

# Vorinjektion im Tunnelbau – eine vernünftige Maßnahme

**Knut F. Garshol**

(deutsche Version von Roland Mayr)

**MBT Latin America**

## 1 Einführung

Eine der Ortsbrust voreilende Injektion kann viele Vorteile mit sich bringen, wird aber selbst bei zweckdienlicher Notwendigkeit häufig nicht eingesetzt K aufgrund mangelnder Erfahrung oder unzureichendem Wissensstand im Injektionsbereich. Oft existieren auch schwer auszuräumende Missverständnisse, etwa daß Injektionsmaßnahmen extrem teuer und nicht sehr wirksam sind.

Ein anderer Grund ist die Entscheidung, zeit- und kostenintensive Vorinjektionsmaßnahmen für Grundwasserbeherrschung bzw. Gebirgsverbesserung zu treffen, ohne daß eine offensichtliche Notwendigkeit gegeben ist.

Der Ortsbrust vorausseilende Erkundungsbohrungen sind eine sinnvolle Vorinjektionsmaßnahme für den Vortrieb. Ein signifikanter Wassereinbruch an der Ortsbrust stellt ein massives Problem dar, angetroffen durch eine Erkundungsbohrung, ist das Problem leicht lösbar.

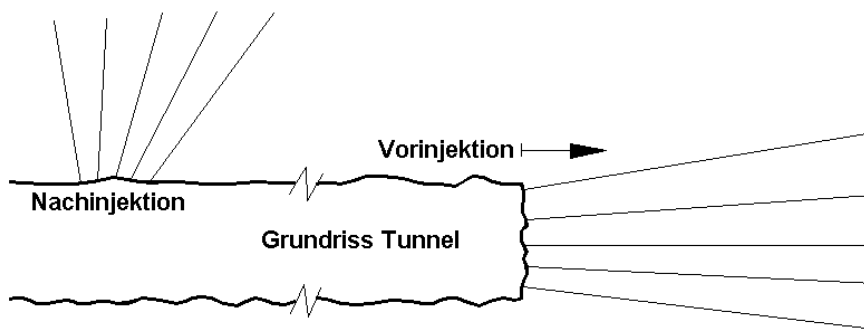
### 1.1 Verfahrensbeschreibung

#### **Gebirgsinjektion**

In das Gebirge werden Bohrlöcher mit entsprechendem Durchmesser, Länge und Richtung gebohrt; Setzen von Packern nahe dem Bohrlochmund (oder jede andere Maßnahme welche einen druckdichten Anschluss an das Bohrloch gewährleistet); Verbindung von Pumpe und Bohrlochpacker mittels Schläuchen oder Rohren; Einbringen des Injektionsmaterials mit Überdruck in Klüfte und Risse im Umgebungsbereich des Bohrloches.

Bei Injektionen im Tunnelbau sind zwei grundlegend verschiedene Situationen zu unterscheiden:

- Vorinjektionen: dem Vortrieb vorlaufende Injektionsmaßnahmen. Die Bohrlöcher werden der Ortsbrust voreilend in das unverritzte Gebirge gebohrt und das eingebrachte Injektionsmaterial verbessert das Gebirge dem Vortrieb voreilend. Bei seichtliegendem Tunnel bzw. Tunnel mit geringer Überlagerung sowie Zugang zur Oberfläche kann eine voreilende Injektion auch von ober Tage ausgeführt werden.
- Nachinjektionen: das Bohren und Injizieren wird im bereits hergestellten Tunnelbereich hinter der Ortsbrust durchgeführt.



**Abb. 1:** Vorinjektion und Nachinjektion

In den meisten Fällen dient eine Injektion im Tunnelbau der Beherrschung und Kontrolle des Grundwassers. Eine Verbesserung der Gebirgsverhältnisse ist nur gelegentlich das Hauptziel, oft jedoch ein angenehmer Nebeneffekt einer Injektion zum Zweck der Grundwasserbeherrschung. Vorwiegend werden im Tunnelbau zementöse Injektionen verwendet. Es sind jedoch einige sehr brauchbare chemische Injektionen verfügbar.

Die Injektion des Gebirges um einen Tunnel ist eine seit 50 Jahren verwendete Technik. Sie hat sich in den letzten 15 bis 20 Jahren jedoch sehr stark weiterentwickelt, hauptsächlich in Skandinavien. Injektionen wurden in einer Vielzahl von Gebirgstypen - von weichen, zerklüfteten Sedimentgesteinen bis zu Granitgneis - gegen hohen Wasserdruck (50 bar) wie auch in seichtliegenden, innerstädtischen Tunnel erfolgreich eingesetzt.

## 2 Tunnelinjektionen

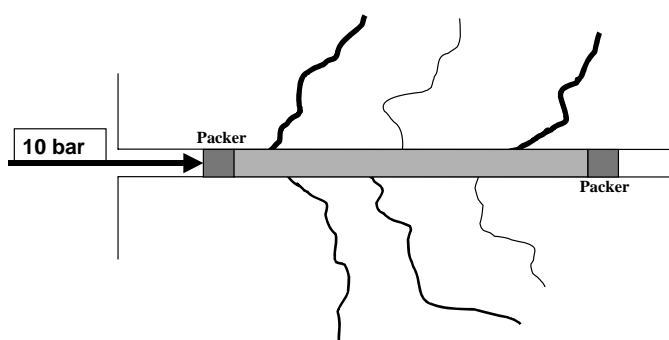
### 2.1 Traditionelle Zementinjektion

Felsinjektionen wurden ursprünglich für Dammfundierungen im Kraftwerksbau und für allgemeine Bodenstabilisierung entwickelt. Bei solchen Aufgabenstellungen gibt es normalerweise keine Einschränkungen des verfügbaren Arbeitsraumes. Deshalb war das Injizieren meist eine separate Tätigkeit, die ohne Beeinträchtigung oder Behinderung durch andere Baustellenaktivitäten durchgeführt werden konnte.

