

Eppenberg Tunnel: Soft Ground Drive and Inner Lining

Eppenbergtunnel: Lockergesteinsvortrieb und Innenausbau

On the Berne-Olten-Zurich railway line in Switzerland, the stretch between Gretzenbach and Wöschnau, which is the sole remaining twin-track section, forms a bottleneck. This situation is to be rectified by late 2020 by widening the line between Olten and Aarau to provide four tracks. This upgrade will increase the route's availability and capacity as well as it will attain more flexibility. We reported on the 3.1 km long Eppenberg Tunnel in issue 8/2017 of tunnel. This article thus merely provides a brief summary of the overall project and concentrates on the findings obtained from the construction sections already completed as well as the current status.

Auf der Schweizer Bahnstrecke Bern–Olten–Zürich bildet derzeit der Bereich von Gretzenbach bis Wöschnau, als einziger noch doppelspuriger Abschnitt, einen Engpass. Dieser soll mit dem Vierspurausbau zwischen Olten und Aarau bis Ende 2020 aufgehoben werden, um somit die Verfügbarkeit und die Kapazität der Strecke zu erhöhen und mehr Flexibilität zu erreichen. Bereits in tunnel 8/2017 haben wir über den 3,1 km langen Eppenbergtunnel berichtet. Der vorliegende Artikel gibt daher nur einen kurzen Überblick über das Gesamtprojekt und konzentriert sich auf die Erfahrungen aus den bisher fertiggestellten Bauabschnitten sowie auf den aktuellen Stand der Arbeiten.

Dipl.-Ing. Heiko Atzbacher, Eppenberg Tunnel Client's Chief Construction Manager/Chefbauleiter Eppenbergtunnel, ILF Beratende Ingenieure AG, Zürich, Switzerland/Schweiz

Dipl.-Ing. Nathaniel Coupy, Tunnel Construction Client's Manager/Bauleiter Tunnel, ILF Beratende Ingenieure AG, Zürich, Switzerland/Schweiz

Dipl.-Ing. Stephan Eitel, Technical Service/Head of slurry mode for Eppenberg Tunnel/Technischer Innendienst/Leiter Nassvortrieb Eppenbergtunnel, Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Tunnelling Division, Frankfurt, Germany/Deutschland

Dipl.-Bau-Ing. Gabriele Pagliari, Client Section Manager/Abschnittsleiter Bauherr, SBB AG, Infrastruktur, Multiprojekte Olten, Switzerland/Schweiz

The railway line between Olten and Aarau is located on the main route between the cities of Berne and Zurich. On account of high demand for both passenger and goods traffic, the SBB is upgrading this link. The route is being widened from two to four tracks in order to increase capacity. As the existing route cannot be upgraded within the communities located along it owing to a lack of space, a twin-track rail tunnel is required through the Eppenberg. Once the contract was awarded, construction work started in 2014. Apart from the main tunnel, which is connected to the surface infrastructure by means of two evacuation shafts as well as an escape tunnel, two cut-and-cover tunnels are needed to link the main tunnel with the existing rail network in an optimal manner. As a result, a roughly 0.5 km long single-track tunnel is being produced in Wöschnau and a 270 m long ramp structure in Gretzenbach. Once construction is completed the Eppenberg Tunnel will be 3.1 km long. 2.6 km of this total had to be driven by means of a tunnel boring machine (TBM). The remainder of the tunnel is built by cut-and-cover.

Tunnel Drive with TBM

The drive for the mined tunnel commenced at the east portal in Wöschnau. Towards this end, a huge excavation pit was created in advance. In order to withstand the massive pressure from the slope around 2400 rock bolts had to be used to secure the pit. As the initial section of the main tunnel runs through soft ground with shallow

Die Bahnstrecke zwischen Olten und Aarau liegt in der Hauptverkehrsachse zwischen den Großstädten Bern und Zürich. Aufgrund der hohen Nachfrage sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr baut die SBB diese Verbindung aus. Um die Kapazität zu erhöhen, muss die Strecke von zwei auf vier Spuren erweitert werden. Da die bestehende Trasse aus Platzmangel in den Ortschaften entlang der Strecke nicht ausgebaut werden kann, ist ein doppelspuriger Bahntunnel durch den Eppenberg erforderlich. Mit den Bauarbeiten konnte nach der Auftragsvergabe im Jahr 2014 begonnen werden. Neben dem Haupttunnel, der über zwei Rettungsschächte sowie einen Rettungsstollen mit der Oberflächeninfrastruktur verbunden ist, sind zur optimalen Anbindung des Tunnels an das bestehende Streckennetz zwei Tagbautunnel erforderlich. So werden in Wöschnau ein rund 0,5 km langer Einspurtunnel und in Gretzenbach ein 270 m langes Rampenbauwerk erstellt. Der Eppenbergtunnel wird nach Abschluss der Bauarbeiten eine Gesamtlänge von 3,1 km haben. Davon waren 2,6 km mit einer Tunnelbohrmaschine (TBM) aufzufahren. Der restliche Tunnel wird in offener Bauweise erstellt.

