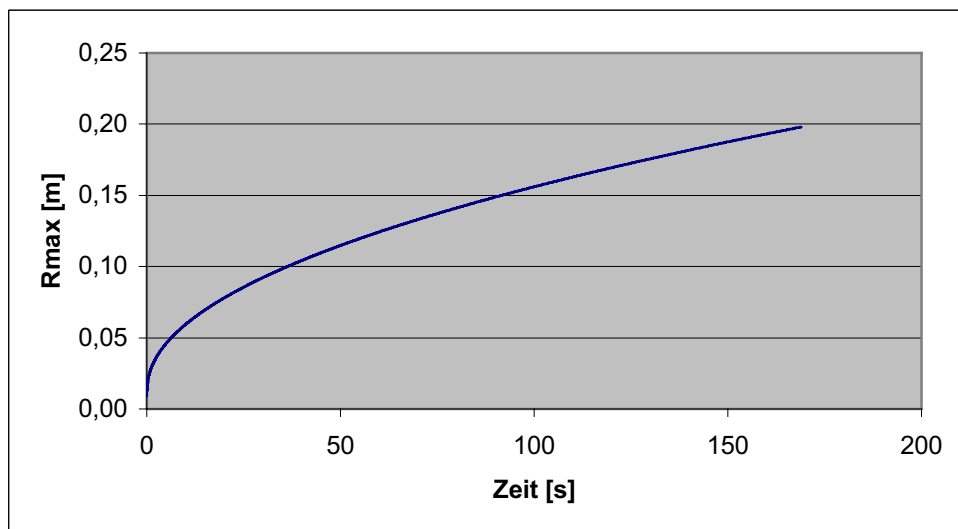


Abb.46 b: Berechnung der Injektionsreichweite vom Packer 5 beim Injektionsdruck von 20 bar

Während der Durchführung der Versuche wurden auch die Verschiebungen des Oberflächenpackers beim Einpressen gemessen, um nachzuweisen, dass keine Vergrößerung der Spaltweite während der Injektion unter Einwirkung des Injektionsdrucks stattfindet. Die Verschiebungen wurden mit einer Messuhr gemessen. Die Toleranzgrenze bei der Messuhr ist 0,001 mm. Die Messungen haben eine Verschiebung von ca. 0,01 mm gezeigt.

Bei der Durchführung der Injektionen ist das Injektionsmittel über den ganzen Umfang des Packers ausgetreten. (Abb. 47) Am Anfang ist es in einigen Punkten und dann gleichmäßig über den ganzen Umfang ausgetreten. Der Injektionsdruck betrug 10-20 bar. Zwischen dem Anfang der Injektion und dem gleichmäßigen Austritt verging ca. 3

Minuten beim Packer 4 und ca. 2 Minuten beim Packer 5. Das zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Modellierung.

### Versuche 6, 7

Die Experimente wurden analog zum Versuch 4 durchgeführt. Aber in diesen Experimenten wurde der Stoß beraubt, mit dem Kunststoffinjektionsmittel „Denepox 40“ von Fa. Deneef beschichtet und für 7 Tage gelassen. Danach wurden die Oberflächenpacker betoniert. 7 Tage nach dem Betonieren wurden die Permeabilitätswerte bei jedem Packer gemessen. Nach dieser Messung wurde das Injektionsmaterial eingepresst und dabei die Seitenausstritte beobachtet. 7 Tage nach dem Einpressen wurden die Permeabilitätswerte bei jedem Packer wieder gemessen und mit den vorherigen Werten verglichen.



Abb.47: Seitenausstritte des Injektionsmittels bei der Durchführung der Injektion

Die Messungen vor dem Verpressen haben eine Permeabilität von  $6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  beim OP6 und  $6 \cdot 10^{-14}$  beim OP7 gezeigt. In den Abb. 48 a, 48 b ist der Vergleich der verbleibenden Masse der Luft in der Versuchskammer (siehe Kap. 5.3, Abb. 24), die aus den Messdaten gerechnet wurde, und der verbleibenden Masse der Luft in den Versuchskammern, die nach dem Modell (gemäß Gleichungen (58-59)) bei Rissöffnungsweiten von 0,014 mm und 0,016 mm gerechnet wurde, angegeben. Die Daten zur Berechnung der Rissöffnungsweiten sind im Anhang 1 (Punkt 8.2 und 9.2) zu finden.

Diagramm zur Berechnung der Reichweite der Injektion beim Packer 6 (Laut dem Modell Kap. 5.2 (gemäß Gleichungen (19-21))) ist in der Abb. 49 a dargestellt. Die Daten zur Berechnung der Reichweite sind im Anhang 1 (Punkt 8.3) zu finden. Das Diagramm zur Berechnung der Reichweite der Injektion beim Packer 5 (Laut dem Modell Kap. 5.2 (gemäß Gleichungen (19-21))) ist in der Abb. 49 b dargestellt. Die Daten zur Berechnung der Reichweite sind im Anhang 1 (Punkt 9.3) zu finden.

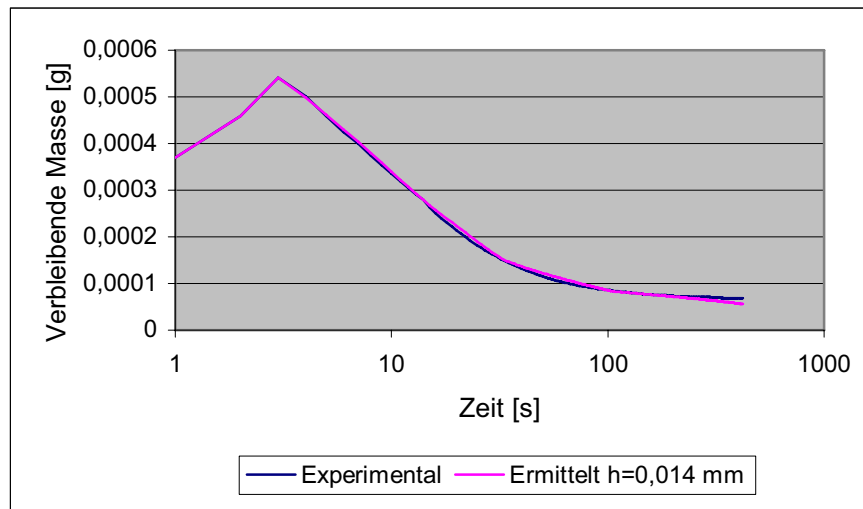


Abb.48 a: Messergebnis und Berechnungsergebnis der Spaltöffnungsweite vom Packer 6

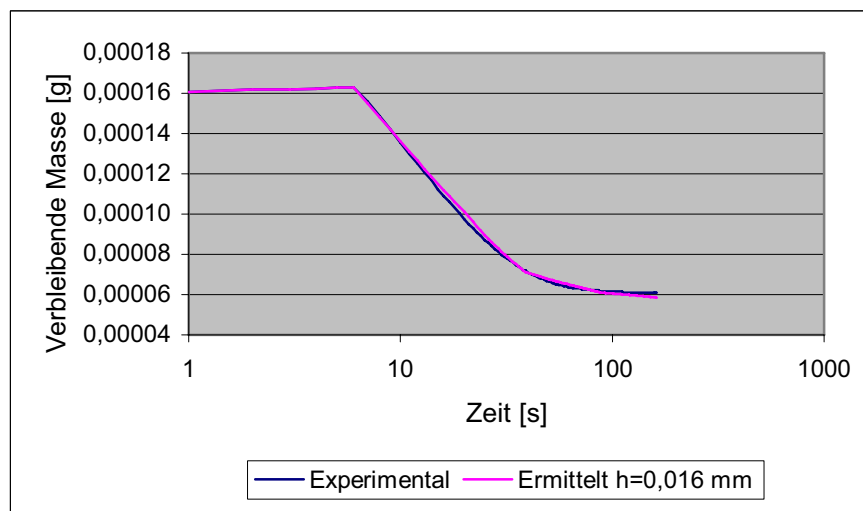


Abb.48 b: Messergebnis und Berechnungsergebnis der Spaltöffnungsweite vom Packer 7



Nach der Injektion wurde noch mal die Durchlässigkeit gemessen. Die Daten des Druckabfalls beim Luftenpressversuch nach der Injektion sind im Anhang 1 (Punkt 8.4, 9.4) zu finden.

Während der Durchführung der Versuche wurden auch die Verschiebungen des Oberflächenpackers analog zu den Versuchen 4 und 5 gemessen. Die Messungen haben eine Verschiebung von ca. 0,01 mm gezeigt.

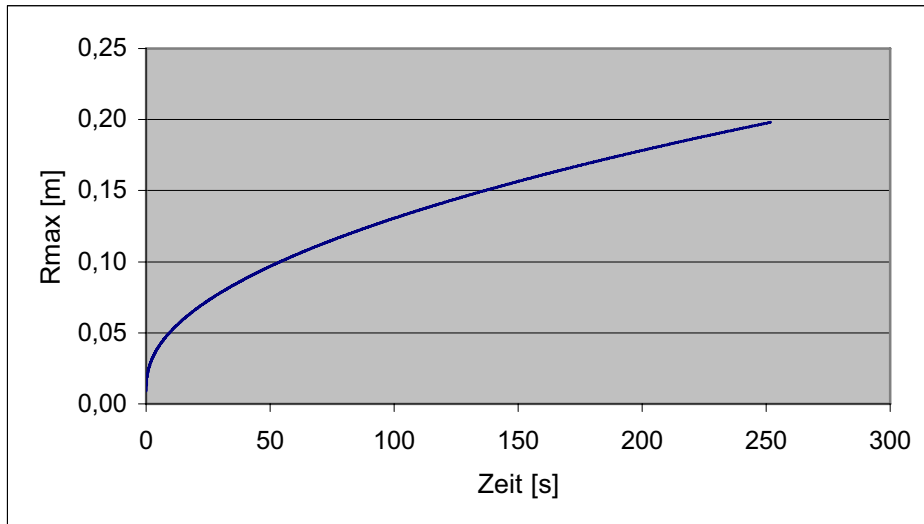


Abb.49 a: Berechnung der Injektionsreichweite vom Packer 6 beim Injektionsdruck von 12 bar

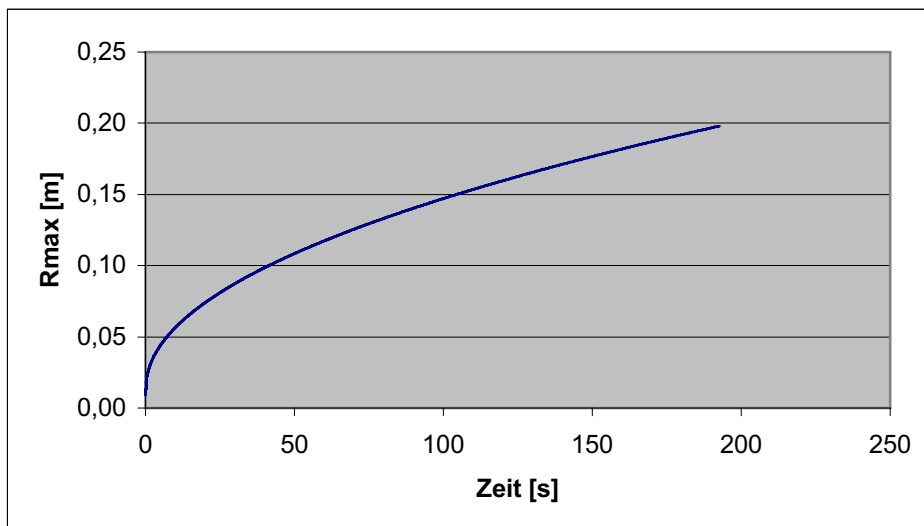


Abb.49 b: Berechnung der Injektionsreichweite vom Packer 7 beim Injektionsdruck von 12 bar

Bei der Durchführung der Injektionen ist das Injektionsmittel im ganzen Umfang gleichmäßig ausgetreten, ohne vorher in einigen Punkten auszutreten. Das zeigt eine

bessere Verteilung des Injektionsmittels bei der Injektion im Fall der vorläufigen Beschichtung. Der Injektionsdruck betrug 10-15 bar. Zwischen dem Anfang der Injektion und dem gleichmäßigen Austritt verging ca. 2 Minuten. Das zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Modellierung.

Der Vergleich der Permeabilitätswerte vor und nach der Injektion in allen Versuchen ist in der Tabelle 5.4.2 dargestellt.

Einpressdruck	Packer 4	Packer 5	Packer 6	Packer 7
	max. Verschiebung, mm			
5 bar	0,000	0,000	0,001	0,000
10 bar	0,001	0,001	0,005	0,004
15 bar	0,002	0,009	0,01	0,008
20 bar	0,002			

Tabelle 5.4.4: Verschiebungen des Oberflächenpackers beim Einpressen

Bezeichnung des Versuchs	Permeabilität	
	Vor der Injektion	Nach der Injektion
Oberflächenpacker 4	6,5 E-16 m <sup>2</sup>	< 7 E-17
Oberflächenpacker 5	7 E-16 m <sup>2</sup>	< 8 E-17
Oberflächenpacker 6	6 E-15 m <sup>2</sup>	6 E-18
Oberflächenpacker 7	4 E-14 m <sup>2</sup>	2 E-19

Tabelle 5.4.5: Vergleich der Permeabilitätswerte vor und nach der Injektion in allen Versuchen [105].

Aus dieser Tabelle ist zu sehen, dass die Injektionen die Durchlässigkeit des konturnähen Bereichs und der Fuge stark verringert haben.

Bei den Oberflächenpackern 5, 6 und 7 vor der Messung nach der Injektion wurde durch das Röhrchen je ein Loch durch die Druckkammer zwei cm Tief gebohrt (Abb. 50), um bei der Messung auch die Durchlässigkeit des Gebirges zu berücksichtigen. Die Messungen haben eine Verringerung der Permeabilität gezeigt. Daraus kann geschlossen werden, dass das Injektionsgut auch ins Gebirge eingedrungen ist.

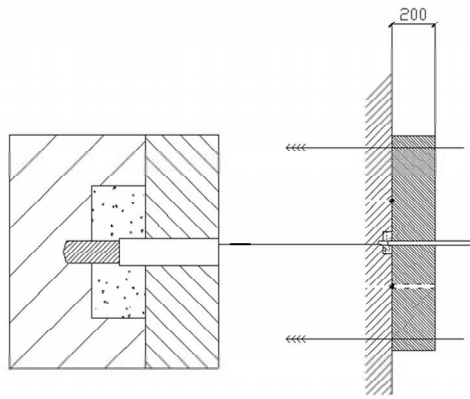


Abb. 50: Erweiterung des Druckkammers bei den Oberflächenpackers 5, 6 und 7

#### 5.4.2.2 Bohrlochversuche

Um die Divergenzen der Fuge während der Injektion auszuschließen, wurden weitere Versuche in Bohrlöchern durchgeführt. Der Durchmesser des Bohrloches betrug 150 mm, die Länge 35 cm. Die Bohrlöcher wurden für 7 Tage so belassen, damit sich die Oberfläche des Bohrlochs durch Verwitterung der Realität eines Gebirgsstoßes annähern kann. Danach wurden die Bohrlöcher zur Betonage vorbereitet. Am Ende jedes Bohrlochs wurde eine 5 cm dicke Druckkammer eingerichtet. An den Wänden des Bohrlochs wurden 3 getrennten Ringe des Injektionsschlauches im 5 cm Abstand befestigt. (Abb. 51) Danach wurden die Bohrlöcher zubetoniert. Im Zentrum der Betonpfropfen wurden je ein Stahlrohr einbetoniert (um später Lufteinpressversuche durchzuführen). Nach dem Aushärten des Betons wurden die Lufteinpressversuche durch die Stahlröhrchen durchgeführt.

Die Messungen vor dem Verpressen haben eine Permeabilität von mehr als  $10^{-14} \text{ m}^2$  beim Bohrloch 1 und  $6 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  beim Bohrloch 2 gezeigt. In den Abb. 52 a, 52 b ist der Vergleich der verbleibenden Masse der Luft in der Versuchskammer (siehe Kap. 5.3, Abb. 24), die aus den Messdaten gerechnet wurde, und der verbleibenden Masse der Luft in den Versuchskammern, die nach dem Modell (gemäß Gleichungen (58-59)) bei Rissöffnungsweiten von 0,007 mm und 0,0017 mm gerechnet wurde, angegeben. Die Daten zur Berechnung der Rissöffnungsweiten sind im Anhang 1 (Punkt 10.2 und 11.2) zu finden.

Dabei wurde beim Bohrloch 1 eine viel höhere Durchlässigkeit festgestellt, als beim Bohrloch 2 und den vorher gemessenen Oberflächenpackern (OP 4-7). Aus diesen

Versuchen wurde die Injektionsweite (Laut dem Modell Kap. 5.2 (gemäß Gleichungen (19-21))) berechnet, siehe Abb. 50 a, b. Die Daten zur Berechnung der Reichweite sind im Anhang 1 (Punkt 10.3 und 11.3) zu finden.

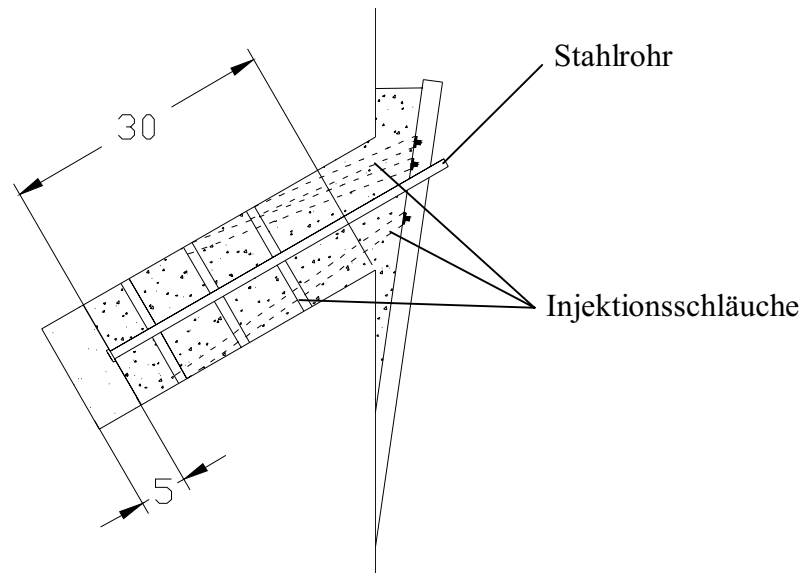


Abb. 51: Schema des Bohrlochversuchs

Beim Verpressen von BL-1 ist das Injektionsmittel aus einem Riss neben dem Bohrloch ausgetreten. Der davor nicht sichtbare Riss hat offensichtlich die extrem hohe Durchlässigkeitswerte während der Messung verursacht (Abb.54 a,b). Danach ist das Injektionsmittel aus der Fuge zwischen dem Beton und Gebirge ungleichmäßig bei einzelnen Punkten ausgetreten. Der Injektionsdruck betrug 10-20 bar.

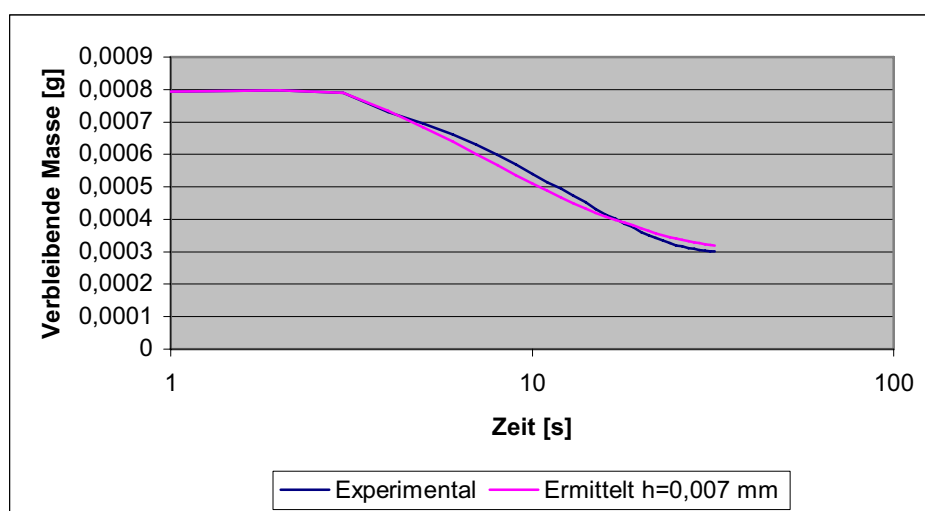


Abb. 52 a: Messergebnis und Berechnungsergebnis der Spaltöffnungsweite vom Bohrloch 1

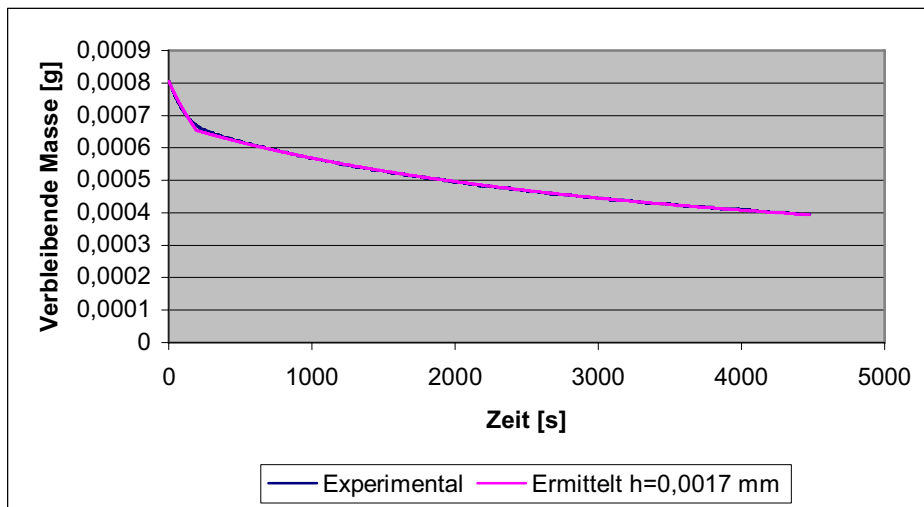


Abb. 52 b: Messergebnis und Berechnungsergebnis der Spaltöffnungsweite vom Bohrloch 2

Beim Versuch BL-2 ist das Injektionsmittel nur aus der Fuge zwischen dem Beton und Gebirge ungleichmäßig bei einzelnen Punkten ausgetreten. Der Injektionsdruck betrug 30-40 bar. Nach dem Aushärten des Kunststoffes wurde der Lufteinpressversuch erneut durchgeführt. Die Werte des Druckabfalls sind im Anhang 1 (10.4 und 11.4) zu finden.

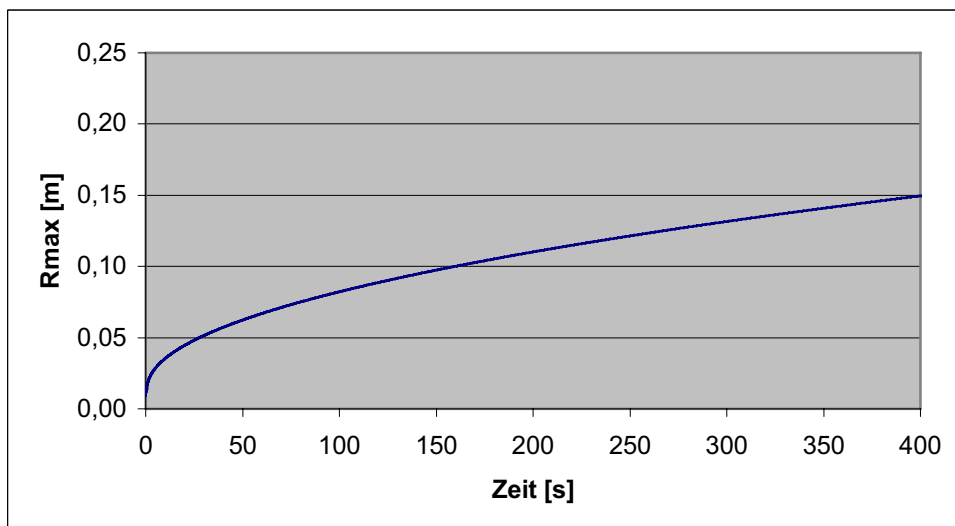


Abb.53 a: Berechnung der Injektionsreichweite beim Bohrloch 1 beim Injektionsdruck von 20 bar

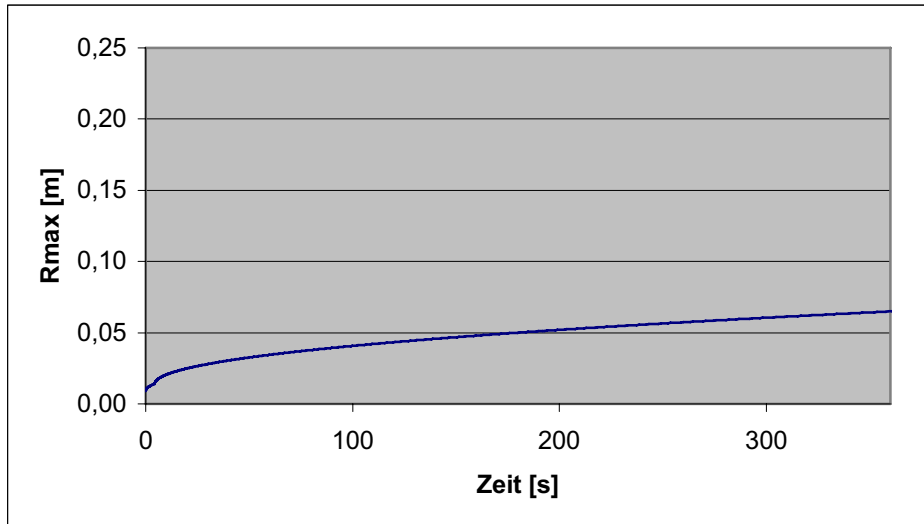


Abb.53 b: Berechnung der Injektionsreichweite beim Bohrloch 2 beim Injektionsdruck von 35 bar

Die Ergebnisse der Durchlässigkeitsmessungen vor- und nach der Injektion sind in der Tabelle 5.4.6 dargestellt.