Die klassische Technik der Zementinjektion konnte deshalb ohne großes Augenmerk auf Effizienz ausgeführt werden. Die typische Art der Ausführung war:

- Intensive Anwendung von Wasserabpressversuchen (WPT) an kurzen Abschnitten der Bohrlöcher (3-5 m) zwecks Bewertung der Wasserdurchlässigkeit (siehe Abb. 2). Dieser Vorgang beinhaltet die Durchführung von WPT – Versuchen entlang der Bohrlöcher, um den gesamten Wasserverlust zu beurteilen, d.h. welche Abschnitte des Bohrlochs wasserundurchlässig sind und welche ein Abfließen des Wassers erlauben. Die Ergebnisse wurden für die Entscheidungsfindung betreffend der Injektionseigenschaften verwendet: chemische oder zementöse Injektion bzw. Wasser/ Zement Verhältnis (w/z Wert nach Gewicht).

#### Wasserabpressversuch



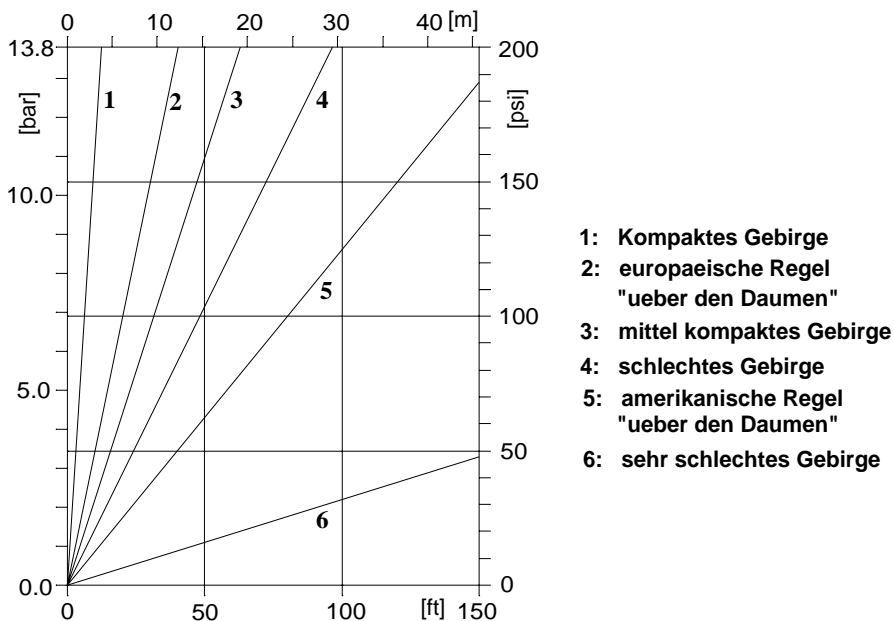
1 Lugeon = 1.0 Liter/Minute  
und Meter Bohrloch bei 10 bar Druck

**Abb. 2:** Wasserabpressversuch

- Verwendung von Injektionen mit variablem meist sehr hohen W/Z Wert (bis zu 4,0) und „injizieren so lange es geht“ d.h. das Injektionsmaterial wird

solange eingepumpt bis der maximal zulässige Druck ohne eine weitere Materialaufnahme erreicht wird.

- Zugabe von Bentonit um ein Absetzen (bluten) zu verhindern und die Leitungen zu schmieren.
- Abgestufte Injektion (in Hinblick auf Tiefe von der Oberfläche); Niederdruckinjektion oder Injektion auf Lücke (neue Bohrlöcher werden zwischen bereits injizierten gebohrt).



**Abb. 3:** Verhältnis zwischen Überlagerung und zulässigem Injektionsdruck nach ISRM (1995)

Der obige Ansatz macht Injektionen sehr zeitaufwändig:

- WPT alle 5 m.
- Das Pumpen von grossen Wassermengen in Hinblick auf die Zementmenge, überflüssiges Ausbreiten des Injektionsmaterials auf Grund des notwendigen Gegendruckes (Beendigung der Injektion erst, wenn kein Injektionsgut mehr aufgenommen wird).
- Konstanthalten des Druckes für eine gewisse Zeit (z.B. 10 min), um das überschüssige Wasser auszupressen und das Injektionsgut zu verdichten; langsame Festigkeitsentwicklung und komplizierte Arbeitsabläufe.

All dies bewirkt eine lange Ausführungsdauer.

Die Begrenzung des Injektionsdruckes, um ein Aufreissen oder „Heben“ des Gebirges zu verhindern (normalerweise unter 5 bar) bzw. eine konservative Annahme des Überlagerungsdruckes, reduziert den Wirkungsgrad der einzelnen Injektionsstufen. Zur Erreichung der gewünschten Abdichtung müssen weitere Bohrungen und Injektionen durchgeführt werden (siehe Abb. 3)

*Zusammenfassung:* Die oben beschriebene traditionelle Zementinjektion ist zur Erreichung eines gewünschten Abdichtungseffektes ziemlich ineffizient in Hinblick auf Zeit und Materialeinsatz. Das ist speziell im Tunnelbau der Fall, wo die Überlagerung und fehlende freie Fläche hohe Injektionsdrücke mit geringem Risiko erlaubt.

## **2.2 Ursachen für den vermehrten Einsatz von Vorinjektionen**

In den letzten 20 Jahren wurde das voreilende Injizieren der Ortsbrust (als „Vorinjektion“ bezeichnet) ein wichtiges Hilfsmittel im modernen Tunnelbau. Dafür gibt es eine Anzahl von Gründen:

- Von Seiten der Behörden werden häufig Beschränkungen betreffend die Drainagewirkung von Tunnel und damit dem Wasserzufluss vorgeschrieben. Dies hat ökologische Gründe und dient auch der Setzungsminimierung (und damit verbundener Schäden) an der Oberfläche.
- Die Gefahr von Wassereinbrüchen oder das unvorhersehbare Anfahren von extrem schlechten Gebirgsverhältnissen kann ausgeschlossen werden, da systematische Erkundungsbohrungen einen integralen Teil des Vorinjektionsverfahrens ausmachen.
- Schlechte Gebirgsverhältnisse können bereits vor der Ortsbrust und dem Anfahren durch den Vortrieb signifikant verbessert werden. Das verbessert die Standfestigkeit des letzten Abschlags sowie der Ortsbrust und minimiert somit die Gefahr eines Verbruches bei schlechten Gebirgsverhältnissen.
- Das Risiko einer Umweltverschmutzung durch Abwassertunnel oder Tunnel, die gefährliche Produkte transportieren, wird verhindert oder minimiert.
- Innenschalen in Spritzbetonbauweise bieten ein bedeutendes Einsparungspotential an Kosten und Zeit. Solche Innenschalen können jedoch nicht unter nassen Bedingungen in einer befriedigenden Qualität hergestellt werden. Eine Kontrolle der Bergwasserzuflüsse durch Vorinjektionsmaßnahmen kann Abhilfe schaffen.

