

Diplomarbeit

Master Thesis

Injektionen im Tunnelbau

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
einer Diplomingenieurin

unter der Leitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Hans Georg Jodl

und als verantwortlich mitwirkenden Assistenten

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Arthur Schönwälder

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement

von

Elitsa Lazarova

1229337

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Hans Georg Jodl für die Bereitstellung des Themas und seine Unterstützung beim Erstellen der Diplomarbeit am Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement an der TU Wien bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich ganz herzlich bei Univ.Ass. Dipl.-Ing. Arthur Schönwälder für die wissenschaftliche Betreuung, ständige Hilfsbereitschaft, für die Ratschläge und Hinweise, für seine Geduld während der Anfertigung meiner Arbeit bedanken.

Der größte Dank gilt jedoch meiner Familie, insbesondere meinem Vater Emil, der mein Interesse an der Geotechnik geweckt hat und mich immer mit den technischen Aspekten des Lebens geholfen hat. Und meine Mutter, die mich stets angehört und unterstützt hat. Ohne deren beider Rückhalt wäre all das nicht möglich gewesen.

Ein großer Dank geht auch an meine besten Freunde Magi, Kosio und Ran, danke für die Aufmunterung und euer Verständnis. Ihr bringt mir immer das Lachen zurück.

Ganz speziell möchte ich meinem Mann bedanken für seine unendliche Liebe, die mir immer Kraft gibt weiterzumachen.

Kurzfassung

Im Tunnelbau treffen sich zusammen verschiedenen Technologien, Prozessen und Konzepte, die eine optimale und sichere Ausführungslösung gewährleisten müssen. In der vorliegenden Diplomarbeit wird beschrieben, wie und welche Probleme anhand der Injektionstechnik beim Tunnelausbau gelöst werden können.

Für die Erstellung der Arbeit wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, die sowohl Werke von *Donel, Girmscheid, Kutzner, Kolymbas, Witke* u.v.m., als auch viele Firmenprospekte und Erfahrungsmitteilungen umfasst. Aufgrund dessen ist die Diplomarbeit praxisorientiert, jedoch sind auch die wichtigsten theoretischen Grundlagen der Injektionstechnologie beschrieben.

Hinsichtlich der Struktur der Diplomarbeit lassen sich vier Teile abzeichnen:

- Der erste Abschnitt beschäftigt sich mit den grundlegenden Begriffen und Theorien der Injektionstechnik. Dieser Teil betrifft die theoretische Seite der Injektionen. Durch Begriffsbestimmung und Beschreibung der wesentlichen technischen Aspekte, wie: Ziele der Injektionsarbeiten, Injektionsparameter, beeinflussende Faktoren, Anwendungsbereiche usw. wird eine theoretische Basis geschaffen, die die Vertiefung zum Thema erlaubt.
- Der zweite Abschnitt umfasst eine detaillierte Beschreibung der Verfahren, Materialien und Geräte der Injektionstechnologie im Ingenieurtiefbau. Die Aufmerksamkeit wird auf die Praxis bezüglich der Planung, Ausführung und Bewertung der Injektionsarbeiten gelegt. In diesen beiden Abschnitten wird der allgemeine Überblick über die Injektionstechnologie in Grund und Tiefbau gegeben.
- Der dritte Abschnitt dient als Übergang von dem allgemeinen Überblick der Injektionstechnik zu einer Vertiefung der Injektionstechnik im Tunnelbau.
- Der Kernpunkt dieser Diplomarbeit ist der vierte Abschnitt, der die Anwendungsbereiche von Injektionsarbeiten im Tunnelbau beschreibt. Dieses Teil besteht aus zwei Kapiteln, die die zwei Hauptaufgaben der Injektionen- Abdichten und Verfestigen darstellen. Die Grundlagen, die Besonderheiten und die Ausführungsschritte der verschiedenen Injektionsmaßnahmen werden ausführlich erklärt und so wird der Stand der Injektionstechnik im Tunnelbau dargestellt.

Abstract

Many different technologies, processes and concepts can be found within tunneling that are tasked with a secure and optimal fulfillment of the construction. The following Thesis reviews grouting works as a tool to resolve various problems in tunneling.

The Thesis is based on wide literary research which includes works of authors such as Donel, Girmscheid, Kutzner, Kolymbas, Witke and others, as well as various private company prospects and reports. This makes the Thesis practical but at the same time takes into consideration the theoretical fundamentals and prerequisites of grouting technology.

Regarding the structure of the work, it is split in four separate parts:

- Part one presents the theoretical side, by reviewing the fundamental topics and theories of the grouting technology. By clarifying the topics and describing the base technical aspects, including: purposes of grouting works, grouting parameters, affecting factors, areas of application etc., we establish a theoretical base which allows further development of the topic.
- Part two is a detailed description of the methods, materials and tools (machinery), used in grouting works in underground engineering. Emphasis falls on the practical side, as planning, fulfillment and evaluation of the grouting works are all reviewed.
- The third part can be described as a transition between grouting technology as a whole to its integration in the area of tunneling.
- The central part of the Thesis is the fourth part, which develops the points regarding application of grouting works in tunneling. It is comprised of two main topics corresponding with the two main functions of grouting – sealing works and stabilizing. The main states, specifics and steps for completion are reviewed in detail which highlights the level of development of this technology.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	2
Kurzfassung	3
Abstract	4
Inhaltsverzeichnis	5
1 Grundlagen der Injektionstechnik	8
1.1 Zweck der Injektion.....	8
1.1.1 Verfestigung	8
1.1.1.1 Festgestein.....	9
1.1.1.2 Lockergestein	10
1.1.2 Abdichtung	12
1.1.2.1 Dichtsohlen.....	12
1.1.2.2 Injektionsschleier	13
1.1.2.3 Abdichtung bei Tunnelvortrieb	13
1.1.3 Sanierungsinjektionen	13
1.2 Injektionsarten	13
1.2.1 Ohne Baugrundverdrängung	14
1.2.1.1 Poreinjektion.....	14
1.2.1.2 Kluft-/ Kontaktinjektion	15
1.2.1.3 Hohlraumverfüllung	15
1.2.2 Mit Baugrundverdrängung	15
1.2.2.1 Hydraulische Rissbildung	16
1.2.2.2 Verdichtungsinjektion.....	16
1.2.2.3 Düsenstrahlverfahren	16
1.3 Injektionsparameter	17
1.3.1 Injizierbarkeit	17
1.3.1.1 Boden.....	17
1.3.1.2 Fels	20
1.3.2 Injektionsdruck.....	21
1.3.3 GIN – Kriterien.....	23
1.3.4 Pumprate.....	24
1.3.5 Reichweite.....	24
1.3.6 Injektionszeit.....	25
1.4 Richtlinien	25
2 Injektionsmittel	26
2.1 Fließverhalten von Injektionsmittel.....	26
2.2 Suspensionen.....	28
2.2.1 Zusammensetzung	29

2.2.2	Anwendung	30
2.3	Lösungen.....	31
2.4	Kunstharzinjektionen	31
2.5	Emulsionen.....	33
2.6	Anwendungsgrenzen und Besonderheiten	33
3	Ausführung von Injektionen	36
3.1	Erkundung und Planung	36
3.1.1	Erforderliche Untersuchungen bezüglich Bodeneigenschaften	36
3.1.2	Wasserabpressversuch	37
3.1.3	Probeinjektion.....	39
3.1.4	Untersuchung und Prüfung von Injektionsmittel	40
3.1.5	Grundlagen und Ziele der Planung	41
3.2	Geräte	42
3.2.1	Bohrsysteme und Bohrwerkzeug	42
3.2.1.1	Rotationskernbohrung	42
3.2.1.2	Rammkernbohrung.....	43
3.2.1.3	Rollenmeißelbohrung.....	44
3.2.1.4	Schneckenbohrung.....	46
3.2.1.5	Hammerbohrung.....	46
3.2.1.6	Bohrspülung	47
3.2.1.7	Bohrausrüstung	47
3.2.2	Geräte zum Einbringen des Injektionsgut	50
3.2.2.1	Mischer und Rührwerke	51
3.2.2.2	Injektionspumpen	53
3.2.2.3	Packer	54
3.3	Vorgehensweise	55
3.3.1	Injektion im Festgestein	56
3.3.1.1	Injizieren „von oben nach unten“	56
3.3.1.2	Injizieren „von unten nach oben“	56
3.3.1.3	Einpressen mehrerer Injektionsmittel	57
3.3.2	Injektion im Lockergestein	57
3.3.2.1	Injektionen über offene Bohrgestänge	57
3.3.2.2	Verdichtungsinjektion.....	57
3.3.2.3	Hebungsinjektion	58
3.4	Prüfung von Injektionsarbeiten	58
3.4.1	Prüfungen während der Herstellung	58
3.4.2	Prüfungen nach der Herstellung	59
4	Grundlagen der Injektionstechnik im Tunnelbau.....	60
4.1	Ausbrucharten und Vortriebsmethoden.....	61
4.1.1	Konventioneller Vortrieb	62

4.1.2	Maschinelles Vortrieb	62
4.2	Sicherungsmaßnahmen	63
4.3	Hohlraumauskleidung	64
5	Abdichtungsinjektionen im Tunnelbau	65
5.1	Untertagebau	65
5.1.1	Vorinjektionen	67
5.1.2	Fugeninjektionen	69
5.1.3	Betonrissinjektionen	77
5.1.4	Kontaktinjektion	85
5.1.4.1	Firstspaltverpressung	85
5.1.4.2	Ringspaltverpressung	87
5.1.5	Schleierinjektion	93
5.2	Offene Bauweise	97
5.2.1	Injektionsarbeiten als zusätzliche Abdichtungsmaßnahmen bei Baugrubenwänden	98
5.2.1.1	Schlitzwände	98
5.2.1.2	Spundwand	99
5.2.1.3	Bohrpfahlwand	100
5.2.2	Injektionssohlen	102
5.2.2.1	Hochliegende Injektionssohlen	102
5.2.2.2	Tiefliegende Injektionssohlen	104
6	Verfestigungsinjektionen im Tunnelbau	106
6.1	Ankersysteme	106
6.2	Gewölbesicherung	112
6.2.1	Gewölbesicherung mittels Spießen	112
6.2.2	Gewölbesicherung mittels Rohrschirm	113
6.3	Düsenstrahlverfahren	114
6.4	Soilfracturing /Hebungsinjektionen	118
6.5	Vorspanninjektionen für Druckstollen	121
7	Überblick über die Injektionsmittel und Technologien im Tunnelbau	125
8	Zusammenfassung	127
	Literaturverzeichnis	128
	Abbildungsverzeichnis	131
	Tabellenverzeichnis	134

1 Grundlagen der Injektionstechnik

1.1 Zweck der Injektion

Der Begriff „Injektion“ bezieht sich auf das Einpressen unter Druck von fließfähigen Stoffen in Poren, Risse und Hohlräume eines Mediums. Dieses Medium kann sowohl Lockergestein und Fels, als auch Beton oder ganze Bauwerke sein. Die Ausfüllung mit Injektionsgut führt zur Verbesserung der Eigenschaften des Materials und als Folge davon können zwei Aufgaben gelöst werden:

- Verfestigung des Materials
- Abdichtung des Mediums

In der Regel führt eine Verfestigungsinjektion zu verbesserten Abdichtungseigenschaften, aber um einen wirksamen Injektionsarbeitsablauf zu erreichen, ist eine exakte Definition des Ziels noch in der Planungsphase zu setzen. Dazu ist für die erfolgreiche Verbesserung der Baugrundeigenschaften durch Injektionen eine ausreichende Erkundung des Bodens von größter Bedeutung. Dafür ist eine Unterscheidung zwischen Fest- und Lockergestein erforderlich.

1.1.1 Verfestigung

Mittels Verfestigungsinjektionen wird die Tragfähigkeit des Bodens gesteigert, d.h. die Verformungen werden reduziert und die Schubfestigkeit erhöht sich. Diese Anwendung ist besonders bei folgenden Baumaßnahmen von Bedeutung:¹

- Baugrubensicherung
- Böschungsstabilisierung
- Setzungsbegrenzung
- Gründungsverbesserung
- Rohrschirm im Tunnelbau

Die obengenannten Fälle haben ein umfangreiches Anwendungsgebiet. In weiterer Folge werden daher nur noch jene Anwendungen, die für den Tunnelbau bedeutsam sind, betrachtet.

¹ Vgl. Riedmüller G., Injektionen im Boden und Fels, 2002, S. 22.

1.1.1.1 Festgestein

Die geologische Beschreibung des Felses ist die Grundlage jeder Behandlung des Untergrundes mit Injektionen. Dabei sind insbesondere Klüftgeometrie (Richtung, Abstand, Weite), allfällige Klüftfüllungen, der Primärspannungszustand und die Durchlässigkeit von Interesse.² Meistens kommt die Verfestigung durch Injektionen in den Fels als Kombination aus Einpressmittel und Stahlglied zu Stande. In diesem Fall spricht man von Verpressankern. Sie sind auf Zug beanspruchte Bauteile, die eine aufgebrachte Zugkraft auf eine tragfähige Baugrundschiicht abtragen. Durch Einpressen von Verpressmörtel in den hinteren Teil eines in den Baugrund eingebrachten Stahlzugglieds wird ein Verpresskörper hergestellt, der über das Stahlzugglied und den Ankerkopf mit dem zu verankernden Bauteil oder Gebirgstiel verbunden ist. Die vom Anker aufzunehmende Last wird im Bereich des Verpresskörpers in den Baugrund abgetragen.³ Weitere Informationen zur Anwendung und Herstellung von Anker siehe Kapitel 6.1.

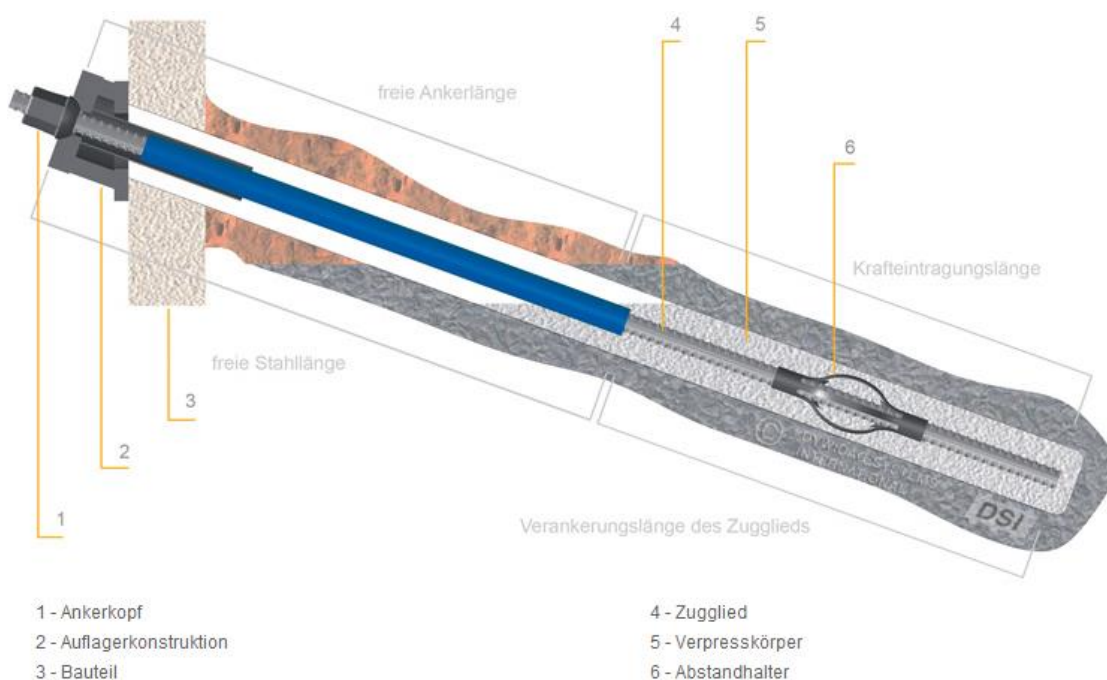


Abb. 1.1: Verpressanker⁴

² Vgl. Widman R.: Einführung in die Problematik der Injektionen in Fels, In: Mitteilungen für Ingenieurgeologie und Geomechanik/ Poisel Rainer, 1. Auflage- Wien, 1998, S. 6.

³ Vgl. Möller G., Geotechnik- Grundbau, 2006, S. 200.

⁴ Quelle: <http://www.dywidag-systems.de/produkte/geotechnik/dywidag-stabanker.html>

1.1.1.2 Lockergestein

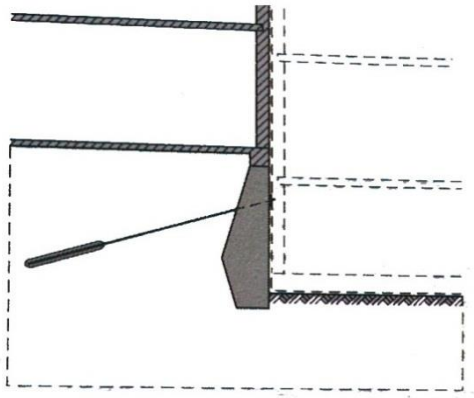
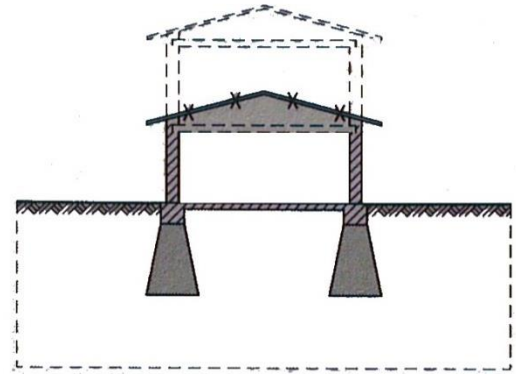
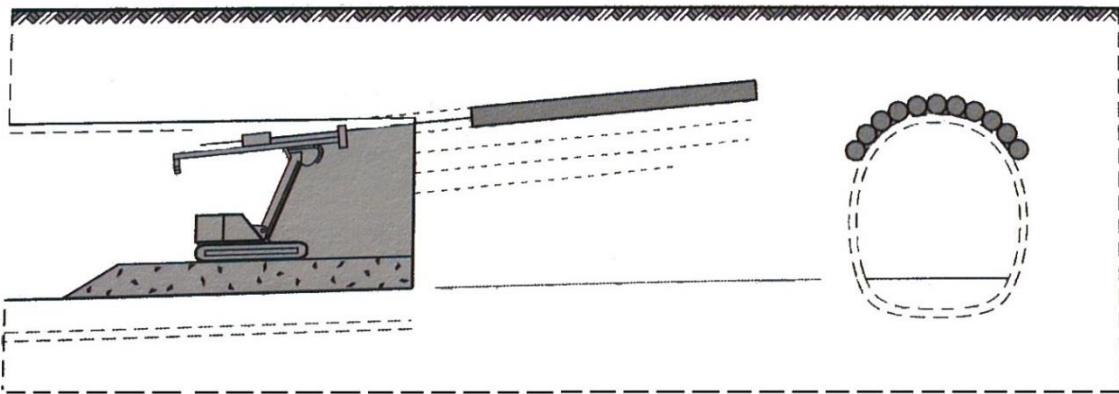
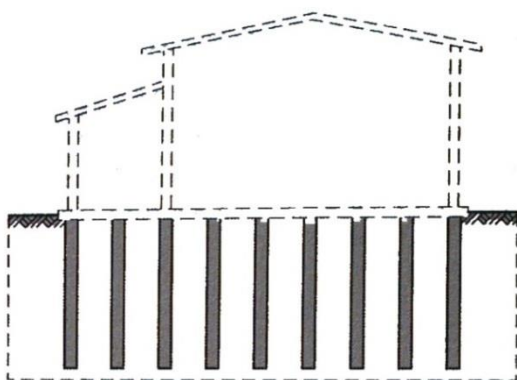
Wie bei der Verfestigungsinjektion im Fels ist es bei Lockergestein das Ziel die Schub- und die Druckfestigkeit zu erhöhen und somit die Verformungen einzuschränken um ein stabilen und dichten Baugrund zu erreichen. Hierbei stehen verschiedene Injektionsverfahren zur Verfügung, je nachdem was für physikalische und mechanische Eigenschaften der Boden besitzt und welche Einsatzgrenzen vorhanden sind. Folgende Unterteilung zeigt eine sinnvolle Differenzierung der Injektionsarten, wenn der Injektionseffekt gegenüber dem Korngerüstzustand untersucht wird:⁵

- Niederdruckinjektionen: das Injektionsgut wird unter geringem Druck im Boden eingepresst, ohne Beschädigung des Korngerüsts.
- Hebungsinjektionen: durch gezielte Aufsprengung des Bodens unter hinreichend hohem Druck werden Verformungen in Form von Setzungen rückgängig gemacht.
- Düsenstrahlverfahren: das Injektionsgut wird durch eine Düse mit Drücken von 300 bis 600 bar injiziert. Dabei zerstört es die ursprüngliche Bodenstruktur und kann sich mit dem anstehenden Boden durchmischen.
- Compaction Grouting: ein Mörtel wird mit einem Druck von bis zu 50 bar in sandige bis schluffige Böden eingepresst. Dabei dringt er nicht in die Poren ein, sondern presst den Boden vor sich hin. Dadurch können Bauwerkssetzungen rückgängig gemacht werden.

Wie bereits erläutert, gibt es ein paar Methoden die Bodeneigenschaften durch Injektionen zu verbessern. Die folgenden Abbildungen zeigen einige Anwendungsgebiete:⁶

⁵ Vgl. Kolymbas D., Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, 2011, S. 371-376

⁶ Vgl. Möller G., Geotechnik- Grundbau, 2006, S. 48.

*Unterfangung**Fundamentverbesserung**Schirmherstellung im Tunnelbau**Bodenverbesserung bei bestehenden Gebäuden**Abb. 1.2: Anwendungsgebiete von Injektionen (exemplarisch)⁷*

⁷ Vgl. Möller G., Geotechnik- Grundbau, 2006, S. 48.

1.1.2 Abdichtung

Die Grenze zwischen beiden wichtigsten Funktionen von Injektionen (Verfestigung und Abdichtung) ist oft sehr fließend. Die Ausfüllung von Poren und Klüften führt selbstverständlich zu einer Verdichtung, das gleiche gilt jedoch nicht umgekehrt.

Reduktion der Durchlässigkeit oder überhaupt Herstellung von Wasserdichtschicht sind die Ziele der Abdichtungsinjektionen. Als typische Anwendungsfälle gelten in diesem Sinn die folgenden Beispielen.

1.1.2.1 Dichtsohlen

Bei Baugruben, wo eine wasserdichte, bindige Bodenschicht in erreichbarer Tiefe nicht vorhanden ist und eine Absenkung des Grundwassers nicht durchgeführt wird, kommen Injektions- und DSV-Sohlen zur Hilfe. Die Entscheidung welches Verfahren angewendet wird, ist von den Bodeneigenschaften abhängig. Dabei muss auch die Notwendigkeit von speziellen Maßnahmen gegen die Auftriebskräfte (am meistens bei hoch liegenden Injektionssohlen) untersucht werden. Die Dichtsohlen kommen meistens in Kombination mit Baugrubensicherung mittels Spund- oder Schlitzwand zum Einsatz.

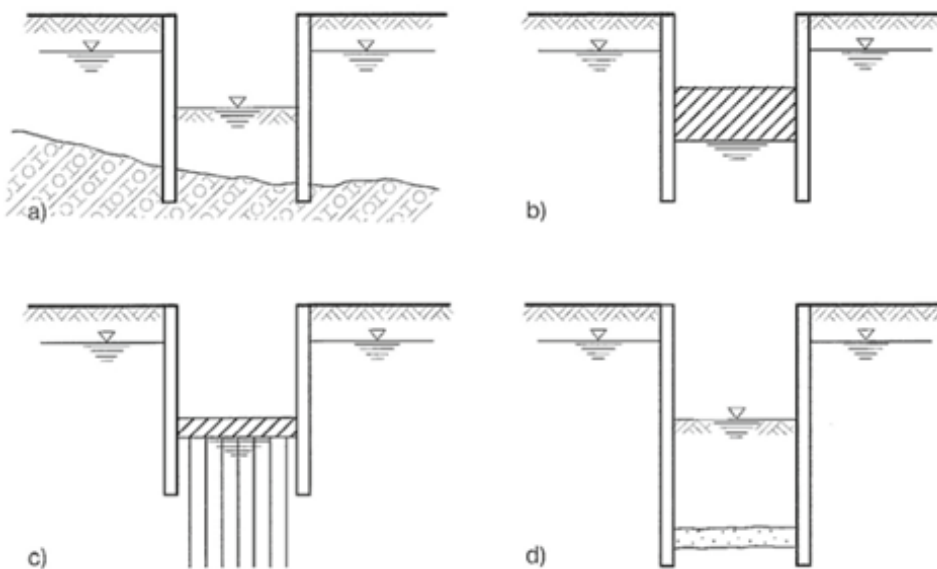


Abb. 1.3: Ausbildungsvarianten dichte Baugrubensohle: a) natürliche Dichtsohle aus bindigem Boden, b) hochliegende Sohle ohne Verankerung, c) hochliegende verankerte Sohle, d) tiefliegende Sohle⁸

⁸ Vgl. Boley C.: Handbuch Geotechnik, 2012, S.770.

1.1.2.2 Injektionsschleier

Im Talsperrenbau, meistens bei Staumauern und Staudämmen, sind Dichtungsschleier erforderlich um die Durchsickerung, also die Sickerwasserverluste und eventuelle unerwünschte Porenwasserdrücke zu verringern, bzw. zu verhindern. Der Injektionsschleier besteht aus zahlreichen Zementinjektionen (oft wird auch Bentonit eingesetzt), die die weniger durchlässigen Schichten unter die Gründungssohle erreichen sollen. Sie werden oft von Herdmauern oder Kontrollgängen ausgeführt.

1.1.2.3 Abdichtung bei Tunnelvortrieb

Beim Tunnelbau ist die Grundwasserbeherrschung genauso wichtig wie die Sicherungsmaßnahmen. Die Gefahr eines Wassereinbruchs kann den Vortrieb signifikant beeinflussen und oft spielt das Vorhandensein von Wasser die Hauptrolle bei der Entscheidung über die Ausführung von Injektionsschirmen. Andererseits treten sehr selten trockenen Untertagbaustellen ohne Gebirgswasser auf und Abdichtungsinjektionen müssen immer vorhanden sein.

1.1.3 Sanierungsinjektionen

Weitere Anwendung findet die Injektionstechnik sowohl bei der Sanierung von Betonbauteilen und verschiedenen Fugenarten, als auch als sofortiges Hilfsmittel bei Schadensfällen. Risse und Fehlstellen im Betonkörper können zu ernststen Folgen bezüglich der Stand- und Dauerfestigkeit führen. Die rechtzeitige Feststellung und die schnelle Maßnahmenergreifung durch Injektionen ermöglichen eventuell den weiteren normalen Betriebszustand des Bauwerks.

Nachträgliche Injektionen bei Schlitz- und Spundwänden für die Sicherung der Dichtigkeit, Ertüchtigungsinjektionen bei Bohrpfählen, Sanierung von Geländerutschungen oder Grundbrüchen zählen zu den häufigsten Anwendungsbeispielen.

1.2 Injektionsarten

Die Unterteilung der Injektionsarten nach Verfestigungs- und Abdichtungsinjektionen ist eine mögliche Einteilung, obwohl diese Begriffe einen großen Tätigkeitsraum umfassen. Die primäre Information darüber braucht weitere Erklärungen und Erläuterungen über die verwendeten Verfahren, das Injektionsgut, Injektionsmedium usw.

Eine andere mögliche Klassifikation der Injektionsarbeiten kann nach der Art des zu injizierenden Untergrundes erfolgen:

- Fest- oder Felsgestein
- Boden- oder Lockergestein
- Künstliche Baustoffe

Eine verbreitete Einteilung ist in *ÖNORM EN 12715 „Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Injektionen“* angegeben:

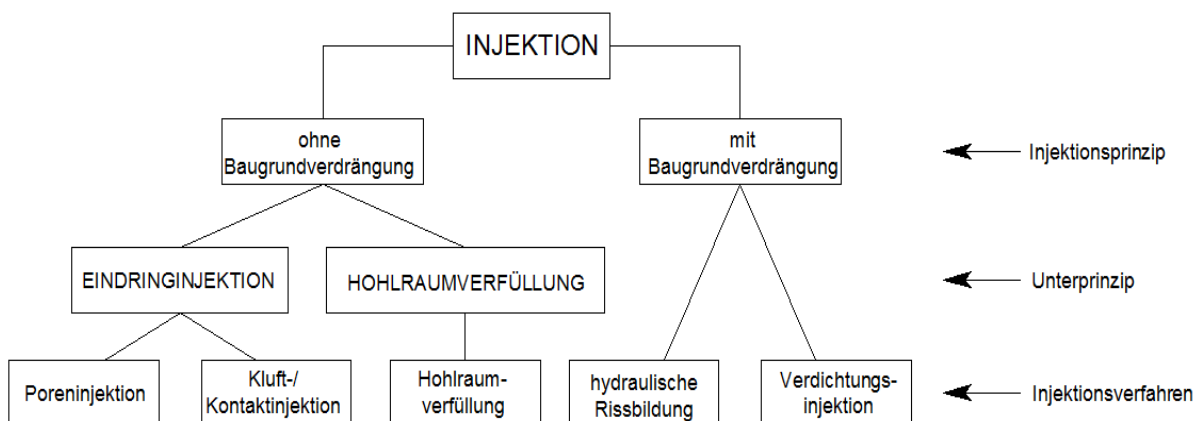


Abb. 1.4: Injektionsprinzipien und –verfahren nach ÖNORM EN 12715

1.2.1 Ohne Baugrundverdrängung

Das Ziel von Injektionen ohne Baugrundverdrängung besteht darin, vorhandene Porositäten in Form von Trennflächen bei Fels, Poren bei Lockergesteinen oder Hohlräumen im Baugrund mit einem geeigneten Injektionsmittel zu schließen bzw. zu füllen⁹ ohne das Korngerüst zu zerstören. Die verformungsfreie Verdrängung von Wasser oder Gas bezeichnet man als Eindringinjektionen. Dazu stehen zwei Methoden zur Verfügung: Poren- und Kluft- bzw. Kontaktinjektion. Die Verfüllung größer natürlicher oder künstlicher Hohlräume bezieht sich auf die sogenannte Hohlraumverfüllung.

1.2.1.1 Poreinjektion

Mit den sogenannten Poreinjektionen in Lockergesteinen (auch Niederdruckinjektionen genannt) soll die Verformbarkeit reduziert bzw. die Steifigkeit des injizierten Bodenvolumens erhöht und/oder die Kohäsion und somit die Scherfestigkeit vergrößert werden. Dies führt zu

⁹ Vgl. Boley C.: Handbuch Geotechnik, 2012, S. 513.

einer höheren Druckfestigkeit des injizierten Bodenvolumens. Die Reduzierung der Durchlässigkeit kann ebenfalls ein Ziel der Poreninjektionen sein.¹⁰ Wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Ausführung ist die Druckkontrolle. Die Poreninjektion eignet sich für gewachsene, grobkörnige Böden bis in den Feinsandbereich. Nicht geeignet ist die Poreninjektion bei gemischt- und feinkörnigen Böden, organischen Böden, veränderlich feste Gesteine und bei Fels.¹¹

1.2.1.2 Kluft-/ Kontaktinjektion

Kluftinjektion bewirkt, dass offene Klüfte, Risse und Spalten im Fels ohne Erzeugung oder Ausdehnung vorhandener Risse mit Injektionsgut verfüllt werden, um die Durchlässigkeit des behandelten Baugrundes zu verringern und/oder seine Festigkeit zu erhöhen.¹² Zu Kluftinjektionen zählen die Verpressanker, Dichtsohlen von Baugruben, Schleierinjektion unterhalb von Dämmen und Staumauern usw. Die Kontaktinjektionen beziehen sich auf die Einbringung von Injektionsgut in der Kontaktfläche zwischen Bauwerk und Baugrund, z.B. Tunnelauskleidung.

1.2.1.3 Hohlraumverfüllung

Hohlraumverfüllung wird zur Verfüllung großer natürlicher oder künstlicher Öffnungen eingesetzt. Mit dem Wort Hohlraumverfüllung bezeichnet man im Allgemeinen das drucklose oder unter geringen Drücken erfolgende Einbringen großer Mengen an Injektionsgut.¹³ Diese Injektionsstrategie findet ihre Anwendung bei Karstgebirge oder stark geklüfteten Felsgesteinen.

1.2.2 Mit Baugrundverdrängung

Bei der Verdrängungsinjektion wird durch das Injektionsgut der Boden verformt, verdichtet oder verdrängt. Je nachdem ob nur eine Verdichtung oder auch eine Aufsprengung und Hebung vorgenommen wird unterscheidet man folgende Verfahren¹⁴.

¹⁰ Ebd., S. 513.

¹¹ Vgl. Estermann U.: Bodenverfestigungs- und Bodenverbesserungsverfahren, 2005, S. 324.

¹² ÖNORM EN 12715, 2001, S. 17.

¹³ Ebd.

¹⁴ Vgl. Skriptum Bauverfahren im Tiefbau, TU Wien, S. 87.

1.2.2.1 Hydraulische Rissbildung

Hydraulische Rissbildung ist auch als *Hydraulisches Fracturing* oder *Soil Fracturing* bekannt. Unter hohem Injektionsdruck werden die Poren beim Einpressen kontrolliert zerstört, indem sie mit Injektionsmittel gefüllt werden. Dadurch stabilisiert oder verfestigt sich der Baugrund, obwohl die Poren ausgeweitet werden.

Der Verpressvorgang wird mehrmals wiederholt, je nachdem was für ein Effekt erreicht werden soll. Bei der Erstverpressung erfolgt eine Verdichtung, bei der Zweitverpressung kommt es möglicherweise auch zum Hebungseffekt, während bei fortgesetzter Verpressung das Hauptziel die Hebung ist¹⁵. Der Grund einen Hebungseffekt zu verursachen liegt in der Volumenvergrößerung, verursacht durch dem Suspensionszutritt nach dem lokalen Aufreißen.

1.2.2.2 Verdichtungsinjektion

Bei der Verdichtungsinjektionen, auch *Compaction Grouting* genannt, gibt es im Gegensatz zur hydraulischen Rissbildung keinen Bodenmatrixabbruch, sondern eine Porenverdrängung. Steifer bis plastischer Injektionsmörtel wird in den Boden eingepresst, wobei der umgebende Boden am Injektionsort lokal verdrängt und verdichtet wird. Charakteristisch ist der kugelförmig ausgebildete Injektionskörper. Die Verdichtungsinjektion lässt sich in folgenden Böden anwenden:¹⁶

- Lockere nichtbindige Böden, wie Sande oder Kiese, über und unter dem Wasserspiegel;
- Weiche ungesättigte oder teilgesättigte feinkörnige Böden, wie Schluffe oder Tone;
- Strukturempfindliche Böden, wie z. B. Löss.

1.2.2.3 Düsenstrahlverfahren

Die Ausdrücke Jet Grouting, Hochdruckinjektion (HDI) oder Soilcrete-Verfahren beziehen sich alle auf einen Sonderfall von Baugrundverbesserung, der nicht zur klassischen Injektionstechnik gehört. Der anstehende Boden wird von einem rotierenden energiereichen Schneidstrahl (Strahlgeschwindigkeit bis 400 m/s) aus Zementsuspension aufgeschnitten, wobei ein Teil des Bodens ausgespült wird und der verbleibende Bodenanteil vermischt sich mit der Suspension, dadurch wird eine verbesserte Bodensäule erreicht.

¹⁵ Vgl. Skriptum Bauverfahren im Tiefbau, TU Wien, S. 87.

¹⁶ Vgl. Boley C.: Handbuch Geotechnik, 2012, S. 502.

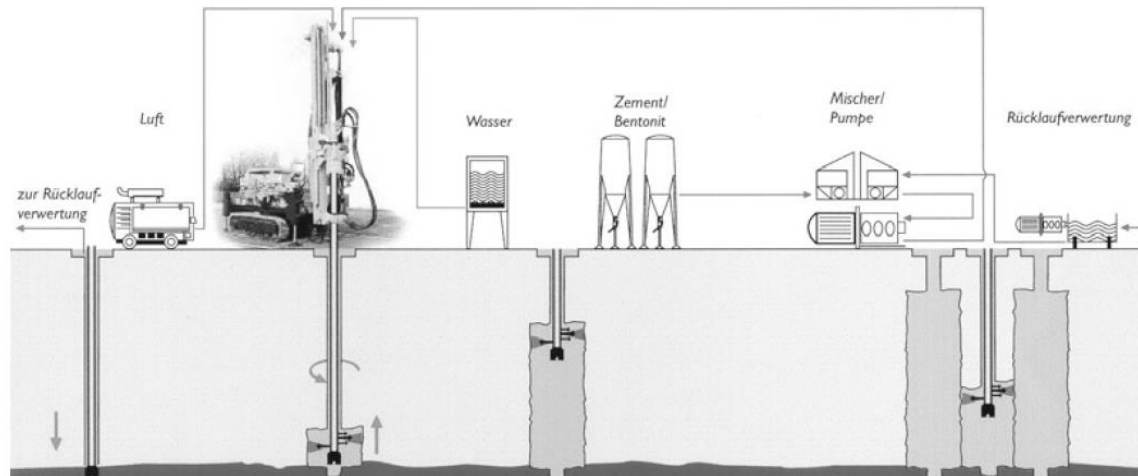


Abb. 1.5: Herstellung von Düsenstrahlsäulen¹⁷

1.3 Injektionsparameter

Dieser Teil erfasst die wesentlichen Injektionsparameter mit Ausnahme von Injektionsmittel und ihren Eigenschaften, Besonderheiten und Anwendungsbereichen, die detailliert im dritten Abschnitt beschrieben sind.

1.3.1 Injizierbarkeit

Ob ein Medium überhaupt injizierbar ist hängt von den Eigenschaften des Mediums selbst und von den Fließeigenschaften des Injektionsguts ab. Die Aufnahmefähigkeit für das Injektionsgut wird durch das Porenvolumen, -geometrie, -raumstellung, bzw. Klufzustand bestimmt, deswegen sind die Voruntersuchungen von größter Bedeutung. Für die Erkundung der Bodeneigenschaften ist zunächst die grundsätzliche Unterscheidung zwischen Fest- und Lockergestein erforderlich.

1.3.1.1 Boden

Für die erfolgreiche Injektion müssen die Bodenkenngrößen bekannt sein. Nachfolgend werden ein paar Kriterien beschrieben, die die Injizierbarkeit darstellen. Es ist anzumerken, dass diese Kriterien in einen Zusammenhang zwischen einander stehen und demnach nicht getrennt betrachtet werden können.

¹⁷ Vgl. Boley C.: Handbuch Geotechnik, 2012, S. 496.

- Kriterium Korngröße Boden D / Korngröße Injektionsgut d

$\frac{D_{15}}{d_{85}}$	> 24	Injektion möglich
	< 24	Injektion eventuell möglich
	< 11	Injektion nicht möglich

Tab. 1.1: Injektionsfähigkeit nach der Korngröße

D_{15} = Korndurchmesser des Lockergesteins bei 15% Siebdurchgang

d_{85} = Korndurchmesser innerhalb des Injektionsguts bei 85% Siebdurchgang

Dieses Kriterium beschreibt das Vermögen, dass die größten Körner des Injektionsguts die feinsten Porenkanäle passieren können. Neben diesem empirisch ermittelten Injektionskriterium wird die Injizierbarkeit auch durch Versuche verschiedener Böden überprüft (Abb. 2.6).

- Kriterium Kornverteilung: während die Kornverteilung, bzw. die Kornverteilungskurve ein Merkmal für die Zusammensetzung des Bodens ist, stellt sie indirekt auch das Porensystem dar, das die Bewegung des Injektionsguts beeinflusst. *Kutzner* stellt die Anwendungsbereiche von Injektionsmitteln nach der Kornverteilung dar:

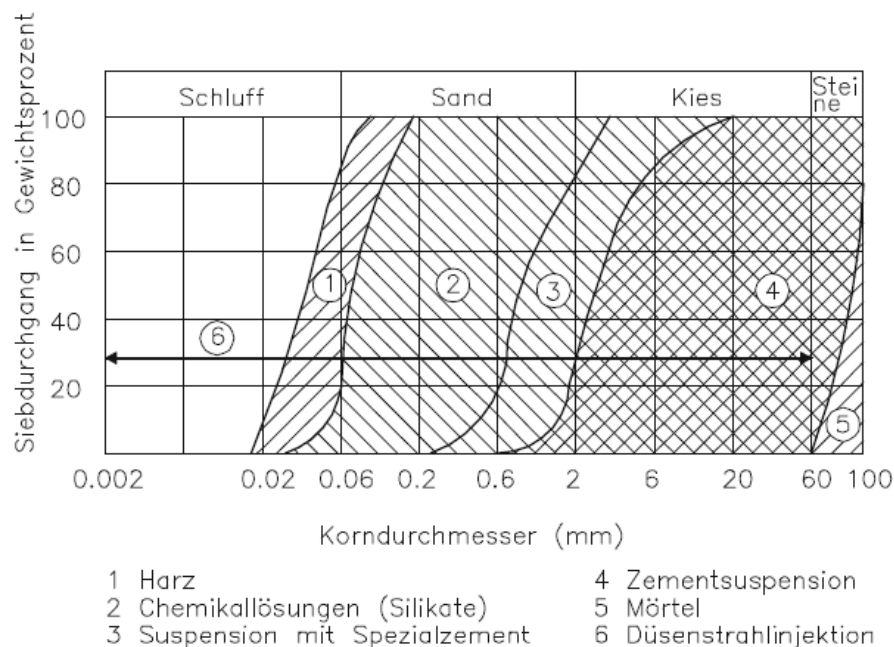


Abb. 1.6: Anwendungsbereiche von Injektionsmittel¹⁸

¹⁸ Vgl. Kolymbas D., Geotechnik: Bodenmechanik, 2011, S. 379.

- Kriterium der Durchlässigkeit: einerseits bedingt die Durchlässigkeit des Bodens den Injektionsbedarf bei Verdichtungsinjektionen, andererseits ist sie von Bedeutung bei der Wahl des Injektionsguts. Verschiedene Autoren wie *Cambefort* und *Maag* geben einen Zusammenhang zwischen der Durchlässigkeit des Bodens und dazu passenden Injektionsmittel nach der mittleren Korngröße des Injektionsmittels, bzw. des zu injizierenden Mediums an.
- Kriterium der Porenengstelle: die Porenengstelle lässt sich definieren als ein eingeschriebener Kreis im Zwischenraum von drei sich berührenden Körner mit unterschiedlicher Größe (Abb. 2.7).

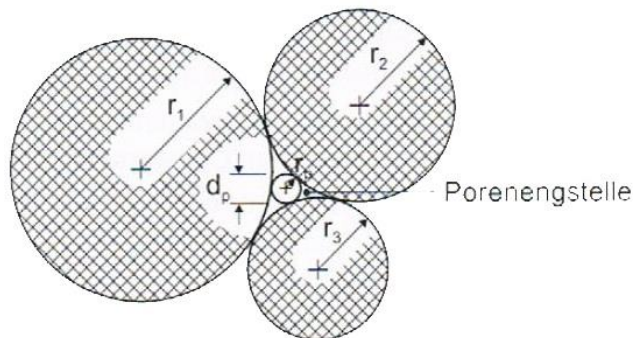


Abb. 1.7: Ebener Schnitt durch eine Porenengstelle¹⁹

Die Bestimmung der Porenengstelle ist relevant für das Eindringen von Injektionsgut im Boden. Mathematisch können die unterschiedlichen Größen der Porenengstellen anhand der Korngrößerverteilung ermittelt werden und durch eine Porenengstellenverteilungskurve dargestellt werden. Mit dieser Kurve kann abgelesen werden wieviel Prozent der Porenengstellen in einem Korngefüge einen kleineren oder größeren Durchmesser als den jeweils betrachteten Durchmesser haben (Abb. 2.8).

