Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt,
Heft Nr. 93, 2014, 153-162
Vorträge zum 21. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 20.März 2014

Eisenbahntunnel unter dem Flughafen von Helsinki - Geotechnische Aspekte bei der Planung der Tunnelauskleidung in glykolhaltigem Bergwasser

Dr.-Ing. Jörg Holzhäuser, Dipl.-Ing. Hartmut Heidenreich
HIC · Holzhäuser Ingenieur Consult GmbH, Ettlingen

Timo Cronvall, Heikki Saarikivi
VR Track Oy, Helsinki

1 Einführung

Derzeit wird in der finnischen Stadt Vantaa ein ca. 8 km langer zweiröhriger Eisenbahntunnel und eine unterirdische Station unterhalb des Flughafens Helsinki Vantaa gebaut. Durch den unerwarteten Zutritt von glykolhaltigem Bergwasser aus dem frisch angeschlagenen Gebirge wurden Änderungen im nachfolgenden Bauablauf erforderlich, die der Mikrobenbildung und dem starken chemischen Angriff infolge des Glykols Rechnung tragen. Der Beitrag behandelt die geotechnischen Randbedingungen bei der Lösungs-Entwicklung für die Planung der Tunnelauskleidung in den durch Glykol beeinträchtigten Tunnelabschnitten. Es werden hierbei die wesentlichen Elemente der im Zuge der Ausführungsplanung gefundenen Lösungen präsentiert einschließlich deren bautechnischen Umsetzung.

2 Projektübersicht

In Helsinki wird von der Finnischen Verkehrsbehörde aktuell im Rahmen des Projektes ‘New Ring Rail Line‘ das Stadtbahnnetz der Stadt Helsinki um eine insgesamt 18 km lange zweigleisige Neubaustrecke erweitert (Särkkä, 2011). Auf einer Gesamtlänge von 8 km verläuft diese Neubaustrecke unterirdisch und unterquert hierbei den internationalen Flughafen Helsinki Vantaa, der damit an das öffentliche Schienenverkehrsnetz

