



Ausbau Bahnhof Bern RBS

Herausfordernder städtischer Tunnelbau

Marco Ramoni, Dr. sc. dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Basler & Hofmann AG, Esslingen/CH
Stephan Reiling, dipl. Bau-Ing. FH, Projektmanagementfachmann (GPM/IPMA Level D), B+S AG, Bern/CH
Simon Lerch, dipl. Bau-Ing. FH, Executive MBA BFH, Emch+Berger AG, Bern/CH

Ausbau Bahnhof Bern RBS

Herausfordernder städtischer Tunnelbau

Das Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» beinhaltet den Neubau eines unterirdischen Bahnhofs und seiner Zulaufstrecke. Der neue RBS-Bahnhof besteht aus zwei 200 m langen, 26 m breiten und 17 m hohen Bahnhofskavernen, die 12 m unterhalb der bestehenden Gleise des Hauptbahnhofs Bern liegen. Die 1,5 km lange Zulaufstrecke weist unterschiedliche Querschnitte auf und wird sowohl im Untertags als auch im Tagbau erstellt.

Expansion of Bern RBS Station

Challenging Urban Tunnel Construction

The project «Expansion of Bern RBS Station» involves building a new underground station as well as the railway line for accessing it. The new RBS Station consists of two 200 m long, 26 m wide and 17 m high station caverns, which lie 12 m underneath the existing railway tracks of Bern Central Station. The 1.5 km access railway line has different cross sections and runs both underground and above ground (open cut).

1 Einleitung

Die Regionalverkehr Bern-Solothurn AG (RBS) realisiert zurzeit das Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» [1] [2]. Dabei handelt es sich um den Bau eines neuen unterirdischen Bahnhofs, bestehend aus zwei Bahnhofskavernen – für jeweils zwei Gleise (Meterspur) und einen mittig angeordneten Perron – sowie dessen Zulaufstrecke (Bild 1). Der Ausbau der RBS-Infrastruktur ist erforderlich, weil der bestehende RBS-Bahnhof die Grenzen seiner Kapazität erreicht hat: Der 1965 eröffnete RBS-Bahnhof war für 16 000 Reisende/Tag konzipiert und wird aktuell von 60 000 Reisenden/Tag frequentiert [3] [4]. Sowohl der bestehende als auch der neue RBS-Bahnhof befinden sich unterhalb der Gleise des Hauptbahnhofs Bern.

Der Hauptbahnhof Bern ist mit 250 000 Reisenden/Tag der zweitgrösste Bahnhof der Schweiz [3] und wird zurzeit im Rahmen des Projektes «Ausbau Publikumsanlagen Bahnhof Bern» von der Schweizerischen Bundesbahnen AG (SBB) ausgebaut [2]. Dabei wird unter anderem eine neue Personenunterführung (die sogenannte Unterführung Mitte) gebaut, die sich teilweise oberhalb des neuen RBS-Bahnhofs befindet (Bild 1). Die zwei Projekte «Ausbau Bahnhof Bern RBS» und «Ausbau Publikumsanlagen Bahnhof Bern SBB» werden parallel entwickelt und in etwa zeitgleich realisiert, sodass zahlreiche planerische und ausführungstechnische Schnittstellen in der Planung und in der Ausführung zu berücksichtigen sind.

1 Introduction

Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS) is currently implementing the project «Expansion of Bern RBS Station» [1] [2]. It involves building a new underground station consisting of two station caverns – for two tracks (metre gauge) each and a platform arranged in between – as well as the access line to the new station (Fig. 1). The RBS infrastructure needs to be expanded as the existing RBS Station has reached its capacity: The RBS Station opened in 1965 and was designed for 16,000 passengers per day, but now 60,000 passengers pass through every day [3] [4]. Both the existing and the new RBS Station are located below the tracks of Bern Central Station.

Bern Central Station is the second largest station in Switzerland with 250,000 passengers per day [3] and is currently being expanded by Swiss Federal railways (SBB) within the scope of the project «Expansion of Bern Station public facilities» [2]. This involves, among other things, building a new pedestrian underpass (the so-called Unterführung Mitte), part of which lives above the new RBS Station (Fig. 1). The two projects «Expansion of Bern RBS Station» and «Expansion of Bern SBB Station public facilities» are developed in parallel and implemented more or less at the same time, meaning that numerous factors have to be taken into consideration during design and construction.

Extension de la gare RBS de Berne

Les défis de la construction d'ouvrages souterrains en milieu urbain

Tous les ouvrages souterrains sont réalisés près de la surface et dans des conditions urbaines exigeantes. Les travaux se déroulent principalement en roche tendre et parfois en terrain meuble aquifère. Ils sont rendus complexes par une faible couverture et de fortes charges de fondation au-dessus, mais aussi par leur réalisation, pour partie, au milieu ou près de structures existantes, parfois en parallèle à d'autres projets, le tout sans interruption de l'exploitation des infrastructures ferroviaires de la gare centrale de Berne ou du transport régional RBS. Ils requièrent des solutions spécifiques, mûrement réfléchies et parfois peu communes – comme la congélation du sol, l'étalement d'un bâtiment ou la disposition d'une armature de cisaillement dans le béton projeté utilisé pour le soutènement provisoire.

Ampliamento della stazione RBS di Berna

Le sfide della costruzione di opere sotterranee in ambito urbano

Tutte le opere sotterranee sono realizzate vicino alla superficie e in presenza di condizioni urbane impegnative. Le opere si trovano principalmente in roccia tenera e in parte in materiale sciolto acquifero. L'esecuzione con copertura ridotta e al di sotto di fondazioni con alti carichi, in parte all'interno o in vicinanza di strutture già esistenti, parallelamente ad altri progetti di ampliamento e con la struttura ferroviaria esistente della stazione centrale di Berna e di RBS in funzione, è impegnativa e richiede soluzioni specifiche, pensate nel dettaglio e, talvolta, inconsuete – come ad esempio il congelamento del terreno, la sottofondazione di un edificio o la disposizione di un'armatura di taglio nel calcestruzzo spruzzato utilizzato per la messa in sicurezza dello scavo.

Nach einer Projektübersicht (Kapitel 2) befasst sich der vorliegende Beitrag mit den einzelnen Abschnitten sowie mit ausgewählten Herausforderungen des Projektes «Ausbau Bahnhof Bern RBS» aus Sicht des Projektverfassers (Kapitel 3–5).

2 Projektübersicht

Das Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» gliedert sich in neun Abschnitte (Bild 2):

1. RBS-Bahnhof (Neubau);
2. Bahnhofeinfahrt;
3. Eilgutareal;
4. Henkerbrännli;
5. Bierhübeli;
6. Wildpark;
7. Schanzentunnel (Bestand, Zufahrtstunnel);
8. Schanzentunnel (Bestand, Ausserbetriebnahme);
9. RBS-Bahnhof (Bestand, Ausserbetriebnahme).

Der Abschnitt 1 (Kapitel 3) besteht aus dem neuen RBS-Bahnhof mit seinen Nebenbauwerken. Die Abschnitte 2–7 (Kapitel 4) bilden die Zulaufstrecke zum neuen RBS-Bahnhof aus. Die Abschnitte 8–9 (Kapitel 5) betreffen die Ausserbetriebnahme der nicht mehr benötigten Teile der bestehenden RBS-Infrastruktur.

3 RBS-Bahnhof (Neubau) – Abschnitt 1

3.1 Bahnhofskavernen

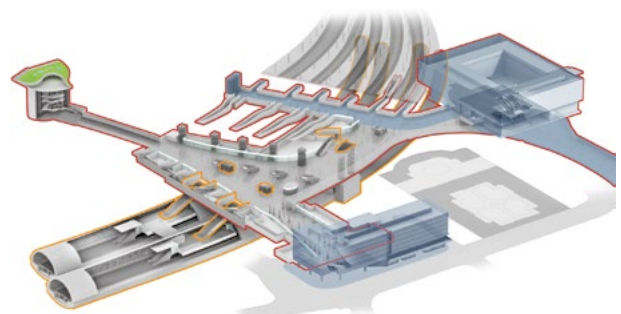
Die Hauptobjekte des Abschnitts 1 sind die zwei Bahnhofskavernen, die 200 m (Nordkaverne) respektive 210 m (Südkaverne) lang, 26 m breit und 17 m hoch sind und einen Abstand zueinander von 5–10 m aufweisen (Bild 3 und Bild 4). Die sich darin befindenden, 12 m breiten Perrons liegen

After a project overview (Chapter 2), this report outlines the individual sections as well as selected challenges of the project «Expansion of Bern RBS Station» from the point of view of the project engineer (Chapters 3–5).

2 Project Overview

The project «Expansion of Bern RBS Station» is divided into nine sections (Fig. 2):