Tunnelvortrieb mit TBM

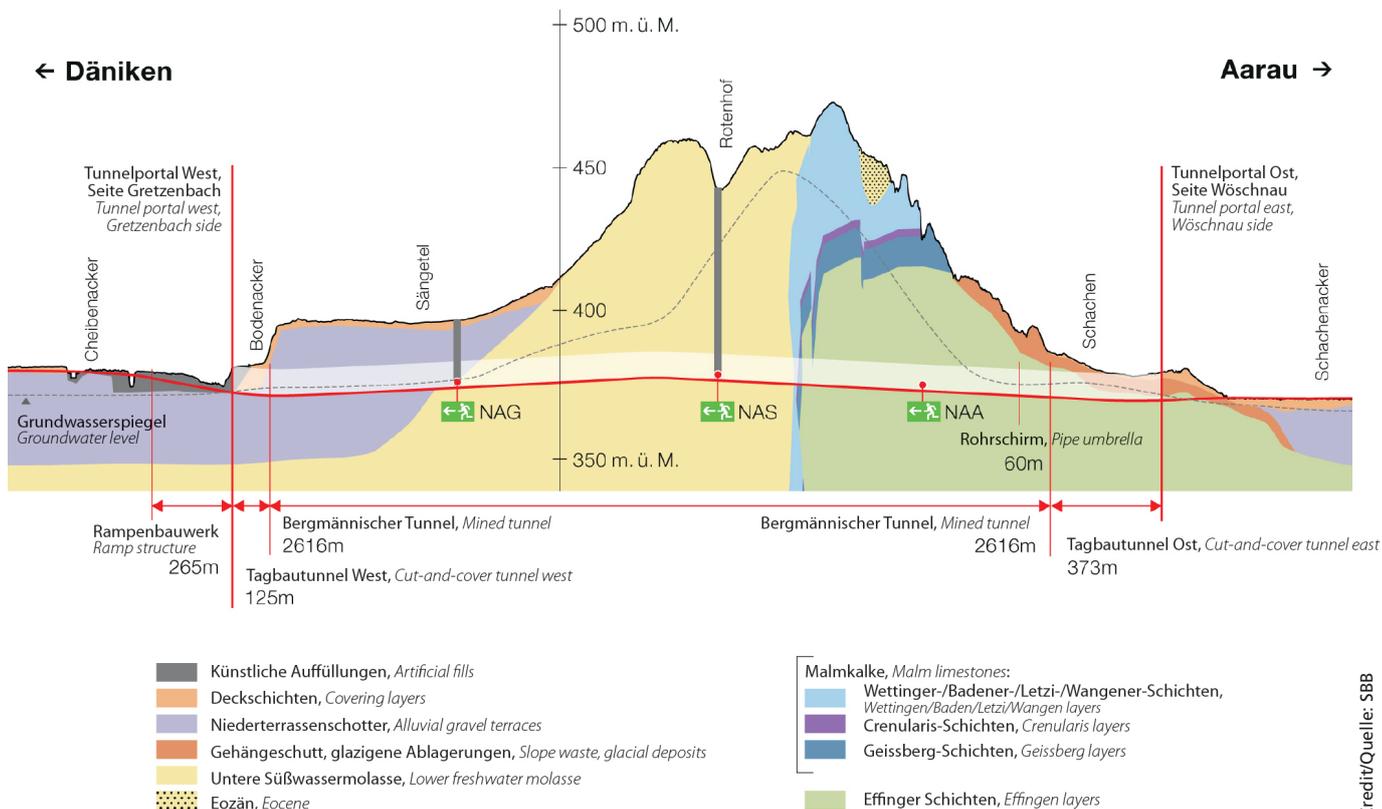
Der Vortrieb für den bergmännischen Tunnel wurde am Ostportal in Wöschnau begonnen. Dort wurde vorgängig eine gewaltige Baugrube ausgehoben. Um dem enormen Hangdruck standzuhalten, musste diese mit etwa 2400 Ankern gesichert werden. Da der erste Abschnitt des Streckentunnels durch loses, für einen maschinellen Vortrieb ungeeignetes Material mit wenig Überdeckung führt, kam die TBM nicht von Beginn an zum

overburden, which is unsuitable for a mechanised drive, the TBM could not be applied at first. As a consequence, the first 60 m of tunnel had to be produced by conventional means using the pipe umbrella method. In the process, the tunnel cross-section was excavated via drill+blast protected by the advance pipe umbrella. Once sufficient overburden in load-bearing ground prevailed, the TBM was installed in the starting cavern, which until then had been reserved for the drill+blast logistics.

A convertible Mixshield TBM was selected to produce the Eppenberg Tunnel on account of the changing geology (please see tunnel 08/2017). This was suitable for driving in rock (dry excavation) as well as soft ground (wet excavation using the hydro-shield mode). The 115 m long and 2400 t heavy tunnelling machine possessed a 12.79 m boring diameter. The machine's core was the 234-t heavy cutting wheel, driven by ten powerful electric motors. After a 3-month long assembly period, driving operations started in January 2017.

The Eppenberg Tunnel was lined with 2 m wide segments, which were installed ring-by-ring protected by the TBM shield. In the dry excavation section, where the 30 cm thick Swiss stack segment was used, the ring segments in the