Bezeichnung des Versuchs	Permeabilität	
	Vor der Injektion	Nach der Injektion
Bohrloch 1	> 1 E-14 m <sup>2</sup>	6,5 E-20
Bohrloch 2	6 E-17 m <sup>2</sup>	5 E-19

Tabelle 5.4.6: Vergleich der Permeabilitätswerte der Bohrlochversuche vor und nach der Injektion [105].

Aus den Messergebnissen ist zu sehen, dass die Injektionen sehr stark die Permeabilität des Systems verringert haben. Der Versuch mit dem Bohrloch 1 weist darauf hin, dass durch Kunststoffinjektionen auch die unsichtbaren feinen Risse (z.B. tiefe Verwitterungszonen) effektiv abgedichtet werden können.



Abb.54 a: Austritt des Injektionsmittels durch ein Riss bei der Injektion

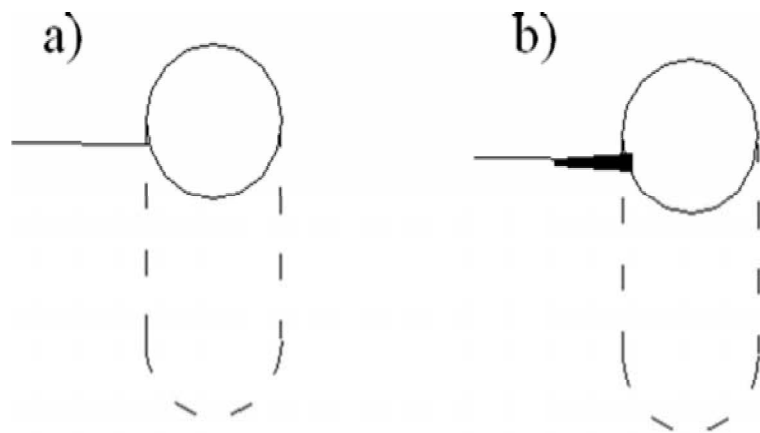


Abb.54 b: Schema der Lage des Risses beim Bohrlochversuch (a – vor der Injektion, b – nach der Injektion)

### 5.4.2.3 Auswertung der Bitumeneinpressversuche

Zur Prüfung der Übereinstimmung des Modells im Fall der Strömung eines dickflüssigen Injektionsmittels wurde die Auswertung eines Versuchs [92] mit 2-K Bitumen durchgeführt .

Der Versuch wurde zur Prüfung der verschiedenen Injektionsschläuche geplant. Die aus dem Versuch gewonnenen Daten lassen sich gut mit den nachgerechneten Daten vergleichen und die Glaubwürdigkeit des Modells für einen solchen Fall einzuschätzen.

In der Abb. 55 ist die Lage der Injektionsschläuche in der Mitte der 8,5 cm starken MgO-Betonplatte dargestellt. Nach dem Stellen der Betonschalung wurden 4 cm MgO-Beton eingebracht. 96 Stunden später wurden die Injektionsschläuche verlegt (Abb.56). Danach wurden die restlichen 4,5 cm MgO-Beton betoniert. Insgesamt kamen 226kg MgO-Beton zum Einsatz.

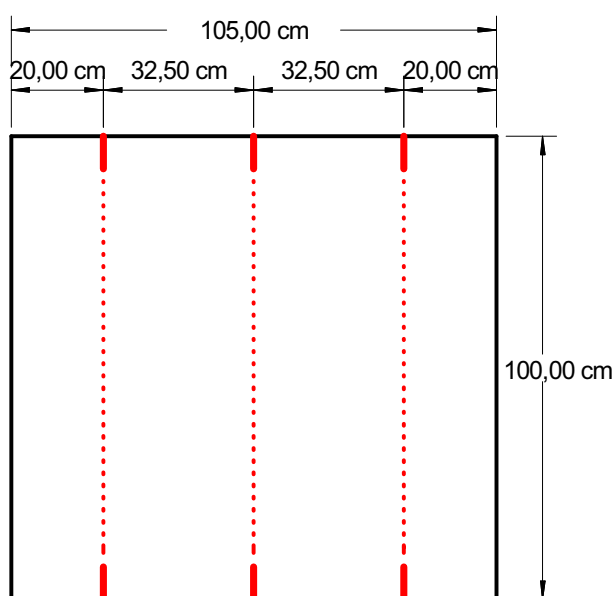


Abb.55: Aufbau Plattenversuch

Die Betonplatte wurde mit einem 1200kg schweren Gewicht belastet, um einer eventuellen Deformation der Platte entgegenzuwirken. Zur Lastverteilung kam Sand zum Einsatz.

Im Versuch wurden folgende Injektionsschläuche geprüft:

1. Verpreßschlauchsystem Intec-Cem
2. Verpreßschlauchsystem Intec



### 3. Verpreßschlauchsystem Intec-Cem mit Vaseline

Gewöhnlich kommt der Intec-Cem-Schlauch bei Zementsuspensionsverpressung zum Einsatz, während das Verpressschlauchsystem Intec für Harzverpressungen verwendet wird. Der Einsatz von Vaseline wurde vorgesehen, um zur Permeabilitätsbestimmung einen definierten Prüfraum gewährleisten zu können.

Danach wurden die Permeabilitätstests für jeden Schlauch mit Luft durchgeführt. In der Abb. 57 ist der Vergleich der verbleibenden Masse der Luft in der Versuchskammer (in diesem Fall – im Injektionsschlauch) (siehe Kap. 5.3, Abb. 24), die aus den Messdaten gerechnet wurde, und der verbleibenden Masse der Luft in der Versuchskammer, die nach dem Modell (gemäß Gleichungen (58-59)) bei Rissöffnungsweiten von 0,0022 mm und 0,013 mm gerechnet wurde, angegeben. Die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite sind im Anhang 1 (Punkt 12.1) zu finden. Die geometrischen Parameter des Modells wurden zur Beschreibung der Versuchsbedingungen verändert, um den realen Luftströmungsverlauf in der Platte zu modellieren. Zu diesem Zweck wurden statt radialsymmetrischen bzw. konzentrischen Strömung für einzelne Abschnitte der Schläuche verschiedene Strömungsstrecken angenommen (Abb. 58).

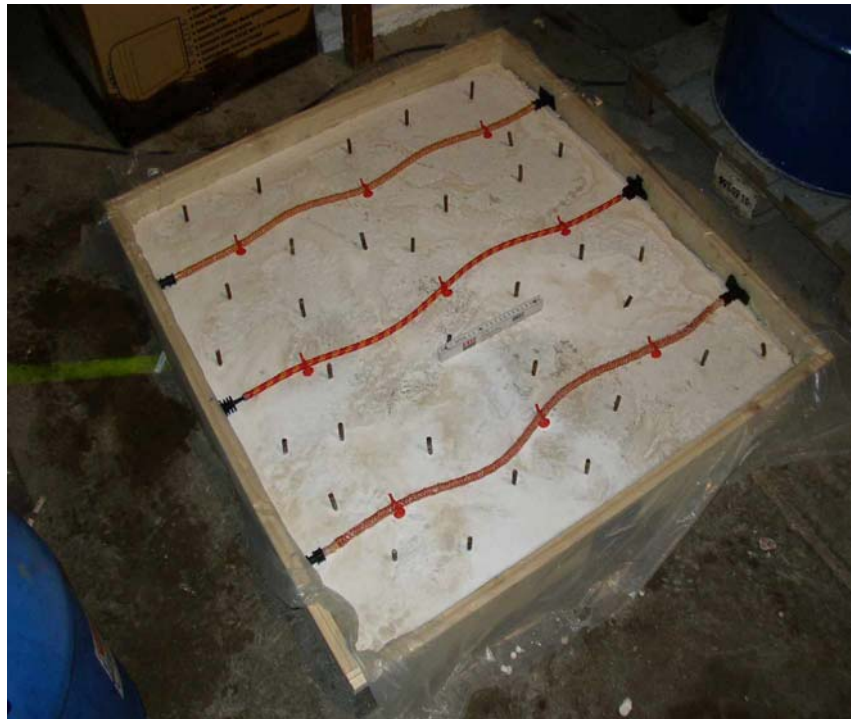


Abb. 56: Lage der Injektionsschläuche in der Mitte der Betonplatte

Nach Abschluß aller Permeabilitätsmessungen wurden zwei Injektionsschläuche mit Bitumen (2-K Bitumen [ ]) verpresst. Der Schlauch in der Mitte der Platte wurde nicht

verpresst, um weitere Versuche mit der Platte durchführen zu können. Der Injektionsdruck wurde auf 15 bar eingestellt. Die Injektionsdauer betrug ca. 3 Minuten.

Die Viskosität des Injektionsmittels war während des Verpressens nicht konstant, Die Viskositätswerte sind in Abb. 59 dargestellt. Die Berechnungen der Injektionsreichweite wurden unter Berücksichtigung der zunehmenden Viskosität von 2-K Bitumen durchgeführt.

Die Abb.60 zeigt die Ergebnisse der Verpressung. Die maximale Ausbreitung des Injektionsmittels beim Schlauch Intec-Cem betrug ca. 18 cm, die minimale ca. 10 cm. Die laut Modell berechnete Reichweite der Injektion für diesen Schlauch, innerhalb einer Zeit von 180 s, betrug ca. 12 cm.

Die maximale Ausbreitung des Injektionsmittels beim Schlauch Intec-Cem mit Vaseline betrug ca. 5 bis 10 cm. Die mit dem Modell berechnete Injektionsreichweite für diesen Schlauch innerhalb von 180 s betrug ca. 7 cm.

Der mit Hilfe des Modells berechnete Strömungsverlauf ist in Abb. 61 dargestellt. Die Daten zur Berechnung der Reichweiten der Injektionen beim Einpressen der Schlauche Intec-Cem und Intec-Cem+Vaseline sind im Anhang 1 (Punkt 12.2) dargestellt.

Die Ergebnisse des Experiments zeigen eine relativ gute Übereinstimmung mit den Modellannahmen. Eine genauere Berechnung ist aufgrund der wenigen Ausgangsdaten ist nicht möglich.

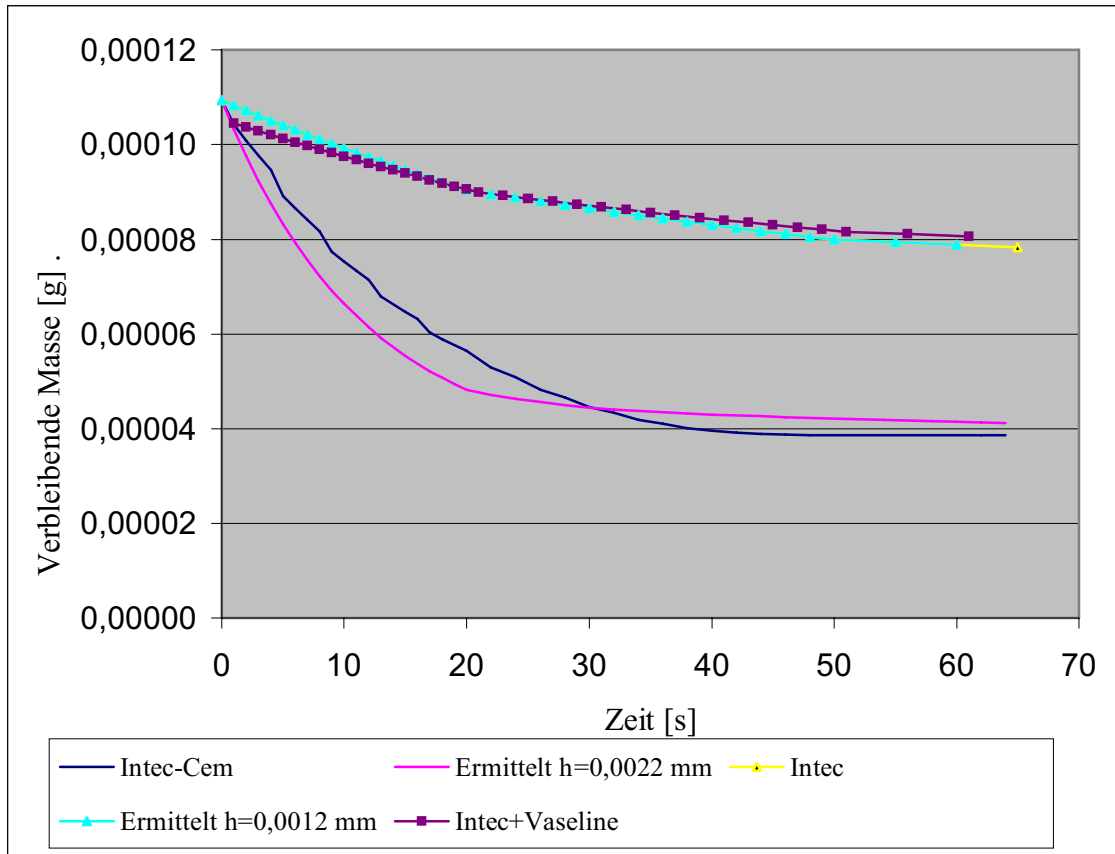


Abb 57: Messergebnis und Berechnungsergebnis der Spaltöffnungsweite beim Lufteinpressversuch.

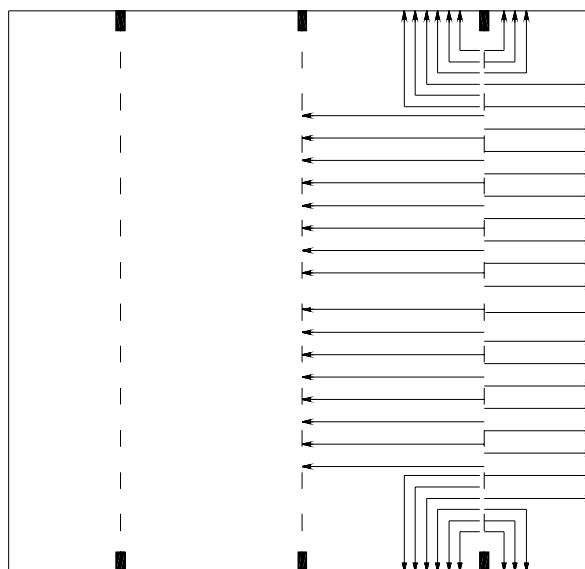
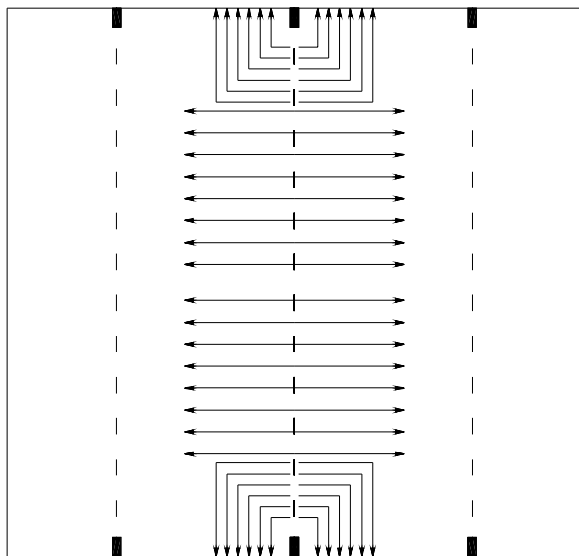
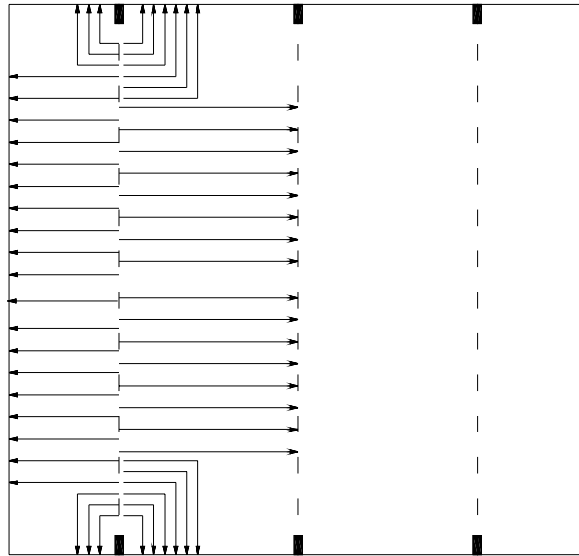


Abb. 58: Schematische Darstellung des Luftverlaufs in der Betonplatte für jeden Injektionsschlauch

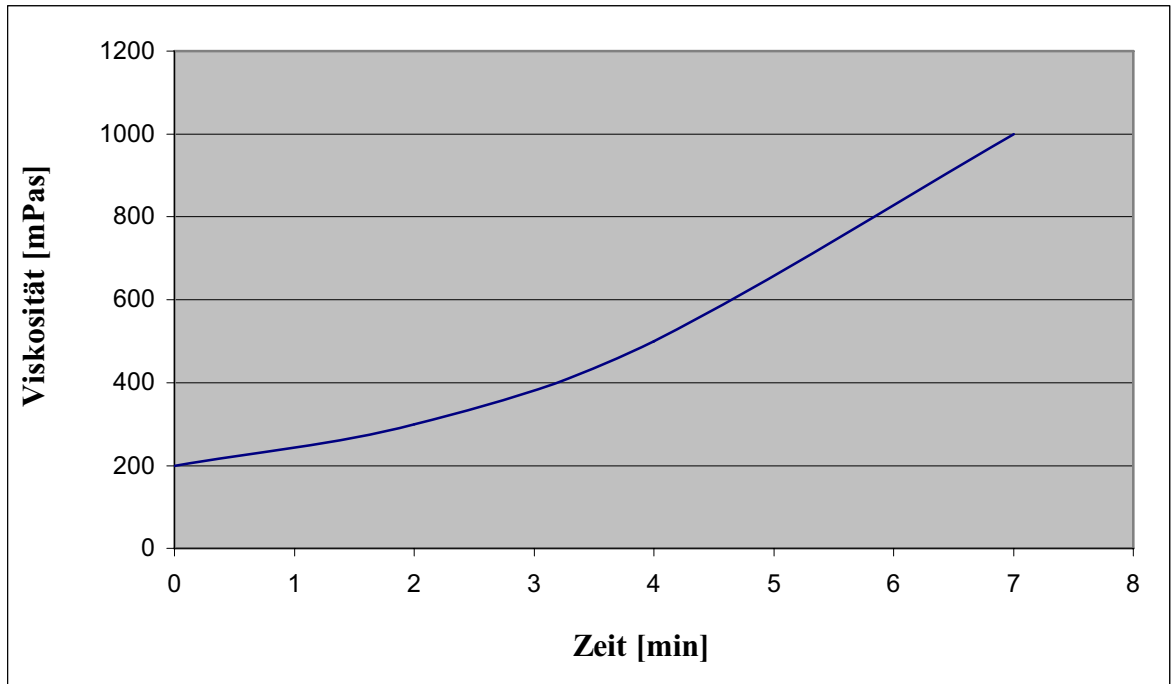


Abb. 59: Viskosität von 2-K Bitumen in Abhängigkeit von der Zeit

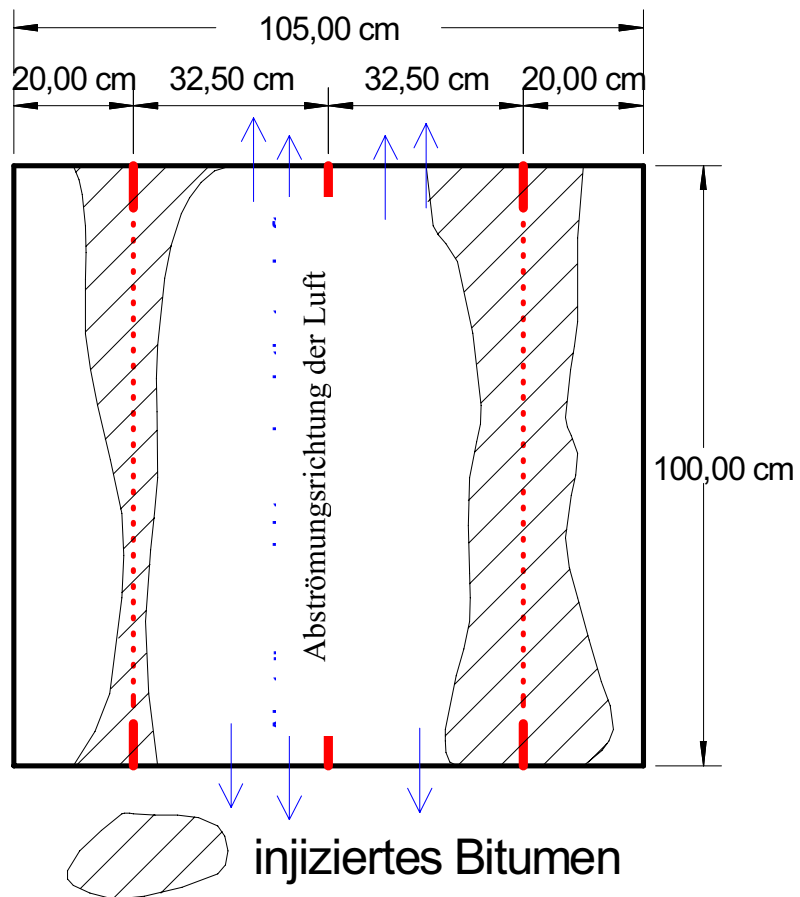


Abb. 60: Schematische Darstellung der injizierten Bereiche innerhalb der Kontaktfuge (ohne Massstab)

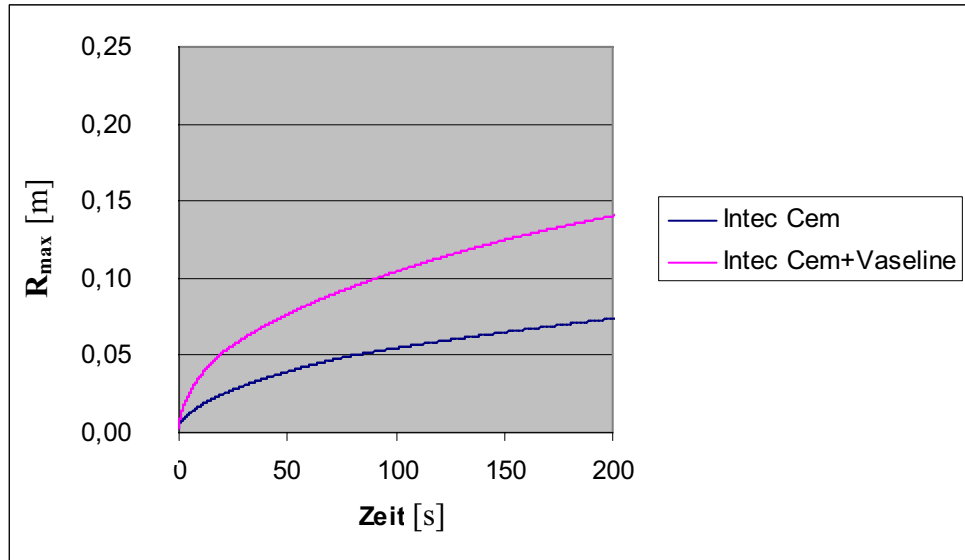


Abb. 61: Der berechnete Strömungsverlauf in der Betonplatte

## 5.5 Schlussfolgerung

In allen Versuchen wurde die Wirksamkeit der Kunststoffinjektionen in die Füge zwischen dem Gebirgsmassiv und Betonelemente geprüft. Die Versuche zeigen, dass die durchgeführten Maßnahmen eine Abdichtung der durchlässigen Zone zwischen Beton und Gebirge ermöglichen. Die Messungen der Reichweite haben gezeigt, dass das Modell gut mit den experimentellen Daten übereinstimmt.

