

Heinz Ehrbar, Dipl. Ing. ETH, DB Netz AG, Frankfurt am Main/DE
Thomas Grundhoff, Dipl.-Ing., DB Netz AG, Karlsruhe/DE
Sascha Björn Klar, Dipl.-Ing., DB Netz AG, Karlsruhe/DE

Tunnel Rastatt

Ein Schlüsselprojekt in vielerlei Hinsicht

Der Tunnel Rastatt ist ein Schlüsselprojekt des europäischen Güterverkehrskorridors A und unterfährt die Stadt Rastatt auf insgesamt 4,270 m. Seit 2013 laufen die Vorarbeiten, im Mai 2016 wird der maschinelle Vortrieb aufgenommen. Für drei Bauabschnitte sind Vereisungen geplant, um einen sicheren Vortrieb zu ermöglichen. Zudem ist der Tunnel Rastatt ein offizielles Building-Information-Modeling-Pilotprojekt (BIM) des deutschen Verkehrsministeriums.

The Rastatt Tunnel

A Key Project in Many Respects

The Rastatt Tunnel is a key project in the European rail freight corridor A and passes under the town of Rastatt with a total length of 4,270 m. Preparatory works have been underway since 2013, and the mechanised tunnel drive will start in May 2016. Ground freezing is planned for the three construction sections in order to enable safe tunnelling. The Rastatt Tunnel is also an official Building Information Modelling (BIM) pilot project of the German Transport Ministry.

1 Geplante Ausbauten auf dem Korridor A (Rotterdam–Genua)

Die Europäische Kommission will mit dem Ausbau von definierten Verkehrsachsen (Korridoren) die Leistungsfähigkeit des Schienengüterverkehrsnetzes erheblich steigern. Dazu wurden die sechs Schienekorridore A bis F definiert, welche sich an bestehenden und künftigen Verkehrsströmen orientieren. Die Ausrüstung dieser Korridore mit dem europäischen Zugsicherungssystem, dem European Rail Traffic Management System (ERTMS), sorgt hierbei für einen möglichst wirtschaftlichen Betrieb. Auf dem Korridor A (Rotterdam–Genua) soll damit das Güterverkehrsvolumen bis 2020 durch ein wesentlich verbessertes Angebot mit höherer Pünktlichkeit und kürzeren Fahrzeiten gegenüber dem Zustand von 2005 auf 56 Mrd. Tonnenkilometer verdoppelt werden.

Die Schweiz ist mit den NEAT-Achsen Lötschberg-Simplon und Gotthard in den Korridor A direkt eingebunden. Nach der Eröffnung des Gotthard-Strassentunnels im Jahr 1980 und der darauffolgenden starken Zunahme des alpenquerenden Güterverkehrs auf der Strasse wurde der Ausbau der Schienen-Alpentransversalen in der Schweiz gegen Ende der 1980er-Jahre politisch mehrheitsfähig, vom Schweizer Stimmvolk schliesslich in mehreren Abstimmungen beschlossen (1992) und mit einer stabilen Finanzierung versehen (1998). Seit 1977 steht auch in Deutschland der vierspurige Ausbau der Rheintalbahn von Karlsruhe nach Basel und damit der Ausbau des Korridors A auf der Agenda der Deutschen Bahn.

1 Planned Improvement on Corridor A (Rotterdam–Genoa)

The European Commission intends with the improvement of defined transport corridors to considerably improve the capacity of rail freight transport. For this purpose, six corridors A to F have been defined, which are oriented on present and future traffic flows. The equipment of these corridors with the European Rail Traffic Management System (ERTMS) should ensure the most economic possible operation. On corridor A (Rotterdam–Genoa), the rail freight volume should be doubled compared to 2005 to 56 billion tonne km by 2020 due to much better service, with improved punctuality and shorter journey times.

Switzerland is directly integrated into corridor A with the new railway link through the Alps (NRLA) Lötschberg-Simplon and Gotthard axes. After the opening of the Gotthard Road Tunnel in 1980 and the subsequent heavy increase of transalpine road freight traffic, the improvement of rail routes across the Alps gained a political majority in Switzerland towards the end of the 1980s, as was confirmed by Swiss voters in several referenda (1992) and provided with stable financing (1998). Since 1977, the four-track widening of the Rheintalbahn line from Karlsruhe to Basel and thus the improvement of corridor A has also been on the agenda of German Railway DB.

With regard to the implementation of the NEAT, Switzerland and Germany made an agreement in 1996, which included

Tunnel de Rastatt

Un projet clé à bien des égards

En 1996, la Suisse et la République fédérale d'Allemagne signaient un accord pour garantir la capacité de l'accès à la nouvelle ligne ferroviaire suisse à travers les Alpes (NLFA). Les deux grands tunnels de base en Suisse ont été construits entre-temps et l'aménagement des tronçons d'accès en Suisse progresse. En Allemagne aussi, l'aménagement du corridor de fret ferroviaire européen A est en travaux depuis des années. Malgré cela, pour parvenir à l'objectif convenu, à savoir l'aménagement d'une ligne ferroviaire continue à quatre voies entre Karlsruhe et Bâle, il y a encore beaucoup à faire en Allemagne. Les travaux du tunnel de Rastatt marquent le début d'un autre ouvrage clé. En dehors des tâches techniques pointues qui sont à maîtriser, le tunnel Rastatt constitue également l'un des plus grands projets pilotes de la société allemande DB Netz AG pour le passage à la méthode numérique de processus des grands projets du bâtiment (BIM ou Building Information Modeling).

Galleria Rastatt

Da molti punti di vista un progetto chiave

Nel 1996 la Svizzera e la Repubblica Federale di Germania hanno firmato un accordo sulla garanzia della capacità delle linee d'accesso alla nuova ferrovia transalpina (NFTA) in Svizzera. I due grandi tunnel di base in Svizzera sono stati nel frattempo costruiti e la costruzione delle linee d'accesso in Svizzera procede bene. Anche in Germania da anni si lavora all'ampliamento del corridoio merci europeo A. Nonostante ciò, per raggiungere l'obiettivo prefissato e cioè un ampliamento a quattro corsie della linea ferroviaria fra Karlsruhe e Basilea, dalla parte tedesca deve ancora venire costruito molto. Con l'inizio dei lavori di costruzione della galleria di Rastatt è stato affrontato un altro oggetto chiave. Oltre a impegnative misure tecniche di costruzione, che devono essere superate, la galleria di Rastatt della DB Netz AG serve anche a uno dei primi importanti progetti pilota per la conversione di grandi progetti nel metodo di gestione BIM – Building Information Modeling.

Im Hinblick auf die Realisierung der NEAT wurde 1996 zwischen der Schweiz und Deutschland unter anderem vereinbart, die folgenden Massnahmen auf den NEAT-Zulaufstrecken zwecks Sicherstellung der Leistungsfähigkeit gegenseitig abzustimmen [1]:

a) auf deutscher Seite:

- durchgehender viergleisiger Ausbau zwischen Karlsruhe und Basel im Hinblick auf die Vollausslastung der NEAT;

b) auf schweizerischer Seite:

- Bau einer neuen Linie zwischen den Räumen Olten und Bern (Konzept BAHN 2000);
- Bau einer neuen Linie aus dem Raum Basel durch den Jura;
- Bau einer weiteren zweigleisigen Rheinbrücke im Zuge der Verbindungsbahn zwischen Basel Badischer Bahnhof und Bahnhof Basel SBB.

Bekanntermassen erfolgte die Umsetzung der geplanten Massnahmen aus verschiedenen Gründen mit unterschiedlichen Realisierungsgeschwindigkeiten. In der Schweiz wurde die Neubaustrecke zwischen den Räumen Olten und Bern 2004 in Betrieb genommen, der Lötschberg-Basistunnel folgte 2007, und der Gotthard-Basistunnel wird Ende 2016 in kommerziellen Betrieb gehen. Die volle Leistungsfähigkeit der Gotthard-Achse soll 2020 mit der Inbetriebnahme des Ceneri-Basistunnels und dem Ausbau der Tunnelbauten auf den Zulaufstrecken auf 4,0 m Eckhöhe für den Güterverkehr erreicht werden. Der Bau einer neuen Linie durch den Jura erfolgte jedoch nicht.

Auch in Holland wurde auf dem Korridor A gebaut. Seit 2007 ist die als reine Güterzugstrecke ausgelegte 158,5 km lange Betouweroute zwischen Rotterdam und der deutschen Grenze

the following measure on the NEAT approach lines to ensure the capacity on both sides [1]:

a) on the German side:

- continuous four-track line between Karlsruhe and Basel to serve the full utilisation of the NEAT;



1 Der europäische Korridor A mit der Ausbaustrecke Karlsruhe–Basel

The European corridor A with the new and upgraded line Karlsruhe–Basel

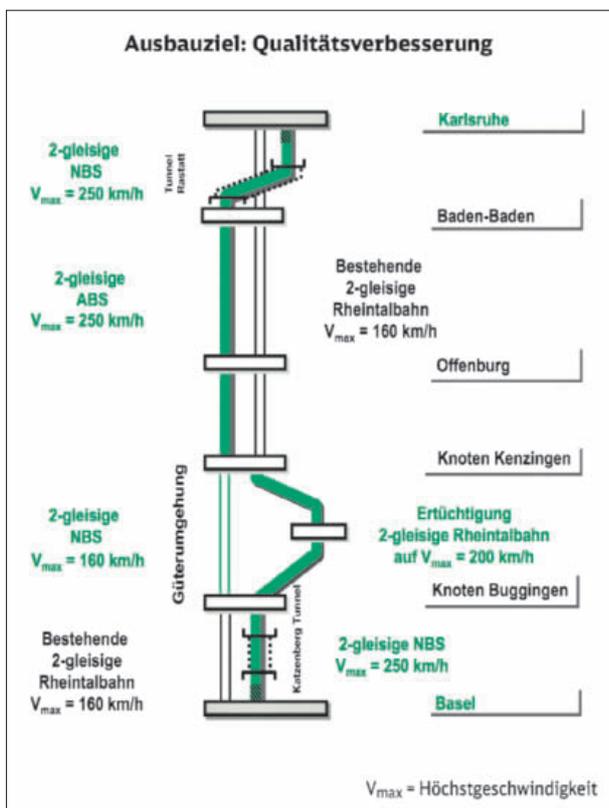
Quelle/credit: DB Netz AG

bei Zevenaar in Betrieb. Ab der holländischen Grenze plant die Deutsche Bahn den dreigleisigen Ausbau der rund 70 km langen Strecke zwischen Emmerich und Oberhausen mit Gesamtinvestitionen von rund 2 Mrd. EUR. Die grössten baulichen Massnahmen für den Korridor A in Deutschland betreffen jedoch den Aus- und Neubau der Strecke Karlsruhe–Basel (Bild 1).

2 Projekt Aus- und Neubaustrecke Karlsruhe–Basel

Mit dem Neubau und dem teilweisen Ausbau der Rheintalbahn zwischen Karlsruhe und Basel verfolgt die Deutsche Bahn drei zentrale Ziele:

1. Erhöhung der Streckenkapazität:
Der prognostizierte Mehrverkehr auf der Rheintalbahn soll so dauerhaft aufgenommen werden können.
2. Entmischung der Verkehre:
Die Trennung der schnellen Züge des Fernverkehrs von den langsameren Zügen des Nah- und Güterverkehrs verhindert gegenseitige Beeinträchtigungen im Betrieb.
3. Qualitative Verbesserung für die Reisenden:
Die Erhöhung der maximalen Geschwindigkeit für den Reisefernverkehr auf 250 km/h verkürzt die Reisezeiten deutlich.



Quelle/credit: DB Netz AG

2 Ursprünglich geplanter Streckenaus- und -neubau zwischen Karlsruhe und Basel (noch ohne die Auswirkungen des Bundestagsbeschlusses vom 28. Januar 2016 zur geänderten Trassierung in den Streckenabschnitten 7 und 8)

Originally planned upgrading and new line between Karlsruhe and Basel (still without the effects of the Bundestag decision of 28 January 2016 with a changed route in line sections 7 and 8)

b) on the Swiss side:

- construction of a new line between the Olten und Bern areas (Concept Rail 2000);
- construction of a new line from the Basel area through the Jura;
- construction of a second two-track bridge over the Rhine as part of the link between Basel German Station and Basel Swiss Station.

As is well known, the implementation of the planned measures is proceeding at various paces for various reasons. In Switzerland, the new line between the Olten und Bern areas went into service in 2004, the Lötschberg Base Tunnel followed in 2007, and the Gotthard Base Tunnel will start commercial operation at the end of 2016. The full capacity of the Gotthard axis should be achieved in 2020 with the opening of the Ceneri Base Tunnel and the improvement of the tunnels on the approach lines to 4.0 m corner height for freight traffic. The construction of a new line through the Jura Mountains has however not yet happened.

Work is also underway on corridor A in the Netherlands. Since 2007, the 158.5 km long Betouweroute between Rotterdam and the German border at Zevenaar has been in operation as a pure freight line. From the Dutch border, German Railways DB plans the three-lane widening of the line about 70 m long between Emmerich and Oberhausen with a total investment of €2 billion. The largest construction measure on corridor A in Germany, however, concerns the new construction and improvement of the line from Karlsruhe to Basel (Fig. 1).

2 Improvement and Newbuild Line Karlsruhe–Basel

With the new construction and partial upgrading of the Rheintalbahn line between Karlsruhe and Basel, DB has three central aims:

1. Increase of line capacity:
the forecast extra traffic on the Rheintalbahn line should be permanently absorbed.
2. Segregation of traffic:
the segregation of long-distance high-speed trains from slower local and long-distance freight trains will prevent reciprocal hindrances in operation.
3. Quality improvements for passengers:
the increasing of the maximum speed for express trains to 250 km/h will considerably shorten journey times.