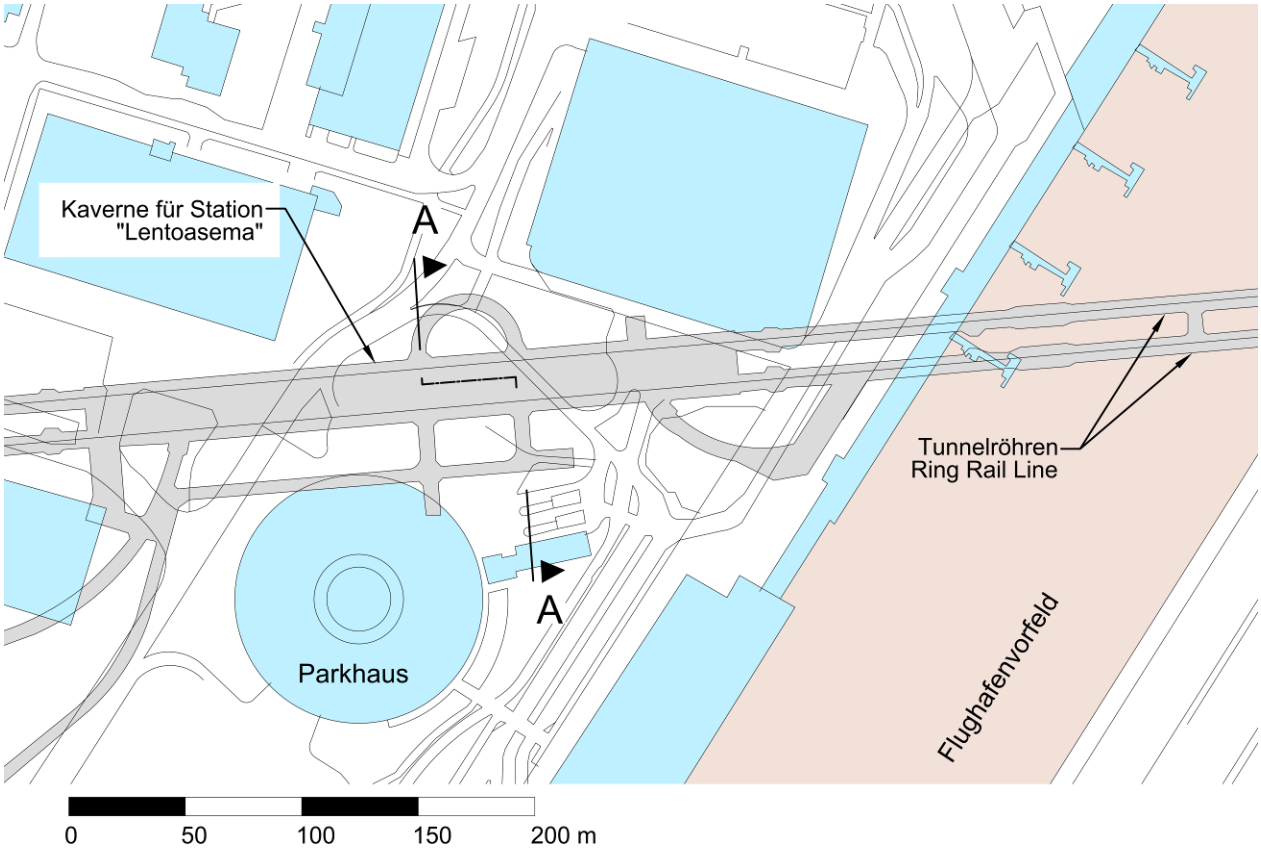

Bild 1 Lageplan-Ausschnitt ‘New Ring Rail Line‘: Tunnelröhren und Bahnhof ‘Lentoasema‘ unter dem Flughafen Helsinki Vantaa

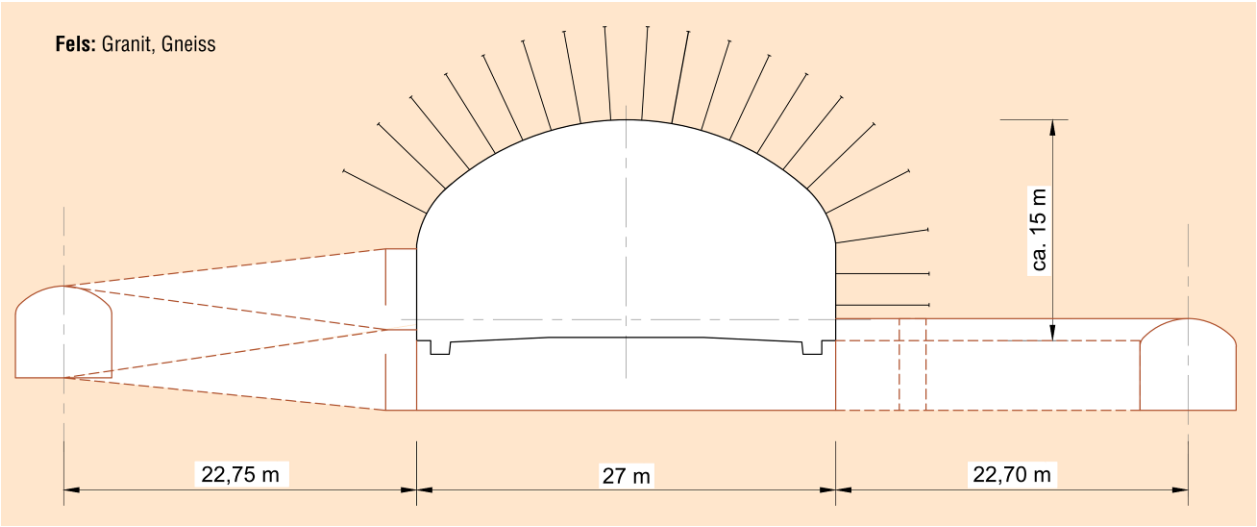

Bild 2 Ausbruchquerschnitt des Bahnhofs ‘Lentoasema‘ mit seitlichem Zugangsstollen