Das oben beschriebene Modell der Strömung in der Auflockerungszone lässt sich anwenden, um die Injektionsparameter (Rissöffnungsweite, Reichweite der Injektion) bei den Abdichtungsarbeiten in der Auflockerungszone zwischen dem Gebirge und dem Bauwerk zu bestimmen.

Das Modell hat Vorteile gegenüber den Modellen, die sich auf der Vorstellung der Kontaktfuge als ein poröses Medium beziehen. Im vorliegenden Fall hängen die Strömungsparameter nicht von der Tiefe und den Porositätswerten der Auflockerungszone ab. Diese Parameter können im breiten Intervall schwanken und stehen im Zusammenhang mit dem Tachyhydritgehalt im Gebirge, mit der Zeit der Einwirkung der Luft auf das Gebirge und mit den technologischen Parameter des Vortriebs (bzw. der Stoßberaubung).

Im Fall der Anwendung des obengenannten Modells können alle notwendigen charakteristischen Werte der durchlässigen Zone aus dem Lufteinpressversuch bestimmt werden. Es verbessert die Genauigkeit der Berechnungen und vermindert den Einfluss der lokalen geologischen Störungen auf die Ergebnisse der Modellierung.

Durch diese Methode kann man auch den Arbeitsaufwand für die Untersuchungen der Gebirgseigenschaften vermindern.

## **6 Technologievorschlag für Abdichtungsmassnahmen am Beispiel der Grube Teutschenthal.**

### **6.1 Allgemeine Bemerkungen zur Grube Teutschenthal**

Die Grube Teutschenthal ist der erste Standort, wo die langzeitstabile Streckendämme nicht im Steinsalz, sondern im leichtlöslichen Kaligestein gebaut werden müssen. Durch die Verschlussbauwerke müssen die noch bestehenden Verbindungen zu den benachbarten Grubenfelder dauerhaft hydraulisch abgedichtet werden [102].

Die Technologie des Errichtens eines Verschlussbauwerkes soll die technische Dichtheit unter den komplizierten geologisch-mineralogischen Bedingungen gewährleisten. Die komplizierten Verhältnisse sind dadurch verursacht, dass der Hauptbestandteil des Gebirges stark geschichteter tachyhydritreicher Carnallit und Kieserit ist. Die Zusammensetzung des Gesteins ist im Kapitel 2, Tab. 2.1 beschrieben. Wegen der hohen Hygroskopie des Gebirges entsteht beim Errichten eines Hohlraumes innerhalb von einigen Stunden eine Verwitterungs- und Auflockerungszone. Weiterhin, wird beim Betonieren infolge der Erstarrungswärme das Gestein im Konturbereich eines Hohlraumes erwärmt, was zu weiteren chemischen Reaktionen führt und zusätzlich eventuell die konturnahe Zone auflockern kann.

Das Zerfließen des Gebirges ist auch durch Steuerung der Wetterparameter und Anwendung der Schutzbeschichtungen nicht zu vermeiden. Deswegen muss die Abdichtungstechnologie auch nachträglichen Maßnahmen, wie Vergütung des konturnahen Bereiches der zukünftigen Streckenverschlüsse, vorsehen.

Problematisch ist die Auswahl geeigneter Beschichtungs- und Injektionsmaterialien unter dem Gesichtspunkt der geforderten Langzeitbeständigkeit. Deshalb beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Entwicklung eines Technologievorschlags für die nachträgliche Vergütung der konturnahen Auflockerungszone im Bereich der zukünftig vorgesehenen Streckenverschlussbauwerke. Die Hauptelemente der in der Grube Teutschenthal vorgeschlagenen Streckenverschlüsse sollen aus MgO-Beton bestehen.

### **6.2 Technologie zur Errichtung des Verschlussbauwerkes**

In vorliegender Arbeit wird eine Technologie zur Errichtung eines Verschlussbauwerkes beschrieben, wobei besonders Wert auf die Verminderung der Durchlässigkeit des Kontaktbereichs zwischen dem Gebirge und dem Bauwerk gelegt



wird. Als Hauptbaumaterial für diese Verschlussbauwerke wurde MgO-Beton vorgeschlagen [25]. Möglich ist der Einsatz als Ortbeton. Zur Verminderung der Wärmeentwicklung des Magnesia-Betons soll die Betonage mit dem Spritzbeton-Verfahren getestet werden.

Durch das Spritzbetonverfahren kann eine geringere Wärmeentwicklung beim Betonaushärten erreicht werden.

Das „nasse“ Spritzbetonverfahren wurde infolge von Experimenten verworfen, weil das Aushärten von MgO-Beton sehr lange dauert und die traditionellen Beschleunigungsmitteln aufgrund des Chemismus des MgO-Betons nicht verwendet werden können. Der MgO-Beton lässt sich nur durch das „Trockene“ Spritzbetonverfahren aufbringen. [93]. Dabei muss darauf geachtet werden, dass für die Betonage im Carnallitit das Einhalten einer besonderen Zusammensetzung der Betonkomponenten (damit der Beton möglichst wenig mit dem umliegenden Gebirge reagiert [24]) erforderlich ist. Insbesondere muss beim Mischen in der Düse das Verhältnis von Salzlösung und Zement möglichst genau eingehalten werden.

### **6.3 Vorbereitung der Strecke zur Errichtung des Verschlussbauwerkes**

Zum Entfernen der verwitterten Schicht des Carnallitits muss das Gebirge im konturnähen Bereich mit einer Teilschnittmaschine nachgeschnitten werden.

Laut [7] geht die Verwitterungszone bis zu 0,5 m ins Gebirgsmassiv. Aus diesem Grund muß das Gebirge beim Berauben des Stoßes in allen Punkten der Streckenoberfläche mindestens auf 0,5 m tief nachgeschnitten werden. Ausgehend von diesen Gedanken muss die Strecke nach der Beraubung des Stoßes wieder eine viereckige Form mit abgerundeten Ecken bekommen.

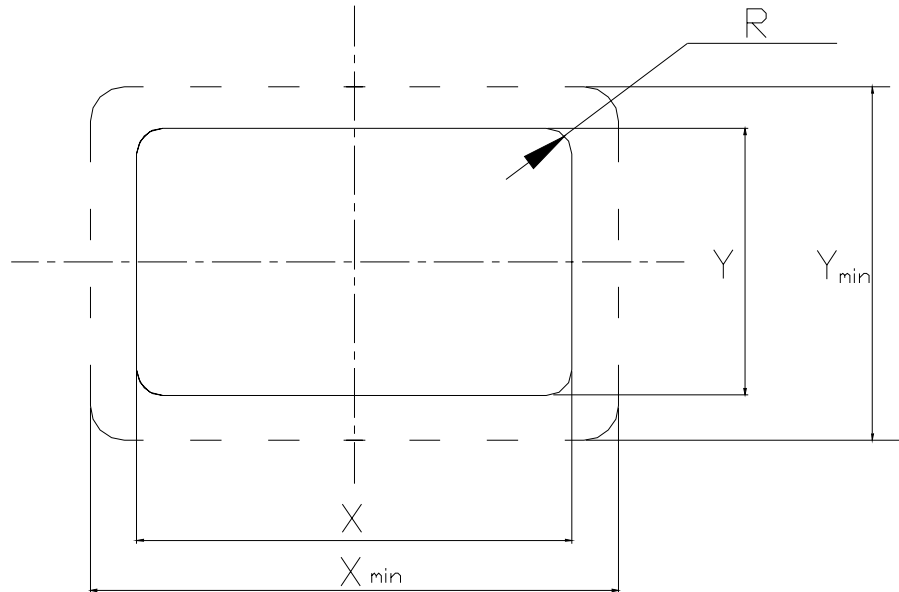


Abb. 62: Schema des Streckenquerschnitts

Die minimale Dimensionen der Strecke nach dem Berauben ( $X_{\min}, Y_{\min}$ ) mit dem Radius  $R$  der abgerundeten Ecken sind:

$$X_{\min} = X + 0,5 \cdot \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}} + R \left( \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}} + 1 \right) \quad (63)$$

$$Y_{\min} = Y + 0,5 \cdot \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} + R \left( \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} + 1 \right) \quad (64)$$

wobei  $X, Y$  – die Dimensionen der Strecke im ursprünglichen Zustand,  $R = 0,5$  m angenommen werden kann (Abb. 62)

Der Umfang der Strecke mit den Abgerundeten Ecken ist gleich:

$$P = 2(X + Y) - (2\pi - 8) \cdot R \quad (65)$$

Weiterhin muss der neue Querschnitt der Strecke auf die Standsicherheit ohne Ausbau geprüft werden. Wenn in diesem Querschnitt die Standsicherheit nicht gewährleistet ist, muß die Form der Kontur verändert werden (bogenförmig, kreisförmig usw.).

Nach dem Berauben muss die Oberfläche durch Trockenstrahlen gereinigt [14] und sofort mit dem Epoxydharz durch luftlose Spritzverfahren beschichtet werden.

#### **6.4 Die Betonage und vorläufige Maßnahmen**

Im Weiteren wird der Anfang des vorgesehenen Streckenverschlusses als Null-Punkt bezeichnet. Die Lage von allen anderen Punkten wird auf diesen Punkt bezogen.

Zur Bestimmung der Durchlässigkeit der Kontaktzone zwischen dem Bauwerk und dem Gebirge werden am Anfang folgende Maßnahmen durchgeführt: nach der Beraubung des Stoßes auf 0,5 m wird in Null -Punkt im ganzen Umfang der Strecke ein Injektionsschlauch gelegt. (Abb.63-1) Der undurchlässige Teil des Schlauchs muss dann nach dem Betonieren im Zentrum der Betonscheibe sein. Die Länge dieses Teils muss mindestens 2,5 m betragen.

Danach werden 0,5 m der Strecke auf vollem Querschnitt betoniert (Abb.63 - 2).

Nach dem Aushärten des Betons, analog zur vorherigen Operation, wird im Punkt „0,5 m“ noch ein Injektionsschlauch an der Kontur verlegt. Später wird die Strecke im gesamten Querschnitt bis zum Punkt „1 m“ zubetoniert.

Nach dem Aushärten des Betons wird durch den Schlauch im Punkt „0,5 m“ der Lufteinpressversuch durchgeführt und die Permeabilität berechnet. Der Durchfluss wird in 2 Richtungen erfolgen – durch die Fuge zwischen den Punkten „0,5 m“- „0“ in den Injektionsschlauch (im Punkt 0) und durch die Fuge zwischen den Punkten „0,5 m“- „1 m“ in die Strecke. Bei diesem Messverfahren haben die lokale Gebirgsstörungen und Mängel im Beton einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Messung. Aus diesem Grund kann eine Stelle mit der erhöhten Durchlässigkeit die Ergebnisse für die ganze Kontur verfälschen. Um solche mögliche Fehler auszuschließen, werden die Messungen der Durchlässigkeit in lokalen Bereichen gemacht. Dafür werden im Punkt „1 m“ 0,5 m lange Abschnitte von Injektionsschläuchen verlegt. Der Abstand zwischen den Abschnitten soll mindestens 1 m betragen. (Abb. 63-3)

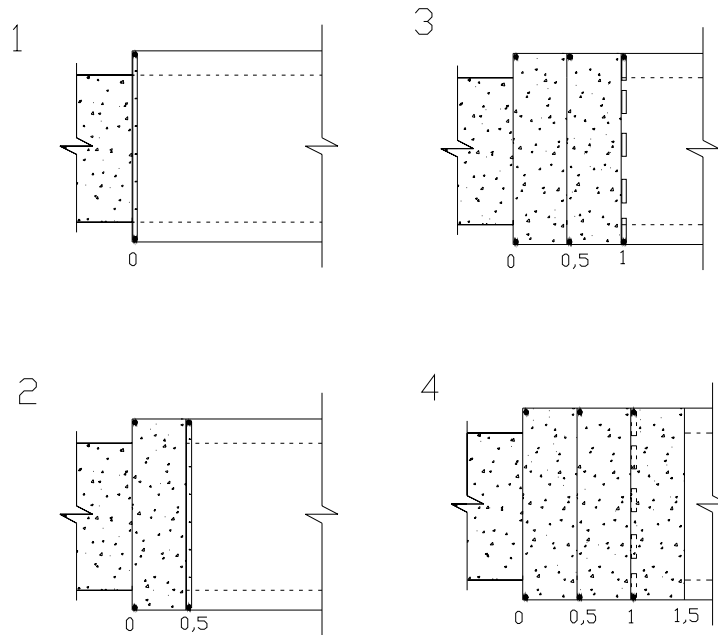


Abb. 63: Schema der Durchführung der Arbeiten zur Bestimmung der Durchlässigkeit des konturnahen Bereichs

Der Anzahl der Abschnitte (N) kann mit der Formel (66) bestimmt werden:

$$N = P / 1,5 \text{ (Stück)} \quad (66)$$

P - Umfang der Strecke, m

Die Anzahl N wird dabei bis zum nächsten kleineren ganzen Zahl abgerundet.

Die benachbarten Abschnitte müssen für 5 cm relativ zu einander in der Richtung der Streckenlänge versetzt werden (ein Teil der Schläuche müssen in Punkt „1 m“ verlegt werden, und anderer Teil muss in Punkt „1,05 m“ verlegt werden).

Danach wird die Strecke bis zum Punkt 1,5 m betoniert. (Abb. 63-4). Nach dem Aushärten des Betons werden die Permeabilitätswerte für jeden Abschnitt des Schlauchs einzeln gemessen. Aus den gemessenen und ermittelten Werten wird die geringste Durchlässigkeit ausgewählt und der Wert für die Durchlässigkeit der Auflockerungszone angenommen.

Auf Grund der berechneten Durchlässigkeitsparameter wird nach dem Modell (Kap. 5) die Reichweite der Injektion mit dem Polymerstoff innerhalb von 300 Sekunden bestimmt. Danach wird der Abstand zwischen den Schläuchen wie folgt berechnet:

$$L = R_{\min} \cdot 2 \text{ (m)} \quad (67)$$

$R_{\min}$  – Reichweite der Injektion für den Abschnitt mit der geringsten gemessenen Durchlässigkeit

Die Schläuche zum Einpressen des Kunststoffes werden am Stoß nicht als ganzer Ring befestigt, sondern in 4 Teilen montiert (Abb. 64). Das Ziel dieser Teilung ist die Verminderung des Strömungswiderstandes im Schlauch und der Druckdifferenz des am Anfang und am Ende des Schlauches.

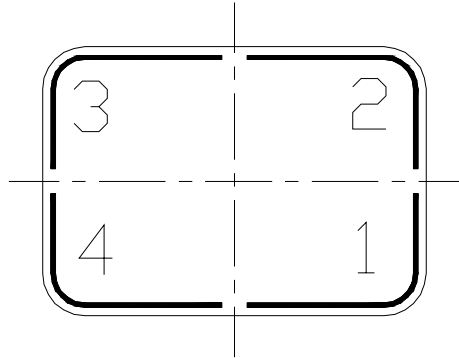


Abb.64: Reihenfolge des Verpressens

Das Einpressen muss unmittelbar nach dem Aushärten eines Betonageabschnittes erfolgen, weil die Injektion, nach dem das Bauwerk komplett gebaut wäre, zu kompliziert ist. Dies ist durch die großen Strömungsenergieverluste in einem langen Schlauch bedingt.

Das Einpressen bei jedem Ringssegment wird in der Reihenfolge erfolgen, wie in Abb. 64 gezeigt. Es ist notwendig, um die Luft bei der Injektion aus dem Einpressbereich entweichen zu lassen.

Jede 3 Meter müssen die Beobachtungsringe (ein ganzer Ring aus dem Injektionsschlauch) verlegt werden, um nachträglich die Dichtheit kontrollieren zu können. Nach dem Betonieren der Strecke und der Durchführung der Injektionsarbeiten soll die Dichtheit der Auflockerungszone durch diese Beobachtungsringe durch die Lufteinpressversuche geprüft werden.

## 6.5 Schutzbeschichtung

Eine Schutzbeschichtung muss sofort nach der Reinigung der Oberfläche der Strecke aufgetragen werden. Das Auftragen der Beschichtung muss durch luftlose Spritzverfahren erfolgen – das Zerstäuben des Polymerstoffes muss durch Druck ohne Kontakt mit Druckluft geschehen. Dies wird bedingt dadurch, dass die Druckluft eine erhöhte Feuchtigkeit im Vergleich zu Grubenwettern hat. Beim Pulverisieren von unlöslichen hydrophoben Bestandteilen mit Druckluft entsteht eine Mischung aus Wasser und Polymer, die bei der Berührung mit dem Stoß zur Beschleunigung der

Verwitterung der hygroskopischen Salze führen würde. Aus diesen Gründen wäre diese Maßnahme in dem Fall des Beschichtens mit Druckluft absolut ineffektiv.

### **6.6 Verlegung der Injektionssysteme**

Die Injektionssysteme (perforierte Injektionsschläuche) müssen dicht an der Streckenkantur befestigt werden. Die Befestigung muss robust sein, um nicht beim Auftragen des Spritzbetons (oder Massenbeton) beschädigt zu werden. Zur Befestigung der Injektionsschläuche werden Rohrschellen aus Plastik oder Metall verwendet. Rohrschellen aus Plastik sollen bevorzugt verwendet werden, weil bei ihrer Anwendung unter salinaren Bedingungen die metallischen Befestigungen chemischen Reaktionen verursachen können. Zudem haben Rohrschellen aus Plastik eine bessere Korrosionsbeständigkeit.

Beim Auftragen des Betons durch Spritzbetonverfahren muss vor dem Einbringen der Hauptmasse des Betons eine erste Schicht auf die Injektionsschläuche aufgebracht werden, um ihre Beschädigung oder ein Verschieben beim Betonieren zu verhindern.

Die Leitungen (undurchlässige Teile der Schläuche) müssen sich im Betonkörper befinden. Am Ende jeder Leitung wird ein Nippel mit dem Normanschluss für eine Pumpe befestigt. Die undurchlässigen Teile der Schläuche müssen unmittelbar an der Oberfläche der Strecke beginnen (nicht im Betonkörper), um Flüssigkeitsverluste bei der Injektion auszuschließen.

Da die Oberfläche der Strecke nach der Beraubung mit einer Teilschnittmaschine uneben ist, müssen für jeden Schlauch Rinnen geschlagen werden, um einen engen Abstand der Schläuche am Stoß zu gewährleisten. Die Rinne muss ca. 0,5 cm tief sein. Und kann mit einem elektrischen Abbauhammer erstellt werden. Nach dem Errichten müssen die neuberaubte Stellen wieder mit dem Kunststoffschutzmittel beschichtet werden.

### **6.7 Auswahl der Injektionssysteme**

Zum Einpressen der niedrigviskosen Injektionsstoffe sind fast alle zur Zeit hergestellten Injektionsschläuche tauglich.

Die durchgeführten Versuche haben eine bessere Tauglichkeit der Schläuche für Zementsuspensionsinjektionen (z.B. Intec, Intec-Cem, Fa. Intec) gezeigt. [92] Diese Schläuche haben einen geringeren Strömungswiderstand und eine ebenere innere

Oberfläche, was den hydraulischen Gradient im Schlauch verringert und das Injektionsmittel sich besser verteilen lässt.

Für die Injektionsarbeiten in der Kontaktfuge eignen sich alle Injektionssysteme wegen der kleinen Injektionsmenge.

## **6.8 Berechnung der technologischen Parameter beim Verschluss einer Strecke in der Kalisalzgrube Teutschenthal.**

Die nachfolgenden Betrachtungen werden mit Rücksicht auf die vorläufigen und nachträglichen Maßnahmen zum Schutz und zur Abdichtung des Gebirges in der konturnahen Zone vorgenommen.

### **6.8.1 Auswahl der Technologie der Beraubung des Stoßes und der Beschichtung der Streckenoberfläche mit dem Polymerschuttmittel**

Zum Minimieren der Zeit der Einwirkung der Luftfeuchtigkeit auf das Gebirgsmassiv vor dem Betonieren soll die Beraubung schrittweise durchgeführt werden (Abb. 65). Die Länge der Abschlüge muss im Zusammenhang mit der Arbeitsleistung der Teilschnittmaschine (mit der die Beraubung durchgeführt wird), der Geschwindigkeit des Betonierens, der Geschwindigkeit der Beschichtung und mit Rücksicht auf die Verringerung der Einwirkungszeit der Luftfeuchtigkeit auf das Gebirgsmassiv berechnet werden.

Die Beschichtung des Gebirgsmassivs mit dem Kunststoff wird unmittelbar nach der Reinigung des Stoßes durch Trockenstrahlen durchgeführt.

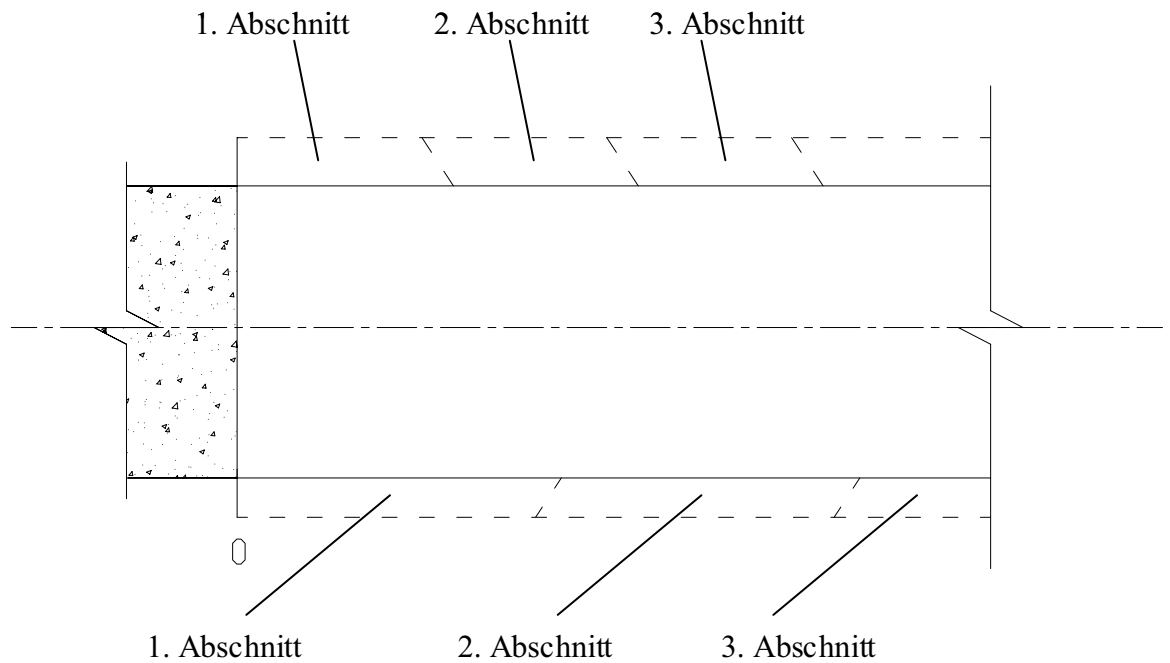


Abb. 65: Schema der Stoßberaubung

### 6.8.2. Berechnung der Parameter des Arbeitsablaufs bei der Errichtung des Verschlussbauwerkes unter Berücksichtigung der vorläufigen und nachträglichen Maßnahmen zum Schutz und zur Abdichtung der konturnähen Zone

Der Arbeitsverlauf beim Errichten des Verschlussbauwerkes kann in vier Teile untergliedert werden:

- Beraubung des Stoßes
- Reinigung des Stoßes
- Schutzbeschichtung des Stoßes
- Verlegen der Injektionsschläuche
- Betonieren des Querschnitts

Wegen der technologischen Besonderheiten des Betonierens und der Stoßberaubung können diese Arbeitsprozesse nicht mit den Anderen kombiniert werden, wobei aber das Injizieren im vorherigen Feld mit dem Verlegen der Injektionsschläuche im neuen Feld kombiniert werden kann. Berücksichtigt man, dass die Beraubung des Stoßes aufgrund der höheren Leistung der verwendeten Maschinen schneller als alle anderen Prozesse durchgeführt werden kann, kann das Arbeitsschema nach der Messung der Permeabilitätswerte wie folgt dargestellt werden (in diesem Fall wird als der ein



Abschlag eine bestimmte Streckenlänge bezeichnet, die aus den Dimensionen der Strecke und aus den Leistungsparametern der Maschinen ermittelt werden kann):

1. Stoßberaubung auf drei Abschlüge (Abb. 66-1)
2. Reinigung des Stoßes auf drei Abschlüge
3. Beschichtung der beraubten Streckenoberfläche mit dem Schutzmittel (Abb. 66-2)
4. Verlegung der Injektionsschläuche auf dem 1. Abschlag (Abb. 66-3)
5. Betonieren des 1. Abschlags (Abb. 66-4)
6. Injektionsarbeiten auf dem 1. Abschlag, Verlegung der Injektionsschläuche auf dem 2. Abschlag (Abb. 66-5)
7. Betonieren des 2. Abschlags (Abb. 66-6)
8. Injektionsarbeiten auf dem 2. Abschlag, gleichzeitig Verlegung der Injektionsschläuche auf dem 3. Abschlag (Abb. 66-7)
9. Betonieren des 2. Abschlags (Abb. 66-8)
10. Stoßberaubung auf den drei nächsten Abschnitten (Abb. 66-9)
11. Beschichtung der beraubten Streckenoberfläche mit dem Schutzmittel (Abb. 66-9)
12. Injektionsarbeiten im 3. Abschlag, gleichzeitig Verlegung der Injektionsschläuche auf dem 4. Abschlag (Abb. 66-10)

Die Punkte 4-11 werden dann zyklisch wiederholt.