After the completion of the construction measures, slower freight and commuter trains should predominantly use the two existing tracks; from Offenburg to north of the Katzenberg Tunnel completed in 2012, freight traffic will run on separate new tracks. New tracks will be laid for a maximum speed of 250 km/h for long-distance express trains. With this segregation of traffic, the transport concept also offers extensive possibilities for the development of commuter services in the state of Baden-Württemberg (Fig. 2).

The Rastatt Tunnel • A Key Project in Many Respects

Nach Vollendung der Baumassnahmen werden die langsameren Güter- und Nahverkehrszüge überwiegend die beiden vorhandenen Gleise nutzen; von Offenburg bis nördlich des 2012 fertiggestellten Katzenbergtunnels soll der Güterverkehr auf separaten neuen Streckengleisen geführt werden. Für den Fernverkehr werden die neuen Gleise für eine Geschwindigkeit von 250 km/h ausgelegt. Durch die Entflechtung der Verkehre bietet das Verkehrskonzept auch weitreichende Möglichkeiten für die Nahverkehrsentwicklung des Landes Baden-Württemberg (Bild 2).

Die Aus- und Neubaustrecke Karlsruhe–Basel ist in insgesamt neun Streckenabschnitte gegliedert, welche ihrerseits wiederum in einzelne Planfeststellungsabschnitte (PFA) aufgeteilt sind (Bild 3).

Mehrere Streckenabschnitte (StA) sind mittlerweile in Betrieb, so die 43,7 km lange Strecke Rastatt–Offenburg, StA 2–6 (Bild 4), seit 2004 und seit Dezember 2012 der Abschnitt 9.1 mit dem 9835 m langen Katzenbergtunnel. Dieser ist nach den aktuell gültigen Richtlinien für den Bau und den Betrieb langer Eisenbahntunnel ausgelegt und weist nebst Querschlägen alle 500 m auch eine mit Strassenfahrzeugen befahrbare Sohle auf (Bild 5) [2].

Die 16 km lange Neubaustrecke von Karlsruhe bis nach Rastatt Süd (StA 1) befindet sich derzeit im Bau (siehe 3, «Der Tunnel Rastatt») und soll 2022 in Betrieb genommen werden (Bild 6). Auch im StA 9 zwischen Freiburg und Basel wird derzeit die Umsetzung verschiedener Baumassnahmen vorbereitet, während im Streckenabschnitt 9.2 kurz vor Basel verschiedene Ausbauten getätigt werden.

Die Projektentwicklung in den StA 7 und 8, mit einer Gesamtlänge von 82,5 km oder 45% der Streckenlänge Karlsruhe–Basel, gestaltet sich innerhalb des Gesamtprojekts am schwierigsten. Im Verlauf des langwierigen Planfeststellungsverfahrens kam es in diesen Streckenabschnitten in wesentlichen Fragen zur Trassierung der Aus- und Neubaustrecke auf politischer Ebene zu einem Meinungsumschwung. We-



3 Realisierungsstand Karlsruhe–Basel per Ende 2015
State of implementation Karlsruhe–Basel at the end of 2015

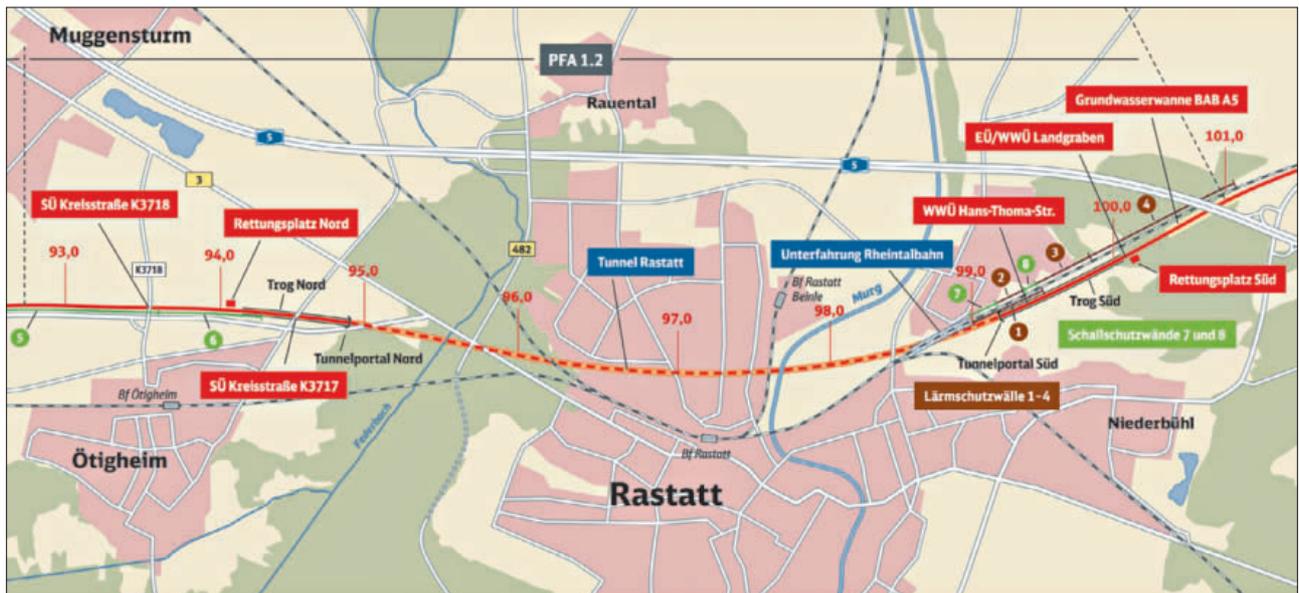


4 Vierspurig ausgebaute Rheintalbahn bei Baden-Baden
(Strecke Rastatt–Offenburg)
Four-track widened Rheintalbahn at Baden-Baden
(line Rastatt–Offenburg)

The improvement and newbuild line Karlsruhe–Basel is divided into altogether nine new line sections, which are then sub-divided into individual planning sections (PFA) (Fig. 3).



5 Der Katzenbergtunnel, seit 2012 in Betrieb (links), mit einer für Strassenfahrzeuge befahrbaren Sohle, «System Bögl» (rechts)
The Katzenberg Tunnel, in operation since 2012 (left), with an invert suitable for wheeled vehicles "System Bögl" (right)



Quelle/credit: DB Netz AG

6 Streckenführung im Planfeststellungsabschnitt (PFA) 1.2 inklusive Tunnel Rastatt
Route of the planning section (PFA) 1.2 including the Rastatt Tunnel

sentliche Forderungen, die früher als nicht finanzierbar eingestuft wurden, wurden plötzlich als machbar betrachtet. Im Rahmen der Tätigkeit eines rein rechtlich mit keinerlei Entscheidungskompetenzen versehenen Projektbeirats wurde beschlossen, die Stadt Offenburg mit einem Tunnel zu unterfahren und die anschließende Trasse Richtung Süden mit der Autobahn A5 zu bündeln. Diese Entscheidungen haben zur Folge, dass die eingereichten und gemäss geltendem Recht genehmigungsfähigen Projekte nicht weiterverfolgt werden. Der gesamte Planungslauf beginnt nochmals, was eine Verzögerung von mindestens fünf Jahren nach sich zieht. Mit einer Fertigstellung dieser StA ist deshalb erst nach 2030 zu rechnen. Die Gesamtinvestitionen für die Streckenabschnitte erhöhen sich zudem um mindestens 2 Mrd. EUR. Am 28. Januar 2016 erfolgte die geschlossene Zustimmung zu dieser geänderten Projektvariante durch den Deutschen Bundestag.

Per Ende 2022, also zwei Jahre nach der durchgehenden Betriebsaufnahme der Gotthard-Achse der NEAT, werden somit rund 55 % der gesamten 182 km langen Aus- und Neubaustrecke zwischen Karlsruhe und Basel in Betrieb sein. Mit diesen Massnahmen soll sichergestellt werden, dass es bis zur Inbetriebnahme der weiteren Abschnitte nicht zu Kapazitätsengpässen im NEAT-Zulauf kommt.

Die Baukosten des Gesamtprojekts Karlsruhe–Basel werden aktuell (noch ohne die im Projektbeirat entschiedenen Varianten Tunnel Offenburg und Autobahnparallele) mit rund 7,1 Mrd. EUR veranschlagt. Davon wurden bis Ende 2013 rund 2,2 Mrd. EUR investiert. Der Grossteil der Finanzierung erfolgt durch Bundesmittel der Bundesrepublik Deutschland, mit Kostenbeteiligung der Europäischen Union (EU) und der Deutschen Bahn.

Many line sections (StA) are meanwhile already in operation, for example the 43.7 km long Rastatt–Offenburg line, StA 2–6 (Fig. 4), since 2004 and since December 2012 the section 9.1 with the 9,835 m long Katzenberg Tunnel. This was designed according to the current regulations for the construction and operation of longer tunnels and in addition to cross passages every 500 m, also has an invert suitable for road vehicles (Fig. 5) [2].

The 16 km long new line from Karlsruhe to Rastatt Süd (StA 1) is currently under construction (see section 3, “The Rastatt Tunnel”) and should start operation in 2022 (Fig. 6). Also in StA 9, various measures are currently being prepared between Freiburg and Basel, while various upgrading measures are also being undertaken in line section 9.2 shortly before Basel.

The project development in StA 7 and 8, with a total distance of 82.5 km or 45 % of the distance from Karlsruhe to Basel, has turned out to be the most difficult part of the overall project. In the course of the laborious planning approval processes, there was considerable political shift of opinion about the route of the upgraded and new line. Essential requirements, which had formerly been seen as not financially feasible, were suddenly regarded as feasible. A public project support committee with no decision-making competence recommended the route should pass below the town of Offenburg in a new tunnel and the subsequent route to the south should be bundled with the federal highway A5. These decisions had the consequence that the project design, which had been handed according to the applicable law and which was ready for approval, was no longer pursued. The entire design process started again, resulting in a delay of at least five years. The completion of this StA is thus only to be expected in 2030. The total investment for the line section will also increase by at least €2 billion. On 28 January 2016, the German Parliament (Bundestag) agreed this changed project variant.

3 Der Tunnel Rastatt

3.1 Planung und Ausführung

Der Tunnel Rastatt ist analog dem Katzenbergtunnel als Zweiröhrensystem konzipiert, entsprechend den aktuellen Anforderungen der EU und des deutschen Eisenbahn Bundesamtes (EBA) an den Brand- und Katastrophenschutz für den Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln [2, 10]. Diesen Anforderungen liegt das Konzept einer schienenunabhängigen Fremdrettung zu Grunde, was den Einbau einer für Strassenfahrzeuge nutzbaren Fahrbahn und alle 500 m den Bau von Querschlägen mit Rettungsschleusen bedingt. Ein Löschwassersystem, Handläufe, Notrufsäulen, Rettungsschleusen in den Querschlägen, eine Tunnelbeleuchtung und ein Fluchtwege-Leitsystem ergänzen die baulichen Einrichtungen des Tunnelrettungskonzepts (Bild 7).

Nach seiner Inbetriebnahme wird der Tunnel Rastatt während der Hauptverkehrszeit am Tag den schnellen Personenfernverkehr und – soweit möglich – den Güterverkehr aufnehmen. In der schwächer ausgelasteten Nachtzeit sowie in freien Fahrplantrassen wird der Güterverkehr durch den Tunnel geführt, um das Stadtgebiet von Rastatt so deutlich vom Schienenverkehrslärm zu entlasten.

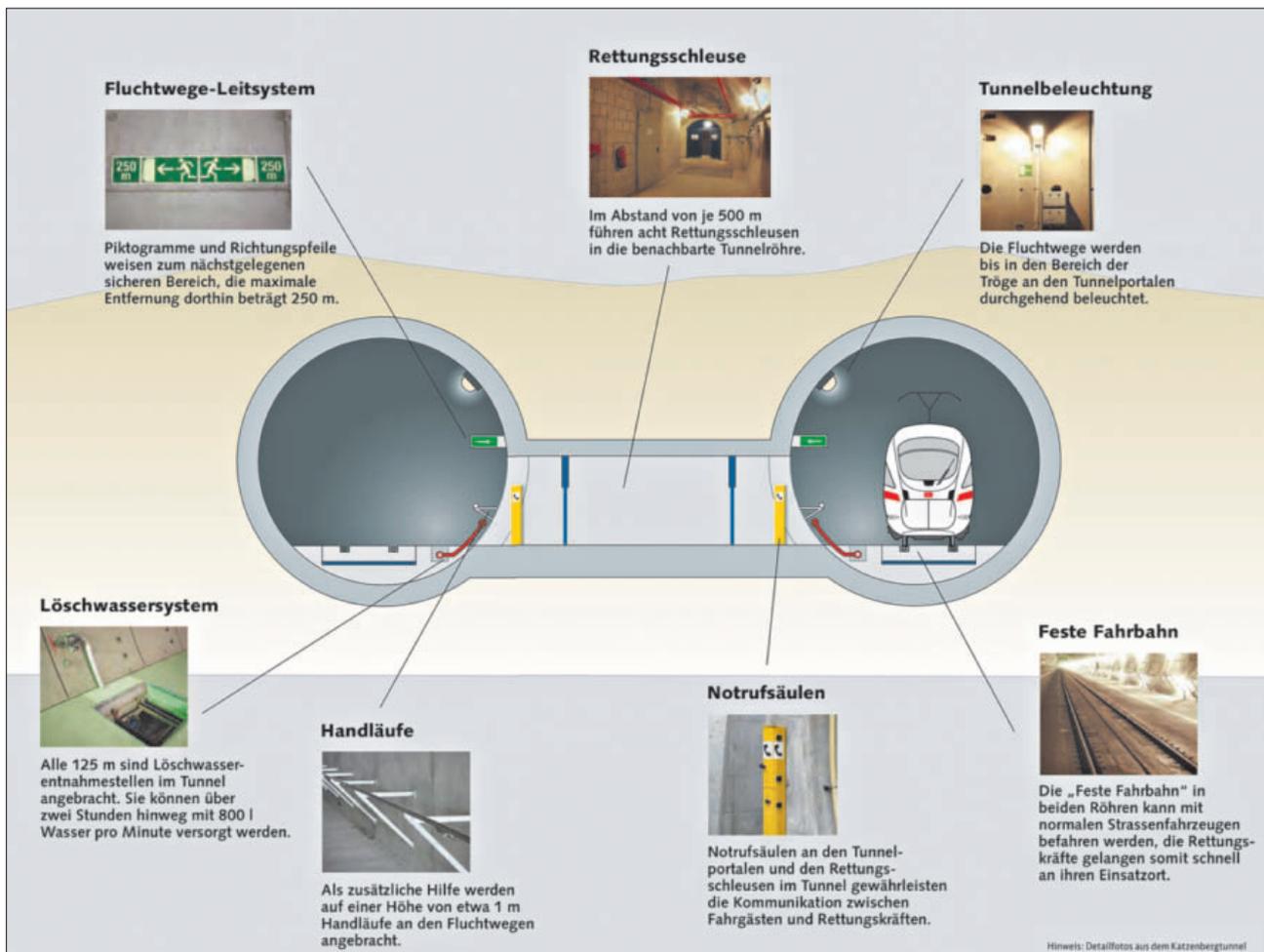
By the end of 2022, that is two years after the complete opening of the Gotthard axis of the NRLA, about 55 % of the total 182 km distance of the new and upgraded line between Karlsruhe and Basel will thus be in operation. These measures should ensure that there are no further capacity bottlenecks on the NRLA approach route until the opening of the further sections.