Table 1. Beispiele von Wasserzuflüssen an der Ortsbrust R. Fu et.al. (2001)

Projekt	Länge (km)	Zufluss m <sup>3</sup> /min	Wasserdruck (bar)	Ort
Pinglin	12.8	10.8	20	Taiwan, R.O.C
Yung-Chuen	4.4	67.8	35	Taiwan, R.O.C
Central (East Portal)	8	18.6		Taiwan, R.O.C
Seikan	53.8	67.8		Japan
Semmering Erkundungsstollen	10	21		Österreich
Gotthard Piora Erkundungsstollen	5.5	24	90	Schweiz
Isafjordur	9	150-180	6-12	Island
Abou	4.6	180	22	Japan
Lungchien tailrace	.8	81		Taiwan, R.O.C
NorthWest Himalaya	10	72		Indien
Access Oyestol		5	50	(Zufluss in 1 Bohrloch) Norwegen
Kjela (Bordalsvann)		15	23	Norwegen
Ulla Forre, Flottene		40		Norwegen

Mit modernen Bohrwägen kann selbst zähes, kompaktes Gebirge mit Penetrationsraten von 2.5 bis 3.0 m/min gebohrt werden. Das führt zu geringen Kosten bei Erkundungsbohrungen als Schutz vor plötzlich zerstörenden Wassereintrüben. Trotzdem ist es bei einer Anzahl von Projekten zu katastrophalen Situationen gekommen, die Projekte wurden oft für Monate gestoppt. Es ist ein Rätsel warum man sich nicht für begrenzte Erkundungsbohrungen und somit für geringe Kosten entscheidet, um die Folgen eines möglichen Wassereintruchs zu vermeiden? Speziell wenn wir wissen, dass bei Früherkennung die Durchführung von Gegenmaßnahmen zu einem Bruchteil der Zeit und Kosten möglich ist, als bei plötzlichem Auffahren. Die Liste der Beispiele ist lang, und nur einige sind in Tabelle 1 angeführt. Die letzten drei Beispiele wurden vom Autor angefügt.

### 2.3 Anmerkungen zu Nach-Injektionen

Injektionen hinter der Ortsbrust (Nachinjektionen) sollten mit Vorinjektionen zum Abdichten von verbliebenen Nassstellen eingesetzt werden. Das wird speziell dann notwendig, wenn mit der Vorinjektion nicht die erforderliche durchschnittliche Dichtigkeit eines bestimmten Tunnelabschnittes erreicht wurde. Interessanterweise konnte beobachtet werden, dass die Nachinjektion bei weitem wirksamer ist, wenn bereits im gleichen Abschnitt eine Vorinjektion durchgeführt

wurde. Das typische Problem des Wanderns von Wasserzuflüssen, ohne sie wirklich abzudichten, kann meist verhindert werden.

In mehreren Projekten wurde wiederholt die Erfahrung gemacht, dass nur über Nachinjektionsmaßnahmen selten das gewünschte Ergebnis erreicht wird und wenn, dann nur unter extremer Ausnutzung aller Reserven. Wenn mittels Injektionsmaßnahmen ein bestimmtes Maß an Wasserdichtigkeit erreicht werden soll, kann die Bedeutung einer Vorinjektion nicht genug betont werden. Der Grund liegt darin, dass die Vorinjektion die Klüfte vor Beginn eines Wasserzuflusses versiegelt, während bei der Nachinjektion das Wasser bereits in den Tunnel einfließt und die Klüfte bei strömendem Wasser abgedichtet werden müssen. Ein Effekt bei der Nachinjektion ist deshalb das Auswaschen des Injektionsmaterials. Eine zusammenfassende Studie über mehrere Norwegische Projekte von O. Stenstad (1998) zeigt, dass der Zeit und Kostenaufwand zur Erreichung eines geforderten Ergebnisses beim Nachinjektionsverfahren 30 bis 60 mal höher als beim Vorinjektionsverfahren sein kann.

Die Verbreitung des Injektionsmaterials beim Einpressen in das Gebirge wird vom Gesetz des geringsten Widerstandes bestimmt. Der kürzeste Weg mit dem geringsten Widerstand führt bei der Nachinjektion oft direkt in den Tunnel zurück. Um eine Ausbreitung des Injektionsmaterials im Gebirge zu gewährleisten muss als erstes der Rückfluss in den Tunnel gestoppt werden. Falls das Injektionsmaterial über wasserführende Klüfte in den Tunnel zurückfließt, wird es weiter verdünnt und ausgewaschen. Je größer die wasserführenden Klüfte, die Zuflussmenge und der Druck sind, desto schwieriger ist es sie abzudichten. Das sind genau die Ursachen für die von Stenstad aufgezeigten dramatischen Mehrkosten.

## **2.4 Der Tunnelbau Ansatz**

Im modernen Tunnelbau ist die Vortriebsgeschwindigkeit der entscheidende Faktor für die Gesamtwirtschaftlichkeit. Das ist mit den hohen Investitionskosten für die Tunnelausrüstung und den damit verbundenen Kapitalkosten verbunden. Hinzu kommt der beschränkte Platz an der Ortsbrust der parallele Aktivitäten meist ausschließt.