Bild 3 Ausgebrochener Hohlraum für den Bahnhof ‘Lentoasema‘ mit Vertikalschacht

angeschlossen wird. Dazu wurde unterhalb des Terminals Nr. 1 der mit einer Ausbruchfläche von 330 m² großzügig bemessene Bahnhof ‘Lentoasema’ sowie Zugangsstollen und ein Vertikalschacht bergmännisch ausgebrochen (Bild 1, 2 und 3). Ebenso sind die zum Bahnhof führenden zwei eingleisigen Tunnelröhren vom jeweils 58 m² Ausbruchfläche (ca. 7,1 m Breite; ca. 8 m Höhe) und die alle 200 Meter angeordneten Verbindungsstollen bereits ausgebrochen worden.

Das Auffahren der Hohlräume im harten, massiven Granit bzw. Gneiss erfolgte im Sprengvortrieb ohne größere Probleme (Bild 3). Entsprechend der in Finnland üblichen Vorgehensweise in weitestgehend standfestem Fels war vorgesehen, je nach Bedarf lediglich eine sporadische Felssicherung mittels vermörtelter Felsnägel, Spritzbeton und Injektionen zur Gebirgsvergütung. Eine durchgehende Innenschale, wie sie z.B. in Mitteleuropa oder auch in Asien in veränderlich festen Gesteinen üblich ist (Kreutzer und Holzhäuser 2008; Rädle und Steppuhn 2011), war nicht vorgesehen.

Bei der Unterfahrung des Flughafens wurden über eine Länge von ca. 500 m unerwartet kontaminierte Bergwässer angetroffen, die vermutlich aus der Verwendung von Enteisungsmittel im Flughafenbetrieb stammen und eine stark beton- und stahlangreifende als auch eine erhebliche geruchsbelästigende Wirkung hervorrufen. Glykolhaltiges Bergwasser verursacht das Wachstum von Biomasse auf der Ausbruchoberfläche. Die hierbei wachsenden Bakterien entstehen beim Abbau des Glykols, das unter aeroben Bedingungen (Sauerstoff vorhanden) wie auch unter anaeroben Bedingungen (kein Sauerstoff vorhanden) stattfindet. Der pH-Wert kann bis auf ein Niveau von ca. 5 sinken,

was dann als stark betonangreifend einzustufen ist. Dies geht einher mit der Bildung von organischen Säuren, wie z.B. Essigsäure, bzw. von Schwefelwasserstoff (H_2S), welcher mit einem typischen Geruch nach faulen Eiern belastet ist. Für den späteren Betrieb der Bahnlinie sind mit der erforderlichen Umplanung mögliche Geruchsbelästigungen im Tunnel und im Bahnhofsbereich auszuschließen und der Korrosionsschutz für starken chemischen Angriff sowohl für den Sicherungsausbau als auch für den Endausbau zu berücksichtigen.

3 Zielsetzung der Lösungsfindung

Als Ergebnis einer ersten Bestandsaufnahme wurden folgende Zielsetzungen und Randbedingungen erarbeitet:

- Das Eindringen von glykolhaltigem Bergwasser in das Tunnelinnere und der Kontakt mit den Konstruktionselementen des Tunnelausbaus aus Beton bzw. Stahl muss verhindert werden.
- Materialien, die in Kontakt mit dem glykolhaltigen Bergwasser kommen, müssen weitestgehend resistent gegen die chemische und mikrobiologische Einwirkung sein.
- Zur Sicherstellung der dauerhaften Stabilität des Tunnelhohlraumes müssen die bereits eingebauten Sicherungselemente durch Zusatzmaßnahmen ergänzt bzw. ersetzt werden.
- Das glykolhaltige Bergwasser soll systematisch gefasst und abgeführt werden. Das Drainagesystem muss eine Kontroll- und Spülmöglichkeit aufweisen.
- Der Endausbau muss grundsätzlich keine Gebirgslasten aufnehmen, da das Gebirge weitestgehend standfest ist. Prophylaktisch wurde eine Einzellast von 600 kg zur Simulation der Einwirkung eines einzelnen herabfallenden Felsblockes auf die zu planende Tunnelauskleidung angenommen.