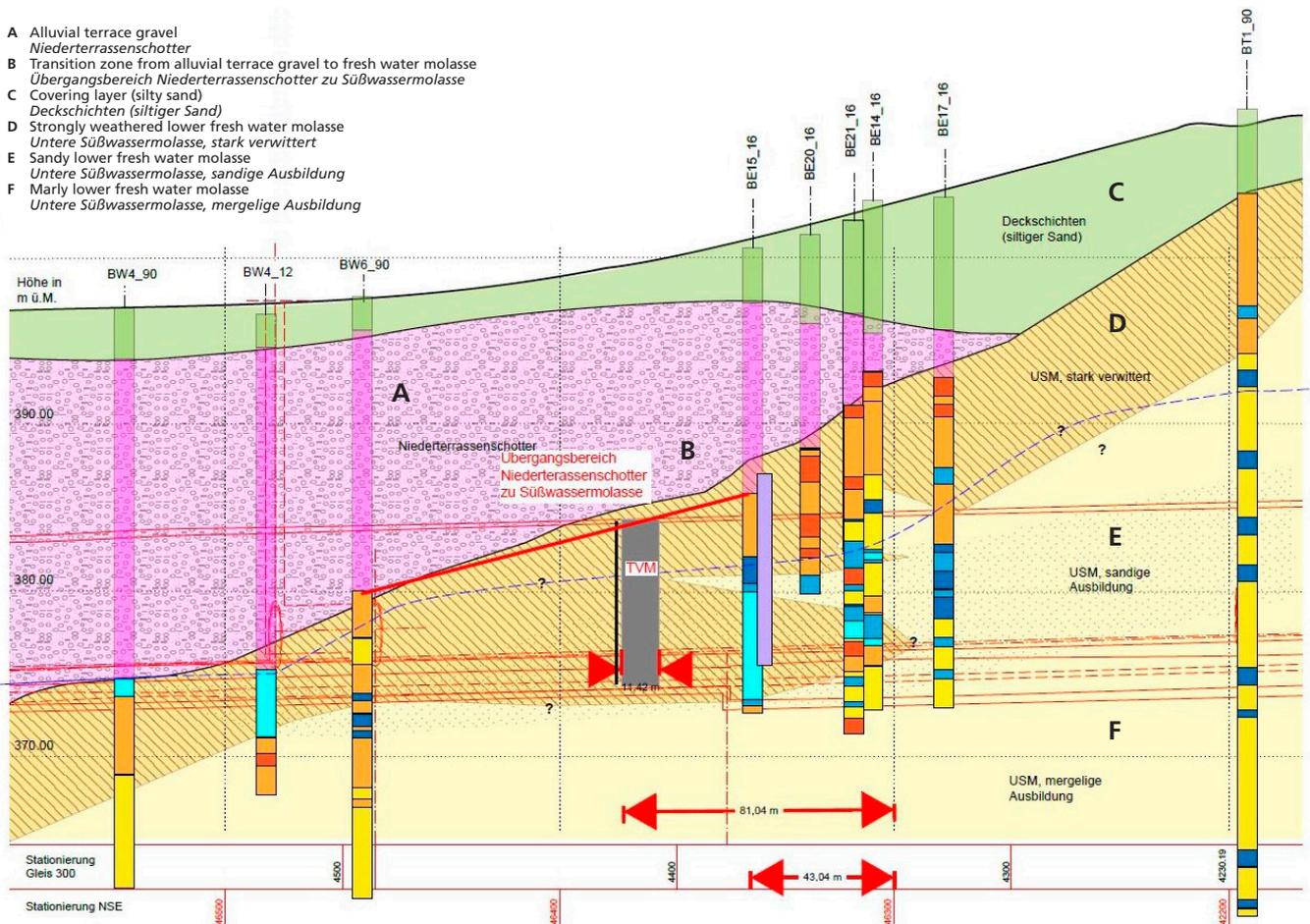
Einsatz. Die ersten 60 Tunnelmeter mussten daher konventionell im Rohrschirmverfahren erstellt werden. Dabei wurde der Tunnelquerschnitt im Schutze des vorauselenden Rohrschirmes im Sprengvortrieb ausgebrochen. Nachdem eine ausreichende Überdeckung im tragfesten Gestein erreicht wurde, begann die Installation der TBM in der Startbaugrube, welche bis dahin für die Logistik des Sprengvortriebs freigehalten werden musste. Für den Bau des Eppenbergtunnels wurde aufgrund der wechselnden Geologie (siehe tunnel 08/2017) eine umbaubare Mixschild-TBM gewählt. Diese eignet sich sowohl für Vortrieb im Fels (Trockenvortrieb) als auch im Lockergestein (Nassvortrieb im Hydroschildmodus). Die 115 m lange und 2400 t schwere Vortriebsanlage hatte einen Bohrdurchmesser von 12,79 m. Herzstück der Maschine war das 234 t schwere Schneidrad, welches über zehn leistungsstarke Elektromotoren angetrieben wurde. Nach einer Montagezeit von drei Monaten konnten die Vortriebsarbeiten im Januar 2017 aufgenommen werden. Die Ausbruchsicherung des Eppenbergtunnels erfolgte mit 2 m breiten Tübbing, die im Schutz des Schildes der TBM ringweise eingebaut wurden. Im Bereich des Trockenvortriebs, wo der Schweizer Stapeltübbing mit einer Dicke von 30 cm zum Einsatz kam, wurden die Ringsegmente im unteren Tunnelquerschnitt mit Mörtel hinterpresst und im oberen Tunnelquerschnitt mit



1 Geological longitudinal section of the Eppenberg Tunnel
Geologischer Längsschnitt des Eppenbergtunnels

Credit/Quelle: SBB

- A Alluvial terrace gravel
Niederterrassenschotter
- B Transition zone from alluvial terrace gravel to fresh water molasse
Übergangsbereich Niederterrassenschotter zu Süßwassermolasse
- C Covering layer (silty sand)
Deckschichten (siltiger Sand)
- D Strongly weathered lower fresh water molasse
Untere Süßwassermolasse, stark verwittert
- E Sandy lower fresh water molasse
Untere Süßwassermolasse, sandige Ausbildung
- F Marly lower fresh water molasse
Untere Süßwassermolasse, mergelige Ausbildung



2 Geological longitudinal section in transition area from rock to soft ground
Geologischer Längsschnitt im Übergangsbereich von Fels zu Lockergestein

lower tunnel cross-section were grouted with mortar; the upper cross-section was backfilled with pea gravel. In the wet excavated section, the entire segmental ring, which was also 30 cm thick and concreted with EPDM sealing gaskets, was grouted with mortar. Backfilling the annular gap (the space between the edge of the excavation and segment) assures the ring remains in its proper position and minimises the settlements in the ground located above. The reinforced concrete segments were produced in the segment plant belonging to the JV partner Marti in Balsthal, located only some 40 km away; they were transported to the site by rail.

Dry Excavation

The first mechanised drive part-section initially passed through Jurassic marl and limestone (Fig. 1) and subsequently through freshwater molasse so that the TBM could be operated in dry mode.

In the process, the rock excavated by the cutting wheel fitted with 17" discs was transported by belt conveyor to the intermediate storage point on the site installation

Perkies hinterfüllt. Im Bereich des Nassvortriebs wurde der gesamte, ebenfalls 30 cm dicke Tübbingring, der im Nassbereich mit einbetonierten EPDM-Dichtungsprofilen ausgerüstet ist, rundum mit Mörtel hinterpresst. Die Auffüllung des Ringspaltes (Spalt zwischen Ausbruchrand und Tübbing) garantiert die Lagegenauigkeit des Ringes und minimiert zudem die Setzungen des darüber liegenden Bodens. Die Stahlbetontübbinge wurden im nur etwa 40 km entfernten Tübbingwerk von ARGE-Partner Marti in Balsthal hergestellt und per Bahn zur Baustelle transportiert.

Trockenvortrieb

Die erste Teilstrecke des maschinellen Vortriebs führte zunächst durch die Mergel- und Kalksteine des Jura (Bild 1) und danach durch die untere Süßwassermolasse, weshalb die TBM im Trockenmodus betrieben werden konnte.

Dabei wurde das vom mit 17"-Disken besetzte Schneidrad abgebaute Gestein mittels Förderband zur Zwischendeponie auf der Baustelleneinrichtungsfläche in Wöschnau transportiert. Die Juraschichten wurden zwischengelagert und konnten später für Hinterfüllungen direkt auf der Baustelle wiederverwendet

yard at Wöschnau. The Jurassic layers were temporarily stored and could subsequently be used directly on-site for backfilling purposes. The excavated molasse material was unsuitable for being recycled on-site so that it was transported to the redeveloped special waste landfill at Kölliken.

During the dry excavation, the TBM was not yet operated continuously – as was subsequently the case during wet mode – but ran only from Mondays to Fridays during the day shift. In the process, the intended rates of advance of 100 m per week were regularly achieved.