Damit Injektionsgut in den Boden eindringen kann, gilt nun als Kriterium, dass die Korngrössverteilung des Injektionsmittels links der Porenengstellekurve des Bodens liegen muss. Diese Aussage geht jedoch vom ungünstigsten Fall aus, nämlich der dichtesten Lagerung. Da dies in der Natur so nicht vorkommt, können bei locker bis mitteldicht gelagerten Böden auch Suspensionen mit größerer Korngrößenverteilungslinie verwendet werden.²⁰

¹⁹ Vgl. Stein D, Entwicklung und Erprobung von optimierten Injektionsmitteln und -verfahren zur kontinuierlichen Ringspaltstützung beim Rohrvortrieb im heterogenen Baugrund, 2007, S.97.

²⁰ Vgl. Skriptum Baugrund und Injektion 2013, TU Wien, S. 15.

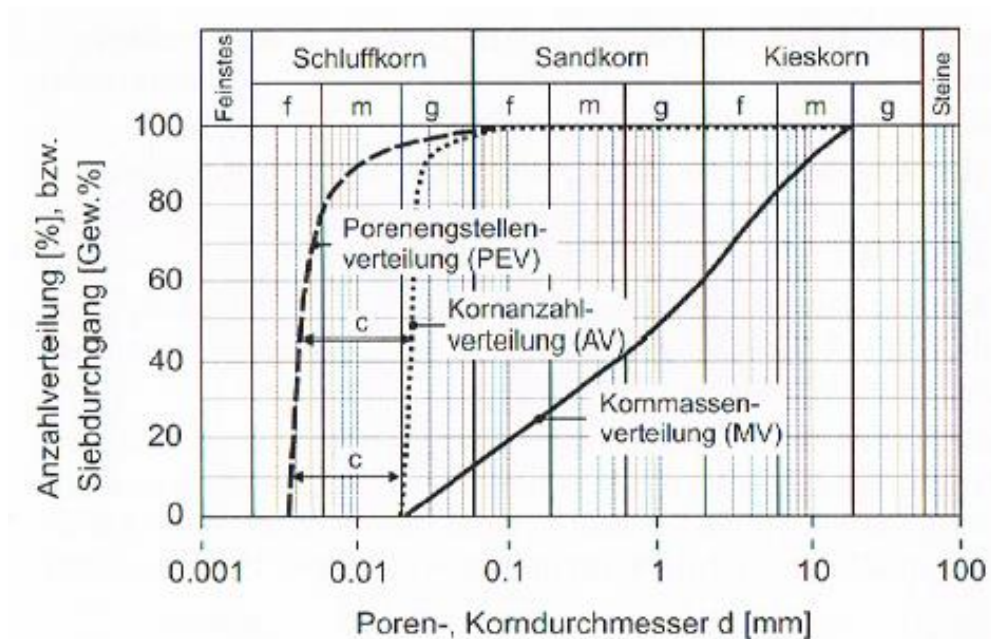


Abb. 1.8: Porenengstellverteilung²¹

1.3.1.2 Fels

Die Injizierbarkeit von Fels hängt stark von den vorhandenen Klüften ab. Ungeklüftetes Gestein ist in der Regel nicht injizierbar, kann also injektionstechnisch als dicht angesehen werden.²² Wesentliche Parameter für die Beschreibung der Klüften im Felsgestein sind:

- Klüftweiten: eine Annäherung an das Injektionsvermögen stellt das Verhältnis zwischen der Öffnungsweite der Kluft und dem Korndurchmesser des Injektionsmittels bei 85% Siebdurchgang dar:

$\frac{M}{d_{85}}$	> 5	Injektion möglich
	3 ÷ 5	Injektion eventuell möglich
	< 3	Injektion nicht möglich

Tab. 1.2: Injektionsfähigkeit nach der Klüftweite

M= Öffnungsweite der Kluft

d_{85} = Korndurchmesser innerhalb der Injektionsgut bei 85% Siebdurchgang

²¹ Vgl. Stein D, Entwicklung und Erprobung von optimierten Injektionsmitteln und -verfahren zur kontinuierlichen Ringspaltstützung beim Rohrvortrieb im heterogenen Baugrund, 2007, S.98.

²² Vgl. Skriptum Baugrund und Injektion 2013, TU Wien, S. 16.

- Abstände der Klüfte untereinander: sind von Bedeutung für die Anzahl und die Lage der Injektionsbohrlöcher.
- Räumliche Stellung der Klüfte: bestimmt meistens die Neigung der Bohrlöcher.
- Rauigkeit der Klüfte: beeinflusst die Reichweite (die Entfernung zwischen der Injektionsquelle und dem Punkt, bis zu dem das Injektionsmittel der Injektion vorgedrungen ist²³), die immer im Zusammenhang mit dem Injektionsdruck und der Wahl von Injektionsmittel ist. Grob gesagt je rauher die Trennfläche ist, desto höherer Injektionsdruck wird einerseits benötigt um die notwendige Reichweite zu gelangen und desto unviskoser soll andererseits das Injektionsmittel sein.
- Verfüllung mit Wasser/Boden: die Klüftverfüllung könnte verschiedene Spannungszustände verursachen, die sich vom Spannungszustand aus dem Überlagerungsgewicht unterscheiden können, was die Größe des Injektionsdrucks beeinflusst.

1.3.2 Injektionsdruck

Der Injektionsdruck spielt eine wichtige Rolle für den optimalen Injektionsvorgang. Einerseits darf er nicht zu klein sein, weil die gewünschte Reichweite nicht erzielt werden könnte, andererseits darf er nicht zu groß sein, da er sonst eine unerwünschte Verschiebung von Fels- oder Lockergestein, eine Hebung der Oberfläche oder eine Vorspannung des Bauwerks oder Gebirges verursachen könnte. Der Injektionsdruck wird weitgehend bestimmt durch die Injektionsart: bei Auffüllinjektionen ist er wesentlich kleiner als bei Aufbrechinjektionen, dabei ist zu unterscheiden zwischen Injektionsdruck zur Verdichtung im Locker- und Festgestein. Für Lockergestein geben *Cambefort (1964)* und *Kutzner (1991)* eine rechnerische Beziehung zwischen dem Aufreißdruck und den Bodenkennwerte an:

$$\text{Für bindige Boden: } p_0 = \frac{\gamma \cdot h}{m-1} + c$$

$$\text{Für nicht bindige Boden: } p_0 = \frac{\gamma \cdot h}{m} \cdot (1 + \sin \varphi)$$

p_0 – Aufreißdruck

γ – Wichte des Bodens

h – Bohrlochtiefe

c – Kohäsion

$1/m$ – Querdehnzahl

φ – Reibungswinkel

²³ Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 11.

Für Festgestein hängt der Injektionsdruck von der räumlichen Orientierung der Klüfte ab, aber allgemein gilt, dass der Injektionsdruck in jeder Tiefe kleiner als der Überlagerungsdruck sein soll.²⁴ Ein Vorschlag für die Größe des Einpressdrucks nach der Gebirgsverhältnisse gibt *Kutzner* in folgender Tabelle:

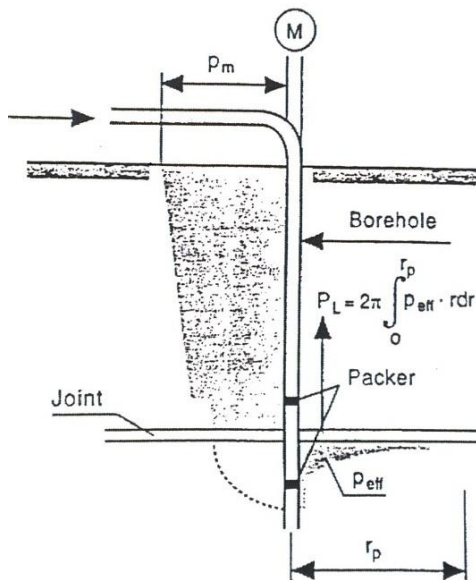
Bohrlochtiefe (m), normal zur Geländeoberfläche gemessen	Überlagerungs- druck, Felswichte = 25 kN/m ³	Vorschlag für vorwiegend horizontal oder böschungsparell geschichtetes Gebirge	Vorschlag für quasi isotropes Gebirge	Druck als Äquivalent zum Gewicht des umgekehrten Kegelstumpfs, Felswichte = 25 kN/m ³ , Injektionsradius 2 m.
0 bis 5	0 bis 0,13	0,1 bis 0,2	0,2 bis 0,3	0,4
5 bis 10	0,13 bis 0,25	0,2 bis 0,5	0,3 bis 0,6	0,4 bis 2,0
10 bis 20	0,25 bis 0,5	0,5 bis 1,0	0,6 bis 1,2	2,0 bis 9,0
20 bis 30	0,5 bis 0,75	1,0 bis 2,0	1,2 bis 2,5	9,0 bis 25,0
> 30	> 0,75	> 2,0	> 2,5	> 25,0

Tab. 1.3: Einpressdruckgröße

Als weitere Komplikation ergibt sich bei der Drucksteuerung der Unterschied zwischen „Betriebsdruck“ und „wirksamer Druck“. Der Betriebsdruck ist der Druck, der an der Injektionspumpe oder am Bohrlochmund gemessen wird, während der wirksame Druck jener Druck ist, der unter Berücksichtigung von Druckverluste infolge Reibung an der Injektionsstelle wirkt²⁵.

²⁴ Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 23.

²⁵ Vgl. Skriptum Baugrund und Injektion 2013, TU Wien, S. 31.



p_m – Betriebsdruck

p_{eff} – Wirksamer Druck

r_p – Reichweite

Abb. 1.9: Druckverlauf vom Bohrlochmund bis in den Spalt²⁶

Folgende Regel für gelungene Injektionsarbeiten wird durch die Praxis bekräftigt: der Druck soll vom Beginn des Injektionsvorgangs bis zum Ende langsam gesteigert werden. Der Enddruck wird eine gewisse Zeit gehalten um ein ausreichendes Drucksystem im Gebirge zu erreichen. Mit der Drucksteigerung ist eine Abnahme der Verpressgeschwindigkeit, bzw. der Injektionsmenge verknüpft.²⁷

1.3.3 GIN – Kriterien

GIN (Grout Intensity Number) dient als Abbruchkriterium für den Injektionsvorgang von Klüften und Spalten. Dieses Verfahren wurde von *Lombardi* entwickelt und wird den letzten 20 Jahren von der Praxis akzeptiert. Das Prinzip basiert auf die Idee einen konstanten Energieaufwand beim injizieren zu halten, der als Produkt des Verpressdrucks und der Injektionsmenge angesehen werden kann.

GIN- Wert = $P \cdot V$ = Energie

P- Injektionsdruck in bar

V- Injektionsvolumen in l/m

Ein konstanter GIN-Wert postuliert einerseits eine Begrenzung der Injektionsaufnahme in weiten offenen Klüften und führt andererseits zu verbesserten Ergebnissen in schwer injizierbaren Rissen infolge einer Erhöhung des Verpressdrucks. Der Hauptaspekt liegt

²⁶ Vgl. Widman R.: Einführung in die Problematik der Injektionen in Fels, 1998, S. 12.

²⁷ Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 104

jedoch in der Vermeidung einer Kombination von hohen Verpressdrücken und großen Einpressvolumina. Diese Kombination bringt eine immense Gefahr hinsichtlich einem weiteren Aufbrechen (hydrofracturing) in sich.²⁸

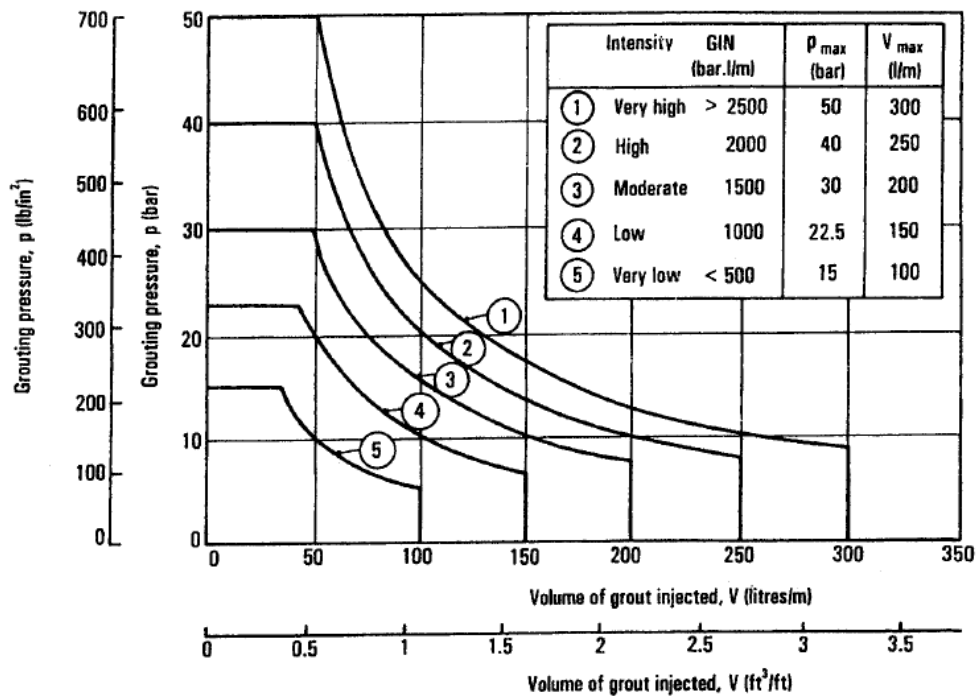


Abb. 1.10: Darstellung des Injektionsdruckes als Funktion des Injektionsvolumens für verschiedene GIN Werte²⁹

1.3.4 Pumprate

Als Pump- oder Verpressrate wird die eingepresste Menge an Injektionsgut pro Zeiteinheit bezeichnet, üblicherweise wird sie in l/min gegeben.

1.3.5 Reichweite

Eine beschreibende Größe der Injektionsarbeiten kann die Reichweite sein. Es gibt mehrere mathematische Funktionen, wodurch eine Endreichweite geschätzt werden kann, aber sie ist in allen Fällen projektspezifisch und über Probefelder zu bestimmen und sogar da ist es schwierig den exakten Verlauf von Injektionen im Boden vorauszusagen. Allerdings zeigen die Betrachtungen das die Reichweite direkt proportional der Kluftweite und dem wirksamen Injektionsdruck ist und umgekehrt proportional der Fließgrenze des Injektionsmittels.

²⁸ Vgl. Linsbauer H.: Einführung in die Problematik der Injektionen in Fels, 1998, S. 28.

²⁹ Vgl. Linsbauer H.: Einführung in die Problematik der Injektionen in Fels, 1998, S. 13.

1.3.6 Injektionszeit

Die Injektionszeit ist mehr oder weniger durch das Injektionsmittel bestimmt. Während der Injektion muss das Injektionsmittel stabil bleiben, d.h. keine unerwünschten Sedimentationsprozesse bei Zementsuspensionen und keine unvorhergesehenen Erhärtungen sind erlaubt. In diesem Zusammenhang wird auch von der Pumpfähigkeit gesprochen. Außerdem steht die Injektionszeit im Zusammenhang mit dem zulässigen Injektionsdruck und der gewünschten Reichweite. Die begrenzte Verarbeitungszeit der verschiedenen Injektionsmittel hat Einfluss auf die erzielbare Reichweite, da bei einem definierten Injektionsdruck lediglich eine bestimmte Menge des Injektionsmittels injiziert werden kann. Die Abbindezeit bei chemischen Injektionsmitteln beträgt etwa eine Stunde, während bei Zementsuspensionen ein bis sechs Stunden, je nachdem was für Zusätze in der Mischung hinzugefügt worden sind, möglich sind. So ist die Reichweite von chemischen Injektionsmitteln immer kleiner, da nur eine sehr begrenzte Verarbeitungszeit zur Verfügung steht³⁰.

1.4 Richtlinien

Diese Arbeit stützt sich auf folgende Normen:

- ÖNORM EN 12715:2000 Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Injektionen
- ÖNORM B 4454:2001 Erd- und Grundbau - Injektionen in Fest- und Lockergestein - Prüfungen
- ÖNORM EN 1504-5:2012 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 5: Injektion von Betonbauteilen
- DIN 4093: 2012 Bemessung von verfestigten Bodenkörpern – Hergestellt mit Düsenstrahl-, Deep-Mixing- oder Injektions-Verfahren

³⁰ Vgl. Irngartiner St.: Strömungsverhalten thermoplastischer Schmelzen in klüftigem Festgestein, 2007, S. 13.

2 Injektionsmittel

2.1 Fließverhalten von Injektionsmittel

Obwohl für die Erfüllung der Zielsetzung die Eigenschaften des ausgehärteten Injektionsgutes maßgeblich sind, spielt für den erfolgreichen und problemlosen Injektionsvorgang das Fließverhalten die Hauptrolle. Dabei sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Eigengewicht sowie rheologische Parameter (Viskosität, Kohäsion)
- Durchdringungsvermögen
- Stabilität, Auswaschbarkeit, Reaktionszeit

Um das Fließverhalten zu beschreiben, sind die Begriffe Fließgrenze und Viskosität zu definieren. Die Fließgrenze lässt sich bezeichnen als ausreichend große Spannung, die plastische Deformationen verursacht. Die Viskosität η ist ein Maß für die Zähigkeit von Flüssigkeiten. Diese Zähigkeit wird durch innere Reibung verursacht, die benachbarte Flüssigkeitsschichten aufeinander ausüben, weil ihre Moleküle sich gegenseitig anziehen.³¹ Zur besseren Erklärung dieser Eigenschaft dient folgendes Modell (Abb. 3.1).

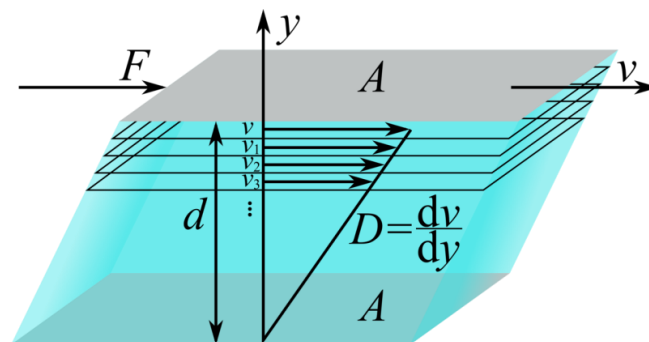


Abb. 2.1: Fluidfilm zwischen ruhender Platte (unten) und bewegter Platte (oben)³²

Eine Flüssigkeit befindet sich zwischen einer festen und einer beweglichen Platte, die sich mit der Geschwindigkeit V bewegt. Der Flüssigkeitsfilm kann als eine Gesamtheit von untereinander stehenden Flüssigkeitsschichten dargestellt werden, wobei die oberste Schicht, die sich neben der beweglichen Platte befindet, auch mit Geschwindigkeit V bewegt wird. Die Schicht oberhalb der unbeweglichen Platte ist auch unbeweglich, also ist die

³¹ Vgl. Stein D.: Entwicklung und Erprobung von optimierten Injektionsmitteln, 2007, S. 21.

³² Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Viskosität#mediaviewer/File:Definition_Viskositaet.png

Geschwindigkeit gleich Null. Das daraus resultierende Geschwindigkeitsgefälle D , definiert

$$D = \frac{dV}{dy} \quad (3.1.)$$

die Änderung der Geschwindigkeit senkrecht zur Bewegungsrichtung:

Im Experiment lässt sich zeigen, dass im Idealfall die Kraft F , die nötig ist, um die obere Platte in Bewegung zu setzen, proportional zur Fläche A , dem Geschwindigkeitsunterschied dV und antiproportional zum Abstand der Platten dy ist. Hieraus ergibt sich die Gleichung:

$$F = \eta * A * \frac{dV}{dy} = \eta * A * D \quad (3.2.)$$

wobei η die Proportionalitätskonstante ist und als dynamische Viskosität bezeichnet wird. Ein Stoff, der sich zwischen zwei Platten befindet, hat die Viskosität 1 Ns/m^2 , wenn bei einer Größe der Platten von 1 m^2 und einem Plattenabstand von 1 m eine Kraft von 1 N benötigt wird, um die Platten mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s gegeneinander zu verschieben. Für die physikalische Einheit der dynamischen Viskosität gilt also:³³

$$1\text{N} = [\eta] * \left(\frac{\text{m}^2 * \text{m}}{\text{m} * \text{s}} \right) \Rightarrow [\eta] = \frac{\text{N} * \text{s}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}} = 1 \text{ Pa} * \text{s}$$

Zu unterscheiden ist auch kinematische Viskosität, die nur die innere Reibung eines Stoffes beschreibt und unabhängig von der Dichte eines Stoffes ist.

Die Schubspannung τ , die bei der Bewegung von zwei Flüssigkeitsschichten unterschiedlicher Geschwindigkeit entsteht, wird definiert als:

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta * D \quad (3.3.)$$

Alle Flüssigkeiten, die solche Fließverhalten besitzen, sind als Newton'sche Flüssigkeiten bekannt. Allgemein bedeutet das, dass die Schergeschwindigkeit proportional zur Scherspannung ist. Solches Verhalten weisen das Wasser und die Mehrzahl der für Injektionen verwendeten Lösungen auf.

³³ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Viskosität#Einheiten>

Ein anderer Fall von Fließverhalten tritt bei den meisten Suspensionen und Emulsionen auf. Sie werden durch das Bingham'sche Gesetz beschrieben, das lautet, dass zunächst eine Anfangsschubfestigkeit (τ_0 – Fließgrenze) der viskosen Masse überwunden werden muss, um das Fließen in Gang zu setzen. Die mathematische Darstellung ist durch Gleichung (3.4.) gegeben.

$$\tau = \tau_0 + \eta * D \quad (3.4.)$$

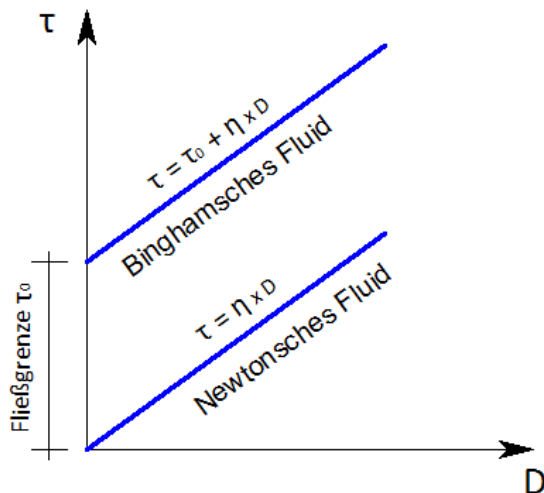


Abb. 2.2: Schubspannungs-Schergeschwindigkeits-Diagramm³⁴

2.2 Suspensionen

Als Suspensionen werden Stoffgemische aus einer Flüssigkeit und darin fein verteilten Festkörpern bezeichnet. Sie zählen sich zu den Bingham'schen Fluiden, wobei sich Suspensionen mit einer Viskosität im Bereich von $1-10 \cdot 10^{-2} \text{Ns/m}^2$ als günstig erwiesen haben. Bei den Injektionen handelt es sich um Zementsuspensionen mit Ton-, Bentonit- und weiteren Zusätze, in Spezialfällen kommen auch Mikrozementsuspensionen zum Einsatz. Wesentliche Faktoren für Injektionszemente sind deren Mahlfineinheit und die Korngrößenverteilung. Während die Mahlfineinheit wesentlich das Fließverhalten und die Sedimentationseigenschaften bestimmt, liefert die Korngrößenverteilung Nachweise über die mögliche erreichbare Eindringtiefe in Klüfte und Spalten.³⁵

³⁴ Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 13.

³⁵ Vgl. Skriptum Baugrund und Injektion 2013, TU Wien, S. 21.

2.2.1 Zusammensetzung

Die gewöhnlichen Zementsuspensionen werden aus Zement und Wasser hergestellt. Als Mindestkriterien mit Rücksicht auf die Zementeigenschaften werden empfohlen:³⁶

- Spezifische Oberfläche größer als 3.000 bis 3.500 cm²/g
- Größtkorn höchstens 0,1 mm
- Mindestens 90% der Zementkörner kleiner als 0,05 mm

W/Z-Werte von 0,5 bis 5,0 sind charakteristisch, aber in Hinblick auf ein optimiertes Zusammenspiel zwischen Fließverhalten, Fließgrenze und Sedimentation sind W/Z-Werte im Bereich 0,7÷2,0 zu empfehlen. Je geringer der W/Z-Wert ist, desto höher wird die Festigkeit des erhärteten Injektionsmittels, gleichzeitig verschlechtern sich aber die Fließeigenschaften. Experimente beweisen, dass W/Z-Werte größer als 2,0 den Fließvorgang nicht wesentlich beeinflussen, deswegen gilt dies in der Praxis als Obergrenze. Abhängig von der Korngröße des Zements und von den Zementsorte und seiner Dichte ergeben sich unterschiedliche Sedimentationsgeschwindigkeiten. Je feiner die Zementkörner sind und je enger aneinander sie sich in der Suspension befinden, umso weniger sedimentiert die Suspension.³⁷ Die Stabilität einer Zementsuspension wird nämlich durch den Sedimentationsvorgang bedingt. Nach *EN 12715:2000* gelten Suspensionen als stabil, die in 2 Stunden bei einer Temperatur von 20 °C im oberen Bereich eines 1.000-ml-Messzylinders mit 60 mm Innendurchmesser weniger als 5% Klarwasser abgeben. Da die oben genannte W/Z-Werte instabilen Suspensionen entsprechen ist eine Zugabe eines Stabilisators fast immer notwendig. Dazu können 1-4% Bentonit hinzugefügt werden, ohne die Festigkeitseigenschaften zu beeinflussen. Weil die Bentonitkörner wesentlich feiner als die Zementkörner sind, dienen sie als mechanische Brücke zwischen den Zementkörnern und so wird die Viskosität erhöht und auch die Abbindezeit verzögert. Weitere Zusatzmittel, die zum Einsatz kommen sind: Verflüssiger, Abbindebeschleuniger, –verzögerer oder luftporenbildende Mittel.

Wenn in der Zusammensetzung der Suspension auch Sand vorhanden ist, dann spricht man von Mörtel. Solche Zement-Sand-Suspension ist in der Regel nur dann anzuwenden, wenn große Hohlräume oder weite Klüfte zu verfüllen sind. Da der Mörtel sehr ungünstige

³⁶ Vgl. Skriptum Baugrund und Injektion 2013, TU Wien, S. 21.

³⁷ Vgl. Donel M., Bodeninjektionstechnik, 1995, S. 32.

Sedimentationseigenschaften hat, können Zementpasten verwendet werden. Sie besitzen einen W/Z-Wert zwischen 0,4-0,6 und lassen sich als stabil bezeichnen.

Wenn keine hohe Festigkeit erforderlich ist, können aus wirtschaftlichen Gründen Füllstoffe wie Gesteinsmehle, Schlacken oder Asche verwendet werden. Ihren Einfluss auf die Suspension in Bezug auf die Fließeigenschaften, Festigkeitsentwicklung, Durchlässigkeit und Erosionsstabilität sollte jedoch mittels Laborversuchen überprüft werden.

Anmachwasser als wesentlicher Bestandteil von Suspensionen muss im wesentlichen Trinkwasserqualität haben, auf alle Fälle muss es sowohl frei von schädlichen Chemikalien und Stoffen, als auch von organischen Bestandteilen sein.

2.2.2 Anwendung

Suspensionen werden sowohl als Injektionsmittel, als auch Bohrspülung für Stabilisierung des Bohrlochs und Abtransport des Bohrkleins, verwendet.

Zementinjektionen bei nicht bindigen Böden kommen im Kies- und Grobsandbereich zum Einsatz. Beide Injektionsaufgaben (Verfestigung und Abdichtung) können erfüllt werden, wobei folgende Besonderheiten zu berücksichtigen sind:³⁸

- Die Durchlässigkeit des Zements vor dem Abbinden liegt zwischen 10^{-6} bis 10^{-7} m/s und nimmt während der Hydratation ab, je nachdem wieviel Überschußwasser in der Suspension bei Abbindebeginn vorhanden ist. Überschlußwasser macht den Zement poröser und durchlässiger, deswegen sind bei der Verdichtungsinjektionen W/Z-Werte im unteren Bereich zu empfehlen. Der Grad und die Art der Porenfüllung sind auch von Bedeutung: zusätzliche Porenwasser nimmt die Durchlässigkeit zu, während die feste Porenfüllung sie abnimmt. Die Orientierungswerte nach *Kutzner* für den Durchlässigkeitsbeiwert der Zementsuspension nach 28 Tagen liegen in Größenordnung von 10^{-12} bis 10^{-10} m/s.

- Die Festigkeitsentwicklung von Zementsuspensionen ist in der Regel für Verfestigungszwecke ausreichend, jedoch können Zusatzmittel und Füllstoffe wie Bentonit, Abbindebeschleuniger, Ton, Sand usw. einen wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit und Erosionsstabilität ausüben. Vorversuche sind immer durchzuführen, wenn hohe Druckfestigkeit das Ziel ist.

³⁸ Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 247-255.

- Bei der Abdichtung von Felsgestein wird eine Mörtelinjektion allein nicht zum Ziel führen, sondern sie wird als Voraus- oder Zusatzmaßnahme zur Injektion reiner Zementsuspension erfolgen.³⁹ Der Grund dafür ist das ungünstige Sedimentationsverhalten von Mörtel.

2.3 Lösungen

Als Lösung wird ein homogenes Gemisch aus aufgelösten Stoffen in einer Flüssigkeit bezeichnet. Sie zählen zu der Newton'schen Fluiden. Als Injektionsmittel dieser Art kommen Silikatgele zum Einsatz, die aus Natriumsilikat (Wasserglas) gelöst in Wasser und einem organischen oder anorganischen Härter bestehen. Grundsätzlich sind Hart- und Weichgele zu unterscheiden. Erstere dienen vorrangig der Verfestigung, während Weichgele in der Regel zur Abdichtung verwendet werden, wobei das Einsatzgebiet nur Sandböden umfasst, deren Grobschluffanteil (Korngröße $<0,006$ mm) nicht mehr als 10% ist.⁴⁰

Bei dem so genannten *Joosten*-Verfahren werden nacheinander Wasserglas und danach ein Salz der Salzsäure (MgCl, CaCl, NaCl) eingepresst, wobei eine schlagartige Reaktion entsteht. Als Ergebnis davon bildet sich ein Hartgel mit sehr hoher Festigkeit (bis zu $5,0$ MN/m²).⁴¹ Bei dem „one shot“-Verfahren, werden die Komponente (stark verdünnte Wasserglaslösungen) vor dem Verpressen vermischt und in einem Arbeitsschritt eingepresst. Bei richtiger Einstellung entsteht das Gel etwa 30-60 Minuten nach Herstellung der Mischung, d.h. dass die flüssige Mischung etwa 30 Minuten lang eingepresst werden kann.⁴²

Die Anwendung chemischer Injektionsmittel wird als negativ gegenüber der Umweltverträglichkeit bewertet, was zur starken Reduktion des Gebrauchs führt. Heute werden für Abdichtungsinjektionen nur in Einzelfällen Weichgele verwendet.

2.4 Kunstharzinjektionen

Bei feinkörnigeren oder schluffigen Böden kommen die Kunstharzinjektionen, wegen ihrer sehr niedrigen Viskosität und daher hohen Eindringfähigkeit zum Einsatz. Harze sind auch sehr oft verwendet als Sanierungsinjektionsmittel für Risse- und Fugenverfüllung

³⁹ Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 247-255. S. 101.

⁴⁰ Vgl. Schnell W., Verfahrenstechnik zur Sicherung von Baugruben, 1990, S. 201.

⁴¹ Vgl. Möller G., Geotechnik- Grundbau, 2006, S. 40.

⁴² Vgl. Donel M., Bodeninjektionstechnik, 1995, S. 47.

verschiedener Art. Sie werden vor dem Einpressen angemischt und zählen zu den Einkomponentenverpreßmittel. Nach dem Anmischen kommt es zur Bildung von Makromolekülen, welche die dauerhafte Dichtung, bzw. Verfestigung bewirken.⁴³ Es sind Kunstharze auf Epoxid- Polyurethan- und Acrylatbasis zu unterscheiden.⁴⁴

Epoxidharze sind zweikomponentige Produkte: die so genannte "A-Komponente" enthält meist das Epoxidharz, die "B-Komponente" den Härter, der in einem vorbestimmten Mischungsverhältnis dem Harz zuzugeben ist. Das Reaktionsprodukt zeichnet sich durch druck- und zugfeste, kraftschlüssige Verbindungen aus.

Die niedrigviskose Polyurethanharze werden in einkomponentiger und zweikomponentiger (Stammharz und Härter) Form eingesetzt. Einkomponentige Produkte reagieren mit dem Wasser im Injektionsbereich, zweikomponentige Produkte reagieren mit ihrem Härter. Beide Systeme können in ihrer Reaktionszeit durch Katalysatoren gesteuert werden. Die Eigenschaften des Reaktionsprodukts hängen vom Wassergehalt ab: von hoch verformbar bis hochfest. Eine wichtige Eigenschaft ist die Quelfähigkeit bei Wasserkontakt.

Ein Sonderfall von Polyurethanharze sind die Polyurethanschäume. Diese Zweikomponenten-Kunstharze reagieren bei Kontakt mit Wasser und bilden CO₂, was zu einer Aufschäumung führt. Aus 1 Liter Gemisch entstehen bei ungehinderter Aufschäumung 12 Liter Polyurethanschaum. Die Aushärtezeit ist sehr rasch (30 s bis 3 min). Dabei sind ausgehärtete Polyurethanschäume duktil, d.h. sie können deformiert werden, ohne zu reißen oder von den Flanken abgelöst zu werden.⁴⁵ Sehr oft wird diese Wirkungsweise bei Schadenstellen, infolge Wassereinbruch verwendet. Eine schnelle Vorabdichtung wird mit dem PU-Schaum erreicht, jedoch wird aufgrund der Offenporigkeit keine dauerhafte abdichtende Wirkung erzielt und ein zweiter Arbeitsgang mit Polyurethanharzinjektion ist notwendig.

Acrylharze haben den Vorteil, dass sie auch bei Minustemperaturen (bis zu -30 °C) aushärten können. Das ist möglich aufgrund der Zugabe von verschiedenen Aktivatoren.

Einen Überblick über mögliche Verwendungszwecke von Harzen gibt *EN 12715:2000* in folgender Tabelle:

⁴³ Vgl. Möller G., Geotechnik- Grundbau, 2006, S. 40.

⁴⁴ Vgl. Richtlinie Injektionstechnik, Teil 1: Bauten aus Beton und Stahlbeton, 2008, S. 15-17.

⁴⁵ Vgl. Kolymbas D., Geotechnik: Bodenmechanik, 2011, S. 381.

Harzart	Art des Baugrundes	Einsatz/Anwendung
Acrylharz	Körniges Lockergestein, fein geklüfteter Fels	Verringerung der Durchlässigkeit Verbesserung der Festigkeit
Polyurethanharz	Große Hohlräume	Verschäumung, um das Eindringen von Wasser zu blockieren (wasserreaktive Harze) Verfestigung oder örtliche Hohlraumfüllung (Zweikomponenten-Harze)
Phenolharz	Feiner Sand und sandiger Kies	Abdichtung und Verfestigung
Epoxidharz	Geklüfteter Fels	Verbesserung der Festigkeiten Verringerung der Durchlässigkeit

Tab. 2.1: Anwendungsgebiete von Harzen

Die Anwendung von Kunstharzinjektionen bleibt wegen der hohen Kosten und der möglichen Umweltgefährdung auf Sonderfälle beschränkt.⁴⁶

2.5 Emulsionen

Die Verwendung von Emulsionen als Injektionsmittel ist fast ausschließlich auf Bitumenemulsion beschränkt. Alle Verfahren beruhen darauf, dass die im Wasser emulgierten Bitumentropfen mit dem Wasser unter Druck in die Poren oder Klüfte des zu injizierenden Mediums geschwemmt werden. Ein zum richtigen Zeitpunkt zugegebenes Zusatzmittel bewirkt, dass sich die Bitumenteilchen zusammenballen und die Poren und Klüfte des Mediums verstopfen.⁴⁷

2.6 Anwendungsgrenzen und Besonderheiten

Als allgemeine Regel bei der Wahl von Injektionsmittel gilt, dass immer das größte Mittel angewandt werden soll, welches sich in die vorhandenen Klüfte und Poren einpressen lässt. Das ergibt sich aus wirtschaftlichen und technischen Überlegungen. Eine wirtschaftliche Überlegung ist: wenn für ein bestimmtes Kluft- oder Porensystem ein zu dünnes

⁴⁶ Vgl. Skriptum Bauverfahren im Tiefbau 2014, TU Wien, S. 89.

⁴⁷ Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 283.

Injektionsmittel gewählt wird, würde es bis zu unerwünscht großen Reichweiten vordringen. Ein technischer Grund: die Dichtigkeit und Festigkeit der ausgehärteten Injektionsmittel steigt mit dem Zusatz grober Bestandteile.⁴⁸ Um beste Ergebnisse zu erzielen ist es möglich einen Wechsel der Injektionsmittel, während des Injizierens eines bestimmten Bohrlochs, zu machen.

Wie schon im Abschnitt 2 erwähnt, hängt die Injektionsmittelwahl stark von den Bodeneigenschaften ab. Manche Autoren wie *Cambefort*, *Kutzner* und stellen graphisch den Zusammenhang zwischen einigen Bodenkennwerten und dazu passenden Injektionsmittel dar. Typische Beispiele sind:

- Das Diagramm der Anwendungsbereiche von Injektionsmitteln nach der Kornverteilung (Abb. 2.6, Abschnitt 2)
- Eindringfähigkeit der Injektionsmaterialien in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Untergrundes

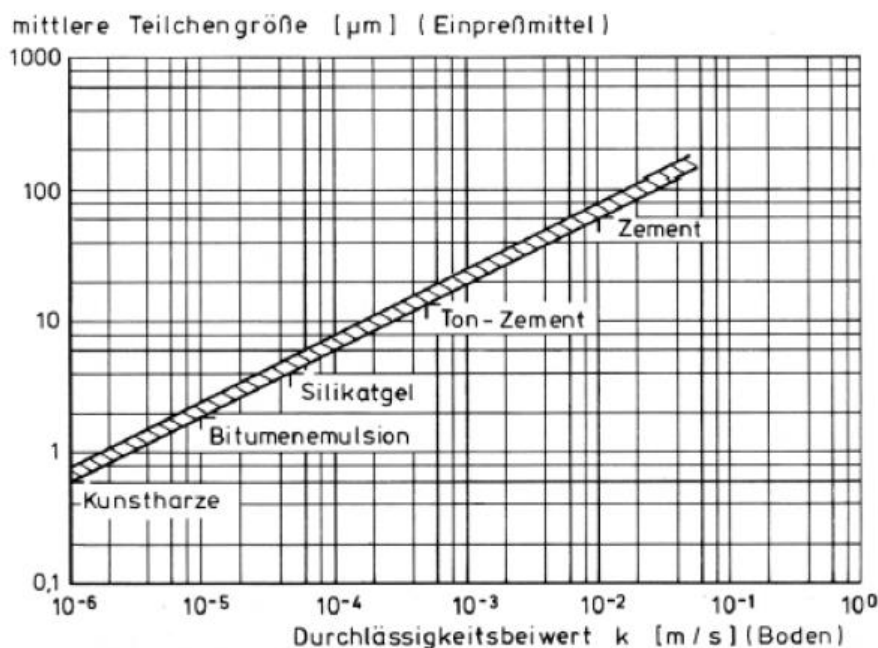


Abb. 2.3: Beziehung zwischen Durchlässigkeitsbeiwert und Einpressmittel⁴⁹

Einen Überblick über die Injektionsmittel, ihre Zusammensetzung und Anwendungsbereiche gibt Firma *Bilfinger Spezialtiefbau GmbH* in ihrem Firmenprospekt:

⁴⁸ Vgl. Maybaum G., Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau, 2009, S. 251.

⁴⁹ Vgl. Cambefort H., Bodeninjektionstechnik: Einpressungen in Untergrund und Bauwerke, 1969

Art	Mörtel und Pasten	Suspension	Lösungen	Emulsionen
Begriffsbestimmungen	Suspensionen mit sehr hohem Feststoffanteil	Feine Verteilung eines nicht gelösten Stoffes in einer Trägerflüssigkeit	Auflösung von festen Stoffen in Lösungsmittel	Fein verteiltes Gemisch zweier verschiedener Flüssigkeiten, meist mit Stabilisatoren
Zusammensetzung	Mischung aus: Wasser, Zement, Sand und ggf. speziellen Zusätzen, W/Z-Wert i.A. kleiner 1	Mischung aus: Wasser, Zement oder Feinstbindemittel und ggf. Bentonit, Flugasche o.ä. Stoffen W/Z-Wert i.A. größer 1	Mischung aus: Wasser, Wasserglas, Härter, Kunstharzen, Kunststoffen	Mischung aus: Wasser, Bitumen, Emulgatoren, wasserunlöslichen Wasserglashärtern
Anwendung	Verfüllen von Hohlräumen und Spalten. Herstellung von Injektionsbeton, Unterwasserbeton Dichtungsschleier im Tunnel und Tal-sperrrenbau	Abdichten und Verfestigen von Kies- und Sandböden, Klüften u. Spalten im Fels Risse im Mauerwerk	Abdichten und Verfestigung von Sand- und Feinkiesböden Haarrissen im Mauerwerk Fundamentverstärkungen und Vertiefungen Sohlenabdichtung	Fundamentverstärkungen und Vertiefungen Sohlenabdichtung

Tab. 2.2: Injektionsmittel

3 Ausführung von Injektionen

Die bisherigen Abschnitte betreffen die theoretische Seite der Injektionen, wobei nicht alle Aspekte im Detail wiedergegeben sind. Die Begriffe, die Prinzipien und die Eigenschaften sind insofern erläutert, als ihre praktische Bedeutung leicht verstanden werden kann. In den weiteren Abschnitten wird die Aufmerksamkeit auf die Praxis bezüglich der Planung, Ausführung und Bewertung der Injektionsarbeiten gelegt.

3.1 Erkundung und Planung

Die Planung von Injektionsarbeiten ist wie jede andere Baumaßnahme eine komplexe Aufgabe, die nicht nur die Logistik von Geräten, Materialien und Personal, sondern auch die Zielsetzung, die Methoden zur Ausführung der vorgegebenen Ziele und die Bewertung der ausgeführten Arbeiten umfasst. Viele Faktoren müssen gleichzeitig berücksichtigt werden, deshalb wird es nötig die Planung und Durchführung von Injektionsmaßnahmen von Personen und Fachfirmen durchführen zu lassen, die über entsprechende Fachkenntnisse und Erfahrungen auf diesem Spezialgebiet verfügen.

Für die richtige Planung und den Erfolg der Injektionsarbeiten, sind die Eingangsdaten, die schon teilweise in Abschnitt 2 gegeben sind, von großer Bedeutung. Da die Ergebnisse der Bodenerkundung als Grundlage für die Planung und die Ausführung dienen, müssen die geotechnische Untersuchungen mindestens *ÖNORM 1997-2* und *ÖNORM EN 12715* befolgen.

3.1.1 Erforderliche Untersuchungen bezüglich Bodeneigenschaften

Für die Erstellung eines geotechnischen Berichts werden Feld- und Laborversuche durchgeführt, die Frage der Aufnahmefähigkeit des Grunds und dazu passenden Injektionsmittel klären müssen. Egal ob es um Verdichtungs- oder Verfestigungsinjektionen geht, gilt es zu klären wieviel und welches Material idealerweise benutzt werden sollte.

Im *ÖNORM EN 12715*, Teil „*Geotechnische Untersuchungen*“ sind die zu untersuchenden besonderen Angaben beschrieben. Hier ist ein Überblick über die notwendigen Erkundungen bezüglich der Bodenkenngößen und –parameter gegeben (Tab. 4.1).