4 Sanierungsplanung

Im Rahmen der Sanierungsplanung wurden unterschiedliche Vorgehensweisen untersucht, die insbesondere hinsichtlich deren Konsequenzen für die Bauausführung, Chancen und Risiken sowie hinsichtlich der Kosten für Herstellung und Wartung gegenübergestellt wurden. Die Holzhäuser Ingenieur Consult GmbH hat hierbei für VR Track OY Planungsleistungen im Rahmen der Entwurfsplanung für den Haupttunnel und die Verbindungsstollen und der daran anschließenden Ausführungsplanung für die Verbindungsstollen erbracht. Im vorliegenden Artikel können aus Platzgründen nicht alle untersuchten Lösungsvarianten erläutert werden, stattdessen wird die zur Ausführung kommende Lösung näher betrachtet.

Primär galt es, eine praktikable Lösung zu finden, sodass der Ausbau der Tunnelröhren und der Verbindungsstollen unter Berücksichtigung der neuen Gegebenheiten und der o.g. Zielsetzungen ausgeführt werden konnte.
Die grundlegenden Überlegungen zur Konzipierung unseres Sanierungsvorschlages waren:

1. Die Standsicherheit des bereits erstellten Hohlraumes ist dauerhaft zu gewährleisten.
2. Das kontaminierte Bergwasser ist dem Gebirge zu entziehen und schnellstmöglich über ein Entwässerungssystem schadensfrei abzuführen.
3. Einbau einer Abdichtungsfolie, die den chemischen Angriffen dauerhaft widersteht, die Mikrobenbildung minimiert und den betroffenen Bereich geruchsdicht (annähernd luftdicht) abschließt und somit die Konstruktionselemente schützt und den Eisenbahnbetrieb ermöglicht. Auf der „schwarzen“ Seite ist ein Unterdruck (Vakuum) vorgesehen.
4. Der Ausbau des ausgebrochenen Hohlraumes soll das vorgegebene Lichtraumprofil umschreiben und gleichzeitig die Abdichtungsfolie vor luftseitigen Beschädigungen schützen.
5. Die Lösung soll sicher, dauerhaft und insgesamt kostengünstig sein.
6. Es sollte möglich sein – wenn erforderlich – das Sanierungssystem in den Tunnelröhren zu verlängern und in den Bahnhofsbereich weiterzuführen.
7. Auch ein späterer Rückbau der Sanierungskonstruktion sollte auf eine einfache Art möglich sein.

4.1 Sanierungslösung für die Verbindungsstollen

In einem Abstand von rund 200 Metern sind innerhalb des Sanierungsbereiches zwischen den parallel verlaufenden Tunnelröhren 4 Stück Verbindungsstollen zu planen. Drei Verbindungsstollen sind als reine Flucht- und Rettungsstollen ausgelegt und ein Verbindungsstollen enthält zusätzliche Räume für technische Ausstattung (Bild 4).