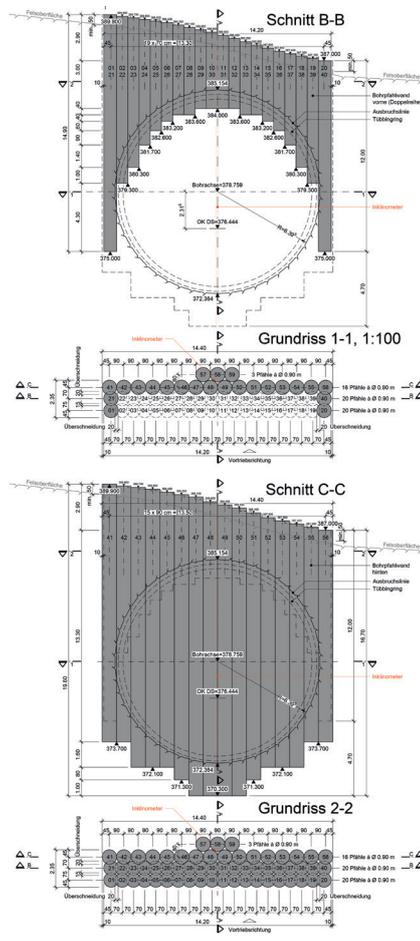
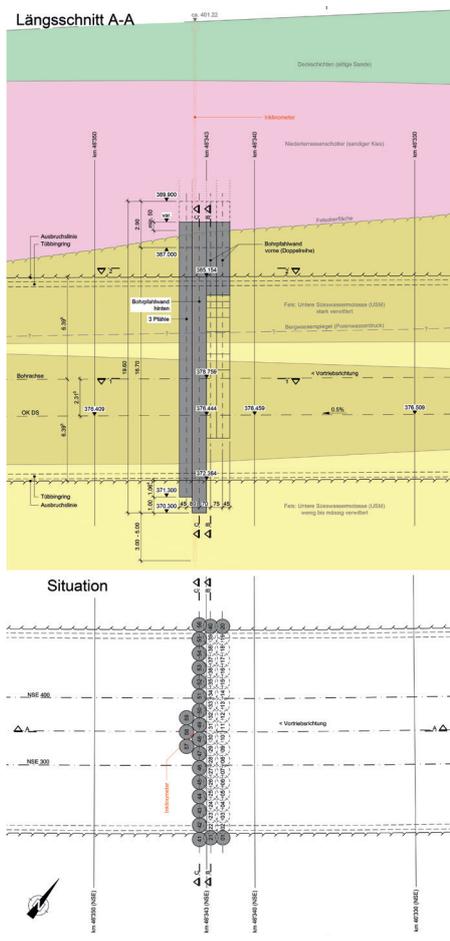
Conversion Phase

After tunnelling 1800 m, the TBM reached the transition zone between the molasse and the alluvial terrace gravel in June 2017. Thereafter, the tunnel route no longer passed through rock but soft ground. In addition, parts of the tunnel cross-section were located beneath the groundwater level in the following tunnelling section. Thus, the TBM had to be converted to wet mode. In order

werden. Das abgebaute Molassegestein eignete sich nicht zur Weiterverwendung auf der Baustelle, es konnte jedoch in der sanierten Sondermülldeponie in Kölliken deponiert werden. Während des Trockenvortriebs wurde die TBM noch nicht – wie später in Nassvortrieb – im Umlaufbetrieb, sondern nur montags bis freitags jeweils während der Tagschicht betrieben. Hierbei konnten die vorgesehenen Leistungen von 100 m pro Woche regelmäßig erreicht werden.

Umbauphase

Nach 1800 m Vortrieb erreichte die TBM im Juni 2017 die Übergangszone zwischen der Molasse und dem Niederterrassenschotter. Die Tunnelstrecke verlief im Folgenden nicht mehr im Fels, sondern im Lockergestein. Desweiteren befanden sich im nächsten Vortriebsabschnitt Teile des Tunnelquerschnittes unter dem Grundwasserspiegel. Folglich musste die TBM für den Nassvortrieb umgebaut werden. Um die Umbauposition zu optimieren, wurden schon während des Trockenvortriebs im Bereich der Umbauposition zusätzliche Erkundungsbohrungen durchgeführt. Die dabei erkundete Geologie sprach für



Credit/Quelle: SBB | IG Rapid

3 Geometry of underground conversion station
Geometrie des unterirdischen Umbaubahnhofs



Credit/Quelle: Wayss & Freytag

2017-08-14 10:00

4 Separation plant on the site installation yard
 Separationsanlage auf der Baustelleneinrichtungsfläche

to optimise the position for the conversion, additional exploratory drilling was already undertaken during dry mode to detect the best position. The geology that was investigated indicated that the wet excavation section in the molasse should be reduced. However, the transition zone from the rock to the soft ground (**Fig. 2**) turned out to be too instable so that the natural working face during the conversion phase was estimated to be unstable without additional measures.

At short notice, a conversion station was planned for this area, which could be produced by installing overlapping bored pilings from the arable terrain located above, prior to the arrival of the TBM (**Fig. 3**).

The previously selected setup for converting the TBM turned out to be suitable. Once the TBM had reached the conversion position on June 8, 2017, the cutterhead with extended cutting wheel displacement was driven some 20 cm into the bored pile wall and at the same time the shield tail came to a standstill exactly 5 cm in front of the last dry ring to be installed.

Once the TBM had been positioned exactly in the bored pile wall, the team on-site commenced with the conversion phase, which was scheduled to last only eight weeks. This signified a reduction of the previously planned conversion phase by five weeks. A sporting target – which, however, could be achieved under safe conditions, by decoupling the time-sensitive conversion work within the tunnel tube (such as e.g. disassembling the tunnel conveyor and

eine Reduktion der Nassvortriebsstrecke in der Vollmolasse. Der Übergangsbereich vom Fels in das Lockergestein (**Bild 2**) erschien jedoch zu instabil, so dass die natürliche Ortsbrust während der Umbauphase ohne Zusatzmaßnahmen als nicht standsicher eingeschätzt wurde.

Kurzerhand wurde für diesen Bereich ein Umbaubahnhof geplant, der schon vor Ankunft der TBM durch das Einbringen überschnittener Bohrpfähle von der darüber liegenden Landwirtschaftsfläche aus hergestellt werden konnte (**Bild 3**).

