

# **Injektionsmaßnahmen zur Sicherung des Druckluftvortriebs des Tunnels Karl-Friedrich-Straße als Teil des Verkehrsprojekts Kombilösung Karlsruhe**

**Dr.-Ing. Bertram Schulze <sup>1)</sup>,**

**Dipl.-Ing. Johannes Kunigam <sup>2)</sup>,**

**Dipl.-Ing. Frank Nenninger <sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup> Smolczyk & Partner GmbH, Stuttgart

<sup>2)</sup> BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH, Dresden

<sup>3)</sup> KASIG mbH, Karlsruhe

# 1 Überblick über das Verkehrsprojekt Kombilösung Karlsruhe

Das Verkehrsprojekt Kombilösung Karlsruhe ist ein Jahrhundert-Projekt für die Stadt Karlsruhe, mit dem mehrere Ziele verfolgt werden:

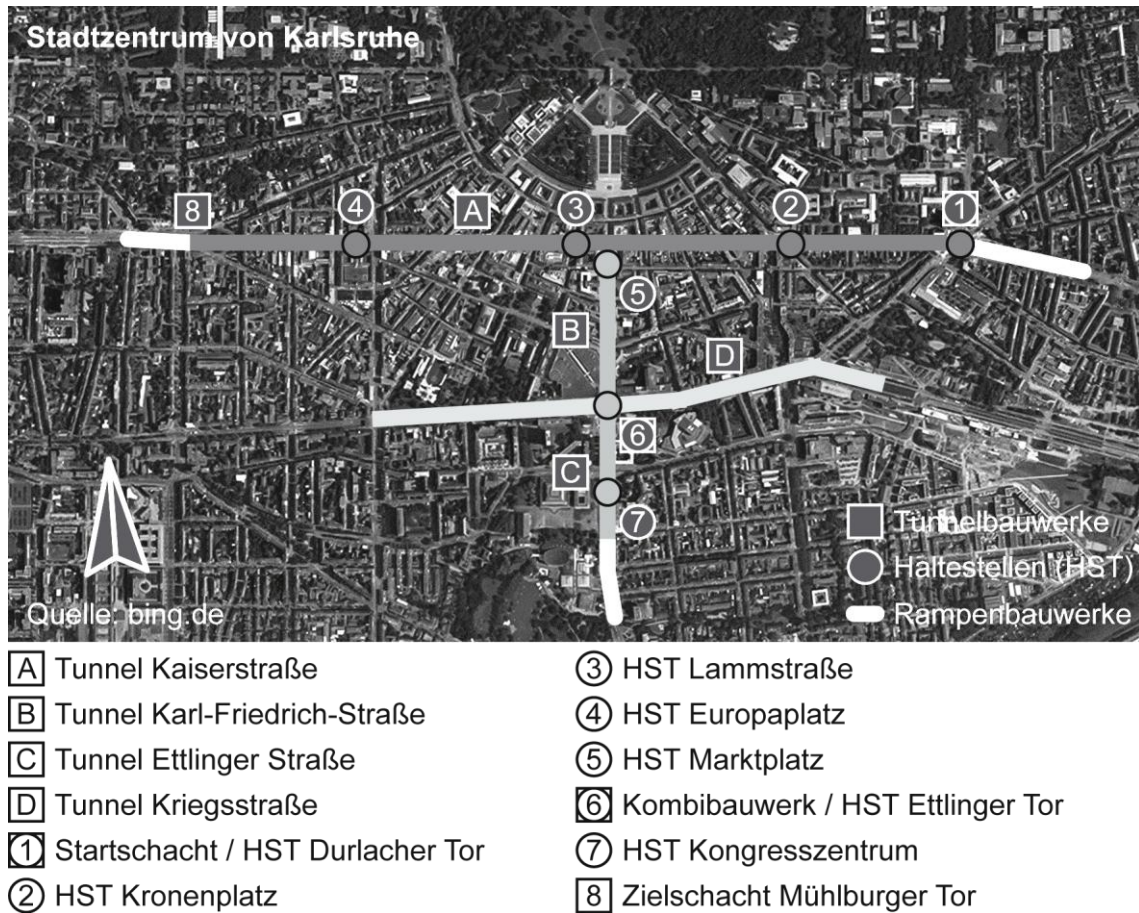
- Verbesserung und Zukunftssicherung des ÖPNV, der alleine im Stadtgebiet Karlsruhe inzwischen knapp 110 Millionen Fahrgäste pro Jahr befördert,
- Schaffung einer schienenfreien Fußgängerzone im Stadtzentrum, insbesondere der Kaiserstraße, der Haupteinkaufsstraße von Karlsruhe, in welcher die Bahnen heute in beiden Richtungen im Minutentakt verkehren, und der damit verbundenen deutlichen Erhöhung der Entwicklungspotenziale in der Innenstadt,
- Entlastung der bisherigen Hauptverkehrsachse in der Kaiserstraße durch eine zweite West-Ost-Achse in der Kriegsstraße,
- Entlastung der Verkehrsknotenpunkte mit Reduzierung der Lärm- und Abgasbelastung sowie
- eine erhebliche Aufwertung des Stadtbildes.

Zu diesem Zweck sind zwei Teilprojekte geplant bzw. in der Realisierung schon weit fortgeschritten (Abb. 1).

Das Teilprojekt Stadtbahntunnel mit Südabzweig am Marktplatz ist seit Anfang 2010 in der Realisierung. Der Stadtbahntunnel verbindet in West-Ost-Richtung auf einer Länge von rund 2,4 km vier unterirdische Haltestellen mit zwei je rund 0,4 km langen Rampen. In einer etwa 1,2 km langen unterirdisch abzweigenden Nord-Süd-Trasse (sog. Südabzweig) werden drei weitere unterirdische Haltestellen und eine 0,4 km lange Rampe miteinander verbunden. An seinen drei Zufahrtsrampen bindet der Stadtbahntunnel in das bestehende oberirdische Straßenbahnnetz ein. Damit bildet der Stadtbahntunnel das bislang oberirdisch geführte Stadtbahnnetz mitsamt den zugehörigen Haltestellen unterirdisch ab (Abb. 1) und ersetzt dieses im Bereich der Fußgängerzone in der Kaiserstraße vom Kronenplatz (2) bis zum Europaplatz (4) sowie unter dem Marktplatz (5).

Die 7 unterirdischen Haltestellen werden in Deckelbauweise unter Aufrechterhaltung der bestehenden oberirdisch geführten Stadtbahnverkehrs, der Zuwegungen zu den Wohn- und Geschäftsgebäuden und des städtischen Geschäftslebens hergestellt. Über die zwischenzeitlich abgeschlossenen Spezialtiefbauarbeiten zur Herstellung der Baugruben für die Haltestellen- und Rampenbauwerke mit den enormen technischen und bauleistungsrechtlichen Herausforderungen sowie äußerst hohen Qualitätsanforderungen insbesondere an die Herstellung der

Düsenstrahlsohlen wurde bereits mehrfach berichtet (z.B. Nenninger et al. 2014, Schulze et al. 2014).