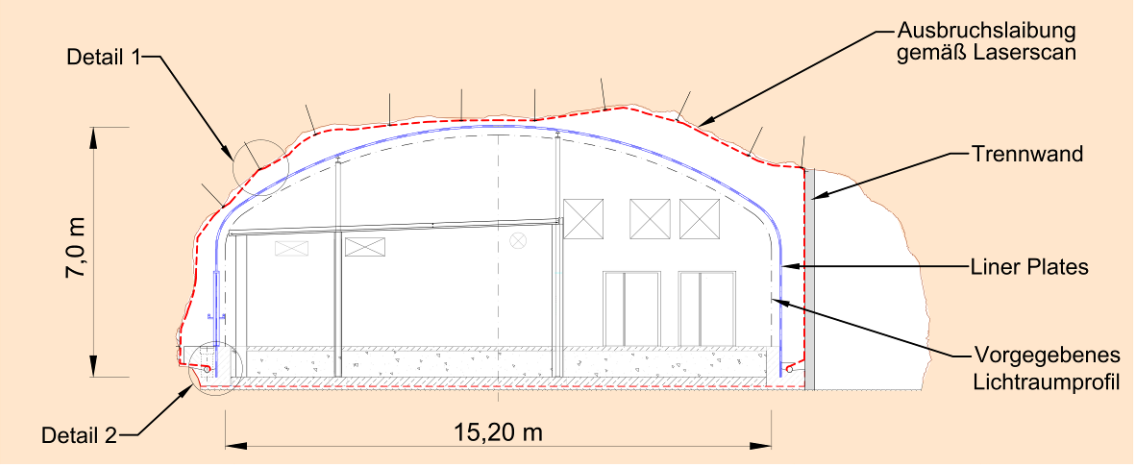

Bild 4 Querschnitt ‘Erweiterter Verbindungsstollen‘ mit Innenausbau

Detail 1:

Betonplombe im Fall von Überprofil

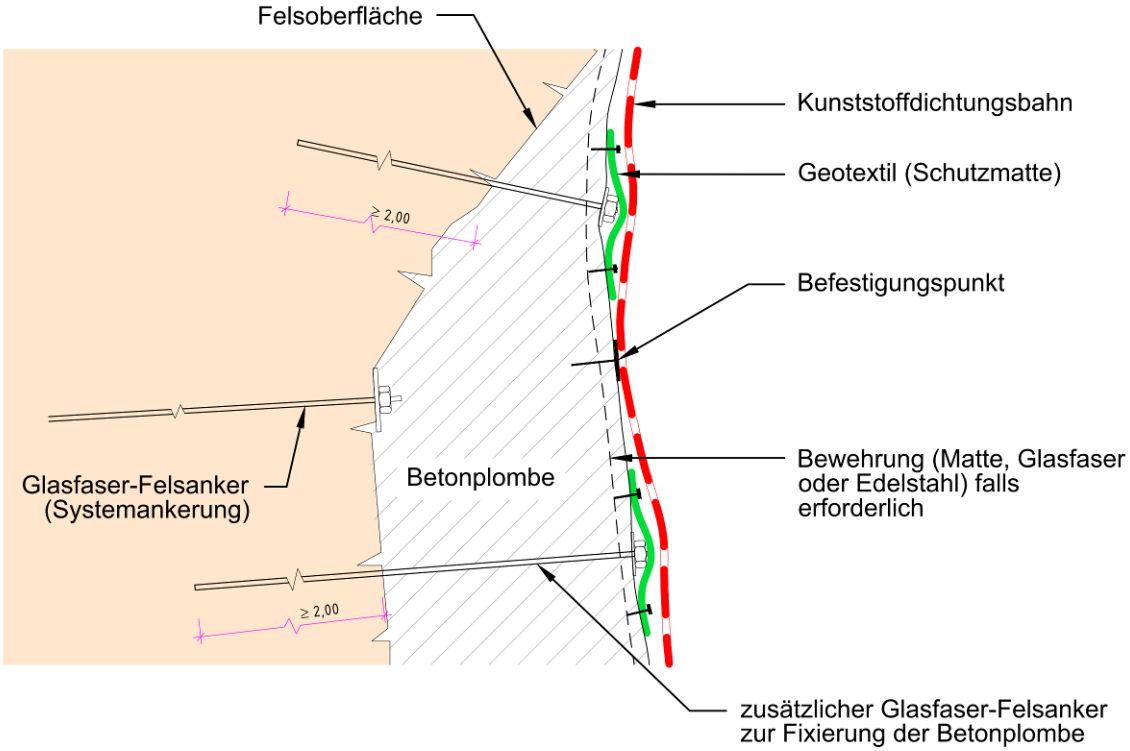

Bild 5 Detail 1: Befestigung der Kunststoffdichtungsbahn und einer Spritzbetonplombe im Ulmenbereich