1. RBS Station (new);
2. Station entrance;
3. Eilgutareal;
4. Henkerbrännli;
5. Bierhübeli;

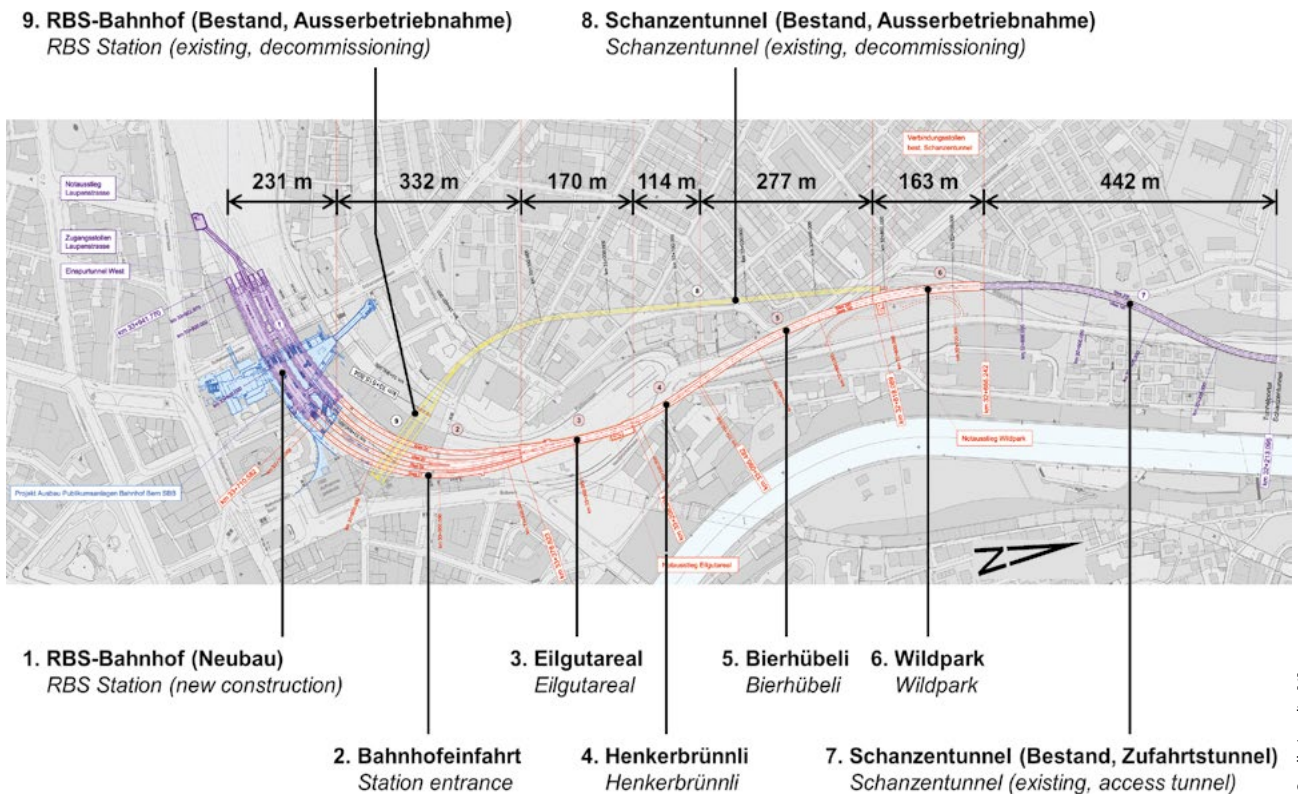


— Ausbau Publikumsanlagen Bahnhof Bern SBB
Upgrade public facilities Bern Station SBB

— Ausbau Bahnhof Bern RBS
Upgrade Bern Station RBS

1 Projekte «Ausbau Publikumsanlagen Bahnhof Bern SBB» und «Ausbau Bahnhof Bern RBS» – Visualisierung
Projects «Expansion of Bern RBS Station» and «Expansion of Bern SBB station public facilities» – visualisation

Quelle/credit: [2]



Quelle/credit: [6]

2 Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» – Abschnitte (Situation)
Project «Expansion of Bern RBS Station» – sections (situation)

23 m unterhalb der südlichen Gleise (1–8) des Hauptbahnhofs Bern respektive 17 m unterhalb der neuen SBB-Personenunterführung. Aus diesen Niveaudifferenzen resultiert eine Überdeckung der Bahnhofskavernen im First von 12 m respektive 6 m. Die Höhenlage der Bahnhofskavernen ergibt sich einerseits aus der statisch erforderlichen Überdeckung und andererseits aus dem Ziel möglichst kurzer Umsteigezeiten.

Im Projektperimeter sind mehrere setzungempfindliche Objekte vorhanden, die durch die Bahnhofskavernen unterquert werden. Die Bahnhofskavernen sind im Grundriss so platziert, dass die Lasten aus den darüber liegenden Objekten möglichst symmetrisch auf den Ausbau der Bahnhofskavernen einwirken. Die zu unterquerenden Hauptobjekte sind (von Westen nach Osten, Bild 3):

- die Fussgängerüberquerung «Welle von Bern» (ein Bauwerk aus Holz, Stahl und Glas);
- die Strassenbrücke «Schanzenbrücke», welche die Bahngleise der SBB überspannt; die Betonbrücke hat eine Gesamtlänge von 107 m und ist in vier Felder mit einer Spannweite von 16–33 m unterteilt; der Abstand zwischen dem First der Bahnhofskavernen und den Brückenfundamenten beträgt 5–10 m;
- das sogenannte Posttunnelsystem, welches früher von der Post genutzt wurde und heute als Logistikweg und Lagerfläche dient; der Abstand zwischen dem First der Bahnhofskavernen und den unterirdischen Bauwerken des Posttunnelsystems beträgt 2 m;

- 6. Wildpark;
- 7. Schanzentunnel (existing, to be access tunnel);
- 8. Schanzentunnel (existing, to be decommissioned);
- 9. RBS Station (existing, to be decommissioned).

Section 1 (Chapter 3) consists of the new RBS Station and its ancillary structures. Sections 2–7 (Chapter 4) form the access line to the new RBS Station. Sections 8–9 (Chapter 5) relate to the decommissioning of the parts of the existing RBS infrastructure that are no longer needed.

3 RBS Station (new) – Section 1

3.1 Station Caverns

The main objects of Section 1 are the two station caverns, which are 200 m (north cavern) and 210 m (south cavern) long, 26 m wide and 17 m high and spaced apart by 5–10 m (Figs 3 and 4). The 12 m wide platforms in the station caverns lie 23 m below the southern tracks (1–8) of Bern Central Station and 17 m below the new SBB pedestrian underpass, respectively. These level differences result in 12 m to 6 m cover above the crown sections of the station caverns. The elevation of the station caverns is on the first hand based on the shortest possible time which is required to change trains and on the other hand to cope with the static requirements (structurally required cover).

The area surrounding the construction site includes numerous objects and structures that are susceptible to settlement and that are undercut by the station caverns. Viewed from above,

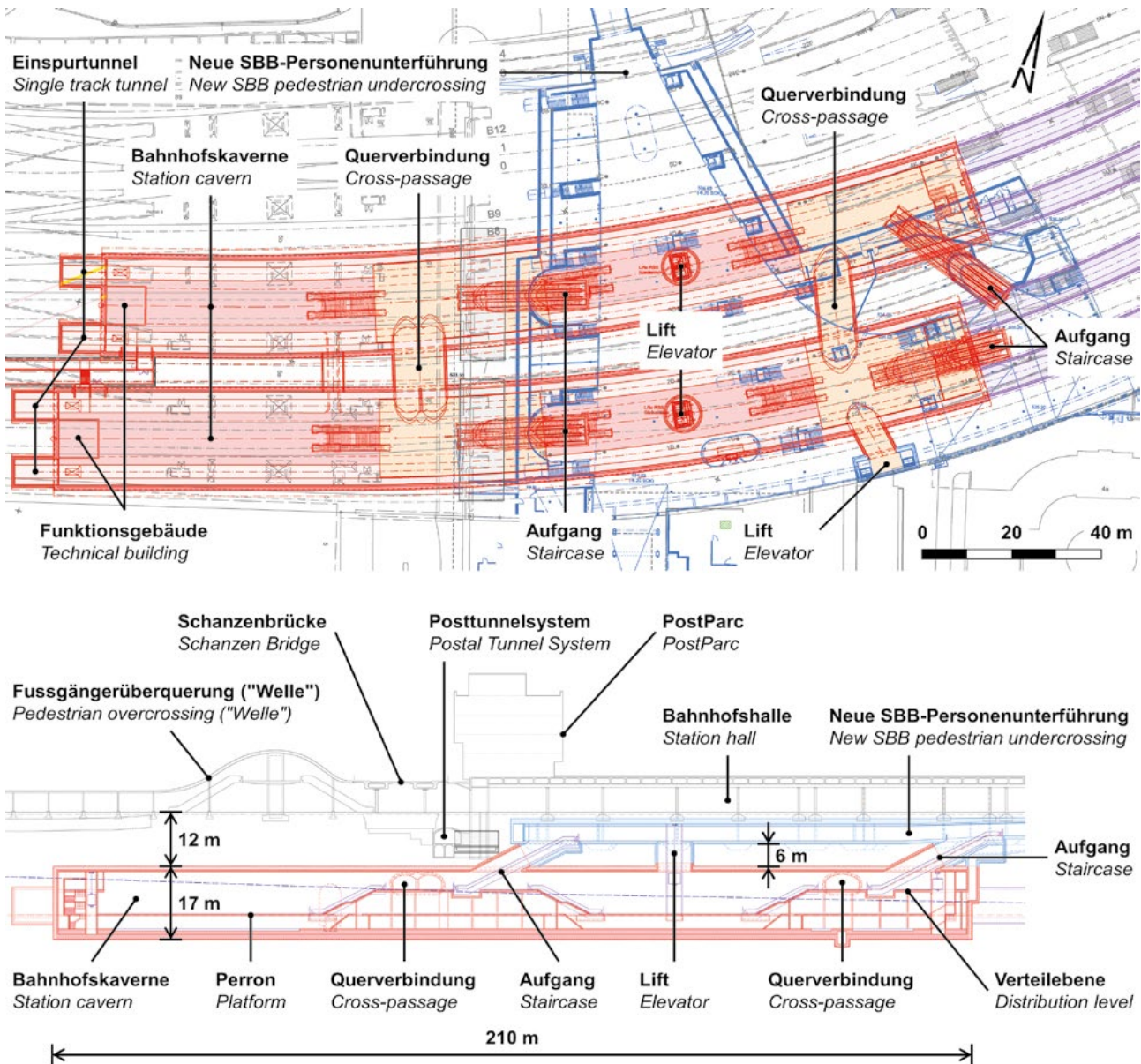
- der sogenannte PostParc (Kapitel 3.5);
- die Bahnanlagen und die Bahnhofshalle (deren Decke eine mit Vollstahlstützen getragene Betonplatte ist) des Hauptbahnhofs Bern.

Für den Personenfluss in und zwischen den Bahnhofskavernen sind sogenannte Verteilebenen vorgesehen, die durch zwei Querverbindungen miteinander verbunden sind (Bild 3). Ferner sind beide Bahnhofskavernen mit jeweils zwei Aufgängen und einem Lift mit der neuen SBB-Personenunterführung verbunden. Ein weiterer Lift im südöstlichen Bereich ermöglicht eine direkte Verbindung zur Postautostation, die sich oberhalb des Hauptbahnhofs Bern befindet.