Die Vortriebsgeschwindigkeit wird von der, für die Vortriebsarbeiten notwendige Stundenanzahl, entschieden (unter der Voraussetzung, dass alle anderen Faktoren konstant bleiben). Die für die Vorinjektion benötigte Zeit muss deshalb in der Regel von der Vortriebszeit abgezogen werden. Die Stunde Vortriebszeit hat typischer Weise einen Wert von mehr als € 1000,- und es ist offensichtlich, dass alle Aktivitäten an der Ortsbrust optimal abgestimmt sein müssen. Daraus ergibt sich, dass sich Injektionsmaßnahmen im Tunnelbau grundsätzlich von Injektionen bei Dämmen oder von der Oberfläche aus unterscheiden. Dies ist einer der

Hauptursachen für die unterschiedliche technische Entwicklung bei Tunnelinjektionen im Vergleich zu anderen Arten der Felsinjektionen.

Dies ist auch einer der Gründe dafür, dass technische Richtlinien und Normen, welche mit besten Intentionen ausgearbeitet wurden, oft mit Untersuchungsprogrammen, Tests und Verfahrensanweisungen überladen sind. Dies wirkt sich im Endeffekt oft kontraproduktiv aus. Wenn eine stufenweise Durchführung von Wasserabpressversuchen in allen Bohrlöchern vorgeschrieben ist, wenn ein Teil der voreilenden Erkundungsbohrungen als Kernbohrungen vorgesehen ist, wenn die Öffnungsweite und Orientierung der Klüfte mit Kamerabefahrung festgestellt werden muss, etc., und all diese Maßnahmen mit einem komplizierten Vorgang der Entscheidungsfindung verbunden sind, so kann das in der Gesamtheit als Overkill bezeichnet werden. Forschungsvorhaben können nicht Teil von Injektionsarbeiten im Tunnelbau werden, wenn Kosten und Erfolg Priorität haben. Traurigerweise können selbst solch überambitionierte Verfahren das Endergebnis nur teilweise verbessern.

In den letzten 15 Jahren wurden neue zementöse Produkte für den Injektionsbereich entwickelt. Typischerweise sind diese Zemente feiner und können angepasste Erstarrungseigenschaften und Festigkeitsentwicklungen bieten. Meist werden diese Zemente mit Zusatzmittel und Additiven versehen, um gänzlich neue Zementmörteleigenschaften und Eindringtiefen zu gewährleisten. Zusammen mit Arbeitsanweisungen, welche an die neuen Materialeigenschaften angepasst sind, kann die Wirksamkeit signifikant vergrößert werden. Obwohl diese Zemente teurer als normale Portlandzemente sind, sind sie in Hinblick auf die Gesamtprojektkosten und die Ausführungsqualität konkurrenzfähig.

Erfolgsschlüssel: Stabile Microzementinjektion (kein „bluten“) mit niedriger Viskosität (Marsh Trichter Zeit  $< 32$  s) und schnellem Abbindeverhalten. Die Injektion erfolgt mit Hochdruck ( $> 50$  bar) unter Beachtung eines zweifachen Abbruchkriteriums (Erreichen des Druckes oder der Menge je Loch).



## 3 „Planung“ von Tunnelinjektionen

### 3.1 Hintergrund

Planung von Felsinjektionsmaßnahmen beinhaltet im Wesentlichen die Auslegung des Bohrrasters, die Spezifizierung der Injektionsmaterialien sowie die Methoden und Maßnahmen bei der Ausführung. Diese Einflussgrößen können ingenieurmäßig gesteuert und den vorherrschenden Gegebenheiten angepasst werden, um das gewünschte Ergebnis zu erreichen. Eine genaue Vorhersage des erreichbaren Ergebnisses ist aufgrund der geologischen Unsicherheit und der Natur der Injektionstechnik nicht möglich. Niemand kann die Vorgänge im Gebirge während der Injektion direkt beobachten. Nur indirekten Methoden, wie eine Beurteilung des Wasserzuflusses in den Tunnel oder eine Inaugenscheinnahme des ausgebrochenen, vorinjizierten Tunnels, können durchgeführt werden.

Selbst eine Beurteilung von sorgfältig gesteuerten Großversuchen (full scale) kann sich als schwierig erweisen. Die Änderungen in den Gebirgsverhältnissen von einem zum anderen Testort können nicht genau quantifiziert werden. Nichtsdestotrotz wurden die meisten Grundsätze der Vorinjektion mit Hilfe der Ergebnisse einiger tausend Tonnen injizierten Materials entwickelt und unterstützt. Ein Verständnis der Grundsätze ist nicht soviel Spekulation wie oft behauptet wird.

Der Begriff „Planung“ benötigt im Zusammenhang mit Tunnelinjektionen einige Erklärungen. Der Erklärungsbedarf ergibt sich aus der unterschiedlichen Verwendung des Begriffs im Vergleich zum normalen Sprachgebrauch:

Die Planung im Hochbau oder einer Brücke beinhaltet die Erstellung der notwendigen Pläne, Statiken und Richtlinien, eine Festlegung der Abmessungen und Geometrie, der Lastannahmen der Fundamente und der generellen Auslegung des zu bauenden Gebäudes. Die gesamte Planung hat die physische Umgebung, die Anforderungen des Bauherrn betreffend Lasten und Lebensdauer sowie sonstige Einschränkungen zu berücksichtigen.

Im Fall von Tunnelinjektionen werden viele erwarten, dass die obigen Grundsätze auf die „Planung“ anwendbar sind. In Wirklichkeit ist es nicht möglich die Arbeiten im Detail voraus zu planen, und in keiner Weise entspricht es dem Planungsprozess des vorigen Absatzes. Die Planung von Injektionsmaßnahmen im Tunnelbau geht von einer guten Schätzung der durchschnittlichen Durchlässigkeiten im zu durchörternden Gebirge aus. Typischerweise beinhaltet die Planung Berechnungen über den wahrscheinlichen Wasserzufluss; Pläne über Art, Tiefe, Winkel und Bohrraster der Injektionslöcher; Ausführungsanweisungen über alle Aspekte der Arbeiten sowie Materialspezifikationen. Ziel ist es, die geforderte Dichtigkeit des Tunnels zu gewährleisten. Es ist keine Frage, dass Pläne erforderlich sind, welche das Endergebnis der Arbeiten mit Abmessungen zeigen.