Die vorab gewählte Stationierung für den Umbau der TBM erwies sich als geeignet. Nachdem die TBM am 8. Juni 2017 die Umbauposition erreicht hatte, war der Bohrkopf mit ausgefahrener Schneidradverschiebung ca. 20 cm in die Bohrpfahlwand eingefahren während gleichzeitig der Schildschwanz mit Bürstendichtung exakt 5 cm vor dem letztgebauten Trockenring zum Liegen kam.

Nachdem die TBM präzise in die Bohrpfahlwand hineinfahren war, begann die vom Baustellenteam auf nur acht Wochen Dauer angesetzte Umbauphase. Das bedeutete eine Reduktion der vorab geplanten Umbauphase um fünf Wochen. Ein sportliches Ziel – das aber unter sicheren Bedingungen erreicht werden konnte, indem die zeitkritischen Umbauarbeiten innerhalb der Tunnelröhre, wie z. B. die Demontage des Tunnelbandes und die Montage der Pumpen und Kompressoren, durch versetzte Arbeitszeiten von den Umbauarbeiten der TBM entkoppelt wurden.

Die schon während des Trockenvortriebes begonnene Montage der Separationsanlage außerhalb des Tunnels wurde aufgrund

assembling the pumps and compressors) from the TBM conversion activities thanks to staggering working times. The assembly of the separation plant outside the tunnel, which already started during the dry excavation also became a time-sensitive issue on account of the conversion phase being shortened. For this reason, the assembly cycle had to be optimised here as well. Thanks to outstanding work preparation and optimal scheduling, it was possible to resume tunnelling on August 6, 2017, earlier than originally planned. Prior to this, assembly of the separation plant, conversion of the slurry circuit and conversion of the machine were completed.

A substantial team was assembled, given a medical check-up and extensively trained for the predicted compressed air operations during the conversion phase as preparation for the forthcoming wet excavation activities. This also included specialist compressed air doctors on stand-by, who were to be ferried to the site at short notice by the Rega Flugbereitschaft air service should an incident occur.

der Verkürzung der Umbauphase ebenfalls zeitkritisch. Deshalb musste auch hier der Montageablauf optimiert werden. Durch eine hervorragende Arbeitsvorbereitung und eine optimierte Ablaufplanung konnte der Vortrieb bereits am 6. August 2017, früher als ursprünglich geplant, wiederaufgenommen werden. Zuvor waren Separationsanlagenmontage, Förderkreislaufumbau und Maschinenumbau nahezu zeitgleich zum Abschluss gebracht worden.

Als Vorbereitung für die Nassvortriebsarbeiten wurden schon während der Umbauarbeiten ein umfangreiches Team für die prognostizierten Druckluftarbeiten zusammengestellt, ärztlich untersucht und umfangreich geschult. Dazu gehörten auch acht Druckluftärzte im Bereitschaftsdienst, die im Ereignisfall von der Rega Flugbereitschaft kurzfristig zur Baustelle gebracht werden sollten.

Nassvortrieb

Beim Nassvortrieb im Hydroschildverfahren war der vordere Teil der TBM abgeschottet und stand unter Druck. Zusätzlich befand sich im Bohrkopf nun die Bentonitsuspension. Das Gemisch aus Tonmineralien und Wasser mit thixotropen Eigenschaften diente



Credit/Quelle: Marti Dienstleistungen AG | Glauser

5 TBM after breakthrough in the Gretzenbach target shaft
TBM nach Durchschlag in den Zielschacht Gretzenbach

Wet Excavation

For the wet excavation using the hydro-shield method, the TBM's front part was sealed off and subjected to compressed air. In addition, the cutterhead was filled with bentonite suspension. The mix consisting of clay minerals and water with thixotropic properties served on the one hand, as a support agent and on the other, as a means of conveyance for the muck. The pressurised bentonite suspension penetrated the surrounding material and by doing so displaced the groundwater while supporting the working face so that settlements on the surface were confined to a minimum. The excavated material was mixed with the suspension, pumped off and transported through the discharge line to the separation plant with an installed throughput of 2400 m³/h (Fig. 4). The separation plant, constituting a system with one coarse screen and eight fine screens, was located on the installation yard outside the tunnel together with the storage tanks for fresh concrete. The excavated material was separated from the bentonite in a multi-stage process so that the bentonite could be returned to the conveyor line. The tanks for the used suspension as well as the chamber filter presses needed for dewatering were also set up on the installation yard.

einerseits als Stützmittel und andererseits als Fördermittel für das Ausbruchsmaterial. Die unter Druck stehende Bentonitsuspension drang in das Umgebungsmaterial ein, verdrängte dabei das Grundwasser und stützte die Ortsbrust, um Setzungen an der Oberfläche zu minimieren.

Das Ausbruchsmaterial wurde mit der Suspension vermischt, abgepumpt und durch die Förderleitung zur Separationsanlage mit einem installierten Umlaufvolumen von 2400 m³/h transportiert (Bild 4). Diese aus einer Grobsieb- und acht Feinsiebanlagen bestehende Separationsanlage befand sich zusammen mit den Lagertanks für Frischbentonit auf der Installationsfläche außerhalb des Tunnels. Hier wurde das Ausbruchsmaterial in einem mehrstufigen Vorgang wieder vom Bentonit getrennt, das dann erneut in den Förderkreislauf eingeleitet werden konnte. Auch die Altsuspensionstanks sowie die zum Entwässern benötigten Kammerfilterpressen wurden auf der Installationsfläche untergebracht.

Da der Bohrquerschnitt im Bereich des Umbaubahnhofs noch voll in der unteren Süßwassermolasse lag, begann der Nassvortrieb in der prozesstechnisch schwierigsten Phase. Die schälend abgebaute Süßwassermolasse war erwartungsgemäß wasserlöslich. Der abgebaute Boden quoll im Förderkreislauf neben seiner natürlichen Suspension auch unter dem mechanischen

As the excavated cross-section around the conversion station was still completely located in the Lower Fresh Water Molasse, the wet excavation commenced in what was the most difficult phase in technical terms. The Fresh Water Molasse removed by cutting was soluble in water as expected. The extracted soil swelled in the conveyor line under the mechanical influence of the discharge pumps in addition to its natural suspension and disintegrated into its ultra-fine components. It was only possible to restrict the continuous charging of the circulating suspension with ultra-fine material by an above average exchange of the bentonite suspension. This resulted in a very low rate of advance at the start of the wet excavation quite apart from leading to the cutterhead clogging substantially. Only after the Aare Gravels increasingly entered the tunnel from above, it was possible to increase the rate of advance continuously. However, at the same time, the risk of surface settlements became greater. The coarse Aare Gravels revealed increased susceptibility to water and were highly abrasive so that regular tool checks had to be undertaken under compressed air. The filter cake structure caused by the standard suspension, however, failed to provide