	Bodenkenngrößen	Untersuchungsmethode
Bodenerkundung	Korngrößenverteilung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Siebanalyse bei Sand und Kies ➤ Sedimentationsanalyse bei Schluff und Ton ➤ Kombination aus beiden
	Lagerungsdichte	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ausstechzylindermethode ➤ Ersatzmethoden ➤ Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens
	Porenanteil	Rechnerische Ermittlung nach der Bestimmung von anderen Bodenkennwerten wie Trocken- und Kornwichte
	Durchlässigkeit k-Wert	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Aus der Kornverteilung ungestörter Bodenproben ➤ Laborversuch mit konstanter Druckhöhe ➤ Pumpversuch
Felserkundung	Lage, Größe, Häufigkeit, Mächtigkeit von Spalten und Klüften	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kernbohrungen ➤ Schächten ➤ Schürfen
	Wasserdurchlässigkeit	➤ Wasserabpressversuch (Lugeon Test)

Tab. 3.1: Untersuchungsparameter und -methoden

3.1.2 Wasserabpressversuch

Als besonders wichtig für die Durchführbarkeit einer Abdichtungsinjektion in Felsgestein wird der Wasserabpressversuch, auch WD-Test oder nach seinem Erfinder „Lugeon Test“ genannt, erläutert. Die Idee ist den Druck und die eingepresste Wassermenge in einer Bohrloch-Teststrecke zu messen (Abb. 17). Das Maß für die Wasseraufnahme wird in Lugeon (Lu) gemessen, wobei 1 Lu als der Wasserverlust von 1 Liter Wasser pro 1 m Teststrecke bei einem Druck von $1,0 \text{ MN/m}^2$ bezeichnet wird. Der Versuch liefert weder

unmittelbare Information über die Raumstellung, Anzahl und Öffnungsweite der Klüfte, noch Durchlässigkeitsbeiwerte. Er gibt jedoch Hinweise auf das Schluckvermögen des Gebirges.⁵⁰

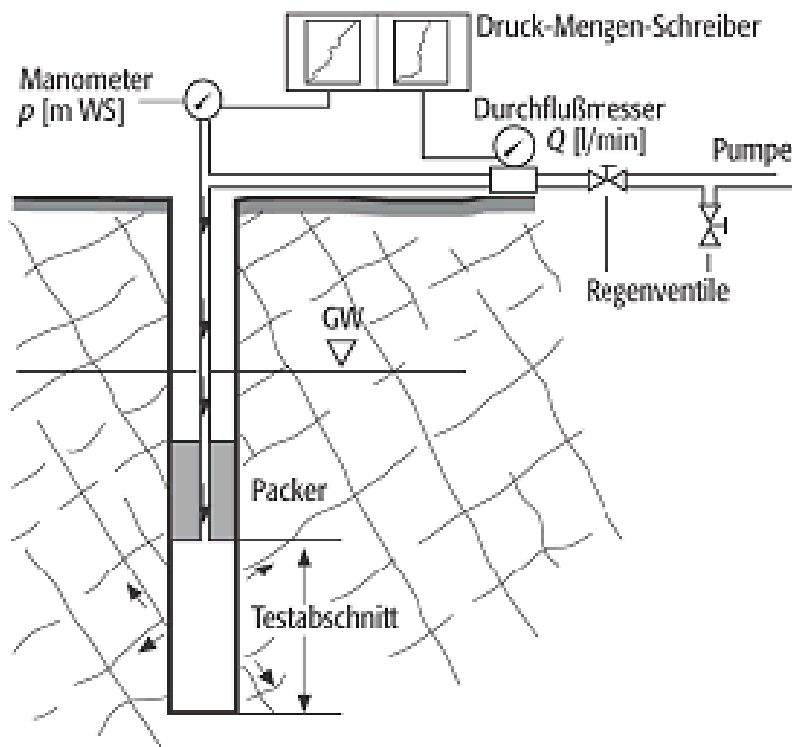


Abb. 3.1: Lugeon-Test mit Einfachpacker⁵¹

Die Durchführung von WD-Testen umfasst die Bestimmung von einem Versuchsfeld nach Lage und Größe, das später auch für Probeinjektion gebraucht werden kann. Grundsätzlich funktioniert der Versuch folgendermaßen: in einem Bohrloch mit Durchmesser 50-100 mm wird ein Einfach- oder Doppelpacker positioniert und das Wasser wird unter verschiedenen Druckstufen eingepresst. Die Druckstufen werden so lange gehalten bis zum Erreichung einer konstanten Wassermenge pro Zeiteinheit. Übliche Druckstufen sind: 0–0,2–0,5–0,8–1,0–0,8–0,5–0,2–0 MN/m². Dieser Schritt wird für verschiedene Tiefenabschnitte des Bohrlochs wiederholt. Eine Auswertung der Ergebnisse von WD-Testen ist über p-Q Diagramme möglich. Sie stellen graphisch die Wasseraufnahme in den stationären Strömungsphasen der einzelnen Druckstufen dar (Abb.4.2).

⁵⁰ Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 56-61

⁵¹ Quelle: <http://www.geodz.com/deu/d/Wasserdruck-Test>

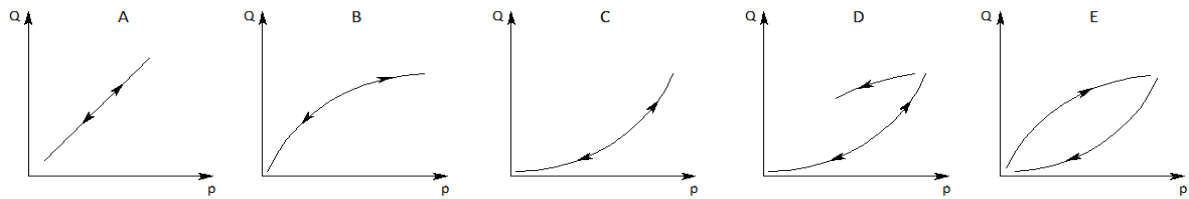


Abb. 3.2: Grundformen der Druckmengendiagramme von WD-Testen⁵²

Basierend auf Untersuchungen von *Klopp*, *Schimmer* und *Rißler* beschreibt *Kutzner* den Sinn der meisten Diagrammformen, wie folgt:

- Form *A*: Laminares Fließen, gleiche Aufnahmevermögen bei auf- und absteigenden Drücken.
- Form *B*: Turbulentes Fließen, das Reibungsverluste und als Folge unproportionales Aufnahmevermögen bei hohen Drücke verursacht. In Kluftweiten von 0,13 bis 0,4 mm findet der Übergang von laminares zu turbulentem Fließen statt.
- Form *C*: Elastische Gebirgsverformung: die Verformung zeigt sich Änderung des Aufnahmevermögens.
- Form *D*: Erosion von Kluffüllungen (erwünscht, wenn die Füllung geringere Dicht- oder Festeigenschaften als das Injektionsmittel besitzt) oder Aureißen des Gebirges (unerwünscht). Beide Fälle lassen sich nicht aus dem Diagramm unterscheiden, deswegen sind weitere Untersuchungen erforderlich.
- Form *E*: Verfüllung von Klüften oder Rückfließen mangels Vorflut.

Hauptnachteil des WD-Tests ist die Möglichkeit für Fehler bei der Auswertung des Aufnahmevermögens. Die Adsorption in einer Bohrlochstrecke kann z.B. von nur einer weiten Kluft oder von sehr vielen engen Klüften bedingt werden und in beiden Fällen gleich sein, aber die Injizierfähigkeit dagegen ist ganz unterschiedlich.⁵³ Infolgedessen sind Probeninjektionen unter Verwendung von Injektionsmittel durchzuführen.

3.1.3 Probeinjektion

Als Begleitmaßnahme für die Wasserabpressversuche und zur Bewertung der vorläufig berechneten Parameter ist eine (oder mehrere) Probeinjektion zu empfehlen. Sie ist mit dem gewählten Injektionsmittel durchzuführen und liefert einerseits Informationen über die Zuverlässigkeit der durchgeführten WD-Tests, andererseits gibt sie Hinweise auf das

⁵² Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 64.

⁵³ Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 56.

Bohrverfahren, die Aufnahmemenge an Injektionsgut und erzielte Reichweiten. Allerdings muss klar sein, dass obwohl Probeinjektionen durchgeführt wurden, unvorhergesehenen Umstände entstehen können und eine rechtzeitige Anpassung erforderlich sein könnte.

3.1.4 Untersuchung und Prüfung von Injektionsmittel

Weitere wichtige Voraussetzungen für erfolgreiche Injektionsarbeit ist die Qualität des Injektionsmittels. Es hängt sowohl von den Charakteristiken der Ausgangsstoffen, als auch von den Eigenschaften der ganzen Mischung ab. In *ÖNORM B 4454* stehen die erforderlichen Prüfungen und die zu untersuchenden Eigenschaften, die hier in gekürzter Form dargestellt werden (Tab. 4.2).

Parameter	Methode	Richtlinie
Injektionsgut auf Zementbasis		
Viskosität Vliesvermögen	Rotationsviskosometer Marschtrichter Flow-Cone Eintauchprüfung	ÖNORM B 4750
Stabilität	Sedimentationsversuch im Schlammzylinder Absetzprüfung	ÖNORM B 4750
Dichte	Messglas Aräometer Pyknometer Dichtewaage	
Festigkeitsentwicklung	Nadelgerät einaxiale Drckprüfung	ÖNORM B 3310 ÖNORM B 4415
Injektionsgut auf Silikatbasis		
Viskosität Vließvermögen	Rotationsviskosometer Marschtrichter	
Dichte	Messglas Aräometer Pyknometer	
Festigkeitsentwicklung	Bestimmung der Gelier- und Kippzeit	ASTM D 4648

	Bestimmung der Scherfestigkeit mit Penetrometer und Flügelsonde	
Volumenbeständigkeit	Ermittlung des Synärsewassers	
Injektionsgut auf Kunststoffbasis		
Viskosität Vließvermögen	Rotationsviskosimeter	
Dichte	Messglas Pyknometer	
Festigkeitsentwicklung	Bestimmung der Kippzeit Bestimmung der Scherfestigkeit mit Penetrometer oder Flügelsonde einaxiale Druckprüfung	ASTM D 4648 ÖNORM EN ISO 527
Verformungsverhalten	Bruchdehnungsmessung Quellungsmessung	ÖNORM EN ISO 527

Tab. 3.2: Untersuchung der Injektionsmittel

3.1.5 Grundlagen und Ziele der Planung

Bei Injektionsarbeiten unterscheidet sich die Bedeutung des Begriffs *Planung* von seinem ingenieurbaulichen Sinn. Während die Planung eines Gebäudes die Erstellung der notwendigen Pläne, Statikberechnungen, die Festlegung der Abmessungen und Geometrie, der Lastannahmen der Fundamente usw. beinhaltet, sind bei den Injektionsmaßnahmen diese Parameter nicht so bedeutend, weil die Natur der Injektionsarbeiten eine Vorausplanung im Detail nicht erlaubt. Die Planung von Injektionsarbeiten umfasst im Wesentlichen die Anordnung (einschl. Tiefe und Winkel) und Anzahl von Bohrlöchern, die Spezifizierung der Injektionsmaterialien und die zu verwendenden Methoden und Maßnahmen bei der Ausführung. Ein Teil der Planung dieser Einflussgrößen kann als Schätzung betrachtet werden, weil eine genaue Vorhersage des erreichbaren Ergebnisses aufgrund der geologischen Unsicherheit und der Natur der Injektionstechnik nicht möglich ist. Es ist anzumerken, dass während der Ausführung fast immer eine Anpassung an die Baustellenbedingungen notwendig ist. Dieser Anpassungsbedarf muss bei der Planung, bzw. beim Abschluss des Bauvertrages berücksichtigt werden.

3.2 Geräte

Grundsätzlich sind bei der Injektionsarbeiten zwei technologische Prozesse zu unterscheiden: Herstellung des Bohrlochs und Herstellung des Einpresskörpers. Die Herstellung des Bohrlochs beruht auf Rotations- oder Schlagwirkung eines Gestänges, das mit der Bohrkronen endet.

3.2.1 Bohrsysteme und Bohrwerkzeug

Für die Herstellung von Bohrlöchern stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, je nachdem ob es um Locker- oder Festgestein geht und was für Bohrlochtlängen erzielt werden müssen. Während der Bohrung kann auch eine zusätzliche Spülung ausgeführt werden, die zur Auflockerung, Kühlung oder bei Vorhandensein von Zement oder Bentonit als auch Wandstützung bei instabilen Bohrlöchern dienen kann.

Die Bohrgutlösung ist durch Drehen, Schlagen oder gleichzeitiges Drehen und Schlagen gewährleistet. Das Drehmoment und die Schlagkraft werden von der Bohrmaschine über das Gestänge auf das Werkzeug übertragen.⁵⁴ Das gelöste Gut wird entweder durch eine Spülung herausgespült oder als Kern entnommen. Die meistverbreitete Bohrsysteme sind:

3.2.1.1 Rotationskernbohrung

Bei Injektionsarbeiten kommt die Kernbohrung bei der geologischen Erkundung, als Kontrolle während und nach dem Abschluss der Arbeiten oder zur Gewinnung von Proben aus dem Injektionskörper zum Einsatz.⁵⁵ Dazu wird ein Kernrohr mit einer Ringbohrkronen verschraubt und um die eigene Achse über ein Gestänge in den Boden gedreht (Abb. 4.3). Der auf diese Weise erbohrte Kern gleitet in das Kernrohr. Um eine brauchbare Bodenprobe zu erhalten sind bei der Kernbohrtechnik eine Reihe von Parameter wie der Anpressdruck auf die Bohrkronen, ihre Drehgeschwindigkeit, Spülung und etc. zu beachten.⁵⁶ Daher müssen sie unabhängig regelbar sein. Die Spülung kann die Bodenprobe wesentlich beschädigen. Die Lösung dieses Problems ist die Verwendung von Mehrfachkernrohre (Doppel- oder Dreifachkernrohr).⁵⁷

⁵⁴ Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 157.

⁵⁵ Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 185.

⁵⁶ Vgl. Skriptum Bohrtechnik 2013, TU Wien, S. 23.

⁵⁷ Siehe Punkt 4.2.1.7

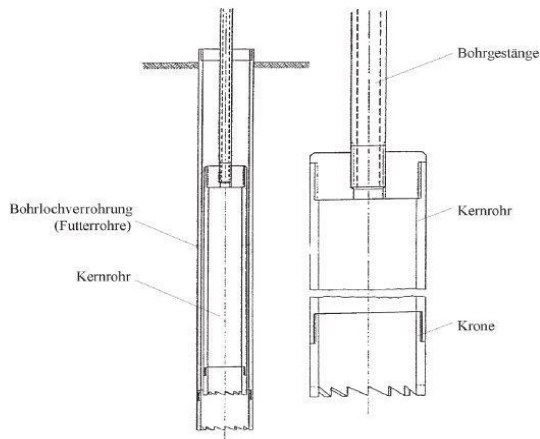


Abb. 3.3: Rotationskernbohrung mit Doppelkernrohr⁵⁸

Die Rotationskernbohrung findet seine Anwendung sowohl bei Fest- als auch bei Lockergestein, und ist die einzige Möglichkeit zur Gewinnung ungestörter Felskernproben. Während die Kernbohrung im Festgestein nur durch das Vorhandensein von Spülwasser möglich ist, ist das Spülwasser bei dem Lockergestein, wegen der Gefahr von Ausspülung der Feinteile, unerwünscht oder zumindest muss ein Mehrfachkernrohr verwendet werden.

3.2.1.2 Rammkernbohrung

Zur Gewinnung von Bodenproben in bindigen, schluffigen Tonschichten steht dieses Bohrsystem zur Verfügung. Mittels eines Fallgewichts (300-500 kg) oder hydraulisch über einen luftbetriebenen Hammer wird ein unten offenes Kernrohr schlagend in den Boden eingetrieben.⁵⁹ Die Futter- und Kernrohre müssen größere Wandstärken aufweisen als beim Rotationskernbohrverfahren, weil die Beanspruchung des Rohres durch den Rammvorgang größer ist. Die Bohrdurchmesser liegen zwischen 100 und 300 mm und es kann eine Tiefe von bis zu 40 m erzielt werden.⁶⁰

⁵⁸ Vgl. Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S.13.

⁵⁹ Vgl. Skriptum Bohrtechnik 2013, TU Wien, S. 31.

⁶⁰ Vgl. Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S.12.



Abb. 3.4: Rammkernbohrung⁶¹

3.2.1.3 Rollenmeißelbohrung

Diese Technik, auch Rotary-Bohrverfahren genannt, wurde für sehr große Tiefen (> 1.000 m) als Erkundungsbohrung für Erdöl und Gas entwickelt. In Verbindung mit geeigneter Spültechnik kann sie auch in nicht standfesten Böden in geringeren Tiefen wirtschaftlich angewendet werden.⁶² Das zerkleinerte Gestein wird über eine durch das Bohrgestänge (einem verschraubbaren Rohrstrang) zugeführte und am Meißel austretende Spülflüssigkeit - Wasser mit Ton oder Barytmehl - kontinuierlich entfernt und gelangt im Ringraum zwischen Bohrloch und Bohrgestänge an die Erdoberfläche (Abb. 4.5).⁶³ Als Bohrkronen dient ein Rollenmeißel (Abb. 4.6), der mit hohem Anpressdruck rotierend in den Boden gedrückt wird. Der Rollenmeißel besteht üblicherweise aus drei gegeneinander winkelig angeordnete, gezähnte Kegelrollen. Wenn der Bohrmeißel in Drehung versetzt wird, rollen die Kegelrollen auf der Bohrlochsohle ab und zerkleinern dabei das zu durchbohrende Gestein.

⁶¹ Quelle: http://www.geocontrol.ch/resources/Kuesn02_g.jpg

⁶² Vgl. Skriptum Bohrtechnik 2013, TU Wien, S. 27.

⁶³ Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Tiefbohrung>

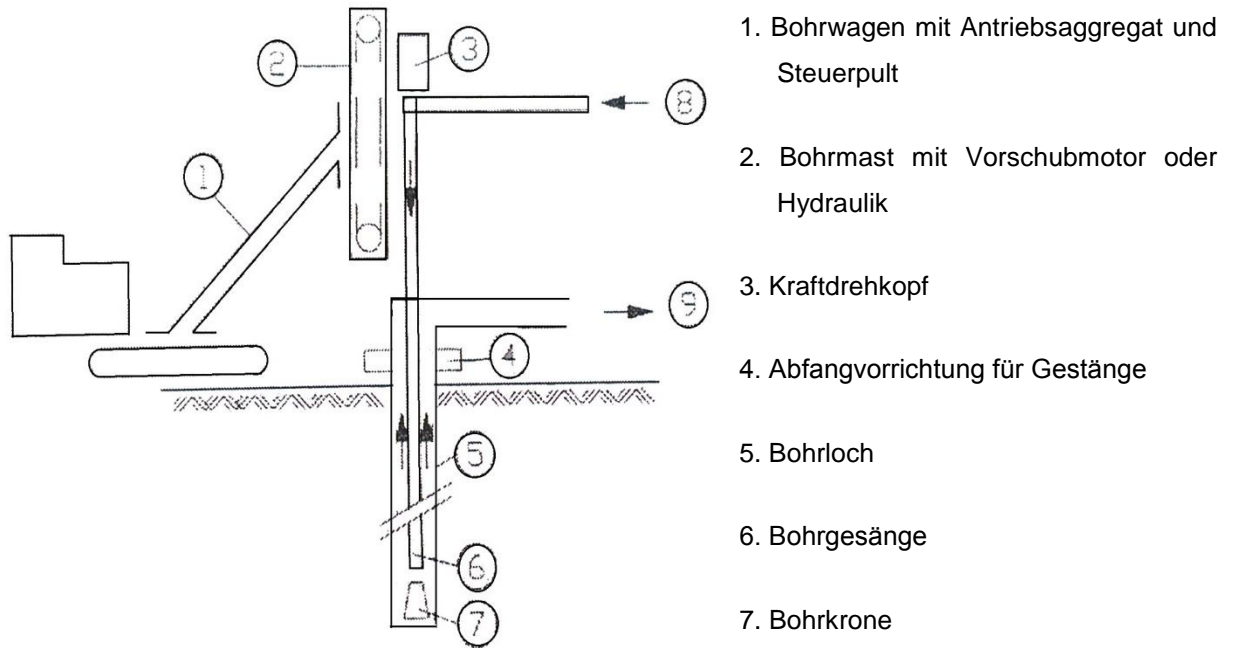


Abb. 3.5: Schema des Drehbohrverfahrens⁶⁴



Abb. 3.6: Rollenmeißelarten⁶⁵

⁶⁴ Quelle: Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 160.

⁶⁵ Quelle: <http://rockmax.de/produkte/rollenmeissel.html>

3.2.1.4 Schneckenbohrung

Sowohl die Kernbohrung und Rollenmeißelbohrung, als auch die Schneckenbohrung zählen zu den Drehbohrungsverfahren, wobei Rollenmeißel- und Schneckenbohrung zu der Vollbohrung gehören. Bei der Schneckenbohrung wird eine Endlos- oder Hohlbohrschnecke in den Boden geschraubt und dabei das Bohrgut ohne Spülfluß kontinuierlich ausgetragen. Am Ende der Schnecke können verschiedene Bohrkronen montiert werden, je nach vorliegenden Geologie.

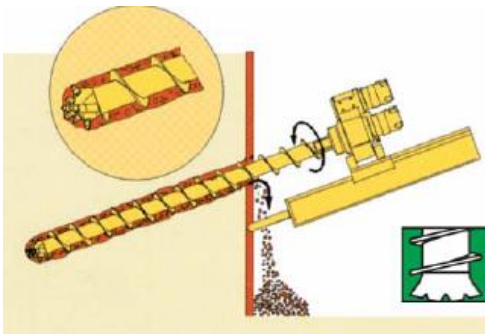


Abb. 3.7: Drehbohren mit Bohrschnecke⁶⁶

3.2.1.5 Hammerbohrung

Die Herstellung des Bohrlochs bei der Hammerbohrung wird durch eine Kombination aus Hammerschlägen mit gleichzeitigem Drehen. Der Hammer befindet sich Übertage (Tophammer) oder im Bohrloch (Im-Loch-Hammer) und wird hydraulisch oder pneumatisch betrieben (Abb. 4.8). Meistens kommt dieses Verfahren in Festgesteinen zum Einsatz, bei Lockergestein ist immer eine Verrohrung notwendig und deshalb ist die Methode weniger geeignet.

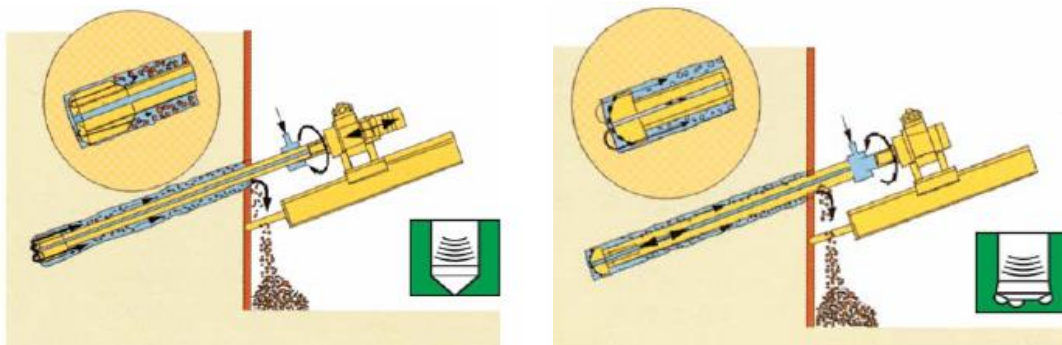


Abb. 3.8: Dreeschlagbohren mit Hammer Übertage und Im-Loch-Hammer⁶⁷

⁶⁶ Quelle: http://www.durequipment.com/uploads/3/3/7/0/3370812/kr_802-2.pdf

3.2.1.6 Bohrspülung

Durch die Bohrspülung können folgenden Aufgaben gelöst werden:

- Auflockerung des Grunds
- Abtransport des gelösten Materials
- Abkühlung des Bohrwerkzeugs
- Stabilisation des Bohrlochs
- Kompensation erhöhter Gebirgsdrücke

Zu unterscheiden ist zwischen direkter und indirekter Spülung. Bei der direkter strömt das Spülmittel durch das Bohrgestänge nach unten, tritt durch die Spülschlitze der Bohrkronen in das Bohrloch und steigt nach oben im Ringraum zwischen dem Bohrgestänge und der Bohrlochwand. Bei der indirekten Spülung wird das Spülmittel im Ringraum nach unten gepumpt und fließt im Bohrgestänge zurück.⁶⁸

Als Spülmittel werden Wasser, Luft, Wasserluftgemische und Suspensionen mit Bentonit oder Zement verwendet. Wichtiger Parameter ist die Spülgeschwindigkeit, weil sie die gelösten Teilchen nach oben transportieren können muss, d.h. sie muss größer als die Absinkgeschwindigkeit sein. Die erreichbare Spülgeschwindigkeit hängt von der Leistung der Spülpumpe oder des Kompressors und vom Querschnitt des Ringraums zwischen Gestänge und Bohrloch ab.⁶⁹

3.2.1.7 Bohrausrüstung

- Bohrkronen

Die Bohrkronen befinden sich am unteren Ende des Gestänges und wird aufgeschraubt oder aufgesteckt. Die Wahl der Bohrkronen hängt von dem Bohrverfahren und der Festigkeit des Bodens ab. Für harten Fels werden Diamantbohrkronen empfohlen und im weichen Fels und Lockergestein Hartmetallkronen. Die Lebensdauer beträgt zwischen 5 und 50 Bohrmeter bei Diamantkronen 30 bis 300 m für weiches Festgestein und Lockergestein und ist von folgenden Faktoren abhängig:⁷⁰

- Gesteinshärte

⁶⁷ Quelle: http://www.durequipment.com/uploads/3/3/7/0/3370812/kr_802-2.pdf

⁶⁸ Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 169.

⁶⁹ Ebd. S. 171.

⁷⁰ Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 180.

- Werkzeughärte
- Bohrandruck
- Drehgeschwindigkeit
- Schlagkraft
- Spülgeschwindigkeit
- Zustand der Bohrmaschine und der Ausrüstung



Abb. 3.9: Bohrkronentypen⁷¹

- Kernrohr

Bei der Kerngewinnung sind insgesamt vier Methoden zu unterscheiden: Einfach-, Doppel-, Dreifach- und Seil-Kernrohr-Systeme.

Die Einfachkernrohre bestehen aus einem Kernrohrkopf, der das Gestänge mit dem Rohr verbindet und die Spülung in das Rohr leitet, Kernrohr zum Aufnehmen des Kerns und Räumer mit Bohrkernfänger zur Verhinderung des Zurückfallen des Bohrkerns. Beim Einfachkernrohr ist die Bodenprobe im direkten Kontakt mit dem rotierenden Rohr und der Spülung, was als ein negativer Effekt beurteilt werden kann. In weichen Formationen ist auch eine Trockenbohrung möglich.

Das Doppelkernrohr besteht aus zwei dünnwandigen Rohren: einem Außen- und einem Innenrohr, die mittels Kugellager, das die Drehung des Innenrohrs verhindert, am oberen Ende verbunden sind. Am unteren Ende des Außenrohrs befinden sich die Räumer und die Bohrkronen. Am unteren Ende des Innenrohrs befinden sich der Kernfangring und die Kernfanghülse. Die Bohrspülung wird zwischen Außen- und Innenrohr geleitet, wobei der Kontakt Bohrspülung- Bohrkern nur im Bereich der Bohrkronen stattfindet. Die auf diese Weise gewonnenen Kernproben werden besser geschont, besonders wenn es um gestörte und weiche Formationen geht.

⁷¹ Quelle: <http://www.atlascopco.at>

Eine weitere Form des Kernrohrs ist das Dreifachkernrohr. Dabei wird der Bohrkern anhand einer voreilenden Metall- oder Kunststoffhülse im Innenrohr ohne Kontakt mit der Spülung aufgenommen.

Bei dem Seilkernbohren geht es um ein Doppelkernrohr, wessen Innenrohr schnell wechselbar ist.

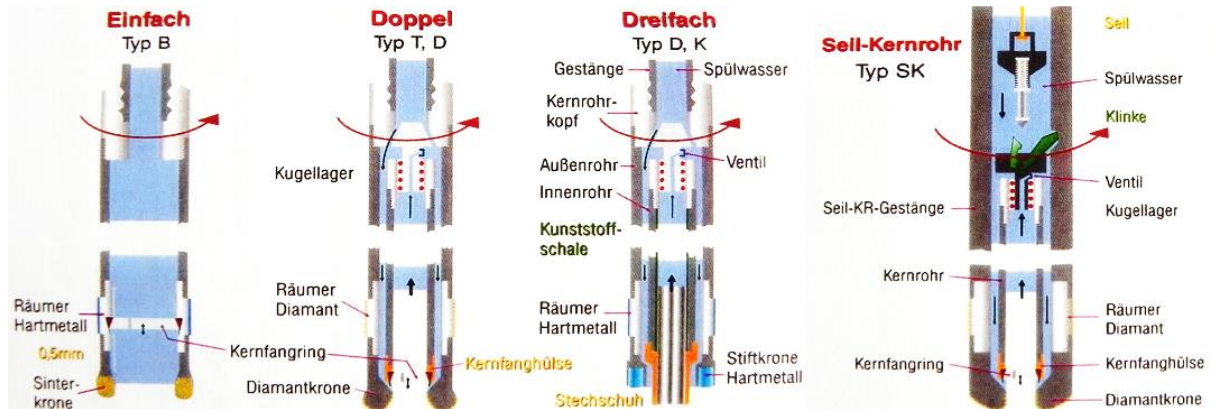


Abb. 3.10: Kernbohrsysteme⁷²

- Bohrhämmer

Die Bohrlochhämmer teilen sich sowohl in Außen-Hammer und Im-Loch-Hammer, als auch in solche mit Luft- oder Hydraulikantrieb.

- Gestänge und Futterrohr

Das Bohrgestänge dient dazu, den Andruck und das Drehmoment vom Drehkopf auf die Bohrkronen zu übertragen. Daneben sind auch folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Förderung der Bohrspülung zur Bohrlochsohle bei direkter Spülung
- Abtransport des Bohrkleins

Zur Gestängeausstattung gehören:⁷³

- Bohrgestänge mit Steckverbindung: Stahlrohr mit vorgeschweißter Sechskantsteckverbindung und Sicherheitsstift geeignet für Trockenbohrverfahren.
- Bohrgestänge mit Schraubverbindung: verschiedene Varianten können hergestellt werden um eine Anpassung zu erreichen, je nachdem, ob eine Spülung und was für Spülung vorhanden ist. Auch bei Imlochhammersystemen kommt die Schraubverbindung der Gestänge in Betracht.

⁷² Quelle: Skriptum Bohrtechnik 2013, TU Wien, S. 41.

⁷³ Vgl. Buja H.-Otto, Handbuch der Baugrunderkennung, 2009, S. 298.

-
- Kellybohrgestänge: teleskopierbare Bohrstange, meistens für Bohrpfähle verwendet, bei der Bohrarbeiten für Injektionen ist sie nicht von Bedeutung
 - Schwerstangen: bei Tiefenbohrungen werden dickwandige Stahlrohre verwendet um ein Ausknicken des Gestänges mittels Andruck zu vermeiden
 - Stabilisatoren: sie werden im unteren Teil des Bohrstranges vor der Schwerstange (von oben gesehen) angeordnet und dienen dazu das untere Teil des Bohrstranges im Bohrloch zu zentrieren.
 - Stoßdämpfer: sie werden zur Minderung der Längsschwingungen unmittelbar über dem Bohrwerkzeug in den Bohrstrang eingebaut, wobei die Stärke dieser Schwingungen unter anderem von der Gesteinshärte und dem Werkzeugtyp abhängig ist.

Bei Lockergestein oder brüchigen Festgestein, wenn die Zement-Bentonit Suspensionen nicht ausreichend zur Stabilisierung der Bohrlochwände sind, werden Futterrohre verwendet. Das sind glatte Stahlrohre, wobei das letzte Rohr mit einer Schneid Schuhkrone endet. Folgende Rohrverbindungssysteme sind möglich:

- Schweißverbindung
- Steckverbindung
- Schraubverbindung
- Schnellverschlussverbindung

3.2.2 Geräte zum Einbringen des Injektionsgut

Nach den Bohrarbeiten folgt der echte Teil der Injektionsarbeiten. Die Injektionsausrüstung besteht aus Geräte zur Aufbereitung und Geräte zum Einbringen des Injektionsguts, also wird eine Misch- und Einpressstation benötigt, die bei kleinen Förderweiten vereinigt werden können.

In der Mischstation wird das Injektionsgut vorbereitet: seine Komponenten werden dosiert, gemischt und das fertige Injektionsmittel wird zu der Einpressanlage gepumpt. Diese Prozesse werden durch den Charakter des Injektionsmittels bestimmt, wobei die die richtige Dosierung, die Mischzeiten, die Verweildauer und die Fließ- und Erhärtungseigenschaften zu beachten sind.

Manche Zusatzstoffe (Flugasche, Feinsand) und Zusatzmittel (Verzögerer, Beschleuniger) müssen unmittelbar vor dem Einpressen hinzugefügt werden, was auch einen Mischer an der Einpressstation verlangt. Um eine gleichmäßige Förderung von Injektionsgut zum

Injektionsloch zu gewährleisten, wird ein Vorratsbehälter mit Rührwerk benötigt. Das Hauptelement der Einpresstation ist die Injektionspumpe, die das Einpressen ermöglicht. Der Durchflussmesser und der Druckgeber befinden sich vor dem Packer und messen die pro Sekunde verpresste Fördermenge und den durch die Injektionspumpe aufgebrauchten Injektionsdruck.

Eine Optimierung der Rüstzeit und des Platzbedarfs ist durch Verwendung von kombinierten Misch- und Injektionsanlagen mit 2 bis 8 Pumpen pro Einheit eingesetzt möglich. Die modernen Pumpen sind in kompakter schallisolierter Bauweise gebaut, was die Lärmemissionen verringert und die strengen innerstädtischen Vorgaben von 40 bis 50 dBA erfüllt.⁷⁴

Im Folgenden werden die Hauptkomponente der beiden Stationen weiter erläutert.

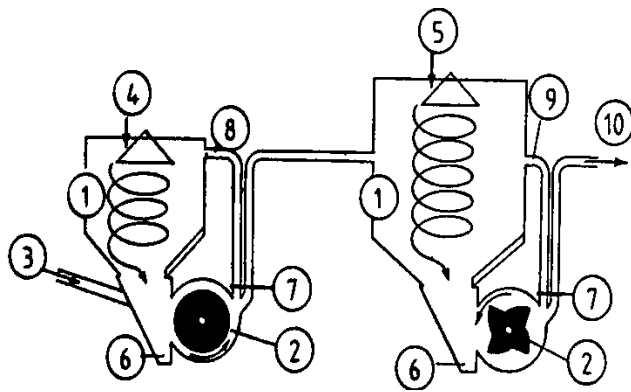
3.2.2.1 Mischer und Rührwerke

Um die erwünschte Flies- und Erstarrungseigenschaften zu erzielen, müssen die einzelnen Komponenten des Injektionsmittels gut miteinander vermischt werden. Bei den Zementsuspensionen bedeutet das, dass die Oberfläche aller Feststoffpartikel mit Wasser benetzt werden muss. Die zweite Hauptaufgabe der Mischer ist die Verdrängung von Luftblasen aus der Suspension.

Für Zement, Feinstbindemittel, Bentonit und weitere Zusätze wird der Kolloidalmischer (Turbomischer) verwendet. Durch sehr hohe Geschwindigkeit einer Wirbelradscheibe (etwa 1.200 U/min) werden die Feststoffpartikel großen Scherkräften und sehr großen Turbulenz ausgesetzt, wodurch die Partikel voneinander getrennt und individuell benetzt werden. Für unterschiedliche Feststoffe wie Zement, Feinzement, Sand und Bentonit, können spezielle Wirbelradscheiben verwendet werden. Bei einigen Suspensionen wird z. B. für das Beimischen von Sand ein zusätzlicher Mischer benötigt (Abb. 4.11). Die Verweilzeit der Stoffe im Mischer bis zu fertigen Aufbereitung beträgt nur etwa 2 bis 4 Minuten für Zementsuspensionen und 4 bis 6 Minuten für Bentonitsuspensionen.⁷⁵

⁷⁴ Vgl. Hornich W., Grundbau-Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren, S. 185.

⁷⁵ Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 218.



1. Mischbehälter
2. Wirbelradscheiben
3. Wasserzugabe
4. Zementzugabe
5. Sandzugabe
6. Sumpfe für grobe Bestandteile
7. Zweiwegventile
8. Kreislauf 1, Zementsuspension
9. Kreislauf 2, Mörtel
10. Ausgang zur Verpresspumpe

Abb. 3.11: Wirkschema von Kolloidalmischer⁷⁶

Zwischen dem Mischer und der Injektionspumpe ist ein Vorratsbehälter mit Rührwerk erforderlich, der das Injektionsgut in Bewegung hält um eine Sedimentation der Suspension zu verhindern (Abb. 4.12).

Bei Zwei-Komponenten Kunstharzinjektionen wird das Mischen durch Statikmischer vor dem Einpressen erzielt.



Abb. 3.12: Kompakte Injektionsanlage⁷⁷

⁷⁶ Quelle: Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 218.

⁷⁷ Quelle: <http://www.haeny.com/index.php?id=46&L=0#84>

3.2.2.2 Injektionspumpen

Das wichtigste bei den Injektionspumpen ist, dass der Druck und die Fördermenge unabhängig voneinander gesteuert werden müssen. Dies heißt, dass die Pumpe in der Lage sein muss, bei konstanten Drücken sowohl große Mengen als auch kleinste Mengen zu pumpen. Vorgegebene Drücke dürfen nicht überschritten werden.⁷⁸ Durch Steuerung über Hydraulikölmenge bei den Hydraulikaggregaten kann die Steuerung über die Injektionsparameter Druck und Durchflussrate gleichzeitig in sehr feinen Abstufungen und ohne manuelle Nachregelung erfolgen, damit ist auch Injizieren nach GIN- Kriterium möglich.

Die Pumpausrüstung kann in Form von Injektions-Pumpen, Injektions-Container oder Pump-Stationen ausgestattet werden (Abb. 4.13). Die Mehrheit der Injektionspumpen sind Kolbenpumpen mit elektro-hydraulischem Antrieb. Bei der Injektion von Zwei-Komponenten-Kunstharze muss auch die Pumpe eine Zwei-Komponenten sein (Abb. 4.14).



Abb. 3.13: Injektions-Pumpen, Injektions-Container und Pump-Stationen⁷⁹



Abb. 3.14: Zwei-Komponenten-Pumpe⁸⁰

⁷⁸ Vgl. Maybaum G., Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund und Spezialtiefbau, 2011, S. 251.

⁷⁹ Quelle: Firmenprospekt der Firma STS Scheltzke

3.2.2.3 Packer

Der Transport des fertigen Injektionsgutes zum Packer erfolgt über Injektionsschläuche, die meistens auf einer Trommel aufgewickelt sind. Bei der Wahl des Schlauchs sind der höchste aufzunehmende Druck und möglichst minimale Druckverluste von Bedeutung.

Packer dienen zur Isolierung von Bohrlochabschnitte im Bohrloch und dadurch tritt das Injektionsgut in die gewünschte Richtung aus. Zu unterscheiden sind Einfach- und Doppelpacker, je nach der Anzahl des Dichtungselements. Bei Einfachpacker ist die Injektion des Bohrlochs nur von unten nach oben möglich, weil der untere Abschluss des Bohrlochabschnitts die Bohrlochsohle ist. Das Dichtungselement wird hydraulisch oder pneumatisch expandiert anhand einer Handpumpe, die durch einen mit Stahlgewebe verstärkten Gummischlauch das Expansionsmittel pumpt. Die Doppelpacker (Abb. 4.15) haben zwei Dichtungselemente, die den Injektionsabschnitt begrenzen. Dazwischen tritt das Injektionsgut entweder direkt oder durch das perforierte Manschettenrohr aus.

Manschettenrohre, auch Ventilrohre genannt, sind Injektionsrohre aus Hart-PVC oder Stahl, die in einem bestimmten Abstand perforiert sind. Die Perforation ist mit einer Gummimanschette überdeckt, die sich unter dem Injektionsdruck ventilartig aufbläht und das Injektionsgut durch die Perforation (standardmäßiger Abstand: 33 cm) in die Umgebung austreten lässt. Wenn das Manschettenrohr nach der Injektion ausgespült wird, kann jede Gummimanschette erneut beaufschlagt werden. Das ist besonders vorteilhaft, wenn unterschiedliche Verpressmittel nacheinander eingepresst werden müssen oder wenn schichtweise unterschiedliche Mittel eingepresst werden sollen. Der Ringraum zwischen Bohrlochwand und Manschettenrohr wird von unten nach oben mit einer Mantelmischung zur Stabilisierung des Bohrlochs und Zentrierung des Manschettenrohrs gefüllt. Nach dem Abbinden der Mantelmischung werden die einzelnen Gummimanschetten mit einem Doppelpacker angefahren. Mit Wasser oder auch bereits mit der Injektionssuspension wird der Ringraum im Bereich der Gummimanschetten aufgebrochen. Danach beginnt der eigentliche Injektionsvorgang, bei dem stufenweise jede Gummimanschette mit der Injektionssuspension verpresst wird. Nach Abschluss der Injektion wird das Manschettenrohr saubergespült. Gegebenfalls kann zu einem späteren Zeitpunkt nochmals nachverpresst werden. Ein Rückfluss von Injektionsgut ins Manschettenrohr und Übertritte von einem in

⁸⁰ Quelle: <http://de.vorek.cz/sortiment/verfestigungs--und-stabilisierungs-injektionen/injektions-pumpen-1/injektions-pumpe-avd-2/>

Arbeit befindlichen Bohrloch zu benachbarten, unverpressten Bohrlöchern bzw. Manschettenrohren sind nicht möglich.⁸¹

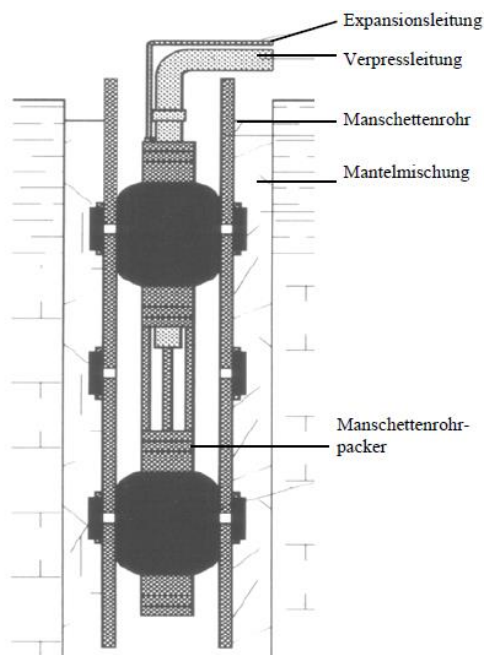


Abb. 3.15: Schema eines Doppelpackers mit Manschettenrohr⁸²

3.3 Vorgehensweise

Wie schon erwähnt wurde, umfasst der Injektionsprozess nicht nur die reinen Injektionsarbeiten, sondern auch Begleitmaßnahmen wie Erkundung, Bohren, Spülen, Injektionsgutvorbereitung etc. Standardmäßig gilt folgende Reihenfolge für die Durchführung von Injektionsarbeiten:

- Definition vom Injektionsbedarf und Zielsetzung
- Geologische Erkundung in Situ und im Labor, Interpretation der Ergebnisse
- Projekterstellung
- Bei großen Projekten unbedingt Probeinjektion durchführen
- Bohren
- Bohrlöcher reinigen durch Spülen mit einem Gemisch aus Wasser und Druckluft
- Packerherstellung und Injizieren

⁸¹ Firmenprospekt der Firma STS Scheltzke

⁸² Quelle: Firmenprospekt der Firma STS Scheltzke

- Nachträgliche Qualitätsprüfung

Ein Teil dieser Prozesse wurde bereits in den vorigen Kapiteln erklärt. In den folgenden Abschnitten werden einige Bemerkungen und Besonderheiten bei der Vorgehensweise im Fest- und Lockergestein erklärt.

3.3.1 Injektion im Festgestein

Bohren und Einpressen sind abwechselnde Prozesse. Normalerweise wird im Festgestein ein Injektionskörper nach folgendem Prinzip erreicht: auf der zu injizierender Fläche werden zuerst weniger Bohrlöcher erstellt, dann werden sie injiziert und danach bei Bedarf werden neue Löcher gebohrt und injiziert. Dieser Vorgangsvorteil durch die schrittweise Zunahme der Injektionslöcher wird eine optimale Erreichung des Injektionskörpers ohne Überschreitung des Materials durch Übertritte in benachbarten Löchern gewährleistet.