**Abb. 1:** Überblick über das Verkehrsprojekt Kombi-Lösung Karlsruhe

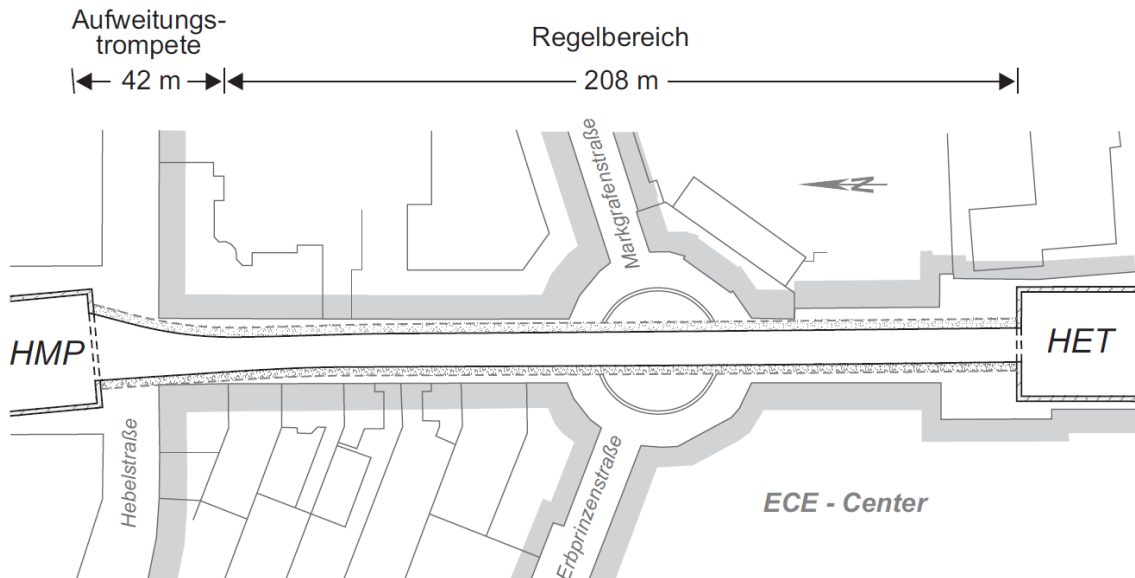
Der in maschineller Bauweise mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust aufgefahrene Tunnel Kaiserstraße beginnt am Startschacht Durlacher Tor im Osten (1) und endet nach einem Vortrieb von etwas mehr als 2 km am Zielschacht Mühlburger Tor im Westen (8). Der Tunnel ist seicht liegend, die Überdeckung der Tunnelfirste beträgt nur zwischen rund 4 m und 8 m. Der Vortrieb hat im November 2014 begonnen, der Durchschlag erfolgte im September 2015.

Die Tunnelstrecken im Südabzweig können aus technischen und wirtschaftlichen Erwägungen heraus nicht maschinell aufgefahren werden. Die vorbereitenden Spezialtiefbauarbeiten zur Herstellung des Tunnelabschnitts Karl-Friedrich-Straße in bergmännischer Bauweise sind Gegenstand des vorliegenden Berichts. Die Herstellung der Tunnelabschnitte in der Ettlinger Straße in offener Bauweise wird Gegenstand gesonderter Veröffentlichungen sein.

Das Teilprojekt Straßenbahn in der Kriegsstraße mit Straßentunnel (D) soll in Kürze vergeben werden. Baubeginn ist für Sommer 2016 geplant.

## 2 Der Tunnel Karl-Friedrich-Straße

Der Tunnel Karl-Friedrich-Straße (TKF) verbindet auf einer Länge von rund 250 m die Haltestellen Marktplatz (HMP) im Norden und Ettliger Tor (HET) im Süden. Diese Strecke ist geprägt von außerordentlich beengten Platzverhältnissen (Abb. 2 und Abb. 3).



**Abb. 2:** Lageplan des Tunnels Karl-Friedrich-Straße

### ① Straßenansicht



### ② Luftbild



**Abb. 3:** Blick auf die Tunneltrasse: (1) zu Beginn der Baustelleneinrichtung von Norden nach Süden; (2) Luftbild von Süden nach Norden

Darüber hinaus liegen folgende Besonderheiten vor, die die Entscheidung für die bergmännische und gegen die offene Bauweise maßgeblich beeinflusst haben:

- Aufweitung des Regelquerschnittes an der Haltestelle Marktplatz (sog. „Trompete“) von rund  $80 \text{ m}^2$  auf  $180 \text{ m}^2$  zur Aufnahme eines dritten Gleises, das als „Stumpfgleis“ in der Haltestelle Marktplatz endet.
- Unterfahrung des historischen, denkmalgeschützten, gemauerten Landgrabens, eines in Betrieb befindlichen Teils des Karlsruher Abwassersystems, der die Tunneltrasse im Bereich des Aufweitungsquerschnittes schräg und, in lediglich rund  $0,8 \text{ m}$  Abstand quert.
- Unterfahrung der Verfassungssäule, einem Denkmal am Rondellplatz in der südlichen Hälfte der Tunneltrasse, mit etwa rund  $5,5 \text{ m}$  Abstand.
- Unterfahrung einer in Betrieb befindlichen gemauerten Abwasserleitung mit Eiprofil Ei1000/1600KK (Mittelkanal), nahezu über die gesamte Länge des Tunnels, wobei der Abstand zwischen Tunnelfirste und Kanalsohle wegen des nach Norden gerichteten Fließgefälles von Nord nach Süd leicht zunimmt und als Minimalwert nahe der Haltestelle Marktplatz etwa  $1,5 \text{ m}$  beträgt.
- Sicherstellung der Zu- und Abfahrten sowie der Flucht- und Rettungswege über zwei kleinere Querstraßen, da Zufahrten von Süden und Norden durch die beiden Haltestellenbauwerke Ettliger Tor und Marktplatz nicht möglich sind.
- Sicherstellung ständiger Zugangsmöglichkeiten zum Einkaufszentrum ECE-Center westlich der Karl-Friedrich-Straße.
- Berücksichtigung einer Vielzahl von Ver- und Entsorgungsleitungen mit entsprechenden Hausanschlüssen im Baufeld.

Der knapp  $250 \text{ m}$  lange Tunnel Karl-Friedrich-Straße wird daher als bergmännischer Tunnel in der sog. Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT) und infolge der Grundwassersituation (siehe unten) im Druckluftvortrieb von Süd nach Nord aufgefahren. Dazu wird in der Haltestelle Ettliger Tor eine Druckschleuse um das geplante Startportal errichtet (Abb. 4).

Der Tunnel hat aus statischen Gründen im Regelquerschnitt ein Maulprofil mit einer lichten Breite von  $10,5 \text{ m}$  und einer lichten Höhe von  $9,2 \text{ m}$ . Der Ausbruchsquerschnitt beträgt somit rund  $80 \text{ m}^2$ . Im Aufweitungsbereich vergrößern sich die lichte Breite auf  $19,6 \text{ m}$ , die lichte Höhe auf  $11,5 \text{ m}$  und der Ausbruchsquerschnitt auf rund  $180 \text{ m}^2$ . Die Schienenoberkante (SO) fällt von  $101,6 \text{ m NHN}$  im Norden auf  $101,0 \text{ m NHN}$  im Süden.

Die Anwendung der NÖT setzt voraus, dass sich um den Ausbruchsquerschnitt ein (kurzzeitig) selbsttragendes Stützgewölbe im Boden ausbildet, das den Einwirkungen auf den entstehenden Hohlraum solange widersteht, bis die den Ausbruchsarbeiten unmittelbar folgende Spritzbetonsicherung die Belastung übernimmt. Infolge der vorliegenden Untergrundverhältnisse (siehe unten) wurde deshalb vom Planer eine Verfestigung des Baugrundes in einem  $2,0 \text{ m}$  starken Ringbereich um den Ausbruchsquerschnitt vorgesehen. Weiterhin war eine Ver-

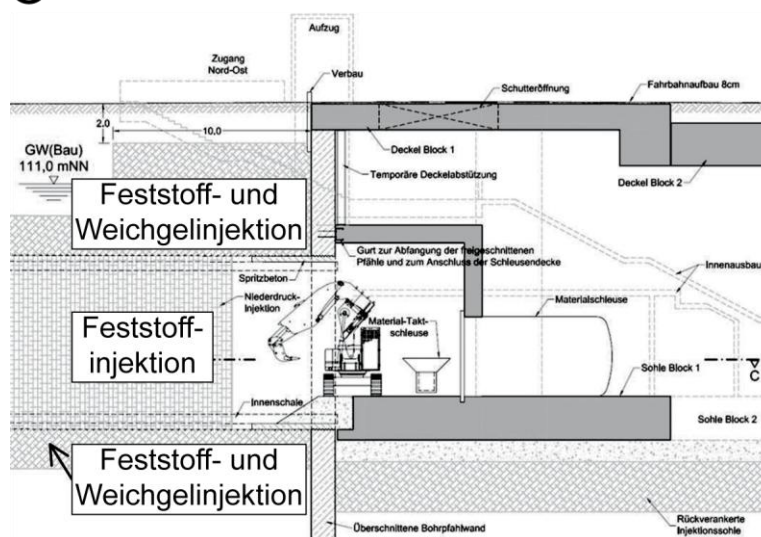


festigung des Ausbruchsquerschnitts selbst zur Erhöhung der Ortsbruststabilität beim Tunnelausbruch erforderlich.