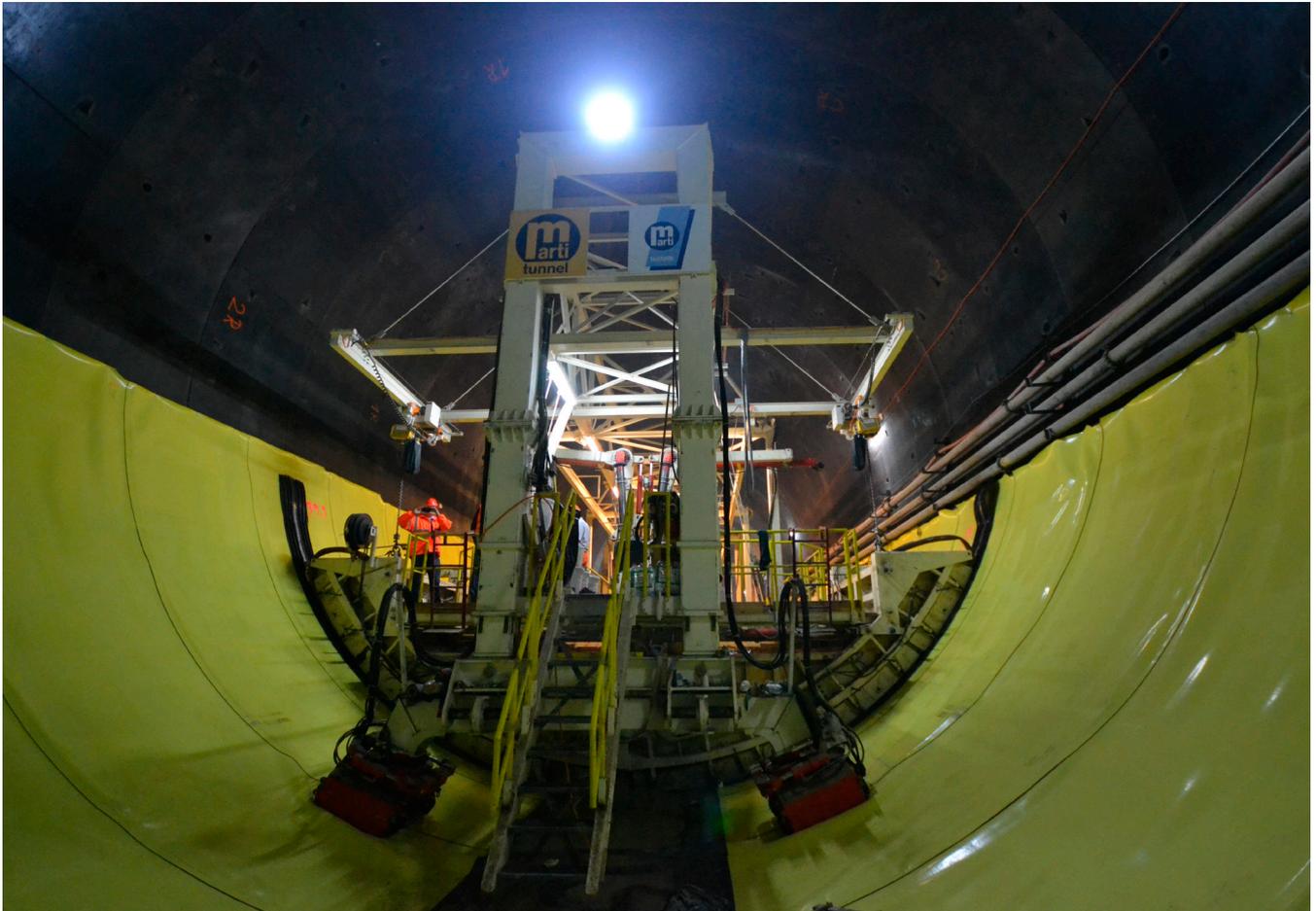
Einfluss der Förderpumpen auf und zerfiel in Feinstbestandteile. Das kontinuierliche Aufladen der Umlaufsuspension mit Feinstmaterialien konnte nur durch einen überdurchschnittlich hohen Austausch der Bentonitsuspension limitiert werden, was zu Beginn des Nassvortriebes eine sehr geringe Vortriebsleistung zur Folge hatte und darüber hinaus zu erheblichen Verklebungen des Bohrkopfes führte.

Erst nachdem zunehmend die Aare-Schotter von oben in den Tunnelquerschnitt einfielen, konnte die Vortriebsgeschwindigkeit kontinuierlich erhöht werden. Gleichzeitig stieg jedoch das Risiko von Oberflächensetzungen. Die groben Aare-Schotter zeigten erhöhte Wegigkeiten und waren stark abrasiv, so dass regelmäßige Werkzeugkontrollen unter Druckluft durchgeführt werden mussten. Der Filterkuchenaufbau durch die Standardbentonitsuspension bot hierfür jedoch keine ausreichende Standsicherheit; vor jeder Druckluftintervention war daher ein kompletter Austausch der Stützflüssigkeit in der Abbaukammer notwendig. Zusätzlich wurde die Ortsbrust innerhalb der Abbaukammer mit langkettigen Polymeren und Bentonitgranulaten ertüchtigt. Nur durch diese Maßnahmen konnten die umfangreichen Druckluftarbeiten innerhalb der grobkörnigen Aare-Schotter sicher ausgeführt werden.



Credit/Quelle: Arge Tunnel Eppenberg

6 Temporarily stored excavated material on-site
Zwischengelagertes Ausbruchmaterial auf der Baustelle



Credit/Quelle: Wayss & Freytag | Boxheimer

7 Placing the floor concrete using self-compacting concrete (SCC)
Sohlbetoneinbau mit selbstverdichtendem Beton

sufficient stability so that it was necessary to completely replace the support fluid in the extraction chamber prior to each compressed air intervention. Furthermore, the working face within the extraction chamber was improved with long chain polymers and bentonite granulates. Only by resorting to these measures was it possible to safely execute the extensive compressed air operations within the coarse-grained Aare Gravels.