Unterhalb der Perrons sind zahlreiche technische Räume vorgesehen (Bild 4). Ferner befindet sich ein sogenanntes

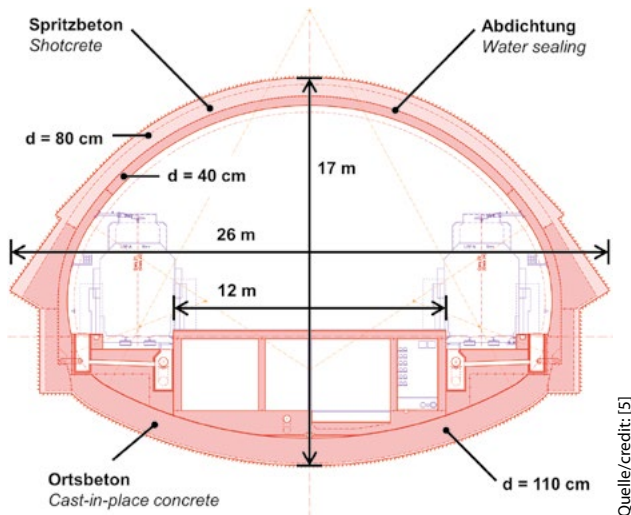
the station caverns are placed such that the loads from the objects and structures located above act as symmetrically as possible on the lining of the station caverns. The main objects and structures to be undercut are (from west to east, Fig. 3):

- the pedestrian overpass «Welle von Bern» (a structure made of wood, steel and glass);
- the road bridge «Schanzenbrücke», which extends over the SBB railway tracks; the concrete bridge is 107 m long in total and is divided into four spans measuring 16–33 m each; the distance between the roof of the station caverns and the bridge foundations is 5–10 m;
- the so-called Posttunnelsystem (postal tunnel system), which was used formerly by the postal service and which today serves as a logistics route and storage space; the distance between the roof of the station caverns and the underground structures of the postal tunnel system is 2 m;



3 Bahnhofskavernen – Situation (oben) und Längsschnitt (unten)
 Station caverns – situation (top) and longitudinal section (bottom)

Quelle/Credit: [5]



Quelle/Credit: [5]

4 Bahnhofskavernen – Normalprofil

Station caverns – standard cross section

Funktionsgebäude am westlichen Ende jeder Bahnhofskaverne (Bild 3).

Zur Sicherstellung einer späteren Erweiterung (unter Betrieb) zu einem Durchgangsbahnhof sind auf der Westseite der Bahnhofskavernen bei allen Gleisen 10 m lange Einspurtunnel als Anschlussmöglichkeit für die allfällige Zufahrtsstrecke West vorgesehen (Bild 3). Im Endzustand des vorliegenden Projektes (Kopfbahnhof) beherbergen die Einspurtunnel die Prellböcke.

Die Bahnhofskavernen befinden sich vollumfänglich in der Unteren Süsswassermolasse, die vorwiegend aus Sandsteinschichten und aus fein geschichteten Wechsellagerungen von Sandstein, Feinsandstein, Siltstein und Mergel besteht. Die Felsoberfläche kann mit glazialen Abflussrinnen und Kolken (aufgefüllte Gletschermühlen) durchzogen sein. Die Bahnhofskavernen befinden sich teilweise unterhalb des Bergwasserspiegels.

Um die Erschütterungen und die bautechnischen Risiken möglichst zu minimieren, erfolgt der Vortrieb der Bahnhofskavernen hauptsächlich mittels Teilschnittmaschine und in mehreren Teilausbrüchen respektive Arbeitsschritten (Bild 5):

1. Ausbruch und Sicherung (Spritzbeton und Gitterträger, $d = 30$ cm) des oberen Teils beider Paramentstollen;
2. Ausbruch und Sicherung (Spritzbeton und Gitterträger, $d = 30$ cm) des unteren Teils beider Paramentstollen;
3. Betonieren eines Widerlagers (Ortbeton, $d = 50$ – 165 cm) in beiden Paramentstollen;
4. Ausbruch und Sicherung (Spritzbeton und Gitterträger, $d = 30$ cm) des oberen mittleren Teils der Kalotte;
5. Abbruch der Zwischenwände und parallele Verstärkung der Ausbruchsicherung (Spritzbeton und Gitterträger, von $d = 30$ cm auf $d = 80$ cm) der gesamten Kalotte;
6. Ausbruch des unteren mittleren Teils der Kalotte (Kern) und paralleler Abbruch der Zwischenwände;
7. Ausbruch des mittleren Teils der Strosse;

- the so-called PostParc (Chapter 3.5);
- the railway facilities and the station hall (the ceiling of which is a concrete slab supported by solid steel columns) of Bern Central Station.

So-called distribution levels that are interconnected by means of two cross-passages are intended for the flow of pedestrians in and between the station caverns (Fig. 3). Furthermore, both station caverns are connected via two staircases and one elevator each to the new SBB pedestrian underpass. Another elevator in the south-western portion of the new RBS Station provides a direct connection to the Post Bus Station, which is located above Bern Central Station.

Numerous technical rooms are provided below the platforms (Fig. 4). Moreover, a so-called functional building is located at the western end of each station cavern (Fig. 3).

In order to allow for future extension (with ongoing operation) to a through station, 10 m long single-track tunnels are provided on the western side of the station caverns as a way to join the possible western access line (Fig. 3). In the finished state of the present project (terminal station), the single-track tunnels house the buffer stops.

The station caverns are located entirely within the Lower Freshwater Molasse, which primarily consists of layers of sandstone and thin alternating layers of sandstone, fine sandstone, siltstone and marlstone. The rock surface may be scoured with glacial drainage channels and potholes (filled in glacier mills). The station caverns are located partially below the groundwater level.

In order to minimise tremors and constructional risks as far as possible, the station caverns are mainly excavated using a roadheader and in several partial excavation work steps (Fig. 5):

1. Excavation and support (shotcrete and lattice girder, $d = 30$ cm) of the upper portion of both side-wall tunnels;
2. Excavation and support (shotcrete and lattice girder, $d = 30$ cm) of the lower portion of both side-wall tunnels;
3. Concreting of an abutment (concrete cast in-situ, $d = 50$ – 165 cm) in both side-wall tunnels;
4. Excavation and support (shotcrete and lattice girder, $d = 30$ cm) of the upper portion of the top heading;
5. Demolition of the dividing walls and simultaneous reinforcement of the excavation support (shotcrete and lattice girder, from $d = 30$ cm to $d = 80$ cm) of the entire top heading;
6. Excavation of the lower-middle portion of the top heading (core) and simultaneous demolition of the dividing walls;
7. Excavation of the middle part of the bench;
8. Excavation and support (shotcrete, $d = 25$ cm) of the lateral portions of the bench and simultaneous concreting of the outer walls (concrete cast in-situ, $d = 55$ cm) of the bench;
9. Excavation of the floor and simultaneous concreting of the invert (concrete cast in-situ, $d = 110$ cm).

8. Ausbruch und Sicherung (Spritzbeton, $d = 25$ cm) der seitlichen Teile der Strosse und paralleles Betonieren der Aussenwände (Ortbeton, $d = 55$ cm) der Strosse;
9. Ausbruch der Sohle und paralleles Betonieren des Sohlgewölbes (Ortbeton, $d = 110$ cm).

Die Abschlagslänge ist beschränkt auf 1–2 m für die Parameterstollen und die Kalotte, auf 3,5 m für die seitlichen Teile der Strosse und auf 5 m für den mittleren Teil der Strosse und die Sohle. Je nach erforderlichem Sicherungstyp wird die Ausbruchsicherung mit Ankern entlang der Ausbruchlaibung ergänzt. Wo vorausseilende Massnahmen erforderlich sind, sind Spiessschirme und eine Ortsbrustankerung vorgesehen. In Bereichen mit hohen Lasten und/oder geringen Baugrundfestigkeiten werden die Kalottenwiderlager mit Mikropfählen verstärkt.

Im Rahmen der Aushubarbeiten für die neue SBB-Personenunterführung werden die heute flach fundierten Stahlstützen der Bahnhofshalle des Hauptbahnhofs Bern mittels Mikropfählen abgefangen. Die Länge der Mikropfähle, die sich oberhalb der Bahnhofskavernen befinden, wurde so beschränkt, dass ein Mindestabstand zwischen Mikropfahlspitzen und Ausbruchsicherung von mindestens 1 m eingehalten wird. Die von den Mikropfählen abzutragenden Lasten betragen bis zu 15 MN (auf Dimensionierungsniveau). Aus der Nähe zu den Bahnhofskavernen und dem Betrag der Lasten ergibt sich die (nicht übliche) Notwendigkeit der Anordnung einer Schubbewehrung in der Ausbruchsicherung der Bahnhofskavernen in den Bereichen unterhalb der Mikropfähle. Ferner gilt die Bedingung, dass das Kalottengewölbe der Bahnhofskavernen (Ausbruchsicherung, $d = 80$ cm) vollumfänglich tragfähig sein muss, bevor die SBB-Abfangungen belastet und die Aushubarbeiten für die neue SBB-Personenunterführung gestartet werden dürfen. Damit kann sichergestellt werden, dass die Lasten von der Tragstruktur der Bahnhofskavernen aufgenommen werden können und dass die Mikropfähle nicht unterfahren werden müssen.

Die Querverbindung Ost (Bild 3) ist 8,8 m breit und 5,5 m hoch. Sie wird im Vollausbau ausgebrochen. Die Querverbindung West ist aufgrund der Anforderungen aus der Personenhydraulik breiter und wird aus statischen Gründen als Brillenprofil mit einer gesamten Breite von 12,4 m und einer Höhe von 5,3 m realisiert. Der Vortrieb erfolgt in drei Etappen (zuerst der Mittelstollen inkl. Ausbildung der Stützkonstruktion und anschliessend die zwei Seitenstollen).

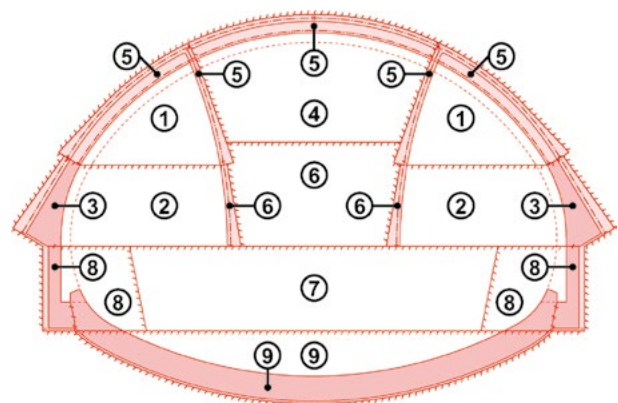
Die vier Aufgänge und die zwei Liftschächte (Bild 3), welche die Bahnhofskavernen mit der neuen SBB-Personenunterführung verbinden, werden aus Gründen der Arbeitssicherheit nur zu einem kleinen Teil im Untertagbau ausgebrochen. Dies erfolgt in kurzen Etappen und mit sofortiger Sicherung nach Fertigstellung des Kalottengewölbes der Bahnhofskavernen. Das Kalottengewölbe wird beim Vortrieb an diesen Stellen verstärkt, um den späteren Durchbruch der Aus-

The round length is limited to 1–2 m for the side-wall tunnels and the top heading, 3.5 m for the lateral portions of the bench and 5 m for the middle portion of the bench and for the floor. Depending on the type of support required, the excavation support is supplemented by rock bolts along the excavated profile. Where anticipatory measures are required, spiles umbrellas and face bolting shall be provided. In regions of high loads and/or low rock mass strength, the top heading abutments are reinforced with micropiles.