3.3.1.1 Injizieren „von oben nach unten“

Diese Methode ist für Formationen mit geringerer Standfestigkeit geeignet. Zuerst wird bis auf kleine Tiefe gebohrt, durch Packer wird das Injektionsmittel verpresst und dann wird auf die Erstarrung der injizierenden Strecke gewartet. Erst danach wird tiefer gebohrt, wobei die verpresste Bohrlochstrecke wieder aufgebohrt werden muss. Die Wartezeit hängt von dem Zwischenspiel zwischen der Gefahr von Auswaschung des noch nichts erstarrten Injektionsmittels durch die Bohrspülung und dem Kronenverschleißgrad bei erstarrter Injektion. Die nächste Position des Packers ist am unteren Ende der vorverpressten Strecke. Als Nachteil kommen hier die höheren Kosten, wegen des Aufbohrens zu tragen.

3.3.1.2 Injizieren „von unten nach oben“

Bei standfesten Formationen wird das Bohrloch bis zur Endtiefe gebohrt und dann von unten nach oben mittels Doppelpacker injiziert. Wichtig ist der richtige Zeitpunkt zum Lösen des Packers: einerseits muss der Packer solange expandiert gehalten werden bis das Injektionsmittel abgebunden hat ohne Gefahr für Zurückwanderung. Andererseits muss das Überschußwasser aus dem Injektionsmittel leicht austreten können.

3.3.1.3 Einpressen mehrerer Injektionsmittel

Es sind zwei unterschiedliche Fälle möglich:

- Injizieren mit Injektionsmittel gleicher Komponenten, aber verschiedener Rezeptur: meist Zementsuspensionen mit unterschiedlichem Wassergehalt. Der Grund dafür ist zuerst die weiten Klüfte mit grobem Injektionsmittel zu injizieren und dann die verbliebene enge Klüfte mit feinerer Suspension zu verpressen. Auch ist es möglich zuerst mit dickeren Injektionsmittel anzufangen um unerwünscht große Reichweiten zu verhindern.
- Einpressen unterschiedlicher Injektionsmittel: im Sonderfällen werden Zementsuspensionen und Chemikalien nacheinander eingepresst. Falls keine Ventilrohre verwendet wurden, sind für die Chemikalinjektionen neue Bohrlöcher erforderlich, was zur Verteuerung führt.

3.3.2 Injektion im Lockergestein

Injizieren im Lockergestein kann durch drei verschiedene Effekte erzielt werden: Bodenverdrängung, Porenverfüllung und Poren-, bzw. Bodenzerstörung, je nach dem Ziel der Injektion und den Eigenschaften des zu injizierenden Bodens.

3.3.2.1 Injektionen über offene Bohrgestänge

Bei stark durchlässigen nicht bindige Böden kann der Injektionsvorgang anhand der von unten offenen Bohrgestänge durchgeführt werden. Hierbei wird in der Regel von unten nach oben über das Bohr- oder Rammgestänge während des Ziehens das Injektionsgut eingepresst. Der Einpressdruck ist so zu begrenzen, dass ein Austreten der Suspension an der Geländeoberfläche vermieden wird bzw. der Verpressdruck reduziert wird, sofern dies auftritt.⁸³ So wird eine Verfestigung/Abdichtung ohne Bodenverdrängung erzielt.

3.3.2.2 Verdichtungsinjektion

Eine Porenverdrängung wird durch stufiges Einpressen von Injektionsmörtel erzielt. Es entstehen kugel- oder eiförmige übereinanderliegenden Injektionskörpern, die die so genannte Stabilisierungssäule, durch kontinuierliches Ziehen des Gestänges, formieren

⁸³ Vgl. Boley C.: Handbuch Geotechnik, 2012, S. 519.

(Abb. 4.16). Der umgebende Boden wird am Injektionsort lokal verdrängt und dabei verdichtet.

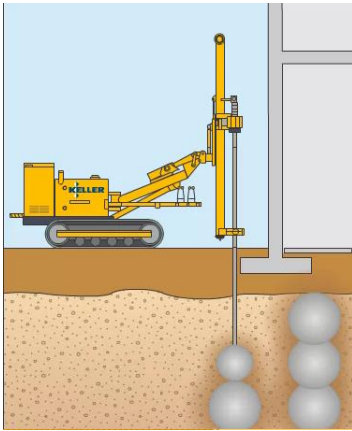


Abb. 3.16: Herstellung von STS-Säule bei Verdichtungsinjektion⁸⁴

3.3.2.3 Hebungsinjektion⁸⁵

Bei diesem Verfahren werden im Boden Fließwege (Fracs) geöffnet in die das Injektionsgut eindringt und erhärtet. Durch Wiederholung der Injektionsschritte kann eine kontrollierte Hebung erzielt werden. Für die Ausführung wird das Ventilrohrverfahren verwendet, wegen der Möglichkeit für mehrmalige Verpressung durch die Ventile. Durch das Beaufschlagen bestimmter Ventile können Gebäude gezielt gehoben werden.

3.4 Prüfung von Injektionsarbeiten

Die Prüfung der Injektionsarbeiten umfasst sowohl die Injektionsmittelprüfungen (Punkt 4.1.4), als auch Prüfungen während und nach der Herstellung des Injektionskörpers.

3.4.1 Prüfungen während der Herstellung

Die Registriergeräte, die zu der Injektionsausrüstung gehören, geben ständig Auskunft über die Injektionsgutmenge und die Einpressdrücke. Durch diese Daten können einige Schlussfolgerungen über den Zustand der injizierten Bereiche und daraus für den Erfolg der Injektionsarbeiten gemacht werden. Bei unerwarteten, d.h. nicht geplanten Nennwerten müssen rechtzeitig Maßnahmen getroffen werden.

⁸⁴ Quelle: <http://www.kellergrundbau.de/de/verdichtungsinjektion.html>

⁸⁵ Vgl. Boley C.: Handbuch Geotechnik, 2012, S. 507-508.

Zu den Prüfungen während der Herstellung zählen die geodätischen Vermessungen der Geländeoberfläche. Sie sollen aufzeigen, dass keine unerwünschten Verformungen des Baugrunds oder Gebäudehebungen stattfinden.⁸⁶ Außerdem dienen auch die visuellen Besichtigungen der Umgebung als Prüfung.

3.4.2 Prüfungen nach der Herstellung

Die Injektionsqualität nach der Herstellung muss durch visuelle Begutachtung, Laborversuche an Probestücken und in-situ-Untersuchungen am Injektionskörper nachgewiesen werden.

Der Verdichtungseffekt wird durch nachträgliche WD-Tests, überprüft, wobei die Ergebnisse mit den Ergebnisse von vorigen Testen vergleicht werden. Als Qualitätsmaßstab setzt der Bauherr eigene Kriterien im Sinne zulässiger Wasseraufnahme fest.⁸⁷ Für die Ausführung von Kontroll-WD-Tests werden neue Bohrlöcher gemacht, die danach wieder verpresst werden müssen. Bei der Erstellung der Kontrollbohrungen wird empfohlen, wenn möglich, eine Kerngewinnung durchzuführen. Somit kann der Kern später auch in Labor untersucht werden.

⁸⁶ Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 295.

⁸⁷ Vgl. Kutzner Ch.: Injektionen im Baugrund, 1991, S. 296.

4 Grundlagen der Injektionstechnik im Tunnelbau

Die bisherigen Abschnitte dienen als Basis für eine vertiefte Untersuchung der Injektionsarbeiten im Tunnelbau, ihrer Ziele und der Verfahren zur die Erreichung dieser Ziele. In nächsten Kapiteln werden die möglichen Anwendungen von Injektionen beschrieben mit Schwerpunkt auf spezifische Einzelfälle. Manche Besonderheiten des Tunnelbaus, die eine Beziehung zu den Injektionsarbeiten haben, werden dabei kurz erwähnt.

Ein Tunnel ist eine künstliche Durchfahrt, die Berge, Gewässer oder andere Hindernisse unterquert. Nach *DIN 1076* sind die Tunnel Bauwerke, die unterhalb der Erd- oder Wasseroberfläche, abgesehen von der Zu- und Ausfahrt, liegen und in geschlossener Bauweise hergestellt werden oder bei offener Bauweise länger als 80 m sind. Folglich wird dies als Kriterium für die Klassifizierung der Injektionsarbeiten nach der Bauweise (Untertagebau oder offene Bauweise) dienen.

Ein Hauptunterschied zwischen dem Tunnelbauwerk und anderen Ingenieurbauwerken ist, dass die ganze Tunnelkonstruktion einem starken Einfluss in Form von Gebirgs- und Bergwasserdruck auf das Bauwerk ausgesetzt ist. Die kontinuierliche Wechselwirkung zwischen Gebirge und Hohlraumbauwerk muss immer berücksichtigt werden. In allen Fällen bestimmt die Umgebung die notwendigen Maßnahmen zur Ausführung und die Betriebsbedingungen. Deswegen sind die Standortuntersuchungen besonders wichtig für die Beurteilung des Gebirges und somit für die ingenieurtechnischen Entscheidungen.

Selbstverständlich ist die Unterscheidung zwischen Fest- und Lockergestein, sowohl für die Bauweise und die Vortriebsmethode, als auch für die Injektionsarbeiten von Bedeutung. Ein Überblick für die Injektionsunterschiede zwischen beiden Medien wurde bereits in den Kapiteln 2 und 3 gegeben.

Durch die Komplexität des Tunnelbaus muss immer besonderes Augenmerk auf die einzelnen Bauprozesse und ihre Beziehungen zueinander gelegt werden. In diesem Sinne dürfen die Injektionsarbeiten nicht unabhängig von den anderen Tätigkeiten im Tunnelbau, wie z. B. Tunnelvortrieb, Sicherungsmaßnahmen, Auskleidung, Entwässerungsmaßnahmen usw. betrachtet werden. Sie finden ihre Anwendung neben oder zusätzlich zu den Maßnahmen der Hauptprozessen, die während des Baus eines Tunnels auftreten. Aus diesen Gründen wird ein kurzer Überblick über die Hauptarbeiten beim Tunnelaufbau gemacht, um den Stand der Injektionstechnik im Tunnelbau zu erläutern.

4.1 Ausbrucharten und Vortriebsmethoden

Grundsätzlich sind zwei Ausbrucharten zu unterscheiden: Vollausbuch und Teilausbuch des Querschnitts. Der Wahl hängt vorzugsweise von den ingenieurgeologischen Bedingungen, der Querschnittsgröße und der Vortriebsmethode ab.

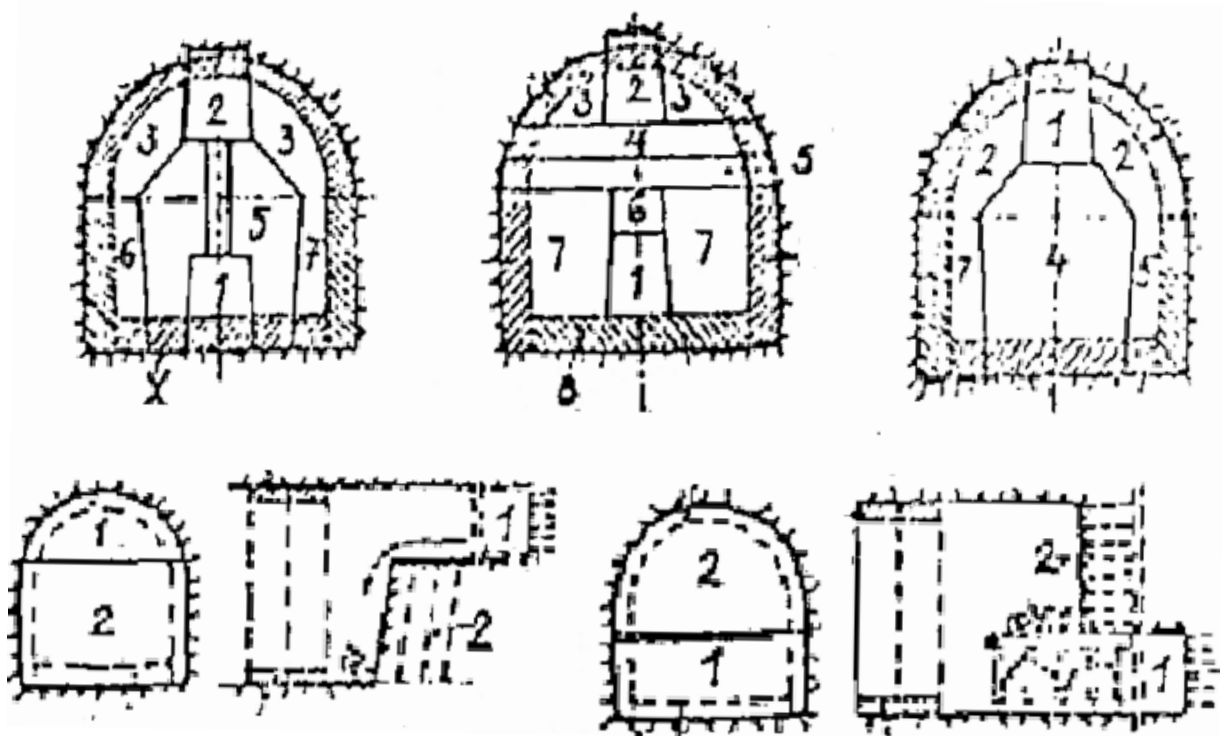


Abb. 4.1: Teilausbrucharten⁸⁸

Der Wahl der Vortriebsmethode ist von den geologischen Gegebenheiten, hydrologischen Verhältnissen, den Tunnelausmaß (Querschnitt, Länge, Gefälle) und den wirtschaftlichen Überlegungen abhängig. Folgende Möglichkeiten stehen zur Verfügung:

⁸⁸ Quelle: Georgiev L., Tunnelbau, 2004, S. 373.

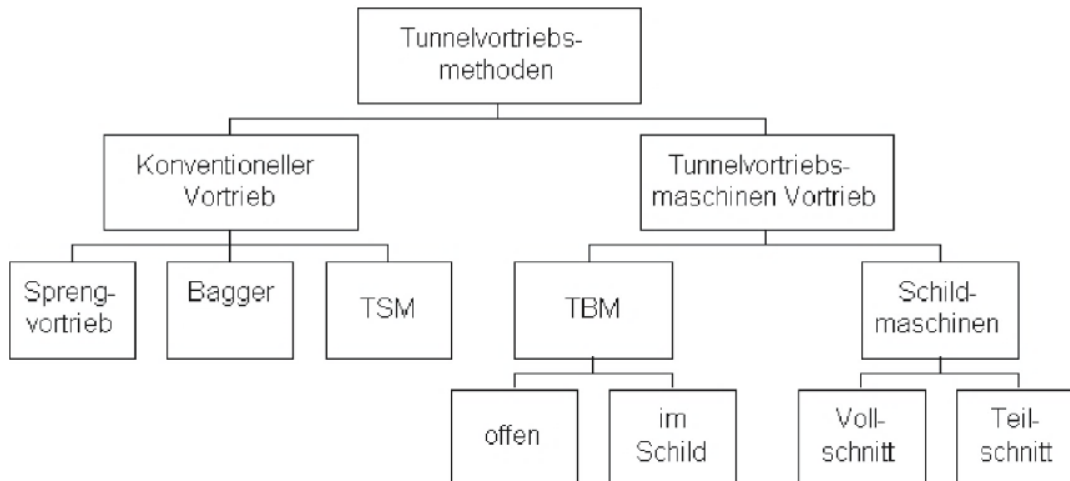


Abb. 4.2: Tunnelvortriebsmethoden⁸⁹

4.1.1 Konventioneller Vortrieb

Die einzelnen Arbeitsvorgänge des Lösens, Ladens und des Stützmitteleinbaues werden im Wesentlichen zeitlich nacheinander und mit Hilfe von Einzelgeräten ausgeführt. Der Ausbruch erfolgt durch:⁹⁰

- Sprengen: ein Arbeitszyklus besteht aus Bohren, Laden, Verdämmen, Sprengen, Lüften, Sichern, Aufladen und Abtransportieren
- Bagger: im Gebirge mit geringer Festigkeit und im Lockergestein werden Hydraulikbagger mit Tieflöffeln, Hydraulikhammer oder -meissel zum Ausbruch eingesetzt.
- Teilschnittmaschine: bei mittleren Gesteinsfestigkeiten (50-80 N/mm²) und geklüfteten Formationen kann diese Maschine sehr effektiv sein, wegen der Möglichkeit des gleichzeitigen Ausbruchs und Schutterns.

4.1.2 Maschineller Vortrieb

Im Unterschied zum konventionellen Vortrieb werden die einzelnen Arbeitsvorgänge hier gleichzeitig ausgeführt. Das Lösen erfolgt in der Regel durch einen mit Schneidwerkzeugen bestückten kreisförmigen Bohrkopf.⁹¹ Die Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) unterteilen sich in Tunnelbohrmaschinen (TBM) und Schildmaschinen (SM).

⁸⁹ Quelle: Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 67.

⁹⁰ Vgl. Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 133-135.

⁹¹ Vgl. Skriptum Bauverfahrenstechnik 2011, TU Wien, S. 149-150.

Tunnelbohrmaschinen sind für Felsgestein mit mittleren bis hohen Standzeit geeignet. Es sind TBM ohne und mit Schild zu unterscheiden. Die erste Art, auch als offene TBM oder Gripper- TBM bezeichnet, ist für standfesten und störfreies Gebirge geeignet. Durch hydraulisches Pressen der Abstützplatten (Gripper) wird die TBM positioniert und durch Vorschubzylinder wird eine Vorschubkraft erzeugt, die den Anpressdruck auf den Bohrkopf erschafft. Während des Vortriebs wird sofort die Sicherung ausgeführt. Bei der TBM mit Schild ist die ganze Maschine durch einen Schildmantel geschützt, was die Durchführung in nachbrüchigem bis gebrächem Gebirge erlaubt. Die Sicherung und der Ausbau erfolgen mittels Tübbing. Mit den Vorschubzylindern schiebt sich die TBM an den bereits eingebauten Tübbing vorwärts.⁹²

Zum Abbau von Lockergesteinsboden im oder außerhalb des Grundwassers sowie bei geringer Standzeit der Ortsbrust sind Schildmaschinen geeignet.

4.2 Sicherungsmaßnahmen

Wenn die Standzeit des Gebirges nicht ausreicht müssen Sicherungsmaßnahmen vorgenommen werden, um die Tragfähigkeit des Gebirges zu verbessern. Folgende Stutzmittel können zur Sicherung verwendet werden:⁹³

- Spritzbeton, Spritzbeton mit Bewehrungsnetzen, Stahlfaserspritzbeton
- Stahlbogen (TH - Profile etc.)
- Gitterträger
- Anker
- Verzugsbleche und Kanaldielen
- Spiesse
- Beton
- Bernoldbleche etc.

Bei bergmännisch aufgefahrenen Tunneln führte die technische Entwicklung mit der „Neuen Österreichischen Tunnelbauweise“ (NÖT) zu einer zweiseitigen Bauweise: Außenschale aus Spritzbeton, Innenschale aus Ortbeton. Bei dieser Bauweise wird der Spritzbeton zur

⁹² Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 387-388.

⁹³ Vgl. Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 157.

vorläufigen Sicherung des Hohlraums sofort nach dem Ausbruch direkt auf das Gebirge aufgebracht. Erforderlichenfalls werden die obengenannten Stützmittel eingesetzt.⁹⁴

4.3 Hohlraumauskleidung⁹⁵

Die Art und überhaupt die Notwendigkeit der Tunnelschale werden sowohl durch die geologischen, geotechnischen und hydrologischen Verhältnisse, als auch durch den Verwendungszweck des Tunnels bestimmt. Prinzipiell unterscheiden sich:

- einschalige Tunnelauskleidungen, die in Form von Spritzbetonschale (unbewehrt oder mit ein- und mehrlagiger Mattenbewehrung), Stahlfaserspritzbetonschale oder Tübbingauskleidung ausgeführt werden können. Die einschalige Tunnelauskleidung lässt sich als eine Umwandlung der temporären Sicherung in permanente Schale betrachten.
- zweischalige Tunnelauskleidung: zwei separate Schalen werden ausgeführt, die sich durch die statischen, konstruktiven und funktionalen Anforderungen unterscheiden. Meistens sind die beiden Schalen durch eine Regenschirmabdichtung, in Form von Kunststoffdichtungsbahnen getrennt. Die zweischalige Bauweise kann wie folgt ausgeführt werden:
 - Spritzbetonsicherungsschale, Isolierung und Ortbetonauskleidung, bewehrt oder unbewehrt
 - Tübbingsicherungsschale, Isolierung und Ortbetonauskleidung, bewehrt oder unbewehrt

⁹⁴ Vgl. Bonk M., Lufsky Bauwerksabdichtung, 7. Auflage, 2010, S. 329

⁹⁵ Vgl. Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 359-360.

5 Abdichtungsinjektionen im Tunnelbau

Das Bergwasser erschwert einerseits den Tunnelvortrieb, andererseits beeinflusst es die Dauerhaftigkeit des Bauwerks. Die Beherrschung und Kontrolle des Grundwassers reduzieren das Gefährdungspotential, sowohl während des Baus, als auch während der Betriebsdauer. Im Folgenden werden die verschiedenen Möglichkeiten zur Bergwasserbehandlung dargestellt, insbesondere die Lösungen, die die Injektionstechnik bietet.

5.1 Untertagbau

Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen wird die geschlossene Bauweise, besonders in Festgestein für die Ausführung eines Tunnels bevorzugt. Da eine trockene Untertagebaustelle sehr selten auftritt, kommen die Wasserbehandlung und -haltung immer in Betracht. Welche Entwässerungs- und Abdichtungsmaßnahmen durchgeführt werden müssen, hängt von verschiedenen Faktoren, z.B. hydrologische und geologische Verhältnisse, Größe des Wasserdrucks, Bauweise, Tunnelnutzung usw. Grundsätzlich sind zwei Abdichtungskonzepte zu unterscheiden:

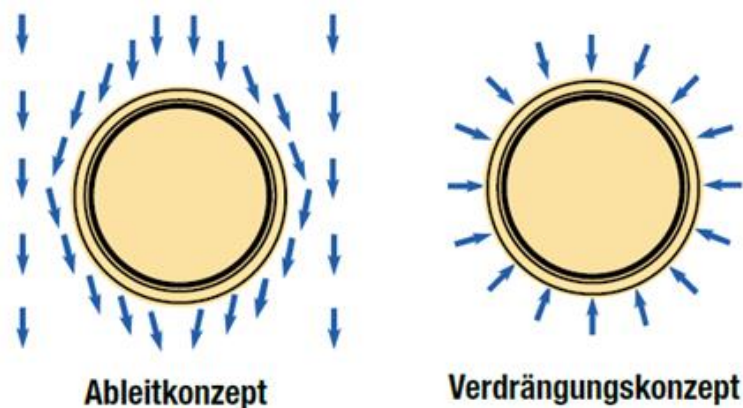


Abb. 5.1: Tunnelabdichtungskonzepte⁹⁶

Je nach welchem vorhandenem Konzept stehen verschiedene Wasserhaltungsmaßnahmen zur Verfügung (Abb. 6.2).

⁹⁶ Quelle: http://che.sika.com/dms/getdocument.get/be65678c-7003-3c12-848e-955e63207ca0/Abdichtungen_Tunnelbau.pdf

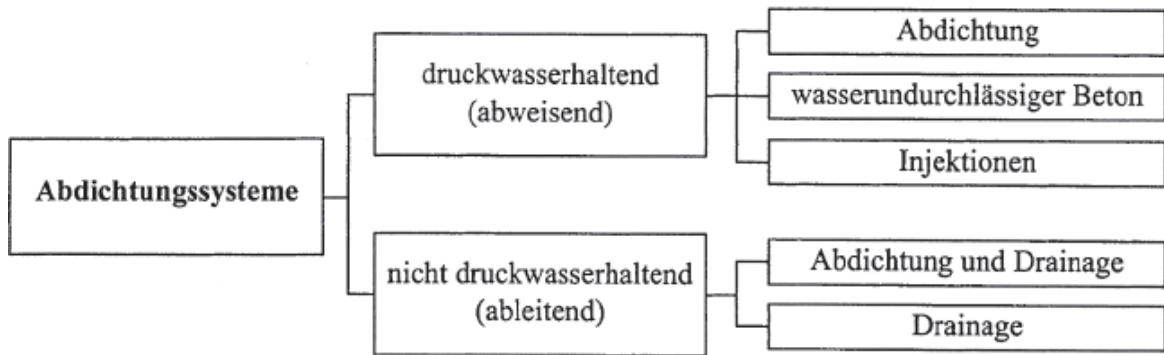


Abb. 5.2: Abdichtungssysteme und zusätzliche Maßnahmen⁹⁷

Die abdichtende Wirkung einer Tunnelauskleidung kann sowohl durch die wasserundurchlässige Ausführung des Betons (WU-Beton) als auch durch eine auf der Außenseite der Schale aufgetragene Hautabdichtung (Kunststoffdichtungsbahnen) erzielt werden. Die Kriterien für die Wahl des Abdichtungssystems sind in der folgenden Tabelle dargestellt.⁹⁸

Lage des Bauwerks zum GW- Spiegel	Querschnitts-ausbildung	Abdichtung gegen	KDB- Abdichtungs-geometrie	Abdicht-ungssystem	Fugenband
oberhalb	druckwasser-entlastet	Sickerwasser	Regenschirm	KDB	-
unterhalb	druckwasser-entlastet	Sickerwasser	Regenschirm	KDB	-
unterhalb	druckwasser-haltend	Druckwasser	-	WUB ⁹⁹	innenliegend
			rundum	KDB ¹⁰⁰	außenliegend

Tab. 5.1: Kriterien für die Wahl des Abdichtungssystems

Außenabdichtungen halten das Wasser und damit auch eventuelle chemische Angriffe von der Betonschale fern, sind jedoch bei Undichtigkeiten schwer zu sanieren im Unterschied zu

⁹⁷ Quelle: Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2013, S. 374.

⁹⁸ Vgl. Richtlinie Tunnelabdichtung, 2012, S. 8- 9.

⁹⁹ WUB: Wasserundurchlässige Beton

¹⁰⁰ KDB: Kunststoffdichtungsbahn

einer WU-Beton-Schale, deren Rissen leicht sichtbar sind.¹⁰¹ Falls die gewünschte Dichtigkeit beeinträchtigt wird, müssen Sanierungsmaßnahmen getroffen werden. Da die Lebensdauer eines Tunnels mehr als 100 Jahren betragen kann, sind die Sanierungsmaßnahmen meist notwendig. Durch eine gute Abdichtung können sie jedoch erst zu einem späteren Zeitpunkt auftreten.

5.1.1 Vorinjektionen^{102,103}

Wenn eine Grundwasserabsenkung aus technischen, wirtschaftlichen oder umweltverträglichen Gründen nicht möglich ist oder keine vollständige Entwässerung erzielt werden kann, kommen zur Verhinderung von unvorgesehenen Wassereintrüben und zur Abdichtung des Tunnels vorausseilende Injektionen zum Einsatz. Sie sind von besonderer Bedeutung bei der Durchquerung von grundwasserführenden Störzonen, die oft aus Trümmernmassen und gletschertransportierten Komponenten, die in schluffigen, sandigen und kiesigen Lockergestein eingebettet sind, bestehen. Solche Störzonen können bei den hydrologischen und geologischen Vorerkundungen erkannt werden, aber durch eine Erkundungsbohrung während des Vortriebs können die potentiellen Risiken besser beurteilt und eventuelle Schäden infolge Wassereintrüben verhindert werden.

Meistens werden zwei bis vier Erkundungsbohrungen, in Position 12 und 6 Uhr, bzw. 12-3-6 und 9 Uhr, mit einem Winkel von 5 – 8° nach außen, mittels Hammerbohrverfahren mit Wasserspülung ausgeführt. Als Kriterium für die Notwendigkeit von Injektionsarbeiten dient die Erfüllung von einer den folgenden Bedingungen:

- Anfangszufluss an einem einzelnen Bohrloch > 3 l/min
- Anfangszufluss von allen Bohrlöchern > 6 l/min
- Verlust von über 50% Spülwasser an einem einzelnen Bohrloch

Falls irgendeine der obengenannten Bedingungen in einem Abstand größer als 15 m von der Ortsbrust erfüllt wird, ist ein problemloser Abschlag von 5 m möglich. Falls dieses Kriterium nicht erfüllt ist, soll mit der Ausführung von Vorinjektionen begonnen werden. Vor der Ausführung von Vorinjektionen müssen die Erkundungsbohrlöcher mittels eines Packers in einer Tiefe von 2 m mit Mörtel injiziert werden.

¹⁰¹ Vgl. DAUB, Betonauskleidungen für Tunnel in geschlossener Bauweise, S. 27.

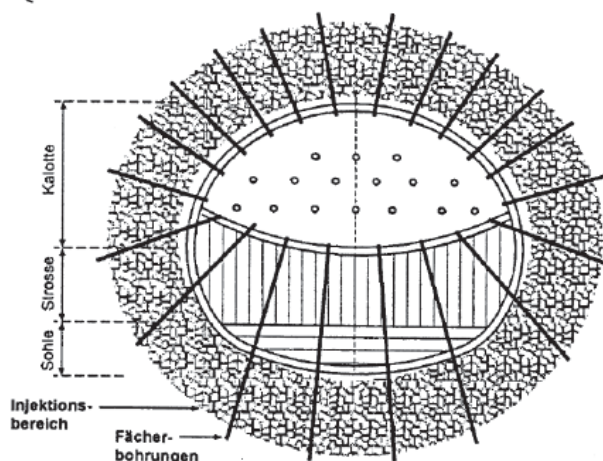
¹⁰² Vgl. Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 262-263.

¹⁰³ Vgl. Garschou K., Vorinjektion im Tunnelbau – eine vernünftige Maßnahme, In: Beiträge zum 17. Christian Veder Kolloquium - Injektionen in Boden und Fels, 2002, S. 65-82.

Folgende Schritte sind bei der Ausführung von Vorinjektionen nach der Festlegung von Störzonen durchzuführen:

- Bestimmung von Raster, Länge und Richtung der Injektionsbohrlöcher, sodass der gesamte Ausbruchquerschnitt mit Fächerbohrungen überlagert wird. Der Überlappungsgrad der einzelnen Fächerschnitte hängt von der Größe der Störzone und den entsprechenden Wasserzuflüssen ab.
- Bohren der Injektionslöcher: je nach Bohrergerät, Bohrgestänge und Felsparameter werden Bohrlöcher mit Längen von 10 bis 15 m erzielt. Im Allgemeinen sollen die Bohrlöcher in einem Winkel von $6-12^\circ$ zur Tunnelachse gebohrt werden. Nach einer sorgfältigen Beurteilung der notwendigen Zeit für das Abbinden des Injektionsmittels werden mindestens vier Löcher zur Kontrolle gebohrt, deren Lage an die vorherigen Injektionsmengen und geologischen Strukturen angepasst wird.
- Abschnittsweises Injizieren der Bohrlöcher mit Packern: es muss immer mit dem tiefsten Bohrloch an der Ortsbrust begonnen. Ob die Injektionsarbeiten ihre Aufgabe ausreichend gut erfüllt haben wird erst nach der Kontrollbohrung klar. Falls der Anfangszufluss- und/oder das Verlustkriterium noch nicht erfüllt sind, werden zusätzliche Injektionen durchgeführt, solange bis zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Am Ende des Injizierens entsteht ein Injektionskörper, der wegen seiner Form auch als *Injektionszwiebel* bezeichnet wird. Die vorseilenden, räumlichen Injektionszwiebeln von 10-15 m Länge ermöglichen einen Vortrieb von ca. 5-10 m.

Querschnitt



Längsschnitt

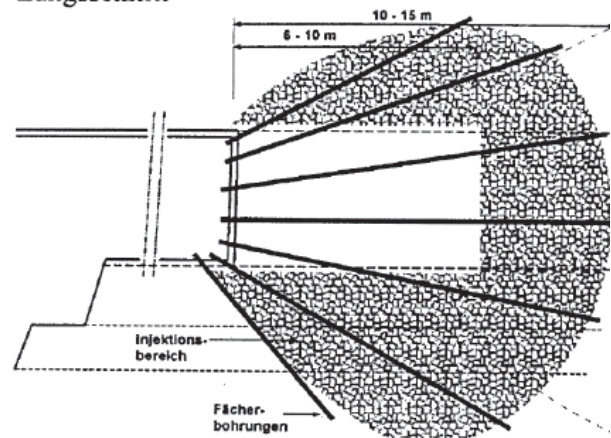


Abb. 5.3: Schema eines Injektionsschirms "Injektionszwiebel"¹⁰⁴

Folgende Möglichkeiten kommen bei der Wahl des Injektionsmittels zum Einsatz:

¹⁰⁴ Quelle: Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 263.

- Zementsuspensionen und Feinmörtel: Normalzementsuspensionen werden in allen Fällen nur mit Zugabe von Bentonit und Abbindebeschleuniger verwendet, während bei der Anwendung von Mikrozetementen spezielle Erstarrungsbeschleuniger hinzugefügt werden. Mittels dieser Methode kann das Zeitfenster der Zementsuspension von 1 – 2 Minuten bis zu ca. 20 Minuten kontrolliert werden, in der die Pumpfähigkeit erhalten bleibt, bevor das Abbinden eintritt und der Mörtel fest wird. Diese Möglichkeit zur Abbindesteuerung ist besonders praktisch, wenn eine kontrollierte Injektion mit begrenzter Mörtelausbreitung in sehr durchlässigem Fels und Boden erforderlich ist oder bei Grundwasserbedingungen, die ein sehr schnelles Abbinden erfordern.¹⁰⁵
- PU- Schäume: da die Anwendung von Feinstzement-Suspensionen aufwendiger als die Anwendung von Normalzement-Bentonitsuspensionen ist, kommen auch Kunstharzinjektionen auf der Basis von Reaktions- oder Kondensationsharzen zum Einsatz. Gesteuert über die Zugabe von Beschleuniger können sie einen raschen Injektionserfolg durch Unterbinden von Wassereinbrüchen erreichen.

Der größte Nachteil der Vorinjektionen ist der intermittierende Vortrieb. Die Vortriebs- und Injektionsmannschaften können nur abwechselnd, nacheinander mit tageweiser Unterbrechung ihre Arbeiten durchführen. Die Notwendigkeit von vorausseilenden Injektionen muss aufmerksam beurteilt werden.

Folgende Überlegungen zu Vorinjektionen sollten im Betracht gezogen werden:

- Vorinjektionen versiegeln die Klüfte vor Beginn eines Wasserzuflusses, während bei Nachinjektionen das Wasser bereits in den Tunnel hineinfließt und die Klüfte bei strömendem Wasser abgedichtet werden müssen, wobei die Gefahr des Auswaschens von Injektionsmaterial existiert.
- Bei Nachinjektionen ist die Rückfluss von Injektionsgut möglich. Um eine Ausbreitung des Injektionsmaterials im Gebirge zu gewährleisten muss als erstes der Rückfluss in den Tunnel gestoppt werden. Je größer die wasserführenden Klüfte, die Zuflussmenge und der Druck sind, desto schwieriger ist es sie abzudichten

5.1.2 Fugeninjektionen

Als Hauptelement eines Tunnels muss die Auskleidung die Vielfalt von Einwirkungen, sowohl während des Baus, als auch während der Nutzungsdauer sicher aufnehmen. Die Gebirgs- und Wasserdrücke, Eigenlasten, chemische Angriffe, Temperatureinwirkungen und vielen

¹⁰⁵ Vgl. Firmenprospekt „Injektionen: Lösungen für den Untertagebau“ der Firma "Master Builders Solutions by BASF"

anderen Faktoren müssen durch die Auskleidung berücksichtigt werden. Wie schon gesagt, ist die Wahl von den geologischen und hydrologischen Verhältnissen und von den technischen Parametern wie Tunnelquerschnitt, -länge und Vortriebsmethode abhängig.

Die Tunnelschale aus Ortbeton wird in der Regel anhand des Schalwagens in Blöcken von 8-12 m Länge hergestellt. Die Schalungskonstruktion muss mindestens zwei Blöcke überspannen, die durch Bewegungsfugen voneinander getrennt sind. Die Bewegungsfugen können als Dehnfugen mit Fugeneinlagen oder als Pressfugen ohne Fugeneinlagen ausgeführt werden. Die einzelnen Blöcke werden in zwei oder mehreren Abschnitten betoniert, was die Entstehung von Arbeitsfugen zwischen Sohle und Gewölbe bedingt. Da die Fugen als Schwachstellen für die endgültige Abdichtungsfunktion angesehen werden, müssen sie mit besonderer Aufmerksamkeit behandelt werden. Die Injektionstechnik findet u. a. hier ihre Anwendung, wobei folgende Verpresssystemen zu unterscheiden sind:¹⁰⁶

- planmäßige Maßnahmen, die als Ergänzung (Sekundärabdichtung) zu einem Profilband, Fugenblech oder einer KDB eingesetzt werden
- Instandsetzungsmaßnahmen bei Undichtigkeiten, die die Sanierungsarbeiten erleichtern

Zuerst werden die Anwendungsbeispiele der Injektionstechnik für Sanierungsarbeiten beschrieben und dann wird der Fall, durch Einsetzung von vorsorglichen Verpresseinrichtungen, als eine Alternative der klassischen Injektionsmaßnahmen angesehen.

Folgende Schadensfälle sind möglich:¹⁰⁷

- Wasserdurchtritt bei Beschädigung des Fugenbanddehnteils infolge mechanischer Beschädigung des Fugenbandes beim Einbau, Überbeanspruchung des Fugenbandes oder nicht fachgerecht ausgeführte Verbindungen und Stöße, mangelhafter chemischer Beständigkeit des Fugenbandes.

¹⁰⁶ Vgl. Richtlinie Tunnelabdichtung, 2012, S. 91.

¹⁰⁷ Vgl. Firmenprospekt „Abdichtung mit Injektionsverfahren“ der Firma DESOI, S. 6- 9.

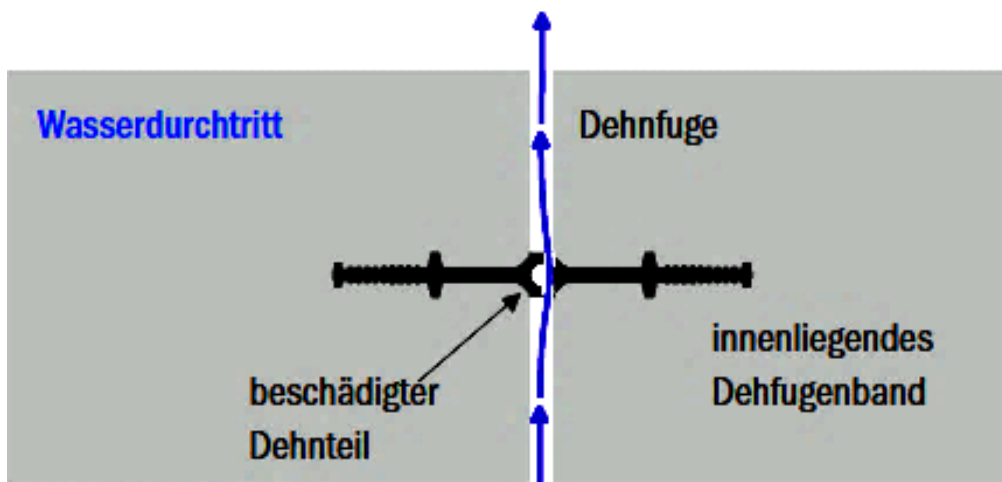


Abb. 5.4: Undichter Dehnteil¹⁰⁸

- Wasserumflüchtigkeit im Bereich des Fugenbanddichtteils als Folge von nicht fachgerecht einbetonierten Fugenbandschenkeln oder Hohlräumen, zu großer Fallhöhe des Betons oder mangelhafter Verdichtung. Als weitere Ursachen für die Entstehung von Umläufigkeiten sind zu nennen: Fehler beim Einbau von Fugenbändern, nicht entfernte Verschmutzungen oder nicht abgetautes Eis auf dem Dichtteil vor dem Betonieren, Verletzungen des Dichtteils durch Nägel oder Bewehrungsenden, umgeklappte Dichtschenkel durch unzureichende Befestigung.

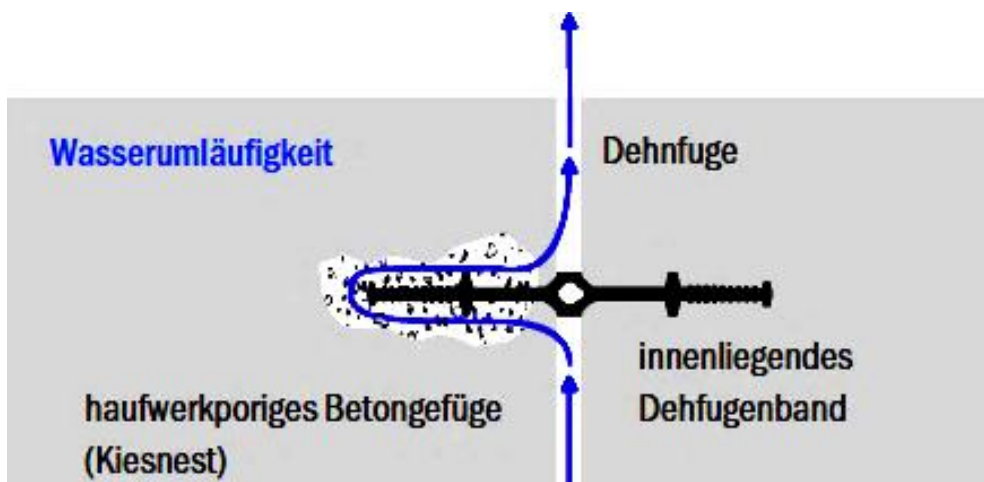


Abb. 5.5: Umläufiger Dehnteil¹⁰⁹

¹⁰⁸ Quelle: http://www.desoi.de/fileadmin/user_upload/desoi.de/Unternehmen/Fachprospekte/Wasserundurchl_Bauwerke_2_mail.pdf

¹⁰⁹ Quelle: Ebd.

Für die erfolgreiche Sanierung einer Dehnfuge müssen neben der Beanspruchung (Wasserdruck, Verformung) auch die Lage, der Umfang und möglichst die Ursache der Fehlstelle bekannt sein. Häufig ist es schwer die Frage, welcher Schadensfall eintritt eindeutig zu beantworten. In diesen Fällen wird in der Regel nach dem Ausschlussprinzip vorgegangen. Zunächst wird der Dichtteil im betroffenen Fugenabschnitt durch partielle Injektion über Bohrpacker injiziert. Wenn diese Maßnahme nicht den gewünschten Erfolg erbringt, wird die Fuge im Regelfall anschließend hinter dem Dehnfugenband injiziert oder durch eine partielle Schleiervergelung unmittelbar vor dem Bauteil abgedichtet. Letztere Maßnahmen sind aber nur für den Fall geeignet, dass keine größeren Fugenbewegungen zu erwarten sind.

- Abdichten des Dichtteils durch partielle Injektion über Bohrpacker: bei einer Wasserumflüchtigkeit des Fugenband-Dichtteils können die Hohlräume und Fehlstellen durch direkte Injektion im betroffenen Bereich des Dichtteils über Bohrpacker injiziert werden. Da die Beurteilung, an welcher Seite des Fugenbands die Fehlstelle sich befindet, unmöglich ist, werden in der Regel nach dem Ausschlussprinzip nacheinander beide Dichtteile zunächst wechselseitig mit einem Abstand von 30–50 cm angebohrt (Abb. 6.6). Dabei ist darauf zu achten, dass bei der Bohrung lediglich der Dichtteil, nicht jedoch der Dehnteil des Fugenbandes getroffen wird. Der Abstand der Bohrungen zur Dehnfuge muss auf das Fugenband abgestimmt sein, damit der Dehnteil nicht verletzt wird. Nach Reinigen der Bohrkanäle von Bohrstaub und dem Einbau von Bohrpackern erfolgt die Verpressung mit dem Füllstoff über die Bohrpacker. Während des Verpressvorgangs wird der Materialfluss an den angrenzenden offenen Bohrpackern kontrolliert. Über diesen kann auch die verdrängte Luft entweichen.