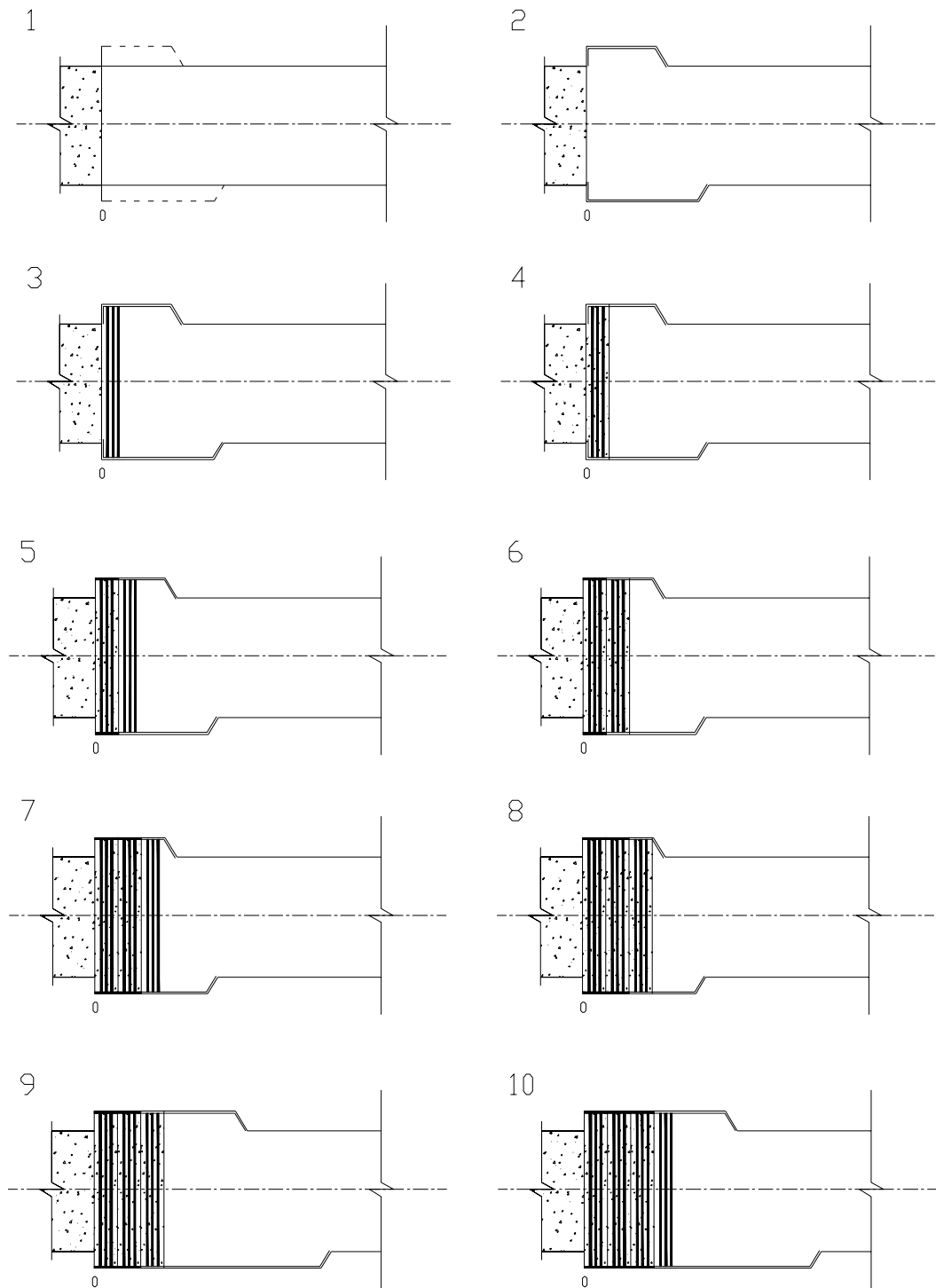


Abb.66: Reihenfolge der Arbeiten beim Errichten eines Verschlussbauwerkes im Carnallit mit Rücksicht auf die Abdichtung der konturnähen Zone.

Vor jeder Stoßberaubung wird die Dichtheit der im vorherigen Zyklus betonierten Abschnitte durch einen Lufteinpressversuch geprüft.

### 6.9 Vorschlag zum Verwenden künstlicher Schlitzze und Einschnitte

Zur Verstärkung der wasserabdichtenden Eigenschaften des Verschlusses und zur Verhinderung der Kapillarströmungen im konturnähen Bereich könnten jede 5–6 Meter Schlitzze (Einschnitte) im gesamten Umfang der Strecke errichtet werden. In die Einschnitte wird ein Ring aus festem Material eingefügt. Dann werden die Abschnitte der Strecke zubetoniert und die Hohlräume mit Kunststoff durch die vorher in den Einschnitten verlegten Injektionsschläuche verfüllt. Diese Methode wurde noch nicht in technischen Versuchen ausprobiert.

Zur Herstellung des Rings kann Polyethylen ausgewählt werden. Wegen der Einbauschwierigkeiten soll der Ring erst vor Ort zusammgebaut werden. Die Elemente des Rings werden wie in Abb. 67 dargestellte Konstruktion haben. Der Ring wird auf folgender Weise in den Einschnitt eingebaut: die Segmente werden in den Einschnitt eingeführt und dann durch die Schlösser miteinander verbunden (Abb.68).

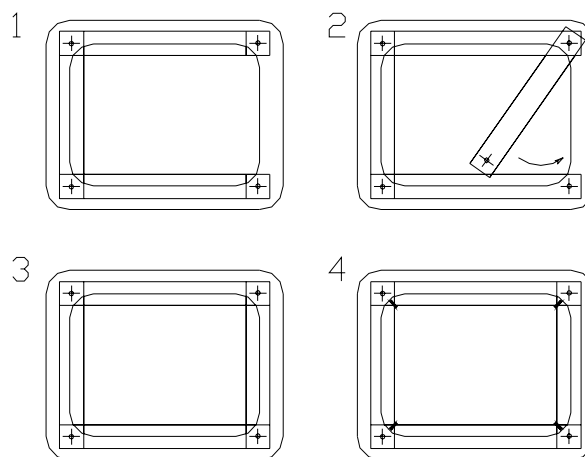


Abb. 67: Einbauschema des Rings

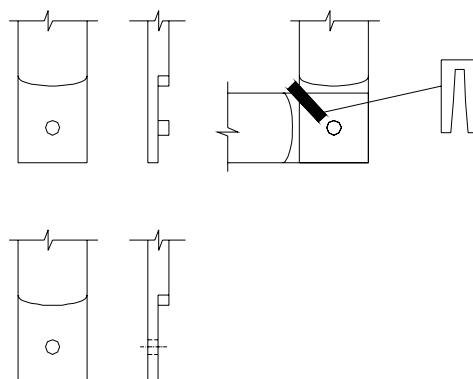


Abb. 68: Schema der Schlösser zur Verbindung der Segmente

Das Errichten des Einschnitts wird mit einer Kreissäge mit einem Verschiebungsmechanismus realisiert. Sägen solcher Art werden im Bauwesen zum

Errichten der Durchgänge in Betonwänden verwendet. Die Säge wird auf einer Schiene verschoben. Die Schiene wird an einer Wand mit Dübel oder Anker verfestigt. Die Schnittbreite beträgt 0,5–1 cm. Zum Errichten eines Einschnittes müssen 2 Schnitte parallel zu einander gemacht werden. Das Gebirge zwischen den Schnitten kann mit einem Abbauhammer entfernt werden. An den schwer erreichbaren Stellen (z.B. Ecken) muss ein Einschnitt mit einer Kettensäge oder einem Pickhammer ausgeführt werden. Nach dem Aufbau des Einschnittes muss das Gebirge in diesem Bereich mit einigen Schichten Schutzmittel bestrichen werden, weil das Gebirge durch die Schneidwärme höhere hygroskopischen Eigenschaften hat. Nachdem müssen die Injektionsschläuche und der Ring in den Einschnitt eingebracht werden.

Danach muss der Streckenabschnitt mit dem Spritzverfahren oder durch das Aufbringen des Ortbetons zubetoniert werden. Danach muss das Injektionsmittel in den Einschnitt eingepresst werden, um die Hohlräume zu schließen.

#### 6.10 Methodik zur Herleitung des Arbeitsablaufs

Nach dem Verfüllen der Hohlräume und der Strecke sowie dem Betonieren des Übergangs wird die Beraubung des verwitterten Gebirge durchgeführt.

Das Volumen des zu beraubenden Gebirges kann man wie folgt bestimmen:

Volumen pro 1 m Strecke –  $V[\text{m}^3/1\text{m Strecke}]$  ist gleich:

$$V = 2 \cdot h \cdot t + 2 \cdot l \cdot t + \pi \cdot t^2, \quad [\text{m}^3/1\text{m Strecke}]$$

(68)

wobei  $h$  – Höhe der Strecke, [m]

$l$  – Breite der Strecke, [m]

$t$  – Schneidtiefe, [m]

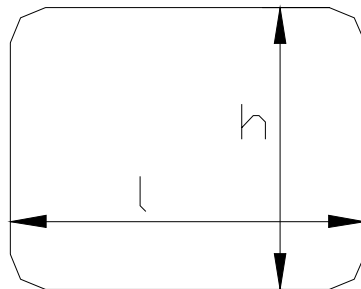


Abb. 69 Schema zur Berechnung der Arbeitsvolumen

Die Zeit, die zur Stoßberaubung pro 1 m Strecke notwendig ist, beträgt:

$$T_{1m} = V/H \quad (69)$$

wobei  $H$ , [ $m^3/s \cdot 1m$  Strecke] – die mittlere Betriebsleistung der Teilschnittmaschine, unter Berücksichtigung der Umsetzungen in der Strecke, ist.

Der Streckenquerschnitt nach der Stoßberaubung ist dann:

$$A_{QS} = l \cdot (2 \cdot t + h) + 2 \cdot h \cdot t + \pi \cdot t^2 \quad (70)$$

Die Fläche der Streckenoberfläche nach der Stoßberaubung beträgt:

$$S = (2 \cdot h + 2 \cdot l + 2\pi \cdot t), \text{ [m}^2\text{/1m Strecke]} \quad (71)$$

Die Zeit, die zur Beschichtung vom 1 m der Strecke mit einer Anzahl von  $n$  Geräten gleichzeitig notwendig ist:

$$T_{Besch} = \frac{S}{v \cdot n} \cdot k, \text{ [min]} \quad (72)$$

wobei

$v$ , [ $m^2/min$ ] – die Trockenstrahlgeschwindigkeit

$k$  – Zeitkoeffizient, welcher Leistungseinbußen berücksichtigt, wenn sich mehrere Maschinen auf engen Raum gegenseitig behindern. (1,2 bei zwei Geräten; 1,4 bei mehr als zwei Geräten)

$n$  – Anzahl der Geräte

Die Zeit zur Reinigung der Stoßes vom 1 m der Strecke durch Trockenstrahlverfahren:

$$T_{Strahl} = \frac{S}{v_R \cdot n_R} \cdot k, \text{ [h]} \quad (73)$$

$v_R$ , [ $m^2/h$ ] – die Beschichtungsgeschwindigkeit unter Verwendung eines luftlosen Spritzverfahrens des Beschichtungsverfahrens bei Verwendung des Apparats der luftlosen Dispersion

$k$  – Zeitkoeffizient, welcher Leistungseinbußen berücksichtigt, wenn sich mehrere Maschinen auf engen Raum gegenseitig behindern. (1,2 bei zwei Geräten; 1,4 bei mehr als zwei Geräten)

$n_R$  – Anzahl der Geräte

Die Zeit, die zum Verlegen eines Injektionsschlauchs notwendig ist:

$$T_{RING} = T_W + T_S + T_F + T_{Vorb} \quad (74)$$

$T_W$  - Dauer der Befestigung der Injektionsschläuche an den Wänden der Strecke

$T_S$  - Dauer der Befestigung der Injektionsschläuche an der Sohle der Strecke

$T_F$  - Dauer der Befestigung der Injektionsschläuche an den Firsten der Strecke

$T_{Vorb}$  - Dauer der Maßnahmen zur Vorbereitung der Injektionsschläuche zu den Injektionsarbeiten, beträgt 30 min.

Die Dauer der Befestigung der Injektionsschläuche an den Wänden der Strecke ist gleich:

$$T_W = 2 \cdot (T_{180} + T_H) \quad (75)$$

$T_{180}$  - Dauer der Befestigung der Injektionsschläuche an den Wänden auf der Höhe unter 180 cm (ohne Hilfsvorrichtungen)

$T_H$  - Dauer der Befestigung der Injektionsschläuche an den Wänden auf der Höhe über 180 cm (mit Hilfsvorrichtungen)

$$T_H = T_{IH} + T_{BH} \quad (76)$$

$T_{IH}$  - Dauer der Installation der Hilfsvorrichtungen

$T_{BH}$  - Dauer der Befestigung

Folgende Befestigungsgeschwindigkeiten werden erreicht:

- 0,1 m/min – auf einer Höhe unter 180 cm
- 0,05 m/min – auf einer Höhe über 180 cm
- Dauer der Installation der Hilfsvorrichtungen 5 min,

Die Befestigungsdauer der Injektionsschläuche in den Firsten der Strecke ist:

$$T_F = T_{IHF} + T_{BF} \quad (77)$$

$T_{IHF}$  - Dauer der Installation der Hilfsvorrichtungen,

$T_{BF}$  - Dauer der Befestigung der Injektionsschläuche,

- die Befestigungsgeschwindigkeit der Injektionsschläuche in den Firsten der Strecke ist:

0,04 m/min

- Dauer der Installation der Hilfsvorrichtungen – fahrbaren Gerüst: 10 min,

Dauer der Befestigung der Injektionsschläuche in der Sohle der Strecke ist gleich:

$$T_B = T_{RG} + T_{BB} \quad (78)$$

$T_{RG}$  - Dauer der Reinigung des Bodens vor der Verlegung der Schläuche

$T_{BB}$  - Die Befestigungsdauer der Injektionsschläuche

- die Befestigungsgeschwindigkeit der Injektionsschläuche ist 0,15 m/min,

- Dauer der Reinigung des Bodens: 10 min,

Anzahl der Ringe pro 1 m Strecke:

$$N_{RING} = \frac{1}{1,5 \cdot R_{5/40}}, [\text{Stück}] \quad (79)$$

$R_{5/40}$  - maximale Reichweite des Injektionsmittels innerhalb von 5 Minuten beim Druck von 40 bar, [m] (wird nach dem Modell (Kapitel 4) gerechnet, aufgrund der Daten von Lüftdruckversuche)

Die Gesamtzeit zur Verlegung der Injektionsschläuche auf 1 m der Strecke ist:

$$T_{IS}^{1m} = N_{Ring} \cdot T_{Ring}, [s] \quad (80)$$

Die Dauer für das Betonieren von 1 m Strecke beim Spritzen ist:

$$T_{BET} = \frac{T_{VM}}{L_{SB}} + \frac{A_{QS} \cdot 1}{V_{BET}} \quad (81)$$

$T_{VM}$  - die Dauer der vorläufigen Maßnahmen und der Reinigung von Einrichtungen nach dem Betonieren

$L_{SB}$  - Länge des Abschnittes beim Betonieren, [m]

$V_{BET}$  - die Leistung des Betonieren, [m<sup>3</sup>/Stunde]

und beim Massenbeton:

$$T_{BET} = \frac{T_{VM}}{L_{SB}} + T_{Absch} \quad (82)$$

$T_{Absch}$  - die Dauer des Aufbringens des Betons in die Schalung, [m<sup>3</sup>/Stunde]

$T_{VM}$  - die Dauer der vorläufigen Maßnahmen und der Reinigung von Einrichtungen nach dem Betonieren (Einschließlich Schalungsaufbau und Schalungsabbau)

Die Dauer der Injektionsarbeiten für einen Ring:

$$T_I = T_{VM} + N_{SEG} \cdot 11, [\text{min}] \quad (83)$$

$N_{SEG}$  - Anzahl der Segmente von Injektionsschläuchen in einem Ring

$T_{VM}$  - die Dauer der vorläufigen Maßnahmen und der Reinigung der Geräte nach der Injektion (20 min)

Zwischen dem Betonieren und dem nachfolgenden Einpressen der Epoxydharze müssen mindestens 72 Stunden vergehen. Diese Zeit ist notwendig für den Beton, um auszuhärten und abzukühlen.

Gemäß der berechneten Werte wird der Arbeitsverlauf (die Dauer des Arbeitszyklus und die Länge des Abschnittes) so ausgerechnet, dass die Pufferzeiten minimal sind.

## 6.11 Herleitung des Arbeitsablaufs für die Bedingungen der Kalisalzgrube Teutschenthal

### 6.11.1 Arbeitsablauf beim trockenen Spritzbetonverfahren

Abb. 69 zeigt das typische Streckenquerschnitt der in der Grube Teutschenthal zukünftig zu verschließenden Verbindungsstrecken.

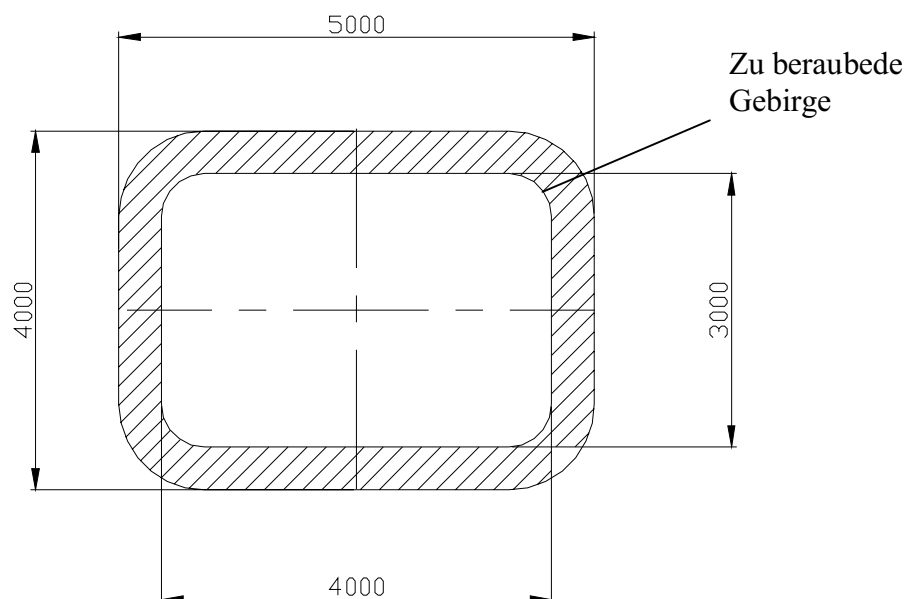


Abb. 69: Schema des Streckenquerschnitts



In der Grube Teutschenthal haben die Strecke, wo das Verschlussbauwerk gebaut werden kann, folgende Querschnitte (Abb.69): viereckige Form mit abgerundeten Ecken, Höhe 3000 mm, Breite 4000 mm. Bei solchen Dimensionen der Strecke ist das Volumen von bei der Beraubung abgeschnittener Gebirgsmasse pro 1 m der Strecke (wenn 50-60 cm tief geschnitten wird) unter Verwendung der Formel (68) ist gleich:

$$V = (2 \cdot 3 \cdot 0,5 + 2 \cdot 4 \cdot 0,5 + \pi \cdot 0,5^2) = 7,8 \text{ [m}^3\text{/1 m Strecke]}$$

Die Zeit, die zur Stoßberaubung pro 1 m Strecke notwendig ist, beträgt:

$$T_{1m} = V/H \tag{69}$$

wobei H – mittlere Betriebsleistung der Teilschnittmaschine, unter Berücksichtigung der Umsetzungen in der Strecke, ist. Bei Verwendung einer Teilschnittmaschine vom Typ *beispielsweise Eickhoff ET-120*, ist die Betriebsleistung für solche Operationen 10 m<sup>3</sup>/h (unter Berücksichtigung der Zeit für Umsetzungen)

$$T_{1m} = \frac{7,8 \text{ m}^3}{10 \text{ m}^3 / \text{h}} = 0,78 \text{ (h/1 m Strecke)} = 46 \text{ (min/1 m Strecke)}$$

Dann ist der Streckenquerschnitt nach der Stoßberaubung unter Verwendung der Formel (70) für die Grube Teutschenthal:

$$A_{BRB} = 4 \cdot (2 \cdot 0,5 + 3) + 2 \cdot 3 \cdot 0,5 + \pi \cdot 0,5^2 = 19,8 \text{ m}^2$$

Die Fläche der Streckenoberfläche nach der Stoßberaubung pro 1 m Strecke unter Verwendung der Formel (71) beträgt:

$$S = (2 \cdot 3 + 2 \cdot 4 + 2\pi \cdot 0,5) \cdot 1 \text{ m} = 17,14 \text{ m}^2$$

Die Geschwindigkeit des Beschichtungsverfahrens ( $v$ , m<sup>2</sup>/min) bei Verwendung des Apparats der lüftlosen Dispersion beträgt ca. 0,1 m<sup>2</sup>/min. Dementsprechend ist die Zeit, die zur Beschichtung vom 1 m der Strecke mit 3 Geräten gleichzeitig notwendig ist, unter Verwendung der Formel (72):

$$T_{Besch} = \frac{17,14}{0,1 \cdot 3} \cdot 1,4 = 79 \text{ (min)}$$

Die Zeit zur Reinigung der Stoßes vom 1 m der Strecke durch Trockenstrahlverfahren unter Verwendung der Formel (73), bei  $v_R=1,5$  (m<sup>2</sup>/h) und  $n_R=1$ :

$$T_{Strahl} = \frac{17,14}{1,5 \cdot 2} \cdot 1,2 = 6,85 \text{ (h)}$$

Die Zeit, die zum Verlegen eines Rings des Injektionsschlauchs notwendig ist (nach der Formel (74)):

$$T_{RING} = T_W + T_S + T_F + T_{Vorb}$$

$T_W$  - Dauer der Befestigung der Injektionsschläuche an den Wänden der Strecke

$T_S$  - Dauer der Befestigung der Injektionsschläuche an der Sohle der Strecke

$T_F$  - Dauer der Befestigung der Injektionsschläuche an der Firste der Strecke

$T_{Vorb}$  - Dauer der Maßnahmen zur Vorbereitung der Injektionsschläuche zu den Injektionsarbeiten, beträgt 30 min.

Dann ist die Dauer der Befestigung der Injektionsschläuche in den Wänden der Strecke unter Verwendung der Formel (75) und (76) für die Grube Teutschenthal:

$$T_W = 2 \cdot \left( \frac{1,8m \cdot 60s}{0,1m} + \frac{2,2m \cdot 60s}{0,05m} + 300s \right) = 7440 \text{ (s)} = 124 \text{ (min)}$$

Dauer der Befestigung der Injektionsschläuche in der Firste unter Verwendung der Formel (77) für die Grube Teutschenthal:

$$T_F = 600s + \frac{4m \cdot 60s}{0,04m} = 6600 \text{ (s)} = 110 \text{ (min)}$$

Dauer der Befestigung der Injektionsschläuche in der Sohle der Strecke unter Verwendung der Formel (78) für die Grube Teutschenthal ist:

in dem gegebenen Fall:

- Streckenbreite: 4 m,
- die Geschwindigkeit der Befestigung der Injektionsschläuche ist 0,15 m/min,
- Dauer der Reinigung des Bodens: 30 min (1800 s),

Dauer der Befestigung der Injektionsschläuche in der Sohle:

$$T_S = 1800s + \frac{4m \cdot 60s}{0,15m} = 3400 \text{ (s)} = 57 \text{ (min)}$$

Die Zeit, die zum Verlegen 1 Rings des Injektionsschlauchs notwendig ist (nach der Formel (74)):

$$T_{RING} = 30 + 124 + 110 + 57 = 321 \text{ (min)}$$

Anzahl der Ringe pro 1 m Strecke unter Verwendung der Formel (79):

$$N_{RING} = \frac{1}{1,5 \cdot R_{5/40}}, \text{ St.}$$

$R_{5/40}$  - maximale Reichweite des Injektionsmittels in 5 Minuten beim Druck von 40Bar, m (wird nach dem Modell (Kapitel 4) gerechnet, aufgrund der Daten von Permeabilitätsmessungen / Luftdruckversuche)

In dem gegebenen Fall wird die Reichweite  $R_{5/40}$  gleich 50 cm angenommen.