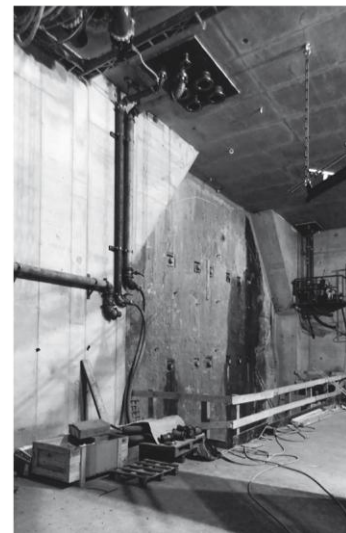
Der Vortrieb findet unterhalb des Grundwasserspiegels statt und erfolgt deshalb unter Druckluft. Die Druckluft verdrängt dabei das Grundwasser aus dem Hohlraum. Je durchlässiger der Baugrund ist, desto höher sind der Luft- ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) und damit auch der Energiebedarf. Der Druckluftbetrieb wird durch den hohen Energiebedarf dann unwirtschaftlich, wenn der umliegende Baugrund aus gut wasser- und luftdurchlässigem Material besteht, was hier mit den sandig-kiesigen Flussablagerungen der Fall ist. Darüber hinaus steigt bei einem Druckluftvortrieb das Ausführungsrisiko, wenn beim Vortrieb stark luftdurchlässige Bereiche angetroffen werden. In diesem Fall kann es zu sog. Ausbläsern kommen, die zu einem u.U. schlagartigen Druckluftverlust im Tunnel und damit zu einem Verlust der Stützwirkung bzw. zu einem Wassereinbruch führen. Im schlimmsten Fall kann dies einen Tagbruch bedeuten, der sich bis auf benachbarte Gebäude auswirken kann. Ein solcher Fall muss innerstädtisch unbedingt vermieden werden.

Vom Planer und vom Bodengutachter wurde die mit der Verfestigung des Baugrundes um den Ausbruchsquerschnitt herum einhergehende Abdichtung als nicht ausreichend erachtet, um den Luftbedarf auf ein wirtschaftlich vertretbares Maß zu reduzieren und eine ausreichende Sicherheit gegen Ausbläser zu gewährleisten. Aus diesem Grunde wurde zusätzlich zur Verfestigungsinjektion eine Abdichtungsinjektion in dem 2,0 m starken Ring außerhalb des Ausbruchsquerschnitts geplant. Über die Injektionsarbeiten wird nachfolgend berichtet.

### ① Druckschleuse



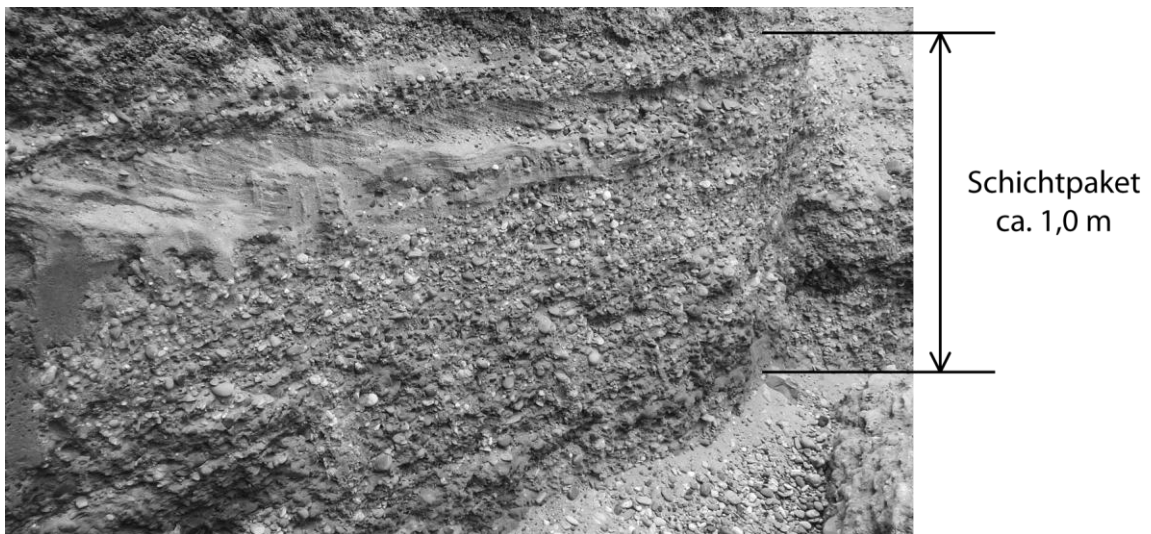
### ② Anschlagwand



**Abb. 4:** Druckluftschleuse an der Haltestelle Ettliger Tor: (1) Schnitt in Tunnelängsrichtung; (2) Anschlagwand in der Abbaukammer

### 3 Baugrundverhältnisse und Injektionskonzept

Die Baugrund- und Grundwasserverhältnisse in Karlsruhe sind geprägt durch ihre Lage mit Rheintal mit mächtigen fluviatilen Kies- und Sandablagerungen, die direkt unter oft mehrere Meter mächtigen Auffüllungen anstehen und bis in große Tiefen ( $> 40$  m) reichen. Dabei ist eine für fluviatile Sedimente typische Fein-, Schräg- und Kreuzschichtung der Böden vorhanden, die zu einer ausgeprägten Durchlässigkeitsanisotropie der Sande und Kiese führt (Abb. 5).



**Abb. 5:** Feinschichtung der anstehenden Sande und Kiese

In den für die Tunnelbauwerke maßgeblichen Tiefen sind die Sande und Kiese meist mitteldicht bis dicht gelagert. Oberflächennah ist deren Lagerung überwiegend mitteldicht, seltener locker. Schluff- und Tonlinsen sind im Stadtgebiet von Karlsruhe in diesem Tiefenbereich nur vereinzelt in die Kiese und Sande eingelagert. Zwischen den Haltestellen Ettlinger Tor und Marktplatz wurden in einer Tiefe von rund 18 m unter GOK, also unterhalb der Tunnelsohlen, Schluff- und Tonlinsen erkundet. Nach den Erkenntnissen aus den Bohr- und Injektionsarbeiten sind diese Schluff- und Tonlinsen dort vermutlich durchgängig vorhanden. Ihre Konsistenz ist meist steif und die Mächtigkeit nimmt in Nord-Süd-Richtung von rund 1,0 m auf rund 2,5 m zu.

Der Durchlässigkeitsbeiwert für die Sande und Kiese wird im Stadtgebiet von Karlsruhe, gestützt auf die Erkenntnis aus zahlreichen Pumpversuchen, allgemein mit  $k_f = 3 \cdot 10^{-3}$  m/s angenommen. Das entwässerbare (d.h. für die Injektion nutzbare) Porenvolumen beträgt rund 20% bis 25%. Die vertikale Durchlässigkeit ist wegen der Feinschichtung (Abb. 5) deutlich geringer als die horizontale, der Unterschied kann ein bis zwei Zehnerpotenzen betragen.

Der Grundwasserspiegel liegt im Bereich des Tunnels Karl-Friedrich-Straße etwa bei 110,0 m NHN bis 111,0 m NHN und damit rund 3,5 m bis 5,0 m unter Gelände. Der Tunnel liegt vollständig im Grundwasser.

Die Grundwasserfließrichtung ist von Südosten nach Nordwesten gerichtet. Bei einem Fließgefälle von ca.  $i = 0,1 \%$  beträgt die Fließgeschwindigkeit rund 0,5 m/d.