Within the scope of the excavation work for the new SBB pedestrian underpass, the stanchions of the station hall of Bern Central Station – which now have flat foundations – are supported by micropiles. The length of the micropiles, which are located above the station caverns, has been limited so as to keep a minimum distance of at least 1 m between the tips of the micropiles and the excavation support. The maximum load to be carried by the micropiles is 15 MN (at dimensioning level). Unusually, due to the proximity to the station caverns and the magnitude of the loads, shear reinforcement has to be provided in the excavation support of the station caverns in the regions below the micropiles. Furthermore, it is crucial that the top heading vault of the station caverns (excavation support, $d = 80$ cm) is fully capable of supporting loads before the SBB supports can be loaded and before the excavation work for the new SBB pedestrian underpass can be started. In this way, it can be ensured that the loads can be absorbed by the support structure of the station caverns and that the micropiles do not have to be underpinned.

The east cross-passage (Fig. 3) is 8.8 m wide and 5.5 m high. It is excavated by means of full-face excavation. The west cross-passage is broader on account of pedestrian dynamics requirements and, for static reasons, is designed as an «eyewear profile» with a total width of 12.4 m and a height of 5.3 m. Excavation takes place in three stages (firstly the central tunnel incl. formation of support structure and then the two side tunnels).

The four staircases and the two elevator shafts (Fig. 3), which connect the station caverns to the new SBB pedestrian



5 Bahnhofskavernen – Teilausbrüche/Arbeitsschritte (Querschnitt)
Station caverns – partial excavations/work steps (cross section)

Quelle/credit: [5]



6 Bahnhofskavernen – Visualisierung des Gewölbes mit rippenartiger Struktur
Station caverns – visualisation of the vault with rib-like structure

bruchsicherung zu ermöglichen. Der grössere Teil des Ausbruchs der Aufgänge und der Liftschächte erfolgt im Tagbau von oben nach unten im Rahmen der Bauarbeiten für die neue SBB-Personenunterführung. Der Liftschacht für die Verbindung zur Postautostation wird vollumfänglich von oben nach unten ausgebrochen.

Die Bahnhofskavernen werden teilabgedichtet. Der Ausbau ist zweischalig im Gewölbe und einschalig in der Sohle (Bild 4). Die Querverbindungen, die Aufgänge und die Liftschächte, die sich oberhalb der Bergwasserdrainage der Bahnhofskavernen befinden, werden voll abgedichtet und vollumfänglich zweischalig ausgebaut. Dasselbe gilt für die Einspurtunnel auf der Westseite der Bahnhofskavernen sowie für den Liftschacht zur Postautostation.

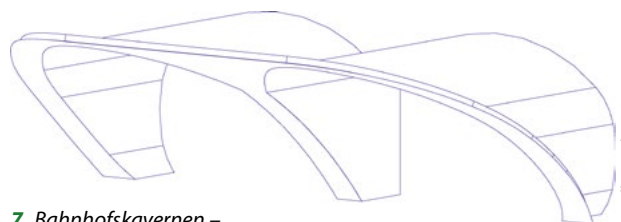
Das Gewölbe der Bahnhofskavernen wird in Ortbeton ausgeführt ($d = 40 \text{ cm}$, Bild 4), wobei die Oberfläche eine rippenartige Struktur hat (Bild 6). Die Rippen sind 33 cm breit und 12 cm tief. In ihren 67 cm breiten Zwischenräumen nimmt die Rippenstruktur Lichttechnik, Brandmelder und Akustik-elemente auf. Eine solche langfristig sichtbare Oberflächenstruktur ist im Untertagbau nicht üblich. Ihre Realisierung ist sehr anspruchsvoll und stellt hohe Anforderungen insbesondere an die einzusetzende Schalung. Zwecks sauberer Abschlussdetails sind bei den Gewölbeverschneidungen Stahleinfassungen vorgesehen (Bild 7).

3.2 Schacht Laupenstrasse

Der Schacht und der Stollen Laupenstrasse (Kapitel 3.3), die sich westlich der Bahnhofskavernen befinden (Bild 8), dienen einerseits als Angriffsstelle in der Bauphase und andererseits

underpass, are only excavated underground to a limited extent for occupational safety reasons. This takes place in short stages, with support measures implemented immediately and after completion of the top heading vault of the station caverns. The top heading vault is reinforced at these points during excavation in order to allow for dismantling of the excavation support at a later time. The majority of the excavation work on the staircases and elevator shafts takes place above ground from top to bottom during the construction works for the new SBB pedestrian underpass. The elevator shaft for the connection to the Post Bus Station is excavated exclusively from top to bottom.

The station caverns are partially waterproofed. The lining consists of two layers in the vault and one layer in the invert (Fig. 4). The cross-passages, staircases and elevator shafts, which are located above the groundwater drainage system of the station caverns, are fully waterproofed and have double-layered lining. The same applies to the single-track tunnels on the western side of the station caverns and to the elevator shaft to the Post Bus Station.



7 Bahnhofskavernen – Stahleinfassung für die Querverbindung West
Station caverns – steel edging for the west cross-passage

als Logistik- und Fluchtweg/Notausstieg in der Betriebsphase. Ferner beherbergen sie diverse Teile der Brandlüftung. Der Schacht ist 21 m lang, 14 m breit und 17 m tief. Die Geometrie des Schachtes ist durch die bestehenden Gebäude im Süden, die Parzellengrenze im Osten, die Gleise im Norden sowie die Freihaltezone für einen allfälligen Schanzen-tunnel (Strassentunnel) im Westen gegeben.

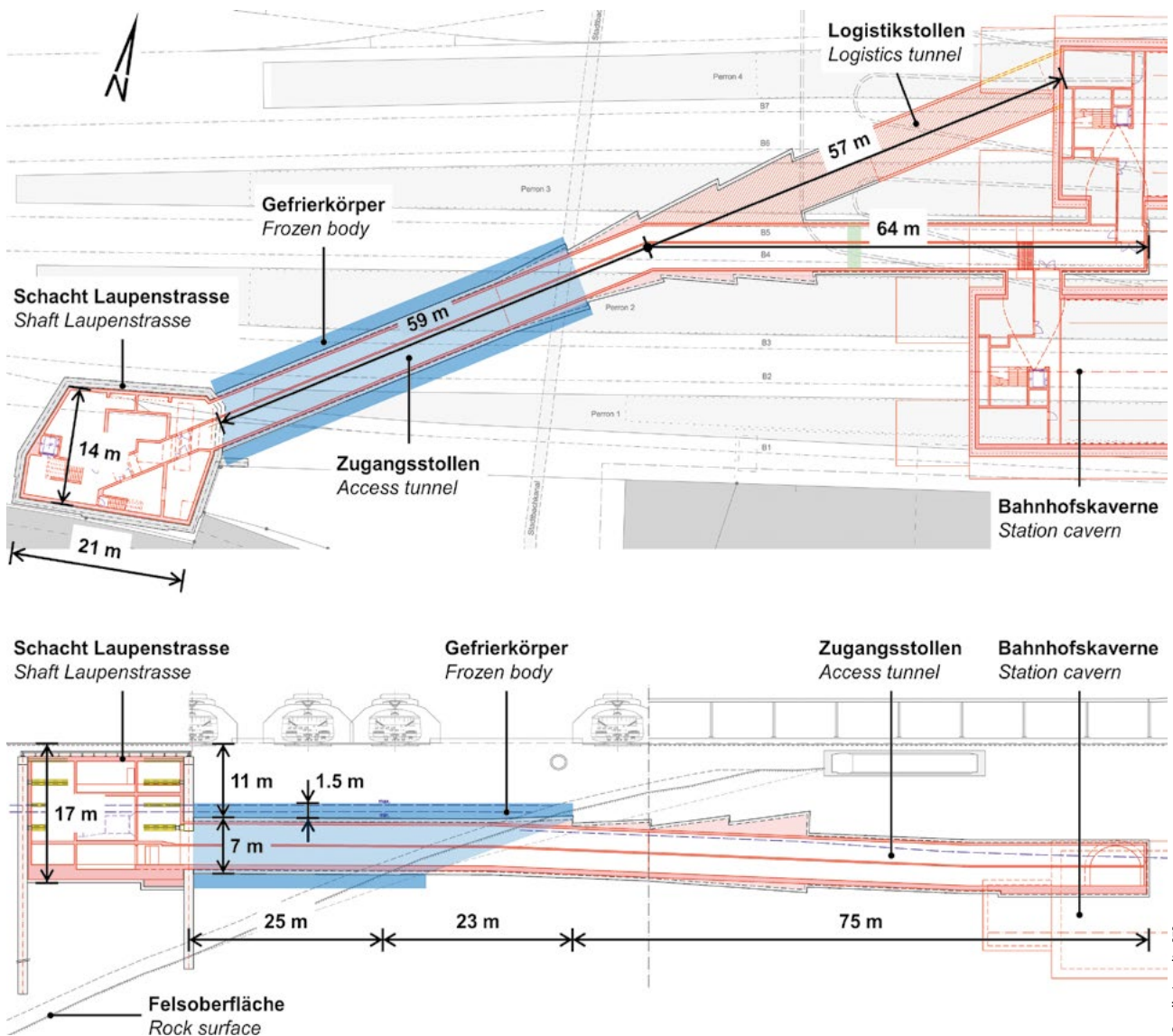
Der Schacht liegt im wasserführenden Lockergestein (Bild 8). Dabei handelt es sich vorwiegend um glaziale und fluvioglaziale Ablagerungen (Rückzugsschotter, Rückstausedimente und Moränenablagerungen) sowie, oberflächennah, um künstliche Auffüllungen. In diesem Bereich befindet sich der Grundwasserspiegel 8 m unterhalb der Geländeoberkante.