Eine Voruntersuchung beim Felstunnel kann niemals ausreichenden Kenntnisstand über die Gebirgsverhältnisse und hydrogeologischen Verhältnisse liefern, um einen Planungsansatz wie bei einer Brücke zu erlauben. Weiters sind die verfügbaren Berechnungsmethoden nicht ausreichend, um die Verknüpfung von Ergebnis und der notwendigen Schritte dahin zu analysieren. Zugegeben, es besteht keine Möglichkeit, alle Materialeigenschaften genau genug zu messen, um sie dann in ein eventuell verfügbares mathematisches Modell einzugeben.

### 3.2 Praktische Planungsschritte

Die grundsätzliche Planung für oben beschriebene Injektionsmaßnahmen auf Basis eines empirisch beobachteten Planungsvorganges mit iterativer Rückkopplung, hat folgendermaßen abzulaufen:

- Nach Festlegung der Anforderungen an die Dichtigkeit können die Projektdaten und alle anderen Informationen über Gebirgsverhältnisse und Hydrogeologie analysiert und mit den Anforderungen verglichen werden. Das beinhaltet oft überschlägige Berechnungen des potentiellen Wasserzuflusses unter verschiedenen typischen Gegebenheiten. Auf Basis von empirischen Daten (von früheren Vorinjektionen in Tunnelprojekten) kann dann eine umfassende Beschreibung der notwendigen Maßnahmen zusammengestellt werden. Wie umfangreich diese Arbeitsbeschreibung („Planung“) auch ist, und egal welche Hilfsmittel und Berechnungsverfahren eingesetzt wurden, wird sie immer eine Prognose bleiben. Diese Prognose beschreibt die Ausführung der Vorinjektionsarbeiten unter Annahme bestimmter erwarteter Gebirgsverhältnisse bzw. die notwendigen Schritte um die geforderte Dichtigkeit des Tunnels zu erreichen.
- Nach dem Ausbruch kann die erreichte Dichtigkeit, in Bezug auf Wasserzuflüsse, genau gemessen werden. D.h., die zufließende Wassermenge kann der Größe nach mit der geforderten Vorgabe verglichen werden und damit ist eine eindeutige Beurteilung der Situation möglich. Wenn die Resultate befriedigend sind, so werden die Arbeiten ohne Änderungen weitergeführt. Es ist nur eine weitere Bestätigung der Zuflussraten mittels Messungen notwendig.
- Ist der gemessene Wasserzufluss zu hoch, so wird diese Information für eine weitere Entscheidungsfindung verwendet, wie die „Planung“ anzupassen ist, um befriedigende Ergebnisse für den verbleibenden Tunnelabschnitt zu bekommen. Eine stufenweise Anpassung des Planungsprozesses kann für ein ausreichendes Ergebnis notwendig sein. Fertiggestellte Tunnelabschnitte, welche nicht den Anforderungen der Planung/Ausschreibung entsprechen, müssen örtlich nachinjiziert werden bis entweder der Wasserzufluss gering genug ist oder ein Kompromiss betreffend die Anforderung getroffen wurde.

### 3.3 Prognose der Injektionsmengen

Fast alle Vorinjektionen im Felstunnelbau sind auf Zementbasis (Portlandzement oder Mikrozemente). In speziellen Fällen, wie Gebirgsverhältnisse mit Ton oder anderen feinen Bestandteilen als Kluffüllung, bzw. wenn der Abdichtungserfolg mit Zement alleine nicht erreicht werden kann, werden als Zusatzmaßnahmen chemische Injektionen eingesetzt. Es gibt keine Erfahrung für den Haupteinsatz von chemischen Injektionen, welcher den typischen Verbrauch angibt. Für die Zementinjektionen ist dies jedoch vorhanden.

Auch im Fall von Zementinjektionen hängt die erforderliche Menge von einer Vielzahl von Faktoren ab und jede Schätzung im Voraus ist ungenau. Hauptinflussfaktoren sind die Gebirgseigenschaften (Gefügeeigenschaften), da eine geringe Anzahl von weit offenen Klüften mehr Zement aufnimmt als eine Kleinklüftung im cm-Abstand, welche stark verteiltes Tropfwasser im Tunnel verursacht („Regen“). Andere wichtige Faktoren sind die geforderte Dichtigkeit nach erfolgter Injektion, der Wasserdruck, der Tunnelquerschnitt, die Zementtype und die angewandte Injektionstechnik.

Es gibt Durchschnittsverbräuche von Tunnelprojekten mit systematischer Vorerkundung und örtlicher systematischer Vorinjektion unter verschiedenen skandinavischen Bedingungen. Sie variieren im Durchschnitt über die gesamte Tunnellänge zwischen weniger als 20 kg/m und mehr als 250 kg/m. Einen Extremfall stellt der Bjoroy Strassentunnel (unter dem Meer) dar, wo auf einen Abschnitt von 500 m Länge 2000 kg/m verbraucht wurden.

Bei der Bewertung empirischer Daten mit so großem Streubereich, erweist sich ein probabilistischer Ansatz als nützlich. Wenn wir zur Illustration der empirischen Daten drei verschiedene Zahlen festlegen, stellt es sich folgendermaßen dar:

1. Der kleinste Durchschnittsverbrauch (mit 5% Wahrscheinlichkeit, dass der Durchschnitt kleiner ist)	15 kg/m
2. Der wahrscheinliche Durchschnittsverbrauch über die Tunnellänge	50 kg/m
3. Der grösste Durchschnittsverbrauch (mit 5% Wahrscheinlichkeit, dass der Durchschnitt größer ist)	500 kg/m

Diese Werte sind vorwiegend für Festgestein (jedoch nicht nur granitischer Fels) repräsentativ und die Tunnellänge muss über 1000 m sein, um einen annehmbaren Durchschnitt zu geben. Es ist offensichtlich, dass diese Zahlen nur als Illustration bereits ausgeführter Projekte angesehen werden können. Sie können nicht direkt (und treffsicher) auf neue Projekte mit anderen Gebirgsverhältnissen übertragen werden.