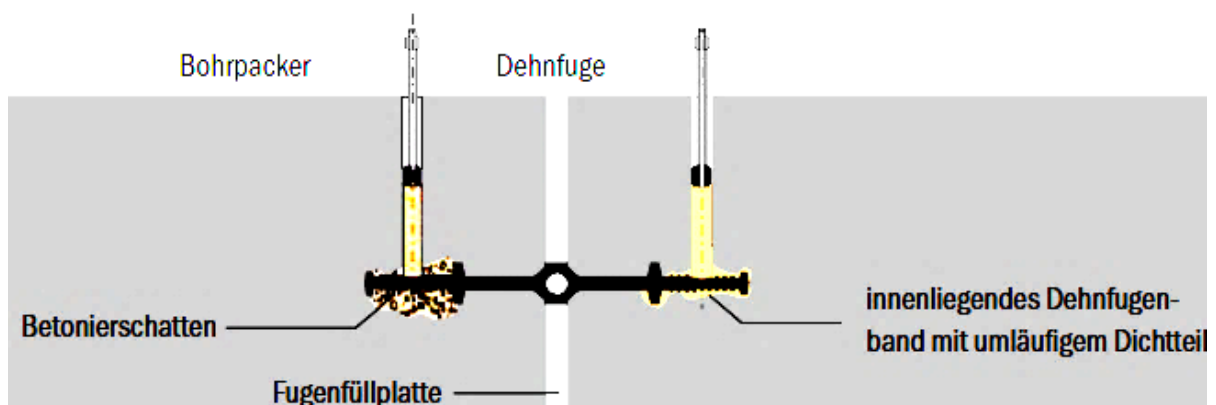


Abb. 5.6: Direkte Injektion im Bereich der Umläufigkeit¹¹⁰

¹¹⁰ Quelle: http://www.desoi.de/fileadmin/user_upload/desoi.de/Unternehmen/Fachprospekte/Wasserundurchl_Bauwerke_2_mail.pdf

- Injektion der Dehnfuge zwischen Fugenband und wasserzugewandter Bauteiloberfläche (Abb. 6.7): wenn das Dehnteil beschädigt wird und als Folge daraus undicht muss die Dehnfuge zusätzlich mit Acrylatgel oder Polyurethanharz injiziert werden. Bohrkanäle zwischen dem Erdreich und dem Dehnfugenband werden angebohrt und ausgeblasen. Dann wird durch Bohrpacker injiziert, wobei das Erdreich und das einbetonierte Dehnfugenband als Widerlager dienen. Die Kontrolle des Materialflusses erfolgt bei der Verpressung über offene benachbarte Bohrpacker oder eine Entlüftungsbohrung. Zum Schluss werden die Bohrpacker entfernt und die Öffnungen mit einem schwindarmen Mörtel verschlossen.

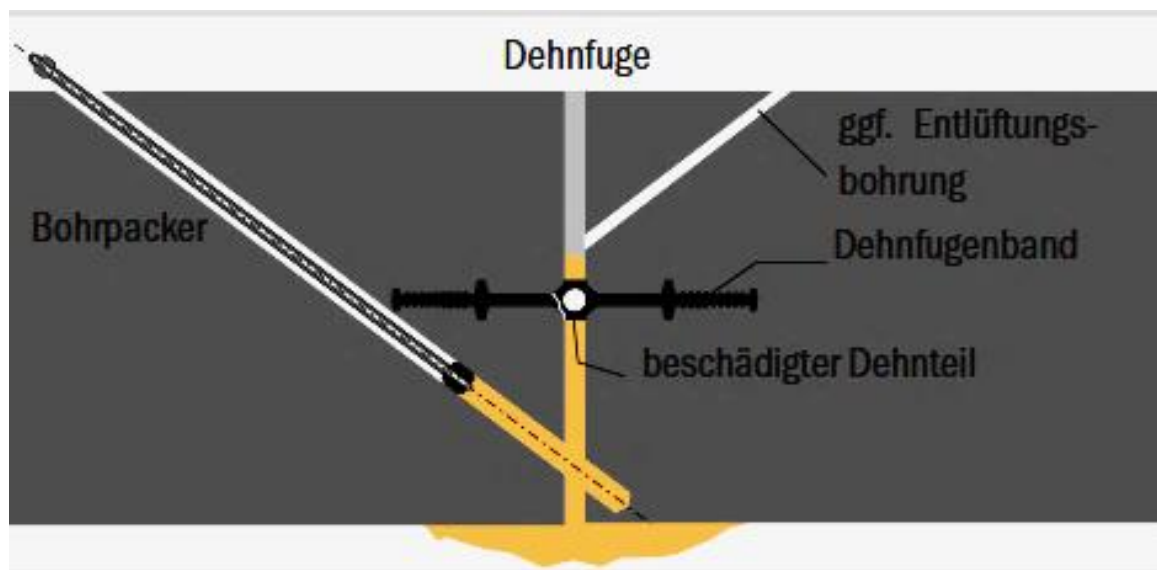


Abb. 5.7: Vergelung der Fuge¹¹¹

- Injektion der Dehnfuge zwischen Fugenband und wasserabgewandter Bauteiloberfläche: es wird eine temporäre Verdämmung benötigt, die als Widerlager bei der Injektion des Zwischenraums zwischen dem Fugenband und der raumseitigen Abschalung dient. Um ein Austrocknen und Schwinden des Injektionsmaterials zu verhindern, wird die Fuge nach der Injektion und dem Entfernen der Abschalung mit einem Fugenfüllprofil, einem Kompressionsprofil, einer dauerelastischen Fugenverschlussmasse, einem streifenförmigen Abklebesystem oder einer Blechabdeckung verschlossen bzw. abgedeckt.

¹¹¹ Quelle: http://www.desoi.de/fileadmin/user_upload/desoi.de/Unternehmen/Fachprospekte/Wasserundurchl_Bauwerke_2_mail.pdf

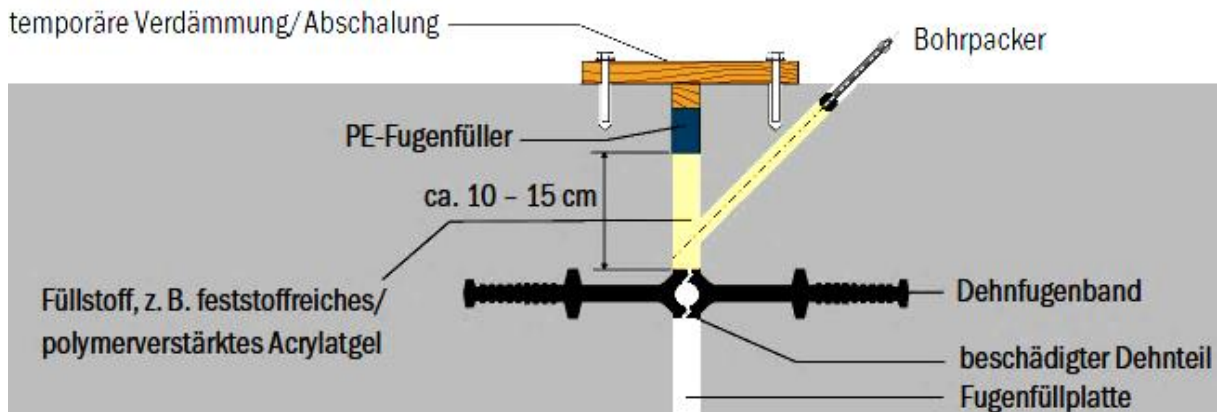


Abb. 5.8: Injektion des Zwischenraumes zwischen Fugenband und raumseitiger Bauteiloberfläche¹¹²

Die übliche Verpressmaterialien für Fugeninjektion sind wie folgt:¹¹³

- Zementbasierte Verpressmaterialien: je nach der Fugenbreite kommen Zementmörtel, -leime und -suspensionen zum kraftschlüssigen Füllen zum Einsatz. Als Zusatzmittel können Fließmittel, Abbindeverzögerer und Quellmittel verwendet werden. Eigenschaften wie Fließ- und Pumpfähigkeit, Stabilität, geringes Schwindverhalten und hohe Dichtigkeit müssen berücksichtigt werden. Weiterhin ist bei der Verwendung von zementbasierten Verpressmaterialien auf eine mögliche Entmischung infolge fließend-strömenden Wassers zu achten.
- Acrylatgele: wasserquellfähige Verpressmaterialien auf Acrylat- bzw. Methacrylatbasis, die zu einem gummiartigen, flexibilen Produkt aushärten. Sie zeichnen sich durch hohe Reißdehnung und eine extrem niedrige Mischungsviskosität aus. Die in nasse oder wassergefüllte Fugen verpressten Acrylatgele müssen gut anhaften und dem Wasserdruck durch eine quellfähige Wirkung nach der Verpressen entgegen wirken. Die weichen Acrylatgele sind eher zur Verfüllung von Bewegungsfugen geeignet.
- PUR-Harze oder -schäume: dafür gelten die gleichen Besonderheiten wie bei Rissinjektionen¹¹⁴
- Silikatharze oder -schäume: zweikomponentiger, schnell reagierender, leicht flexibilisierter Verpressschaum auf Silikatbasis, bei dem nach der Vermischung der

¹¹² Quelle: http://www.desoi.de/fileadmin/user_upload/desoi.de/Unternehmen/Fachprospekte/Wasserundurchl_Bauwerke_2_mail.pdf

¹¹³ Vgl. Richtlinie Tunnelabdichtung, 2012, S. 98- 100.

¹¹⁴ Siehe Punkt 6.1.3 Betonrissinjektionen

Komponenten eine viskose Emulsion entsteht, die kein weiteres Wasser aus dem Verpressgebiet aufnimmt.

- Abdichten des Dichtteils durch Verpressung über Injektionsschlauchsysteme: dieses System gehört zu den planmäßigen Maßnahmen, die eine zusätzliche, sekundäre Abdichtung ermöglichen. Das System besteht aus Verpressschläuche aus thermoplastischen Schlauchkern mit einem Injektionskanal und Auslassöffnungen für das Injektionsgut, die durch Membrane oder Ummantelung vor dem Eindringen von Zementschlämme beim Betonieren geschützt sind. Es ist zu unterscheiden zwischen einmal verpressbaren und mehrfach verpressbaren Injektionsschläuchen. Beste Ergebnisse werden erzielt, wenn die Schläuche am Fugenband, meist bei FMS-Fugenbänder¹¹⁵ anhand Kabelbindern eingebaut werden (Abb 6.12, Abb. 6.13).

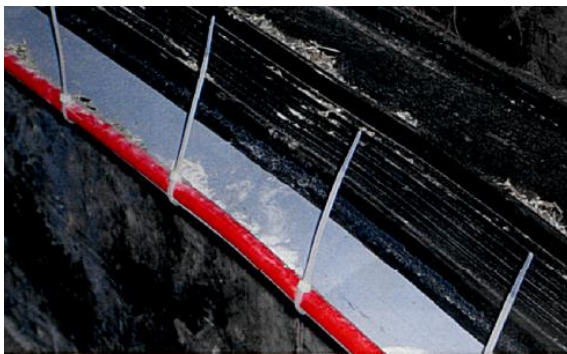


Abb. 5.9: Befestigung des Injektionschlauchs¹¹⁶

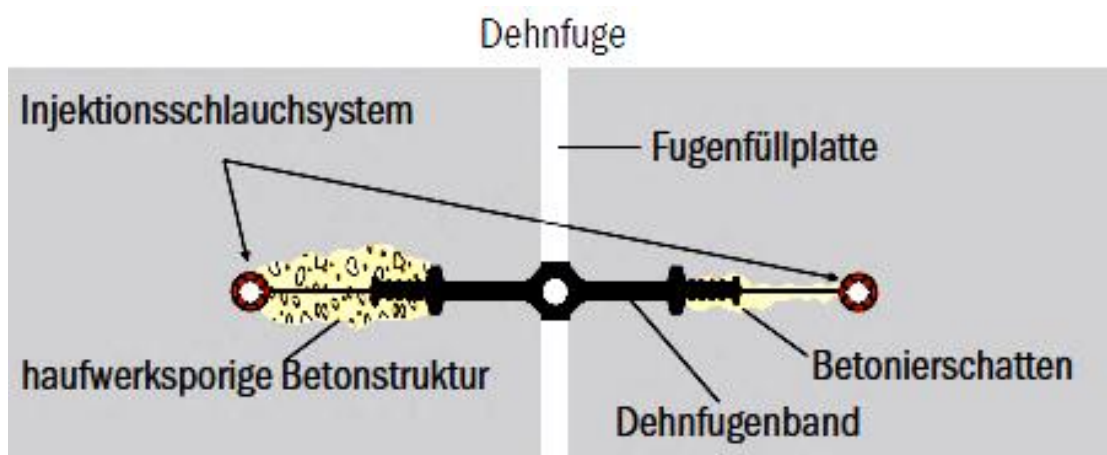


Abb. 5.10: Abdichten durch Injektionsschlauchsystem¹¹⁷

¹¹⁵ FMS Fugenband: innen liegendes Elastomer-Fugenband mit Mittelschlauch und mit Stahllaschen (nach DIN 7865)

¹¹⁶ Quelle: Hohman R., Fugenabdichtung bei WU Bauwerken aus Beton, 2009, S. 230.

¹¹⁷ Quelle: http://www.desoi.de/fileadmin/user_upload/desoi.de/Unternehmen/Fachprospekte/Wasserundurchl_Bauwerke_2_mail.pdf

Einerseits wird dadurch beim Verpressen des Schlauchsystems ein unkontrollierter Materialaustritt in das Erdreich vermeiden, andererseits werden die Verpressenden des Schlauchsystems nicht über die innenliegende Fugenabdichtung (Profilband, Fugenblech) geführt. Werden die Verpressschläuche wasserseitig eingebaut und führen deren Verpressenden in das Tunnelinnere, so entsteht die Gefahr, dass diese selbst wasserführend sind.¹¹⁸ Die Verpressung der Arbeitsfuge erfolgt über die Verpressenden, die in einbetonierte Verwahrdosen eingeführt sind, über Variopacker oder Nagelpacker. Die geeignete Injektionsmittel sind in der folgenden Tabelle angegeben:

Injektionsmaterial	Anmerkung
Zementsuspension	<ul style="list-style-type: none"> - einkomponentig - kraftschlüssige Verbindung - für trockene bis feuchte Rissufer - vakuumierbar, d. h. durch Anlegen eines Unterdruckes kann das Injektionsgut aus dem Injektionskanal gesaugt werden, was die Mehrfachverpressung erlaubt
PUR-Harz	<ul style="list-style-type: none"> - zweikomponentig - dehnbare Verbindung - für trockene bis feuchte Rissufer - nicht vakuumierbar
Acrylatgel	<ul style="list-style-type: none"> - mehrkomponentig - begrenzt quellfähig - für trockene bis nasse Rissufer - vakuumierbar - dürfen nur verwendet werden, wenn nachgewiesen ist, dass keine Korrosionsgefahr ausgeht

Tab. 5.2: Injektionsmaterialien für die Injektions Schlauchverpressung

Mit der Injektion sollte frühesten nach Abklingen der Hydratation begonnen, aber auch andere Faktoren wie Bauteilabmessungen, Schwindverhalten, Bauteilbewegung bei Temperaturbelastung, Zugänglichkeit der Verpressenden usw. beeinflussen die Wahl des Injektionszeitpunkts. Sehr wichtig bei der Planung ist die Gewährleistung der Zugänglichkeit

¹¹⁸ Vgl. Richtlinie Tunnelabdichtung, 2012, S. 96.

zu den Verpressenden zu einem späteren Zeitpunkt, besonders wenn das System aus mehrfach verpressbaren Injektionsschläuchen besteht.¹¹⁹

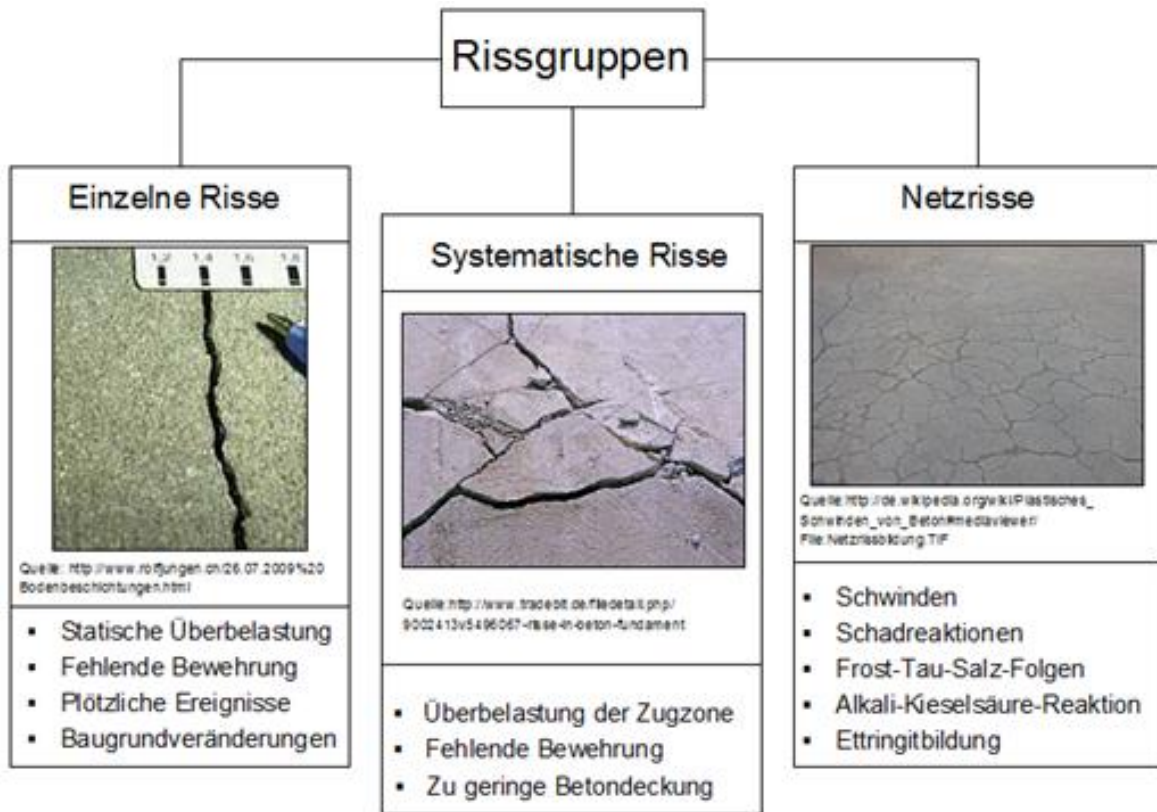
5.1.3 Betonrissinjektionen

Die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit der Tunnelschale können durch Risse beeinträchtigt werden. Sie entstehen, wenn die einwirkenden Spannungen die Widerstandsfähigkeit des Bauteils überschreiten. Da die Zugfestigkeit des Betons kleiner als die Druckfestigkeit ist, entstehen die meisten Risse infolge von Zug- oder Biegezugkäften. Die Ursachen dafür können lastabhängig oder lastunabhängig sein:

- Risse durch Lasten: im Bauzustand führt das Eigengewicht zu einer Biegezugbeanspruchung im Firstbereich des Tunnels und im Gebrauchszustand können weitere Zugbeanspruchungen aus Wasser- und Gebirgsdruck auftreten. Die thermische Belastung infolge Temperaturänderung, besonders bei Druckstollen im Gebrauchszustand kann auch den Spannungszustand ändern. Solche Lasten können Spannungen verursachen und dadurch die Risse entstehen lassen.
- Lastunabhängige Risse: meistens sind das Risse infolge Schwinden oder durch Abfließen der Hydratationswärme. Sowohl die Veränderung der Betontemperatur als auch das Austrocknen führen zu Veränderungen des Betonvolumens und zu Verformungen. Diese Verformungen kann der Beton nicht mehr ungehindert abführen, sobald er zu erstarren beginnt. Eine innere Verformungsbehinderung führt zu Eigenspannungen, eine äußere Verformungsbehinderung erzeugt Zwangsspannungen. Beim Abkühlen und Schwinden des Betons entstehen Zugspannungen, wenn die Verformung behindert wird. Diese Zugspannungen können Risse verursachen.

Verschiedene Mechanismen verursachen unterschiedliche Rissbildung:

¹¹⁹ Vgl. Hohman R., Fugenabdichtung bei WU Bauwerken aus Beton, 2009, S. 219- 251.



Die Risse unterscheiden sich noch nach ihrer Tiefe in dem Betonbauteil: Oberfläche- (Schalenrisse), Risse in der Biegezugzone oder Risse durch die gesamte Bauteildicke (Trennrisse). Für die Verhinderung oder Verminderung der Rissbildung stehen ein paar konstruktive, betontechnische und/oder ausführungstechnische Maßnahmen zur Verfügung. Durch Trennung der Ortbetoninnenschale von der Spritzbetonaußenschale mit Abdichtungsfolien können die Zwangsspannungen reduziert und dadurch die zwangsbedingten Risse vermieden werden. Zu den betontechnischen Maßnahmen zählt die Zusammensetzung des Betons. Die Zwangsspannungen, die durch das Abfließen der Hydratationswärme und durch späteres Schwinden entstehen, können durch Anpassung der Betonzusammensetzung und Umgebungstemperatur vermindert werden. Die ausführungstechnischen Maßnahmen umfassen verschiedene Parameter wie niedrige Frischbetontemperatur, verformungssteife Schalung, Vermeidung von ruck- und stoßartigen Ausschalen usw.

Entstandene Risse müssen, wenn sie oberhalb einer bestimmten Breite liegen, durch Injektion geschlossen werden.¹²⁰

¹²⁰ Vgl. Bonk M., Lufsky Bauwerksabdichtung, 7. Auflage, 2010, S. 261-267.

Die typischen Risse, die während des Tunnelbaus entstehen können, sind:¹²¹

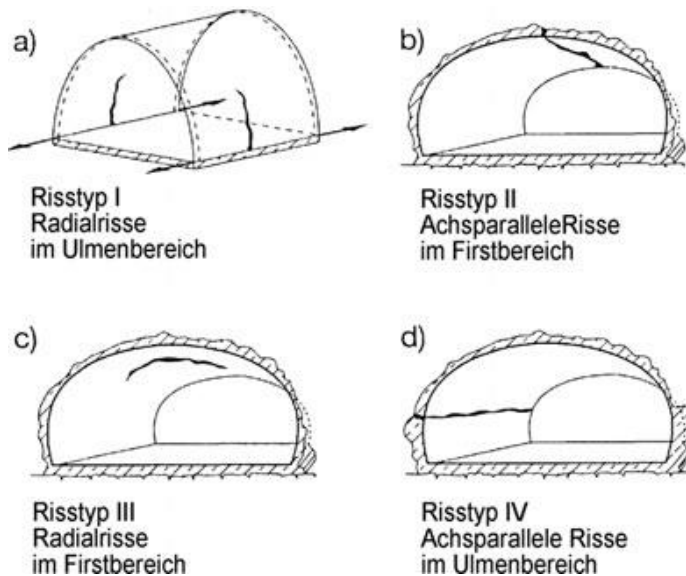


Abb. 5.11: Typische Schalenrisse¹²²

- Radialrisse im Ulmenbereich: wenn die Sohlplatte zuerst betoniert wird, kommt es zu einer Verhinderung der Verformungen und Entstehung von Zwangzugspannungen infolge der nachträglichen Betonierung der Wände. Verformungen werden z.B. durch abfließende Hydratationswärme, durch Schwinden oder bei plötzlich verringerter Lufttemperatur im Tunnel hervorgerufen.
- Achsparelle Risse im Firstbereich: solche Risse treten selten in einem Tunnelsegment gemeinsam mit Ulmenradialrissen auf. Die Ursache dafür ist meistens die unzureichende Festigkeit beim Ausschalen. Solche Axialrisse können auch später noch durch Austrocknung und schnelle Abkühlung der Tunnelinnenflächen sowie durch ungleich verteilte Belastungen verursacht werden.
- Radialrisse im Firstbereich: entstehen infolge besonders schnell erhärtender Betonmischungen mit sehr hoher Hydratationswärme, wenn diese nur im Firstbereich eingebaut werden. Der im Ulmenbereich verwendete Beton mit normaler Wärmeentwicklung kann dabei entsprechend verformungsbehindernd wirken.
- Achsparelle Risse im Ulmenbereich: Die Ursachen sind ähnlich wie bei den Achsparellrissen im Firstbereich. Sie können auch während der Herstellung durch zu große

¹²¹ Vgl. Bonk M., Lufsky Bauwerksabdichtung, 7. Auflage, 2010, S. 331.

¹²² Quelle: Bonk M., Lufsky Bauwerksabdichtung, 7. Auflage, 2010, S. 332.

Verformbarkeit des Schalwagens oder durch unsymmetrische Belastung beim Betonieren entstehen.

Diese Risse dürfen die Dauerhaftigkeit des Tunnels und den Betrieb nicht beeinträchtigen. Sie sollten daher durch entsprechende Maßnahmen möglichst vermieden werden. Für eine adäquate Lösung der Rissbildungsprobleme ist die Rissdiagnostik von großer Bedeutung. Die erforderlichen Maßnahmen sind eng mit den Ursachen verbunden und die Ermittlung der Ursachen ist durch die Natur der Risse bedingt. Die wichtigsten Rissparameter, die untersucht werden müssen, um schon entstandenen Riss zu beseitigen, sind:

- Rissart
- Rissverteilung
- Rissbreite
- Risstiefe
- Risslänge
- Rissbewegungen
- Rissfeuchtigkeit

Die Untersuchung und die Beurteilung der Rissbildung beantworten die Frage ob eine Sanierung und Injektion von Rissen erforderlich ist. Die Entstehung von Rissen beeinträchtigt nicht unbedingt die Stand- und Dauerfestigkeit der Konstruktion. *DIN EN 1992-1-1* gibt einige Angaben zu zulässigen Rissbreiten bezüglich des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit an. Nach der Feststellung des Bauwerkszustands, der Schadensursache und den daraus folgenden Auswirkungen werden die erforderlichen Maßnahmen geplant und ausgeführt. Die Rissbehandlung erfolgt durch Injektionsfüllstoffe. Sie können, je nach dem vorgesehenen Verwendungszweck, in drei Kategorien eingeteilt werden:¹²³

- Rissfüllstoff für kraftschlüssiges Füllen von Rissen, Hohlräumen und Fehlstellen in Beton: der Füllstoff muss in der Lage sein, einen Verbund mit der Betonoberfläche zu bilden und über diese Kräfte zu übertragen. Diese zugfeste Verklebung erlaubt keine weitere Bewegung der Rissflanken.
- Rissfüllstoff für dehnbares Füllen von Rissen, Hohlräumen und Fehlstellen in Beton: flexibler Füllstoff, der nach dem Füllen in der Lage ist, Rissbreitenänderungen aufzunehmen.

¹²³ Vgl. ÖNORM EN 1504-5: 2013, S. 8.

- Rissfüllstoff für quellfähiges Füllen von Rissen, Hohlräumen und Fehlstellen in Beton: Füllstoff, der in der Lage ist, wiederholt durch Wasseradsorption zu quellen, wobei die Wassermoleküle physikalisch an die Moleküle des Rissfüllstoffes gebunden werden.

Die abdichtende Funktion erfolgt durch die Anwendung von wasserbeständigen und wasserundurchlässigen Materialien wie Epoxid-, Polyurethan-, Acrylharze oder Füllstoffe auf Basis mineralischer Bindemittel.¹²⁴

- Epoxidharze: niedrigviskose zweikomponentige Produkte, die hohe Eigen- und Haftfestigkeiten in trockener Umgebung erzwingen. In feuchter Umgebung sind speziell formulierte Harze einzusetzen, wobei angemerkt werden muss, dass die Festigkeitsentwicklung temperaturabhängig ist. Diese Materialien sind zum kraftschlüssigen Verbinden von Rissflanken bestimmt. Sie sind in der Lage, auftretende Kräfte verformungsfrei von einer Rissflanke zur anderen zu übertragen. Kraftschlüssiges Füllen mit EP-Harzen ist nur bei trockenen Rissen möglich.
- Polyurethanharze: einkomponentiges Mittel, das mit dem Wasser im Injektionsbereich reagiert, oder ein zweikomponentiges Produkt, das mit dem Härter reagiert. Die Reaktionszeit kann durch Katalysatoren gesteuert werden. Wieder ist die Festigkeitsentwicklung temperaturabhängig. Diese Injektionsharze dienen zum dehnfähigen Verbinden von Rissflanken. Mit PUR-Harzen können auch feuchte Risse, und Risse mit anstehendem Wasserdruck dauerhaft abgedichtet werden.
- Acrylharze: zweikomponentige Produkte, die durch zusätzlichen Aktivator auch bei Minustemperaturen ausreagieren können.
- Zement- oder Feinzementsuspensionen mit Zusätzen wie Fließmittel, Abbindeverzögerer oder Quellmittel gewährleisten ein kraftschlüssiges Füllen. Sowohl trockene, als auch feuchte Risse können durch Zementleim geschlossen werden.
- Polyurethanschäume: bei Wasserandrang durch die Risse kann noch flüssiger, unausreagierter Füllstoff ausgedrückt werden. Durch den Einsatz von PU-Schäumen wird aufgrund der schnellen Wasserreaktivität des Schaums, ein temporärer Wasserstopp erreicht. Wegen der Porösität wird die dauerhafte Abdichtungswirkung nicht gewährleistet und eine zusätzliche Polymerbasisinjektion wird benötigt.

Nach der *Richtlinie Injektionstechnik* sind drei Injektionsverfahren zu unterscheiden:¹²⁵

¹²⁴ Vgl. ÖBV Richtlinie Injektionstechnik, Teil 1, 2008, S. 11- 17.

¹²⁵ Vgl. ÖBV Richtlinie Injektionstechnik, S. 18.

-
- Niederdruckinjektionsverfahren: wenn die Konstruktion, eine geringe Baustoffqualität oder das Injektionsmedium höhere Drücke nicht zulassen. Der Injektionsdruck beträgt max. 10 bar.
 - Hochdruckinjektionsverfahren: Injektionsdruck über 10 bar.
 - Vakuuminjektion: ein Sonderverfahren, bei dem durch Aufbau von Vakuum im Rissverlauf das Injektionsgut eingesaugt wird. Voraussetzung für das Funktionieren dieser Methode ist die Möglichkeit, den Riss vollkommen zu verdämmen, sodass ein Vakuum im zu injizierenden Riss aufgebaut werden kann.

Die Wahl des Verfahrens hängt ab von der Art des Baustoffs, seiner Druckfestigkeit, der Konstruktion, der Lage und Art der Bewehrung (falls vorhanden), der Verdämmung, dem einzusetzenden Injektionsmaterial und der Zielsetzung der Injektion. Bei den Rissinjektionen der Tunnelschale kommen das Nieder- und das Hochdruckinjektionsverfahren zum Einsatz, wobei die Risstiefe sehr aufmerksam untersucht werden müssen, weil bei Trennrissen eine Hochdruckinjektion die Betoninnenschale zerstören kann.

Um die Ausführungsschritte des Prozesses leichter zu erklären, müssen zuerst die verwendeten Geräte und Ausrüstung beschrieben werden:¹²⁶

- Packer
 - Bohr- und Schlagbohrpacker: sind zur Injektion von Epoxid- und Polyurethanharzen und für alle Rissarten geeignet. Er kommt dann zum Einsatz wenn mit hohen Drücken gearbeitet und der Riss von innen nach außen gefüllt werden soll.
 - Klebepacker: werden bei trockenen Rissen verwendet. Das Füllgut wird von der Oberfläche in den Riss eingebracht. Da zum Setzen des Packers keine Bohrung nötig ist, kann er problemlos bei dünnen Bauteilen, solchen mit dichter Bewehrung, bei Spannbeton und sehr gut zum Füllen von Oberflächenrissen eingesetzt werden
 - Schlagpacker: Universelle Einfüllstutzen zur kraftschlüssigen, dehnfähigen oder verfüllenden Rissinjektion im Hoch- und Ingenieurbau. Trockene und feuchte Risse werden wie bei Klebepackern, jedoch mit hohen Drücken von der Bauteiloberfläche mit Epoxid- und Polyurethanharzen verfüllt.

¹²⁶ Vgl. Firmenprospekt der Firma „StoCretec“ GmbH



Abb. 5.12: Arten von Betonrissinjektionspacker¹²⁷

• Pumpen: zum Einbringen des Injektionsguts werden Pumpen mit manuellem, elektrischem oder pneumatischem Antrieb verwendet. Sie bestehen aus Druckerzeuger, Materialvorratsbehälter, Druckschlauch mit Anschlussstück zum Packer und müssen eine stufenlose Druck- und Mengenregulierung leisten. Nach der Anzahl der Komponenten sind Ein- und Mehrkomponentenpumpen zu unterscheiden. Bei Einkomponentenpumpen wird das vorgemischte Material in die Pumpe gefüllt, während bei Mehrkomponentenpumpen das Material unmittelbar vor dem Injektionspacker in einer Mischvorrichtung gemischt wird. Nach der Art des Förderprinzips unterscheiden sich die Pumpen nach:¹²⁸

- Membranpumpe: die Materialförderung und Druckerzeugung erfolgt mittels Membran. Verpresst werden niedrigviskose Füllstoffe im Hoch- und Niederdruckverfahren.
- Kolbenpumpe: die Materialförderung und Druckerzeugung erfolgt mittels Kolben. Verpresst werden Füllstoffe im Hoch- und Niederdruckverfahren.
- Schneckenpumpe: die Materialförderung und Druckerzeugung erfolgt mittels Schnecke. Verpresst werden mineralische Suspensionen im Niederdruckverfahren.
- Schlauchpumpe: die Materialförderung und Druckerzeugung erfolgt durch mechanisches Zusammendrücken eines Schlauches. Verpresst werden mineralische Füllstoff im Niederdruckverfahren.
- Vakuumpumpe: die Materialförderung erfolgt durch den Aufbau eines Unterdrucks. Eingesetzt werden niedrigviskose Füllstoffe.

Die Wahl der Ausrüstung hängt einerseits von dem Injektionsstoff, andererseits von der Rissart, -anzahl und -größe, sowie vom Zusammenspiel Zeit-Kosten ab.

¹²⁷ Quelle: http://www.sto.at/media/documents/download_broschuere/kategorie_betoninstandsetzung/09661-016de_06_06-11_72dpi.pdf

¹²⁸ Vgl. Richtlinie Injektionstechnik, Teil 1, 2008, S. 19- 20.

Bei der Ausführung von Betonrissinjektionen gibt es folgende Schritte:¹²⁹

- Die Oberfläche wird gereinigt. Wechselseitig (rechts und links) werden Bohrkanäle entlang des Risses in einem Winkel von 45-60° gebohrt. Damit wird sichergestellt, dass zumindest jede zweite Bohrung auch bei schräg verlaufenden Rissen den Riss kreuzt.

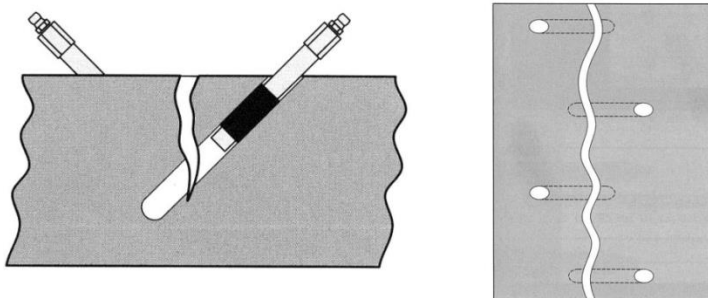


Abb. 5.13: Anordnung der Packer¹³⁰

- Überschreitet die Breite des Risses ein bestimmtes Maß, müssen Verdämmungsmaßnahmen vorgenommen werden. Die Verdämmung verhindert das unkontrollierte Auslaufen des Füllgutes während des Injektionsvorgangs. Die dazu verwendeten Materialien sollen schnellreaktiv sein und können organisch oder mineralisch gebunden sein.
- Reinigung der Bohrkanäle entweder durch Ausblasen mit Druckluft, Aussaugen oder Druckwasserspülung. Dadurch werden alle losen Teile im Injektionsbereich entfernt. Die Reinigungsmethode ist abhängig vom Injektionsmaterial.
- Vorbefeuchten: bei Injektionen in trockenen Bauteilen ist bei Füllstoffen auf Basis mineralischer Bindemittel und bei einkomponentigen Polyurethanharzen ein Vorbenetzen über den Bohrkanal nötig
- Einsetzen der Packer und Injizieren des Füllgutes: bei vertikalen Rissen erfolgt der Injektionsvorgang immer von unten nach oben. Es wird so lange injiziert bis es beim nächsten Packer das Füllgut, unter Beachtung des zulässigen Injektionsdrucks, austritt.
- Injektionspacker werden anschließend wieder entfernt und die Bohrlöcher sauber verschlossen.

¹²⁹ Vgl. Richtlinie Injektionstechnik, Teil 1, 2008, S. 21- 22.

¹³⁰ Quelle: <http://www.adicon.de/index.php?id=packer>

5.1.4 Kontaktinjektion

Als Kontaktinjektionen werden alle nachträglichen Injektionen bezeichnet, die den vollständigen Kontakt zwischen der Schale und der Umgebung erzielen. Dazu gehören die Firstspaltverfüllung bei den zweischaligen Tunnelauskleidungen und die Ringspaltverpressung der Tübbinge beim Schildvortrieb.

5.1.4.1 Firstspaltverpressung

Das Betonieren im Firstbereich ist immer komplizierter als die Betonierung der Ulmen und der Sohle. Infolge der Nachverdichtung und der Wasserabsonderung des Betons kann sich ein Spalt im Firstbereich bilden. Bei den zweischaligen Konstruktionen mit Kunststoffdichtungsbahnen dazwischen kann eine solche Spaltbildung sogar kritisch sein, weil die wasserdruckbelastete KDB durch die bergseitig frei liegende Bewehrung perforiert werden kann und dadurch nicht mehr die abdichtende Funktion gewährleistet wird.



Abb. 5.14: Spaltbildung im Firstbereich¹³¹

Für die Feststellung von Fehlstellen wie Firstspalten muss die Innenschalendicke mittels eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens überprüft werden. Dies erfolgt durch Echo-Verfahren wie das Ultraschall- oder das Impakt-Echo-Verfahren. Beide Messverfahren müssen zuerst durch mindestens drei Probekörper aus Tunnelinnenschalenbeton für die konkrete Tunnelbaustelle kalibriert werden. In der Regel wird ein Messraster von 80x80 cm im Bereich der Firste und der Blockfugen (Abb. 6.15) angelegt. Bei dem Ultraschall-Echo-Verfahren wird anhand eines Prüfkopfs an der Oberfläche der Tunnelschale ein Ultraschallimpuls im Bauteil ausgelöst. Der Impuls reflektiert an der Rückwand der Tunnelinnenschale und wird durch den Empfangskopf, der sich auch an der Oberfläche der Tunnelschale befindet,

¹³¹ Quelle: <http://www.ndt.net/article/bau-zfp2008/Inhalt/v16.pdf>

empfangen. Durch vorläufige Kalibrierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Ultraschalls c kann aus der Laufzeit des Impulses t auf die Dicke der Innenschale d geschlossen werden:

$$d = c * \frac{t}{2} \quad (6.1.)$$

Bei dem Impakt-Echo-Verfahren werden durch mechanische Impulse (Schallwellen), z.B. mit einer Stahlkugel, in das zu untersuchende Bauteil eingeleitet. Deren Vielfachreflexionen zwischen der Oberfläche und den Grenzflächen (z.B. Rückwand oder Hohlstellen) werden mit einem breitbandigen Empfänger aufgenommen und einer Frequenzanalyse unterzogen. Aus den Ergebnissen der Frequenzanalyse lässt sich die Bauteildicke bestimmen. Bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit des Körperschalls c kann die Dicke der Innenschale d einer Frequenzanzeige f zugeordnet werden:

$$d = \frac{c}{2 * f} \quad (6.2.)$$

Somit lassen sich Minderdicken lokalisieren.¹³²

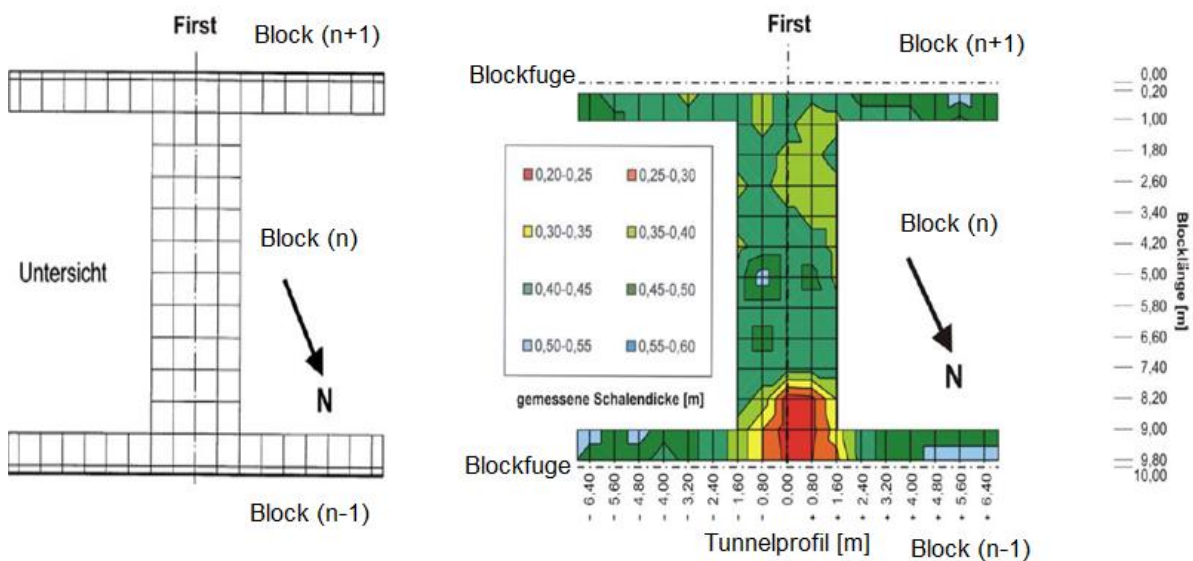


Abb. 5.15: Messraster und -Ergebnisse¹³³

Im Abbildung 6.15 rechts im unteren Bereich des „H-Profiles“ ist sichtbar, dass z.B. die Sollschalendicke von 35 cm nicht erzielt wurde. Bei Vorliegen derartiger Fehlstellen muss eine der Firstspaltverpressung vorausseilende Instandsetzung bzw. Verfüllung des Hohlraumes und eine vollständige Einbettung der Bewehrung mit einem qualitativ

¹³² Vgl. ZTV-ING - Teil 5 Tunnelbau- Abschnitt 1: Geschlossene Bauweise, S.32-34.

¹³³ Quelle: <http://www.ndt.net/article/bau-zfp2008/Inhalt/v16.pdf>

hochwertigen Verpressgut erfolgen, um die Dauerhaftigkeit und Standsicherheit des Tunnels sicher zu stellen. Die Verfüllung der Hohlräume erfolgt frühestens 56 Tage nach dem Betonieren des betreffenden Blockes über Packer, deren Anordnung richtet sich nach der Geometrie der Schadstelle. Der Abstand der Packer (Einfüllstutzen) in der Firstlinie darf 3 m nicht überschreiten, wobei die äußeren Packer 1 m von den Blockfugen entfernt anzubringen sind. Einen Tag vor der Injektion sowie kurz vor dem Injektionsbeginn muss die zu injizierende Oberfläche mit Wasser über Packer in den Firstspaltverpressstutzen befeuchtet werden. Das eingesetzte Material zur Firstspaltverpressung variiert je nach Tunnelbaustelle, d.h. nach Größe und Konfiguration der Spalten, deswegen wurden keine konkreten Gaben zum Verpressgut gemacht. Zum Einsatz kommen Zementleime, Zementsuspensionen, Vergussmörtel sowie Verpressbetone mit verschiedenen Wasserzementwerte bzw. Wasserfeststoffwerte. Der Verpressdruck soll drei bar nicht überschreiten.¹³⁴

5.1.4.2 Ringspaltverpressung

Bei der Verwendung von vorgefertigten Tübbingelementen entsteht bei der Weiterfahrt des Schildes ein Ringraum, der nach außen durch das umgebende Gebirge, nach innen durch die Tübbingelemente und stirnseitig durch die Schildschwanzdichtung begrenzt wird.¹³⁵ Dieser Ringraum, auch Ringspalt genannt, formiert sich aus dem Steuerpalt zwischen Schildmantel und Ausbruchrand (infolge Schildkonizität und Überschnitt) und aus dem Ringspalt zwischen der Tübbingauskleidung und Ausbruchrand (Abb. 6.17).