Die Baugrubensicherung des Schachtes besteht aus 1 m dicken Schlitzwänden. Die Baugrube ist mit fünf Spriesslagen

The vault of the station caverns is concrete cast in-situ ($d = 40$ cm, Fig. 4), with the surface having a rib-like structure (Fig. 6). The ribs are 33 cm wide and 12 cm deep. The rib structure houses lighting technology, fire detectors and acoustic elements in the 67 cm wide intermediate spaces. A long-term visible surface structure of this kind is uncommon in underground construction. It is very challenging to produce and places high demands on the formwork to be used, in particular. Steel edgings are provided for the vault intersections in order to ensure clean finishing details (Fig. 7).

3.2 Laupenstrasse Shaft

The Laupenstrasse Shaft and Tunnel (Chapter 3.3), which are located to the west of the station caverns (Fig. 8), serve as an access point during the construction phase and as a logistics and escape route/emergency exit during the operational phase. They also house various fire ventilation elements. The shaft is 21 m long, 14 m wide and 17 m deep. The geometry of



8 Schacht und Stollen Laupenstrasse – Situation (oben) und Längsschnitt (unten)
Laupenstrasse Shaft and Tunnel – situation (top) and longitudinal section (bottom)

(Bild 9) sowie einer Spriessplatte aus Stahlbeton ausgesteift. Die fünfte Spriesslage wird nur im Bauzustand benötigt, bis die Spriessplatte betoniert ist. Nachher wird sie ausgebaut, um eine ausreichende lichte Höhe für die Ausführung der nachfolgenden Untertagarbeiten (Stollen Laupenstrasse und Bahnhofskavernen) gewährleisten zu können.

Der Schacht liegt aufgrund der beengten Platzverhältnisse teilweise unter bestehenden Gleisen (inkl. Weiche), die nicht über die gesamte Bauzeit gesperrt werden können. Deshalb ist über die Bauzeit des neuen RBS-Bahnhofs eine temporäre Hilfsbrücke erforderlich (Bild 10). Die Hilfsbrücke hat eine Spannweite von 24 m und ist 8 m breit (um ausreichend Platz für zwei Gleise mit Gleisabstand von 4 m zu bieten). In Längsrichtung werden die Lasten über einen Fachwerkträger (Südseite, oberhalb der Schachtöffnung) und direkt in die Schlitzwand (Nordseite) abgetragen. In Querrichtung besteht die Hilfsbrücke aus einer Verbundkonstruktion (Stahlquerträger mit darauf liegenden Betonplatten). Für den Endzustand wird die Schachtdecke als Bahnbrücke ausgebildet.

3.3 Stollen Laupenstrasse

Der Stollen Laupenstrasse hat im Regelquerschnitt einen Durchmesser von 7 m (Lockergesteinsstrecke) respektive 6,7 m (Felsstrecke) und unterfährt das SBB-Gleisfeld mit einer Überdeckung von 11 m (Bild 8). Er besteht aus zwei Teilen:

- Der sogenannte Zugangsstollen ist 123 m lang und wird sowohl im Bau- als auch im Endzustand benötigt. Die An-



Quelle/credit: Planergemeinschaft RBS/vebinder

9 Schacht Laupenstrasse (Blickrichtung West)
Laupenstrasse Shaft (looking west)

the shaft is defined by the buildings to the south, the plot borders to the east, the tracks to the north and the zone reserved for the possible Schanzentunnel (road tunnel) to the west.

The shaft is made in water-bearing soils (Fig. 8). These are mainly glacial and fluvioglacial deposits (glacial retreat gravel, ice-dammed lake deposits and moraine deposits) as well as artificial backfilling close to the surface. In this region, the groundwater level is 8 m below the surface.

The excavated shaft is supported by 1 m thick slotted walls. The construction trench is shored up by five layers of struts (Fig. 9) and a strut slab made of steel-reinforced concrete. The fifth layer of struts is only needed during construction until the strut slab has been concreted. It is then removed in order to ensure a sufficient clear height for the subsequent underground works (Laupenstrasse Tunnel and station caverns).

Due to limited amount of space available, part of the shaft is under existing tracks (incl. switch point), which cannot be closed off for the entire construction period. Therefore, a temporary bridge is required over the entire construction time of the new RBS Station (Fig. 10). The temporary bridge has a span of 24 m and a width of 8 m (in order to provide sufficient space for two tracks that are 4 m apart). In the longitudinal direction, load forces are transferred via a truss girder (south side, above the shaft opening) and directly into the diaphragm wall (north side). In the transverse direction, the temporary bridge is formed of a composite structure (steel cross beams with concrete slabs laid on top). In its final state, the roof of the shaft is built as a railway bridge.

3.3 Laupenstrasse Tunnel

The Laupenstrasse Tunnel has a diameter of 7 m (through the soils) and 6.7 m (through the solid rock) in typical cross section and cuts under the SBB tracks with a cover of 11 m (Fig. 8). It consists of two parts:

- The so-called access tunnel is 123 m long and is required both during and after construction. Access to the caverns is provided by one connection tunnel each, which join the station caverns perpendicularly and, via distribution levels, lead to the functional buildings on the western ends of the station caverns. The access tunnel has a double-layered lining and is fully waterproofed when finished.
- The so-called logistics tunnel, which leads to the front of the north station cavern, is 57 m long and only present in the construction phase and is backfilled at the end of construction works.

The first 25 m of the tunnel extend through water-bearing soil (Fig. 8). As with the Laupenstrasse Shaft (Chapter 3.2), these are primarily glacial and fluvioglacial deposits as well as artificial backfilling close to the surface. In this region, the groundwater level is 1–2 m above the tunnel. After that, the tunnel extends through a 23 m long transition region with mixed face conditions. The remaining 75 m of the tunnel

bindung an die Bahnhofskavernen erfolgt mit je einem Verbindungsstollen, der senkrecht an die Bahnhofskavernen anschliesst und über Verteilebenen zum jeweiligen Funktionsgebäude an den Westenden der Bahnhofskavernen führt. Der Zugangsstollen wird im Endzustand zweischalig ausgebaut und voll abgedichtet.

- Der sogenannte Logistikstollen, der zur Stirnseite der Bahnhofskaverne Nord führt, ist 57 m lang und nur im Bauzustand vorhanden; er wird am Ende der Bauarbeiten verfüllt.

Die ersten 25 m des Stollens liegen im wasserführenden Lockergestein (Bild 8). Wie für den Schacht Laupenstrasse (Kapitel 3.2) handelt es sich dabei vorwiegend um glaziale und fluvioglaziale Ablagerungen sowie, oberflächennah, um künstliche Auffüllungen. In diesem Bereich befindet sich der Grundwasserspiegel 1–2 m oberhalb des Stollens. Anschließend befindet sich der Stollen in einem 23 m langen Übergangsbereich mit gemischter Ortsbrust. Die restlichen 75 m des Stollens befinden sich im selben Fels wie die Bahnhofskavernen (Kapitel 3.1).

Der Vortrieb des Stollens erfolgt ab dem Schacht Laupenstrasse. In der Lockergesteinsstrecke und in der Übergangszone erfolgt der Vortrieb im Vollausschub in Etappen à 1 m. Die Ausbruchsicherung besteht aus Spritzbeton ($d = 45$ cm) und Gitterträgern. Als vorausseilende Bauhilfsmassnahme ist ein Gefrierkörper vorhanden. In der Felsstrecke wird ebenfalls im Vollausschub mit Abschlagslängen von 1 m vorgerieben. Eine Ausnahme stellen die letzten 15 m der Aufweitung dar, wo aufgrund der Querschnittsgrösse respektive von Risikoüberlegungen auf Kalottenvortrieb mit zweiteiliger Unterteilung der Kalotte umgestellt wird. In der Felsstrecke wird systematisch ein Rohrschirm als vorausseilende Bauhilfsmassnahme implementiert, da das Vorhandensein von verwittertem Fels oberflächennah nicht ausgeschlossen werden kann. Die Ausbruchsicherung besteht ebenfalls aus Spritzbeton ($d = 30$ cm) und Gitterträgern. Eine Ortsbrustankerung und Mikropfähle für die Verstärkung der Kalottenwiderlager sind als Zusatzmassnahmen je nach Erfordernis vorgesehen.

Mit dem Gefrierkörper wird der Baugrund rund um den Hohlraum und im Kern verfestigt, versteift und abgedichtet. Die Dicke des Gefrierkörpers ausserhalb des Stollenprofils beträgt 1,5 m (Bild 8). Der Gefrierkörper ist zwischen 30 m (Sohle) und 58 m (First) lang und wird im Fels eingebunden. Für seine Realisierung (Solegefrieren) werden 26 Gefrierlanzen im Umfang und 16 Gefrierlanzen im Kern benötigt (Bild 11). Der Abstand der Gefrierlanzen ist 1 m. Bei der Anordnung der Gefrierlanzen wurden die potenziellen geometrischen Konflikte mit der Spriessung des Schachtes Laupenstrasse berücksichtigt sowie eine möglichst kleine Beschädigung der Bewehrung der Schlitzwände aufgrund der durchdringenden Kernbohrungen angestrebt. Die maximal zulässige Bohrungeauigkeit der gesteuerten Bohrungen (Bild 12) für die Gefrierlanzen beträgt 20 cm.



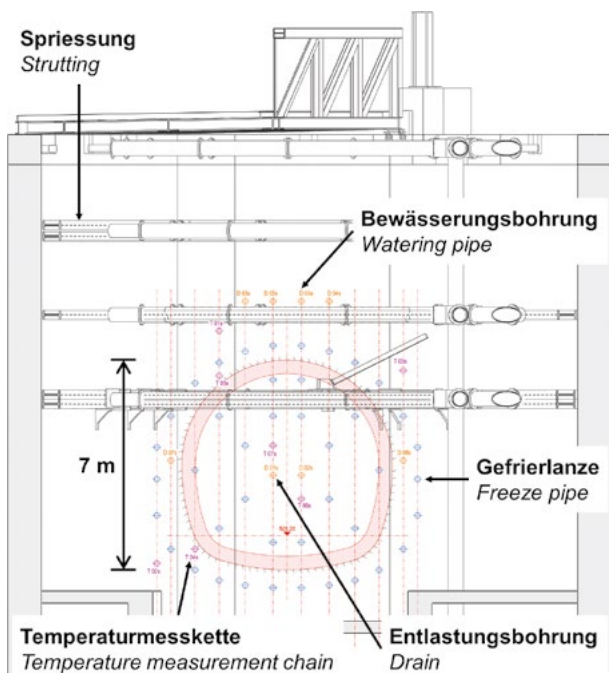
10 Schacht Laupenstrasse (Blickrichtung Ost)
Laupenstrasse Shaft (looking east)

Quelle/credit: Planergemeinschaft RBS verband

run through the same rock as the station caverns (Chapter 3.1).