In order to confine the risk of settlements during the following drive as far as possible, the SBB as client and the responsible JV Tunnel Eppenberg (consisting of the companies Marti Tunnelbau and Wayss & Freytag Ingenieurbau AG) agreed on geo-monitoring in addition to surface monitoring. In the route section before undertunnelling the built-up area prone to settlements, multi-extensometers were installed by means of several drill holes above the tunnel roof. Subsequent undercutting revealed only slight deformations so that the support pressures previously calculated to safeguard the working face's stability could also be verified within the coarse-grained Aare Gravels. The tunnel route led under the village of Gretzenbach with

Um das Setzungsrisiko auch während des jeweils folgenden Vortriebes so gering wie möglich zu halten, verständigten sich die SBB als Auftraggeber und die ausführende ARGE Tunnel Eppenberg (bestehend aus den Firmen Marti Tunnelbau und Wayss & Freytag Ingenieurbau AG) auf ein Geomonitoring zusätzlich zum Oberflächenmonitoring. Im Streckenabschnitt vor der Unterfahrung der setzungsempfindlichen Bebauung wurden in mehreren Bohrungen kurz oberhalb der Tunnelfirste Mehrfachextensometer installiert. Die anschließende Unterfahrung zeigte nur unwesentliche Deformationen, so dass die zuvor berechneten Stützdrücke zur Sicherstellung der Ortsbruststabilität auch innerhalb der grobkörnigen Aare-Schotter verifiziert werden konnten.

Die Trassierung des Tunnels führt unter dem Dorf Gretzenbach mit einer minimalen Überdeckung von lediglich 10 m hindurch (geringer als der einfache Tunneldurchmesser). Beim Unterfahren der Ortschaft wurden Gebäude aus Natursteinmauerwerk und teilweise ohne Bodenplatte passiert. Die Setzungen hätten hier große negative Auswirkungen haben können. Die Oberfläche wurde deshalb während der Vortriebszeit rund um die Uhr mit geodätischen Messungen überwacht, deren Ergebnisse

minimum overburden of merely 10 m (less than the tunnel diameter). Buildings made of natural stone masonry and in some cases without a base plate were passed when under-tunnelling the village. Settlements could have exerted large negative effects here. Hence, the surface was monitored constantly by means of geodetic measurements during driving operations. The results could be controlled online by those responsible on-site. Automated alarm systems provided immediate information in the event of a warning signal or limit values being exceeded so that remedial measures could be undertaken promptly. Ultimately, maximum settlements amounting to 4 mm were encountered below the built-up area; no buildings sustained damage in the process. Fortunately, the very low rate of advance at the start of the excavation could be increased massively once the Aare Gravels were reached. Hard sandstone layers within the lower third of the tunnelling zone also had scarcely any effect on the rate of advance. However, the satisfactory high rate was substantially reduced some three weeks prior to the end of the excavation owing to unexpectedly high wear affecting the pumps and pipelines. This resulted in extensive and time-consuming repair jobs. Altogether, the predicted rates of advance averaging just over 5.5 m per calendar day could be attained during the wet excavation through all homogeneous zones.

End of the Shield Drive

Once the temporary final position in the bored pile wall at the Gretzenbach target pit was reached on December 21, 2017, the wet excavation concluded immediately prior to the Xmas holidays in keeping with the optimistic forecasts made by the team on-site. As a result, soil improvement measures as had been contemplated to provide a "winter shelter" for the TBM on the route turned out to be unnecessary. The next day, the conveyance system was emptied, and the construction site made ready for winter until the final entry into the target shaft in the New Year. The feed and conveyance lines as well as the relay pumps had already been removed when the breakthrough took place as scheduled on February 2, 2018. The frost-susceptible chamber filter presses had also been dismantled and ferried from the construction site. After around a year-long drive, the TBM entered the target pit at Gretzenbach within the scope of a celebration marking the breakthrough (**Fig. 5**) and was subsequently demolished.

Excavated Material

The excavated material extracted from the wet excavation section largely constituted gravels. The gravelly and sandy material mostly devoid of its fine grain components after passing through the separation plant was temporarily stored on the site installation yard (**Fig. 6**) and subsequently

online von den Baustellenverantwortlichen eingesehen werden konnten. Automatisierte Alarmierungssysteme informierten umgehend bei Warn- und Grenzwertüberschreitungen, um im Ereignisfall sofortige Maßnahmen treffen zu können. Im Bereich der zu unterfahrenden Bebauung wurden schließlich maximale Setzungen von 4 mm registriert; Gebäudeschäden traten dabei nicht auf.

Erfreulicherweise konnte die zu Beginn des Vortriebes doch sehr geringe Vortriebsgeschwindigkeit nach Erreichen der Aare-Schotter massiv gesteigert werden. Auch harte Sandsteinschichten im unteren Drittel des Bohrbereiches wirkten sich kaum auf die Vortriebsgeschwindigkeit aus. Jedoch wurde die zufriedenstellend hohe Geschwindigkeit ca. drei Wochen vor Vortriebsende durch unerwartet hohen Verschleiß an Pumpen und Rohrleitungen erheblich reduziert, was umfangreiche und zeitraubende Reparaturarbeiten erforderlich machte. Insgesamt konnten während des Nassvortriebes über alle Homogenzonen die prognostizierten Vortriebsgeschwindigkeiten mit einem Mittelwert von knapp über 5,5 m pro Kalendertag erreicht werden.

Ende des Schildvortriebs

Mit Erreichen der vorläufigen Endposition in der Bohrpfehlwand der Zielbaugrube Gretzenbach am 21. Dezember 2017 endete der Nassvortrieb entsprechend den optimistischen Prognosen des Baustellenteams unmittelbar vor den Weihnachtsfeiertagen. Auf die angedachte Herstellung einer Bodenverbesserung zur „Überwinterung“ der TBM auf der Strecke konnte somit verzichtet werden. Am Folgetag wurde bereits das Fördersystem entleert, und die Baustelle konnte bis zur endgültigen Ausfahrt in den Zielschacht im neuen Jahr winterfest gemacht werden. Bis zum eigentlichen Durchschlag, der wie geplant am 2. Februar 2018 durchgeführt wurde, waren Speise- und Förderleitungen sowie die Staffelpumpen schon zurückgebaut. Auch die frostempfindlichen Kammerfilterpressen waren bereits demontiert und von der Baustelle abgefahren. Nach etwa einjähriger Vortriebszeit wurde die TBM im Rahmen einer Durchschlagfeier (**Bild 5**) in die Zielbaugrube in Gretzenbach eingefahren und im Anschluss demontiert.