Die Innenstadt von Karlsruhe wurde im 2. Weltkrieg stark bombardiert, weshalb allen Eingriffen in den Untergrund flächendeckend Kampfmittelsondierungen vorausgehen mussten.

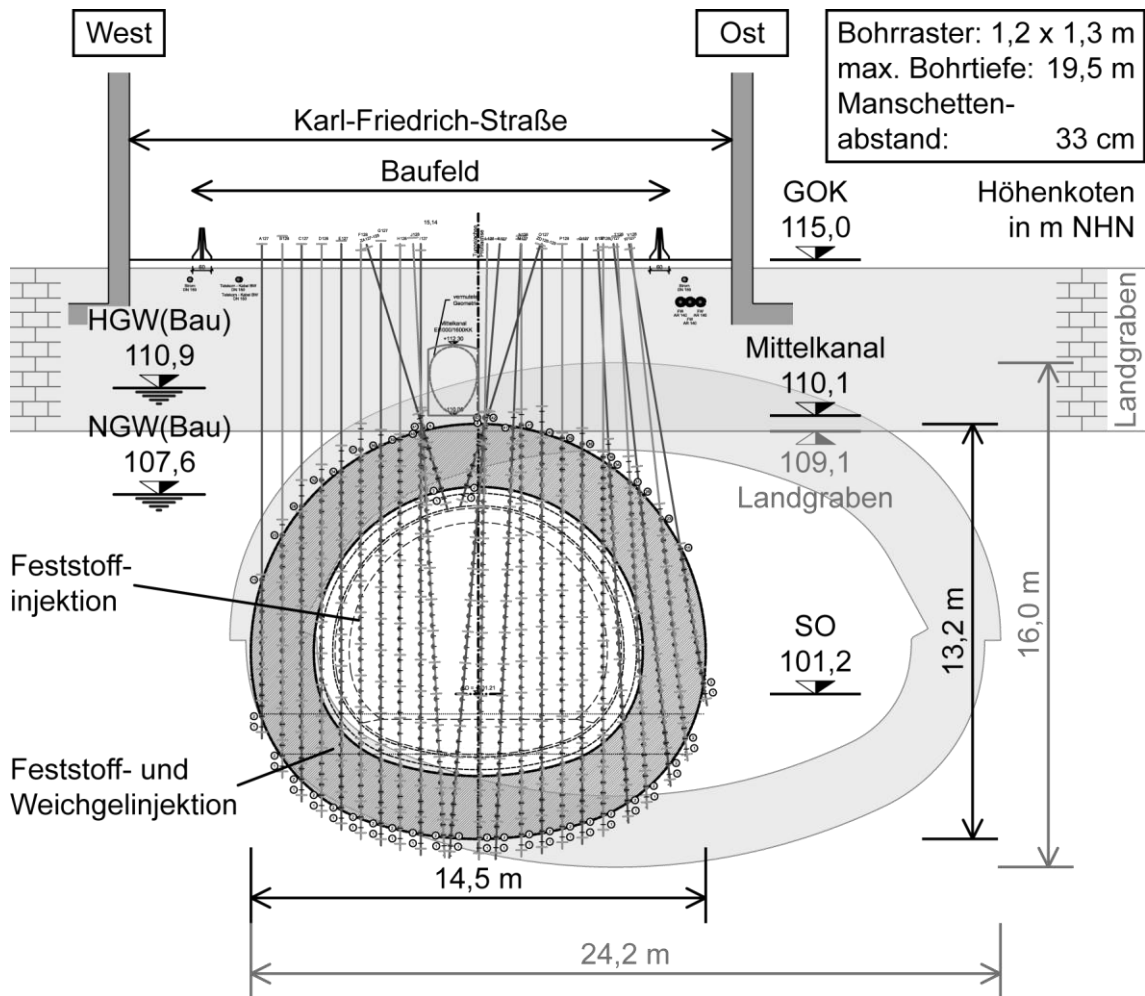
Zur Umsetzung der planerischen Vorgaben: Verfestigung des Ausbruchquerschnittes und eines 2,0 m mächtigen zusätzlich auch abzudichtenden Ringbereichs, wurde eine Niederdruckinjektion über Manschettenrohre ausgeführt. Diese Standard-Technik macht den Injektionsvorgang zeitlich unabhängig vom Bohrvorgang und ermöglicht die Injektion in mehreren Tiefenstufen, die mehrfache Injektion eines Injektionsgutes zu verschiedenen Zeitpunkten sowie die Injektion verschiedener Injektionsgüter von einer Injektionsstelle in verschiedenen, zeitlich getrennten Arbeitsschritten. Diese Vorgehensweise zusammen mit kleinen Injektionsmengen pro Punkt ist in einem für Injektionsaufgaben derart heterogen aufgebauten Untergrund (Abb. 5) die einzige erfolgversprechende Vorgehensweise.

Über den gesamten Tunnelquerschnitt/Injektionsbereich wurden unter Berücksichtigung der Bestandsbebauung (Leitungen, Mittelkanal, Gründung der Verfassungssäule, etc.) vertikale und geneigte unverrohrte Bohrungen mit einem Durchmesser von rund 110 mm abgeteuft. Im Mittel sind pro Querprofil (bestehend aus je 2 versetzt angeordneten Injektionsfächern) rund 25 Bohrungen erforderlich, das bedeutet bei 90 Querprofilen und einigen Zusatzbohrungen insgesamt 2.289 Bohrungen (Abb. 6 und Abb. 7) im Regelbereich und im Aufweitungsbereich ca. 520 weitere Bohrungen.

Wegen der Leitungssituation waren umfangreiche Erkundungsmaßnahmen (Planeinsicht bei den Leitungsträgern und Suchschürfe) im Vorfeld erforderlich. In der Nähe von Leitungen erfolgte der Einbau von Schutzrohren auf den ersten Bohrmeter. Ferner wurde bei den Bohrungen und den Injektionen im Nahbereich von Leitungen, insbesondere dem Mittelkanal, in Abstimmung mit dem Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe regelmäßig alle 3 Tage eine Kamerabefahrung und – im Bedarfsfalle – eine Reinigung der Leitungen durchgeführt.

Eine besondere Herausforderung im Aufweitungsbereich ist die Injektion unter dem Landgraben. Diese Arbeiten laufen derzeit, darüber wird zu einem späteren Zeitpunkt berichtet.





**Abb. 6:** Injektionskonzept für den Tunnel Karl-Friedrich-Straße unterlegt mit dem maximalen Aufweitungsbereich an der HST Marktplatz



**Abb. 7:** Injektionsbohrungen unter beengten Platzverhältnissen

Die Bohrungen erfolgten aufgrund der erforderlichen hohen Genauigkeit mit einem mäklergeführten Bohrgestänge und schonend mit einem Rollenmeißel. Das unverrohrte Bohrloch wurde mit einer dickflüssigen Suspension gestützt, die bei der Bohrung als Spülflüssigkeit diente und nach Fertigstellung der Bohrung im Bohrloch verbleibt und die sog. Mantelmischung bildet. Im vorliegenden Fall wurde die Spülflüssigkeit/Mantelmischung aus einer Suspension mit dem Bindemittel DiWa-mix® hergestellt. In das fertig gestellte Bohrloch wurden die Manschettenrohre (PVC-Rohre mit einem Außendurchmesser von 50 mm und einem Innendurchmesser von 40 mm mit Austrittsöffnungen (Ventilen) im Abstand von 33 cm) eingestellt und mit Abstandhaltern zentriert. Nach Aushärten der Mantelmischung wurden die Injektionsstellen nach Lage und Höhe eingemessen und stehen, entsprechende Reinigung nach jeder Beaufschlagung vorausgesetzt, solange einsatzbereit zur Verfügung, bis sie nach Abschluss der Injektionsarbeiten verschlossen werden. Das vollständige Verfüllen der Manschettenrohre nach Abschluss der Injektionsarbeiten ist ebenso unerlässlich wie das dichte Verschließen der Kampfmittelsondierungsbohrungen, da sonst Wegigkeiten geschaffen werden, die den erforderlichen Luftdruckaufbau bei den Vortriebsarbeiten verhindern und den Injektionserfolg einschränken können. Bei der Injektion wird ein Verpressschlauch mit Längenmarkierungen und mit einem Doppelpacker in die Manschettenrohre eingeführt. Vermessungstechnisch wird sichergestellt, dass der Doppelpacker den Bereich in Höhe der gewünschten Manschetten/Ventile absperrt.