The tunnel is excavated starting from the Laupenstrasse Shaft. In the soil section and in the transition zone, the excavation occurs full-face in 1 m stages. The excavation support consists of shotcrete ($d = 45$ cm) and lattice girders. A body of frozen ground is used as an anticipatory auxiliary measure. In the rock section, full-face excavation with round lengths of 1 m is also carried out. The exception to this are the final 15 m of the widening section, where, due to the size of the cross section and risk considerations, there is a switch to top heading excavation with the top heading being divided into two parts. In the rock section, a pipe umbrella is systematically built-in as an anticipatory auxiliary measure, since the presence of weathered rock close to the surface cannot be ruled out. Also in this case, the excavation support consists of shotcrete ($d = 30$ cm) and lattice girders. Face bolting and micropiles for reinforcing the top heading abutments are also provided as additional measures, as required.

The body of frozen ground is used to strengthen, harden and seal off the subsoil around the cavity and in the core. The thickness of the body of frozen ground outside the tunnel



Quelle/credit: [8]

11 Stollen Laupenstrasse – Layout der Gefriermassnahme (Querschnitt, Blick in Vortriebsrichtung)
 Laupenstrasse Tunnel – layout of ground freezing (cross section, looking in direction of advance)

Die Gefrierlanzen im Kern werden vor dem Vortriebsbeginn abgeschaltet. Ein Auftauen des Kerns wird durch die aussenliegenden Gefrierlanzen (die während des Vortriebs weiterbetrieben werden) verhindert, da somit radial keine Wärmezufuhr zum Kern erfolgen kann (der Wärmezufluss in Längsrichtung des Stollens ist ausreichend gering). Die statische und thermische Bemessung des Gefrierkörpers wurde durch die ETH Zürich (Professur für Untertagbau) durchgeführt. Die berechnete Gefrierzeit bis zum Erreichen der erforderlichen Wandstärke und des Gefrierens des Kernbereichs beträgt 20–30 Tage.

Um den Unsicherheiten betreffend die Lage des Grundwasserspiegels sowie seine saisonalen Schwankungen Rechnung zu tragen, sind oberhalb des Gefrierkörpers respektive des Stollenfirsts vier Manschettenrohre angeordnet (Bild 11), die in vier voneinander mit Packern getrennte Abschnitte unterteilt sind und vor sowie während des Auffrierens kontinuierlich mit Wasser beaufschlagt werden. Ferner sind im Kern zwei Entspannungsbohrungen angeordnet, um sicherzustellen, dass sich beim Auffrieren keine ungünstigen Porenwasserdrücke aufbauen können. Die Erfolgskontrolle der Bewässerung erfolgt mit Piezometern; diejenige der Gefriermassnahme erfolgt mit Temperaturmessketten im Randbereich und ausserhalb des Gefrierkörpers sowie mit den Entspannungsbohrungen im Kern (Dichtigkeitsbeurteilung anhand des Wasseranfalls).

3.4 Bauleistungen

Der Installationsplatz für den Abschnitt 1 befindet sich in der Nähe des Schachtes Laupenstrasse (Kapitel 3.2). Auf-

profile is 1.5 m (Fig. 8). The body of frozen ground is between 30 m (floor) and 58 m (roof) long and is embedded in the rock. In order to create it (brine freezing), 26 freezing lances are required in the perimeter and 16 in the core (Fig. 11). The distance between the freezing lances is 1 m. For the arrangement of the freezing lances, the potential geometric conflicts with the bracing of the Laupenstrasse Shaft were considered and the aim was to inflict as little damage as possible on the reinforcement of the slotted walls with the core drillings. The maximum permissible drilling inaccuracy for the freezing lance drillings (Fig. 12) is 20 cm. The freezing lances in the core are switched off prior to commencement of excavation work. The core is prevented from thawing by means of the outer freezing lances (which continue to operate during excavation), since, in this way, no heat can radially penetrate into the core (the flow of heat in the longitudinal direction of the tunnel is sufficiently low). The static and thermal design of the body of frozen ground were carried out by the ETH Zurich (Chair for Underground Construction). The calculated freezing time until the required wall thickness is reached and until the core region freezes is 20–30 days.

In order to account for the uncertainties in relation to the position of the groundwater level and its seasonal fluctuations, four watering pipes are arranged above the body of frozen ground (Fig. 11) They are divided in four sections separated from one another by means of packers and are continuously supplied with water before as well as during the freezing process. Furthermore, in order to ensure that no unfavourable pore-water pressures can build up during freezing, two relief bores are made in the core. In order to check for adequate water supply, piezometers are used. In order to check for adequate freezing, temperature measurement chains are used in the edge region and outside the body of frozen ground, while the relief bores in the core allow for the assessment of the watertightness based upon the observed water inflow).

3.4 Construction Logistics

The installation site for Section 1 is close to the Laupenstrasse Shaft (Chapter 3.2). Due to the limited amount of space available as well as the restricted access options, a platform was constructed above and next to the tracks west of Bern Central Station as well as above Laupenstrasse (Fig. 13) in order to allow supply and disposal activities to and from the construction site and to create a storage space.

Furthermore, in terms of construction logistics, the following issues regarding lack of space must be emphasised for the Laupenstrasse Shaft: Due to the presence of the struts in the shaft (Fig. 9) and the fact that the northern half of the shaft is covered by the temporary bridge (Fig. 10), the free ground space is reduced to 4 m x 11 m; in addition, the free working height in the shaft is restricted to 4 m, also on account of the struts (Fig. 11).

3.5 Settlement-reducing Measures for PostParc

As mentioned above (Chapter 3.1), the station caverns

grund der engen Platzverhältnisse sowie der beschränkten Zugangsmöglichkeiten wurde eine Plattform oberhalb und neben dem Gleisfeld westlich des Hauptbahnhofs Bern sowie oberhalb der Laupenstrasse gebaut (Bild 13), um die Ver- und Entsorgung der Baustelle zu ermöglichen sowie Lagerfläche zu kreieren.

In Bezug auf die Baulogistik sind ferner folgende Platzbeschränkungen beim Schacht Laupenstrasse zu betonen: Aufgrund des Vorhandenseins der Spriessung des Schachtes (Bild 9) und der Abdeckung der nördlichen Hälfte des Schachtes durch die Hilfsbrücke (Bild 10) reduziert sich die freie Grundrissfläche auf 4 m × 11 m; zudem beschränkt sich die freie Arbeitshöhe im Schacht, ebenfalls aufgrund der Spriessung (Bild 11), auf 4 m.

3.5 Setzungsmindernde Massnahmen PostParc

Wie oben beschrieben (Kapitel 3.1), unterfahren die Bahnhofskavernen mehrere bestehende Objekte. In diesem Kapitel wird auf die setzungsmindernden Massnahmen für das Gebäude «PostParc» näher eingegangen.

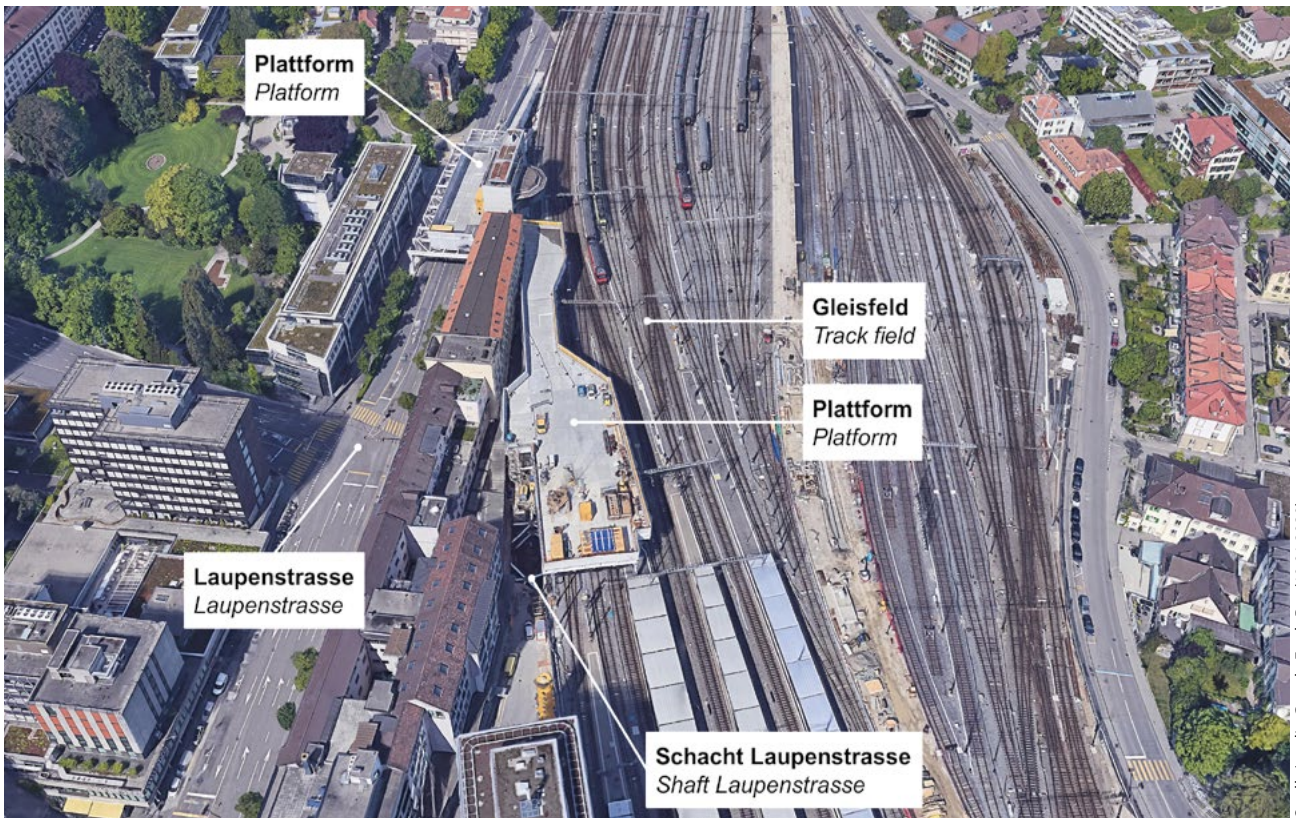
Der PostParc ist ein Gebäudekomplex, der 2016 eröffnet wurde. Für das Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» ist der

undercut several existing structures. In this chapter, the measures for reducing settlement of the PostParc building are described in greater detail.