Dann ist die Anzahl der Ringe pro 1 m Strecke:

$$N_{RING} = \frac{1}{1,5 \cdot 50} = 2 \text{ (St.)}$$

Die Gesamtzeit zur Verlegung der Injektionsschläuche auf 1 m der Strecke unter Verwendung der Formel (80) für den gegebenen Fall ist:

$$T_{IS}^{lm} = 321 \cdot 2 = 641 \text{ (min)}$$

Die Dauer vom Betonieren von 1 m der Strecke unter Verwendung der Formel (81) für den gegebenen Fall ist:

bei Verwendung einer Betonspritzmaschine *beispielsweise MEYCO Altera* mit Betriebsleistung unter solchen Bedingungen von  $V_{BET} = 4 \text{ m}^3/\text{h}$

Aus Technologischen Gründen wird die Strecke in Abschnitten von 1 m betoniert.

Dann ist die Betonagedauer von 1 m der Strecke:

$$T_{BET}^{lm} = \frac{3}{1} + \frac{19,8 \cdot 1}{4} = 7,9 \text{ (St.)}$$

Die Dauer vom Betonieren von 1 Betonierungsabschnitt: 4,5 Stunden.

Die Dauer der Injektionsarbeiten für einen Ring unter Verwendung der Formel (83) ist: in dem Gegebenen Fall besteht der Ring aus 4 Segmenten, dementsprechend:

$$T_I = 20 \text{ min} + 4 \cdot 11 \text{ min} = 64 \text{ (min)}$$

Dann wird zur Durchführung der Injektionsarbeiten auf 1 m Strecke folgender Zeitaufwand benötigt:

$$T_I^{lm} = T_I \cdot N = 64 \cdot 2 = 128 \text{ (min)}$$

Zwischen dem Betonieren und dem nachfolgenden Einpressen der Epoxydharze müssen mindestens 24 Stunden vergehen. Diese Zeit ist notwendig für den Beton, um auszuhärten und abzukühlen.

Zusammenfassend sind die berechneten Volumina und die Zeitaufwände pro 1 m Strecke in der Tabelle 6.1 angegeben.

Operation	Volumina pro 1 m Strecke	Zeitaufwand pro 1 m Strecke
Berauben der Streckenoberfläche	7,8 m <sup>3</sup>	-
Reinigung	17,4 m <sup>2</sup>	408 min
Schutzbeschichtung	17,4 m <sup>2</sup>	79 min
Verlegung der Injektionsschläuche	2 Stück	641 min
Betonieren	19,8 m <sup>3</sup>	456 min
Verpressarbeiten	2 Injektionsringe	128 min

Tabelle 6.1: Volumina und die Zeitaufwände für jede Operation pro 1 m Strecke beim Spritzbetonverfahren.

Aufgrund der Ergebnisse sollte der Arbeitszyklus wie folgt aussehen: die Arbeit wird im Fall des 2-schichtigen Betriebes in 5-tägigen Zyklen durchgeführt. Im Laufe eines Zyklus wird ein 1 Meter langer Abschnitt des Verschlussbauwerkes aufgebaut (Abb.70).

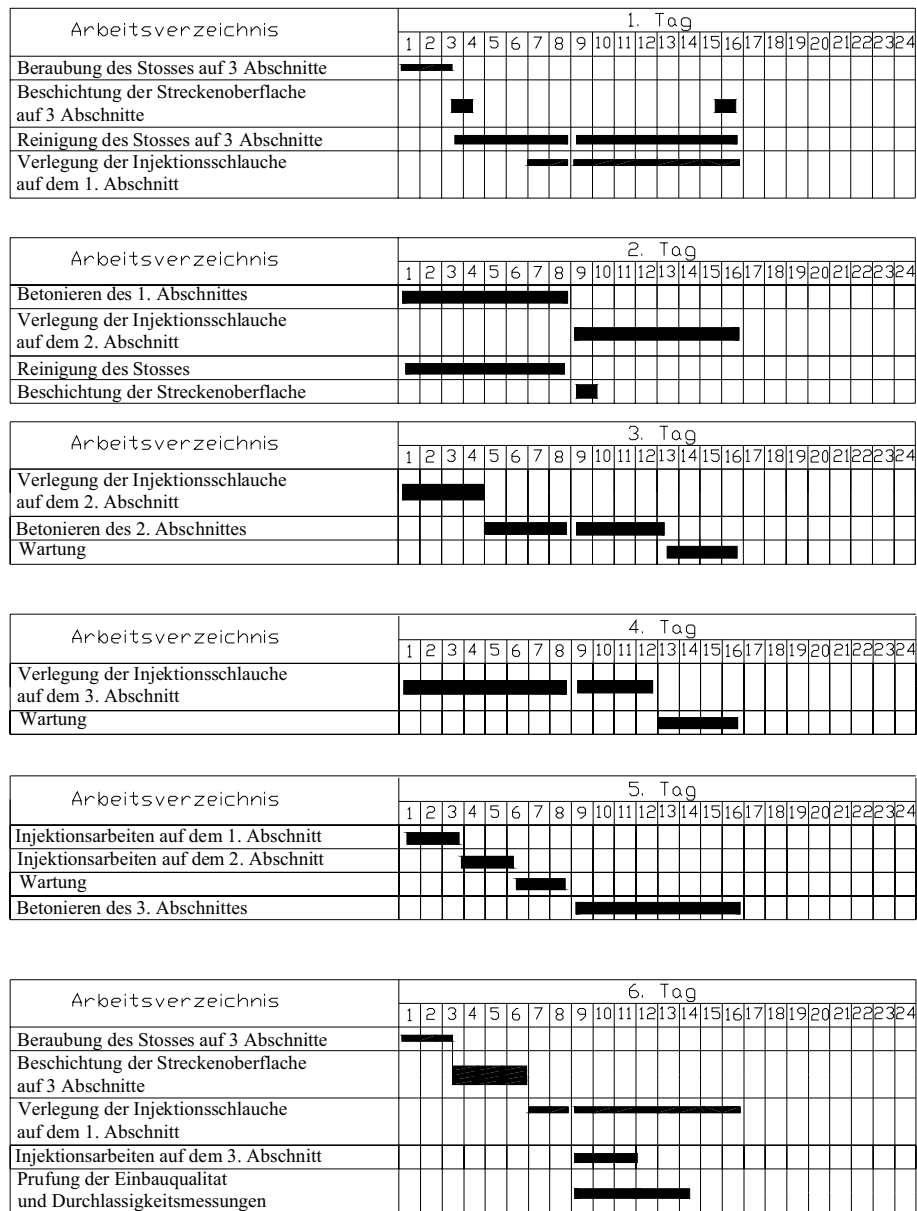


Abb. 70: Arbeitsverlauf beim Errichten eines Verschlussbauwerkes im Carnallit

### 6.11.2 Arbeitsablauf beim Einbau von Ortbeton

Alle Vorbereitungsarbeiten (Stoßberaubung, Reinigung, Beschichtung der Oberfläche, Verlegung von Injektionsschläuche usw.) sind analog zu dem Arbeitsablauf im Spritzbetonverfahren. Die Dauer der Arbeitsabschnitten für diese Vorgänge kann aus der vorherigen Berechnung genommen werden.

Aus technologischen Gründen wird die Strecke in Abschnitten von 0,5 m betoniert.

Dann ist die Dauer vom Betonieren von einem Abschlag unter Verwendung der Formel (82):

bei  $T_{VM} = 32$  Stunden (Dieser Wert wurde aus der Erfahrung angenommen)

$T_{Absch} = 12$  Stunden (Dieser Wert wurde aus der Erfahrung angenommen)

$T_{BET} = 32 + 12 = 44$  (h)

Die Injektionsarbeiten können parallel mit dem Aufbau der Schalung durchgeführt werden.

Die Dauer der Injektionsarbeiten für einen Ring unter Verwendung der Formel (83) ist: in dem gegebenen Fall besteht der Ring aus 4 Segmenten, dementsprechend:

$T_I = 20 \text{ min} + 4 \cdot 11 \text{ min} = 64$  (min)

In diesem Fall kann ein Ring pro Betonierungsabschnitt angenommen werden.

Zwischen dem Betonieren und dem nachfolgenden Einpressen der Epoxidharze müssen mindestens 72 Stunden vergehen. Diese Zeit ist notwendig, damit der Beton aushärten und abkühlen kann.

Bei dieser Technologie muss man noch die Zeit zum Schalungsabbau mitrechnen.

Aus Erfahrung wird diese Zeit mit 16 Arbeitsstunden angenommen.

Zusammenfassend sind die berechneten Volumina und Zeitaufwände pro 0,5 m Strecke in der Tabelle 6.2 angegeben.

Operation	Volumina pro 0,5 m Strecke	Zeitaufwand pro 0,5 m Strecke
Berauben der Streckenoberfläche	3,9 m <sup>3</sup>	-
Reinigung	8,7 m <sup>2</sup>	190 min
Schutzbeschichtung	8,7 m <sup>2</sup>	35 min
Verlegung der Injektionsschläuche	1 Stück	320 min
Betonieren von 0,5 m	9,9 m <sup>3</sup>	44 Stunden
Verpressarbeiten	1 Injektionsring	64 min

Tabelle 6.2: Volumina und Zeitaufwände für jede Operation pro 1 m Strecke beim Einbau von Ortbeton.

Aufgrund der Ergebnisse sollte der Arbeitszyklus wie folgt aussehen: die Arbeit wird in 2-wöchigen Zyklen durchgeführt (mit 5 Arbeitstage pro Woche). Im Laufe eines Zyklus wird ein 0,5 Meter langer Abschnitt des Verschlussbauwerkes aufgebaut. (Abb.71)

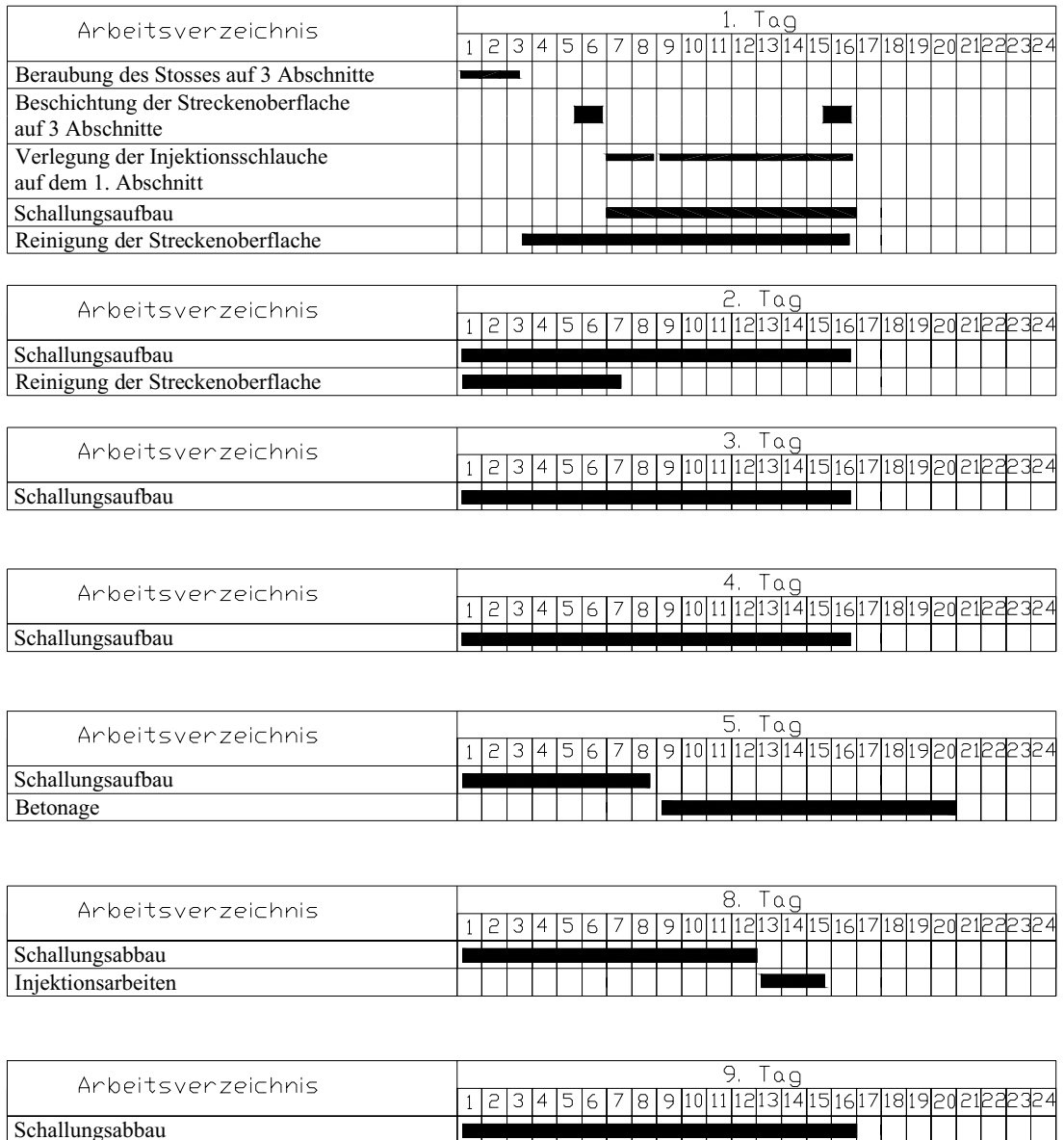


Abb. 71: Arbeitsverlauf beim Errichten eines Verschlussbauwerkes im Carnallit

Aus dem Vergleich dieser zwei Methoden ist zu sehen, dass das Betonieren mit dem Spritzbetonverfahren schneller ist. Für diese Methode besteht aber noch Untersuchungsbedarf und der Nachweis der erreichbaren Qualität unter großtechnischen Bedingungen steht noch aus. Aus diesem Grund wird als Basistechnologie der Aufbau eines Verschlussbauwerkes aus Ortbeton angenommen.

## **7 Schlussfolgerung**

Wie die Versuchsergebnisse gezeigt haben, gewährt die vorgeschlagene Methode der Einrichtung eines Verschlussbauwerkes im Komplex mit den vorläufigen und den nachträglichen Schutz- und Abdichtungsmaßnahmen eine gute Isolierung der Strecke mit einem ausreichenden Undurchlässigkeitsgrad gegen Salzlösungen auch unter hohen Drücken.

Laut den durchgeführten Untersuchungen zur Langzeitbeständigkeit kann dieser Schutzkomplex (Verschlussbauwerk mit der Kunststoffabdichtung) seine Abdichtungseigenschaften innerhalb von 100-150 Jahren behalten. Nach dieser Frist sollte laut den Untersuchungen zum rheologischen Verhalten des Salzgesteins [11,95] sich die Auflockerungszone wegen der Einwirkung des Gebirgsdrucks zurückgebildet haben.

Daher kann diese Methode zur Isolierung der Strecken bei Untertagedeponien von toxischen Abfällen in unterirdischen Hohlräumen, die in tiefen geologischen Formationen in ehemaligen Gruben im Kalisalzgestein eingelagert sind, angewendet werden.

Ein Vorschlag zur Durchführung und die Methode der Ermittlung der wichtigsten technologischen Parameter sind in dieser Arbeit beschrieben. Die Technologie berücksichtigt die vorläufigen und nachträglichen Maßnahmen zum Schutz und zur Abdichtung des Gebirges im Konturbereich.



## 8 Literaturliste

1. Sitz, P.; Gruner, M.: Langzeitsichere Verschlüsse für Untertagedeponien und Endlager unter besonderer Berücksichtigung natürlicher Materialien. Glückauf 132 (1996) Nr. 7, S. 327 – 332
2. Schmidt, M. W. et al.: Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken – Vorprojekt. Förderkennzeichen BMBF 02 C 0234 0. GSF – Bericht 32/95, Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Oberschleißheim, 1996.
3. BMBF-Vorhaben "Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke" TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Prof. Dr.-Ing. W. Kudla, 2004
4. Shishits, I. – (Russisch) Grundlagen der Endlagerung der radioaktiven Abfälle – Moskwa: MGGU, 2004, 632 s.
5. Wittke: Permeabilität von Steinsalz – Theorie und Experiment. – Verlag Glückauf GmbH, Essen 1999
6. Sitz, P. Entwicklung eines Grundkonzepts für langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke im Salinar - Bau und Test eines Versuchsverschlussbauwerkes unter realen Bedingungen. Bericht BMBF 02 C 0547 Sondershausen, 2003
7. IBEWA – Bericht zum Projekt „Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV.“ Teil 2: Erprobung von Funktionselementen in situ. Teilleistung: Standorthydraulik; In situ - und Laboruntersuchungen; großmaßstäbliche Verifizierung, Teutschenthal, 15.11.2005
8. Wiczorek, K., Schwarzianeck, P.: Abschlussbericht zum Vorhaben GRS-18 „Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand“, 2004, ISBN Nr.:3-931995-65-8
9. Häfner, F. Zeitliche Veränderung der Ausdehnung und der hydraulischen Eigenschaften von Auflockerungszonen um Hohlräume in Gesteinen mit viskoplastischen Eigenschaften Bericht BMBF 02 C 0820, 2003
10. Kutzner, Christian: Injektionen im Baugrund – Stuttgart: Enke, 1991
11. Proskurjakov, N., Permjakov, R., Chernikov, A. (Russisch) Physikalisch-Mechanische Eigenschaften vom Salzgestein. Nedra Verlag, Leningrad, 1973

12. Fliss, Th., Kawka, A. Herstellung und Prüfung von Probekörpern aus Solemortel unterschiedlicher Rezepturen. Unveröffentlicht. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau, 2001
13. Breidung, K.-P. Schachtverschlüsse für untertagige Deponien in Salzbergwerken - Forschungsvorhaben Schachtverschluss Salzdettfurth Schacht SA II. Bericht BMBF 02C 0516 Salzdettfurth, 1999
14. Kawka, A. Aktennotiz „Beurteilung der Möglichkeit, Verwitterungsprodukte des carnallitischen Gebirges mittels Trockenstrahltechnik zu beseitigen“ / TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, 2005
15. Ehrhardt, K. Entwicklung und Eigenschaftsuntersuchung von schüttfähigen Bentonit-Zuschlagstoff- und Bentonit- Gemischen für den untertägigen Einsatz als Dichtmaterial / Dissertation, Der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2001
16. Williams, J.R.; Daemen, J.J.K.: The Sealing Performance of Bentonite/Crushed Basalt Borehole Plugs. U.S.Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-4983 1987
17. Quyang, S.: Sealing performance assessments of bentonite/ crushed rock plugs. Diss.1990 University of Arizona, Order Number 9111959
18. Entwurfsplanung von Querschnittsabdichtungen. Abschlussbericht. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe Peine: DBE, 1995.
19. Böhnel, H. & Brückner, D.: Gesteinsmechanische Untersuchungen an zylindrischen Prüfkörpern aus Salzgrusbriketts. Institut für Gebirgsmechanik Leipzig, Teilbericht 20.04.1999. (unveröffentlicht)
20. Fliß, Th.: Mechanische Eigenschaften von Probekörpern aus Salzgrusbriketts unter dem Einfluss von gesättigter NaCl — Lauge. Bericht unveröffentlicht, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau (2000).
21. Koch, G.: Langzeitbeständigkeit von Basalt. Zwischenbericht zum F/E — Vorhaben „Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke“, TU Bergakademie Freiberg, 1998.
22. Fliß, Th. „Entwicklung eines Algorithmus zum Entwurf und zur Bemessung von mehraxial beanspruchten Mauerwerksverbänden unter Berücksichtigung der Langzeitstabilität, sowie Bestimmung der Verbandsparameter.“ / Dissertation. Der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der Technischen Universität Freiberg, 2003

23. Beitz, W., Grote, K.-H., Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, 19. Auflage, Verlag Springer, 1997.
24. Wasowietz, B. Untersuchungen zum Einsatz von Magnesia-Beton im Kontakt mit Kalisalzgestein. Interner Bericht TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau, 2005, unveröffentlicht
25. Gruner, M. Untersuchungen zum Einsatz von Magnesia-Beton zum Aufbau von Verschlussbauwerke im Carnallitit. Interner Bericht, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau, 2005, unveröffentlicht
26. Smirnov, W.: Einrichtung von unterirdischen Öl- und Gasspeicher. Moskau: Gasoilpress, 2000. – 250 s.
27. Schustrow, W.: Abdichtung von Konturnähenzone bei Einrichtung von unterirdischen Öl- und Gasspeicher. Dissertation, MSBU, 1986.
28. Krakau, U.; Sitz, P.: Rheologische und physikalische Bitumen- und Asphaltparameter-Grundlagen für einen effektiven Einsatz im Untertagebergbau. "Spezialverfahren im Bergbau und Bauwesen". Vortragsbroschüre zum 5. Kolloquium, Freiberg, 4. - 7. September 1990, S. 168 - 178
29. Gruner, M., Kawka, A., Knoll, P., Sitz, P. Verfahren und Zusammensetzung zum Abdichten von Strecken im Bergbau und/oder eines Baukörpers. Patentschrift DE 10 2005 009 036. Veröffentlicht 16.03.2006
30. Abschlussbericht Entwicklung eines Grundkonzeptes für Langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallitit) für UTD/UTV, BMBF – Förderkennzeichen 02 C 0942. Teutschenthal, März 2005, Seite 103-112
31. Shilin, A., Zajtsev, M., Zolotarev, I., Ljapidevskaja, O. (Russisch) Abdichtung der unterirdischer und erdberührter Bauteile beim Bau und Sanierung. Lehrbuch. – Verlag „Russkaja Torgovaja Marka“, 2003. – 398 S.
32. Lufsky, K.: Bauwerksabdichtung / von Karl Lufsky. – 4., neubearb. u. erw. Aufl. – Stuttgart: Teubner, 1983
33. Kutzner, Christian: Injektionen im Baugrund – Stuttgart: Enke, 1991
34. Kusmin, Anwendung der Polymerinjektionen zur Verfestigung des Gebirges bei Kohlegewinnung, Moskauer Bergbau Institut, Dissertation, Moskau, Verlag MGI, 1989
35. Schwerter, R. Die Bekämpfung von Salzlösungszuflüssen. Kali und Steinsalz, Band 11, Heft 1/2, Mai 1992, S. 32-43

36. Kloditz, H., Steinberg, S. Versiegelung des Carnallitits im Bohrschacht Asse 4. Kali und Steinsalz, Band 11, Heft 1/2, Mai 1992, S. 23-31
37. Ehrenstein G. W. und Bittmann E.: Duroplaste: Aushärtung - Prüfung - Eigenschaften/. Unter Mitarb. von E. Bittmann - München; Wien: Hanser, 1997
38. Röthemeyer, H.: Endlagerung radioaktiver Abfälle – Weinheim, VCH 1994.
39. Dolezel, B: Die Beständigkeit von Kunststoffen und Gummi. Carl Hanser Verlag, München-Wien, 1978
40. Hellerich, W. Werkstoff-Führer Kunststoffe: Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte. – Wien: Hanser, 1992
41. Blaese, D. Methodische Ansätze zur Abschätzung der Lebensdauer von Kunststoffbauteilen bei komplexer Belastung. – Aachen: Shaker, 2000
42. Widmann, R. Injektionen – Ausführung und theoretische Grundlagen / Felsbau 12 (1994) Nr. 1, Seiten 35-46
43. Russischer Norm - Vereinigtes System des Korrosions- und Alterungsschutzes. Polymerstoffe. Methoden der künstlichen Alterung. GOST 9.707-81. GOSUDARSTVENNYJ KOMITET SSSR PO STANDARTAM, Moskau, 1981
44. Qu, Jun: Untersuchung zur Langzeitbeständigkeit adhäsiver Verbindungen aus Floatglas und Kunststoffen / von Jun Qu Kaiserslautern: Univ.-Bibliothek, 2000 Zugl.: Kaiserslautern, Univ., Diss., 2000
45. Spaude, R. Korrosion und Alterung von Glasfasern und Duroplasten – genehmigte Dissertation, Universität – Gesamthochschule Kassel, 1984
46. Karsten, R. Bauchemie : Handbuch für Studium und Praxis/Rudolf Karsten. -10., überarb. und aktualisierte Aufl - Heidelberg : Miller, 1997
47. Ehrenstein, G. W. Kunststoff-Schadensanalyse : Methoden und Verfahren / Gottfried W. Ehrenstein. - München ; Wien : Hanser, 1992
48. Michler, G. H. Kunststoff-Mikromechanik, Carl Hanser Verlag MünchenWien, 1992
49. Bützer, J., Kessler, K. Kunststoff als Werkstoff: Celluloid und Polyurethan-Weichschaum. Material - Eigenschaften – Erhaltung/ Siegl München 2001
50. Certifikat of Swedish National Testing and Research Institute of Polymer Technology 92M30822
51. Menges, G. Werkstoffkunde Kunststoffe, Carl Hanser Ver-lag München Wien, 3. Auflage, 1990
52. DIN 50035, Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien, März 1989