Für die Verfestigungsinjektion wurde eine Suspension aus Wasser und DiWa-mix® mit einem Feststoffanteil von 230 kg bis 250 kg pro m<sup>3</sup> Suspension eingesetzt. Diese Suspension ist stabil (Absetzmaß unter 2%) und entwickelt, bedingt durch den Bentonitanteil im Feststoff, eine lediglich geringe, aber für den vorliegenden Zweck ausreichende Festigkeit von rund 1 MN/m<sup>2</sup> bis 2 MN/m<sup>2</sup> (nach 28 Tagen). Der Bentonitanteil im Feststoff erhöht darüber hinaus die abdichtende Wirkung der injizierten Bereiche.

Für die Abdichtungsinjektion wurde eine Weichgellösung verwendet. Diese besteht aus rund 78 Vol.-% Wasser, rund 20 Vol.-% Wasserglas und rund 2 Vol.-% Natriumaluminatlösung. Diese Lösung ist abhängig von der Temperatur rund 50 min bis 70 min flüssig/verarbeitbar, bevor sie „schlagartig“ zu einem „Götterspeise-ähnlichen“ Gel reagiert. Dieses Gel hat keinerlei Festigkeit.

Innerhalb jedes Manschettenrohres wurde nach den Vorgaben der ausführenden Firma von unten nach oben injiziert, wobei zunächst die „Verfestigungsinjektion (Primärinjektion)“ und zu einem späteren Zeitpunkt die „Abdichtungsinjektion (Sekundärinjektion)“ erfolgte.

Beginnend im Norden der Maßnahme (Nähe Marktplatz) wurden mehrere Lanzen gleichzeitig (4 bis 8 Stück) mit dem Injektionsgut beaufschlagt, dabei wurde „fächerweise“ vorgegangen, um einen Einschluss von Wasser innerhalb des verfestigten Körpers zu vermeiden und das Grundwasser in eine Richtung zu

verdrängen. Die Einpressraten wurden der geringen Tiefenlage der Ventile unter Gelände angepasst (siehe auch Schulze 1996) und lagen bei etwa 3 l/min bis 6 l/min.

Im Laufe der Maßnahme am Regelquerschnitt hat sich ferner gezeigt, dass es zweckmäßig ist, innerhalb eines Querprofils mit den Injektionen am Mittelkanal zu beginnen: Damit wird eine Injektionsfront vom Kanal weg und nicht zum Kanal hin erzeugt. Bis zu dieser Umstellung des Injektionsablaufes kam es vereinzelt zu Injektionsgutzutritten über Schwachstellen im gemauerten Kanal, obwohl der Kanal oberhalb des eigentlichen Injektionsbereiches lag. Dies ist - als positiver Nebeneffekt - ein Hinweis auf die gute Porenverfüllung im Injektionsbereich und für den Kanal selbst nicht schädlich, wenn die gering festen Anlagerungen rechtzeitig und regelmäßig beseitigt werden, was hier der Fall war. Auf Grund der beengten Platzverhältnisse und der stark eingeschränkten Zugangs-/Zufahrtsmöglichkeiten zu den umliegenden Gebäuden, war es nicht möglich in einem ersten Schritt die gesamten Feststoffeinpressung (Primärinjektion) und danach in einem zweiten Schritt die gesamte Weichgelinjektion (Sekundärinjektion) durchzuführen. Die Injektionen mussten abschnittsweise erfolgen, damit frühzeitig Freigaben von Baubereichen und das Umlegen von Verkehrsführungen erfolgen konnten. Die Primärinjektionen wurden mit einem Vorlauf von mindestens 5 Querprofilen durchgeführt, bevor nachfolgend die Sekundärinjektionen mit Weichgel erfolgten. Die Injektionsarbeiten im Regelbereich sind abgeschlossen, im Aufweitungsbereich laufen sie derzeit noch.

## **4 Qualitätssicherung vor, während und nach der Injektion**

Die Qualitätssicherung wurde, entsprechend dem Arbeitsablauf der Bohr- und Injektionsarbeiten in drei Stufen durchgeführt, welche in der Praxis ineinander übergehen. Die Durchführung der Qualitätssicherung erfolgt unabhängig voneinander durch den AN und durch den AG.

### Schritt 1: Planungsphase (vor den Injektionsarbeiten)

Vor der Ausführung der Bohr- und Injektionsarbeiten wurde durch die ausführende Firma auf Basis des Injektionskonzeptes sowie unter Berücksichtigung der Bestandsbebauung und der Aktenlage hinsichtlich der Leitungen zunächst eine Injektionsplanung (Bohr- und Injektionsraster) erstellt. Bei Abweichungen der tatsächlich erkundeten Lagen von Leitungen und Bestandsfundamenten von der Aktenlage sowie infolge von bauablaufbedingten Restriktionen erfolgte eine Anpassung der SOLL-Lage für die Injektionsbohrungen.

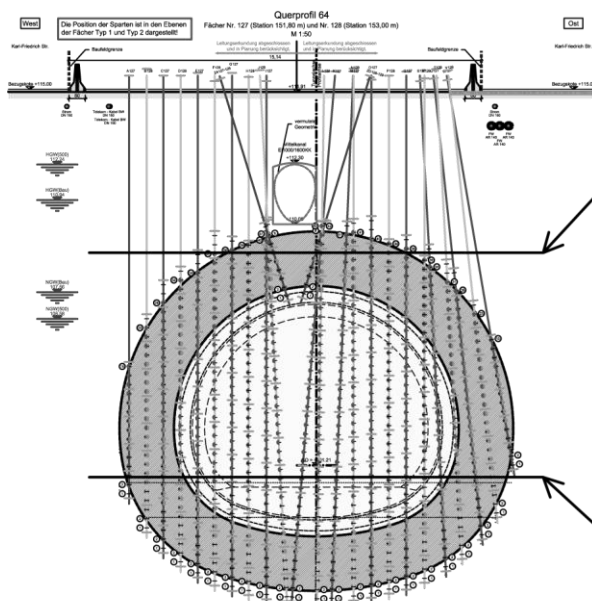
Die Injektionsmengen pro Austrittsstelle/Ventil wurden wegen der Durchlässigkeitsanisotropie strikt begrenzt (75 l bis 100 l) und so festgelegt, dass sich bei dem gewählten elliptischen Ausbreitungsmodell für die Injektionsgüter (horizon-

tale Durchlässigkeit größer als die vertikale Durchlässigkeit) und bei plausibler Annahme für das nutzbare Porenvolumen des Baugrundes, theoretisch eine vollständige Verfüllung des gesamten Porenraums mit Injektionsgut ergibt (SOLL-Volumen). Bei den geneigten Bohrungen sind die gegenseitigen Abstände der Ventile größer, die Injektionsmengen in der Tiefe damit entsprechend größer als bei den oberflächennahen Ventilen. Diese Angaben werden unabhängig auf Plausibilität überprüft.

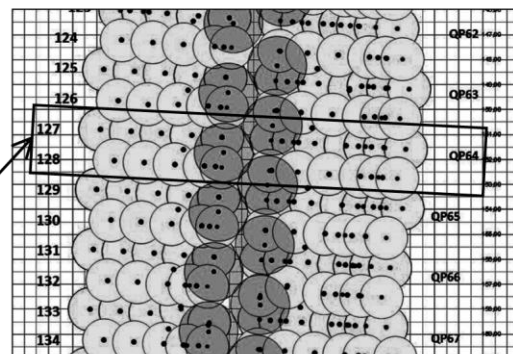
Abb. 8 zeigt die Planung für ein Injektionsquerprofil im Querschnitt mit planmäßigem Bohrlochverlauf und planmäßiger Lage der Injektionsventile (1a) sowie die Bohransatzpunkte im Lageplan (1b). Die unterschiedliche Färbung in (1a)/(1b) markiert den Ausbruchquerschnitt (hellgrau, Feststoffinjektion) und den Ringraum (dunkelgrau, Feststoff- und Weichgelinjektion).