The PostParc is a building complex that opened in 2016. With regard to the project «Expansion of Bern RBS Station», the so-called Reiterbau is of particular interest, as this building (with four or five floors) extends over the tracks of Bern Central Station in parallel with the Schanzenbrücke Bridge and is undercut by the station caverns (Figs 3 and 14). The building is 181 m long, 25 m wide and 14–25 m high. It is composed of steel and concrete with a large glass front and is built on two parallel rows of columns placed between the tracks. One row of supports (west side) consists of former postal elevator shafts that have been filled in with concrete (these used to connect the platform to the postal tunnel system) with a ground area of 8 m²; the other row of supports consists of the (solid steel) supports of the station hall (platform columns) of Bern Central Station. The distance between the station caverns and postal elevator shafts is 2–4 m, and the distance between the caverns and the platform column foundation is 11 m. The foundation loads (at dimensioning level) can reach up to 29 MN for the postal elevator shafts and up to 25 MN for the platform columns.



12 Stollen Laupenstrasse – Bohrarbeiten für die Gefriermassnahme
Laupenstrasse Tunnel – drilling works for ground freezing



Quelle/Credit: Google Earth Pro (10.01.2020)

13 Plattform, Schacht Laupenstrasse und Umgebung (Blickrichtung West)
 Platform, Laupenstrasse Shaft and surroundings (looking west)

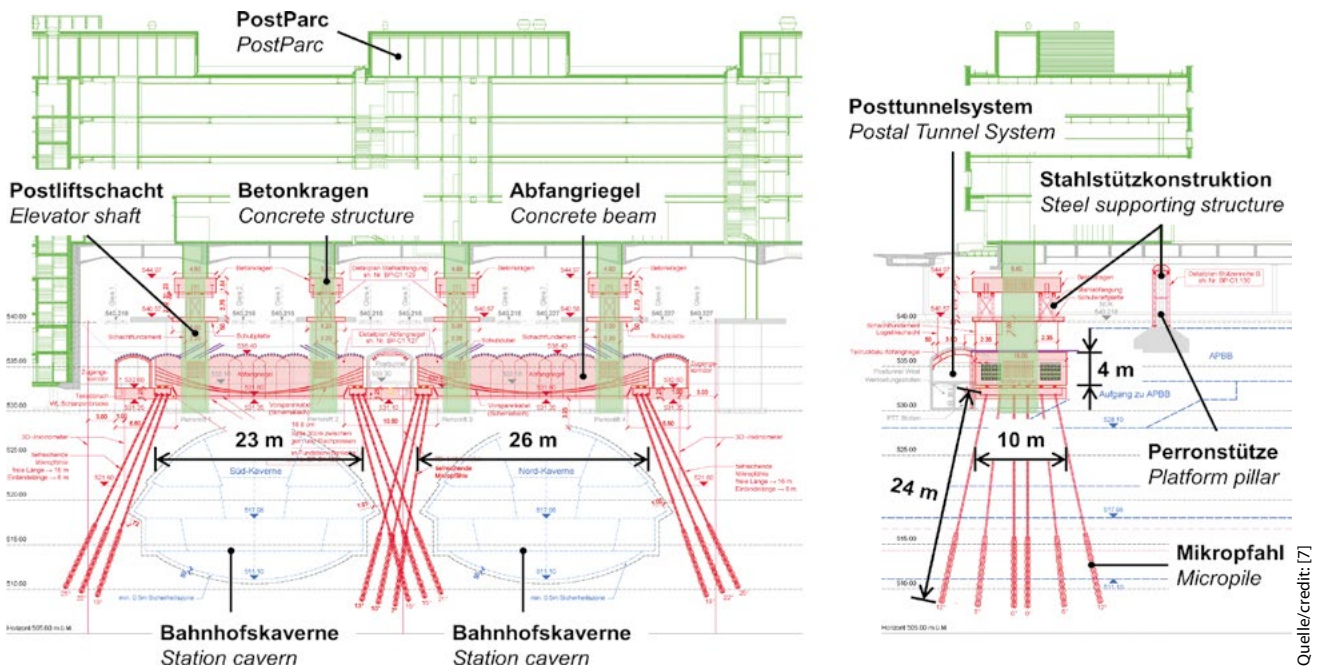
sogenannte Reiterbau von besonderem Interesse, da dieses Gebäude (mit bereichsweise vier oder fünf Stockwerken) die Gleise des Hauptbahnhofs Bern parallel zur Schanzenbrücke überspannt und von den Bahnhofskavernen unterfahren wird (Bild 3 und Bild 14). Das Gebäude ist 181 m lang, 25 m breit und 14–25 m hoch. Es hat eine Struktur aus Stahl und Beton mit einer grossen Glasfront und ist auf zwei parallelen Säulenreihen fundiert, die zwischen den Gleisen platziert sind. Eine Stützenreihe (Westseite) besteht aus ehemaligen, ausbetonierten Postliftschächten (die früher die Perrons mit dem Posttunnelsystem verbunden haben) mit einer Grundrissfläche von 8 m²; die andere Stützenreihe (Ostseite) besteht aus bereits vorhandenen Stützen (Vollstahlstützen) der Bahnhofshalle (Perronstützen) des Hauptbahnhofs Bern. Der Abstand zwischen Bahnhofskavernen und Postliftschächten beträgt 2–4 m, derjenige zu der Foundation der Perronstützen ist 11 m. Die Fundationslasten betragen (auf Dimensionierungsniveau) bis zu 29 MN für die Postliftschächte und bis zu 25 MN für die Perronstützen.

Die aufgrund des Ausbruchs der Bahnhofskavernen erwarteten Setzungen und Setzungsdifferenzen wurden anhand von 3D-FE-Berechnungen unter Berücksichtigung aller Bauphasen und aller Fundationslasten ermittelt. Rechnerisch werden differenzielle Setzungen der Postliftschächte von 10–15 mm erwartet. Gleichzeitig wurde der PostParc nachgerechnet, um seine Setzungsempfindlichkeit zu beurteilen. Diese Nachrechnung zeigte, dass differenzielle Setzungen

The expected settlements and differential settlements due to the excavation of the station caverns were determined based on 3D FE calculations in consideration of all construction phases and all foundation loads. Based on these calculations, differential settlements of 10–15 mm are expected for the postal elevator shafts. A recalculation for the PostParc was carried out in order to assess its susceptibility to settlement. This recalculation showed that differential settlements of up to 20 mm would not compromise the structural safety of the building. Therefore, the calculated differential settlements and the differential settlements that are potentially critical for the PostParc are similar. For this reason and because of the uncertainties inherent in any settlement prediction, for the case in which the settlements or differential settlements are greater than expected or excessive, compensatory measures and measures for reducing settlement are implemented or provided.

The measures for reducing settlement of the postal elevator shafts consist of three packages (Fig. 14):

1. In a first step, two prestressed underground reinforced concrete beams are built. These transfer beams are constructed underground, starting from the existing postal tunnel system (Fig. 15). The transfer beams are 23 m (south) and 26 m (north) long, 10 m wide and 4 m high. Each one is frictionally connected to two postal elevator shafts. Each transfer beam spans one station cavern and is supported by 24 m long (16 m of which as unbounded



Quelle/credit: [7]

14 Setzungsmindernde Massnahmen PostParc – Längsschnitt (links, Blickrichtung West) und Querschnitt (rechts, Blickrichtung Nord)
Settlement-reducing measures for PostParc – longitudinal section (left, looking west) and cross section (right, looking north)

von bis zu 20 mm die Tragsicherheit des Gebäudes nicht beeinträchtigen. Somit liegen die berechneten Setzungsdifferenzen und die für den PostParc möglicherweise kritischen Setzungsdifferenzen nahe beieinander. Aus diesem Grund und wegen der jeder Setzungsprognose inhärenten Unsicherheiten werden – für den Fall, dass die Setzungen und Setzungsdifferenzen grösser als erwartet respektive unzulässig sein sollten – Setzungsminderungs- und Kompensationsmassnahmen umgesetzt respektive vorgesehen.

Die setzungsmindernden Massnahmen für die Postliftschächte bestehen aus drei Paketen (Bild 14):

1. In einem ersten Schritt werden zwei unterirdische vorgespannte Stahlbetonträger realisiert. Diese Abfangriegel werden aus dem bestehenden Posttunnelsystem unterirdisch gebaut (Bild 15). Die Abfangriegel sind 23 m (Süd) respektive 26 m (Nord) lang, 10 m breit und 4 m hoch und werden mit je zwei Postliftschächten kraftschlüssig verbunden. Jeder Abfangriegel überspannt eine Bahnhofskaverne und wird auf 24 m langen (davon 16 m als freie Länge) geneigten Mikropfählen fundiert. Auf diese Weise werden die Fundamentlasten unterhalb der Bahnhofskavernen abgetragen. Um den Setzungsanteil aus der Eigenverformung der Mikropfähle zu minimieren, werden diese mittels hydraulischer Pressen (die sich zwischen Abfangriegel und Mikropfählen befinden) vorgespannt. Zusätzlich zur Setzungsreduktion tragen die Abfangriegel auch zu einer besseren Verteilung der Fundamentlasten über den Bahnhofskavernen bei, um dem Gefährdungsbild eines Durchstanzens der Postliftschächte in die Bahnhofskavernen entgegenzuwirken. Die Wirksamkeit dieses Massnahmenpakets wurde mit weiteren, detaillierteren 3D-FE-Berechnungen untersucht und bestätigt.

length) inclined micropiles. In this way, the foundation loads are carried away below the station caverns. In order to minimise the amount of settlement caused by the inherent deformation of the micropiles, these are preloaded by means of hydraulic presses (arranged between the transfer beams and micropiles). In addition to reducing settlement, the transfer beams also serve to improve the distribution of foundation loads across the station caverns, in order to counteract the hazard of the postal elevator shafts falling through into the station caverns. The effectiveness of this package of measures was investigated and confirmed using additional, more detailed 3D FE calculations.