The construction cost of the entire Karlsruhe–Basel project is currently (still without the Offenburg Tunnel and the stretch parallel to the autobahn as decided by the project support committee) is currently estimated at €7.1 billion, of which about €2.2 billion had been invested by the end of 2013. Most of the finance comes from federal funds from the Federal Republic of Germany, with contributions from the European Union (EU) and DB.

3 The Rastatt Tunnel

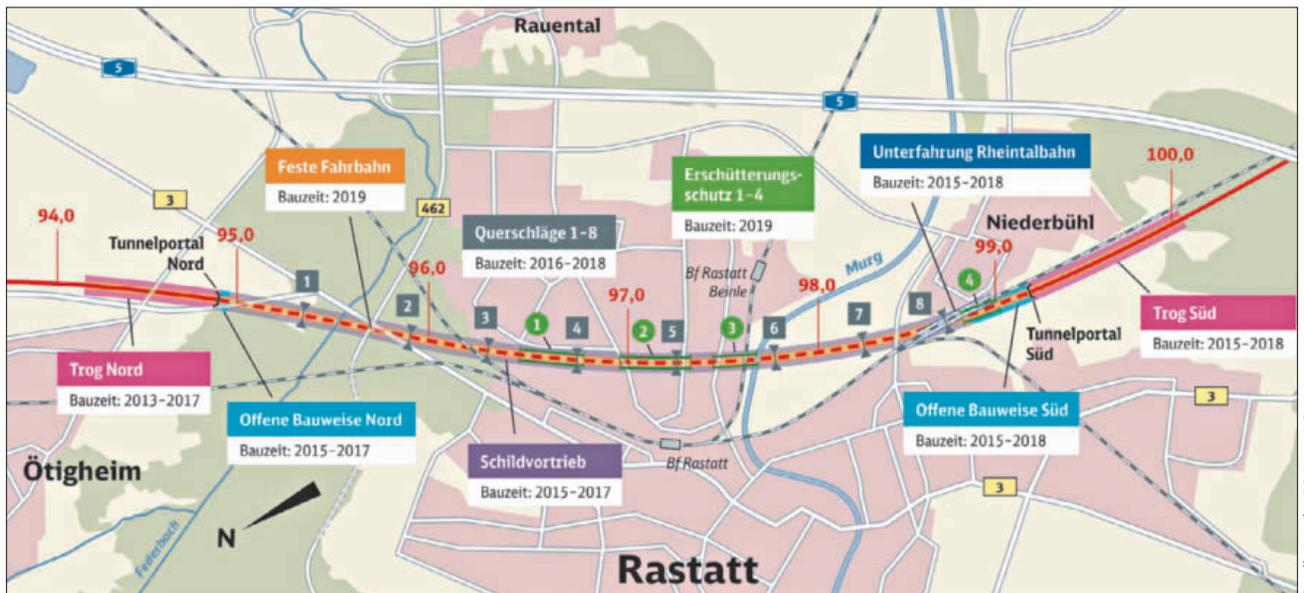
3.1 Design and Construction

The Rastatt Tunnel is of similar design to the Katzenberg Tunnel, with a twin-bore system according to the current requirements of the EU and the Federal Railway Authority



Quelle/credit: DB Netz AG

7 Bauliche Elemente zur Tunnelrettung gemäss gültigen Richtlinien für Neubauten von zweiröhri gen Eisenbahntunneln in Deutschland
Constructional elements for tunnel escape according to the valid Guidelines for new construction of two-track rail tunnels in Germany



Quelle/credit: DB Netz AG

8 Geplante bauliche Massnahmen und generelles Bauprogramm des Tunnels Rastatt
Planned constructional measures and general construction schedule for the Rastatt Tunnel

Das Bauwerk des Tunnels Rastatt beginnt im Norden (Bild 8) mit der 800 m langen Grundwasserwanne (Trog) Nord südlich von Ötigheim. Das Stadtgebiet von Rastatt wird anschliessend mit einem 4270 m langen zweiröhren Tunnel unterquert und endet im Süden mit dem 895 m langen Trog Süd im Bereich Niederbühl. An die Grundwasserwannen anschliessend folgen in Richtung Tunnel die jeweiligen Portalbereiche mit Tunnelrahmen in offener Bauweise mit einer Länge von 45 m im Norden bzw. im Süden 182 m (Oströhre) und 336 m (Weströhre). In alle Portalbauwerke werden die sogenannten Sonic-Boom-Bauwerke zur Minderung des Mikrodruckwelleneffektes (Tunnelknall) integriert (Bild 17). Die Herstellung der Trog- und Rahmenbauwerke erfolgt im Schutz wasserundurchlässiger Baugrubenumschliessungen, bestehend aus Spundwänden und nach unten verankerten Unterwasserbetonsohlen.

Acht Querschläge im Abstand von je 500 m dienen als Fluchtwege zwischen den beiden Röhren. Zur Abführung der Abwässer aus dem Tunnel mittels Pumpanlagen sowie zur Zuführung diverser Medien (zum Beispiel Löschwasser) in den Tunnel wird am Tiefpunkt des Tunnels ein Versorgungsschacht errichtet, der über einen weiteren Querschlag an die Tunnelröhren angeschlossen wird. Sämtliche Querschläge werden nach vorgängiger Vereisung zur Abdichtung und Stabilisierung des umliegenden Baugrunds im konventionellen Vortrieb (Spritzbetonbauweise) aufgeföhren.

Die Streckengradienten werden zur Unterquerung des städtischen Bereichs am Beginn des nördlichen und des südlichen Trops abgesenkt. Mit einem maximalen Gefälle von 12,3‰ entspricht die Trassierung den Anforderungen einer Flachbahn. Aufgrund der flachen Topographie haben die Tunnelröhren eine maximale Überdeckung von nur ca. 20 m. Im städtischen Bereich wird in der Sohle zum Schutz der da-

(EBA) for fire and catastrophe protection for the construction and operation of rail tunnels [2, 10]. These requirements are based on escape independent of rail transport, which requires the provision of paving suitable for road vehicles and cross passages with escape locks every 500 m. Tunnel lighting and an escape route guidance system complete the equipment of the tunnel escape concept (Fig. 7).

When open, the Rastatt Tunnel will be used in the main travel times for high-speed passenger traffic and as far as possible for freight traffic. In the less busy night time and in gaps in the timetable, freight traffic will run through the tunnel in order to relieve the urban area of Rastatt from rail noise as far as possible.

The structures of the Rastatt Tunnel start in the north (Fig. 8) with the 800 m long north groundwater trough situated south of Ötigheim. The tunnel then passes below the urban area of Rastatt as a 4,270 m long twin-bore tunnel and ends in the south with the 895 m south trough near Niederbühl. The groundwater troughs are followed into the tunnel by the portal areas with a framed tunnel in cut and cover with a length of 45 m at the north end and 182 m (east bore) and 336 m (west bore) at the south end. Sonic boom structures are integrated into all portal structures to reduce the micro-pressure wave effect (tunnel boom) (Fig. 17). The trough and framed structure will be constructed inside waterproof support walls consisting of sheet pile walls with underwater concrete inverts that are anchored down.

Eight cross passages at a spacing of 500 m serves as escape routes between the two bores. In order to clear waste water out of the tunnel with a pumping plant and for the pipework for various media (for example extinguishing water), a disposal shaft will be constructed at the deepest point of the

The Rastatt Tunnel • A Key Project in Many Respects

rüber liegenden bewohnten Gebiete vor Lärm und Erschütterungen streckenweise ein Masse-Feder-System eingebaut. Mit dem Tunnelvortrieb wird im Mai 2016 begonnen, die Gesamtbauzeit für Roh- und Ausbau beträgt voraussichtlich fünf Jahre (Bild 12).

Der Baugrund im Bereich der Tunnelbaumassnahme ist dem Quartär und Tertiär zuzuordnen. Unter den bindigen Deckschichten folgen überwiegend mitteldicht bis dicht, örtlich locker gelagerte Wechsellagen von quartären Gemischen aus Kiesen und Sanden mit unterschiedlichen steinigen Anteilen. Darunter stehen tertiäre, aus Feinsanden mit verschiedenen bindigen Beimengungen bzw. aus Schluffen und Tonen bestehende Schichten an. Der quartäre Grundwasserleiter besteht im Wesentlichen aus Kiesen und Sanden mit einer Mächtigkeit von ca. 15 m im Süden und bis zu ca. 40 m im Norden. Es handelt sich um einen einheitlichen, zusammenhängenden Porengrundwasserleiter mit freier Grundwasseroberfläche. Unter Zugrundelegung des höchsten bislang gemessenen Grundwasserstands ist mit einem maximalen Wasserdruck in der Tunnelsohle von bis zu etwa 2,8 bar zu rechnen. Bei Ansatz des höchsten bekannten Grundwasserstands kommt das Bauwerk im gesamten Wannen- und Tunnelbereich im Grundwasser zu liegen (Bild 9).

Aufgrund der anstehenden Baugrundverhältnisse entschied sich der Bauherr deshalb, den bergmännisch vorzutreibenden Abschnitt des Tunnels in geschlossener Bauweise mit Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) auszuführen. Vortriebsbeginn ist für beide Tunnelröhren beim nördlichen Tunnelportal. Zwei TVM werden als Schildmaschinen mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust in Form von Mixschilden ausgeführt und fahren in der Weströhre 3674 m bzw. 3826 m Tunnel in der Oströhre mit einem kreisrunden Querschnitt auf. Der Ausbruchdurchmesser beträgt 10,97 m; beim einschaligen Ausbau werden Tübbinge mit einer Dicke von 50 cm verwendet.

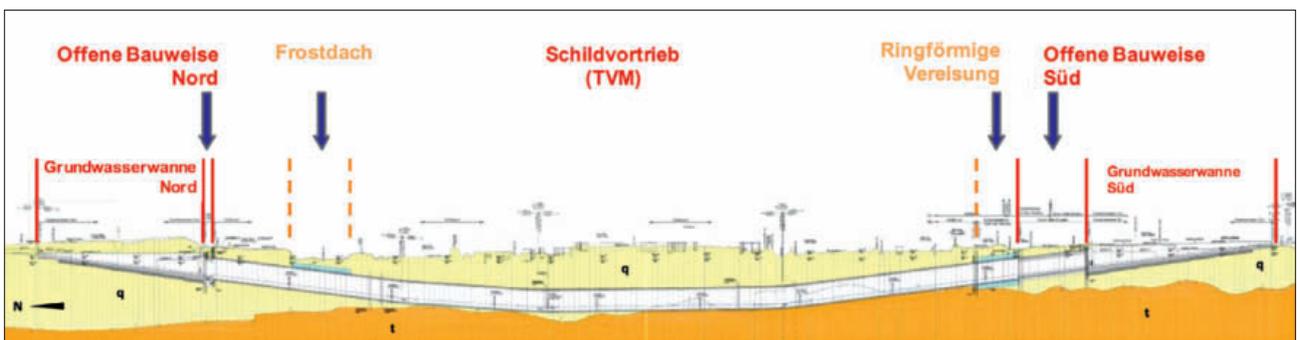
Im Dezember 2014 bestellte das beauftragte Konsortium (Ed. Züblin AG, technische Federführung/Hochtief AG, kaufmännische Federführung) die beiden TVM mit einem Schneidrad von 10,97 m Aussendurchmesser beim Lieferanten Herrenknecht AG. Das Gesamtinvestitionsvolumen für die beiden

tunnel, which will be connected to the tunnel bores by a further cross passage. All cross passages will be conventionally excavated (shotcrete method) under pre-support in the form of ground freezing to waterproof and stabilise the surrounding ground.

The vertical alignments will be lowered at the start of the north and south troughs in order to pass below the urban area. With a maximum gradient of 12.3 ‰, the alignment corresponds to the requirements of a level line. Due to the flat topography, the tunnel bores only have a maximum cover of about 20 m. In the urban area, a mass-spring system will be installed in some stretches to protect the residential areas above from noise and vibration. Tunnel driving will start in May 2016 and the total construction time for the tunnel structure is a forecast five years (Fig. 12).