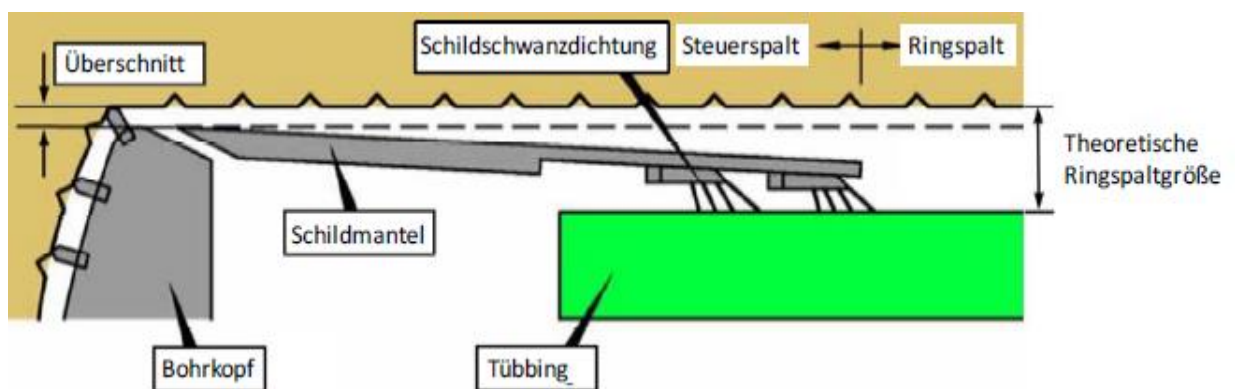


Abb. 5.16: Ringspaltgröße¹³⁶

Die eventuelle Bodenverformung hinter dem Schildschwanz kann vermieden werden durch die so genannte Ringspaltverpressung. Diese Maßnahme gewährleistet:

¹³⁴ Vgl. ZTV-ING - Teil 5 Tunnelbau- Abschnitt 1: Geschlossene Bauweise, S.22.

¹³⁵ Vgl. Maidl B., Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb, S. 37-39.

¹³⁶ Quelle: Wittke, W.: Statik und Konstruktion maschineller Tunnelvortriebe, S.

- Die Verhinderung von Entspannung und Auflockerung des umgebenden Baugrunds
- Einen kraftschlüssige Kontakt zwischen Tunnelauskleidung und Baugrund
- Die Isolierung der Tübbinge vom direkten Kontakt mit betonaggressiven Böden
- Eine zusätzliche Abdichtung über die Tübbingdichtung hinaus

Je nach Baugrundverhältnissen, der Art der Schildmaschine und dem Tübbingsystem unterscheiden sich zwei Grundkonzepte bezüglich der Zusammensetzung des Verpressgutes (Tab. 6.3). Bezüglich der zeitlichen Vorgehensweise des Verpressvorgangs wird zwischen Primär- und Sekundärverpressung unterschieden. Das Ziel der Primärverpressung ist der Aufbau von einer unmittelbaren Bettung der Ringe, dadurch einen setzungsarmen Vortrieb geschaffen wird. Die Aufgabe der Sekundärverpressung ist die restlichen vortriebs- und verfahrensbedingte Hohlräume um den Tunnel, z. B. aus dem Absetzen des Primärverpressgutes, auszufüllen.¹³⁷

Einsatzbereich	Maschinentyp	Tübbingsystem	Verpresssystem
Lockergestein	Schild mit aktiver Ortsbruststützung	einschalig, wasserdicht	Ringspaltverpressung mit Mörtel
Festgestein	offene Schilde	einschalig	Ringspaltverpressung mit Mörtel
		zweischalig	Ringspaltverfüllung mit Mörtel in der Sohle bzw. Perlkiesverblasung in Ulme und Firste

Tab. 5.3: Ringspaltverfüllung bei Schildvortriebsmaschinen mit Tübbingauskleidung

Zur Ringspaltverfüllung gibt es zwei verschiedenen Verfahren. Die erste Möglichkeit ist direkte Mörtelverpressung durch die Öffnungen in den Tübbing, die andere Möglichkeit ist Verpressung durch Zuleitungen im Schildschwanzbereich.

- Verpressung durch Öffnungen in den Tübbing: die Verpressung erfolgt durch Öffnungen in den einzubauenden Tübbing. Die Öffnungen sind mit Gewindestutzen, die während des Setzens der Tunnelringe mit Stopfen verschlossen bleiben, oder mit integrierten Rückschlagventilen aus Kunststoff ausgerüstet. Die Zahl der Öffnungen hängt von der Fließfähigkeit des Materials ab. In der Regel wird nur eine Öffnung pro Tübbing

¹³⁷ Vgl. Maidl B.: Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb, S. 176-181.

eingebaut. Der Verpressvorgang erfolgt in Abschnitten (mindestens eine Ringbreite) über Schläuche an die Öffnungen, wobei spezielle Bürstendichtungen am Ende des Schildschwanzes das Eindringen von Verfüllmaterial in den Tunnel verhindern. Im Fall von standfestem Gebirge und Perlkiesblasung durch die Öffnungen kann mit der Verfüllung des Ringspaltens unmittelbar hinter der Tunnelvortriebsmaschine begonnen werden, so dass ein setzungsarmer Vortrieb möglich ist. Eingebaute Federbleche sollen dabei ein Eindringen des Perlkieses in den Steuerspalt verhindern (Abb. 6.18).¹³⁸ In der Regel geschieht die Verpressung von unten nach oben, wobei das Injizieren gleichzeitig in zwei entgegengesetzten Öffnungen erfolgt. Restliche Hohlräume infolge Absetzens des primären Ringraummaterials, besonders im Firstbereich müssen nachverpresst werden (siehe Kapitel 6.1.4.1).

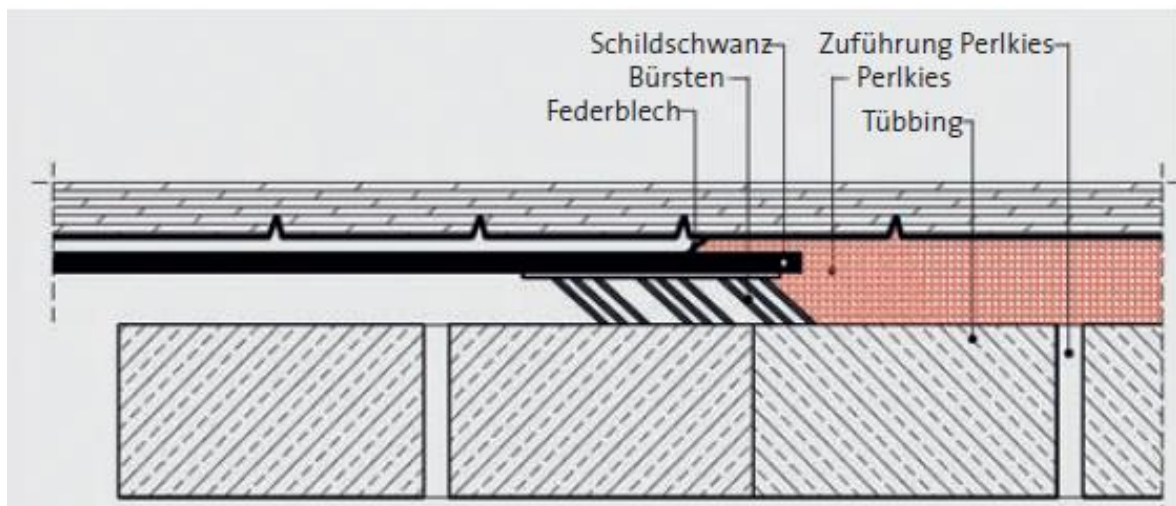


Abb. 5.17: Perlkiesverblasung durch den Tübbing im Festgestein¹³⁹

- Verpressung durch Lisenen im Schildschwanz: diese Alternative kommt zum Einsatz, wenn aufgrund der geologischen Bedingungen eine kontinuierliche Verpressung unmittelbar nach dem Einbau der Tübbinge nötig ist. Das System besteht aus vier bis acht Zuleitungen, die so genannten Lisenen, die ein kontinuierliches Verfüllen des Ringspaltens gewährleisten (Abb. 6.18, Abb. 6.19). Da im Firstbereich üblicherweise eine größere Menge an Mörtel eingebracht werden kann als an der Sohle, kann die Lisenenanordnung entsprechend angepasst werden und von einer regelmäßigen Verteilung über den Umfang abweichen. Die Injektion durch den Schildschwanz stellt dabei hohe Ansprüche an den Verpressmörtel hinsichtlich Abbindeverzögerung und Fließfähigkeit, da während eines Stillstandes der Maschine (Ringbau, Wartung, etc.) die Verpressleitungen nicht durch erhärtenden Mörtel

¹³⁸ Vgl. Thewes M. und Budach Ch.: Mörtel im Tunnelbau, S. 25.

¹³⁹ Quelle: Thewes M. und Budach Ch.: Mörtel im Tunnelbau, S. 25.

verstopft werden dürfen. Möglicherweise müssen die Leitungen während längerer Standzeiten freigespült und mit einem nicht erhärtenden Medium gefüllt werden, das vor der Fortsetzung des Vortriebs aus der Leitung zurückgeführt wird, um dann wieder mit Mörtel beschicht zu werden.¹⁴⁰

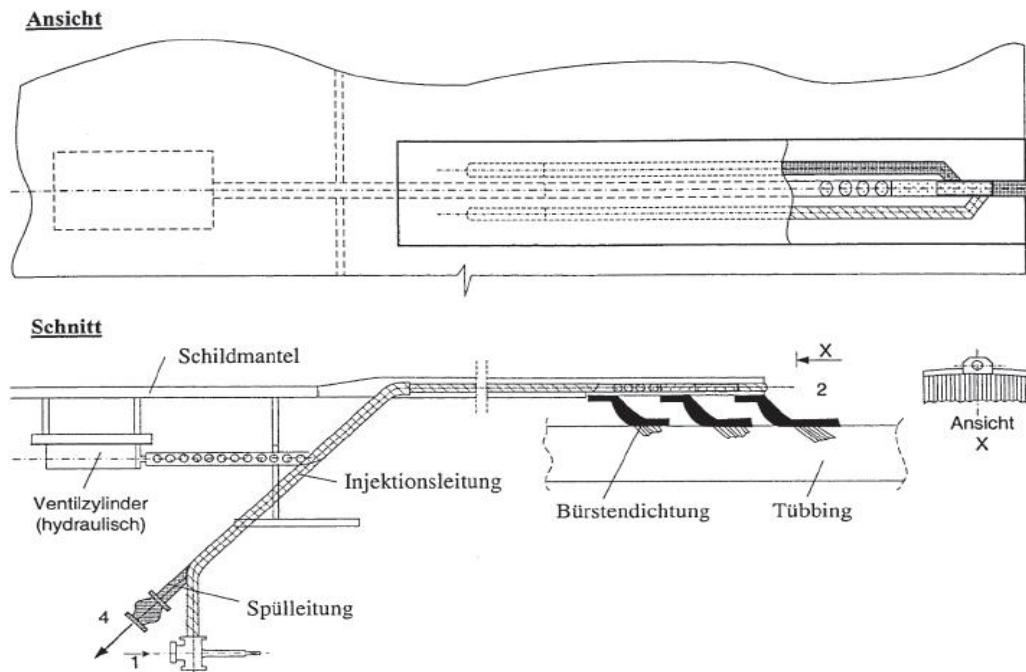


Abb. 5.18: Ringspaltverpresseinrichtung und Bürstendichtung¹⁴¹

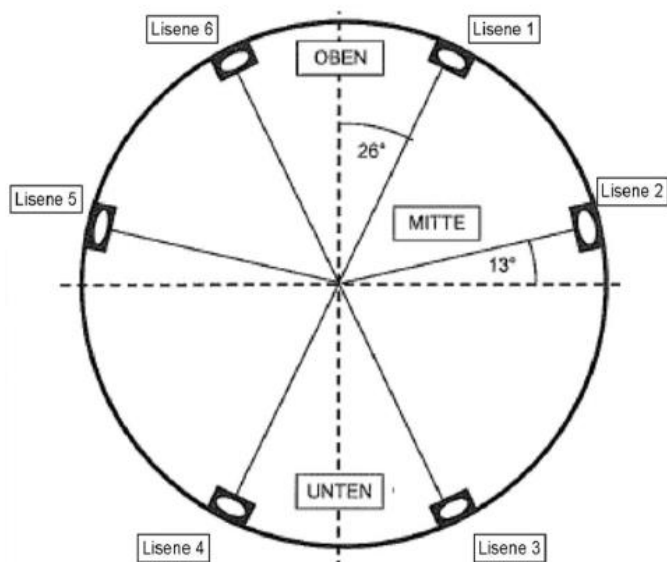


Abb. 5.19: Lisenenanordnung im Schildschwanzblech¹⁴²

¹⁴⁰ Vgl.: Girmscheid G.: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, S. 508.

¹⁴¹ Quelle: Girmscheid G.: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, S. 507.

Die Materialien zur Verfüllung des Ringspaltes müssen folgende Anforderungen und Funktionen erfüllen:

- Kraftschlüssige Bettung der Tübbinge
- Vermeidung oder Verminderung von möglichen Setzungen an der Oberfläche
- Gute Verarbeitbarkeit
- Hohe Stabilität
- Möglicherweise zusätzliche Abdichtung gegen Schicht- und Sickerwasser

Sie können in Ein-Komponenten- und Zwei-Komponenten-Systeme unterteilt werden:

- Ein-Komponenten-Systeme: zu unterscheiden sind zementhaltige und zementfreie Verpressgüter (Perlkies). Die zementhaltigen Injektionsmittel sind das am meisten verbreitete Verfüllmaterial beim Schildvortrieb. Es sind zwei Varianten zu unterscheiden: bedingt aktiver Verpressmörtel mit Zementanteil bis 200 kg/m^3 Frischmörtel (zementarme Mischung) und aktiver Verpressmörtel mit Zementanteil mehr als 200 kg/m^3 . Die übliche Zementarten sind: CEMI (Portlandzement), CEMII (Portlandkalksteinzement, Portlandhüttenzement), CEMIII (Hochofenzement). Als Zuschlagstoffe werden hauptsächlich Sande verwendet, da Sande eine gute Verarbeitbarkeit gewährleisten. Die maximale Größe der einzelnen Körner der Zuschlagstoffe ist an den Durchmesser der Verpressleitungen anzupassen. In der Praxis werden meist Mörtel eingesetzt, die bei Durchmessern der Verpressleitungen von 65 mm über ein Größtkorn von 8 mm verfügen. Die Zusatzstoffe können in hydraulische und puzzolanische (Flugasche, Quarzsand) sowie nichthydraulische Stoffe (Bentonit oder Kalksteinmehl) unterteilt werden. Durch die Zugabe von verschiedenen Zusatzstoffen können die Eigenschaften des Ringspaltmörtels beeinflusst werden. So kann z.B. die Zugabe von Bentonit die Verarbeitbarkeit des Mörtels verbessern. Neben Zusatzstoffen können auch Zusatzmittel die Eigenschaften des Ringspaltmörtels beeinflussen. So kann durch die Zugabe von geeigneten Zusatzmitteln die Verarbeitungsdauer erhöht oder die Mörtelstabilität gewährleistet werden. Für die Verwendung von zementfreien Mischungen gibt es zwei Hauptgründe: einerseits bei Stillständen durch Vortriebsunterbrechungen sind später zusätzliche Spüllmaßnahmen notwendig um die Entstehung von Verstopfungen in der Leitung zu verhindern. Bei Ringspaltmörteln ohne Zement ersetzen nicht-hydrierende Zugabemittel wie Quarzmehl, Kalksteinmehl oder Bentonit den sonst üblichen Zementanteil und verhindern daher ein

¹⁴² Quelle: Thienert, C.: Zementfreie Mörtel für die Ringspaltverpressung beim maschinellen Tunnelvortrieb, S. 7.

Hydrieren innerhalb der Verpresslinie. Andererseits bei standfesten Gebirgen, wo keine zusätzlichen Maßnahmen zum Druckausgleich an der Ortsbrust nötig sind (offene Schilde) besteht die Gefahr von Eindringen von Mörtel in der Abbaukammer. Aus diesen Gründen wird Perlkies in den Ringspalt verblasen. Der Porenraum der Kiesfüllung kann auch in einem anschließenden Arbeitsschritt mit Zementsuspension verfüllt werden, um so die Dränagewirkung des wasserdurchlässigen Ringspalts aufzuheben.

Zwei-Komponenten: um im Lockergestein den Forderungen nach guter Pump- und Verarbeitbarkeit sowie einer geringen Abbindezeit gerecht zu werden, sind Verpressmaterialien entwickelt worden, die aus 2 Komponenten bestehen. Beide Komponenten weisen eine flüssige Konsistenz auf, so dass sie getrennt bis kurz vor den Ringspalt gepumpt und erst dort vermischt werden können. Bei den beiden Komponenten handelt es sich einerseits um eine üblicherweise sandfreie Zement-Bentonit-Suspension mit einem Stabilisator (Komponente A) und andererseits um einen flüssigen Beschleuniger (Komponente B). Durch eine kurze Reaktionszeit der beiden Zugabestoffe entsteht im Ringspalt ein Gel, welches anschließend aushärtet. Durch Steuerung der jeweiligen Zugabemenge beider Komponenten kann die Reaktionszeit der Materialien und somit der Erstarrungsverlauf beeinflusst werden. Durch das Vermischen beider Komponenten an der Düse kurz vor Eintritt in den Ringspalt besteht allerdings unmittelbar nach Beendigung des Verfüllens an dieser Stelle die Gefahr einer Reaktion innerhalb des Leitungssystem und somit des Risikos der Verklebung bzw. Verstopfung. Dieses System hat sich daher bislang in der Praxis als sehr wartungsintensiv herausgestellt.¹⁴³

	Komponente A				Komponente B	
	Wasser	Bentonit	Zement	Stabilisator	Beschleuniger	Wasser
	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
2-K-Verpressmaterial [1]	742	46	482	4	89	7

Tab. 5.4: Rezeptur eines 2-K-Verpressmaterials [kg pro m³ Frischmörtel]

¹⁴³ Vgl. Thewes M. und Budach Ch.: Mörtel im Tunnelbau, S. 23- 25.

5.1.5 Schleierinjektion

Das Prinzip der Schleierinjektion besteht darin über Bohrungen durch ein undichtes Bauteil eine abdichtende Injektion mit Injektionsgel über Bohrpacker an der Bauteilaußenseite zu erzielen, die jedoch in statischer Hinsicht keine Verstärkung der Bauteile bewirkt. Das im flüssigen Zustand sehr niedrig viskose Gel breitet sich in dem Porengefüge des Baugrunds aus und verdrängt das dort vorhandene Wasser indem vor dem Bauteil ein Gel-Erdreich-Gemisch (Gelschleier) sich bildet, das den Wasserzutritt zur Konstruktion verhindert. Im Tunnelbau findet dieses Verfahren seine Verwendung bei der nachträglichen Abdichtung. Der Erfolg der Schleiervergelung hängt maßgeblich von dem Baugrund, der Injektionstechnologie und den Eigenschaften des Injektionsmaterials ab. Damit der gewünschte Abdichtungserfolg erreicht wird, müssen die unterschiedlichen Einflussgrößen aufeinander abgestimmt sein (Abb. 6.21).¹⁴⁴

Baugrund	Injektionstechnologie	Injektionsgel
Boden	Pumpe	im flüssigen Zustand
Porenanteil	Fördermenge	Reaktionszeit
Porengrößen	Förderkonstanz	zeitabhängige Viskosität
Durchlässigkeit	Konstanz des eingestellten Mischungsverhältnisses	Fließverhalten
Wassergehalt	Volumenstrom	Oberflächenspannung
Korngrößenverteilung	Injektionsdruck	im ausreagierten Zustand
Schichtenfolge	Packer	Verformbarkeit
Lagerungsdichte	Austrittsöffnung	Festigkeit
Temperatur	Innendurchmesser	Dichtigkeit
	Packerabstände	sonstige Eigenschaften
	Injektionsdauer	Quellfähigkeit
	Injektionsstufen	Synärese
		Beständigkeit
		Permeabilität

Abb. 5.20: Einflussfaktoren des Injektionserfolgs¹⁴⁵

Die Bodenparameter bestimmen, wie in allen anderen Fällen, die Injektionstechnologie und die Eigenschaften des Injektionsmittels. Zum Beispiel Tabelle 6.5 zeigt den Zusammenhang zwischen der Bodendurchlässigkeit und dem Packerabstand bei Acrylatgelinjektionen. Hierzu können folgenden Bemerkungen vorgetragen werden: einerseits steigt der Materialverbrauch mit zunehmendem Bohrlochabstand, weil je Bohrloch eine größere Wandfläche zu bedecken ist. Das führt, bedingt durch die allseitige (halbkugelförmige) Ausbreitung des Gels, zu einer größeren Dicke des Gelschleierst. Andererseits nehmen die Kosten für die Herstellung der Bohrungen ab. Als Faustregel gilt, dass bei schwierig zu

¹⁴⁴ Vgl. Firmenprospekt "Abdichtung mit Injektionsverfahren" der Firma DESOI, S. 8.

¹⁴⁵ Quelle: Bonk M.: Lufsky Bauwerksabdichtung, S. 482.

durchbohrenden Bauteilen mit großer Dicke oder eng liegender Bewehrung ein größerer Rasterabstand der Bohrlöcher zu bevorzugen ist, bei geringer Bauteildicke oder schwer injizierbarem Baugrund dagegen ein kleinerer. Das Verhältnis von Bohrlochabstand und die injizierter Materialmenge ist unter Berücksichtigung der geplanten Injektionstechnologie so zu gestalten, dass an den Überlappungsstellen der einzelnen Injektionskörper eine Dicke des Gelschleiers (Gel-Erdstoff-Gemisches) von 10 cm sichergestellt ist.¹⁴⁶

Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens	Klassifizierung des Bodens	Bohrraster/ Packerabstand
$k > 10^{-2}$ m/s	sehr stark durchlässig	ca. 50 – 100 cm
10^{-2} m/s $\leq k < 10^{-4}$ m/s	stark durchlässig	
10^{-4} m/s $\leq k < 10^{-6}$ m/s	durchlässig	ca. 30 – 50 cm
10^{-6} m/s $\leq k < 10^{-8}$ m/s	schwach durchlässig	
$k < 10^{-8}$ m/s	sehr schwach durchlässig	-

Tab. 5.5: Erfahrungswerte für Abstände der Bohrpacker bei einer bauteilnahen Abdichtungsinjektion mit Acrylatgel¹⁴⁷

Für den erfolgreichen Schleierinjektionsvorgang ist es wichtig den Injektionsdruck und die Fließgeschwindigkeit zu begrenzen, da sonst Gefügeveränderungen infolge Sufusion oder Aufreißen ergeben können. Solche Ereignisse sind unerwünscht, weil sie zur Vergrößerung des Hohlraumgehalts, bzw. der Durchlässigkeit des Bodens in der Umgebung der Injektionsstelle führen, was mit der Entstehung von Bereichen mit turbulenter Strömung zur Vermischung von Gel und vorhandenem Wasser verbunden ist. Eine solche Durchmischung verschlechtert unkontrolliert die Eigenschaften des ausreagierten Gels, in besonderen Fällen bis zur Unbrauchbarkeit der Abdichtung. Wasserabpressversuche müssen immer vorhanden sein um die beeinflussende Faktoren und Bedingungen miteinander angepasst zu werden.

Die wichtigsten Schwerpunkte, die bei der Planung berücksichtigt werden müssen, sind wie folgt:¹⁴⁸

- Festlegung des Bohrrasters: bestimmt sowohl den Abdichtungserfolg, als auch die Wirtschaftlichkeit der nachträglichen Abdichtung. Es muss meist ein Kompromiss zwischen

¹⁴⁶ Vgl. Bonk M.: Lufsky Bauwerksabdichtung, S. 481.

¹⁴⁷ Quelle: Firmenprospekt "Abdichtung mit Injektionsverfahren" der Firma DESOI, S. 8.

¹⁴⁸ Vgl. Bonk M.: Lufsky Bauwerksabdichtung, S. 489- 490.

Bohraufwand und erforderlicher Materialmenge gefunden werden. Böden mit geringer Durchlässigkeit erfordern wegen der eingeschränkten Reichweite der Injektion meist ein enges Bohrraster.

- Wahl des Injektionsmaterials: entscheidende Charakteristik ist die Reaktionszeit. Die Fließeigenschaften des gewählten Materials und die Oberflächenspannung wirken sich auf das Injektionsergebnis aus. Bestehen keine besonderen Anforderungen, sollte ein Material verwendet werden, mit dessen Verarbeitung das ausführende Unternehmen vertraut ist. Am meistens werden Gele auf Polyurethan- oder Acrylatbasis verwendet.
- Packergeometrie: die Packer müssen mit ihrer Geometrie das Einbringen der erforderlichen Mengen des Gels in der vorgesehenen Zeit ermöglichen. Es soll kein großer Druckverlust am Packer entstehen und die Fließgeschwindigkeit darf nicht so weit ansteigen, dass der Packer als Düse wirkt und Gefügeveränderungen im Boden verursacht. Diese Anforderungen werden erfüllt, wenn der Innendurchmesser der Packer mindestens 6 mm beträgt. Die Verschlussstücken oder Anschlussnippel dürfen den Durchfluss nicht reduzieren.
- Anzahl der Injektionsstufen: im einfachsten Fall wird die gesamte für ein Bohrloch vorgesehene Gelmenge in einer Injektionsstufe, also in einem kontinuierlichen Prozess in den Baugrund gebracht. Dabei entsteht in gut injizierbarem Boden ein annähernd halbkugelförmiger Injektionskörper. Der Gelschleier erreicht bei dieser Technologie eine größere Maximaldicke, als es für die Abdichtung erforderlich wäre (Abb. 6.22).

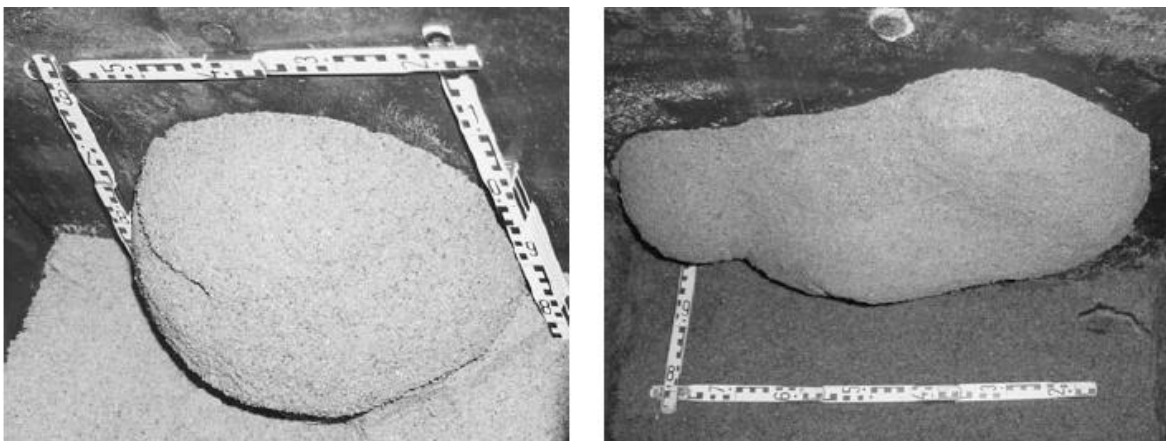


Abb. 5.21: Ausbildung des Gelschleiers in Abhängigkeit von der Anzahl der Stufen; links: 1-Stufeninjektion, rechts: 2-Stufeninjektion¹⁴⁹

¹⁴⁹ Quelle: Bonk M.: Lufsky Bauwerksabdichtung, S. 489.

Wirtschaftlicher wäre es die Gelmenge auf mehrere Injektionsstufen aufzuteilen. Nach Injektion der ersten Stufe reagiert das Gel aus. Der entstandene Injektionskörper bildet ein Widerlager, an dem das Gel der folgenden Injektionsstufe parallel zur Bauwerksaußenfläche vorbei strömt. Durch die Mehrstufeninjektion vergrößert sich bei gleicher Gelmenge die bedeckte Wandfläche, der spezifische Materialverbrauch sinkt.

- Reaktionszeit des Materials: muss größer sein als die Injektionszeit einer Injektionsstufe. Dadurch wird sichergestellt, dass sich kein Fließwiderstand durch Aushärtung des Gels während der Injektion aufbaut. Die Reaktionszeit soll die Injektionszeit aber nicht wesentlich überschreiten, um unkontrollierte Verlagerungen des injizierten Gels auszuschließen.
- Verpressmengen: die erforderliche Gelmenge wird auf der Grundlage des zugänglichen Porenraumes im Boden und des anteiligen Volumens des Injektionskörpers je Bohrloch festgelegt. Die Menge muss während der Injektion für jedes Bohrloch und jede Injektionsstufe ermittelt werden. Der sichtbare Materialaustritt aus benachbarten Packern bei der Injektion ist kein geeignetes Maß zur Festlegung der Injektionsmenge.
- Volumenstrom und Injektionsdruck: der Volumenstrom bei der Injektion sollte vorgegeben werden, um den Injektionsdruck zu begrenzen und ein Aufreißen des Bodens zu vermeiden. Auf der Grundlage der Druckmessung unmittelbar am Packer muss der Volumenstrom ggf. korrigiert werden.

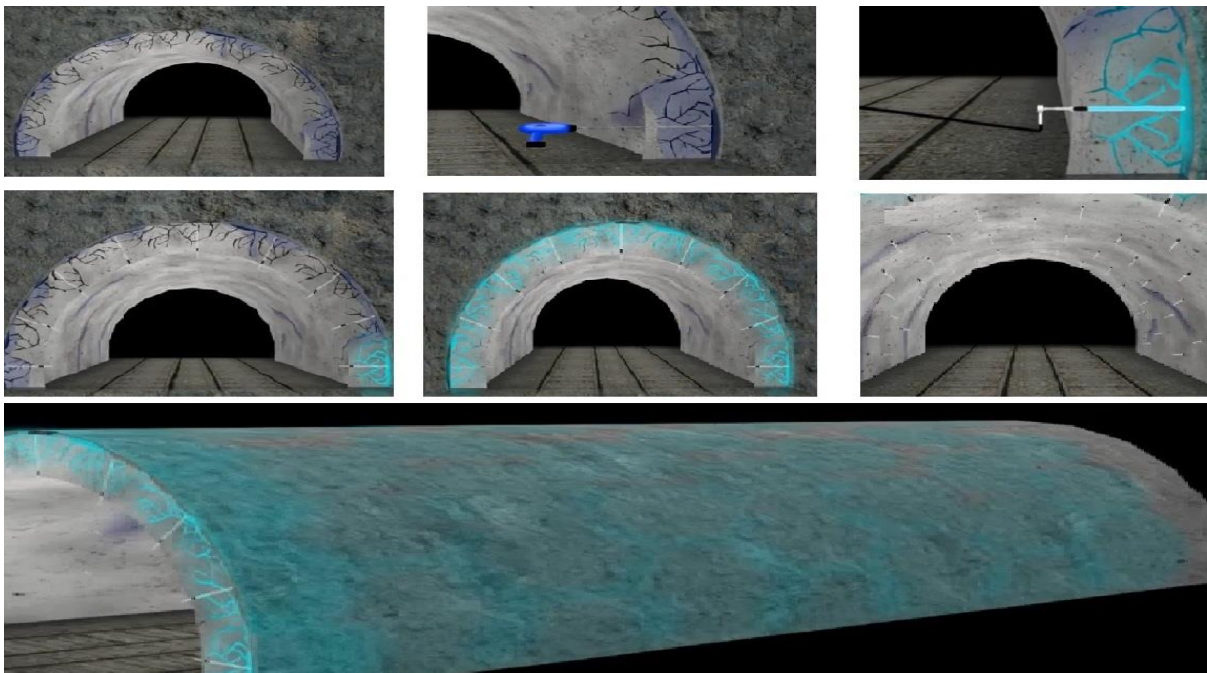


Abb. 5.22: Technologiestufen bei Schleierinjektionen im Tunnelbau¹⁵⁰

¹⁵⁰ Quelle: <https://www.youtube.com/watch?v=jCKYSBKHWto>

5.2 Offene Bauweise

Bei der offenen Bauweise wird der Tunnel durch Aushub des Bodens von der Oberfläche hergestellt. Das ist möglich bei geringen Überdeckungen und wenn ausreichend Platz zur Verfügung steht, was immer schwerer in den innerstädtischen Bereichen wird.

Beim Ausbau in offener Bauweise, wenn natürliche Böschungen nicht möglich sind, kommen verschiedene Arten von Verbaukonstruktionen zum Einsatz: Schlitz-, Bohrpfahl-, Spund- und Trägerbohlwand mit oder ohne Verankerung. Je nach den geotechnischen Bedingungen, können die Verbauwände als permanente Bauwerkswände (bei einschaligen Konstruktionen) oder als temporäre Baugrubenumschließungen (wie bei den zweischaligen Konstruktionen) dienen. Ihre Hauptaufgabe ist die Erd- und Wasserdrücke aufzunehmen.

Das Anwendungsgebiet der Injektionsarbeiten bei offener Bauweise ist beschränkter als beim Untertagebau. Die Technologie der Sanierung von Rissen und die Ausführung von Fugen von Betonelementen sind praktisch das Gleiche wie bei der geschlossenen Bauweise. Nachfolgend werden nur einige spezifische Fälle der Injektionsarbeiten beschrieben.

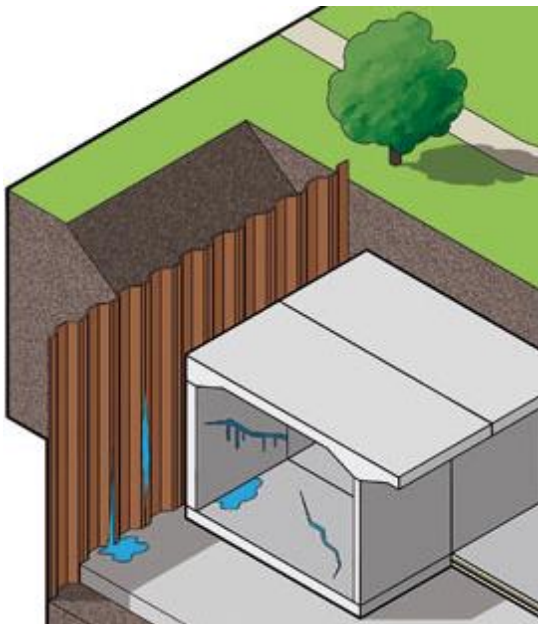


Abb. 5.23: Undichte Fehlstellen bei offener Bauweise¹⁵¹

¹⁵¹ Quelle: Firmenprospekt „Abdichtung im Tunnelbau“ der Firma „Rascor“

5.2.1 Injektionsarbeiten als zusätzliche Abdichtungsmaßnahmen bei Baugrubenwände

Verschiedene Faktoren können zur Entstehung von Fehlstellen bei den verschiedenen Verbaukonstruktionen führen. Unvorgesehene hydro-geologische Bedingungen, existierende Kanäle und Leitungen, zufällige technische Probleme mit Ausrüstung und Geräte usw. verlangen zusätzliche Maßnahmen, die die weitere Projektausführung problemlos erlauben. In den nächsten Punkten werden mögliche Probleme bei den verschiedenen Arten von Verbauwänden diskutiert und passende Lösungen mit Hilfe der Injektionstechnik werden beschrieben.

5.2.1.1 Schlitzwände

Wenn die Schlitzwandtrasse durch Kanäle oder Leitungen gekreuzt wird, muss die Wand an diesen Stellen unterbrochen werden. Die entstandene Lücke kann mit Injektionen geschlossen werden (Abb. 6.25). Je nach den geologischen Bedingungen kann der Injektionskörper nach dem Düsenstrahlverfahren (siehe Punkt 7.3 Düsenstrahlverfahren), Soilfracverfahren (siehe Punkt 7.4 Hebungsinjektionen) oder Manschettenrohrverfahren hergestellt werden. Es ist wichtig die genaue Lage der Leitungen zu wissen, sonst können Injektionen mit hohen Drücken in der Nähe zu Schäden führen.

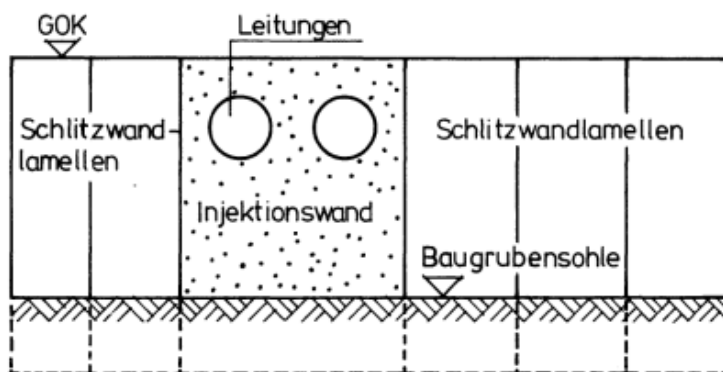


Abb. 5.24: Bereichsweiser Ersatz der Schlitzwand durch eine Injektionswand¹⁵²

Eine andere Anwendungsmöglichkeit der Injektionsarbeiten bezüglich der Herstellung von Schlitzwänden ist beim Vorhandensein von tiefliegenden Findlingen, die nicht vollständig entfernt werden können. Wegen der Gefahr von örtlichen Geländebrüchen, verursacht durch teilweise Zerstörung des Findlings beim Aushub, sind zusätzliche Sicherungsmaßnahmen nötig. Folgende Vorgehensweise wird empfohlen:

¹⁵² Quelle: Schnell W., Verfahrenstechnik zur Sicherung von Baugruben, 1995, S. 199.

- der Schlitz wird bis zum Findling ausgehoben und betoniert;
- Injizieren die Umgebung um den Findling, einschließlich bis in eine Tiefe, die der vorausgesehenen Tiefe des Schlitzes entspricht;
- Zerstörung den Findling im Schlitzbereich anhand Meisseleinsatz;
- Aushub und seitliche Schalungsmontage;
- Verdichtung des Bodens bis zum geplanten Aushubniveau und Herstellung der restlichen Wand, danach Entfernung der Schalung.

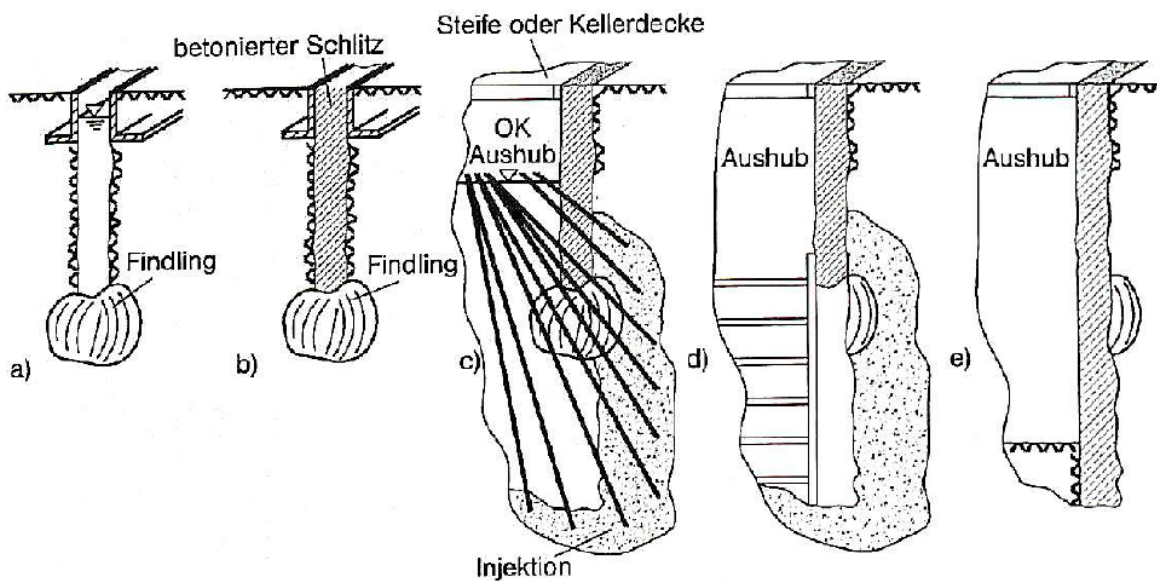


Abb. 5.25: Beseitigungsschritte beim Vorhandensein von Findlingen¹⁵³

5.2.1.2 Spundwand

Die Spundwandschlösser werden als Schwachstelle hinsichtlich der Dichtigkeit gesehen. Wenn Wassereinträge daraus folgen, die die anderen Arbeiten behindern, sind zusätzliche Maßnahmen notwendig. Die einzige Möglichkeit einer ausreichenden Abdichtung ohne die Spundbohlen zu ziehen sind Injektionen hinter der Spundwand im Bereich der Schlösser. Sie werden unter niedrigem Druck nach den Manschettenrohrverfahren ausgeführt.

Bei extremen Wassereinträgen ist zweckmäßig die 2-Komponenten-PU-Harze zu verwenden, obwohl ihr Preis höher im Vergleich zu den hydraulischen Injektionsmittel ist. Bei nicht so extremen Wassereinträgen sind die 1-Komponentenharze bevorzugt, die sofort bei Wasserkontakt reagieren. Zementinjektionen werden eingesetzt, wenn der Wasserandrang

¹⁵³ Quelle: Trintafyllidis T.: Planung und Bauausführung im Spezialtiefbau, S. 72.

gering ist, oder wenn das Schadensbereich groß ist und PU-Harze nicht geeignet sind, aufgrund der lokalen Beeinträchtigung des pH-Wertes.

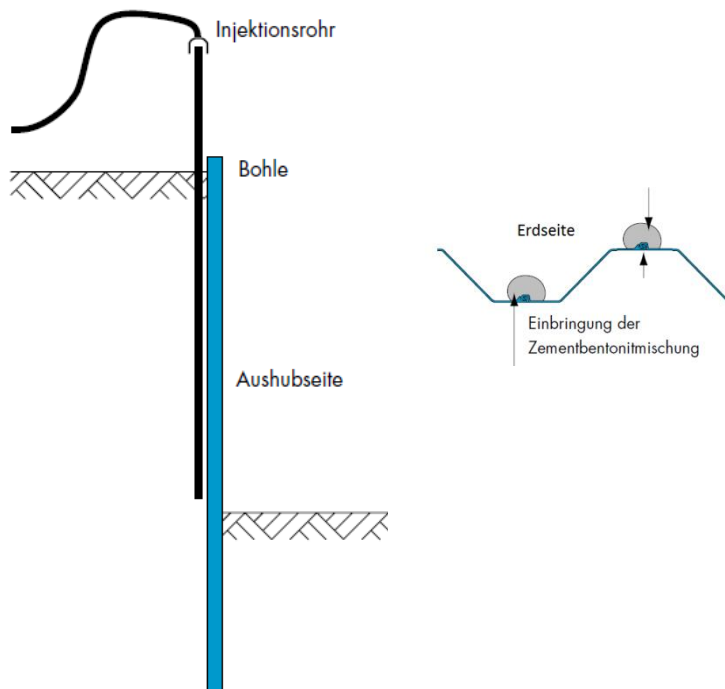


Abb. 5.26: Injektionen hinter der Spundwand¹⁵⁴

5.2.1.3 Bohrpfahlwand¹⁵⁵

Als Zusatzmaßnahmen bei den Bohrpfahlwänden können Fuß- und Mantelverpressungen ausgeführt werden. Einerseits verbessern sie die Setzungseigenschaften, andererseits können sie zu einer Optimierung der Anzahl der Pfähle, des Pfahldurchmessers und –länge führen.