## 4 Ausführung

### 4.1 Hintergrund

Wie bei allen Arbeiten ist es wichtig, die richtige Ausrüstung zu verwenden. Da dies zu weit führen würde, wird es in diesem Artikel nicht behandelt. Es kann jedoch nicht genug betont werden, dass für die Durchführung von Zementinjektionen ein geeigneter Kolloidalmischer, ein Tank mit Rührwerk und eine Pumpe, die mindestens 100 bar Druck aufbringen kann, verwendet werden sollen. Die Pumpe sollte wegen der einfachen Regulierung hydraulisch arbeiten. Die Ausrüstung für chemische Injektionen variiert mit der Art des eingesetzten Injektionsmaterials.

### 4.2 Beispiel für den Sprengvortrieb

Dieses Kapitel beschreibt eine beispielhafte Anwendung einer systematischen Vorinjektion in einem Tunnel mit Sprengvortrieb. Der im folgenden beschriebene Ansatz geht von einer modernen Mikrozinjektion aus, ohne „bluten“ mit niedriger Viskosität (Marsh Trichter Zeit  $< 32$  s) mit zusätzlichen chemischen Produkten (schnell aufschäumendes Polyurethan und Acrylharze) unter Berücksichtigung der Erfahrungen bei ähnlichen Projekten in den letzten Jahren.

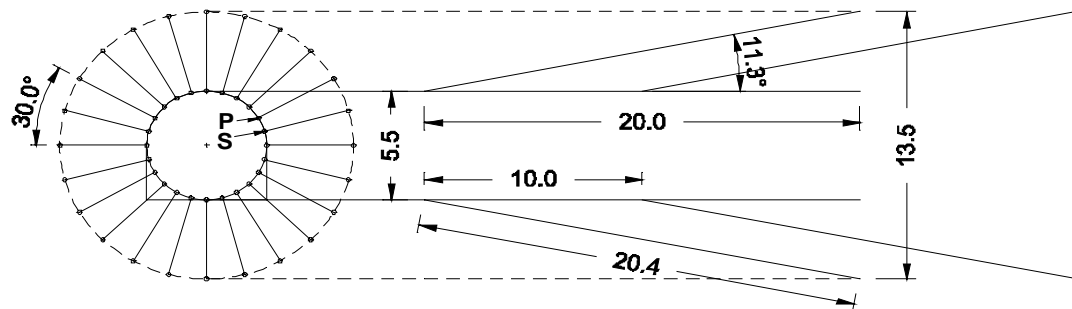
Als Beispiel dient ein Tunnel mit einem Durchmesser von 5,5 m. Die durchschnittliche Permeabilität ist  $k = 3 \times 10^{-5}$  m/s und die Injektionsmaßnahmen sollten diese auf  $k = 5 \times 10^{-7}$  m/s vermindern. Das stellt eine strikte Anforderung dar; in Konsequenz wird eine Vorinjektion durchgeführt, ohne Rücksicht auf die Ergebnisse von Erkundungsbohrungen, auf welche verzichtet wird. (Bei weniger strengen Anforderungen an die Dichtheit kann ein entspannterer Ansatz gute Ergebnisse bringen).

#### 4.2.1 Bohren der Injektionslöcher

Wenn die Bohrlöcher mit einem hydraulischen Bohrwagen hergestellt werden, ergibt dies den besten Wirkungsgrad und die beste Kontrolle. Während des Bohrens werden Störungszonen im Gebirge und Wasserzuflüsse vom Polier in einem Bohrprotokoll händisch festgehalten. Die Bohrlöcher müssen mit Wasserspülung gebohrt werden.

Grundsätzlich haben alle Bohrlöcher eine Länge von 20 m. Wenn alle 10 m ein Injektionsschirm mit 20 m Länge gebohrt und injiziert wird, ist das Risiko während des Vortriebs nichtverpresste Zuflüsse aufzufahren nahe Null. Das ist wichtig, um das Zufließen von unkontrollierten Wassermengen in den Tunnel zu vermeiden. Bei einer Überlappung der Injektionsfächer von 100 % ist die Ausführungsqualität entsprechend gut.

Die Bohrlöcher werden grundsätzlich in einem Winkel von  $11^\circ$  zur Tunnelachse gebohrt; für spezielle Situationen oder Gebirgsverhältnisse können auch andere Richtungen geeigneter sein. Die Anzahl der Bohrlöcher ist in Abbildung 4 dargestellt.



**Abb. 4:** Systematische Vorinjektion mit voller Überlappung

Die Bohrlöcher müssen vor Beginn der Injektion mit 10 bar Wasserdruck gespült werden. Das Spülen erfolgt, indem ein steifer PVC Schlauch bis ans Ende des Bohrlochs eingeschoben wird und langsam beim Spülen herausgezogen wird. Das Spülen ist wichtig für die Entfernung des Bohrkleins, welches anderenfalls die Klüfte verlegen kann. Wenn bei schlechten Gebirgsverhältnissen die Bohrlöcher nicht stabil sind oder wenn mehr als 10 l/min Wasser zufließt, wird auf das Spülen verzichtet.

## 4.2.2 Packer setzen

Die Packer werden in einer Tiefe von 1.0 bis 3.0 m gesetzt, abhängig von den Gebirgsverhältnissen. Bei extrem schlechten Gebirgsverhältnissen kann das Einmörteln von Standrohren aus Stahl oder Kunststoff erforderlich sein.

In Bohrlöchern mit Wasserzufluss sollten die Packer so schnell wie möglich gesetzt werden, um ein Zufließen von Wasser in den Tunnel zu vermeiden.

## 4.2.3 Wasserabpressversuche

Wasserabpressversuche sind routinemässig nicht erforderlich, da der Zeitaufwand in keinem Verhältnis zum Erkenntnisgewinn steht. Insbesondere gibt es bei der Verwendung von mikrofeinen Zementen mit einem definierten W/Z Wert, keinen Grund, um in solche Massnahmen zu investieren, da mit diesen Zementen eine grosse Bandbreite an Gebirgsverhältnissen beherrscht wird.