The tunnel passes through Quaternary and Tertiary geology. Under the cohesive cover layer follow predominantly medium-dense to dense, locally loosely consolidated intercalations of Quaternary mixtures of gravels and sands with varying stone contents. Under these are Tertiary strata consisting of fine sands with various cohesive components or silts and clays. The Quaternary groundwater aquifer essentially consists of gravels and sands with a thickness of about 15 m in the south and up to about 40 m in the north. This is a uniform continuous pore groundwater aquifer with a free groundwater table. Assuming the highest groundwater table measured so far, a maximum water pressure in the tunnel invert of about 2.8 bar has to be expected. If the highest known groundwater table is assumed, then the entire trough and tunnel will lie in the groundwater (Fig. 9).

Due to the prevailing ground conditions, the client thus decided to excavate the mined part of the tunnel in closed mode with a tunnel boring machine (TBM). Both bores will be started from the north tunnel portal. The two TBMs will be shielded machines with slurry support to the face as Mixshields and will drive a circular section 3,674 m long in the west bore and 3,826 m long in the east bore. The excavated diameter is 10.97 m and the single-pass lining will consist of segments 50 cm thick.



Quelle/credit: Bung AG/DB Netz AG

9 Längensprofil Tunnel Rastatt mit vorgesehenen Baumethoden

Longitudinal profile of the Rastatt Tunnel with intended construction methods



Quelle/credit: Herrenknecht AG

10 Im Werk montierter Mixschild S-953 der Firma Herrenknecht AG am Tag der Abnahme im Werk Schwanau (8. Dezember 2015)
Mixshield TBM S-953 from the company Herrenknecht AG on the day of acceptance at the works in Schwanau (8 December 2015)

TVM beträgt rund 36 Mio EUR. Die erste der beiden jeweils 93 m langen und 1750 t schweren Maschinen wurde zwischenzeitlich im Werk in Schwanau montiert (Bild 10). Am 8. Dezember 2015 fand die Abnahme der Maschine im Werk des TVM-Herstellers statt. Die zweite Maschine befand sich im Februar 2016 noch in der Montage.

Nach dem Transport der ersten TVM auf die Baustelle erfolgt deren Montage in der Startgrube im Bereich der nördlichen Grundwasserwanne mit einem geplanten Vortriebsbeginn im Mai 2016. Die zweite Maschine wird die Vortriebsarbeiten anschliessend mit einem zeitlichen Versatz von rund drei Monaten aufnehmen.

Die einschalige Tunnelschale mit einem Innendurchmesser von 9,6 m besteht aus sieben teiligen Tübbingringen mit einer Dicke von 50 cm und einer Breite von 2 m (Bild 11). Jeder eingebaute Ring wiegt rund 80 t. Die Tübbinge werden in einem Betonfertigteilwerk hergestellt, per Zug nach Rastatt und von dort per LKW zur Baustelle geliefert. Während des Tunnelvortriebs fallen Ausbruchsmassen von rund 700 000 m³ an. Diese Massen werden über Förderleitungen von den Maschinen zu einer Separieranlage im Bereich der Baustelleneinrichtungsfläche auf der Nordseite transportiert und dort für die Weiterverwendung bzw. Deponierung aufbereitet. Der Abtransport von der Baustelle erfolgt anschliessend per LKW.

3.2 Vorgesehenes Bauprogramm

Im August 2012 wurde die Finanzierungsvereinbarung zwischen dem Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur (BMVI) und der DB AG für den Streckenabschnitt von Karlsruhe nach Rastatt Süd in der Höhe von 693 Mio. EUR abgeschlossen, womit eine wichtige Voraussetzung für die zügige Realisierung des Streckenabschnitts 1 der Rheintalbahn geschaffen wurde.

Mit vom Bauherrn als Vorabmassnahmen identifizierten kleineren Baulosen wurde noch im Jahr 2013 ein kurzfristiger

In December 2014, the contracting consortium (Ed. Züblin AG, technical lead/Hochtief AG, commercial lead) ordered the two machines with cutting wheel diameters of 10.97 m from the supplier Herrenknecht AG. The total investment cost for the two TBMs is about €36 million. The first of the machines, each with a length of 93 m and a weight of 1,750 t, has meanwhile been assembled at the works (Fig. 10). On 8 December 2015, the machine was accepted at the works of the TBM manufacturer. The second machine was still being assembled in February 2016.

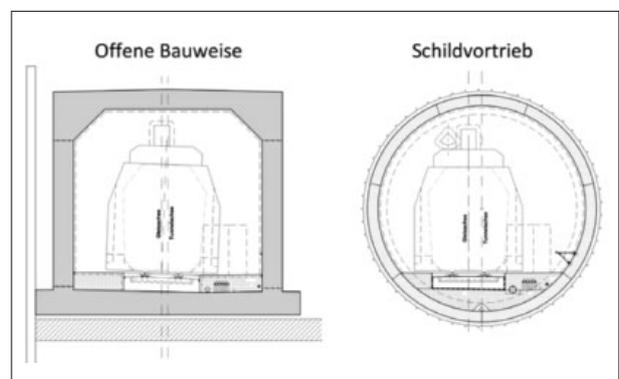
After transport of the first TBM to the site, it was assembled in the construction excavation in the northern groundwater trough, with the start of tunnelling planned for May 2016. The second machine will then start work with a delay of about three months.

The single-pass tunnel lining with an internal diameter of 9.6 m consists of seven-part segment rings with a thickness of 50 cm and a length of 2 m (Fig. 11). Each installed ring weighs about 80 t. The segments are being produced in a precast concrete works, transported to Rastatt by train and from there by truck to the site. The driving of the tunnels will produce about 700,000 m³ of excavated material. The material will be transported through the slurry circuit from the machine to a separation plant on the site facilities area and there processed for reuse or tipping. The material is then transported from the site by truck.

3.2 Intended Construction Programmes

In August 2012, the financing agreement was concluded between the Federal Ministry of Transport and Infrastructure (BMVI) and the DB AG for the line section from Karlsruhe to Rastatt Süd in the sum of €693 million, which fulfilled an important precondition for the implementation of line section 1 of the Rheintalbahn line.

Construction started quite promptly in 2013 with smaller contracts identified by the client as preliminary works. The performance of the earthworks and the excavation for the



Quelle/credit: DB Netz AG

11 Regelquerschnitte für Portalstrecke in offener Bauweise (links) und die Schildvortriebstrecke (rechts)
Standard cross-section for portal sections in cut and cover (left) and the mechanically bored section (right)

Baubeginn Vorabmassnahmen/Construction start, preliminary works	Q3 2013
Fertigstellung Vorabmassnahmen/Completion of preliminary works	Q1 2016
Start Tunnelvortrieb/Start of tunnel driving	Q2 2016
Fertigstellung Tunnelrohbau inklusive Trogbauwerken/Completion of tunnel structure including troughs	Q2 2018
Fertigstellung freie Strecke/Completion of open-air line	Q4 2018
Fertigstellung Strecken- und Tunnelausrüstung/Completion of line and tunnel equipment	Q2 2020
Abschluss Abnahmen und Prüffahrten/Completion of acceptances and trial runs	Q2 2022
Inbetriebnahme/Opening for service	Q4 2022

Table 1 Meilensteine des Bauprojekts Tunnel Rastatt

Table 1 Milestones on the Rastatt Tunnel construction project

Baubeginn realisiert. Die Ausführung von Erdarbeiten und die Herstellung der Baugrube für den Trog Nord sowie der Bau einer Grundwasserwanne zur Unterquerung der Bundesautobahn (BAB) 5 südlich des Rastatter Tunnels wurden im Sommer 2013 begonnen und sind mittlerweile beendet.

Die Ausschreibung der Tunnelrohbauarbeiten wurde im August 2014 mit der Vergabe des Hauptloses an die ARGE Tunnel Rastatt erfolgreich abgeschlossen. Weitere Ausschreibungspakete für die freie Strecke sowie für die Tunnel- und Streckenausrüstung sind in Vorbereitung. Die vorgesehenen Meilensteine bis zur geplanten Inbetriebnahme im Jahr 2022, mit der ein bedeutender Engpass südlich von Karlsruhe beseitigt wird, sind in **Table 1** aufgelistet; **Bild 12** zeigt den detaillierten Rahmenterminplan für den Tunnel Rastatt.

3.3 Dreimaliger Einsatz von Gefrierkörpern für den Tunnelvortrieb

Für die Erstellung des Tunnels Rastatt kommt bei drei Bauvorgängen das Gefrierverfahren (Soleverfahren) als Bauhilfsmassnahme zum Einsatz, nämlich:

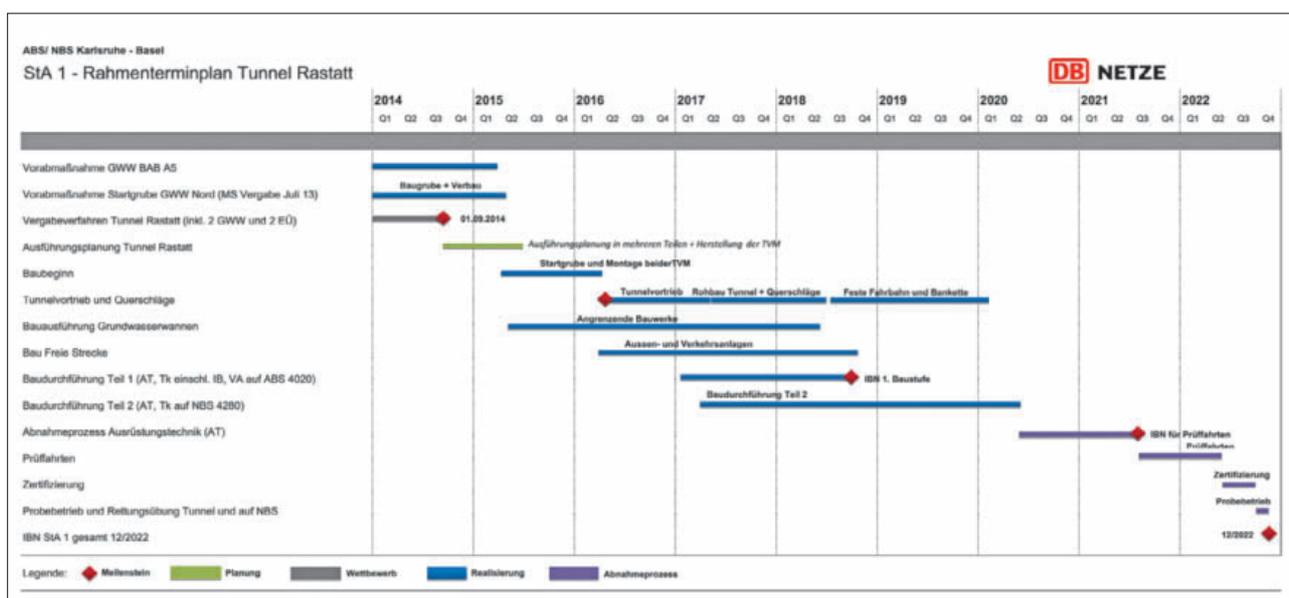
groundwater trough to pass under the federal highway A5 south of the Rastatt Tunnel was started in summer 2013 and has now been completed.

Tendering of the tunnel construction works was successfully completed in August 2014 with the award of the main contract to the consortium JV Tunnel Rastatt. Further tender packets for the open-air line and the tunnel and line equipment are in preparation. The intended milestones until the planned start of services in 2022, with which a significant bottleneck will be removed south of Karlsruhe, are listed in **Table 1**; **Fig. 12** shows the detailed framework schedule for the Rastatt Tunnel.

3.3 Three Uses of Ground Freezing for the Tunnel Drive

Ground freezing (brine process) will be used as an auxiliary construction method for three locations during the construction of the Rastatt Tunnel, specifically:

- a) to pass beneath the low point under the Federbach stream near the north portal due to the shallow cover;



Quelle/credit: DB Netz AG

12 Genereller Bauablauf für den Tunnel Rastatt
General construction programme for the Rastatt Tunnel

- a) zur Unterquerung der Federbachniederung im Bereich des Nordportals, aufgrund zu geringer Überdeckung;
- b) zur Herstellung von neun Querschlägen im wassergesättigten Lockermaterial, zwecks Abdichtung und temporärer Sicherung während des Vortriebs;
- c) zur Unterföhrung der bestehenden Rheintalbahn im Bereich des Südportals, als abdichtende und tragende Sicherung für eventuelle Interventionen.

Die nördlich der Stadt Rastatt liegende Federbachniederung wurde erst nach dem Erhalt des Planrechtes (1998) als Flora-Fauna-Habitat (FFH)-Naturschutzgebiet eingestuft. Diese Entscheidung erforderte trotz des gültigen Planrechtes eine neue Bewertung der Situation. Gespräche mit den Naturschutzbehörden im Rahmen der Fortführung der Entwurfsplanung (entspricht in der Schweiz der Stufe «Bauprojekt») zeigten, dass naturschutzrechtliche Bedenken gegen eine Aufschüttung bestehen, die zum Ausgleich der geringen Überlagerungshöhen das nötige Gegengewicht für den maschinellen Vortrieb erzeugt hätte.

Unter Berücksichtigung der erhöhten Naturschutzanforderungen wurden alternative Sicherungsmassnahmen untersucht. Offene Bauweisen wurden aufgrund des erheblichen Eingriffs in das Ökosystem der Federbachniederung ausgeschlossen. Bodenverfestigungen mittels Injektionen wurden ebenfalls von vornherein verworfen, da diese aufgrund der geringen Überdeckung das oberflächennahe Bodengefüge dauerhaft beeinflusst hätten. Als Ergebnis der Abwägung wurde schliesslich ein dachförmiger Gefrierschirm oberhalb des maschinellen Tunnelvortriebs als Variante mit den geringsten Eingriffen in das FFH-Gebiet identifiziert.