Detail 2

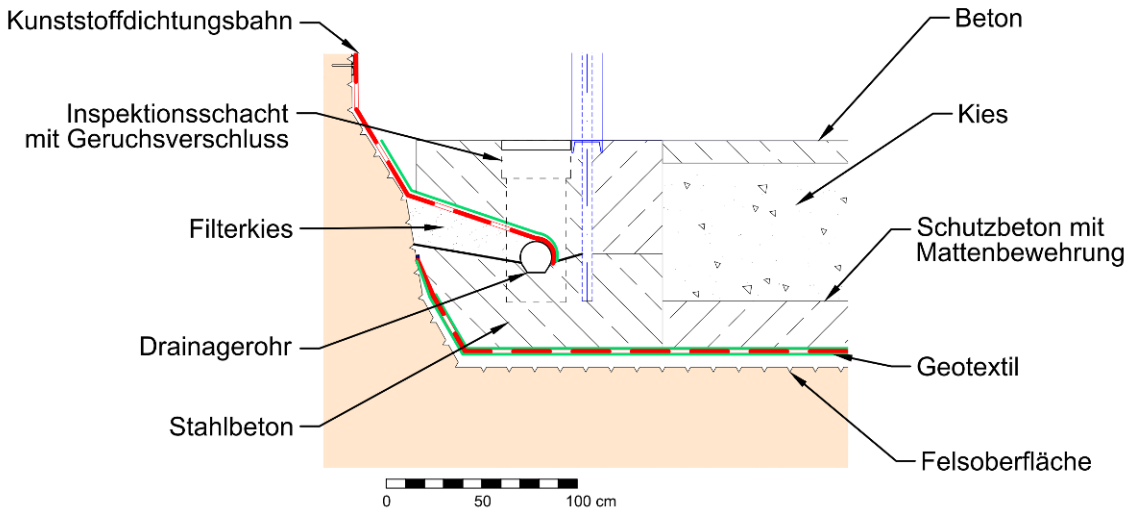

Bild 6 Detail 2: Kunststoffdichtungsbahn im Sohlbereich und Anschluss der Gewölbeabdichtung an das Drainagesystem

Bild 7 Installation der Kunststoffdichtungsbahn im Verbindungsstollen (Regelquerschnitt)

Daraus ergaben sich vom Grundsatz her zwei Querschnitts-Typen, die jedoch lokal aufgrund der unterschiedlichen ausgeführten Ausbruchgeometrie planerisch angepasst werden mussten: der Regelquerschnitt für den einfachen Verbindungsstollen beträgt ca. 34 m² und für den erweiterten Verbindungsstollen ca. 72 m² (Bild 4).
Zur dauerhaften Sicherung des Ausbruchprofils, das in einem massiven, weitestgehend standfesten Granit und Gneis ausgebrochen wurde und gemäß der Ausbruchklassen mit SN-Ankern und Spritzbeton im Firstbereich gesichert ist, haben wir folgendes vorgesehen:

1. Schutz der Leibung gegen Witterungseinflüsse mit einer unbewehrten Spritzbetonversiegelung. Der einzubauende Spritzbeton muss den Anforderungen der Expositionsklasse XA3 für chemisch stark angreifende Substanzen entsprechen.
2. Einbau einer korrosionsbeständigen Fiberglas-Systemankerung im Raster 1,5 x 1,5 m mit Epoxydharzverklebung.
3. Ausführung von Entwässerungsbohrungen, insbesondere an Stellen wo kontaminierte Bergwasserzutritte erkennbar sind, um dem Gebirge das bisher angesammelte Wasser zu entziehen und den weiteren Zutritt für Bergwässer auf Dauer zu erleichtern.
4. Große Überprofilbereiche sind durch verankerte Betonplomben oder eine Trennwand aus XA3-Beton auszugleichen.

5. Zur Ableitung der zugeführten Bergwässer sollte eine 2 mm starke HDPE-Folie im Ausbruchprofil ohne bergeseitiges Schutzvlies eingebaut werden.