Ausbruchmaterial

Das während der Nassvortriebsstrecke aufgefahrenere Ausbruchmaterial bestand vorwiegend aus Kiesen. Das durch die Separationsanlage größtenteils von Feinkornbestandteilen getrennte kiesige und sandige Material wurde direkt auf der Baustelleninstallationsfläche zwischengelagert (**Bild 6**) und zeitversetzt im baustelleneigenen Kies- und Betonwerk gewaschen. Ein Großteil konnte entweder für die eigene Betonherstellung oder für Hinterfüllungen im Projektabschnitt verwendet werden. Durch die Möglichkeit, einen großen Teil des etwa eine Million Tonnen umfassenden Ausbruchmaterials auf der Baustelle wiederzuverwenden, konnten der ursprünglich abgeschätzte Transportaufwand um nahezu 60 % reduziert werden.



SBB InfoCenter Eppenberg

The SBB has set up the InfoCenter Eppenberg together with an exhibition of the project directly on the installation yard relating to the production of the Eppenberg Tunnel and the four-track upgrade. It provides an impression of the size of the project and the technology that is involved. Furthermore, visitors obtain an overview of what's happening on-site from an observation platform above the Wöschnau tunnel portal. After prior registration, various tours are possible for individuals and groups. For more details please access: www.sbb.ch/eppenberg

SBB InfoCenter Eppenberg
 Rund um den Bau des Eppenbergtunnels und den Vierspurausbau Olten–Aarau hat die SBB direkt auf dem Installationsplatz das InfoCenter Eppenberg mit einer Projektausstellung eingerichtet, die die Dimensionen des Projekts und die Technologie dahinter greifbar macht. Darüber hinaus können sich Besucher von einer Aussichtsplattform oberhalb des Tunnelportals Wöschnau aus einen Überblick über den Baustellenbetrieb verschaffen. Nach vorheriger Anmeldung sind auch verschiedene Führungen für Einzelpersonen und Gruppen möglich. Mehr Infos unter: www.sbb.ch/eppenberg

washed in the site's own gravel and concrete plant. A major part could be used either for in-house concrete production or for backfilling jobs in the project section. Thanks to the possibility of being able to recycle a major portion of the roughly one million tonnes of muck on the construction site, it was possible to reduce the originally estimated transport requirements by almost 60 %.

Installing the Inner Lining

In accordance with the SBB's planning specifications, a sealed, 30 cm reinforced concrete inner shell was installed in addition to the temporary supporting segmental lining. As the complete TBM disassembly process including the back-ups took place via the target shaft and the tunnel could largely be cleared prior to the actual breakthrough, it was possible to start on the inner lining once the TBM had entered the target shaft at Gretzenbach.

The installing of the sealing membrane and the inner shell was split up into a number of coordinated production sections. For this purpose, the floor sealing carriage ran ahead of the floor formwork carriage (**Fig. 7**). Self-compacting concrete (SCC) with very high concrete and surface quality, which was placed on a daily basis in 25 m long blocks, was used for the floor.

On the completed floor, it was then possible to produce the openings for the three evacuation tunnels and rescue shafts as well as to excavate the technical bays from the main tunnel tube deploying heavy tunnel excavators. Once

Einbau der Innenschale

Entsprechend der planerischen Vorgaben der SBB wurde zusätzlich zum temporär tragenden Tübbingausbau eine abgedichtete, 30 cm dicke Stahlbetoninnenschale eingebaut. Da die gesamte TBM-Demontage inklusive der Nachläufer über den Zielschacht erfolgte und der Tunnel schon vor dem eigentlichen Durchstich größtenteils geräumt wurde, konnte der Innenausbau direkt nach der Einfahrt in den Zielschacht in Gretzenbach beginnen. Der Einbau der Abdichtungsmembran und der Innenschale wurde in mehrere aufeinander abgestimmte Herstellungsabschnitte zerlegt. Dazu lief der Sohlabdichtungswagen dem Sohlalwagen (**Bild 7**) voraus. Für die Sohle kam selbstverdichtender Beton (SCC-Beton) mit sehr hoher Beton- und Oberflächenqualität zum Einsatz, der in jeweils 25 m langen Blöcken im Tagesrhythmus eingebaut wurde.

Auf der fertiggestellten Sohle konnten dann die Öffnungen zu den drei Rettungsstollen und Rettungsschächten sowie der Ausbruch der Technik-Nischen von der Haupttunnelröhre aus unter Einsatz von schweren Tunnelbaggern hergestellt werden. Nach dem Einbau der Ausbruchsicherung und des Abdichtungsträgers folgte die Montage der empfindlichen Abdichtung im Gewölbereich mit dem Gewölbeabdichtungswagen. Im Folgenden wurden beidseitig die Kicker mittels Schalwagen im Tagestakt mit je 12,5 m Blocklänge hergestellt.

Komplettiert wurde der Gewölbebeton durch zwei Schalwagen, bestehend aus einem beidseitig abgeschalteten Vorläufer sowie dem Schließerschlagwagen. Auch hier erwies sich der Einsatz von selbstverdichtendem Beton als sehr zielführend, so dass

the initial support and the sealing support were installed, the sensitive seal in the vault area was placed by means of the vault sealing carriage. Then formwork carriages were used to produce the kickers at both sides in 12.5 m long blocks per day.

The vault concrete was completed using two formwork carriages, comprising an advance carriage stripping at both sides followed by the rear formwork carriage. In this case too, the application of self-compacting concrete turned out to be most purposeful so that the entire inner vault work could be finished in 2018.

The berms with cable conduits were installed at both sides of the final concrete construction section, which meant that the concreting joint from the kickers to the vault concrete was covered. These activities were completed according to schedule by March 2019 just like the drainage above the floor and the gravel filling with asphalt covering layer.

Outlook

In April 2019, the SBB began installing the rail technology. The Eppenbergtunnel will become operational according to schedule in late 2020.

die gesamten Innengewölbearbeiten noch im Jahr 2018 fertiggestellt werden konnten.

Als letzter Betonbauabschnitt wurden beidseitig die Bankette mit Kabelleerrohren eingebaut, womit die Betonierfuge von Kicker zu Gewölbebeton überdeckt wurde. Diese Arbeiten wurden, genau wie die Drainage oberhalb der Sohle und die Kiesauffüllung mit Asphaltdeckschicht, planmäßig bis März 2019 fertiggestellt.

Ausblick

Im April 2019 hat die SBB mit dem Einbau der Bahntechnik begonnen, sodass der Eppenbergtunnel pünktlich Ende 2020 in Betrieb gehen kann.