Dieser dachförmige Gefrierschirm («Frostdach») hat die Aufgabe, mit einer geschlossenen Abdeckung oberhalb der Tunnelfirste (Bild 13) Geländeaufbrüche und/oder Ausbläser während des TVM-Vortriebs zu verhindern. Mit dem gewählten Konzept werden die während des Vortriebs unter dem Frostdach entstehenden Auftriebskräfte über die Reibungskräfte in den Dachflächen nach unten in den umgebenden Baugrund eingeleitet.

Das Frostdach erstreckt sich über die komplette Unterföhrung der Federbachniederung mit Längen von ca. 185 m im Bereich der Oströhre und ca. 295 m im Bereich der Weströhre und wird durch Schrägbohrungen von der Geländeoberfläche aus hergestellt. Der Frostkörper soll gemäss den statischen Erfordernissen bis etwa auf die Tiefe der künftigen Schienenoberkante reichen, also eine Tiefe von ca. 12 bis 15 m aufweisen. Dazu werden ab der Geländeoberfläche von einem oberhalb der Tunnelachse angeordneten ca. 5 m breiten Streifen in einem Abstand von maximal 1,40 m Schrägbohrungen für die Gefrierlanzen unter einem Winkel von ca. 30 bis 50° aus der Vertikalen eingebracht. Die Bohrungen und die Gefriereröhrungen können mittels Kleingeräten von der Geländeoberfläche aus erstellt werden, womit die Eingriffe in das FFH-Gebiet minimiert werden. Die Gefrier-

- b) to construct the nine cross passages in water-saturated soft ground, as a waterproofing and temporary support measure during the tunnel drive;
- c) to tunnel beneath the existing Rheintalbahn line near the south portal, as a waterproofing and load-bearing support for any interventions.

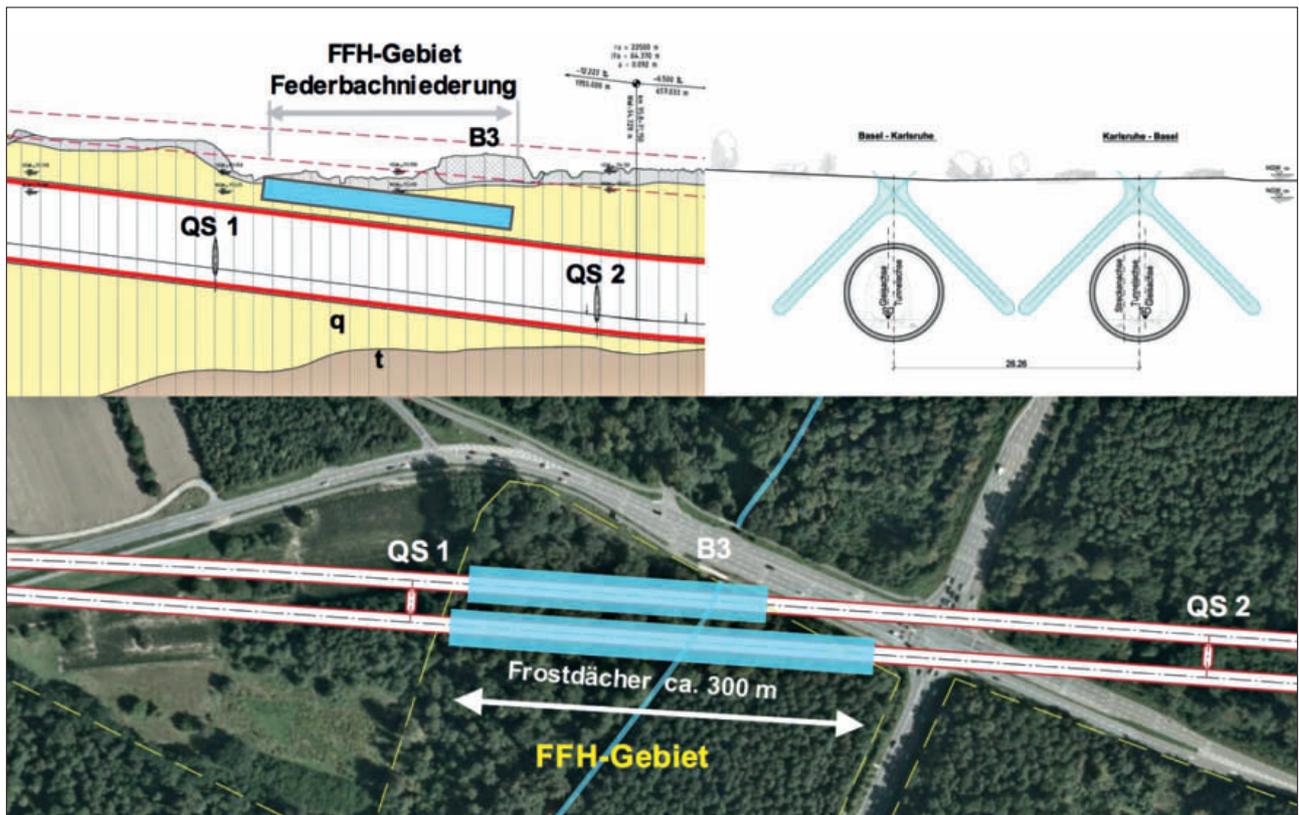
The lowland of the Federbach river north of Rastatt was first categorised as a Flora-Fauna-Habitat (FFH) nature conservation area after the receipt of the planning approval. Despite the valid approval, this decision demanded a re-evaluation of the situation. Discussions with the nature protection authorities in the course of continued work on the preliminary design showed that there are reservations from the point of view of nature conservation against filling of the area, which could have given the necessary opposing load for the mechanised tunnel drive.

Considering the increased requirements of nature conservation, alternative support measures were investigated. Cut and cover construction would represent a considerable encroachment in the ecosystem of the Federbach lowland. Ground freezing by injection was also rejected in advance, since this would permanently affect the soil structure near the surface due to the shallow cover. The final result of the considerations was a frozen canopy above the tunnel drive as the variant with the least impact on the FFH area.

This roof-shaped frozen canopy ("frozen roof") is intended to prevent heave failure of the ground and/or blowouts during the TBM drive with a closed cover above the tunnel crown (Fig. 13). With the chosen concept, heave forces created under the frozen canopy during the tunnel drive will be transferred downward into the surrounding ground through the friction forces in the roof surfaces.

The frozen roof extends along the entire passage beneath the Federbach lowland with a length of about 185 m in the east bore and about 295 m in the west bore, and will be created from ground level through inclined boreholes. The frozen body should according to the structural requirements extend down to about top of rail level, a depth of about 12 to 15 m. For this purpose, inclined boreholes will be drilled from the surface at a maximum spacing of about 1.40 m for the freezing lances at an angle of 30 to 50° to the vertical from a strip 5 m wide above the tunnel centreline. The drilling and installation of freezing pipes can be undertaken from the surface using only small machines, which should minimise impact on the FFH area. The freezing plant and the site facilities area will be situated outside the FFH area. The energy consumption for the freezing plant and the maintenance of the frozen body is about 3.82 million kWh.

Due to its necessary size and duration of use, the frozen body will be produced by brine freezing. The thermal calculations for the frozen roof take into account (to be on the safe side) a groundwater flow speed of up to 0.5 m/d. Under



Quelle/credit: DB Netz AG/Bung AG

13 Schemaskizze zur dachförmigen Bodenvereisung im Bereich der Federbachsenke
Schematic sketch of the roof-shaped ground freezing in the Federbach lowland

anlage und die Baustelleneinrichtungsflächen werden ausserhalb des FFH-Gebiets angeordnet. Der Energiebedarf der Gefrieranlage für den Aufbau und Unterhalt der Frostkörper beträgt rund 3,82 Mio. kWh.

Aufgrund der erforderlichen Grösse des Frostkörpers sowie der erforderlichen Nutzungsdauer wird der Frostkörper mittels Solevereisung hergestellt. Die thermischen Berechnungen für das Frostdach berücksichtigen (auf der sicheren Seite liegend) eine Grundwasserfliessgeschwindigkeit bis zu 0,5 m/d. Unter den angesetzten Randbedingungen wurden Aufgefrierzeiten von ca. 25 Tagen prognostiziert.

Der Aufbau des Frostkörpers bis zur statisch erforderlichen Stärke von ca. 1,00 bis 2,00 m sowie der Erhaltungsbetrieb des Frostkörpers werden durch Temperaturmessungen kontrolliert. Beim Aufgefrieren und späteren Abtauen sind Frosthebungen und Tausetzungen zu erwarten. Im Bereich der Federbachniederung befinden sich allerdings keine setzungsempfindlichen Bauwerke.

Der dauerhafte Eingriff in das Bodengefüge entsteht bei der Vereisungslösung im Wesentlichen durch das Verbleiben von Gefrierlanzen und Verdämmung aus zementgebundenen Mörteln im Boden. Der Eiskörper selbst ist vollkommen reversibel. Nach dessen Abtauen verbleiben ausser den Lanzen und der Verdämmung keine Bauteile im Boden. Die Gefrierlanzen aus Stahl werden nach dem Abschluss der Arbeiten

the assumed constraints, freezing times of about 25 days are forecast.

The formation of the frozen body to its structurally required thickness of 1.00 to 2.00 m and the maintenance of the frozen body will be controlled by temperature measurements. As the ground is frozen and later thawed, associated heaving and settlement are to be expected. In the Federbach lowland, however, there are no structures that are susceptible to settlement.

The permanent impact on the soil structure from ground freezing essentially derives from the freezing lances and stemming of cement-bound mortar remaining in the ground. The frozen body itself is completely reversible. After it has thawed, no construction elements remain in the ground apart from the lances and the stemming. The steel freezing lances are cut off and removed after the completion of freezing work at a depth of about 1.00 m below ground level. The chosen construction process results in less total impact on the ecosystem of the Federbach lowland than temporary filling, although at higher cost. This however has to be invested to ensure acceptance for the project and to preserve the environment.

In the course of the new construction of the Rastatt Tunnel, the tunnel alignment passes beneath the Rheintalbahn line at a glancing angle along a total length of about 350 m and

bis auf eine Tiefe von ca. 1,00 m unter Geländeoberkante (GOK) gekappt und entfernt. Mit dem gewählten Bauverfahren ergeben sich in der Summe geringere Eingriffe in das Ökosystem der Federbachniederung als bei einer temporären Überschüttung, jedoch zum Preis höherer Kosten. Diese mussten aber zur Sicherung der Akzeptanz des Projekts und zur Schonung der Umwelt investiert werden.

Im Zuge des Neubaus des Tunnels Rastatt unterquert die Tunnelstrecke auf einer Gesamtlänge von rund 350 m die Rheintalbahn im schleifenden Schnitt, mit relativ geringer Überdeckung von teilweise weniger als 5,0 m. Die Rheintalbahn kann aufgrund ihrer betrieblichen Bedeutung nicht gesperrt werden, und Eingriffe in den Bahnbetrieb sind möglichst zu vermeiden.

Aufgrund der sehr hohen Anforderungen an die Sicherheit und Aufrechterhaltung des Bahnbetriebs der bestehenden Rheintalbahn sah der der Amtsentwurf für diesen Tunnelabschnitt als Vortriebsverfahren einen Spritzbetonvortrieb im Schutz einer ringförmigen Vereisung vor. Die Vortriebsmaschinen sollten ursprünglich in Zwischenschächten unmittelbar nördlich der Rheintalbahn vor der Unterquerung geborgen werden. Mit Blick auf ein beiderseitiges wirtschaftliches Optimierungspotenzial wurde der Vortrieb unter der Rheintalbahn vom Unternehmer Bau in einem Sondervorschlag mittels TVM angeboten und nach Feststellung der grundsätzlichen technischen Gleichwertigkeit und Machbarkeit beauftragt (Bild 14). Dabei stellt der TVM-Vortrieb in einem nahezu vollständig aufgefrorenen Bodenkörper ein Novum im maschinellen Tunnelbau dar.

Die grundlegenden Anforderungen an den ringförmigen Eiskörper sind die durchgehende Wasserdichtigkeit der Schale und der Anschlüsse an die begrenzenden Verbauwände der Vereisungsschächte sowie die statische Tragfähigkeit des Eisrings. Hierdurch sollen mögliche Einwirkungen auf die Bestandstrecke (beispielsweise Verformungen, Verwindungen etc.) – insbesondere bei erforderlichen Interventionen an der Ortsbrust, zum Beispiel für Hindernisbeseitigungen – auf das geringstmögliche Mass reduziert werden.