Die Plausibilitätsbetrachtung (Injektionsvolumen pro Ventil) wird für verschiedene Ebenen gemacht. Hier sind exemplarisch die Ebenen  $-5,5$  m unter Gelände (2a) und  $-13,5$  m (2b) dargestellt. Die grauen Kreise symbolisieren die Ausbreitung des Injektionsgutes (dunkelgraue Kreise symbolisieren die Ausbreitung des Injektionsgutes aus Zusatzbohrungen mit verdoppeltem Injektionsvolumen). Es zeigt sich hier eine (theoretisch) vollständige Verfüllung des Porenraums.

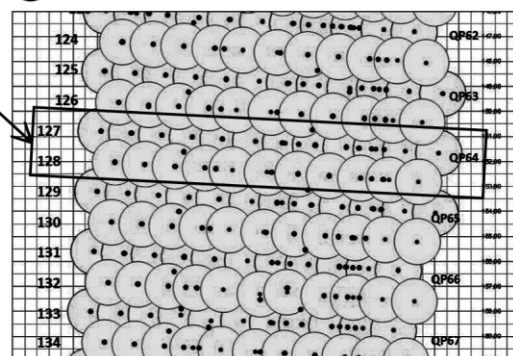
### ① a) Injektionsquerprofil Schnitt



### ② a) Ebene ca. $-5,5$ m unter OKG



### ② b) Ebene ca. $-13,5$ m unter OKG



### ① b) Injektionsquerprofil Lageplan

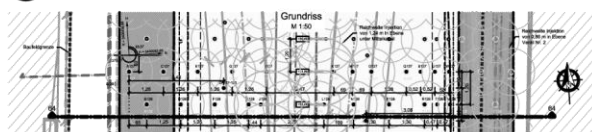


Abb. 8: Plausibilitätsprüfung der Injektionsplanung

## Schritt 2: Ausführung (während der Bohr- und Injektionsarbeiten)

Der Bohrvorgang ist durch lückenlose Aufzeichnung von Bohrfortschritt, Anpressdruck, Drehmoment, Suspensionsdurchfluss und Rotation über die Tiefe hinsichtlich Auffälligkeiten nachvollziehbar. Die räumliche Lage jedes der in die Bohrlöcher eingebauten Manschettenrohre (IST-Lage) wurde durch Inklinometermessungen (vertikale Lage) und Einmessungen des Ansatzpunktes (horizontale Lage) bestimmt.

Mit Kenntnis der IST-Lage der Manschettenrohre und damit der Ventile erfolgte eine erneute Anpassung der Injektionsplanung und der entsprechenden SOLL-Volumen für die Injektionsgüter (DiWa-mix® und Weichgel). Die Korrektur wird je Austrittsstelle („Ventil“) durchgeführt. Sie richtet sich nach dem Injektionskonzept sowie dem tatsächlichen Abstand zwischen SOLL- und IST-Lage der jeweiligen Austrittsstelle. Die SOLL „neu“-Volumen gehen in Arbeitsanweisungen ein, die zum Einen digital an den Steuer-Rechner des Injektionscontainers übertragen werden und zum Anderen als redundante Überprüfung dem Zentralisten (Geräteführer der Injektion) in gedruckter Form im Injektionscontainer vorliegen. Auf den gedruckten Arbeitsanweisungen wird später das tatsächlich injizierte Volumen je Ventil händisch eingetragen, um im Falle von Problemen mit der elektronischen Datenaufzeichnung eine zusätzliche Sicherung (Redundanz) zu haben.

Gemäß dem Injektionskonzept liegen für jedes Ventil als Abbruchkriterien für den Injektionsvorgang ein definiertes SOLL „neu“-Volumen (Mengenbegrenzung) und ein Maximaldruck (zur Verformungsbegrenzung) vor. Druckverlauf, Einpressrate und Injektionsmenge (über Einpressrate und Verpresszeit) werden für jeden Injektionsvorgang pro Austrittspunkt automatisch aufgezeichnet und von sachkundigem Personal nach Injektionsabbruch (Maximalvolumen und/oder Maximaldruck) kontrolliert, ob der Abbruch baugrundbedingt erfolgte oder ob messtechnische/gerätetechnische Gründe (z.B. Druckspitzen) dafür verantwortlich waren. Im letzteren Fall wird die Steuer-Software „überstimmt“ und der abgebrochene Injektionsvorgang fortgesetzt/wiederholt. Dazu prüft der Zentralist den einzelnen Injektionsvorgang direkt im Anschluss. Weiterhin erfolgt durch die Bauleitung täglich eine erste Bewertung der Injektionsvorgänge im Gesamtzusammenhang (Verhalten benachbarter Austrittsstellen). Nach Fertigstellung eines Injektionsfächers erfolgt die Darstellung der Injektionsergebnisse im Querschnitt.

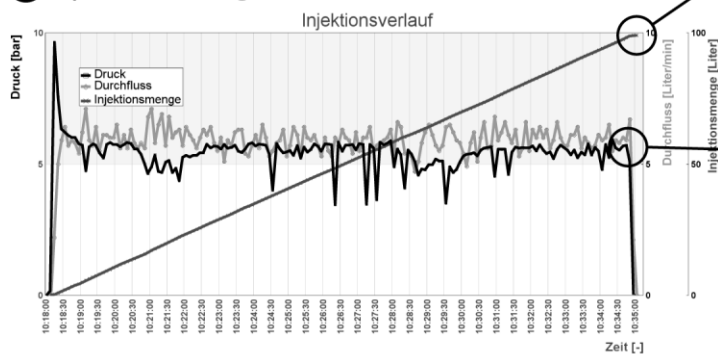
Abb. 9 zeigt exemplarisch ein Injektionsprotokoll der ausführenden Firma mit Darstellung des zeitabhängigen Verlaufs von Injektionsrate und -menge sowie des Drucks. Die zusammenfassenden Rohdaten des Injektionsvorgangs sind in der Tabelle (1a) dargestellt, in der Grafik (1b) ist der Aufreißdruck zu Beginn der Injektion gut erkennbar. In den rechts daneben dargestellten Grafiken sind die "End-Werte" für einen Fächer zusammengefasst, in diesem Fall für die Weichgelinjektion im Ringraum. Jede Zelle in der Grafik ist einem

Ventil/Injektionsvorgang zugeordnet. Dargestellt sind die Endwerte von Volumen und Druck, jeweils in Prozenten des Endvolumens (2a) bzw. des Maximaldrucks (2b). Durch Farbunterschiede gut erkennbar sind hier Bereiche mit geringerer Injektionsgutaufnahme an der Tunnelsohle (2a) bzw. Bereiche an der Tunnelfirste, in denen die Enddrücke geringer sind als der Maximaldruck (2b).