Die Besonderheit dieser Lösung besteht in der von uns vorgesehenen Führung der Abdichtungsbahn und der Sicherungselemente. Die 2 mm dicke HDPE-Kunststoffdichtungsbahn sollte ohne Schutzvlies mit einem Abstand von mindestens 2 cm der vorhandenen Tunnelleibung folgend an Dauerankern gehalten werden, um einen möglichst ungehinderten Zufluss des kontaminierten Bergwassers zu ermöglichen und eine Mikrobenbildung und Verkrustungen zu minimieren. Die Folie sollte an den Befestigungspunkten durch Klemmverschraubungen gedichtet, gehalten und geführt werden. Dabei ist besonders darauf zu achtem, dass sich keine Wassersäcke bilden können und eine direkte Ableitung zu den Sammelleitungen gegeben ist. Überspannungen von kleineren Mehrausbrüchen und Spalten sind dabei durchaus möglich. Um das Abdichtungssystem über den gesamten Tunnelbereich zu verschließen, ist auch eine Sohlabdichtung einzubauen. Wie im Tunnelbau üblich, wird die Sohlabdichtung im Sohlbeton gegen das anstehende Gebirge mit Außen- und Innenschutzvlies einbetoniert um damit Wasserzutritte aus der Sohle und Geruchsbelästigungen zu verhindern.

Das über die Gewölbeabdichtung gesammelte Bergwasser wird den beidseitig auf Sohlhöhe außerhalb der Abdichtung verlaufenden Entwässerungsleitungen zugeführt und über eine Kläranlage schadlos abgeleitet.

Eine weitere Besonderheit besteht in der Wahl des Innenausbaues. Hier haben wir einen selbstragenden Stahlausbau mit Liner- oder Multiplate System „Hamco“ geplant. Der Einbau bzw. die Montage der Einzelelemente sollte auf Streifenfundamenten erfolgen, die in die Sohlplatte integriert sind. Die Liner- oder Multiplate-Elemente werden miteinander verschraubt und ermöglichen einen vereinfachten Zugang zu Inspektionsöffnungen, die als Kontrollpunkte zur Überwachung der Kunststoffdichtungsbahn vorgesehen sind. Die Einzelelemente werden auf Wunsch des Bauherrn so miteinander verschraubt, dass jedes Element nach Belieben für Inspektions- und Wartungsarbeiten ausgebaut werden kann. Als weitere Option ist auf Wunsch des Bauherrn der zusätzliche Einbau von Brandschutzelementen möglich.

Dieses System war zunächst für das gesamte Tunnelsystem vorgesehen. Damit wäre es auch möglich gewesen, Sonderausbau-Varianten zu berücksichtigen, z.B. auch Querschläge und Nischen, und mit unserem Abdichtungs- und Ausbaukonzept anzuschließen. Im Haupttunnel ist letztlich ein anderes System zur Ausführung gekommen, das im Kapitel 4.2 näher erläutert wird.

4.2 Stand der Arbeiten

Für die Bauausführung in den Tunnelröhren entschied sich der Bauherr für eine Lösung, bei der entsprechend dem Vorschlag des Büros Pöyry Betonfertigteile eingebaut werden mit aufgelegter Abdichtungsfolie, wobei beidseitig der Röhren begehbare Kontrollgänge angeordnet sind.

Stand 31.12.2013 sind in der nördlichen Tunnelröhre alle Fertigteile montiert worden, einschließlich des Einbaus der Abdichtungsfolie. An einzelnen Orten werden noch Ortbetonarbeiten ausgeführt.
In der südlichen Tunnelröhre sind etwa 50% der Fertigteile montiert und der Einbau der Abdichtungsfolie wurde gestartet.
Ebenso wurde im ersten Verbindungsstollen mit der Verlegung der Tunnelfolie begonnen.

Bis 2015 soll das Gesamtbauwerk einschließlich Bahnhof fertiggestellt sein und in Betrieb gehen.

Bild 8 Installation der Kunststoffdichtungsbahn im Sohlbereich des Haupttunnels

Bild 9 Installation von Betonfertigteilen im Haupttunnel

Literatur

Kreutzer, M., Holzhäuser, J. (2008)
China: 165 km Eisenbahntunnel im Bau. Tunnel 7/2008, S. 15-26

Rädle, A., Steppuhn, J. (2011)
Norra Länken 35, Innerstädtischer Autobahntunnel in Stockholm, Planung und Bau einer neuartigen Innenschalenkonstruktion im Hartgestein. Mitteilung des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft Nr. 88, 2011, 49-59

Särkkä, P. (2011)
Tunnelling Market in Finland. Tunnel 3/2011, S. 19-24