Der Vereisungsbereich weist je Röhre eine Länge von ca. 220 m auf. Aufgrund des schleifenden Schnitts mit der Rheintalbahn sind die Vortriebsstrecken der einzelnen Röhren in Längsrichtung gegeneinander versetzt. Die Lage wird durch die vorhandene Rheintalbahn bestimmt. Zunächst werden für beide Röhren nördlich und südlich der Rheintalbahn Vereisungsschächte aus Kombinationen von überschnittenen Bohrpfehlen und Schlitzwänden hergestellt. Von diesen Schächten aus werden Gefrierlanzen ringförmig, im Abstand von rund 1,00 m untereinander und von rund 2,00 m zur Aussenkante der Tunnelinnenschale eingebracht, um den späteren Ausbruchquerschnitt sowie Messbohrungen zur Kontrolle des Aufbaus des Eiskörpers vorzutreiben. Die jeweils rund 110 m langen Horizontalbohrungen werden als gesteuerte Bohrungen

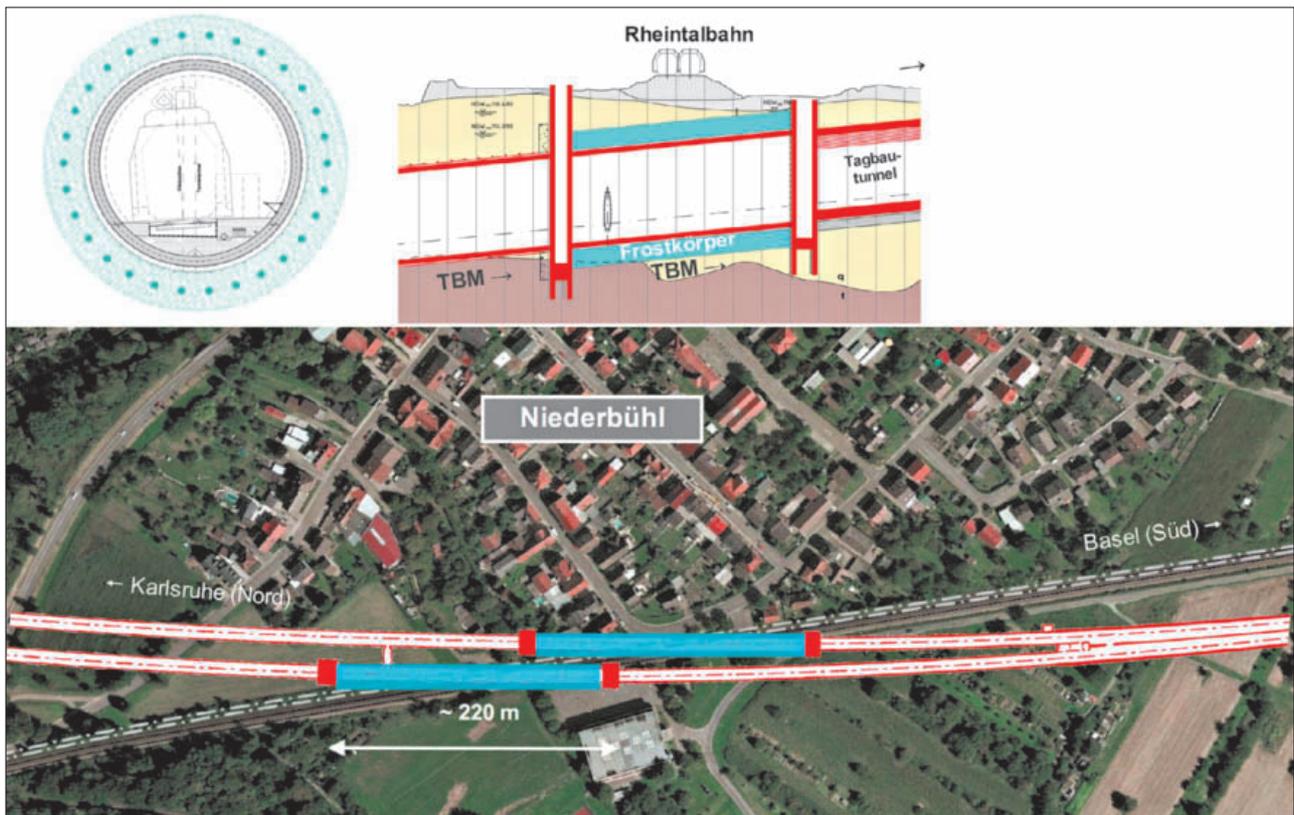
with shallow cover, less than 5.0 m in places. The Rheintalbahn cannot be closed due to its operational significance and interruptions of rail operations are to be avoided as far as possible.

Due to the very stringent requirements for safety and maintenance of rail operation on the existing Rheintalbahn line, the official design for this section of the tunnel intended conventional excavation by the shotcrete method under the protection of ring-shaped ground freezing. The tunnel boring machines should originally have been removed from intermediate shafts immediately before the crossing of the Rheintalbahn. With a view to the economic optimisation potential for both sides, the contractor proposed as an alternative to tunnel under the Rheintalbahn with a TBM and after this had been investigated, the basic technical equivalence and feasibility of the proposal was established and the contract was awarded on this basis (Fig. 14). To bore a tunnel with a TBM through an almost completely frozen body will represent a first in mechanised tunnelling.

The basic requirements for the annular frozen body are continuous water-tightness of the layer and the junctions with adjacent support walls and the structural safety of the load-bearing ring. This is intended to reduce to a minimum any effects on the existing line (for example deformations, distortions etc.), especially in the case of any necessary interventions at the face, for example to remove obstructions.

The frozen zone has a length of about 220 m for each tunnel bore. Due to the glancing angle with the Rheintalbahn, the bored sections of each tunnel are staggered to each other. The location is determined by the existing line. First, freezing shafts are excavated for both bores north and south of the Rheintalbahn with support in the form of a combination of secant pile walls and diaphragm walls. From these shafts, the freezing lances are installed in a ring shape with a spacing of about 1.00 m and about 2.00 m from the outside face of the tunnel inner lining in order to drive the future excavated cross-section and measurement holes to check the formation of the frozen body. The horizontal boreholes each about 110 m long are drilled by directional drilling. In the upper half of the perimeter, the holes are drilled by auger boring with a jacked casing and in the lower half by horizontal directional drilling. After the drilling of the holes for ground freezing and monitoring, they are successively surveyed in three dimensions. After completion, the freezing lances are fed brine as refrigerant and the frozen body is formed. The freezing plant and the site facilities area are located outside the freezing shaft. The electricity consumption of the freezing plant for the formation and maintenance of the frozen body is estimated at about 17.00 million kWh.

The thermal calculations for the frozen body take into account a groundwater flow speed of up to 1.30 m/d. Under



Quelle/credit: DB Netz AG/Bung AG

14 Schemaskizze zur ringförmigen Bodenvereisung im Bereich der Rheintalbahnunterquerung
Schematic sketch for ring-shaped ground freezing at the crossing of the Rheintalbahn line

ausgeführt. Auf den oberen Umfanghälften erfolgen die Bohrungen mittels Pressbohrverfahren und auf den unteren Hälften mittels Spülbohrverfahren. Nach Herstellung der Vereisungs- und Messbohrungen werden diese sukzessive räumlich aufgemessen. Nach Fertigstellung werden die Gefrierlanzen mit dem Kältemedium Sole beschickt und dadurch der Eiskörper aufgebaut. Die Gefrieranlage und die Baustelleneinrichtungsflächen werden ausserhalb der Vereisungsschächte angeordnet. Der Energiebedarf der Gefrieranlage für den Aufbau und Unterhalt der Frostkörper wird auf ca. 17,00 Mio. kWh geschätzt.

Die thermischen Berechnungen für den Frostkörper berücksichtigen eine Grundwasserfließgeschwindigkeit bis zu 1,30 m/d. Unter den angesetzten Randbedingungen wurden Aufgefrierzeiten von ca. 50 Tagen mit einem ungefrorenen Kern von rund 9,00 m prognostiziert. Bei Filtergeschwindigkeiten von mehr als 1,50 m/d kann der Frostkörper voraussichtlich mit einer Gefrierrohrreihe (Abstand 1,0 m) nicht wasserdicht hergestellt werden, bzw. die Gefrierzeit für die Herstellung eines wasserdichten Frostkörpers wird deutlich ansteigen. Als Abhilfe kann auf der Anströmseite eine zweite Gefrierrohrreihe angelegt werden, oder es können alternativ auf der Anströmseite von der Oberfläche aus vertikale Gefrierbohrungen für eine Stickstoffvereisung ausgeführt werden. Beide Massnahmen bewirken eine Abkühlung des Grundwassers und führen somit zu schnellerem Gefrieren des Bodens. Die erforderliche Auslegung der Gefrierkon-

the assumed constraints, the freezing times are forecast at 50 days, with an unfrozen core of about 9.00 m. If the filter speeds are more than 1.50 m/d, the frozen body can probably not be made water tight or else the freezing time for the production of an appropriate frozen body would be greatly increased. If required, a second pipe can be installed on the flow side, or alternatively vertical freezing holes could be drilled from the surface for nitrogen freezing. Both measures would cause cooling of the groundwater and thus lead to more rapid freezing of the ground. The required arrangement of the freezing plant was at the stage of construction planning at the start of 2016.

The formation and maintenance of the frozen bodies is to be monitored by measuring temperature, water pressure, water quantity and brine temperature and flow. While the frozen body is being formed and later thawed, frost heave and thaw settlement of about 3.5 to 4.0 cm are to be expected. Deformations of the Rheintalbahn will therefore have to be continuously checked with automatic surveying above the freezing zones. In case any corrections are necessary to the trackbed (for example tamping), the appropriate machinery and materials will be kept ready so that corrections can be undertaken promptly.

For the mechanised tunnel drive inside the fully closed frozen body under the particular conditions of low settlement, various questions were discussed in the course of designing

struktionsplanung befand sich zu Beginn des Jahres 2016 in der Ausführungsplanung.

Der Aufbau sowie der Erhaltungsbetrieb des Frostkörpers werden durch Temperaturmessungen, Wasserdruckmessungen, Wassermengenmessungen sowie Soletemperatur- und Durchflussmessungen überwacht. Beim Aufgefrieren und späteren Abtauen sind Frosthebungen und Tausetzungen in der Größenordnung von 3,5 bis 4,0 cm zu erwarten. Die Verformungen der Rheintalbahn müssen deshalb über den Vereisungsbereichen durch automatische Lagemessungen kontinuierlich kontrolliert werden. Für gegebenenfalls erforderliche Oberbaukorrekturen (zum Beispiel Nachstopfen) werden die entsprechenden Geräte sowie Materialien vorgehalten und bei Bedarf Korrekturen kurzfristig durchgeführt.

Für den maschinellen Vortrieb innerhalb eines vollständig geschlossenen Eiskörpers unter der besonderen Prämisse eines verformungsarmen Vortriebs wurden im Zuge der TVM-Konzipierung verschiedene Fragestellungen diskutiert. Dabei galt es die folgenden maschinen- und verfahrenstechnischen Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- die Wärmeenergiebilanz der Vortriebsmaschine im Eiskörper – einerseits ein übermässiger Wärmeenergieeintrag durch die TVM mit der Folge von Auftaueffekten als Worst Case, andererseits ein Festfrieren von abgeschlossenen «kalten» Bereichen der Maschinenkonstruktion der TVM während Stillständen;
- das Aufstellen von Störfallszenarien mit Darstellung von Bewältigungsstrategien in Form von Verfahrens- und Arbeitsanweisungen, unter anderem bezüglich «Festfrieren und Wiederauffahrt» und «Hindernissbewältigung»;
- die Eignung der installierten Aggregate und eingesetzten Betriebs- und Schmierstoffe;
- der Werkzeugbesatz des Bohrkopfs und die Abbaubarkeit des Frostkörpers inklusive der Berücksichtigung von Vibrationsemissionen infolge Mixed-Face-Konditionen;
- der Mischungsentwurf für den Ringspaltmörtel unter Berücksichtigung der bauverfahrenstechnischen und beton-technologischen Aspekte – unter anderem Vermeidung freien Überschusswassers im Steuer- und Ringspalt.

Nach mehrfachen intensiven Diskussionen der vorher aufgeführten Fragestellungen und Aspekte unter Zugrundelegung dezidierter wärmetechnischer Berechnungen kann beispielhaft Folgendes festgestellt werden:

- Unter Beachtung von Zusatzmassnahmen kann die Gefahr eines grossflächigen Anfrierens der TVM sowie eines unzulässigen Auftauens des Eiskörpers weitestgehend ausgeschlossen werden. Diese Zusatzmassnahmen umfassen zum einen die Reduzierung der Umlaufmenge der Suspension zur Sicherstellung eines nur geringen Wärmeeintrags und zum anderen den Betrieb ausgewählter Aggregate zur Verhinderung eines Festfrierens.
- Als kritischer Bereich wurde die Schildschwanzdichtung identifiziert, da hier nur ein geringer Wärmeeintrag statt-

the TBM. The following aspects had to be considered regarding the machine and the process technology:

- the thermal energy balance of the TBM inside the frozen body, on the one hand excessive heat introduction by the TBM with a thawing effect as a worst case scenario, or on the other hand enclosed “cold” parts of the machine freezing solid and jamming during stoppages;
- the conception of mishap scenarios with strategies to overcome them in the form of process and working instructions including the scenarios “freezing solid and restarting” and “removal of obstructions”;
- the suitability of the installed equipment and the consumables and lubricants being used;
- the tools fitted to the cutting wheel and the cuttability of the frozen body including consideration of vibration resulting from mixed face conditions;
- the mix recipe for the annular gap grout taking into account the aspects of construction process and concrete technology, for example the avoidance of free excess water in the control and annular gaps.

After many intensive discussions of the questions listed above and with the assistance of appropriate thermal calculations, the following can be stated, for example:

- With the taking of additional measures, the danger of a large-scale freezing solid of the TBM can be largely ruled out. These additional measures include reduction of the circulation quantity of slurry to ensure only a small heat input and also the operation of machinery selected for the purpose to prevent freezing solid.
- The shield tail seal was identified as a critical point since there is only a small heat input here and thus freezing solid during a stoppage cannot be fully ruled out. With an arising bonding stress of 1 MN/m² and the limited surface area of the shield tail seal, the thrust presses should be large enough to ensure restarting in case of a part of the shield skin freezing solid.
- Due to the high through flow volume and the process heat, no negative effects of the temperature on the bentonite suspension are to be expected.
- According to the current state of knowledge, the use of shield tail sealants at temperatures below 0 °C does not lead to any impairment of function. Further information will be gained through a field test.
- Current planning for the material to fill the annular gap intends the use of single-component wet mortar with the addition of an accelerator in the form of calcium aluminates so that the hardening process is controlled and “free” drainage water in the annular gap is prevented or at least can be reduced.

In the course of further construction planning, process and working instructions will be produced to ensure high-quality tunnelling and lining. This includes for example regular temperature measurements in the shield and the determination of dependencies between time, temperature development and advance rate. Through the consideration of the stated

findet und somit ein Anfrieren bei Stillstand nicht ausgeschlossen werden kann. Mit einer entstehenden Verbundspannung von 1 MN/m^2 und der begrenzten Oberfläche im Bereich der Schildschwanzdichtung sind die Vortriebspressenkräfte ausreichend dimensioniert, um eine Weiterfahrt im Falle des Festfrierens eines Teils des Schildmantels sicherzustellen.