Durch Fußverpressung wird der Spitzenwiderstand erhöht, womit eine Reduktion der Setzungen erzielt wird. Für die Ausführung von Fußverpressung muss eine Metallplatte mit zwei Injektionsleitungen, die bis über GOK führen, am erdseitigen Ende des Bewehrungskorbes montiert werden. *Nach dem Erhärten des Pfahlbetons wird über einer der beiden Leitungen die Blase mit Zementschlämme ausgepresst, während durch die zweite Leitung, die im System vorhandene Luft aus der Blase entweichen kann. Da die Blase im Normalfall die ganze Querschnittsfläche des Pfahles innerhalb der Verrohrung abdeckt,*

¹⁵⁴ Quelle: <http://spundwand.arcelormittal.com/uploads/files/bf53b670b0f559fb59a34a14d0b8e1ee.pdf>

¹⁵⁵ Vgl.: Bärthel U., Dausch G.: Einsatz der Injektionstechnik im Spezialtiefbau, S. 23- 29.

wird bei der Injektion die Pfahlaufstandsfläche mit dem Flüssigkeitsdruck vorbelastet und verdichtet. Je höher der Einpressdruck wird, desto mehr hebt das Pfahl ab. Beim Platzen des Blasens dringt die Zementschlämme in den anstehenden Boden ein, wobei vergrößert sich die Aufstandsfläche des Pfahls.

Die Mantelverpressung erhöht die Mantelreibung, was zur Reduktion des Pfahldurchmessers führen kann. Das am häufigsten eingesetzte System besteht aus PE-Schläuchen mit einem Manschettenventil. Die Injektionsleitung wird auf der Innenseite des Bewehrungskorbes montiert. Nach Erstarren des Pfahlbetons wird mittels Hochdruckwasserinjektion (bis 80 bar) das Beton örtlich aufgerissen, sodass Zementsuspension verpresst werden kann. Neben der Wahl des Drucks ist auch auf der Wahl des Injektionsmittels zu achten, um eine ausreichende Eindringtiefe zu erzielen, was entscheidend für die Mantelflächenvergrößerung ist.

Injektionsarbeiten können als auch zusätzliche Maßnahmen bei Feststellung von Fehlstellen bei den Bohrpfählen verwendet werden. Folgende drei Fälle sind möglich (Abb.):

- Bei Setzungen infolge Auflockerung im Fußbereich können Manschettenrohren eingesetzt werden und durch eine Poreninjektion eine Stabilisierung erzielt zu werden (Fall a).
- Falls eine Fehlstelle im Pfahl festgestellt werde, können Bohrungen ausgeführt werden, die durch Packer injiziert werden (Fall b).
- Falls Bohrschlamm im unmittelbaren Fußbereich des Pfahls festgestellt werde, werden Bohrungen durch die Beschallungsrohre bis in den tragenden Baugrund niedergebracht und injiziert (Fall c).

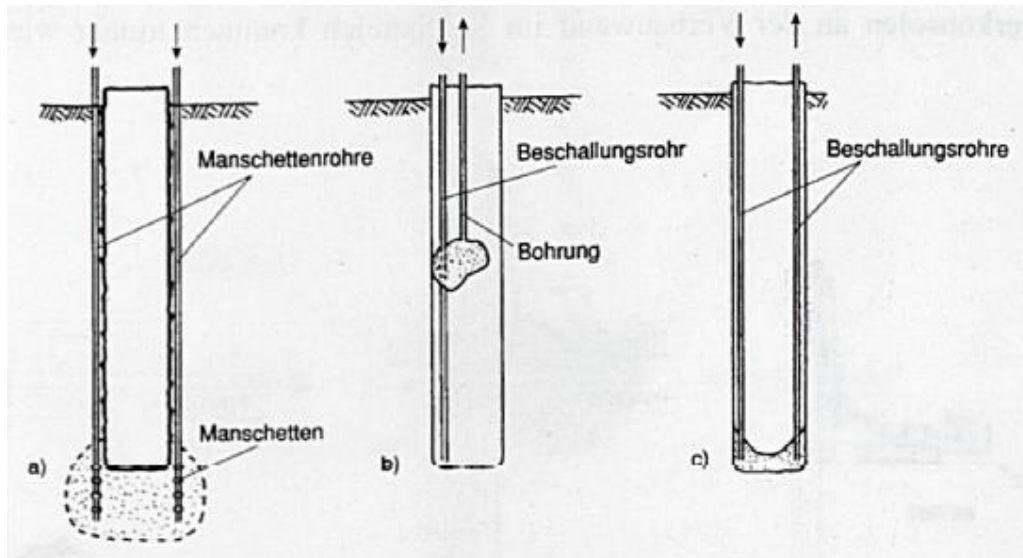


Abb. 5.27: Zusätzliche Injektionsmaßnahmen bei Pfahlfehlstellen¹⁵⁶

5.2.2 Injektionssohlen

Eine mögliche Lösung für die Wasserhaltung bei hochliegende Grundwasserspiegel ist die Errichtung einer so genannten Injektionssohle. In einer Kombination mit Spund-, Schlitz- oder Bohrpfahlwand kann diese Baumaßnahme zu einer wesentlichen Reduktion des Wassers in der Baugrube führen. Die Idee ist es von der ursprünglichen Geländeoberkante nach der Herstellung der seitlichen Baugrubenumschließung eine dichte Injektionssohle auszuführen, die als Abschließung der vertikalen Abdichtung dient. Die Notwendigkeit von solcher Lösungen wird durch Pumpversuche überprüft, deren Ergebnisse an gepumpten Wassermengen, erforderlicher Zeit für die Wiederanstieg des Grundwasserspiegels nach Abstellen des Pumpens und der Grundwasserspiegel außerhalb des Troges als Indikatoren für zusätzliche Abdichtungsmaßnahmen dienen. Es sind hochliegende und tiefliegende Injektionssohlen zu unterscheiden.

5.2.2.1 Hochliegende Injektionssohlen¹⁵⁷

Sie werden anhand der Technologie der Hochdruckinjektionen (siehe Punkt 7.3 Düsenstrahlverfahren) hergestellt, meistens in den Dicken von eins bis zwei Meter. Wegen der Auftriebskraft muss die Sohle auch in vertikaler Richtung mit Zugpfählen verankert werden. Die Abfolge der Tätigkeiten ist folgende (Abb. 6.25):

¹⁵⁶ Quelle: Einsatz der Injektionstechnik im Spezialtiefbau, S. 29.

¹⁵⁷ Vgl. Kolymbas D., Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, 2011, S. 389- 391.

- Errichtung der Verbaukonstruktion
- Errichtung der hochliegenden DSV- Sohle
- Verankerung der Sohle
- Lenzen
- Aushub

Oberhalb der DSV-Sohle muss eine Sandschicht ca. 1,5 m dick belassen werden, die einerseits das Ausspülen von Sand bei eventuellen Undichtigkeiten der Sohle verhindert und andererseits das Anlegen von Pumpensümpfen ermöglicht. Die Verankerung der Sohle erfolgt durch GEWI-Pfähle in einem Rasterabstand von 2,5 bis 3 m. Sie werden entweder in vorgebohrte Bohrlöcher gelegt und danach wird der Ringspalt mit Zementschlämme verfüllt oder die GEWI-Stäbe werden in noch nicht abgebundene DSV-Säulen installiert. So entsteht eine kraftschlüssige Übertragung zum umliegenden Boden und zur Injektionssohle.

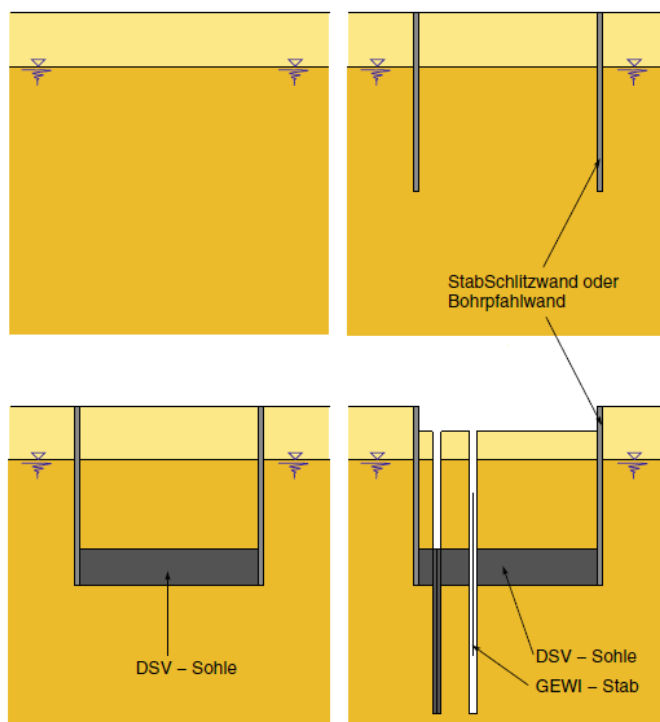


Abb. 5.28: Schritte zur Errichtung einer hochliegenden Injektionssohle¹⁵⁸

¹⁵⁸ Quelle: Kolymbas D., Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, 2011, S. 391.

5.2.2.2 Tiefliegende Injektionssohlen¹⁵⁹

Bei der tiefliegenden Injektionssohle wird die wasserundurchlässige Schicht aus Zement- und/oder Kunststoff suspension, meistens Weichgel mit Verpressdrücken zwischen 7 und 10 bar hergestellt. Die Bohrungen sind nach der Spülbohrverfahren erzielt. Dann ein System, aus Injektionsschlauch (Durchmesser 18 mm), an dessen Ende ein Rohr mit montiertem Ventil in das Bohrloch händisch eingeführt wird. Im Grundriss werden die Injektionsrohre auf ein Raster von gleichseitigen Dreiecken angeordnet. Wie bei allen anderen Injektionsarten gilt hier auch das Zusammenspiel zwischen großem und kleinem Rasterabstand, bzw. kleinem Bohraufwand oder niedrigem Injektionsaufwand. Als optimal werden Rasterabständen zwischen 1,2 und 1,6 m angesehen. Wenn Niederdruckinjektionen nicht durchführbar sind, können auch Hochdruckinjektionen verwendet werden. Es wird bevorzugt Injektionsgut mit geringer Festigkeit (z. B. Gele) verwenden, da es hierbei hauptsächlich um Abdichtung und nicht um Festigkeit geht.

Die Grundidee bei den tiefliegenden Injektionssohlen ist die Erzielung von hinreichendem Widerstand gegen Auftrieb und hydraulischen Grundbruch anhand des Bodeneigengewichts. Das bedeutet, dass in diesem Fall die Sohle nicht so dick wie bei der hochliegenden Injektionssohle werden muss, wobei aber die bleibende Bodenschicht oberhalb der Sohle als Hauptkomponente für die Widerstand gegen Auftrieb gilt und seine Dicke x muss berechnet werden.

$$x \geq \frac{\eta \cdot \gamma_w \cdot (h_3 - h_1) - \gamma \cdot h_4 - \gamma_i \cdot h_2 + \gamma_r \cdot (h_2 + h_4)}{\gamma_r - \eta \cdot \gamma_w} \quad (6.1.)$$

γ : Feuchtraumgewicht

γ_r : das Raumgewicht des gesättigten Erdstoffs

$\gamma_i \approx \gamma_r$: das Raumgewicht des injizierten Bodens

η : Sicherheitsbeiwert

¹⁵⁹ Vgl. Kolymbas D., Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, 2011, S. 390- 393.

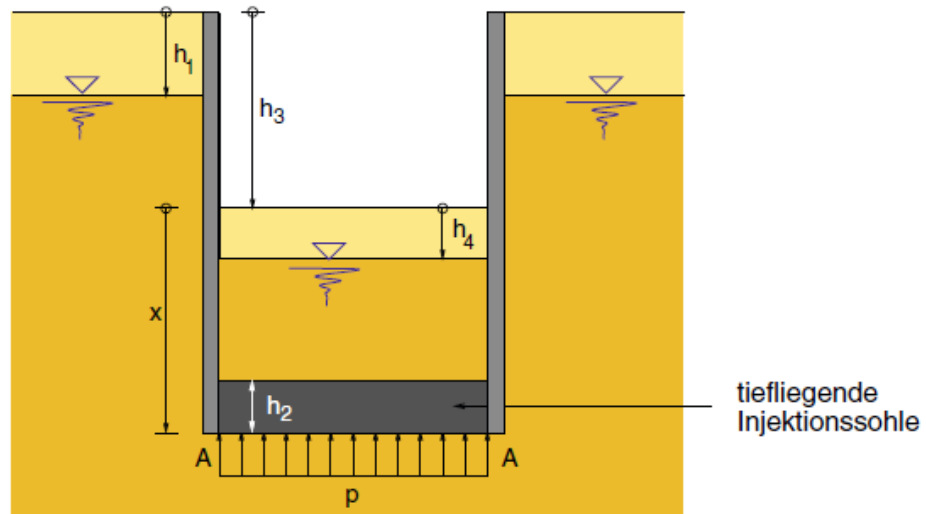


Abb. 5.29: Berechnung die Dicke der Bodenwiderstandsschicht¹⁶⁰

¹⁶⁰ Quelle: Kolymbas D., Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, 2011, S. 393.

6 Verfestigungsinjektionen im Tunnelbau

Die Gruppe der Verfestigungsinjektionen im Tunnelbau ist groß und umfasst verschiedene Verfahren und Mechanismen. Als Sicherungsmaßnahmen kommen Injektionen meistens in einer Kombination mit Stahlgliedern vor, aber auch als selbständige Maßnahmen finden sie ihre Anwendung bei der Lösung verschiedener Probleme.

6.1 Ankersysteme

Die Sicherung mit Ankern in Kombination mit Spritzbeton ist eine der meist verwendeten Methoden zur Gebirgssicherung beim Tunnelvortrieb. Es gibt verschiedene Ankersysteme, die sich verschiedenartig den technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Aspekten anpassen. Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale von Ankern, um das bestgeeignete System bestimmen, sind:

- Form und Werkstoff des Ankerschaftes: Vollstab-, Rohr-, Seil- oder Bündelanker; Stahlanker und glasfaserverstärkte Kunststoffanker
- Art des Verbundelementes: Mörtel-, Spritz- und Reibrohranker (Swellex-Anker)
- Lastaufnahme: schlaffe, verspannte und vorgespannte Anker
- Wirkungsdauer: Daueranker zur Sicherung eines Einschnittes und temporäre Anker zur Baugrubensicherung und Felssicherung beim Tunnelvortrieb

Im Tunnelbau und Bergbau wird hauptsächlich von *Gebirgsankern* gesprochen. Nach *DIN 21521* das sind Bauteile, die in Bohrlöchern im eingebauten Zustand durch Aufnahme von Zugkräften oder von Zug- und Scherkräften Gebirgsteile miteinander oder Konstruktionselemente mit dem Gebirge verbinden. Dadurch wird die Tragwirkung des Gebirges verstärkt. Im Tunnelbau kommen folgenden Arten von Gebirgsankern zum Einsatz:¹⁶¹

- Mechanische Anker: Schlitz-, Spreizhülsen- und Keilanker
- Verbundanker mit Verbundwirkung über die gesamte Ankerlänge (Vollverbundanker) oder nur im Endbereich (Verpressanker)
- Reibungsanker über die gesamte Ankerlänge

In Bezug auf die Injektionstechnik sind die Verbundanker von Interesse, wobei das Verbundelement Zementmörtel oder Kunstharz sein kann. Die Kunstharzanker (Klebeanker)

¹⁶¹ Vgl. Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 228.

werden weiter nicht erläutert, weil es dabei nicht um Injektionen geht, sondern um Verwendung von Patronen.

Bei Vollverbundanker erfolgt der Injektionsvorgang entweder vor oder nach dem Einsetzen des Ankers (auch SN-Anker, siehe Abb. 7.1). Zum Verhindern von Mörtelabfließen wird ein W/B-Wert von ca. 0,35 empfohlen. Es ist sehr wichtig, dass der Anker satt im Mörtel sitzt, um nach dem Erhärten im Verankerungsbereich die Zugkräfte ins Gebirge einzuleiten. Durch den abgebundenen Mörtel wird der Verbund mit dem Gebirge über die gesamte Ankerlänge erzeugt.

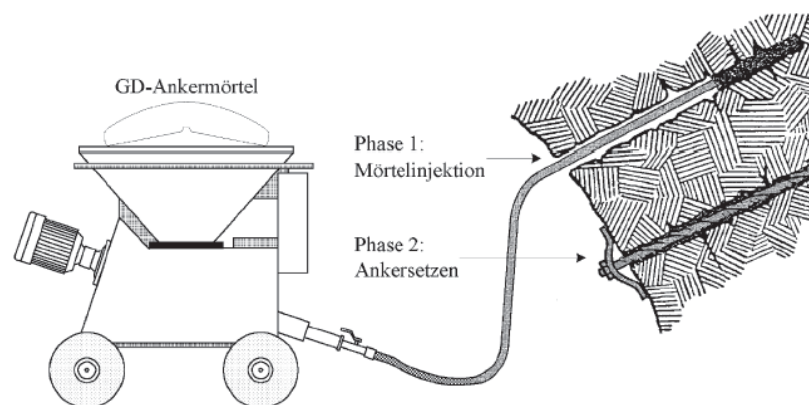


Abb. 6.1: Setzen eines Füllmörtelankers¹⁶²

Eine andere Möglichkeit das Bohrloch zu injizieren ist die Verwendung von Selbstbohrankern (Injektionsanker), die mit einer Bohrkronen versehen sind. Diese Anker werden unverrohrt mit drehschlagenden Bohrhämmern gebohrt und verbleiben nach dem Bohrvorgang im Bohrloch. Während des Bohrvorgangs wird eine dünne Zementsuspension eingepresst, die zur Stabilisierung des Lochs dient und wenn das Bohrloch fertig wird beginnt die eigentliche Verpressung über einen Injektionsadapter.

Verpressanker bestehen aus einem Stahlzugglied, einem Ankerkopf und einem Verpresskörper und besitzen unbedingt eine verbundfreie Teilstrecke, damit das Zugglied in Längsrichtung frei beweglich ist (Abb. 7.2).

¹⁶² Quelle: Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 229.

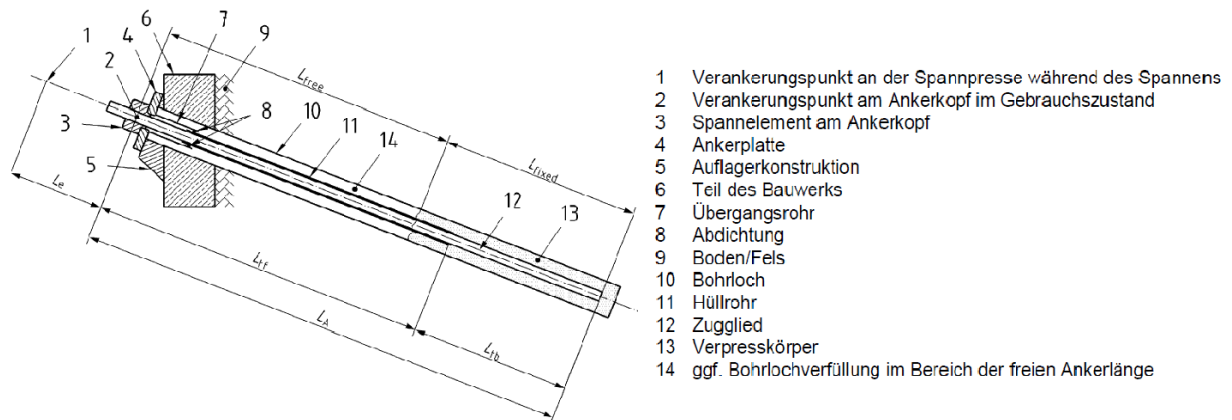


Abb. 6.2: Schema eines Verpressankers¹⁶³

Nach dem Erhärten des Verpresskörpers wird das Stahlglied (Vollstab oder Seil) vorgespannt. Die dadurch erzeugte Ankerkraft wirkt aktiv auf den verankerten Erdkörper, d.h. es wird keine Verschiebung des Erdkörpers zur Aktivierung des Verpressankers benötigt. Es ist sehr wichtig, ob der Anker als Kurzzeit- oder als Daueranker eingesetzt wird, da die Korrosionsschutzanforderungen an Daueranker wesentlich höher sind (Tab. 7.1).

	Kurzzeitanker	Daueranker
Ankerkopf	<ul style="list-style-type: none"> • Schutzanstrich oder Schutzkappe • Überschubrohr oder Schutzanstrich im Bereich zwischen Ankerplatte und Hüllrohr in der freien Stahllänge • Abdichtung des luftseitigen Endes des Hüllrohrs in der freien Stahllänge 	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanisch widerstandsfähige Schutzkappe • Auspressen der Schutzkappe mit Korrosionsschutzpaste • Schutzanstrich der Stahlteile • Mit Korrosionsschutzpaste ausgefülltes Überschubrohr am Übergangsbereich zwischen Ankerplatte und Hüllrohr der freien Stahllänge, fest mit der Ankerplatte verbunden, gegen das Hüllrohr abgedichtet
Freie Stahllänge	<ul style="list-style-type: none"> • Hüllrohr aus Kunststoff (PP- oder PE-Rohr), Wandstärke ≥ 2 mm oder	<ul style="list-style-type: none"> • Hüllrohr aus Kunststoff entsprechend den Festlegungen im Zulassungsbescheid

¹⁶³ Quelle: DIN EN 1537: 2013, S. 6.

	<ul style="list-style-type: none"> • Schrumpfschlauch mit einer Wanddicke ≥ 1 mm (wenn Innenseite mit Korrosionsschutz beschichtet) oder ≥ 5 mm (wenn keine Innenbeschichtung vorhanden) <p>oder</p> <ul style="list-style-type: none"> • werksmäßig aufgebraute Kunststoffbeschichtung mit einer Dicke $\geq 1,5$ mm • Abdichtung des bergseitigen Endes des Hüllrohres mit Dichtungsband, durch Ausschäumen oder mit Ringdichtung (falls erforderlich) 	<ul style="list-style-type: none"> • Auspressen des Ringraumes zwischen Stahl und Hüllrohr mit Korrosionsschutzpaste <p>oder</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anordnung eines zweiten (inneren) Kunststoffrohres, bei dem der Ringraum zwischen Stahl und Rohr mit Zementstein ($d \geq 5$ mm) ausgefüllt ist. Äußeres und inneres Kunststoffrohr müssen gegeneinander frei beweglich bleiben
Verankerungslänge	<ul style="list-style-type: none"> • Zementsteinüberdeckung ≥ 20 mm im Lockergestein und ≥ 10 mm in trockenem Fels 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei Verbundankern: geripptes Kunststoffrohr, bei dem der Ringraum zwischen Stahl und Rohr mit Zementstein (≥ 5 mm) ausgefüllt ist. • Bei Druckrohrankern: geripptes Stahldruckrohr, bei dem der Ringraum zwischen Ankerstahl und Druckrohr mit Korrosionsschutzpaste ausgefüllt ist. • Zementsteinüberdeckung des gerippten Kunststoffrohres bzw. Druckrohres ≥ 10 mm

Tab. 6.1: Korrosionsschutz bei Kurzzeit- und Dauerankern¹⁶⁴

Die Herstellung von Verpressankern erfolgt in drei Hauptschritten:

- Bohren
- Ankereinbau und Verpressen
- Spannen und Festlegen

¹⁶⁴ Quelle: GRUNDBAU-TASCHENBUCH Teil 2: Geotechnische Verfahren, S. 313.

Nach der Fertigstellung des Bohrlochs wird der Anker in dem gereinigten Bohrloch eingebaut und die Zementsuspension eingebracht. Im Unterschied zu den vertikal nach unten ausgeführten Verpressankern, die solange verfüllt werden, bis die Suspension am Bohrlochmund austritt und der Suspensionsspiegel nicht mehr absinkt, wird bei steigenden Ankern, was im Tunnelbau meist der Fall ist, anderes verfahren. Die Verpresslänge wird zur Luftseite hin durch Packer abgeschlossen. Das Verpressen erfolgt durch ein den Packer durchdringendes Verpressrohr. Während des Verpressens muss die Verpressstrecke durch ein weiteres Rohr am höchsten Punkt entlüftet werden (Abb. 7.3).

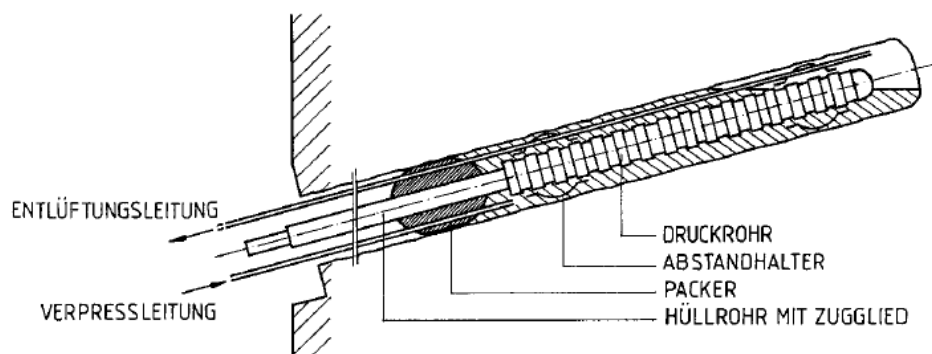


Abb. 6.3: Herstellung eines Ankers „über Kopf“¹⁶⁵

Als Injektionsmittel kommen Suspensionen mit W/B-Wert zwischen 0,35 und 0,70 zum Einsatz. Dabei ist zu beachten, dass Suspensionen mit einem W/B- Wert über $W/B = 0,5$ nur in nichtbindigen Böden eingesetzt werden, die in der Lage sind, beim Verpressvorgang Wasser abzufiltern. In bindigen Böden und Fels sollte der W/B-Wert möglichst niedrig gewählt werden und kleiner als $W/B = 0,45$ sein. Bei W/B- Werten unter 0,40 können Probleme bei der Förderung der Suspension durch die Verpressleitungen auftreten.

Zur Erhöhung der Tragfähigkeit des Verpresskörpers, besonderes bei bindigen Böden können Nachverpressungen etwa einen Tag nach der Erstverpressung durchgeführt werden. Dabei werden die radialen Verspannungen des Verpresskörpers erhöht und durch Vergrößerung einzelner Bereiche des Verpresskörpers wird der Formschluss verbessert. Eine Erhöhung der Tragfähigkeit von bis zu 30% ist dadurch möglich. Die Nachverpressung erfolgt über eine oder mehrere zusammen mit dem Zugglied eingebaute Kunststoffleitungen (Abb. 7.4). Der bereits etwas erhärtete Verpresskörper wird nochmals aufgesprengt, und es wird zusätzliche Zementsuspension in das Gebirge und um die Mantelfläche des Verpresskörpers mit Drücken von 5 bis 30 bar eingepresst. Meist öffnet sich an einem

¹⁶⁵ Quelle: GRUNDBAU-TASCHENBUCH Teil 2: Geotechnische Verfahren, S. 319.

Verpressrohr mit mehreren Ventilen nur das Ventil mit dem geringsten Aufsprengwiderstand, und in dessen Umgebung verbleibt das Nachverpressgut. Um eine erfolgreiche Nachverpressung über die gesamte Verpresskörperlänge zu erreichen, müssen entweder mehrere Verpressrohre mit je einem Ventil am Ende gestaffelt eingebaut werden oder muss mit Manschettenrohr und Doppelpacker jeder Abschnitt des Verpresskörpers gezielt ein- oder mehrfach nachverpresst werden. Mehr noch als bei Primärverpressungen muss beim Nachverpressen darauf geachtet werden, dass durch die hohen Drücke keine Schäden im Umfeld der Verankerungsmaßnahme (Anheben von Gebäuden oder Geländeteilen, Eindringen von Verpressgut in Kanäle, Keller oder Gewässer, großflächiges Aufweiten von Klüften usw.) entstehen.¹⁶⁶

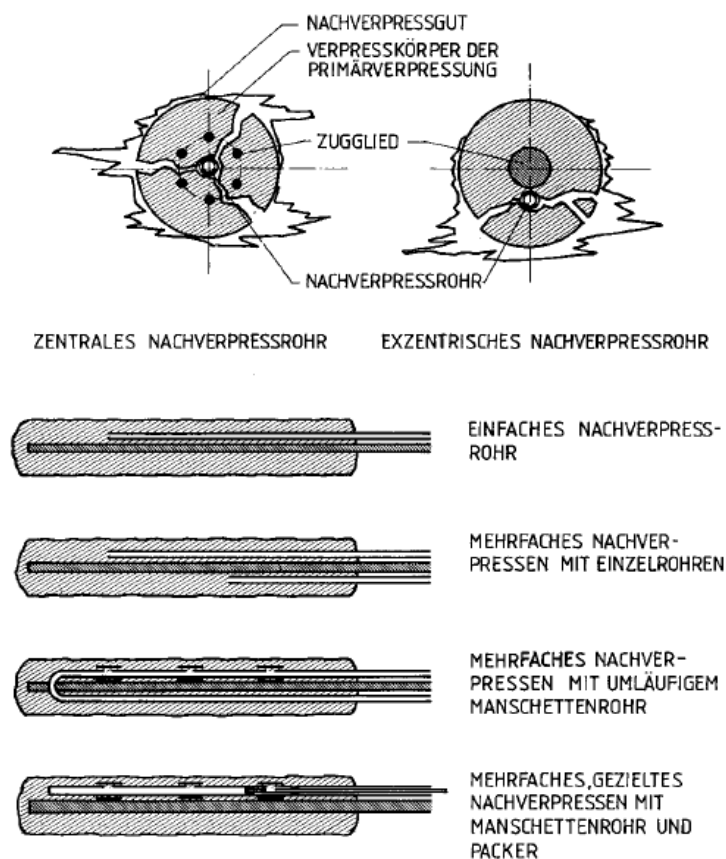


Abb. 6.4: Mechanismen zur Nachverpressung¹⁶⁷

¹⁶⁶ Vgl. GRUNDBAU-TASCHENBUCH Teil 2: Geotechnische Verfahren, S. 306-321.

¹⁶⁷ Quelle: GRUNDBAU-TASCHENBUCH Teil 2: Geotechnische Verfahren, S. 320.

6.2 Gewölbesicherung

Bei geringer Standzeit des Gebirges nach dem Ausbruch, bei Vorhandensein von Störzonen in dem Felsen oder bei Vortrieb im Lockergestein als vorläufige Sicherung werden verschiedene vorauseilende Gewölbesicherungssysteme verwendet. Sie haben die Aufgabe, die freigelegte Zone nach dem Abschlag bis zur Ausführung der konventionellen Sicherung zu stabilisieren. Zu den vorauseilenden Schirmgewölbesicherungen zählen:

- Vorpfändung mittels Verzugsblechen und Kanaldielen
- Spieße
- Rohrschirme
- HDI-Schirme sowie Setzungsstabilisierungsinjektionen
- Gefrierschirme

6.2.1 Gewölbesicherung mittels Spießen

Der Vortrieb unter einer vorauseilenden Sicherung mittels Spießen geht auf die Ankertechnik zurück. Als Spieße werden meist Injektionsbohranker verwendet, die fast parallel zur Tunnelachse am Gewölbeumfang in Abständen von 30–60 cm angeordnet werden. Die Bohrneigung beträgt aus bohrtechnischen Gründen ca. 10–15° gegenüber der Tunnelachse und die Länge liegt zwischen 3-5 m, sodass eine ausreichende Überlappung zu entstehen.

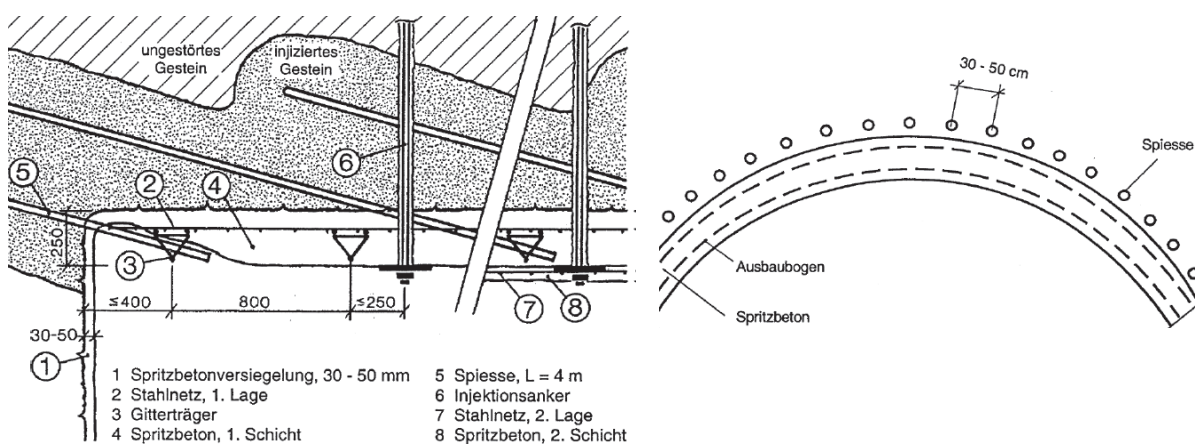


Abb. 6.5: Sicherung mit Spießen, Ankern, Injektionen, Gitterträgern und Spritzbeton¹⁶⁸

Die Verwendung von Injektionsbohranker gewährleistet einerseits den kraftschlüssigen Verbund zwischen dem Anker und dem umgebenden Gebirge, andererseits werden Klüfte und

¹⁶⁸ Quelle: Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 246.

Risse gleichzeitig während des Injizierens geschlossen und drittens wird das Problem der Erstellung von standfesten Bohrlöchern im Lockergestein oder gebrächen Gebirgen gelöst, da während des Bohrens gleichzeitig Injektionsmittel aus dem Zentrumskanal des Ankers verpresst wird. Eine andere Möglichkeit zum Einbau von Spießeln ist durch das Imlochhammerverfahren. Bei diesem Bohrverfahren besteht das Bohrgestänge aus dem Bohrrohr mit Ringbohrkrone, die die Stützwirkung des Bohrlochs in den Schwachzonen gewährleisten und dem Innenhammer mit separatem Gestänge, der die Bohrung in den standfesten Fels durchführt. Durch das Innenbohrhammergestänge erfolgt eine Wasserspülung, wobei das Spülwasser mit dem gelösten Bohrgut zwischen Bohrrohr und Innengestänge aus dem Bohrloch zurückgespült wird. Der Antrieb des Bohrrohrs und des inneren Bohrgestänges geschieht separat, so dass der Übergang vom Lockergestein ins Festgestein in der Weise erfolgt, dass das Bohrrohr nur ca. 10 – 20 cm in den standfesten Fels geführt wird und im Fels nur mit dem inneren Bohrhammergestänge die Bohrung fortgeführt wird. Nach Beendigung der Bohrarbeiten wird das Innengestänge zurückgezogen, der Anker gesetzt und das Bohrloch injiziert. Gleichzeitig erfolgt das Rückziehen des Bohrrohrs.

In Felsklassen, bei denen das Bohrloch ohne zusätzliche Maßnahmen standfest ist, werden meist die billigeren, normalen SN-Anker verwendet, deren Technologie im *Punkt 6.1* beschrieben wurde.¹⁶⁹

6.2.2 Gewölbesicherung mittels Rohrschirm

Beim Vorhandensein von Lockergesteins-Geröllfeldern oder bei der Unterquerung von Straßen und Gebäuden mit geringer Überdeckung werden oft Rohrschirmen ausgeführt. Das System besteht aus Stahlrohren, die schwach geneigt bis 5° zur Tunnelachse in Längen von 12-15 m im oberen Teil der Kalotte eingebracht werden. Die Überlappung des Rohrschirms zu Rohrschirm beträgt in der Regel 3 bis 5 m, jedoch kann diese bei geringer Überdeckung des Tunnels auch bis zu 50% der Bohrlänge betragen. Im Inneren des Mantelrohrs befindet sich das Bohrgestänge, das mit einer Pilotbohrkrone mit verllorener Aufweitungskrone oder mit einer bleibenden Aufweitungs-Excenterkrone endet. Nach dem Rückziehen der Bohrgestänge verbleibt das Rohr im Bohrloch und wird injiziert. Das Rohr ist mit Injektionslöchern ausgestattet, die mit Ventilen mit Gummihüllen bestückt sind. Die Löcher dienen zur Verfüllung des Ringspalts zwischen dem Stahlrohr und dem Baugrund und dadurch wird die Kraftübertragung gewährleistet. Die Injektion erfolgt mittels Packer vom

¹⁶⁹ Vgl.: Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 243- 248.

Rohrinneren aus, beginnend vom Bohrlochtiefsten mit ca. 3 – 7 bar Druck. Dadurch werden nicht nur Risse und Klüfte verfüllt, sondern es wird auch eine Stabilisierung und Verfestigung der ganzen Zone erzielt. Zur Injektion verwendet man meist Zementsuspensionen. Aufgrund der geringen Injektionsdrücke ist die Gefahr der Geländehebung auch bei geringer Überdeckung minimal.

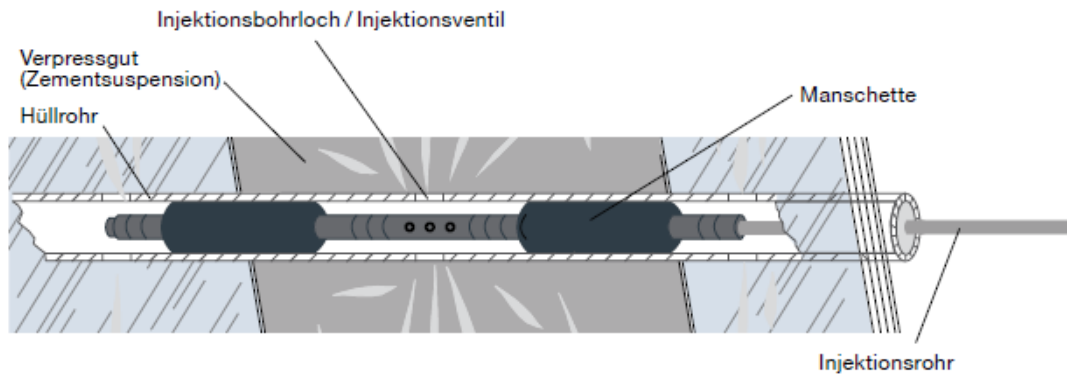


Abb. 6.6: Stahlrohr mit Injektionsventil¹⁷⁰

Oft wird mit der Herstellung von Rohrschirmen auch eine Ortsbrustsicherung mit GFK-Anker und Polyurethaninjektionen durchgeführt und erst dann folgt der echte Vortrieb.

6.3 Düsenstrahlverfahren

Das Düsenstrahlverfahren (DSV) wird auch als Hochdruckinjektionen, Hochdruckbodenvermörtelung, Jet-Grouting oder Soilcrete-Verfahren bezeichnet. Es stellt einen Sonderfall von Zementinjektionen dar, bei dem der Boden durch Injektionsgut unter sehr hohen Drücken (bis 800 bar) durch Düsen mit Strahlgeschwindigkeiten bis zu 400 m/s erodiert wird. Zuerst wird das Gestänge ev. mit Hilfe einer Spülung in den Boden gebohrt und dann langsam (0,1 bis 0,5 m/min) drehend herausgezogen, wobei zugleich injiziert wird (Abb. 2.5). Dabei entstehen Säulen, die die Wasserdurchlässigkeit reduzieren und eine Verfestigung des Bodens bewirken. Im Tunnelbau wird dieses Verfahren vorwiegend als Sicherungsmaßnahme des Vortriebes verwendet. Bei oberflächennahen Tunnel in nicht standfesten Lockergesteinen können vorseilende Hochdruckinjektionen direkt von der Oberfläche ausgeführt werden (wie bei hochliegenden Injektionssohlen), während bei tiefliegenden Tunnel horizontale oder schwach geneigten Säulen von der Ortsbrust erstellt werden.

¹⁷⁰ Quelle: www.dywidag-systems.com/uploads/media/DSI_ALWAG-Systems_AT-Huellrohrsystem_de.pdf

Die Erosionsweite des Düsenstrahles im Baugrund reicht je nach Boden, Verfahrensart und verwendeter Flüssigkeit bis zu 3,5 Meter. Der Anwendungsbereich umfasst alle Lockergesteine (Obergrenze: Kies mit Korngröße 50 mm) bis hin zu Ton. Die erzielbare Festigkeit wird von Art und Menge des Zementanteiles sowie den verbleibenden Bodenanteilen in der Boden-Suspension-Mischung bestimmt. Die Bandbreite erzielbarer Festigkeiten des DSV-Körpers sind:

Bodenart	Ton	Schluff	Sand	Kies
Druckfestigkeit [N/mm ²]	≤ 0,1	≤ 5	≤ 10	≤ 25

Tab. 6.2: Erzielbare Festigkeiten des DSV-Körpers¹⁷¹

Wie bereits erwähnt werden als Injektionsstoffe Zement- oder Zement-Steinmehlsuspensionen mit Wasser-Feststoffwerten von 0,5 bis 1,5 verwendet. Wenn eine Abdichtungsfunktion erwünscht ist kommt als Zusatz Bentonit zum Einsatz.

DSV wird in drei Varianten eingesetzt:¹⁷²

- Einfachverfahren (Simplex): während der Bohrung mittels Kernkronenbohrkopf wird mit Wasser gespült und das Bohrklein wird zwischen Bohrraussen- und Bohrwand ausgespült. Nach dem Erreichen des Bohrlochtieftens wird in das Bohrrohr der Kronendichtungsball (runde Stahlkugel) zum Abdichten der Bohrspülöffnung am Bohr- und Injektionskopf eingespült (Abb.7.7). Danach erfolgt die Injektion durch Rückziehen des Gestänges, wobei aus einer Düse das Injektionsmittel eingebracht wird. Durch diesen Strahl wird der Boden gefräst und mit der Zementsuspension vermischt. Der Rückfluss aus Suspension und gelöstem Boden wird entlang des Gestänges nach oben gefördert. Das Einfachverfahren eignet sich vor allem für geringe Tiefen und horizontale Hochdruckinjektionen.

¹⁷¹ Quelle: Firmenprospekt der Firma Keller

¹⁷² Vgl. Kolymbas D., Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, 2011, S. 376-377.

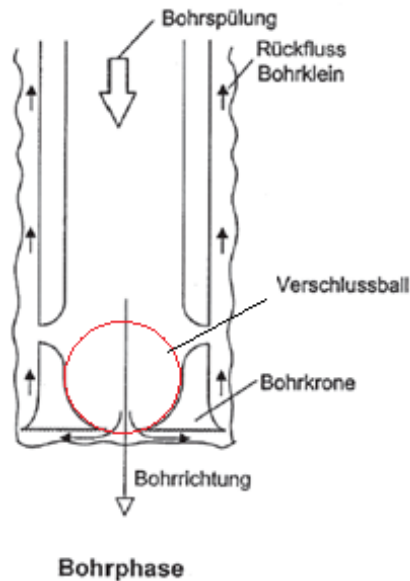


Abb. 6.7: Prinzip der DSV-Säulen Erstellung¹⁷³

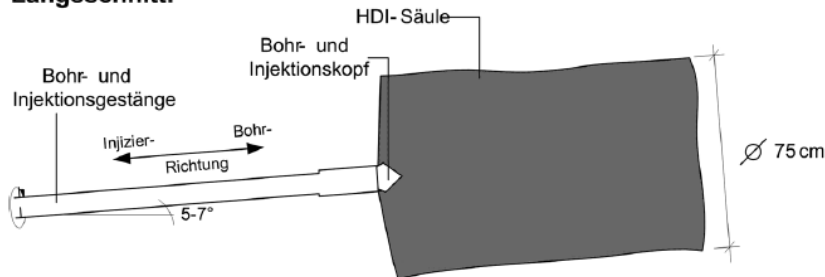
- Zweifachverfahren (Duplex): während des Verpressens wird der Zementsuspensionsstrahl durch eine Doppeldüse mit Druckluft (3-6 bar) „ummantelt“, infolgedessen können größere Durchmesser und größere Tiefen erreicht werden.
- Dreifachverfahren (Triplex): bei diesem Verfahren wird der Wasserstrahl zusätzlich mit Druckluft ummantelt. Die Zementsuspension wird über eine separate Düse unterhalb des Schneidstrahls mit 15 bis 80 bar Druck eingebracht. Durch die Wahl der Winkelgeschwindigkeit mit abgestimmter Ziehgeschwindigkeit des Düsenstrahls ergibt sich bei richtiger Zuordnung von Injektionsmenge und -druck in Abhängigkeit von der Kornverteilung und der Lagerungsdichte eine homogene Säule von etwa konstantem Durchmesser und Festigkeit.