## 4.2.4 Auswahl des Injektionsmaterials

Es wird angenommen, dass Mikrozement als Hauptinjektionsmaterial geeignet ist. Bohrlöcher mit einem Wasserzufluss von mehr als 5 l/min sowie alle anderen Hauptbohrlöcher (1. Stufe) müssen mit Mikrozement verpresst werden.

Chemische Injektionen mit Acrylaten können abhängig von den Gebirgsverhältnissen und dem maximal zulässigen Wasserzutritt in den Tunnel notwendig werden. In diesem Fall sollte die chemische Injektion für die sekundären Bohrlöcher (2. Stufe) angewendet werden (sofern der Wasserzutritt in einzelne Bohrlöcher nicht zu hoch ist, siehe oben).

Ein Kluftwasserzutritt an die Ortsbrust oder in den Tunnel (nicht in Bohrlöcher) kann Probleme mit Umläufigkeiten oder Auswaschen der Injektion geben. Derartige Probleme können mit schnell aufschäumenden Polyurethan gelöst werden, da dieses sehr schnell wirkt und den Wasserfluss temporär unterbindet (gesteuert über die Zugabe von Beschleuniger). Alternativ können auch Mikrozemente, mit Beschleuniger vermischt, verwendet werden.

## 4.2.5 Injektionsdruck

Der Einpressdruck ist ein wichtiger Faktor für eine erfolgreiche Injektion und sollte so hoch sein wie es die Verhältnisse erlauben. Das ist einer der Vorteile einer der Ortsbrust voreilenden Vorinjektion (im Vergleich zur Nachinjektion) und sollte voll ausgenutzt werden. Bei den meisten Injektionen im Festgestein bedeutet dies einen Enddruck von 50 bis 60 bar.

Es gibt jedoch auch Situationen in denen andere Faktoren die Auswahl von Injektionsdruck und Verfahren beeinflussen. Einige Sondermassnahmen sind im Folgenden angeführt.

## 4.2.6 Sondermassnahmen

Bei Injektionsarbeiten müssen Sondermassnahmen getroffen werden, wenn entweder andere Baumassnahmen weniger als etwa 10 m entfernt sind oder die Überlagerung weniger als etwa 10 m beträgt. Auch sehr schlechtes Gebirge (Störungszonen) kann Sondermassnahmen erfordern.

Bei Bedarf können folgende Sondermassnahmen eingesetzt werden:

- Messung des Injektionsdruckes ausserhalb der Injektionsleitung und Festlegung eines niedrigen Maximaldruckes.
- Begrenzung der Injektionsmenge, wenn der Druck ein bestimmtes Niveau übersteigt. Da das Injektionsmaterial nicht schrumpft und bei Pumpende schnell abzubinden beginnt, füllt es den beanspruchten Raum gänzlich aus. Eine Injektion bis keine Aufnahme mehr erfolgt, zwecks Konsolidierung von stabilen Injektionsmaterial, ist nicht erforderlich.

### 4.2.7 Vorgangsweise bei der Injektion

- 1) Immer mit dem tiefsten Bohrloch an der Ortsbrust beginnen und zur Firste fortschreiten bis alle Bohrlöcher verpresst sind.
- 2) Sofern keine Sondermassnahmen erforderlich sind, ist das Verpressen eines Bohrlochs beendet, wenn entweder der maximale Druck, z.B. 60 bar (vorgeschriebener Druck erreicht und für eine Dauer von mindestens 2 Minuten gehalten) oder wenn 100 kg Zement injiziert wurden (unabhängig vom Druck).
- 3) Im Fall von chemischen Injektionen mit Acrylaten gilt ein Bohrloch als injiziert, wenn ein Druck von 30 bar (bei einer Aufnahme von weniger als 1l/min über 5 Minuten) oder eine Gesamtmenge von 500 kg erreicht wird.
- 4) Im Fall von direkter Umläufigkeit kann ein Beschleuniger für den Zement oder schnell aufschäumendes Polyurethan verwendet werden.

Wenn es beim Injektionsvorgang zu einer Umläufigkeit mit einem anderen Bohrloch kommt, muss der Packer des zweiten Bohrlochs geschlossen werden. Die Grenzmenge des Injektionsgutes wird mit der Anzahl der verbundenen Bohrlöcher multipliziert.

### 4.3 Flussdiagramm für die Entscheidung - Beispielkriterien

Typisch für die Verwendung von stabilem Mikrozzement, Bohrungen mit einfacher Überlappung und einem maximalen Wasserzutritt von 30 l/min auf 100 m Tunnel. Siehe Abbildung 5.

Schritt I: Erkundungsbohrungen. Eine typisches Bohrmuster zwei Bohrlöchern, jeweils in Position 12 Uhr und 6 Uhr, mit einem Winkel von 5 – 8° nach aussen. Bei hohem Risiko können 4 Löcher in den Positionen 6-9-12 und 3 Uhr gebohrt werden. Ausführung als Hammerbohrung mit Wasserspülung und einer Maximallänge von 30 m bei einer Überlappung von 5 m.

Das Bohrprotokoll (während des Bohrens) soll Folgendes enthalten:

- Anzeichen von Störungszonen, hoher Bohrfortschritt, Hohlräume.
- Verlust von Spülwasser
- Tiefe bemerkbaren Wasserzutritts
- Nach Fertigstellung: Zuflussrate in l/min

Beim Gestängeausbau sollte mit Wasser und Druckluft gespült werden, um das Bohrloch ausreichend zu reinigen.

**Injektionskriterium A:** Verpressen soll dann erfolgen, wenn eine der nachfolgenden Bedingungen erfüllt wird:

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

**Entfernungskriterium B:** Wenn der aufgezeichnete Wasserzutritt oder Spülwasserverlust tiefer als 15 m von der Ortsbrust auftritt, so kann die Ortsbrust bis auf etwa 5 m Abstand zu diesen Zutritten/Verlusten vorgetrieben werden.