- Aufgrund der hohen Durchsatzvolumen und der Prozesswärme sind negative Auswirkungen der Temperaturen auf die Bentonitsuspension nicht zu erwarten.
- Gemäss derzeitigen Erkenntnissen führt der Einsatz von Schildschwanzdichtmasse bei Temperaturen unter 0°C nicht zu Funktionsbeeinträchtigungen. Weitergehende Informationen werden im Rahmen eines Feldversuchs gewonnen.
- Die aktuellen Planungen zum Ringspaltverfüllmaterial sehen einen einkomponentigen Nassmörtel mit Zugabe einer Beschleunigerkomponente in Form von Calciumaluminaten vor, sodass der Ansteifprozess gesteuert und «freies» Dränagewasser im Ringspalt verhindert bzw. reduziert werden kann.

Im Rahmen der weiteren Ausführungsplanung werden Verfahrens- und Arbeitsanweisungen zur Gewährleistung eines sicheren, qualitativ hochwertigen Vortriebs und Ausbaus aufgestellt. Dazu gehören beispielsweise die Sicherstellung von regelmässigen Temperaturmessungen im Schild sowie die Ermittlung der Abhängigkeiten zwischen Zeit, Temperaturentwicklung und Vortriebsgeschwindigkeit. Durch die Berücksichtigung der genannten speziellen Randbedingungen eines Vortriebs im Eiskörper und die entsprechenden maschinen- und verfahrenstechnischen Adaptionen kann die Unterquerung der Rheintalbahn mit einer TVM sicher beherrscht werden.

Wegen des oberflächennahen Grundwasserspiegels muss beim Tunnel Rastatt das Gefrierverfahren auch für die Erstellung aller neun Querschläge angewendet werden, da

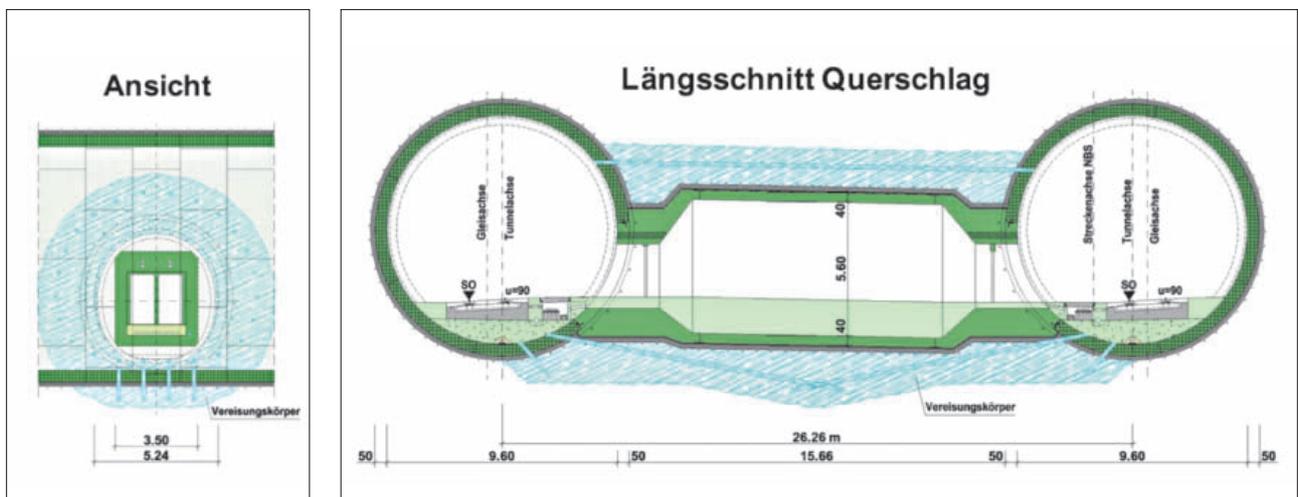
special conditions for driving through a frozen body, and the appropriate adaptations of the machinery and process technology, the crossing of the Rheintalbahn with a TBM can be successfully mastered.

Due to the shallow groundwater table, the ground freezing process will also have to be used for all nine cross passages at the Rastatt Tunnel, since they are all completely in the groundwater. The brine process will also be used for the freezing of the ground around the cross passages (Fig. 15).

The freezing holes will be drilled with the use of a preventer from both tunnel bores, so freezing plant will be needed in both bores. For the excavation work, a frozen body thickness of at least 1.50 m is required. The freezing pipes will be installed at a spacing of about 0.75 m from the excavation profile and arranged so that the maximum freezing pipe spacing of the horizontal borings for all cross passages is planned to be between 1.20 and 1.40 m. In the invert, the borings from both tunnels will have to be drilled at a slight angle to the horizontal for geometrical reasons in order to be able to form a closed frozen ring.

The planned arrangement of the freezing pipes will produce the required geometry of the frozen body in about 30 to 50 days so that excavation can proceed. After completion of the freezing process, the lances are withdrawn with grout being injected as they are withdrawn. The holes through the segments will be permanently filled.

The monitoring of the extent and temperature of the frozen body will also be undertaken here by measuring temperatures at various survey sections as well as the junctions to the segment tube. The electricity consumption of the freezing plant for the formation and maintenance of the nine frozen bodies is about 2.94 million kWh. The first freezing works (for the section under the Federbach lowlands) will start in 2016.



15 Geplante Vereisung der Querschläge im Tunnel Rastatt
Planned freezing for the cross passages in the Rastatt Tunnel

Quelle/credit: Bung AG

alle vollkommen im Grundwasser zu liegen kommen. Bei der Vereisung der ringförmigen Frostkörper um die Querschlüsse herum (Bild 15) wird ebenfalls das Soleverfahren angewendet.

Die Gefrierrohre werden mittels Preventerbohrungen von beiden Tunnelröhren aus hergestellt, wodurch Gefrieranlagen in beiden Tunnelröhren erforderlich werden. Für die Durchführung des Ausbruchs ist eine Frostkörperdicke von mindestens 1,50 m erforderlich. Die Gefrierrohre werden in einem Abstand von ca. 0,75 m vom Ausbruchrand angeordnet, wobei der maximale Gefrierrohrabstand der Horizontalbohrungen aller Querschlüsse planmässig zwischen 1,20 bis 1,40 m liegen wird. Im Sohlenbereich müssen die Bohrungen aus geometrischen Gründen aus beiden Tunnelröhren als leicht gegenüber der Horizontalen geneigte Schrägbohrungen ausgeführt werden, um einen geschlossenen Vereisungsring aufbauen zu können.

Bei der geplanten Gefrierrohranordnung ist die erforderliche Frostkörpergeometrie nach einer Gefrierdauer von etwa 30 bis 50 Tagen erreicht, um den Vortrieb durchzuführen. Nach Beendigung des Vereisungsprozesses werden die Gefrieranlagen gezogen und während des Ziehens verpresst. Die Bohröffnungen in den Tübbingröhren werden dauerhaft und ausschleudersicher verschlossen.

Die Überwachung von Ausdehnung und Temperatur der Frostkörper erfolgt auch hier mittels Temperaturmessungen in verschiedenen Messquerschnitten sowie an den Anschlussstellen an die Tübbingröhren. Der Energiebedarf der Gefrieranlage für den Aufbau und Unterhalt der neun Frostkörper beträgt ca. 2,94 Mio. kWh. Mit den ersten Vereisungsarbeiten (für die Unterquerung der Federbachniederung) wird im Jahr 2016 begonnen.

4 The Rastatt Tunnel – the First Large BIM Pilot Project for the Construction of a Rail Tunnel in Germany

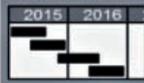
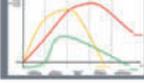
4.1 Recommendations of the Major Projects Reform Commission of the BMVI

Like every modern industrial nation, Germany needs major projects in order to keep industry competitive in the future. This applies to infrastructure projects to the same degree as for building projects. Out of the total German construction volume of about €330 billion (= 100%, data 2014), only 8.3 % is publicly funded civil engineering works. By far the largest part of the investment, 83 %, is for building, divided into residential building (55.6%), commercial building (21.6%) and public building (5.6%). The federal government invested €11 billion in transport routes in 2014, although with a slightly rising tendency. Considering these figures, it is not actually surprising that the subject of BIM has primarily been driven by the building industry.

Experience in recent years shows that many large projects were not in a position to maintain the agreed cost and time frames and sometimes not the required quality. In April 2013, therefore, the then federal Ministry of Transport, Construction and Town Development formed the Major Projects Reform Commission in order to ensure that public funds are efficiently used, citizens can develop more confidence in large projects and the international good reputation of the German building and consulting industry is preserved.

At the end of June 2015, the final report of the reform commission was completed. It included recommendations on the following themes [9]:

- cooperative design as a team;
- first design, then build;
- binding cost-effectiveness calculation;
- clear processes and responsibilities/competence centres;

	Bessere Planungsqualität Better design quality	<ul style="list-style-type: none"> ■ Kollisionsprüfungen, d.h. automatische Prüfung auf Widersprüche zwischen den Gewerken (3D-BIM) Clash detection, i.e. automatic check for inconsistencies between the trades (3D BIM) ■ Varianten- und Fertigungsanalysen vor Baubeginn Variants and analyses of constructability before start of construction
	Höhere Kostensicherheit/ Effizienzsteigerung Higher cost efficiency and efficiency improvement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Genauere, vollständige Mengen-/Kostendaten in frühen Projektphasen (4D-BIM) Exact and complete quantities / cost data in early projectphases (4D BIM) ■ Transparente Aktualisierung abgestimmter Kostenmodelle Transparent update of coordinated cost models
	Höhere Termsicherheit Better completion of deadlines	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bauablaufmodelle in abgestimmten, integrierten Terminmodellen (5D-BIM) Construction process defined in integrated time schedules (5D BIM) ■ Minimierung „vergessener Leistungen“ in Terminplänen Minimisation of forgotten tasks in schedules
	Akzeptanzsteigerung großer Infrastrukturprojekte Increase acceptance of major projects	<ul style="list-style-type: none"> ■ Visualisierung komplexer Gesamtzusammenhänge eines Bauwerks Visualisation of complex overall context of a construction ■ Durchführung von verschiedenen Variantenbetrachtungen Easy execution of studies of various alternatives
	Bessere Lebenszyklus- betrachtungen Better lifecycle analysis	<ul style="list-style-type: none"> ■ Frühe Energie- und CO₂-Bilanzanalysen und Betriebssimulation vor Baubeginn Early analysis of energy consumption, CO₂ footprint and operation simulation ■ Frühzeitige Übergabe der digitalen Baudokumentation Early delivery of the digital construction documentation

Quelle/credit: DB Netz AG

16 Generelle Zielsetzungen bei der Einführung von BIM bei der Deutschen Bahn
General aims of the introduction of BIM at German Railways

4 Der Tunnel Rastatt – das erste grosse BIM-Pilotprojekt beim Bau von Eisenbahntunneln in Deutschland

4.1 Empfehlungen der Reformkommission Bau von Grossprojekten des BMVI

Wie jede moderne Industrienation, benötigt Deutschland Grossprojekte, um mit seiner Wirtschaft auch in der Zukunft international wettbewerbsfähig zu sein. Dies gilt für die Infrastrukturbauten in gleichem Mass wie für den Hochbau. Vom gesamten deutschen Bauvolumen von rund 330 Mrd. EUR (= 100 %, Stand 2014) entfallen lediglich 8,3 % auf den öffentlichen Tiefbau, was einem Volumen von 27,4 Mrd. EUR entspricht. Der weitaus grösste Teil der Investitionen, nämlich beinahe 83 %, fliesst in den Hochbau, aufgeteilt in Wohnungsbau (55,6 %), gewerblichen Hochbau (21,6 %) und öffentlichen Hochbau (5,6 %). Der Bund in Deutschland veranschlagt für den Bau von Verkehrswegen per 2014 11 Mrd. EUR, jedoch mit derzeit deutlich steigender Tendenz. Bei diesen Zahlen ist es jedoch nicht verwunderlich, dass das Thema BIM bisher primär vom Hochbau getrieben war.

Die Erfahrung aus den letzten Jahren hat gezeigt, dass viele Grossprojekte nicht in der Lage waren, den vereinbarten Kosten- und Terminrahmen und teilweise auch die geforderte Qualität einzuhalten. Im April 2013 hat deshalb das damalige Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung die Reformkommission Bau von Grossprojekten gegründet, um sicherzustellen, dass öffentliche Mittel effizient verausgabt werden, die Bürgerinnen und Bürger ein stärkeres Vertrauen in Grossprojekte entwickeln können und damit auch der bis dahin international gute Ruf der deutschen Bau- und Planungswirtschaft gesichert bleibt.

Ende Juni 2015 wurde der Endbericht der Reformkommission abgeschlossen. Dieser enthielt zehn Empfehlungen zu den folgenden Themenkreisen [9]:

- kooperatives Planen im Team;
- erst planen, dann bauen;
- verbindliche Wirtschaftlichkeitsrechnung;
- klare Prozesse und Zuständigkeiten/Kompetenzzentren;
- stärkere Transparenz und Kontrolle;
- Risikomanagement und Erfassung von Risiken im Haushalt;
- Vergabe an den Wirtschaftlichsten, nicht den Billigsten;
- partnerschaftliche Projektzusammenarbeit;
- aussergerichtliche Streitbeilegung;
- Nutzung digitaler Medien – BIM.

Unter dem jetzigen Verkehrsminister Alexander Dobrindt bekam die Empfehlung zu BIM ab Herbst 2013 starken Aufwind, sah dieser doch die grosse Chance, mit der Anwendung von BIM einen wesentlichen Beitrag zur Stabilisierung von Grossprojekten zu leisten und mit dessen Einsatz mindestens Teilbereiche der anderen Empfehlungen günstig zu beeinflussen. Die Deutsche Bahn stellte dem Ministerium im Jahr 2014 zwei grosse Infrastrukturprojekte, nämlich den Bau der Filstalbrücke (Neubaustrecke Wendlingen–Ulm) und den Tunnel Rastatt zur Verfügung.