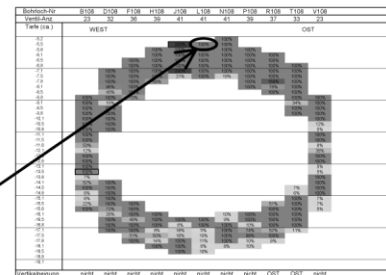
### ① a) Rohdaten tabellarisch

Injektionsdiagramm									
Bauvorhaben: KF-Tunnel Karlsruhe					Gerät: CIRO 10				
QP	Fächer	Bohrung	Ventil	Tiefe	Istmenge	Sollmenge	Start	Ende	Zeitdauer
54	2	L108	41	6,0 m	100,0 l	100,0 l	09.12.2015 10:18:10	09.12.2015 10:35:02	16:52
Injektionsvorgang		Mischung		Durchschnittsdruck		Enddruck		Bemerkung	
1		Weichgel		5,4 bar		5,9 bar		Fertig	

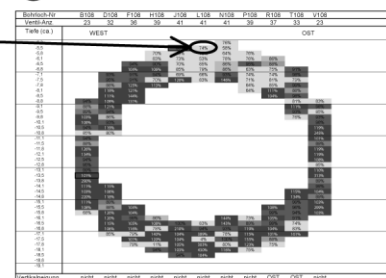
### ① b) Rohdaten grafisch



### ② a) Injektionsmenge



### ② b) Druck



**Abb. 9:** Auswertung der Injektionsprotokolle

Während der Bohr- und Injektionsarbeiten werden fortlaufend in regelmäßigen Abständen die verwendeten Baustoffe (Bohrspülung/Mantelmischung; Feststoffsuspension und Weichgel) hinsichtlich der in der einschlägigen Norm (DIN EN 12715) festgelegten Parameter untersucht.

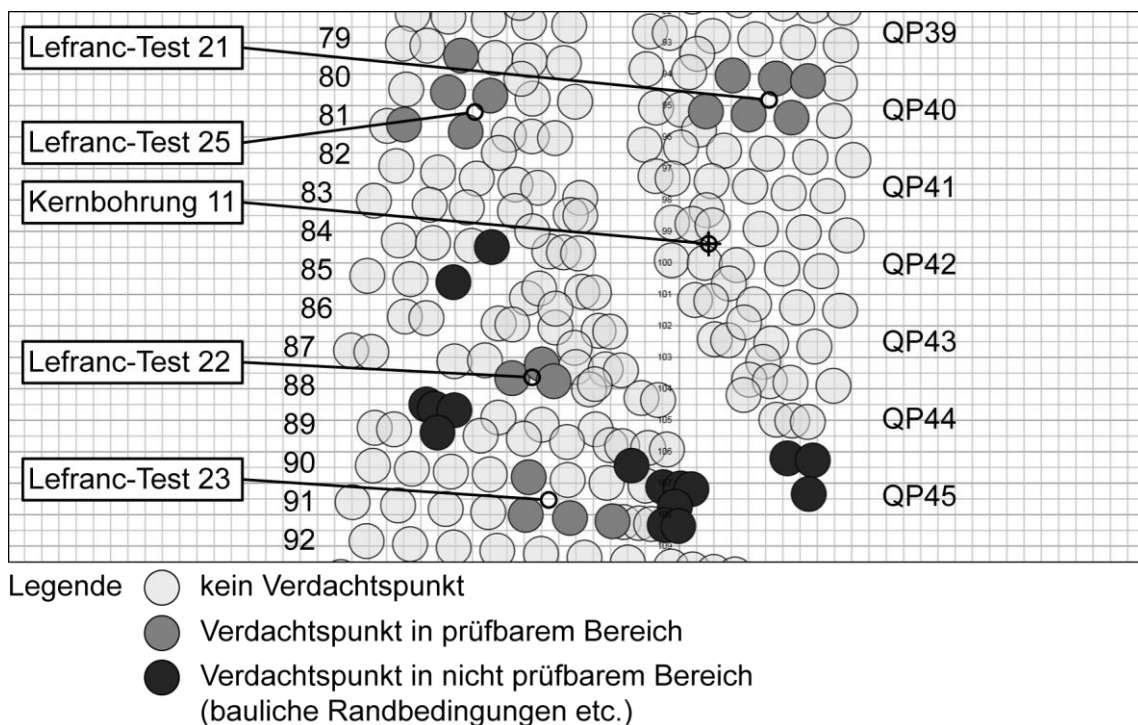
### Schritt 3: Grafische Auswertung und Feldversuche (nach den Injektionsarbeiten)

Die Injektionsdaten (Injektionsmenge und Abbruchdruck) werden grafisch aufbereitet und ausgewertet (siehe Abb. 9), um Bereiche mit auffälligen Injektionsparametern (z.B. geringe oder überdurchschnittlich hohe Injektionsgutaufnahme; Auffälligkeiten beim Enddruck etc.) bzw. ggf. fehlerhaften Injektionsvorgängen (unplausible Abbrüche des Injektionsvorgangs, unplausible Abweichungen vom Injektionskonzept) in ihrer Lage im Querschnitt identifizieren zu können. Durch gleichzeitige Betrachtung "hintereinander" liegender Injektionsfächer wird eine räumliche Betrachtung und Bewertung der Injektionsergebnisse und dadurch das Erkennen von auffälligen Bereichen (Schwachstellenanalyse) ermöglicht.



Gruppieren sich mehrere einzelne Verdachtspunkte zu einem Verdachtsbereich, so kann in diesem Bereich im Nachhinein ggf. eine Nachinjektion ausgeführt werden, bzw. es wird an solchen Stellen ein Durchlässigkeitsversuch in situ (Lefranc-Test) durchgeführt. Die bislang überwiegend im First- und Kämpferbereich des Ringraums durchgeführten Lefranc-Tests haben mit nur wenigen Ausnahmen den Zielwert für die Abdichtungswirkung ( $k_f \leq 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ ) nachweisen können.

Abb. 10 zeigt grafisch aufgetragen die Ergebnisse einer solchen Schwachstellenanalyse, mit Verdachtsbereichen und möglichen Untersuchungen der Qualitätssicherung. Erkennbar ist hier der Verlauf des Mittelkanals. Zu beobachten ist, dass aufgrund der baulichen Randbedingungen nicht alle Verdachtsbereiche prüfbar sind. Die Darstellung gemäß Abb. 10 fließt jedoch in die Gefahrenvorschau beim Tunnelvortrieb ein, so dass nicht prüfbare Verdachtsbereiche bei den Arbeiten berücksichtigt werden können.

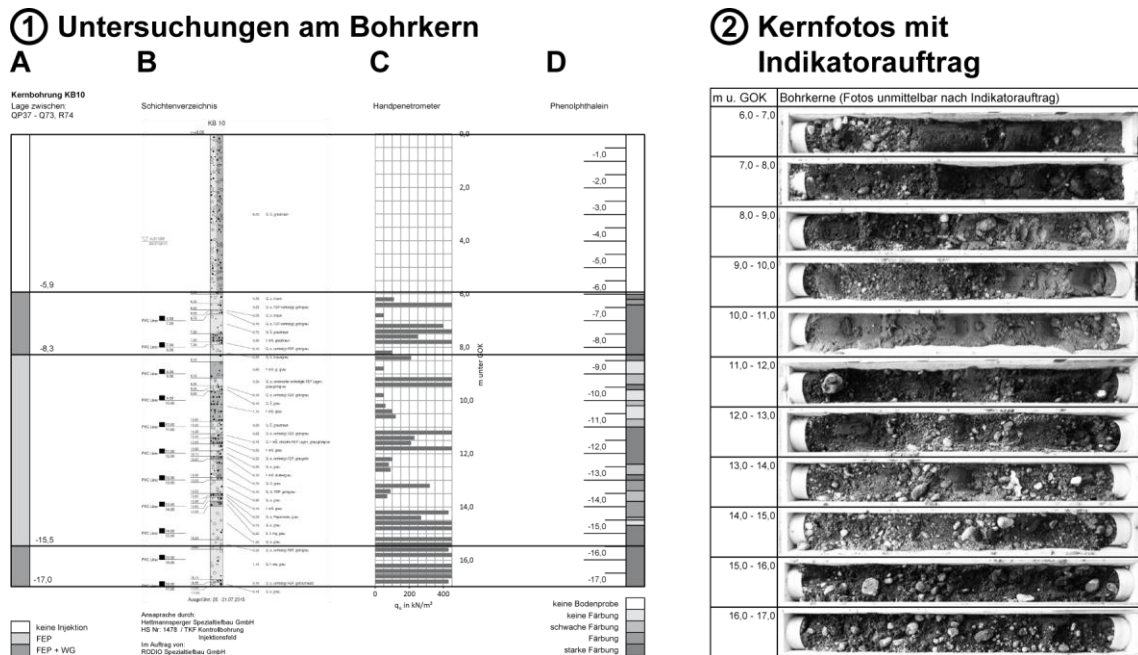


**Abb. 10:** Schwachstellenanalyse für die Querprofile QP 39 bis QP 45

Weiterhin wurden Kernbohrungen in regelmäßigen Abständen niedergebracht. Aufgrund der Bodenverhältnisse und dem Ziel, möglichst intakte Kerne mit ungestörter Baugrundsichtung zu erhalten, wurden diese Kernbohrungen als Hülskernbohrungen durchgeführt.