Schritt II: Verfüllen der Erkundungsbohrungen. Setzen eines Packers in einer Tiefe von 2 m und injizieren. Abbruch der Injektion wenn ein Druck von 20 bar oder eine Menge von 300 kg erreicht wird. Die Erkundungsbohrlöcher können auch mit Ankermörtel und einem Schlauch vom Bohrlochtiefsten aus gefüllt werden.

Schritt III: Vortrieb. Vortrieb bis die Ortsbrust 5 m vom Ende der Erkundungsbohrlöcher entfernt ist. Durchführung der nächsten Erkundungsbohrungen.

Schritt IV: Zusätzliche Bohrlöcher zum Injizieren. Abbohren von insgesamt 8 Löchern. Positionen 6-9-12-3 Uhr sowie 7:30-4:30 sollten zuerst ausgeführt werden. Die zwei letzten Bohrlöcher werden in Bereichen mit grossem Wasserzutritt oder Spülwasserverlust gebohrt.

Schritt V: Vortrieb. Vortrieb bis auf 5 m Abstand der Ortsbrust von den Gegebenheiten, welche die Injektionsentscheidung ausgelöst haben.

Schritt VI: Zusätzliche Bohrlöcher zum Injizieren. Abbohren von insgesamt 8 Löchern. Positionen 6-9-12-3 Uhr sowie 7:30-4:30 sollten zuerst ausgeführt werden. Die zwei letzten Bohrlöcher werden in Bereichen mit grossem Wasserzutritt oder Spülwasserverlust gebohrt. Die Längen dieser zusätzlichen Bohrlöcher sollte so angepasst werden, dass sie bei der gleichen Station wie die vorherigen enden.

Schritt VII: Hochdruckinjektion. Setzen der Packer in einer Tiefe von 1.5 m. Injektion aller Löcher beginnend im unteren Bereich. Abbruchkriterium wenn der Druck 60 bar erreicht oder 1500 kg Zement eingepumpt wurden.

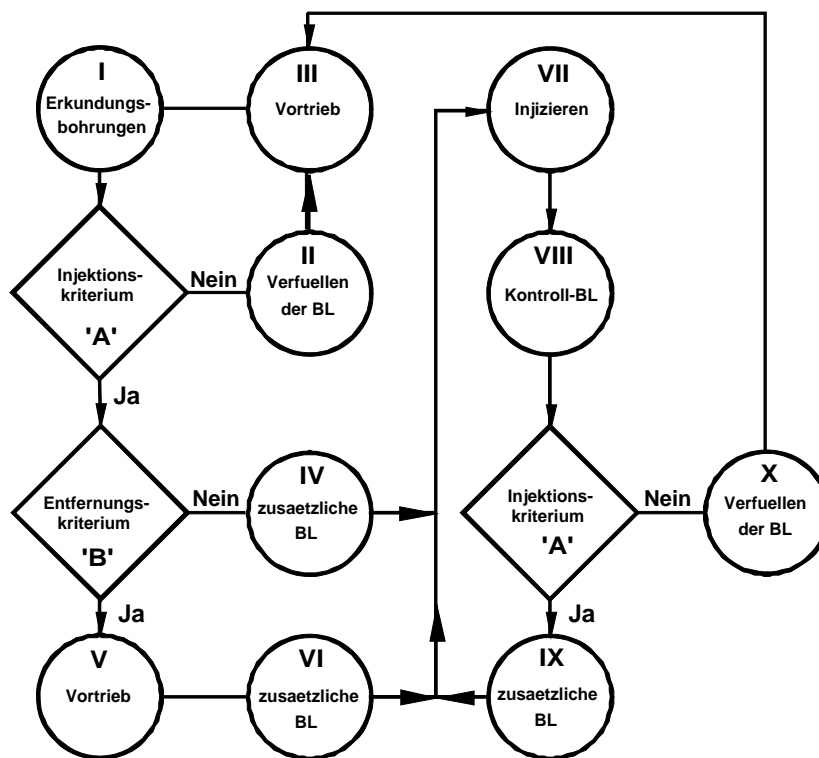
Schritt VIII: Kontrolllöcher. Nach einer sorgfältigen Beurteilung der notwendigen Zeit für das Abbinden des Zements werden mindestens 4 Löcher zur Kontrolle gebohrt. Falls alle Injektionslöcher des vorigen Schrittes hohe Aufnahmen an Injektionsgut aufweisen, sollten 8 Kontrolllöcher gebohrt werden. Die Lage der Kontrolllöcher wird an die vorherigen Injektionsmengen und geologischen Strukturen angepasst. Für die Entscheidung über den nächsten Schritt wird das Injektionskriterium A angewandt.

Schritt IX: Zusätzliche Bohrlöcher. Falls erforderlich, werden weitere Bohrlöcher gebohrt bis insgesamt 8 Löcher zum Verpressen zur Verfügung stehen. Die Posi-



tion der Bohrlöcher wird entsprechend der verfügbaren Information an die lokalen Gegebenheiten (Geologische Strukturen, Verteilung der Injektionsmengen) angepasst.

Schritt X: Verpressen der Kontrolllöcher. Setzen eines Packers in einer Tiefe von 2 m und injizieren. Abbruch der Injektion wenn ein Druck von 20 bar oder eine Menge von 300 kg erreicht wird. Die Erkundungsbohrlöcher können auch mit Ankermörtel und einem Schlauch vom Bohrlochtiefsten aus gefüllt werden.



**Abb. 5:** Flussdiagramm für die Entscheidungsfindung bei Erkundungsbohrungen und Injektionen

## 5 Literaturverzeichnis

International Society for Rock Mechanics (1995)

Final Report of the Commission on Rock Grouting

Fu, R.; Sun, L.J.; Wang, C.L. (2001)

Catastrophic water inflow in the new Yung-Chuen Tunnel. Proc. of AITES-ITA World Tunnel Congress, Vol. III, 143-150.

Stenstad, O. (1998)

Execution of injection works. Proc. of post graduate training course, Norwegian Chartered Engineer Assoc. and the Norwegian Rock Mechanics Group.