- stronger transparency and controls;
- risk management and recording of risks in the budget;
- award to the most economically beneficial, not the cheapest;
- project collaboration as partners;
- out-of-court dispute settlement;
- use of digital media – BIM.

Under the current transport minister Alexander Dobrindt, the recommendation for BIM received strong backing from autumn 2013, as he saw this as a good opportunity to make an essential contribution to the stabilisation of large projects through the use of BIM and with its use, be able to favourably influence at least some of the other recommendations. German Railway made two large infrastructure projects available to the ministry in 2014, specifically the building of the Filstal Bridge (new line from Wendlingen to Ulm) and the Rastatt Tunnel.

4.2 The BIM Pilot Project Rastatt Tunnel

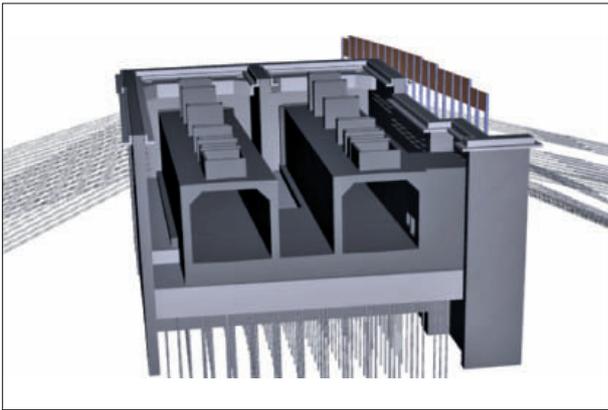
Since both DB pilot projects were shortly before or already under construction, the pilot trials can only cover part of the overall aims, which are to be achieved through the use of BIM in all phases of a project (Fig. 16).

The aims that are still achievable with the pilot projects are:

- improvement of project transparency by visualising the models for the tendered bills of quantities, visualisation of construction progress and optimisation of construction states;
- evaluation of the contribution of BIM to a more efficient project control for cost-effectiveness and observation of schedule and make a contribution to reducing variation orders;
- evaluation of the added value in maintenance and operation by forwarding information at the handover from construction to operation;
- collection of experience in the suitability for checking of performance reports, in the transparency of construction invoices and in the plausibility checking of the schedule with resource and performance data.

In March 2015, development of a BIM model for the Rastatt Tunnel was started parallel to classic design work. In close collaboration with the main contractor, a 3D model covering the entire structure of the tunnel has now been produced with descriptions of all object properties (Fig. 17). The linking of the geometrical 3D model with the associated schedule and cost elements results in a 5D model, with which construction sequences can be simulated and cost development can be determined over the project duration (Fig. 18).

DB have thus provided for the first time a fully-fledged 5D model for the structure of a complex tunnel project. This model currently administrates about 35,000 model elements just for the structure, which are linked with about 3,000 activities on the project schedule and about 3,500 items in the



Quelle/Credit: DB Netz AG

17 3-D-CAD-Modell des Portalbauwerks Nord mit den Druckentlastungsöffnungen gegen den Sonic-Boom-Effekt
3D CAD model of the north portal structure with pressure relief openings against the sonic boom effect

4.2 Das BIM-Pilotprojekt Tunnel Rastatt

Da beide Pilotprojekte der Bahn kurz vor oder bereits in der Ausführung standen, können die Pilotversuche nur einen Teil der übergeordneten Ziele abdecken, welche mit der Anwendung von BIM über alle Leistungsphasen zu erreichen sind (Bild 16).

Die mit den Pilotversuchen noch erreichbaren Ziele sind:

- Steigern der Projekttransparenz durch Visualisierung des Modells zu den ausgeschriebenen Leistungsverzeichnissen, Visualisierung der Bauabläufe sowie Optimierung der Bauzustände;
- Bewerten des Beitrags von BIM zu einer effizienteren Projektsteuerung für Wirtschaftlichkeit und Termintreue sowie Beitrag zur Reduktion der Nachträge;
- Bewerten des Mehrwerts bei Instandhaltung und Betrieb durch Informationsweitergabe beim Übergang vom Bauen zum Betreiben;
- Sammeln von Erfahrungen bei der Prüfbarkeit der Leistungsmeldungen, bei der Transparenz in den Bauabrechnungen und bei der Plausibilisierung des Terminplans durch Ressourcen- und Leistungshinterlegung.

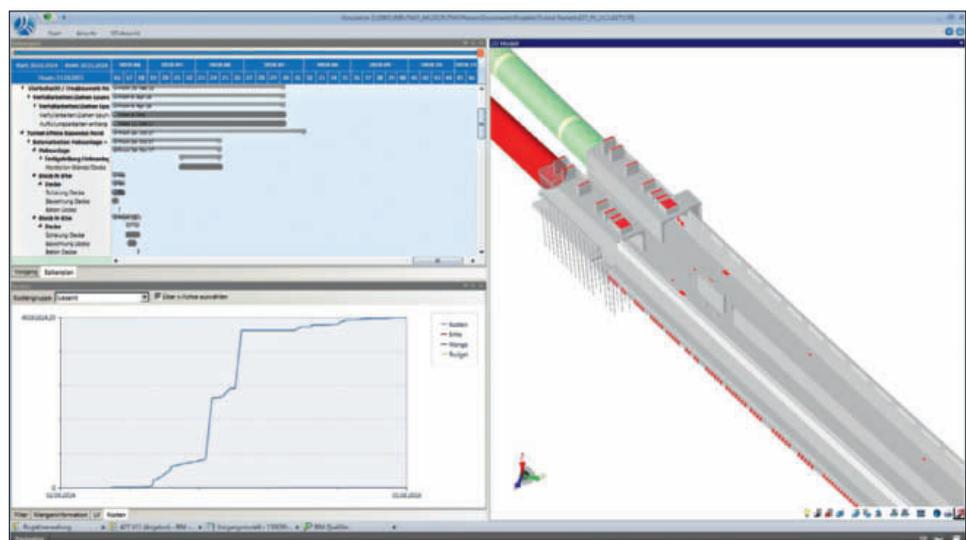
Im März 2015 wurde mit der Entwicklung eines BIM-Modells für den Tunnel Rastatt parallel zur klassischen Planung begonnen. In enger Zusammenarbeit mit dem Hauptunternehmer wurde mittlerweile ein den gesamten Rohbau des Tunnels umfassendes 3-D-Modell mit Beschreibung aller Objekteigenschaften erstellt (Bild 17).

bill of quantities. In a next phase, the railway equipment should also be integrated into the model.

In a next step, the tunnel lining and the railway equipment should also be linked to the BIM model in addition to the tunnel structure, with the aim of providing the operator on the day of handover with a comprehensive digital model of their new structure. This model should be available during the construction period to the contractor, the consultant and the site supervision team as a common working and information platform, and for the client as a holistic project control system. With scientific support, the effects of the BIM should be observed and assessed.

The BIM model of the Rastatt Tunnel is also linked to a digital ground model to enable deformation forecasts at the surface as a function of various parameters during the drive, such as advance rate and support pressure. In order to achieve this additional service, close collaboration has been entered with the Collaborative Research Center 837 "Interaction models for mechanised tunnelling" under the lead of the Ruhr University, Bochum. The first results should, if possible, be reported soon after the start of tunnelling. The example of the Wehrhahn Line in Düsseldorf encouraged DB to take the step to such a complex model in the hope of developing a powerful model for further inner-city projects such as for example the Munich's second core S-Bahn route.

In this sense, the Rastatt Tunnel is not only a key project for the construction challenges to be mastered but also for the application of BIM in tunnelling (Fig. 19). German Railways thus plan to set up a BIM competence centre based on the Karlsruhe–Basel project in Karlsruhe, which will collect the experience from their own pilot projects and make it available for further rail projects, and also for national and international standardisation efforts.



Quelle/Credit: RIB AG

18 Bildschirmfoto des 5-D-Modells des Portalbauwerks Nord; das 3-D-Modell ist hierbei mit dem Bauprogramm und der Soll-Kostenkurve verknüpft
Screenshot of the 5D model of the north portal structure; the 3D model is linked with the construction schedule and the planned cost curve

Durch die Verknüpfung des geometrischen 3-D-Modells mit den zugehörigen Termin- und Kostenelementen ergab sich ein 5-D-Modell, mit dem Bauabläufe simuliert und Kostenverläufe über die Projektlaufzeit ermittelt werden können (Bild 18).

Damit steht der Deutschen Bahn erstmalig ein vollwertiges 5-D-BIM-Modell für den Rohbau eines komplexen Tunnelprojekts zur Verfügung. In diesem Modell werden derzeit ungefähr 35 000 Modellelemente nur für den Rohbau verwaltet, welche mit etwa 3000 Aktivitäten des Terminprogramms und ca. 3500 Positionen des Leistungsverzeichnisses verknüpft sind. In einer nächsten Phase soll auch noch die bahntechnische Ausrüstung in das Modell integriert werden.

In einem nächsten Schritt soll nebst dem Rohbau auch der Tunnelausbau und die bahntechnische Ausrüstung mit dem BIM-Modell verknüpft werden, mit dem Ziel, dem Betreiber am Tag der Übernahme des Tunnels ein umfassendes digitales Modell seines neuen Bauwerks bereitzustellen. Dieses Modell soll während der Bauzeit dem Unternehmer, dem Planer und dem Bauüberwacher als gemeinsame Arbeits- und Informationsplattform und dem Bauherrn als ganzheitliches Projektsteuerungssystem zur Verfügung stehen. Mit einer wissenschaftlichen Begleitung sollen die Effekte des BIM-Einsatzes beobachtet und ausgewertet werden.

Das BIM-Modell des Tunnels Rastatt wird zusätzlich mit einem digitalen Baugrundmodell derart verknüpft, dass Deformationsprognosen an der Oberfläche in Funktion verschiedenster Parameter der Schildfahrt, wie Vortriebsgeschwindigkeit und Stützdruck, ermöglicht werden sollen. Um diese Zusatzleistung realisieren zu können, ist eine enge Zusammenarbeit mit dem Sonderforschungsbereich 837 «Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau» unter Leitung der Ruhr-Universität Bochum angelaufen. Von den ersten Resultaten soll, wenn möglich, schon bald nach dem Vortriebsbeginn berichtet werden. Das Beispiel Wehrhahn-Linie in Düsseldorf ermutigte die Deutsche Bahn, den Schritt zu einem so komplexen Modell zu wagen, in der Hoffnung, ein leistungsfähiges Werkzeug für weitere Projekte im innerstädtischen Bereich, wie zum Beispiel für die zweite Stammstrecke in München, zu entwickeln.

In diesem Sinne ist der Tunnel Rastatt nicht nur von der verkehrlichen Aufgabenstellung und den zu meisternden baulichen Herausforderungen ein Schlüsselprojekt, sondern auch in Sachen BIM-Anwendung für Tunnelbauten (Bild 19). Die Deutsche Bahn plant deshalb, rund um das Projekt Karlsruhe–Basel in Karlsruhe ein BIM-Kompetenzzentrum aufzubauen, welches die Erfahrungen aus den eigenen Pilotprojekten sammelt und sie den weiteren Bahnprojekten, aber auch den nationalen und internationalen Standardisierungsbemühungen zur Verfügung stellt.



Quelle/Credit: DB System GmbH

19 Der Tunnel Rastatt im virtuellen Modell «zuerst digital gebaut – dann real!»

The Rastatt Tunnel in the virtual model "first built digitally – then real!"

Literatur/References

- [1] Vereinbarung zwischen dem Vorsteher des Eidgenössischen Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartements und dem Bundesminister für Verkehr der Bundesrepublik Deutschland zur Sicherung der Leistungsfähigkeit des Zulaufes zur neuen Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT) in der Schweiz, 6. September 1996
- [2] Eisenbahn Bundesamt (EBA), Richtlinie Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln vom 1. Juli 1997 (Anpassung per 1. Juli 2008)
- [3] Die Aus- und Neubaustrecke Karlsruhe–Basel, Verkehrsachse für Europa, Daten und Fakten, Deutsche Bahn AG, 2012
- [4] Grundhoff, Thomas; Klar, Sascha Björn: ABS/NBS Karlsruhe–Basel – Realisierung des Streckenabschnitts 1 und Besonderheiten beim Bau des Rastatter Tunnels, Geomechanics and Tunneling, 2015
- [5] DB Netz AG; Aus- und Neubaustrecke Karlsruhe–Basel, Rohbau Tunnel Rastatt, Projektpräsentation Info-Center Tunnel Rastatt, 10/2015
- [6] Richter, Michael et al.: Bahntunnel Rastatt: Schildvortrieb mit Vereisungsstrecken bei geringer Überdeckung, STUVA-Tagung, 2013
- [7] Müller, Benno: Bodenvereisung als temporäre Bauhilfsmassnahme – Praxisbeispiele, Kolloquium Bauhilfsmassnahmen im Tunnelbau, ETZ Zürich, 13. Dezember 2012
- [8] <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/202210/umfrage/struktur-des-bauvolumens-nach-nachfragebereichen-in-deutschland/Abfrage> 24. Januar 2016
- [9] Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur, Reformkommission Bau von Grossprojekten, Endbericht, Berlin 2015
- [10] Europäische Union (EU), Verordnung Nr. 1303/2014 der Kommission über die technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der «Sicherheit in Eisenbahntunneln» im Eisenbahnsystem der Europäischen Union, 18. November 2014
- [11] Grundhoff, Thomas; Edelhoff, Dennis: Tunnel Rastatt: Hohe Anforderungen an den maschinellen Tunnelbau, Tunnel, 1/2016