In der Abb. 11 sind die unterschiedlichen Injektionsbereiche dargestellt (A), daneben das Bohrprofil (B). Mittels Handpenetrometer erfolgten an diesen Kernen qualitative Festigkeitsuntersuchungen. Gut sichtbar ist die festigkeitssteigernde Wirkung der Feststoffinjektion in den mit Feststoff injizierbaren eher kiesigen Bereichen (C). Weiterhin konnten durch den Auftrag eines pH-Indikators (Phe-

nolphthalein) qualitative Rückschlüsse auf die Verteilung der Injektionsgüter (Feststoff und Weichgel) gezogen werden. Der Farbumschlag des Indikators ist pink bzw. scheint mit dem Grünton der DiWa-mix®-Suspension violett. Das Graustufenbild (2) wurde dahingehend angepasst, dass die rosa-violett verfärbten Bereiche dunkler erscheinen als die unverfärbten ("Falschfarbenbild"). Deutlich erkennbar ist von 8,5 m bis 11,0 m ein Feinsandband, das nicht mit der Feststoffsuspension injizierbar war. Bezogen auf Bohrprofil und Festigkeitsuntersuchungen ist der Farbumschlag über die Tiefe in Spalte D dargestellt.



**Abb. 11:** Auswertung der Kernbohrungen im Injektionsbereich

Zusammengefasst besteht die Qualitätssicherung für die Injektionsarbeiten beim Tunnel Karl-Friedrich-Straße somit aus folgenden Bausteinen:

- Plausibilitätsprüfung des Injektionsrasters (PLAN-Lage der Bohrungen und PLAN-Volumen der Austrittsöffnungen anhand unterschiedlicher Ausbreitungsmodelle)
- Erfassen von Suspensionsverlusten beim Bohren und ggf. Inspektion / Reinigung der betroffenen Kanäle
- Prüfung der Bohrprotokolle auf Auffälligkeiten (Leitungen, Mittelkanal)
- Vermessung jeder Bohrung nach Lage (Ansatzpunkt) und Tiefenverlauf (Inklinometer) und Prüfung hinsichtlich der Grenzwerte für Neigungs- und Ansatzpunktabweichung
- Plausibilitätsprüfung der Arbeitsanweisungen (Ermittelte SOLL-Volumen anhand der Ansatzpunktabweichungen, linearisierter Lageabweichungen und Inklinometergrafiken)

- Prüfung der frischen Injektionsgüter nach DIN EN 12715
- Prüfung jedes Injektionsvorganges (Druck, Menge, Einpressrate) der Primärinjektion und der Sekundärinjektion und grafische Darstellung einzelner Parameter je Querprofil (RODIO Monitoring System – AN: Abbruchdruck und -volumen) bzw. je Fächer (AG: Abbruchdruck und -volumen; kombinierte Abbruchursachen; verpresste Gesamtmenge durch Summation der Volumen aus Primär- und Sekundärinjektion)
- Schwachstellenanalyse mit grafischer Darstellung von Verdachtsstellen (zu wenig Injektionsgut, Auffälligkeiten beim Verpressdruck) mit ggf. Nachinjektionen durch Analyse der Injektionsdaten und kombinierte Auswertung von Planungs-, Bohr- und Injektionsauffälligkeiten
- Durchführung von Feldversuchen an zwischen AN und AG abgestimmten Punkten: in-situ Durchlässigkeitsversuche (Lefranc-Tests) in festgestellten Verdachtsbereichen im Injektionskörper sowie Abteufen von Hülskernbohrungen im Injektionsbereich und Begutachtung der Kerne; zusätzlich durch den AG Untersuchungen zur erzielten Festigkeit (Handpenetrometer) und Vorhandensein von Injektionsgut (visuell und nach Ansprühen des Bohrkerns mit dem pH-Wert-Indikator Phenolphthalein)
- Erstellen einer Abschlussdokumentation mit allen ermittelten Daten (korrigierte Arbeitsdokumente)
- Erstellen einer Zustandsfeststellung für jeden Prüfbereich (hier im Schnitt jeweils 6 Querprofile, also jeweils rund 150 Bohrungen)

Der Aufwand für die Datenerfassung und –auswertung erforderte für die Ausführungsseite wie für die Überwachungsseite einen eigenen Ingenieur. Allein im Regelbereich waren zu bewerten:

- fast 39.000 Bohrmeter in 2.289 Injektionsbohrungen,
- rund 71.600 Ventile / 33.760 m<sup>3</sup> mit Zementsuspension vergütet, davon
- rund 40.000 Ventile / 17.140 m<sup>3</sup> zusätzlich mit Weichgel vergütet,
- in Summe rund 125.000 Injektionsvorgänge.

## 5 Ausblick auf den Tunnelvortrieb

Bei den bislang durchgeführten Qualitätssicherungsuntersuchungen handelt es sich überwiegend um indirekte Kontrollen, die zwar keine Hinweise auf mangelhaft injizierte Bereiche gegeben haben, die aber immer noch Interpretationsspielraum hinsichtlich der tatsächlichen Ausbreitung des Injektionsgutes lassen. Die Wahrheit kommt erst im Tunnelvortrieb "ans Licht". Dieser beginnt im Januar 2016. Über erste Erkenntnisse wird also im Vortrag berichtet werden können.

## 6 Literatur

DIN EN 12715 (2000)

Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Injektionen

Nenninger, F., Opheys, S. & Jud, H. (2014)

Kombilösung Karlsruhe – Technische Herausforderungen und ihre Lösungen. Geotechnik-Tag in München, 07.03.2014.

Schulze, B. (1996)

Zulässige Einpressraten bei der Bodeninjektion, Geotechnik 19, Heft 1, S. 18 - 26.

Schulze B., Jud, H., Nenninger, F., Suric, M. & Pasker, T. (2014)

Qualitätssicherung bei Dicht- und Stützsohlen im Düsenstrahlverfahren bei der Realisierung des Stadtbahntunnels in Karlsruhe. Baugrundtagung in Berlin, 23. - 25.09.2014.

**Autor:**

Vorname, Name: Bertram Schulze

Titel: Dr.-Ing.

Firma, Abteilung: Smoltczyk & Partner GmbH

Adresse: Untere Waldplätze 14, 70569 Stuttgart

Tel: +49 711/13164-32

Fax: +49 711/13164-64

mail: schulze@smoltczykpartner.de

internet: www.smoltczykpartner.de

**Nicht Zutreffendes bitte löschen:**

Teilnahme: ja

Vortragender: ja

**Co-Autor:**

Vorname, Name: Johannes Kunigam

Titel: Dipl.-Ing.

Firma, Abteilung: BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH

Adresse: Kleiststraße 10A, 01129 Dresden

Tel: +49 351/82413-48

Fax: +49 351/82413-86

mail: kunigam@baugrund-dresden.de

internet: www.baugrund-dresden.de

**Nicht Zutreffendes bitte löschen:**

Teilnahme: ja

Vortragender: nein

**Co-Autor:**

Vorname, Name: Frank Nenninger

Titel: Dipl.-Ing.

Firma, Abteilung: Karlsruher Schieneninfrastrukturgesellschaft mbH (KASIG)

Adresse: Kriegsstraße 100, 76137 Karlsruhe

Tel: +49 721/133-5591

Fax: +49 721/133-5599

mail: frank.nenninger@kasig.karlsruhe.de

internet: www.kasig.info

**Nicht Zutreffendes bitte löschen:**

Teilnahme: ja

Vortragender: nein