53. Krebs, C. Avondci, M.-A. Leu, K. W. Langzeitverhalten von Thermoplasten, Carl Hanser Verlag München Wien, 1999
54. Vielh, W. R. Diffusion in and through Polymers - Principles and Applications, Carl Hanser Verlag München Wien New York, 1991
55. Müller, F. H. Hellmuth, E. Permeation, Quellung und Diffusion in Polymeren, Kolloid-Zeitschrift 177 (1961) 1, S. 1-23
56. DIN IEC 216, Leitlinie zur Bestimmung thermischer Langzeiteigenschaften von Elektroisolierstoffen, April 1996
57. Widmann, R.: Injektionen – Ausführung und theoretische Grundlagen / Felsbau 12 (1994) Nr. 1, Seiten 35-46
58. Bolesta, M., Zysk, K.-H. Untersuchungen zum Eindringvermögen von Injektionsmitteln Investigations on the penetration capacity of injecting agents/ Grouting in Rock and Concrete, Widmann (ed.) © 1993 Balkema, Rotterdam
59. DIN IEC 216, Leitlinie zur Bestimmung thermischer Langzeiteigenschaften von Elektroisolierstoffen, April 1996
60. Lege, Th.: Strömungs- und Transportmodellierung / Th.Lege, O.Kolditz, W.Zielke. Springer Verlag, 1996
61. Jähde, H. Injektionen zur Verbesserung von Baugrund und Bauwerk, Berlin 1953
62. Lomize, G.: Strömung im klüftigen Gestein, Gosenergoizdat, 1961
63. Polubarinova-Kochina, P.: „Zur Theorie der Grundwasserwanderung“ / „Nauka“ Verlag, Moskau, 1962
64. Louis, C.: Strömungsvorgänge im klüftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen im Fels, Karlsruhe 1967
65. Müller-Kirchenbauer, H.: Zur Theorie der Injektionen, Karlsruhe 1968
66. Rissler, P.: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von klüftigem Fels, Aachen, Techn. Hochsch. Diss., 1977
67. Rissler, P.: Talsperrenpraxis, Verlag Oldenbourg, München, Wien, 1999
68. Koppelberg, W.: Numerische und statistische Untersuchungen zur Durchlässigkeit geklüfteter geologischer Körper und ihrer Bestimmung durch Wasserdruckversuche / Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1985
69. Krakau, U.: Untersuchungen zu physikalischen und physiko-chemischen Wechselwirkungen beim Einsatz von Bitumen und Asphalten zur Abdichtung und Verwahrung untertägiger Hohlräume / Freiberg, Bergakademie, Diss., 1990

70. Hässler, L., Simulation of grouting in jointed rock. 6. ISRM Kongress, Montreal 1987, Vol. 2, S. 943-946.
71. Kolditz, O.: Strömung, Stoff- und Wärmetransport im Kluftgestein / Verlag Bornträger, Berlin, Stuttgart, 1997
72. Gemmel, D.: Anforderungen an die technologischen Eigenschaften von Injektionsmitteln zum Verfestigung der angeschnittenen Hangendschichten in Abbau- und Basisstrecken. / Dissertation, RWTH Aachen, 1992
73. Widmann, R.: Injektionen in Fels und Beton – Zwischenbericht einer Arbeitsgruppe des Verbundkonzerns / Felsbau 9 (1991) Nr. 3, S. 147-154
74. Gaisbauer, Huber: Injektionen in Fels und Beton – Zwischenbericht einer Arbeitsgruppe des Verbundkonzerns / Felsbau 9 (1991) Nr. 3, S. 149-150
75. Baban, R., Geymayr, H.: Untersuchungen zur Injektion von Kunstharzen in Fugen und Rissen in Massenbeton / Grouting in Rock und Concrete, Verlag Balkema, Rotterdam
76. Konietzky, H., Hart, R., Billaux, D.: Mathematische Modellierung von geklüftetem Fels / Felsbau 12 (1994) Nr.6, S.395-400
77. Kutzner, Ch.: Grouting in Rock und Soil / Verlag Balkema, Rotterdam, 1996
78. Behr, A., Voigt, H.-D., Haefner, F., Belohlavek, K.U.: An advanced well test with automatic model calibration for soils and rocks. Proceedings of ModelCARE 2002, Prague, Czech Republic, 17-20 June IAHS Publ. no 277, 2002.
79. Wieczorek, K., Zimmer, U.: Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge. Abschlussbericht zum vom BMBF unter dem Förderkennzeichen 02 C 0425 7 geförderten Projekt, 1999.
80. Mieke, R., Harborth, B., Klarr, K., Ostrowski, L.: Permeabilitätsbestimmungen im Staßfurt-Steinsalz in Abhängigkeit von einer Streckenauffahrung. Kali und Salz, Band 11, Heft 5/6, 175-184, Dez. 1993.
81. Voigt, H.-D., Untersuchungen zum Strömungsverhalten in ein- und mehrschichtigen porösen Speichern mit Hilfe von mathematischen Simulationsverfahren, Freiberg, Bergakad., Diss., 1977
82. Nasonov, I., Resin, W., Modellierung der physikalischen Prozesse im Bergbau / Moskau, Verlag der Akademie von Bergbauwissenschaften, 1999
83. Nasonov, I., Schuplik, M., Labor-Praktikum für die Modellierung der Bergbauprozessen / Moskau, MGI, 1972
84. Bochkareva, R., Zur Untersuchung des Mechanismus der Bildung einer offenen Porosität im Salzgestein unter mechanischen Beanspruchung und deren

- Zusammenhang mit Deformationsparametern des Gesteins. Moskau, Moskauer Staatliche Bergbau Universität, Dissertation, 1999.
85. Salzer, K., Zwischenbericht von IFG Leipzig zum BMBF-F/E-Vorhaben "Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV" vom 15.06.2006
  86. Salzer, K., Popp, T., Weise, D. IFG Leipzig, Ergebnisbericht AP3 zum BMBF-F/E-Vorhaben "Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV" vom 25.09.2004
  87. Freyer, D., Voigt, W., Bericht Aussagen zur thermischen Stabilität von Tachyhydrit – bezugnehmend zur Problematik Grube Teutschenthal. Im Auftrag des Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt. Freiberg, 08.03.2005
  88. EN ISO 175:2000 Prüfverfahren zur Bestimmung des Verhaltens gegen flüssige Chemikalien
  89. DIN 18156 Stoffe für keramische Bekleidungen im Dünnbrettverfahren. Epoxidharzklebstoffe.
  90. Technisches Datenblatt, Fa. Deneef, Denepox 40
  91. Technisches Datenblatt, Fa. Deneef, HA Cut CFL
  92. Kawka, A., Eignungstest von Injektionsschläuchen zur Permeabilitätsbestimmung/anschl. Injektionsversuch von 2-K-Bitumen. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau Freiberg, 2006, unveröffentlicht.
  93. Kawka, A., Bericht zur Untersuchung des Auftragens des MgO-Betons als Spritzbeton. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau Freiberg, 2006, unveröffentlicht.
  94. Kudla, W., Gruner, M., Priestel, U., Kawka, A., Bericht „Projekt CARLA. PG 24“, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Freiberg, 2006, unveröffentlicht.
  95. Rothfuchs, T. et al., GRS-Bericht Nr. 194 "Final Evaluation of the Project 'Thermal Simulation of Drift Emplacement' (TSDE-Project)", November 2003, ISBN Nr.:3-931995-62-3
  96. Deneef, schriftliche Mitteilung von 22.03.07
  97. Menges, G. Abschätzungsmethode für das Verhalten von Kunststoffen bei Temperaturwechsel unter konstanter Last, Kunststoffe 64 (1974) 4, S.205-211
  98. Allara, D., Fowkes, F. Bonding and adhesion of polymer interfaces. Mater. Sci. Eng., 1986

99. Schmachtenberg, E. Innovation durch Materialforschung und -entwicklung. Bd. 2., Werkstoffauswahl/Lebensdauervorhersage, technische Thermoplaste in Heißwasseranwendungen. - Als Ms. gedr. - Düsseldorf : VDI-Verl., 1999
100. Rosenthal, N., Chehnin, G., Belnik, A., Zhilkin A. (Rus) Korrosionsbeständigkeit von Kunststoffe unter Einwirkung von Laugen im Beton. Zeitschriftartikel „Beton und Eisenbeton“ Nr. 3, 2002
101. Krakau, U., Sitz, P., Wetzels, D. Patent DD 295893: „Verfahren zur Herstellung einer versiegelungsfähigen Oberfläche auf Carnallitgesteinen“, Veröffentlichungsdatum 14.11.1991
102. Sitz, P., Gruner, M., Knoll, P. Sterckenverschlüsse im Carnallit / Kali und Steinsalz Heft 2/2005, Kaliverein e.V.
103. Freidel, T., Numerical simulation of production from tight-gas reservoirs by advanced stimulation technologies. Freiberg, TU Bergakademie, Diss., 2004
104. Voigt, H.-D. Bericht zur Messung der Auswertung der in-situ Teste an den Oberflächenpacker I-06, II-06 und III-06. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau 07.06.2006
105. Grafe, F. Bericht zur Messung der Auswertung der in-situ Teste an den Oberflächenpacker 4-7 und Bohrlöcher 1-2. IBEWA, Freiberg, 07.04.2007



## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Mineraliengehalt in Proben aus Teutschenthal	7
Tabelle 3.1	Sofort nach der Beraubung aufgetragene Beschichtungen	37
Tabelle 3.2	Auf den nassen Stoß (24 Stunden nach der Beraubung) aufgetragene Beschichtungen	38
Tabelle 3.3	Relative Wasseraufnahme von trockenbeschichteten Probekörper bei der Lagerung unter Laborbedingungen	42
Tabelle 3.4	Relative Wasseraufnahme von naßbeschichteten Probekörper bei der Lagerung unter Laborbedingungen	43
Tabelle 3.5.	Relative Wasseraufnahmen von Probekörper	46
Tabelle 4.1	Anwendung der Polymerinjektionsmitteln im Kontakt mit Salzgestein.	58
Tabelle 4.2	Sichtskontrolle der Probekörper nach der Lagerung im Kontakt mit Salzgestein bei erhöhter Temperatur.	60
Tabelle 4.3	Sichtskontrolle der Probekörper nach der Lagerung in Salzlösung bei erhöhter Temperatur.	60
Tabelle 5.4.1	Vergleich der Permeabilitätswerte vor und nach der Injektion	90
Tabelle 5.4.2	Vergleich der Permeabilitätswerte vor und nach der Injektion	91
Tabelle 5.4.3	Vergleich der Permeabilitätswerte vor und nach der Injektion	93
Tabelle 5.4.4	Verschiebungen des Oberflächenpackers beim Einpressen	100
Tabelle 5.4.5	Vergleich der Permeabilitätswerte vor und nach der Injektion in allen Versuchen.	100
Tabelle 5.4.6	Vergleich der Permeabilitätswerte der Bohrlochversuche vor und nach der Injektion.	104
Tabelle 6.1	Volumina und die Zeitaufwände für jede Operation pro 1 m Strecke beim Spritzbetonverfahren.	134
Tabelle 6.2	Volumina und die Zeitaufwände für jede Operation pro 0,5 m Strecke beim Einbau von Ortbeton.	136

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Schema eines Verschlusses beim Gasspeicher im Salzgestein	12
Abb. 2 a	Sättigungsfeuchten von Tachydit	28
Abb. 2 b	Sättigungsfeuchten von Carnallit	28
Abb. 3	Schema der Hohlräume zur Endlagerung von Abfällen	30
Abb. 4 a	Einpressen von Injektionsmitteln zur Verfestigung und Abdichtung des Gebirgsmassivs vor dem Bau des Verschlussbauwerkes	32
Abb. 4 b	Verhinderung von Kapillarströmungen durch die Erstellung von Schlitzern und Einschnitten	32
Abb. 4 c	Abdichtung der Fuge zwischen dem Gebirge und Bauwerk, bzw. der Auflockerungszone durch Injektionen von Polymerstoffen	32
Abb. 5	Bohrlöcher zum Einpressen des Injektionsmittel	33
Abb. 6	In-situ Prüfung der Beschichtungen	37
Abb. 7	Lagerungsversuche bei den beschichteten Probekörper (links – unbeschichtet, rechts – beschichtet mit Denepox 40 nach der Lagerung innerhalb von 7 Tage)	39
Abb. 8	Relative Wasseraufnahme von trockenbeschichteten Probekörper bei der Lagerung unter Laborbedingungen	42
Abb. 9	Relative Wasseraufnahme von naßbeschichteten Probekörper bei der Lagerung unter Laborbedingungen	44
Abb. 10	Relative Wasseraufnahme von naßbeschichteten Probekörper bei der Lagerung unter Laborbedingungen	45
Abb. 11	Kapillarströmungsverhinderung durch Einrichtung von künstlichen Schlitzern	48
Abb. 12	Einrichtung von künstlichen Schlitzern durch das Hydrofracverfahren	48
Abb. 13	Widerlager beim Hydrofracverfahren	49
Abb. 14	Versuch zum Errichten von künstlichen Schlitzern durch Hydrofrackverfahren	50
Abb. 15	Hydrofrackerscheinungen im Bohrloch	50
Abb. 16	Bohrkern aus dem gefrackten Gebirge	51
Abb. 17	Bohrkern aus dem gefrackten Gebirge	51
Abb. 18	Schema zum Versuch zur Anwendung des Rings aus einem festen Material mit nachfolgender Verfüllung der Hohlräume mit Kunststoffe.	53

Abb. 19	Probekörper zur Eignungsprüfung von Polymerinjektionsmitteln im Kontakt mit Salzgestein	57
Abb. 20	Zeitliche Veränderung der Eigenschaften der Kunststoffe unter Einwirkung von Salzlösungen	62
Abb. 21	Zunahme der Konzentration des Wassers und der Salzlösung im Probekörper eines Polymerstoffes bei der Diffusion von den Seiten.	64
Abb. 22	Druckabfall im Riss (Radialsymmetrische Strömung)	67
Abb. 23 a	Rechnungsschema beim Einpressen durch den Injektionsschlauch (Seitenansicht)	67
Abb. 23 b	Rechnungsschema beim Einpressen durch den Injektionsschlauch (Draufsicht)	68
Abb. 24	Druck und Durchflüssmengen Verteilung im Injektionsschlauch	68
Abb. 25	Diagramm zum Auswahl des Strömungsgesetzes	69
Abb. 26	Schema der Strömung beim Einpressen durch den Injektionsschlauch	72
Abb. 27	Druckabfall im Riss. Rechnungsschema zur Modellierung des Lufteinpresversuchs	76
Abb. 28	Das Schema des Versuchsstand zur Prüfung des Modells	81
Abb. 29	Der Versuchsstand zur Prüfung des mathematischen Modells der Klufftströmung.	81
Abb. 30	Strömung des Glycerins im Versuchsstand	83
Abb. 31	Berechtigter Kapillardruck bei der Strömung im Versuchsstand	83
Abb. 32	Strömungsdiagramm nach dem Modell und der Vergleich der berechneten Daten mit den gemessenen	84
Abb. 33	Strömungsdiagramm nach dem Modell und der Vergleich der berechneten Daten mit den gemessenen	85
Abb. 34	Oberflächenpacker	86
Abb. 35	Schema des Oberflächenpackers	85
Abb. 36	Berechnung der Spaltöffnungsweite vom Packer 1	87
Abb. 37	Berechnung der Injektionsreichweite vom Packer 1	88
Abb. 38	Diagramm zur Berechnung der Spaltöffnungsweite vom Packer 2	89
Abb. 39	Oberflächenpacker 3 mit dem Stahlring	90
Abb. 40	Berechnung der Spaltöffnungsweite vom Packer 3	91
Abb. 41	Berechnung der Injektionsreichweite vom Packer 3	92
Abb. 42	Schema des Versuchskomplex 2	93

Abb. 43	Versuchskomplex 2	93
Abb. 44 a	Befestigung des Injektionsschlauches am Stoß	94
Abb. 44 b	Schema der Versuche 4 und 5. Oberflächenpacker mit Injektionsschlauch.	94
Abb. 45 a	Berechnung der Spaltöffnungsweite vom Packer 4	95
Abb. 45 b	Berechnung der Spaltöffnungsweite vom Packer 5	95
Abb. 46 a	Berechnung der Injektionsreichweite vom Packer 4 beim Injektionsdruck von 20Bar	96
Abb. 46 b	Berechnung der Injektionsreichweite vom Packer 5 beim Injektionsdruck von 20 bar	96
Abb.47	Seitenausstritte des Injektionsmittels bei der Durchführung der Injektion	97
Abb. 48 a	Berechnung der Spaltöffnungsweite vom Packer 6	98
Abb. 48 b	Berechnung der Spaltöffnungsweite vom Packer 7	98
Abb. 49 a	Berechnung der Injektionsreichweite vom Packer 6 beim Injektionsdruck von 12 Bar	99
Abb. 49 b	Berechnung der Injektionsreichweite vom Packer 7 beim Injektionsdruck von 12 Bar	99
Abb. 50	Erweiterung des Druckkammers bei den Oberflächenpackers 5, 6 und 7	101
Abb. 51	Schema des Bohrlochversuchs	102
Abb. 52 a	Berechnung der Spaltöffnungsweite vom Bohrloch 1	102
Abb. 52 b	Berechnung der Spaltöffnungsweite vom Bohrloch 2	103
Abb. 53 a	Berechnung der Injektionsreichweite beim Bohrloch 1 beim Injektionsdruck von 20 Bar	103
Abb. 53 b	Berechnung der Injektionsreichweite beim Bohrloch 2 beim Injektionsdruck von 35 Bar	103
Abb. 54 a	Austritt des Injektionsmittels durch ein Riss bei der Injektion	105
Abb. 54 b	Schema der Lage des Risses beim Bohrlochversuch (a – vor der Injektion, b – nach der Injektion)	105
Abb. 55	Aufbau Plattenversuch	106
Abb. 56	Lage der Injektionsschläuche in der Mitte der Betonplatte	107
Abb 57	Berechnung der Spaltöffnungsweite beim Lufteinpressversuch.	109
Abb. 58	Schematische Darstellung des Luftverlaufs in der Betonplatte für jeden Injektionsschlauch	110
Abb. 59	Viskosität von 2-K Bitumen in Abhängigkeit von der Zeit	111

Abb. 60	Schematische Darstellung der injizierten Bereiche innerhalb der Kontaktfuge (ohne Massstab)	111
Abb. 61	Der berechnete Strömungsverlauf in der Betonplatte	112
Abb. 62	Schema des Streckenquerschnitts	116
Abb. 63	Schema der Durchführung der Arbeiten zur Bestimmung der Durchlässigkeit des konturnahen Bereichs	118
Abb. 64	Rheinfolge des Verpressens	119
Abb. 65	Schema der Stoßberaubung	122
Abb. 66	Reihenfolge der Arbeiten beim Errichten eines Verschlussbauwerkes im Carnallit mit Rücksicht auf die Abdichtung der konturnähen Zone.	124
Abb. 67	Einbauschema des Rings	125
Abb. 68	Schema der Schlösser zur Verbindung der Segmente	125
Abb. 69	Schema des Streckenquerschnitts	130
Abb. 70	Arbeitsverlauf beim Errichten eines Verschlussbauwerkes im Carnallit	135
Abb. 71	Arbeitsverlauf beim Errichten eines Verschlussbauwerkes im Carnallit	137

## 11 Anhang

<b>1</b>	<b>Bericht zur Langzeitstabilitätsuntersuchung von Denepox 40</b>	154
<b>2</b>	<b>Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Spaltmodell Versuche 3,5</b>	156
<b>3</b>	<b>Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 1 (Kap 5.4)</b>	156
	Daten des Druckabfalls beim Luftpresseversuch vor der Injektion:	156
	Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 1 (Kap 5.4):	157
	Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Packer 1 (Kap 5.4)	157
	Daten des Druckabfalls beim Luftpresseversuch nach der Injektion Packer 1:	157
<b>4</b>	<b>Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 2 (Kap 5.4)</b>	158
	Daten des Druckabfalls beim Luftpresseversuch vor der Injektion:	158
	Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 2 (Kap 5.4)	158
	Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Packer 2 (Kap 5.4)	159
	Daten des Druckabfalls beim Luftpresseversuch nach der Injektion Packer 2:	159
<b>5</b>	<b>Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 3 (Kap 5.4)</b>	159
	Daten des Druckabfalls beim Luftpresseversuch vor der Injektion:	159
	Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 3 (Kap 5.4)	160
	Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Packer 3 (Kap 5.4)	160
	Daten des Druckabfalls beim Luftpresseversuch nach der Injektion Packer 3:	160
<b>6</b>	<b>Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 4 (Kap 5.4)</b>	161
	Daten des Druckabfalls beim Luftpresseversuch vor der Injektion:	161
	Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 4 (Kap 5.4)	161
	Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Packer 4 (Kap 5.4)	161
	Daten des Druckabfalls beim Luftpresseversuch nach der Injektion Packer 4:	162
<b>7</b>	<b>Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 5 (Kap 5.4)</b>	162
	Daten des Druckabfalls beim Luftpresseversuch vor der Injektion:	162
	Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 5 (Kap 5.4)	163
	Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Packer 5 (Kap 5.4)	163
	Daten des Druckabfalls beim Luftpresseversuch nach der Injektion Packer 5:	163
<b>8</b>	<b>Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 6 (Kap 5.4)</b>	164
	Daten des Druckabfalls beim Luftpresseversuch vor der Injektion:	164
	Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 6 (Kap 5.4)	164
	Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Packer 6 (Kap 5.4)	165
	Daten des Druckabfalls beim Luftpresseversuch nach der Injektion Packer 6:	165
<b>9</b>	<b>Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 7 (Kap 5.4)</b>	166
	Daten des Druckabfalls beim Luftpresseversuch vor der Injektion:	166
	Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 7 (Kap 5.4)	166

Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Packer 7 (Kap 5.4)	167
Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch nach der Injektion Packer 7:	167
<b>10 Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Bohrloch 1 (Kap 5.4)</b>	168
Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch vor der Injektion:	168
Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Bohrloch 1 (Kap 5.4)	168
Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Bohrloch 1 (Kap 5.4)	169
Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch nach der Injektion Bohrloch 1:	169
<b>11 Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Bohrloch 2 (Kap 5.4)</b>	170
Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch vor der Injektion:	170
Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Bohrloch 2 (Kap 5.4)	170
Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Bohrloch 2 (Kap 5.4)	171
Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch nach der Injektion Bohrloch 1:	171
<b>12 Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Betonplatte (Kap 5.4)</b>	172
Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Betonplatte (Kap 5.4)	172
Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Betonplatte (Kap 5.4)	172

## 1 Bericht zur Langzeitstabilitätsuntersuchung von Denepox 40



### The behaviour of Denepox 40 in a salt solution at 60°C

#### Scope

This experiment describes the behaviour of cured Denepox 40 in a salt solution defined by Technische Universität Bergakademie Freiberg.

#### Method

A sample of Denepox 40 is made according the prescriptions mentioned in the technical data sheet of the product. The weight of the sample is measured and the volume is determined according JIS K 6258-1993.

After 7 days curing the sample is immersed in a salt solution defined by Technische Universität Bergakademie Freiberg. The composition of the salt solution is :

251 g/l  $\text{CaCl}_2$   
25 g/l  $\text{MgSO}_4$   
28 g/l  $\text{KCl}$   
18 g/l  $\text{NaCl}$

The recipient of the salt solution with the immersed Denepox 40 is covered to avoid evaporation of water and stored at 60°C in an oven. At regular time intervals the immersed sample is visually observed, it is weighed and the volume is measured according JIS K 6258-1993.

#### Results

The test started on 9 September 2005 and was terminated on 13 February 2007 : Denepox 40 was immersed in the salt solution at 60°C for 512 days.

##### a) Visual inspection

The following pictures show the sample of Denepox 40 before and after the test.



*Denepox 40 at the start of the test*



*Denepox 40 after the test*

*Discussion :* There is no visual effect of the storage during 512 days in the salt solution at 60°C.



b) Mass and volume measurements

The following table shows the results of the weight and volume measurements at the start and at the end of the test.