Die DSV-Technologie findet Anwendung im Tunnelbau bei der Herstellung von Gewölbeschirmen. Bei fein- bis grobkörnigen Sanden mit wechselndem Kiesanteil stabilisieren die Hochdruckinjektionen den Baugrund und ermöglichen den sicheren Tunnelvortrieb. Der Schirm hat einerseits die Aufgabe, den Raum zwischen der Ortsbrust und der nachfolgenden Verkleidung in Tunnellängsrichtung zu überbrücken und andererseits als vorausseilende Sicherung die Ortsbrust gegenüber dem Bruchkörper über und vor der Ortsbrust zu sichern. In der Regel wird dabei das Simplexverfahren verwendet. Die DSV-Säulen werden als vorausseilende Sicherung in zwei Phasen ausgeführt. Zuerst wird jede zweite Säule hergestellt und nach ca. 12 Stunden, wenn im Allgemeinen eine

¹⁷³ Quelle: Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 260.

Mindestfestigkeit, die dem ungestörten umgebenden Boden entspricht erreicht wird, werden die überschrittenen Säulen erzeugt (Pilgerschrittverfahren).

Längsschnitt:



Querschnitt:

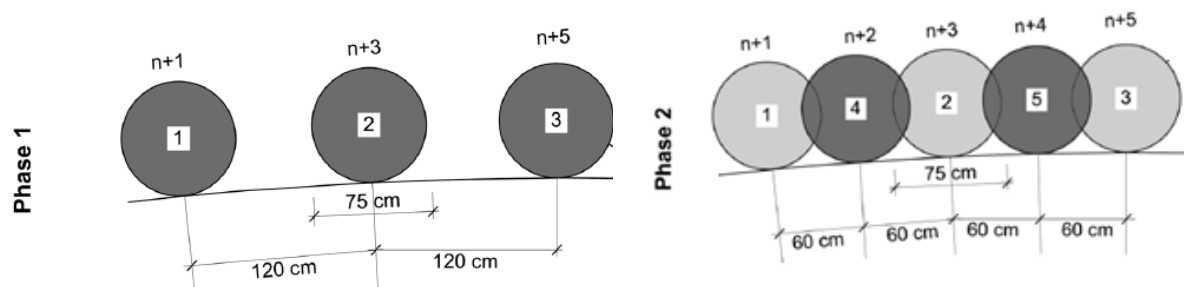


Abb. 6.8: Herstellungsschritte eines DSV-Schirms¹⁷⁴

Der Rasterabstand der Säulen hängt vom erreichbaren Pfahldurchmesser und der erforderlichen Überlappung ab. Er wird so gewählt, dass im Baugrund ein zusammenhängender verfestigter Schirm aus DSV-Säulen entsteht. Folgende Parameter müssen befolgt werden:

- Durchmesser der Säulen: zwischen 50 und 80 cm
- Mindestüberlappung der Säulen je nach Durchmesser ca. 15 – 25 cm
- Neigung der Bohrungen zur Tunnelachse: zwischen 5 bis 7°
- Länge der Säulen: zwischen 10 bis 20 m
- Überlappung der Säulen in Längsrichtung: 2 bis 4 m

Da die DSV-Säulen meist in solchen Bodenarten ausgeführt werden, die sich für den Kalottenvortrieb geeignet sind, müssen die hohen Auflagerpressungen im Kämpferbereich berücksichtigt werden. Dazu kann das Kalottengewölbe in Querrichtung mittels seitlichen, zur Vertikalen geneigten DSV-Säulen unterfangen werden. Das DSV kann auch als

¹⁷⁴ Quelle: Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 263.

Ortsbruststabilisierungsmaßnahme bei zerklüftetem und nicht standfestem Gebirge verwendet werden. Auch eine Kombination mit einem Rohrschirmgewölbe zur Erhöhung der Längstragfähigkeit ist möglich.

Die Ausführung von DSV erfolgt mittels Spezialbohrgeräten mit Scherenbühne. Die Entsorgung der Rücklaufsuspension ($0,25 - 0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ hergestellter DSV-Kubatur) erfolgt über temporär angelegte Rinnen und Pumpensümpfe und wird daraus mittels Absaugwagen abgepumpt. Da die Rücklaufsuspension mit Sand vergemengt sein kann, was ihre Pumpfähigkeit reduziert, muss der Sand mittels Entsender oder Absetzbecken entfernt werden.

Da der Ablauf des Herstellungsprozesses nicht unmittelbar visuell kontrollierbar ist muss vor Beginn der Herstellung des DSV-Injektionsschirms mindestens eine Probesäule hergestellt werden, um die Ausführungsparameter miteinander und mit den Gebirgsverhältnissen anzupassen. Dazu zählen u.a.: Düsendruck, Suspensionsmenge, Winkel- und Ziegeschwindigkeit, Mischungsverhältnisse, Rücklauf.¹⁷⁵

6.4 Soilfracturing/Hebungsinjektionen

Bei innerstädtischem Tunnelbau, wo Oberflächensetzungen fast immer unzulässig sind, besonders wenn sich Gebäude und Leitungssystemen oberhalb der Tunneltrasse befinden, müssen Maßnahmen getroffen werden, die vom Vortrieb ausgehende Setzungen berücksichtigen. Solche Setzungen treten bei weichen und Lockergesteinsböden mit geringer Dichte auf und können anhand der Injektionstechnik ausgeglichen werden. Das Verfahren heißt Soilfracturing und ist auch unter den Namen Hebung-, Kompensations- und Aufbrechinjektionen bekannt. Die Idee ist, dass bei hinreichend hohem Druck das Injektionsgut den Boden aufsprengt. Es wird davon ausgegangen, dass sich dadurch Risse senkrecht zur kleinsten Hauptspannung bilden, die mit Injektionsgut verfüllt werden. Dabei wird der Boden in einer Richtung um das Injektionsrohr herum verspannt, sodass nunmehr die kleinste Hauptspannung in den anderen Richtung wirkt. In einem nachfolgenden Verpressvorgang wiederholt sich dieser Vorgang auf analoge Weise. (Abb. 6.9). Dadurch werden einerseits eine gezielte Bodenverspannung und Hebungen der Geländeoberkante erreichen, andererseits wird eine Bodenstabilisierung und Verfestigung realisiert.¹⁷⁶

¹⁷⁵ Vgl.: Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 256-273.

¹⁷⁶ Vgl. Kolymbas D., Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, 2011, S. 375-376.

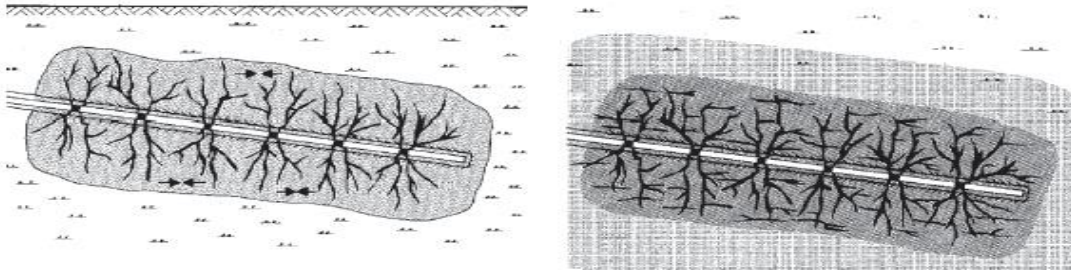


Abb. 6.9: Vertikale Rissbildung bei Erstinjektion und horizontale Rissbildung bei Folgeinjektion¹⁷⁷

Das Soilfracturing-Verfahren ist in allen Böden einsetzbar, insbesondere bei Kies, Sand und Schluff. Die geeigneten Injektionsstoffe werden durch die Korngröße und Siebverteilung bestimmt:

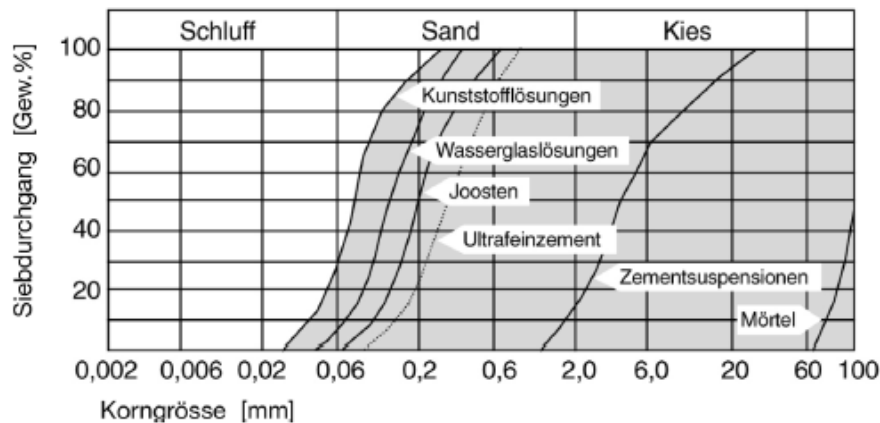


Abb. 6.10: Anwendungsgrenzen verschiedener Injektionsmittel beim Soilfracturing-Verfahren¹⁷⁸

Der Injektionsvorgang erfolgt über Ventilrohre mit Ventilöffnungen in einem Abstand von 30 bis 100 cm in Längsrichtung um eine gleichmäßige Verteilung des Injektionsmittels im Untergrund zu erzielen. Der optimale Abstand des Ventilrohrsystems zur Bauwerksgründungen und zum Tunnel ergibt sich aus folgenden Bedingungen:

- Der Minimalabstand zur Bauwerksgründungen muss so gewählt werden, dass keine lokalen, unerwünschten Hebungen erzeugt werden.
- Der Minimalabstand zum Tunnel muss so gewählt werden, dass lokale Druckeffekte auf die Tunnelauskleidung vermieden werden.

¹⁷⁷ Quelle: Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 279.

¹⁷⁸ Quelle: Ebd.

Wie bei allen Injektionsarbeiten sind die notwendigen Geräte für die Ausführung von Hebungsinjektionen ein Bohrgerät, Pumpenaggregate, Mischer, Dosiereinrichtung mit Silos, Packereinheiten, Steuer- und Messeinrichtungen. Es müssen dabei folgende Schritte durchgeführt werden:

- Erstellen von Bohrungen: der Ausgangspunkt der Injektionsbohrungen bei Kompensationsinjektionen über einem Tunnel kann die Geländeoberfläche, Gebäude, Arbeitsgruben und Schächte oder ein Hilfsstollen sein (Abb. 7.11).

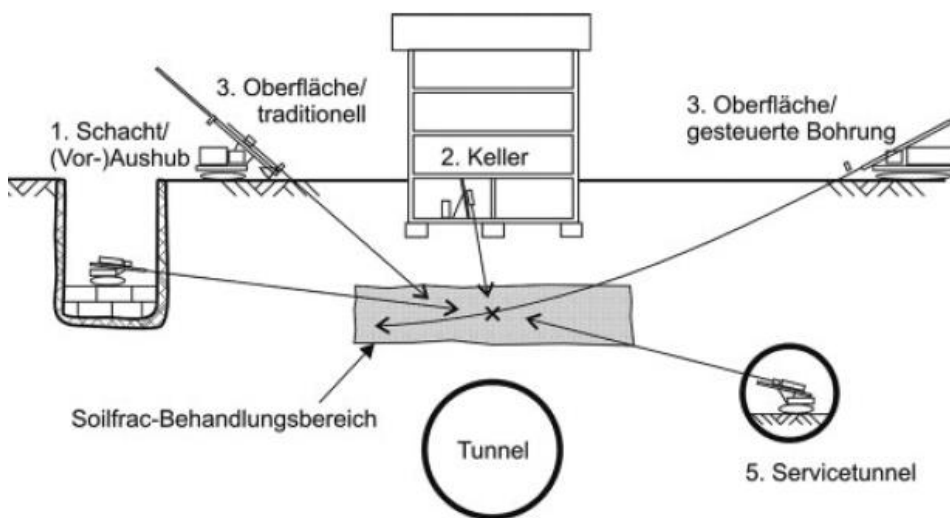


Abb. 6.11: Ausgangspunkte zur Ausführung von Hebungsinjektionen¹⁷⁹

- Mantelverpressung: nach dem Einsetzen der Verpressrohre (Kunststoff- oder Stahlventilrohre, je nachdem ob es sich um einmalige oder mehrmalige Nachverpressungen handelt) erfolgt eine schrittweise Mantelverpressung, die den entstehenden Ringspalt mit einem Spezialbindemittel (Sperrmittel) füllt und somit das Rohr fixiert.
- Erstinjektion: die Klüfte und Hohlräume werden gefüllt und gleichzeitig wird der Boden homogenisiert und verdichtet. Es wird solange injiziert bis die erste Hebungen auftreten.
- Folgeinjektion: während des Tunnelvortriebs werden die Oberflächensetzungen ständig gemessen. Überschreiten die Setzungen einen bauwerksspezifischen Toleranzbereich, wird mit der Folgeinjektion begonnen. Diese Nachinjektionen werden in den bestehenden Injektionskörper eingebracht. Bei der Erstinjektion

¹⁷⁹ Quelle: Witt K.J., GRUNDBAU-TASCHENBUCH Teil 2: Geotechnische Verfahren, 2009, S. 196.

wurden die entstandenen, vertikalen Risse geschlossen und der Injektionskörper ist bereits verspannt, somit setzt die Hebung gleich ein. Die Nachinjektionen können auch über größere Zeiträume (bis zu ca. einem Jahr) wiederholt werden.

Für erfolgreiche Ergebnisse aus den Hebungsinjektionen ist darauf zu achten, dass die Injektionsdrücke, -mengen und -verteilung sehr genau zu dem entstandenen Setzungsfall angepasst werden müssen.¹⁸⁰

6.5 Vorspanninjektionen für Druckstollen

Die hydrotechnischen Anlagen wie Druckstollen und Druckschächte gehören auch zum Tunnelbau. Die Vortriebsmethoden, Sicherungsmaßnahmen, Auskleidungen und Berechnungskonzepte sind ähnlich. Ein wesentlicher Unterschied aber ist das Vorhandensein von Innenwasserdruck. Die Übertragung auf das Gebirge und die Aufnahme des Wassersdrucks von diesem ist oft eine komplizierte Aufgabe, die die Wechselwirkung zwischen Wasserinnendruck, Auskleidung und umliegenden Gebirge umfasst. Wenn das Gebirge die Anforderungen an Standfestigkeit, Dichtigkeit und Rauigkeit nicht erfüllen kann oder wenn die Überlagerungshöhe nicht ausreichend ist, um den Wasserinnendruck aufzunehmen, dann muss unbedingt eine statisch wirkende Auskleidung aufgebaut werden. Meistens das sind Betonschalen und in manchen Fällen wird zur Verbesserung der Tragwirkung und der Dichtigkeit auch eine außenliegende dünne Stahlpanzerung verwendet. Beim Einbau dieser Art sind drei Injektionskonzepte zu unterscheiden:¹⁸¹

- Gebirgsinjektionen: dadurch wird die ursprüngliche Steifigkeit des Gebirgstringens nach der Auflockerung durch den Vortrieb wiederhergestellt. Die Hohlräume zwischen Hohlraumsicherung und Gebirge, sowie Klüfte in der unmittelbaren Umgebung des Hohlraumes werden über Bohrlöcher mit Suspension verfüllt.
- Kontaktinjektionen: wie schon im Punkt 5.1.4 beschrieben wurde kann u.a. im Firstbereich ein Absetzspalt zwischen der Ausbruchsicherung und dem Hinterfüllbeton entstehen. Dieser Spalt wird nach dem Abschluss der Betonarbeiten mit Zementsuspension und einem Druck von 5 bar verpresst.
- Spaltinjektionen: beim Einbau einer Stahlpanzerung kann zwischen Panzerung und Beton ein Spalt infolge Schwinden und Kriechen des Blechs sowie Abkühlung der Panzerung entstehen. Dieser Hohlraum muss mit Zementinjektionen verfüllt werden

¹⁸⁰ Vgl. Girmscheid G., Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2008, S. 278-282.

¹⁸¹ Vgl. Bonpace P., Injektionsarbeiten beim Neubau des Druckschachts für das Kaunertalkraftwerk – Erfahrungsberichte, 2014, S. 481-489.

um den kraftschlüssigen Kontakt zwischen Gebirge und Konstruktion zu gewährleisten. Dies erfolgt über vorverlegte Injektionsleitungen, die spiralförmig an dem Rohr angeordnet sind. Dadurch wird der kraftschlüssige Kontakt zwischen Stahlpanzerung und Hinterfüllbeton realisiert. In Abhängigkeit der Wandstärke der Panzerung sowie der Geometrie werden abschnittsweise die jeweiligen Injektionsdrücke definiert, wobei die Injektion in jedem Fall mit einem minimalen Injektionsdruck von ca. 10 bar ausgeführt wird.

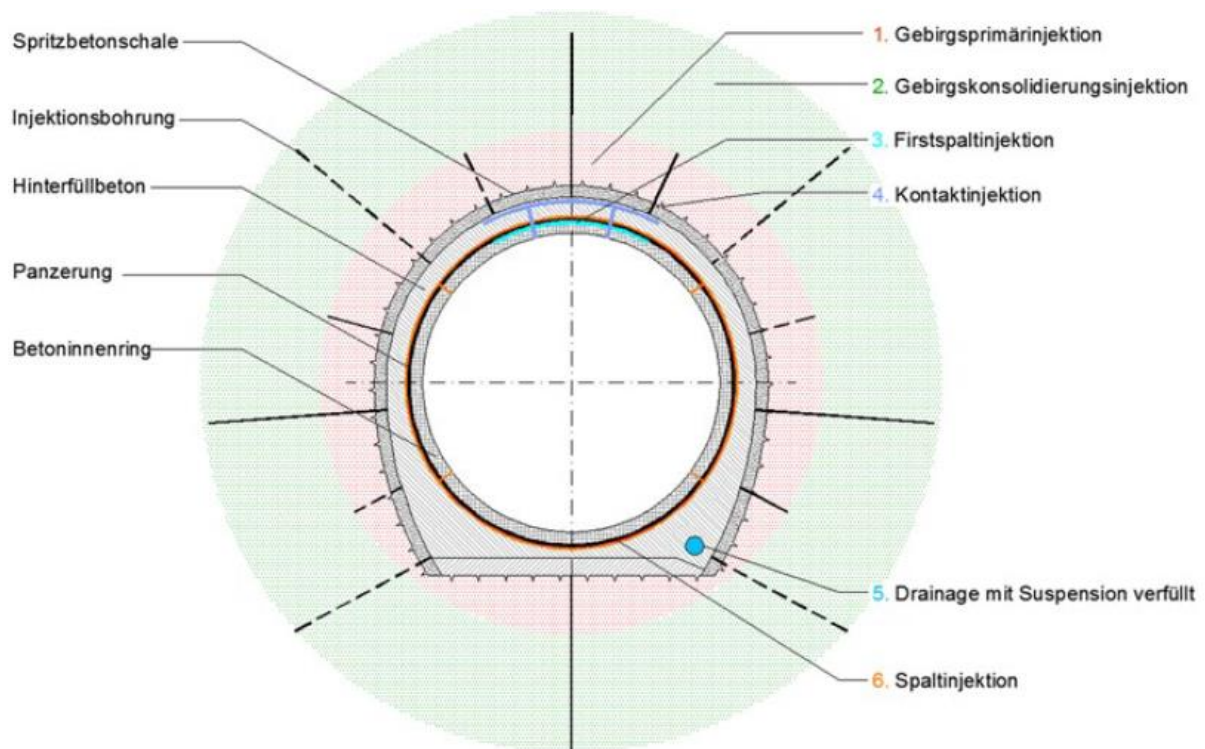


Abb. 6.12: Injektionskonzepte beim Druckstollen¹⁸²

Bevor eine solche schwere und teure Lösung ausgeführt wird, sollten andere Möglichkeiten untersucht werden. Als sehr wirtschaftlich haben sich in vielen Fällen Betonauskleidungen erweisen, bei denen durch eine Kontaktzementinjektion eine radiale Vorspannung und damit eine tangentielle Druckspannung erzeugt wird, deren bleibender Anteil größer ist als die aus dem Innenwasserdruck resultierende Zugspannung. Durch solche passiv vorgespannte Betonauskleidung wird einerseits eine entlastende Wirkung des Gebirgsdrucks gegenüber dem Innendruck hervorgerufen, andererseits wird die Entstehung von Rissen in der Betonschale verhindert, was die technische Dichtigkeit verbessert.

¹⁸² Quelle: BHM, Heft 12: Injektionsarbeiten beim Neubau des Druckschachts für das Kaunertalkraftwerk– Erfahrungsberichte, 2014, S. 482.

Generell gibt es zwei Methoden zur Ausführung von Kontaktinjektionen. Die erste Methode beruht auf Mörtelinjektionen über relativ kurze Bohrlöcher, die nicht mehr als 30 cm in das umliegende Gebirge hineingehen. Die üblichen Durchmesser solcher Bohrlöcher sind zwischen 38 und 70 mm und sie werden nach dem Drehschlagbohrverfahren hergestellt. Die andere Methode wurde von der TIWAG (Tiroler Wasserkraft AG) entwickelt, wobei statt der Erstellung von Bohrlöchern Injektionsschläuche zwischen Gebirge und Auskleidung angeordnet werden. Die Kontaktinjektionsschläuche werden an der Stollenfirste befestigt und längs der Stollenachse in überlappenden Injektionsschleifen zu den Hochpunkten des Querschnittes und wieder zurück geführt.

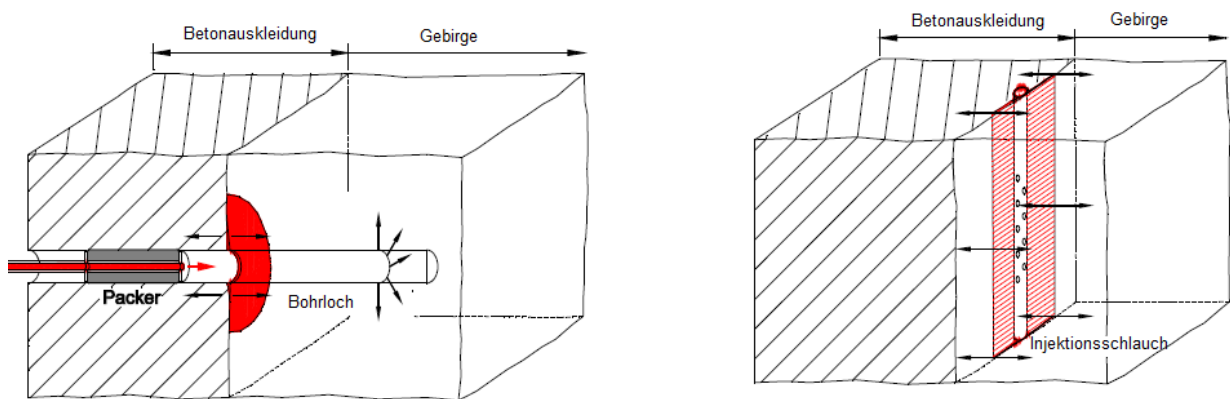


Abb. 6.13: Kontaktinjektion über Packer und Injektionsschläuche

Wenn die Kontaktinjektion eine Vorspannung der Auskleidung erzielen muss, muss bei dem Einbau der Auskleidung ein zielgerichteter Ringspalt zum Gebirge mit einer Größe von ca. 2-5 cm berücksichtigt werden. In Längsrichtung werden durch den Einsatz von Spezialmembranen Injektionsabschnitte mit einer Länge von 1,5 bis 2-mal größer als der lichte Tunneldurchmesser abgesondert. Der Rasterabstand der Injektionslöcher in einem Injektionsabschnitt ist 2 bis 4 m in Querrichtung und 3 bis 5 m in Längsrichtung. Der Injektionsvorgang besteht aus zwei Phasen:¹⁸³

- Phase I: durch das tiefste Bohrloch wird Mörtel unter einem Druck von 3 bis 6 bar injiziert. Dadurch werden die Luft und das eventuell bleibende Wasser nach oben getrieben und treten über das höchste Bohrloch aus. Wenn das Injektionsmittel aus dem höchsten Bohrloch auszufließen beginnt, wird es geschlossen.

¹⁸³ Quelle: Georgiev L., Tunnelbau, 2004, S. 334.

- Phase II: in jedem Injektionsabschnitt werden zwei Querschnitte, jeder mit vier Injektionslöcher gleichzeitig injiziert. Der Injektionsdruck erhöht sich langsam bis zum Erreichen des 1,5-fachen Wasserinnendrucks.

So wird die Auskleidung im Bauzustand vorgespannt und wenn im Betriebszustand der Wasserinnendruck Zugspannungen in der Auskleidung hervorruft, werden sie durch die Vorspannung kompensiert.

7 Überblick über die Injektionsmittel und Technologien im Tunnelbau

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die Injektionstechnologien und dazu passende Injektionsmitteln gegeben. Es ist klar, dass die Injektionsfähigkeit und die Wahl von Injektionsmittel sehr stark vom Untergrund und Baustellenbedingungen abhängig sind und folgende Tabelle stellt nun einen systematisierten Überblick der Injektionstechnik bezüglich der Injektionsmitteln dar.

	Zement-suspension	Mörtel	PU-Harz	PU-Schaum	PU-Gel	Epoxidharz	Acrylatharz	Acrylatgel
Lockergestein								
- Grobkörnige ($D > 2,0$ mm)	++	+++					++	
- Feinkörnige ($0,06 < D \leq 2,0$ mm)	+++		++					
Felsgestein	++							
- Feine Felsklüfte	++		++				+++	
- Große Kavernen und Spalte	+	+++	+++	+++				
Verfestigung	+++					+++	++	
Abdichtung	++		+++	+++		+++	+++	
Vorinjektionen	++			+++				
Fugeninjektionen	+		+++					++
Rissinjektionen	+		+++	++		++		
Kontaktinjektionen	++	+++						
Schleierinjektionen	++							+++
Hochliegende Injektionssohle	+++							
Tiefliegende Injektionssohle	++				+++			+++
Ankersysteme	+++		+			+		
Gewölbesicherung	+++							
DSV	+++							
Soilfracturing	+++	++						++
Vorspanninjektion	+++	+						

Tab. 7.1: Injektionsmitteln und ihre Anwendung im Tunnelbau

Die Zementsuspensionen werden als universelle Injektionsmittel angesehen. Sie kommen sowohl in Locker-, als auch in Felsgestein zur Verfestigung und Abdichtung zum Einsatz. Am häufigsten werden sie bei feinkörnigen Kiesen und Sanden und bei Fels mit einer Kluftweite größer als 0,1 mm eingesetzt. Ein Teil der geotechnischen Problemen, die beim Tunnelaufbau auftreten können, lassen sich anhand verschiedene Technologien mit Zementsuspensionen lösen. Solche Anwendungsbeispiele sind ausführlich in Kapitel 5. Und 6 beschreiben.

Für große Hohlräume oder weite Klüfte ist es wirtschaftlicher mit Mörtel zu verfüllen. Zementmörtel wird auch bei der Ringspaltverpressung und Soilfracturing verwendet. Sehr oft ist unter Zementinjektion eigentlich Mörtelinjektion zu verstehen, was aber falsch ist, weil bei der reinen Zementinjektionen der Sand fehlt.

Bei feinen Rissen und Klüften stellen die Kunstharzinjektionen eine gute Alternative zur Feinzementinjektionen dar. Wegen ihrer niedrigen Viskosität und der hohen Eindringfähigkeit werden sie oft zur Riss- und Fugeninjektion verwendet. Die Acrylatharze sind für feinste und feuchte Fugen und Risse geeignet, da sie die niedrigste Viskosität besitzen. Die Anwendung von Epoxidharzen ist nur bei trockenen Fugen möglich, wobei das Reaktionsprodukt sich mit hohen Druck- und Zugfestigkeit der kraftschlüssiger Verbindung auszeichnet. Wassereinbruchprobleme können mit der PU-Harzen gelöst werden. Beim Kontakt mit Wasser verschäumen sie, wobei eine schnelle Verschließung des Wasserzutritts erreicht wird. Bei großen Kavernen ist die Verwendung der PU-Schaum sehr zweckmäßig, wegen der schnellen und stark Aufschäumung.

Eine gute nachträgliche Flächenabdichtung kann mit Acrylatgelen erreicht werden, wobei das Gel-Erdreich-Gemisch mit dem vorhandenen Wasser eine Schutzschicht bildet. Dieser Effekt wird auch der tiefliegenden Injektionssohlen genutzt. Das gleiche gilt für feuchte Fugen. Abhängig von der Siebkurve können Acrylatgele auch zur Ausgleich von Setzungen verwendet werden.

8 Zusammenfassung

Die vorliegende Diplomarbeit gibt einen Überblick über die möglichen Anwendungen der Injektionstechnik im Tunnelbau. Als Basis dafür dienen die allgemeinen Prinzipien, Technologien und Anforderungen, die bei den üblichen Injektionsarbeiten befolgt werden müssen. Durch die theoretischen Voraussetzungen für das Materialverhalten kann eine Prognose über die Ergebnisse dieser Maßnahme erstellt werden. Die Wechselbeziehung zwischen Viskosität, Injektionsdruck und Reichweite ist bestimmend für den Injektionserfolg. Natürlich spielen neben der Theorie die praktischen Erfahrungen, technische Fähigkeiten und Kompetenzen des Bauunternehmers eine große Rolle. Einerseits ist die Möglichkeit, die Injektionsparameter schnell an die konkreten Baubedingungen anzupassen einer der Hauptvorteile der Injektionstechnik, da die hydrogeologischen Erkundungen selten ein umfangreiches und detailliertes Bild des Untergrunds ergeben. Andererseits hängt dies stark von den Möglichkeiten der Baufirma ab, schnelle und kompetente Lösung der Probleme, die bei der Ausführung von großen Projekten entstehen können, zu finden.

Die Wahl des passenden Injektionsmittels hängt von vielen Faktoren wie Bodenart und -formationen, Vorhandensein von Wasser/Feuchtigkeit usw. ab. Dennoch wird als erster Ansatz in dieser Arbeit eine tabellarische Übersicht und Bewertung der unterschiedlichen Injektionsmittel und deren Anwendbarkeit gegeben. Es ist deutlich zu sehen, dass Zementsuspensionen als universelle Injektionsmittel gelten und durch Zugabe verschiedener Zusatzmittel lassen sich ihre Eigenschaften so verändern, dass sie an die konkreten Bedingungen angepasst werden können. Zusätzlich entfällt durch solche Modifikation des Injektionsmittels die Notwendigkeit zusätzliche Geräte zu mobilisieren, was Zeit und Geld spart. Die Basisausrüstung aus Bohrergerät, Mischstation zur Aufbereitung des Injektionsmittels und Pumpe erlaubt die Ausführung verschiedener Injektionsverfahren. Dies ermöglicht u.a. Klein- und Mittelbetrieben auch an größeren Projekten teilzunehmen.

Obwohl die Injektionsarbeiten nicht zu den Hauptmaßnahmen beim Tunnelaufbau gehören, erleichtern sie oder ermöglichen erst die Ausführung der anderen Bauprozesse, was ihre besondere Bedeutung unterstreicht.

Literaturverzeichnis

- [1] Boley C.: Handbuch Geotechnik, Vieweg+ Teubner Verlag, Berlin, 2012
- [2] Bärthel U., Dausch G.: Einsatz der Injektionstechnik im Spezialtiefbau, In: Beiträge zum 17. Christian Veder Kolloquium - Injektionen in Boden und Fels, 2002
- [3] Bonk M.: Lufsky Bauwerksabdichtung, 7. Auflage, Vieweg+ Teubner Verlag/Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2010
- [4] Bundesanstalt für Straßenwesen: Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen, 2012
- [5] Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen, Betonauskleidungen für Tunnel in geschlossener Bauweise, Dezember 2000
- [6] DIN 21251: 1990 Gegirgsanker für den Bergbau und Tunnelbau, Teil 1 + 2
- [7] DIN 4093: 2012 Bemessung von verfestigten Bodenkörpern – Hergestellt mit Düsenstrahl-, Deep-Mixing- oder Injektions-Verfahren
- [8] DIN EN 1504-5:2005-03: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität – Teil 5: Injektion von Betonbauteilen
- [9] DIN EN 1537:2013 Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau –Verpressanker
- [10] Donel M.: Bodeninjektionstechnik, Studienunterlagen für das Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, 3. Auflage, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1996
- [11] Eichler K.: Fels- und Tunnelbau, Expert Verlag, Renningen, 2000
- [12] Estermann U.: Bodenverfestigungs- und Bodenverbesserungsverfahren, In: Fachzeitschrift der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, Sektion Tiefbau/ Erich Schmidt Verlag GmbH & Co, 6. Auflage- München, 2005
- [13] Firmenprospekt "Abdichtung mit Injektionsverfahren" der Firma DESOI
- [14] Firmenprospekt "Wasserdichte Bauten" der Firma DRYTECH
- [15] Firmenprospekt „Injektionen: Lösungen für den Untertagebau“ der Firma "Master Builders Solutions by BASF"
- [16] Firmenprospekt der Firma „StoCretec“ GmbH
- [17] Gaisbauer R.: Kunstharzinjektionen in Massenbetonrissen geringer Spaltweite, In: Mitteilungen für Ingenieurgeologie und Geomechanik/ Poisel Rainer, 1. Auflage, Wien, 1998
- [18] Garschou K., Vorinjektion im Tunnelbau – eine vernünftige Maßnahme, In: Beiträge

- zum 17. Christian Veder Kolloquium - Injektionen in Boden und Fels, 2002
- [19] Georgiev L.: Tunnelbau, 3. Auflage, Es Print Verlag, Sofia, 2004
- [20] Girmscheid G.: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2008
- [21] Hohmann R.: Fugenabdichtung bei wasserundurchlässigen Bauwerken aus Beton, 2. Auflage, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2009
- [22] Hornich W. und Stadler G.: Injektionen, In: GRUNDBAU-TASCHENBUCH Teil 2: Geotechnische Verfahren/ Witt K. J., 7. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2009
- [23] Kolymbas D., Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, Springer Verlag, Berlin, 2011
- [24] Kutzner Ch., Injektionen im Baugrund, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1991
- [25] Linsbauer H.: Grundlegende Aspekte betreffend das Stabilitätsverhalten von Rißsystemen im Verlauf von Verpreßvorgängen, In: Mitteilungen für Ingenieurgeologie und Geomechanik/ Poisel Rainer, 1. Auflage, Wien, 1998
- [26] Maidl B., Herrenknecht M., Maidl U., Wehrmeyer G.: Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb, 2. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2011
- [27] Möller G., Geotechnik- Grundbau, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2006
- [28] Österreichische Normierungsinstitut: ÖNORM B 4454:2001 Erd- und Grundbau - Injektionen in Fest- und Lockergestein - Prüfungen
- [29] Österreichische Normierungsinstitut: ÖNORM EN 12715 „Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Injektionen“
- [30] Österreichische Normierungsinstitut: ÖNORM EN 1504-5:2012 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 5: Injektion von Betonbauteilen
- [31] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: Richtlinie Injektionstechnik, Teil 1: Bauten aus Beton und Stahlbeton, Wien, 2008
- [32] Riedmüller G., Schubert W., Semprich S.: Injektionen im Boden und Fels, Heft 13, Technische Universität Graz, 2002
- [33] Roder Ch., Mähner D., Willmes M.: Einfluss der Firstspaltverpressung auf zerstörungsfreie Schalendickenmessungen an Tunnelinnenschalen im Bereich von Bundesfernstraßen, In: Fachtagung Bauwerksdiagnose 2008 - Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen und Zukunftsaufgabe
- [34] Schnell W.: Verfahrenstechnik zur Sicherung von Baugruben, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 1995

-
- [35] Stein D., Schößer B., Statezni Ch.: Entwicklung und Erprobung von optimierten Injektionsmitteln und -verfahren zur kontinuierlichen Ringspaltstützung beim Rohrvortrieb im heterogenen Baugrund, Ruhr Universität, Bochum, 2007
 - [36] Thewes M. und Budach Ch.: Mörtel im Tunnelbau, In: BauPortal- Heft 12, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co, München, 2009
 - [37] Thienert C.: Zementfreie Mörtel für die Ringspaltverpressung beim maschinellen Tunnelvortrieb, In: Forschung+Praxis: STUVA-Tagung Band 43, Berlin, 2011
 - [38] Triantafyllidis T.: Planung und Bauausführung im Spezialtiefbau, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2004
 - [39] TU Wien, Institut für Geotechnik, Vorlesungsunterlagen Baugrund und Injektion, 2013
 - [40] TU Wien, Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Vorlesungsunterlagen Bauverfahren im Tiefbau, 2014
 - [41] TU Wien, Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Vorlesungsunterlagen Bauverfahrenstechnik, 2011
 - [42] Wichter L. und Meiniger W.: Verpressanker, In: GRUNDBAU-TASCHENBUCH Teil 2: Geotechnische Verfahren/ Witt K. J., 7. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2009
 - [43] Widman R.: Einführung in die Problematik der Injektionen in Fels, In: Mitteilungen für Ingenieurgeologie und Geomechanik/ Poisel Rainer, 1. Auflage, Wien, 1998
 - [44] Wittke W.: Statik und Konstruktion maschineller Tunnelvortriebe, Glückauf GmbH Verlag, Essen, 2006

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Verpressanker	9
Abb. 1.2: Anwendungsgebiete von Injektionen (exemplarisch)	11
Abb. 1.3: Ausbildungsvarianten dichte Baugrubensohle: a) natürliche Dichtsohle aus bindigem Boden, b) hochliegende Sohle ohne Verankerung, c) hochliegende verankerte Sohle, d) tiefliegende Sohle	12
Abb. 1.4: Injektionsprinzipien und –verfahren nach ÖNORM EN 12715.....	14
Abb. 1.5: Herstellung von Düsenstrahlsäulen	17
Abb. 1.6: Anwendungsbereiche von Injektionsmittel	18
Abb. 1.7: Ebener Schnitt durch eine Porenengstelle	19
Abb. 1.8: Porenengstellverteilung	20
Abb. 1.9: Druckverlauf vom Bohrlochmund bis in den Spalt.....	23
Abb. 1.10: Darstellung des Injektionsdruckes als Funktion des Injektionsvolumens für verschiedene GIN Werte.....	24
Abb. 2.1: Fluidfilm zwischen ruhender Platte (unten) und bewegter Platte (oben).....	26
Abb. 2.2: Schubspannungs-Schergeschwindigkeits-Diagramm	28
Abb. 2.3: Beziehung zwischen Durchlässigkeitsbeiwert und Einpressmittel.....	34
Abb. 3.1: Lugeon-Test mit Einfachpacker	38
Abb. 3.2: Grundformen der Druckmengendiagramme von WD-Testen	39
Abb. 3.3: Rotationskernbohrung mit Doppelkernrohr	43
Abb. 3.4: Rammkernbohrung.....	44
Abb. 3.5: Schema des Drehbohrverfahrens	45
Abb. 3.6: Rollenmeißelarten.....	45
Abb. 3.7: Drehbohren mit Bohrschnecke.....	46
Abb. 3.8: Drehschlagbohren mit Hammer Übertage und Im- Loch-Hammer	46
Abb. 3.9: Bohrkronentypen	48
Abb. 3.10: Kernbohrsysteme.....	49
Abb. 3.11: Wirkschema von Kolloidalmischer	52
Abb. 3.12: Kompakte Injektionsanlage.....	52
Abb. 3.13: Injektions-Pumpen, Injektions-Container und Pump-Stationen.....	53
Abb. 3.14: Zwei-Komponenten-Pumpe	53
Abb. 3.15: Schema eines Doppelpackers mit Manschettenrohr	55
Abb. 3.16: Herstellung von STS-Säule bei Verdichtungsinjektion	58
Abb. 4.1: Teilausbrucharten.....	61
Abb. 4.2: Tunnelvortriebsmethoden	62

Abb. 5.1: Tunnelabdichtungskonzepte	65
Abb. 5.2: Abdichtungssysteme und zusätzliche Maßnahmen.....	66
Abb. 5.3: Schema eines Injektionsschirms "Injektionszwiebel"	68
Abb. 5.4: Undichter Dehnteil	71
Abb. 5.5: Umläufiger Dehnteil	71
Abb. 5.6: Direkte Injektion im Bereich der Umläufigkeit.....	72
Abb. 5.7: Vergelung der Fuge	73
Abb. 5.8: Injektion des Zwischenraumes zwischen Fugenband und raumseitiger Bauteiloberfläche	74
Abb. 5.9: Befestigung des Injektions Schlauchs	75
Abb. 5.10: Abdichten durch Injektionsschlauchsystem.....	75
Abb. 5.11: Typische Schalenrisse	79
Abb. 5.12: Arten von Betonrissinjektionsspacker	83
Abb. 5.13: Anordnung der Packer	84
Abb. 5.14: Spaltbildung im Firstbereich.....	85
Abb. 5.15: Messraster und -Ergebnisse	86
Abb. 5.16: Ringspaltgröße	87
Abb. 5.17: Perlkiesverblasung durch den Tübbing im Festgestein	89
Abb. 5.18: Ringspaltverpresseinrichtung und Bürstendichtung	90
Abb. 5.19: Lisenenanordnung im Schildschwanzblech.....	90
Abb. 5.20: Einflussfaktoren des Injektionserfolgs	93
Abb. 5.21: Ausbildung des Gelschleiers in Abhängigkeit von der Anzahl der Stufen; links: 1-Stufeninjektion, rechts: 2-Stufeninjektion	95
Abb. 5.22: Technologiestufen bei Schleierinjektionen im Tunnelbau.....	96
Abb. 5.23: Undichte Fehlstellen bei offener Bauweise	97
Abb. 5.24: Bereichsweiser Ersatz der Schlitzwand durch eine Injektionswand.....	98
Abb. 5.25: Beseitigungsschritte beim Vorhandensein von Findlingen	99
Abb. 5.26: Injektionen hinter der Spundwand.....	100
Abb. 5.27: Zusätzliche Injektionsmaßnahmen bei Pfahlfehlstellen	102
Abb. 5.28: Schritte zur Errichtung einer hochliegenden Injektionssohle	103
Abb. 5.29: Berechnung der Dicke der Bodenwiderstandsschicht.....	105
Abb. 6.1: Setzen eines Füllmörtelankers.....	107
Abb. 6.2: Schema eines Verpressankers	108
Abb. 6.3: Herstellung eines Ankers „über Kopf“	110
Abb. 6.4: Mechanismen zur Nachverpressung.....	111
Abb. 6.5: Sicherung mit Spiessen, Ankern, Injektionen, Gitterträgern und Spritzbeton.....	112
Abb. 6.6: Stahlrohr mit Injektionsventil	114

Abb. 6.7: Prinzip der DSV-Säulen Erstellung	116
Abb. 6.8: Herstellungsschritte einesDSV-Schirms.....	117
Abb. 6.9: Vertikale Rissbildung bei Erstinjektion und horizontale Rissbildung bei Folgeinjektion	119
Abb. 6.10: Anwendungsgrenzen verschiedener Injektionsmittel beim Soilfracturing-Verfahren.....	119
Abb. 6.11: Ausgangspunkten zur Ausführung von Hebungsinjektionen	120
Abb. 6.12: Injektionskonzepte beim Druckstollen	122
Abb. 6.13: Kontaktinjektion über Packer und Injektionsschläuche.....	123

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1: Injektionsfähigkeit nach der Korngröße	18
Tab. 1.2: Injektionsfähigkeit nach der Kluftweite	20
Tab. 1.3: Einpressdruckgröße	22
Tab. 2.1: Anwendungsgebiete von Harzen	33
Tab. 2.2: Injektionsmittel	35
Tab. 3.1: Untersuchungsparameter und -methoden	37
Tab. 3.2: Untersuchung der Injektionsmittel	41
Tab. 5.1: Kriterien für die Wahl des Abdichtungssystems	66
Tab. 5.2: Injektionsmaterialien für die Injektionschlauchverpressung	76
Tab. 5.3: Ringspaltverfüllung bei Schildvortriebsmaschinen mit Tübbingauskleidung	88
Tab. 5.4: Rezeptur eines 2-K-Verpressmaterials [kg pro m ³ Frischmörtel]	92
Tab. 5.5: Erfahrungswerte für Abstände der Bohrpacker bei einer bauteilnahen Abdichtungsinjektion mit Acrylatgel	94
Tab. 6.1: Korrosionsschutz bei Kurzzeit- und Dauerankern	109
Tab. 6.2: Erzielbare Festigkeiten des DSV-Körpers	115
Tab. 7.1: Injektionsmitteln und ihre Anwendung im Tunnelbau	125