	<b>09.09.2005</b>	<b>13.02.2007</b>	<b>Change (%)</b>
<b>Mass (g)</b>	50,35	50,59	+ 0,48
<b>Volume (ml)</b>	43,92	44,11	+ 0,43

*Discussion* After 512 days storage at 60°C in the salt solution, the mass of the sample Denepox 40 has increased 0,48 % and the volume 0,43 %.

**General conclusion**

When cured Denepox 40 is stored at 60°C in the salt solution defined by Technische Universität Bergakademie Freiberg, there is no visual effect after 512 days and a very limited increase in weight and volume is measured.

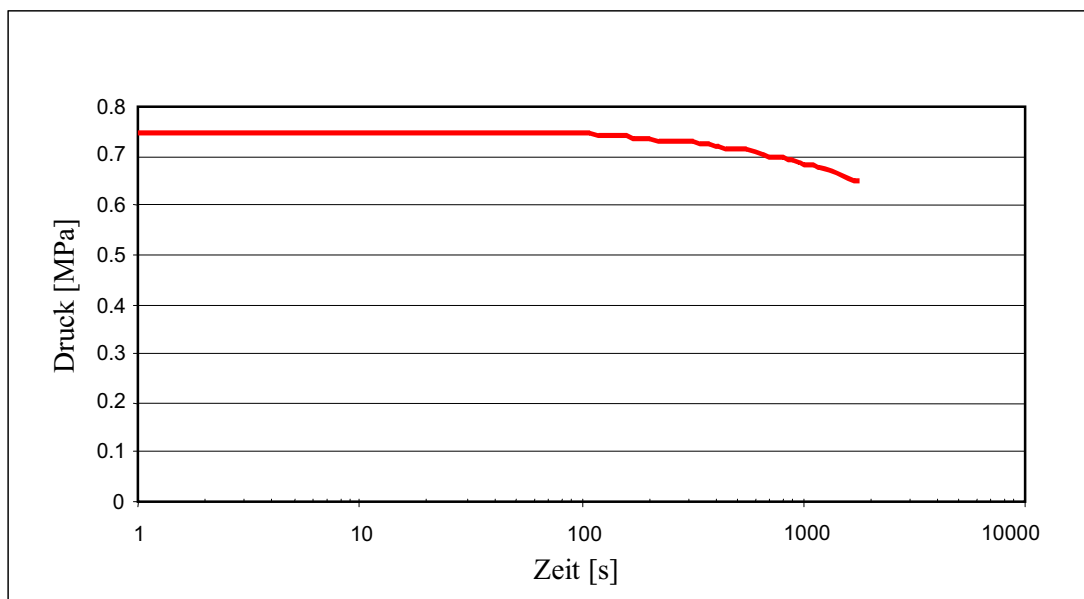
Ir. Piet Kempenaers  
Manager R & D  
26/03/2007

## Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Spaltmodell Versuche 3,5

Parameter	Bezeichnung	Wert
Spaltöffnungsweite	h, m	$30 \cdot 10^{-6}$
Relative Rauigkeit	w	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	92
Einpressdruck	$p_0$ , Pa	101975,68
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,013

## 2 Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 1 (Kap 5.4)

### Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch vor der Injektion:



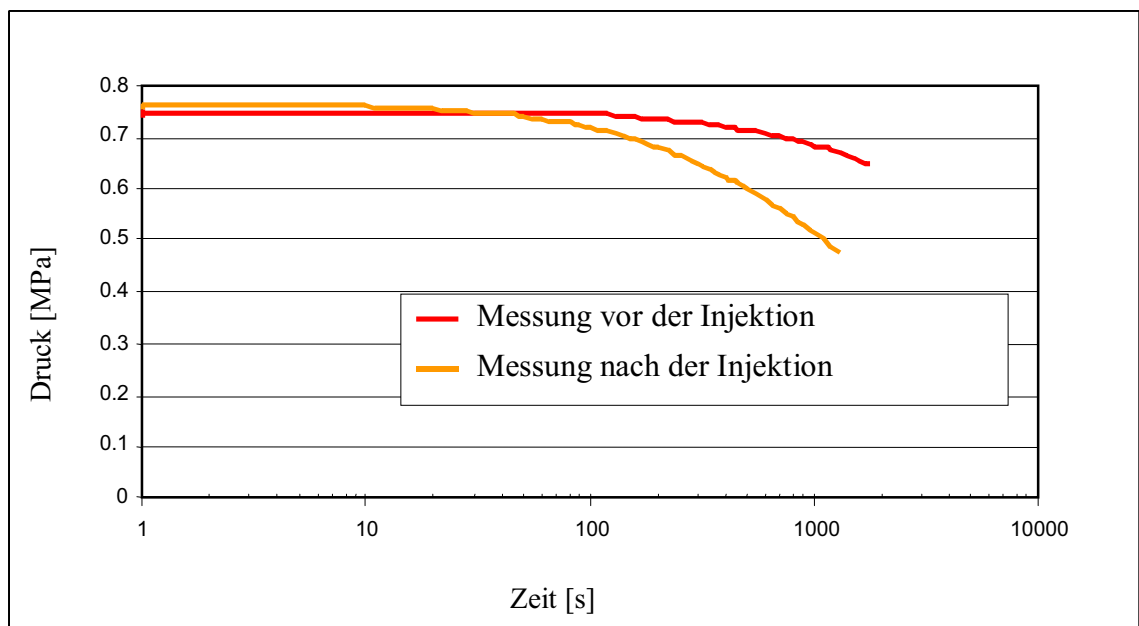
### Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 1 (Kap 5.4):

Parameter	Bezeichnung	Wert
Relative Rauigkeit	w	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	0,018
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045
Umgebungstemperatur	K	ca. 296

### Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Packer 1 (Kap 5.4)

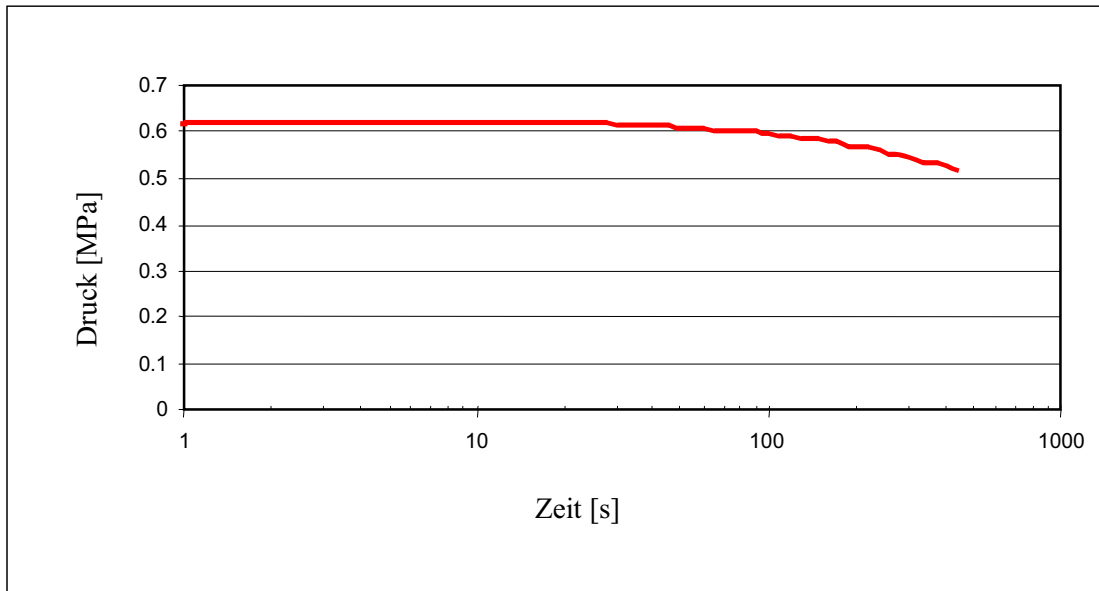
Parameter	Bezeichnung	Wert
Spaltöffnungsweite	$h$ , mm	0,0018
Relative Rauigkeit	$w$	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	70
Einpressdruck	$p_0$ , Pa	4000000
Luftdruck	$p$ , Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045

### Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch nach der Injektion Packer 1:



### 3 Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 2 (Kap 5.4)

**Daten des Druckabfalls beim Luftpresseversuch vor der Injektion:**



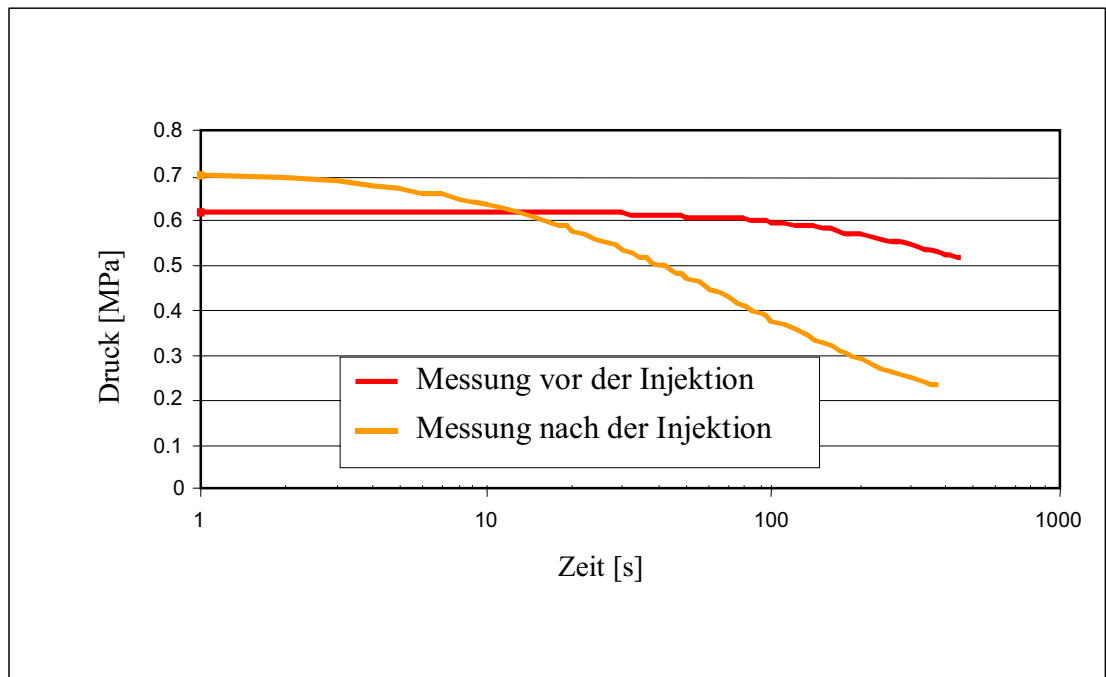
**Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 2 (Kap 5.4)**

Parameter	Bezeichnung	Wert
Relative Rauigkeit	w	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	0,018
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045
Umgebungstemperatur	K	ca. 296

**Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Packer 2 (Kap 5.4)**

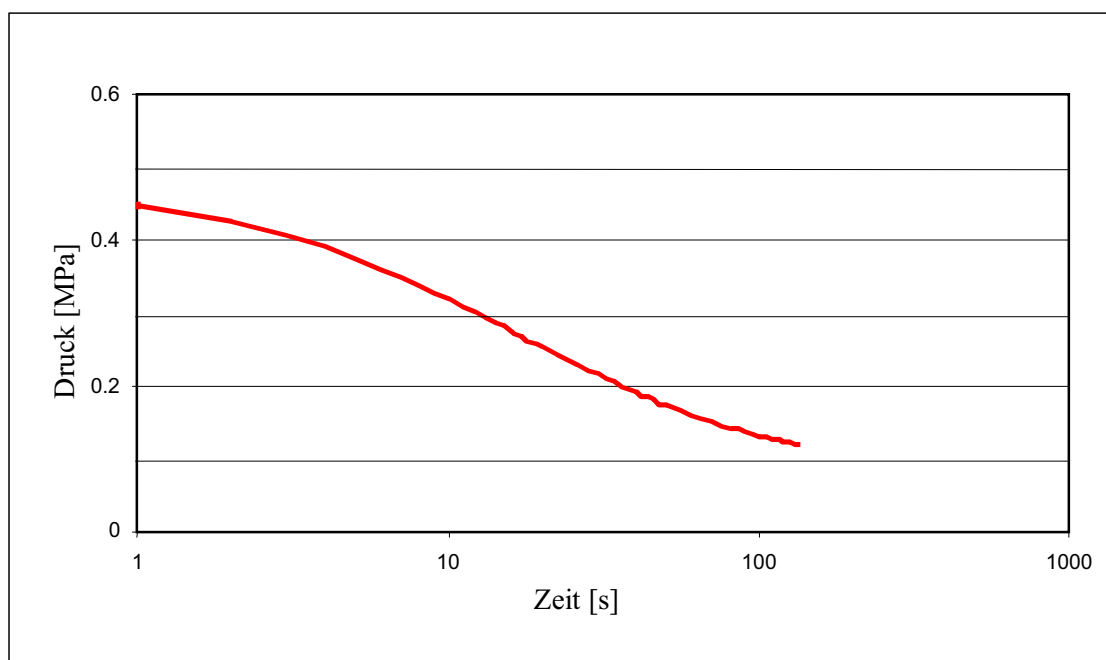
Parameter	Bezeichnung	Wert
Spaltöffnungsweite	h, mm	0,0033
Relative Rauigkeit	w	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	70
Einpressdruck	$p_0$ , Pa	4000000
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045

## Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch nach der Injektion Packer 2:



## 4 Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 3 (Kap 5.4)

### Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch vor der Injektion:



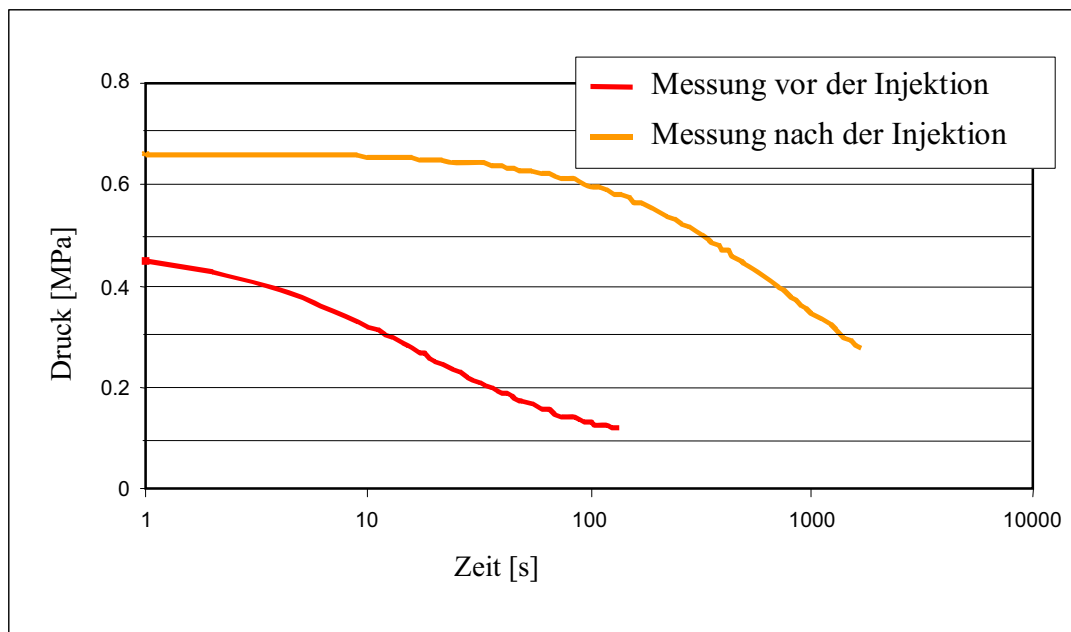
**Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 3 (Kap 5.4)**

Parameter	Bezeichnung	Wert
Relative Rauigkeit	w	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	0,018
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045
Umgebungstemperatur	K	ca. 296

**Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Packer 3 (Kap 5.4)**

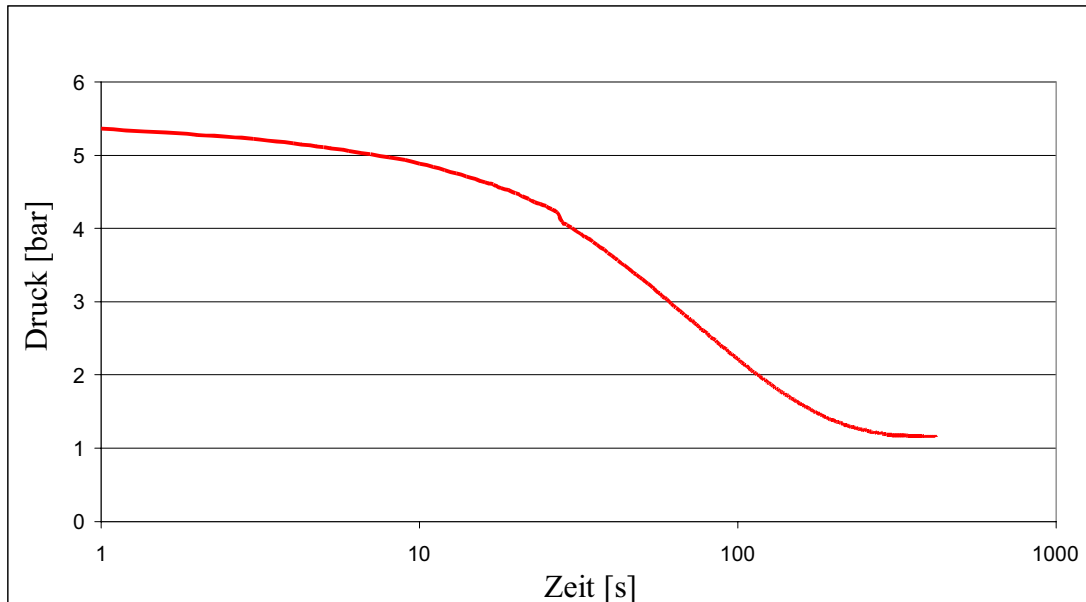
Parameter	Bezeichnung	Wert
Spaltöffnungsweite	h, mm	0,0205
Relative Rauigkeit	w	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	70
Einpressdruck	$p_0$ , Pa	4000000
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045

**Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch nach der Injektion Packer 3:**



## 5 Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 4 (Kap 5.4)

Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch vor der Injektion:



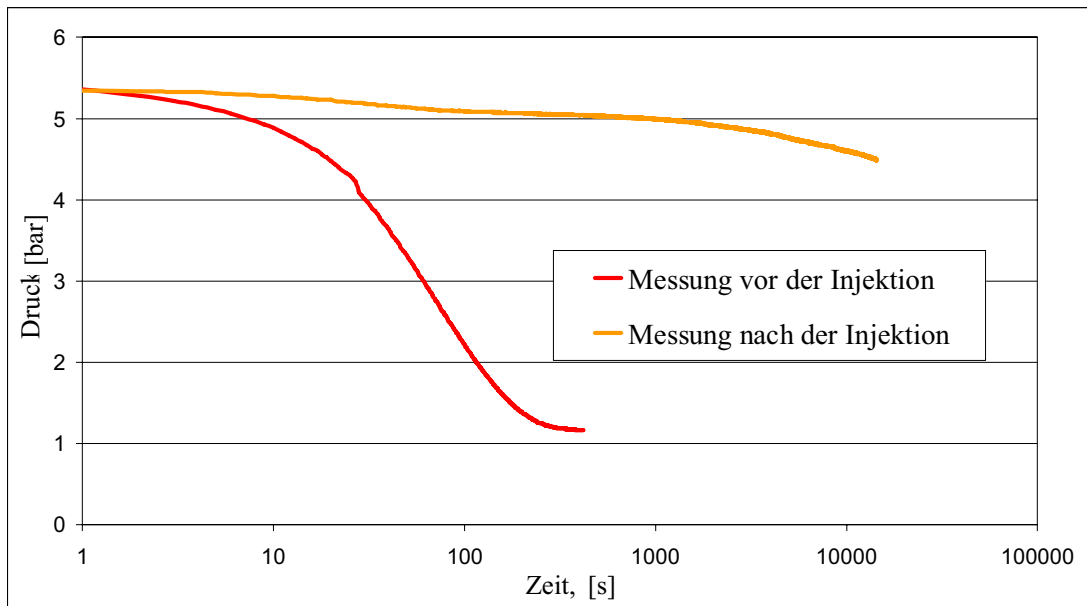
Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 4 (Kap 5.4)

Parameter	Bezeichnung	Wert
Relative Rauigkeit	w	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	0,018
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045
Umgebungstemperatur	K	ca. 296

Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Packer 4 (Kap 5.4)

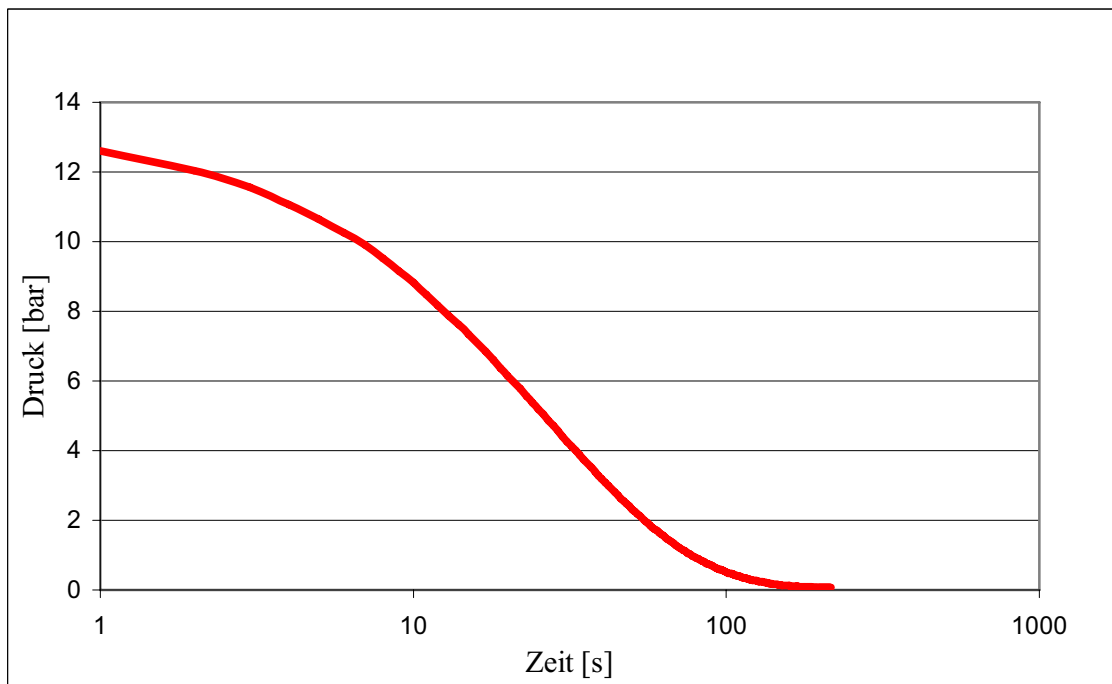
Parameter	Bezeichnung	Wert
Spaltöffnungsweite	h, mm	0,01
Relative Rauigkeit	w	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	70
Einpressdruck	$p_0$ , Pa	2000000
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045

**Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch nach der Injektion Packer 4:**



**6 Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 5 (Kap 5.4)**

**Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch vor der Injektion:**





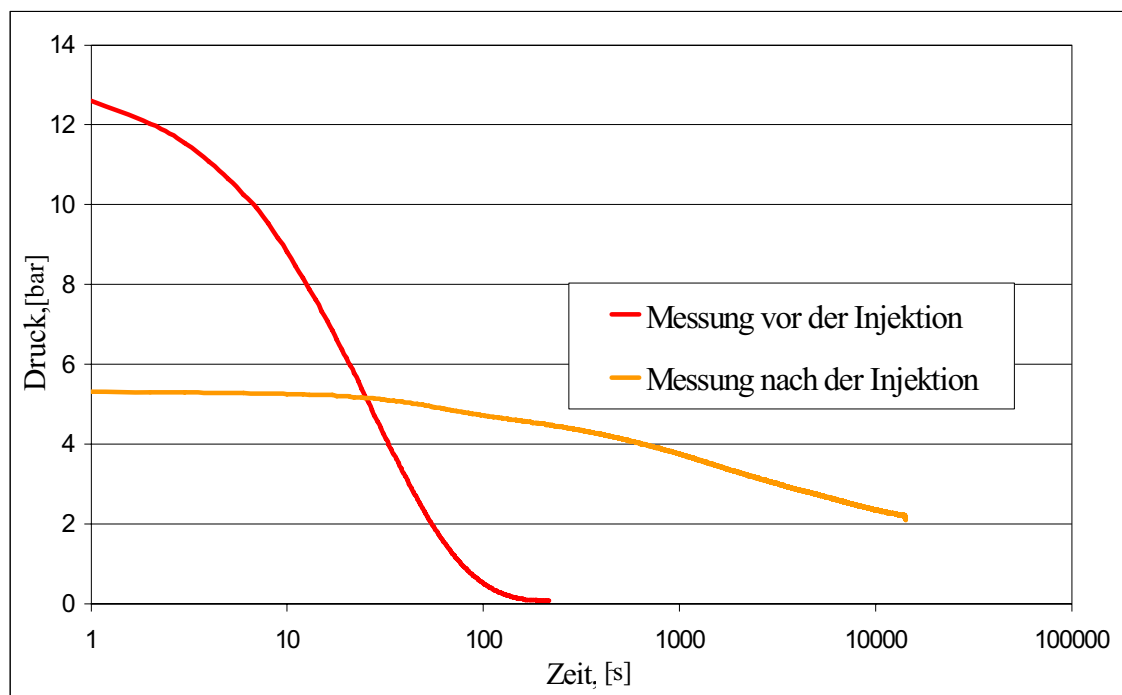
### Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 5 (Kap 5.4)

Parameter	Bezeichnung	Wert
Relative Rauigkeit	w	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	0,018
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045
Umgebungstemperatur	K	ca. 296

### Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Packer 5 (Kap 5.4)

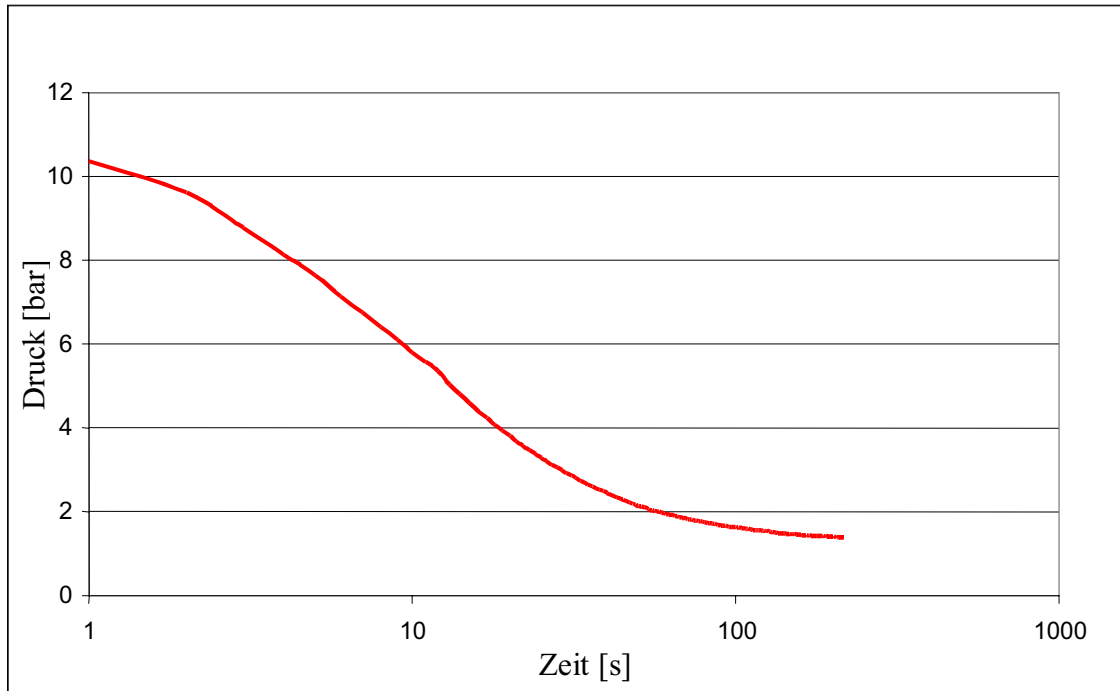
Parameter	Bezeichnung	Wert
Spaltöffnungsweite	h, mm	0,013
Relative Rauigkeit	w	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	70
Einpressdruck	$p_0$ , Pa	2000000
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045

### Daten des Druckabfalls beim Luftenpressversuch nach der Injektion Packer 5:



**7 Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 6 (Kap 5.4)**

**Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch vor der Injektion:**



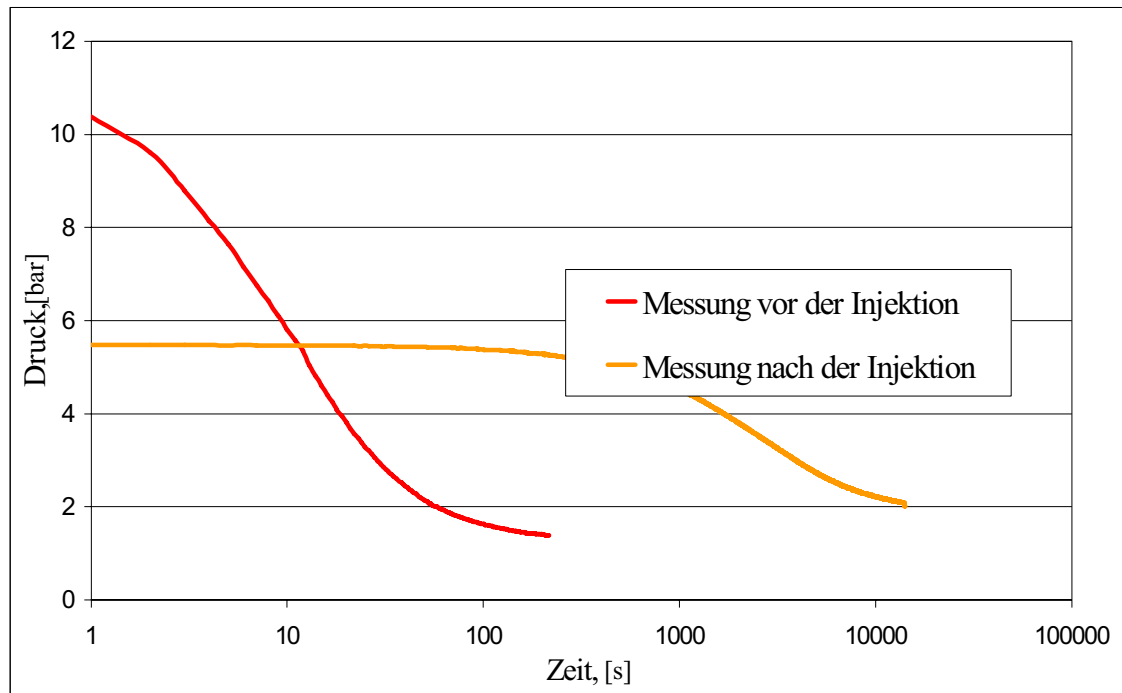
**Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 6 (Kap 5.4)**

Parameter	Bezeichnung	Wert
Relative Rauigkeit	w	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	0,018
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045
Umgebungstemperatur	K	ca. 296

**Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Packer 6 (Kap 5.4)**

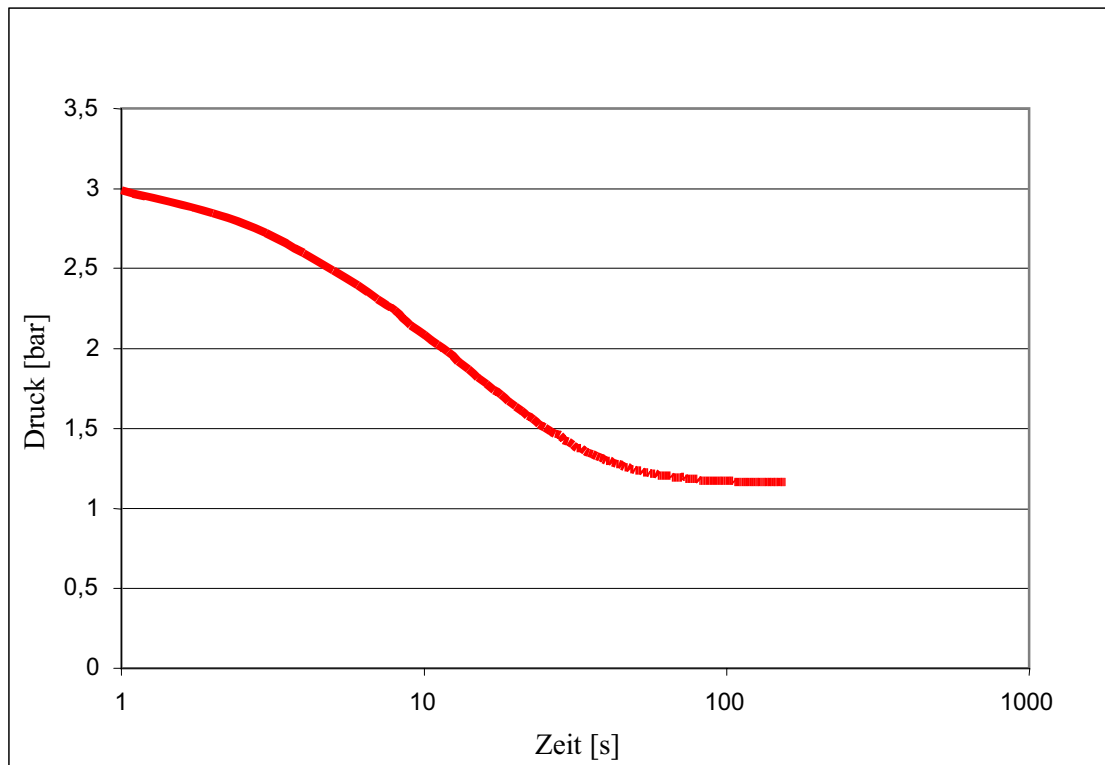
Parameter	Bezeichnung	Wert
Spaltöffnungsweite	$h$ , mm	0,014
Relative Rauigkeit	$w$	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	70
Einpressdruck	$p_0$ , Pa	1200000
Luftdruck	$p$ , Pa	ca.100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045

**Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch nach der Injektion Packer 6:**



## 8 Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 7 (Kap 5.4)

Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch vor der Injektion:



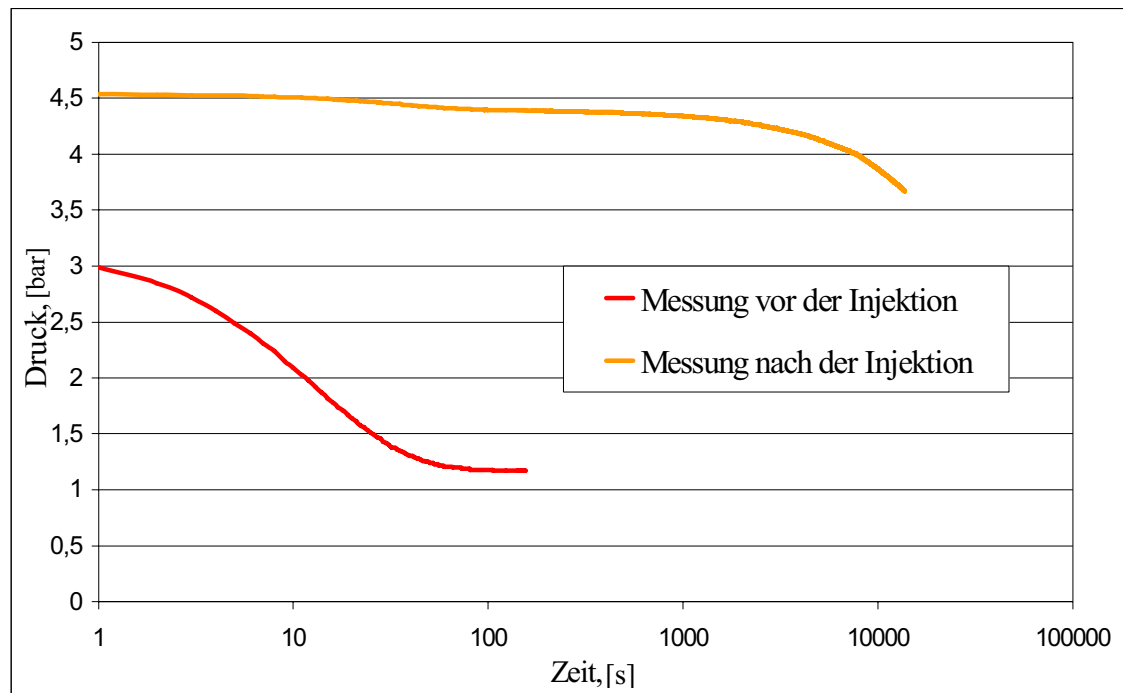
Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Packer 7 (Kap 5.4)

Parameter	Bezeichnung	Wert
Relative Rauigkeit	w	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	0,018
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,013
Umgebungstemperatur	K	ca. 296

**Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Packer 7 (Kap 5.4)**

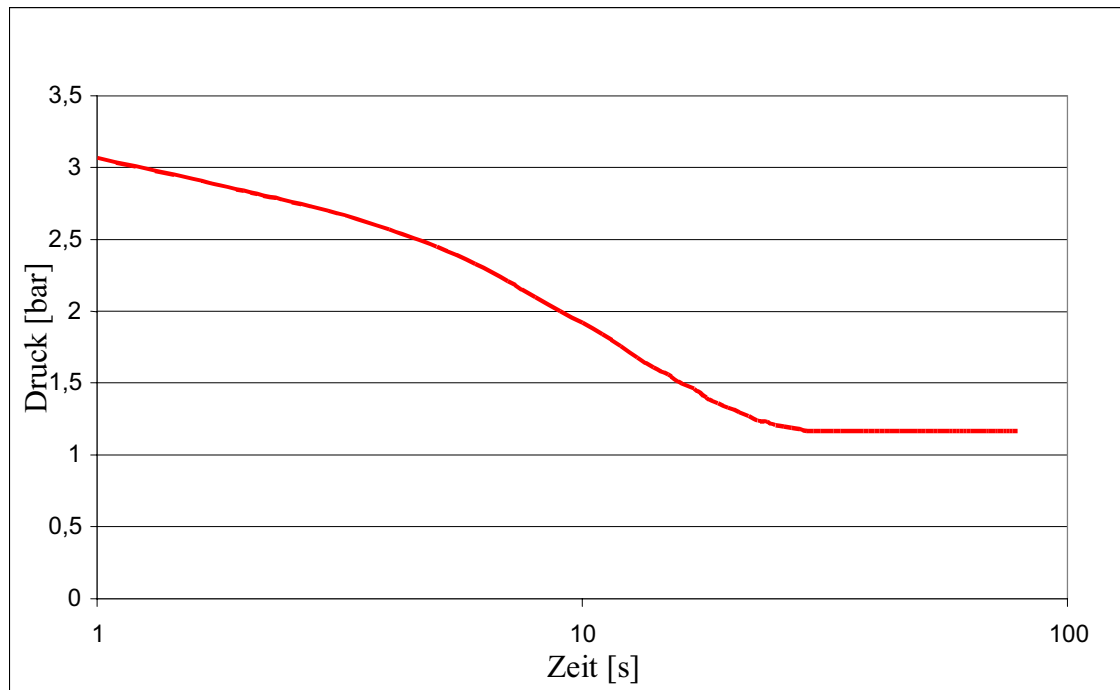
Parameter	Bezeichnung	Wert
Spaltöffnungsweite	$h$ , mm	0,016
Relative Rauigkeit	$w$	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	70
Einpressdruck	$p_0$ , Pa	1200000
Luftdruck	$p$ , Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045

**Daten des Druckabfalls beim Luftpneinpressversuch nach der Injektion Packer 7:**



## 9 Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Bohrloch 1 (Kap 5.4)

Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch vor der Injektion:



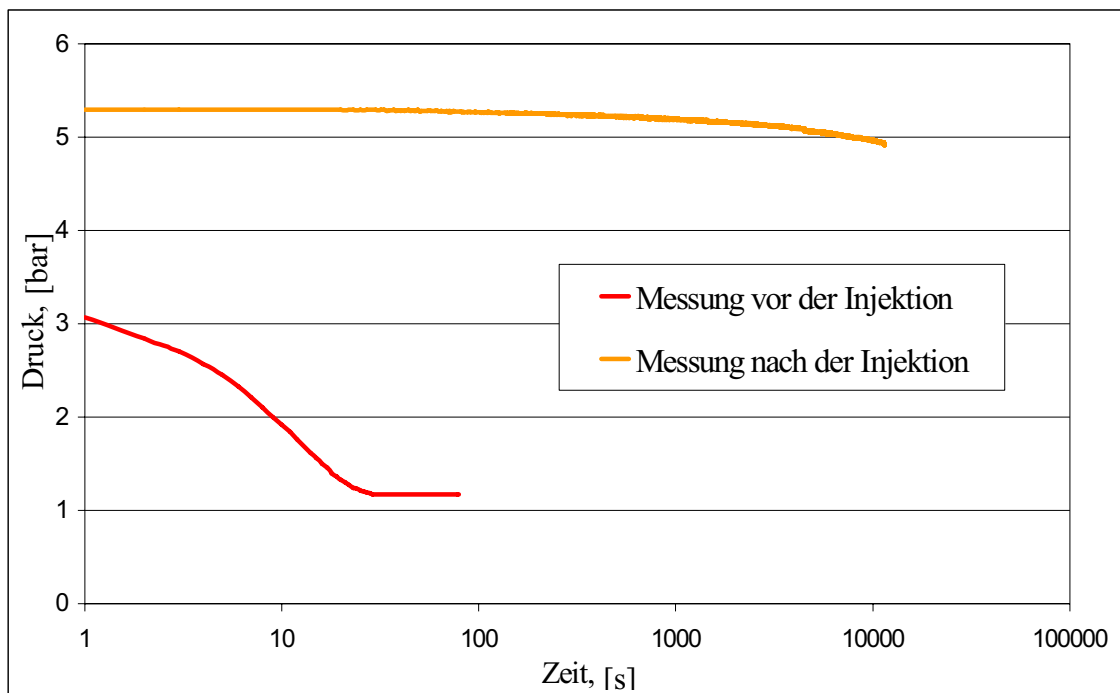
Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Bohrloch 1 (Kap 5.4)

Parameter	Bezeichnung	Wert
Relative Rauigkeit	w	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	0,018
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045
Umgebungstemperatur	K	ca. 296

### Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Bohrloch 1 (Kap 5.4)

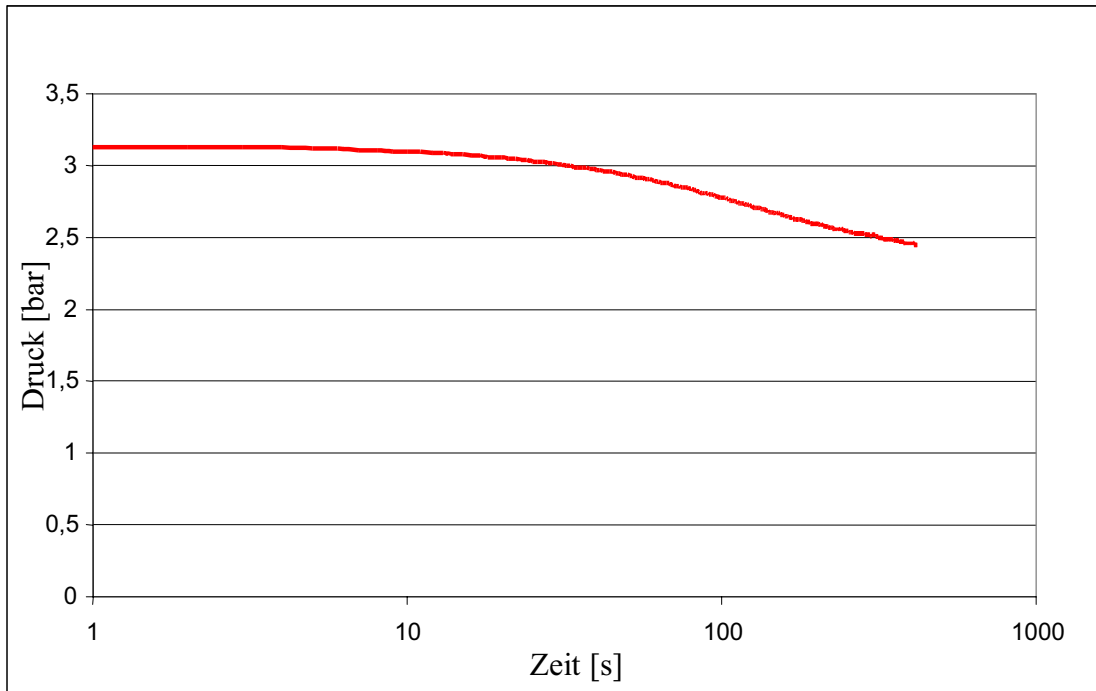
Parameter	Bezeichnung	Wert
Spaltöffnungsweite	$h$ , mm	0,0062
Relative Rauigkeit	$w$	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	70
Einpressdruck	$p_0$ , Pa	2000000
Luftdruck	$p$ , Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045

### Daten des Druckabfalls beim Lufteinpressversuch nach der Injektion Bohrloch 1:



**10 Daten des Druckabfalls und die Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Bohrloch 2 (Kap 5.4)**

**Daten des Druckabfalls beim Lufterpressversuch vor der Injektion:**



**Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Bohrloch 2 (Kap 5.4)**

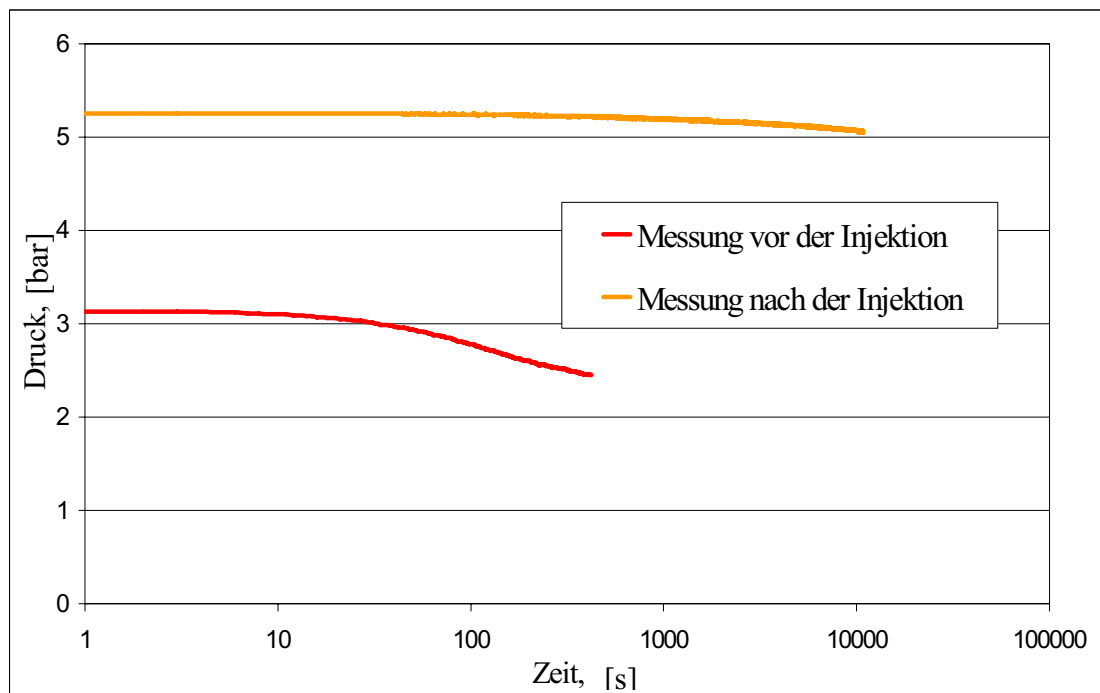
Parameter	Bezeichnung	Wert
Relative Rauigkeit	w	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	0,018
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045
Umgebungstemperatur	K	ca. 296



### Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Bohrloch 2 (Kap 5.4)

Parameter	Bezeichnung	Wert
Spaltöffnungsweite	$h$ , mm	0,0017
Relative Rauigkeit	$w$	0,3
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	70
Einpressdruck	$p_0$ , Pa	3500000
Luftdruck	$p$ , Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045

### Daten des Druckabfalls beim Luftenpressversuch nach der Injektion Bohrloch 1:



## 11 Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Betonplatte (Kap 5.4)

### Daten zur Berechnung der Spaltöffnungsweite Betonplatte (Kap 5.4)

Parameter	Bezeichnung	Wert
Relative Rauigkeit	w	0,2
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	0,018
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045
Umgebungstemperatur	K	ca. 296

### Daten zur Berechnung des Strömungsverlaufs Betonplatte (Kap 5.4)

Parameter	Bezeichnung	Wert
Spaltöffnungsweite	h, mm	0,013
Relative Rauigkeit	w	0,2
Viskosität des strömenden Mediums	$\eta$ , mPas	70
Einpressdruck	$p_0$ , Pa	1500000
Luftdruck	p, Pa	ca. 100000,00
Anfangsradius	$R_0$ , m	0,0045