2. In a second step, the preparation works for the third package of measures are carried out. This involves the use of



Quelle/credit: Planergemeinschaft RBS/verbündet

15 Setzungsmindernde Massnahmen PostParc – Vortriebsarbeiten aus dem Posttunnelsystem
Settlement-reducing measures for PostParc – excavation work from the postal tunnel system

2. In einem zweiten Schritt werden die Vorbereitungsarbeiten für das dritte Massnahmenpaket durchgeführt. Dabei werden massive temporäre Betonkragen ($L = 9,8$ m, $B = 4,6$ m, $H = 1,6$ m) rund um die Postliftschächte betoniert, um den Lastabtrag in den temporären Stahlstützkonstruktionen des dritten Massnahmenpakets zu ermöglichen. Diese Arbeiten erfolgen auf der Ebene der Perrons des Hauptbahnhofs Bern.
3. Der eigentliche aktive Setzungsausgleich wird in einem dritten Schritt und nur dann realisiert, wenn es trotz der anderen setzungsmindernden Massnahmen notwendig ist. Bei Bedarf werden zwei temporäre Stahlstützkonstruktionen pro Postliftschacht installiert, die es erlauben, die gesamte Fundamentlast der Postliftschächte aufzunehmen, wodurch es möglich wird, die Postliftschächte zu schneiden, das Gebäude vom unteren Teil seiner Fundamente abzukoppeln, mit Hilfe von hydraulischen Pressen zu heben und somit allfällige unzulässige Setzungen aktiv auszugleichen.

Um eine aktive Setzungskompensation an den Perronstützen vornehmen zu können, werden sie mit Stahltürmen und hydraulischen Pressen abgefangen (Bild 14). Um den Einfluss auf die Personenhydraulik auf der Ebene der Perrons des Hauptbahnhofs Bern möglichst zu minimieren, werden diese Massnahmen nicht a priori, sondern nur im Bedarfsfall implementiert. Als Entscheidungsgrundlage dient der Überwachungsplan mit den darin definierten Interventionswerten.

4 Zulaufstrecke – Abschnitte 2–7

4.1 Bahnhofeinfahrt – Abschnitt 2

Der Abschnitt 2 befindet sich unterhalb der östlichen Gleiszufahrt des Hauptbahnhofs Bern (Bild 2). Er ist 300–350 m lang und beinhaltet die Zusammenfügung/Entflechtung der vier Gleise zwischen den Bahnhofskavernen und dem Verzweigungsbauwerk (Abschnitt 3, Kapitel 4.2). Ab dem östlichen Ende der Bahnhofskavernen verlaufen die vier Gleise zuerst in jeweils einem Einspurtunnel mit einem Ausbruchquerschnitt von 51 m^2 (Bild 16). Aus diesen werden zuerst die zwei mittleren Einspurröhren zu einem Doppelspurtunnel zusammengefasst. Anschliessend, auf den letzten 20 m in Richtung Eilgut, kommt ein Brillenprofil zur Anwendung. Das Brillenprofil besteht aus dem mittig liegenden Doppelspurtunnel und jeweils einem aussen liegenden Einspurtunnel (Bild 17). Alle Bauwerke in diesem Abschnitt sind zweischalig ausgebaut und teilabgedichtet.

Die Vortriebe des Abschnitts 2 erfolgen vom Eilgut her (Abschnitt 3, Kapitel 4.2). Der Ausbruch erfolgt mit kurzen Abschlagslängen als maschinenunterstützter Vortrieb im Fels (MUF) im Kalottenvortrieb und als seitliche Erweiterung. Die Überdeckung beträgt 5–12 m. Die Ausbruchsicherung besteht aus systematisch eingebauten Stahlbögen und Spritzbeton. Im Bereich der Unterquerung des bestehenden RBS-Bahnhofs (mit einem Abstand zwischen Tunnelfirst und Foundationen von 7 m) sowie in Bereichen mit geringer

temporary solid concrete collars ($L = 9.8$ m, $W = 4.6$ m, $H = 1.6$ m) around the postal elevator shafts in order to allow the loads to be transferred into the temporary steel support structures of the third package of measures. These works take place at the level of the platforms of Bern Central Station.

3. The actual active settlement compensation is implemented in a third step and only if it is required in spite of the other settlement-reducing measures. If necessary, two temporary steel support structures per postal elevator shaft are installed. These structures are able to take the full foundation load of the postal elevator shafts, thus making it possible to cut through the postal elevator shaft, uncouple the building from the lower portion of its foundations, elevate the building using hydraulic presses and thus actively compensate for any excessive settlements.

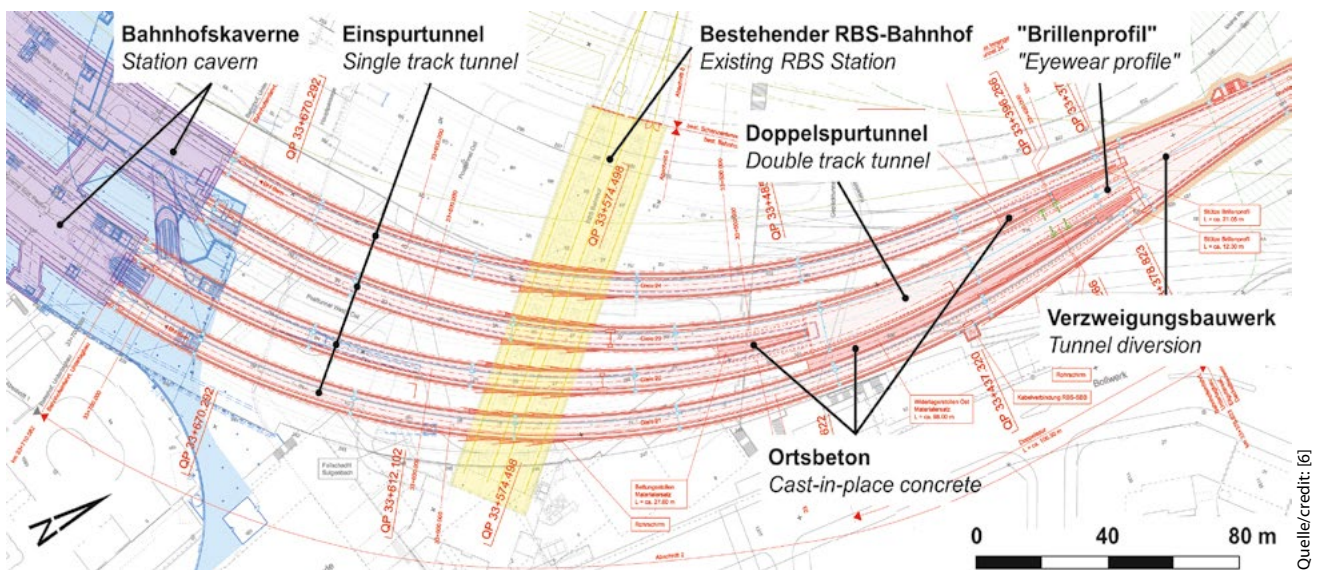
In order to be able to apply active settlement compensation to the platform columns, they are propped up by means of steel towers and hydraulic presses (Fig. 14). In order to minimise as far as possible the influence on pedestrian dynamics at the level of Bern Central Station platforms, these measures are only implemented if required rather than a priori. The basis for this decision is the monitoring plan and the intervention values defined therein.

4 Access Line – Sections 2–7

4.1 Station Entrance – Section 2

Section 2 is located under the eastern track entrance to Bern Central Station (Fig. 2). It is 300–350 m long and comprise the point at which the four tracks enter the station caverns and the branch-off point (Section 3, Chapter 4.2). From the eastern end of the station caverns, the four tracks initially extend into one single-track tunnel each, each with an excavation cross-sectional area of 51 m^2 (Fig. 16). From there, the two central tunnels initially merge into a double-track tunnel. Then, for the last 20 m towards Eilgut, an «eyewear profile» is used. The «eyewear profile» consists of the central double-track tunnel and one outer single-track tunnel on either side (Fig. 17). All structures in this section have double-layered lining and are partially waterproofed.

Excavation work in Section 2 starts at Eilgut (Section 3, Chapter 4.2). It occurs with short round lengths and take the form of mechanically assisted tunnelling in rock for top heading excavation and lateral expansion. The cover is 5–12 m. The excavation support consists of systematically installed steel arches and shotcrete. In the region where the access line undercuts the existing RBS Station (with a distance between the tunnel roof and foundation of 7 m) as well as in regions with a small cover, pre-support measures consisting of pipe umbrellas and face bolting are additionally provided. Where necessary, the top heading abutments are reinforced with micropiles and relief bores are made in the face. In regions where the distance between the tunnels is short (< 3 m), the existing rock has to be replaced with other material. For



16 Bahnhofs-einfahrt – Situation
Station entrance – situation

Überdeckung sind zusätzlich eine vorausseilende Sicherung mit Rohrschirmen sowie eine Ortsbrustankerung vorgesehen. Wo erforderlich, werden die Kalottenwiderlager mit Mikropfählen verstärkt und Entlastungsbohrungen in der Ortsbrust angeordnet. In Bereichen mit geringem Abstand (< 3 m) zwischen den Tunnelröhren ist ein Materialersatz des anstehenden Felsens notwendig. Dafür werden zusätzliche Stollen ausgebrochen, in die eine Stützkonstruktion betoniert wird (Bild 16). Ein ähnliches Vorgehen ist für den Bau des Brillenprofils erforderlich (Bild 17).

Die mittels 2D-FE-Berechnungen prognostizierten Setzungen sowie eine Nachrechnung des bestehenden RBS-Bahnhofs haben gezeigt, dass dessen Voutendecke vorgängig zu verstärken ist. Diese Verstärkung erfolgt mittels eingeborhter Schubdübel. Zusätzlich wird eine Hilfskonstruktion aus Stahl eingebaut, die im Bedarfsfall einen Teil der Kräfte aufnehmen wird.

4.2 Eilgutareal – Abschnitt 3

Der 170 m lange Abschnitt 3 befindet sich unterhalb der Abstellanlage Eilgutareal und der Strassenzufahrt zum SBB-Areal ab Neubrücke-Strasse (Bild 2). In diesem Abschnitt erfolgt die Zusammenlegung/Auffächerung der vier- zur zweispurigen Gleislage zwischen der Aufweitung der Bahnhofs-einfahrt (Abschnitt 2, Kapitel 2) und dem Doppelspurtunnel (Abschnitte 4–7, Kapitel 4.3–4.6). Das Bauwerk erstreckt sich über eine Länge von 150 m, weist eine Breite von 11,5–27 m auf, ist 21 m tief und umfasst vier Untergeschosse (Bild 18): Im untersten Untergeschoss befindet sich die RBS-Gleisanlage; in den anderen Untergeschossen sind technische Räume, bahntechnische Anlagen und Dienstparkplätze für die RBS und die SBB beherbergt. Auf der Südseite des Bauwerks befindet sich ein Notausstieg. Die Abdichtung der Bauwerke erfolgt nach dem drainierenden Prinzip.

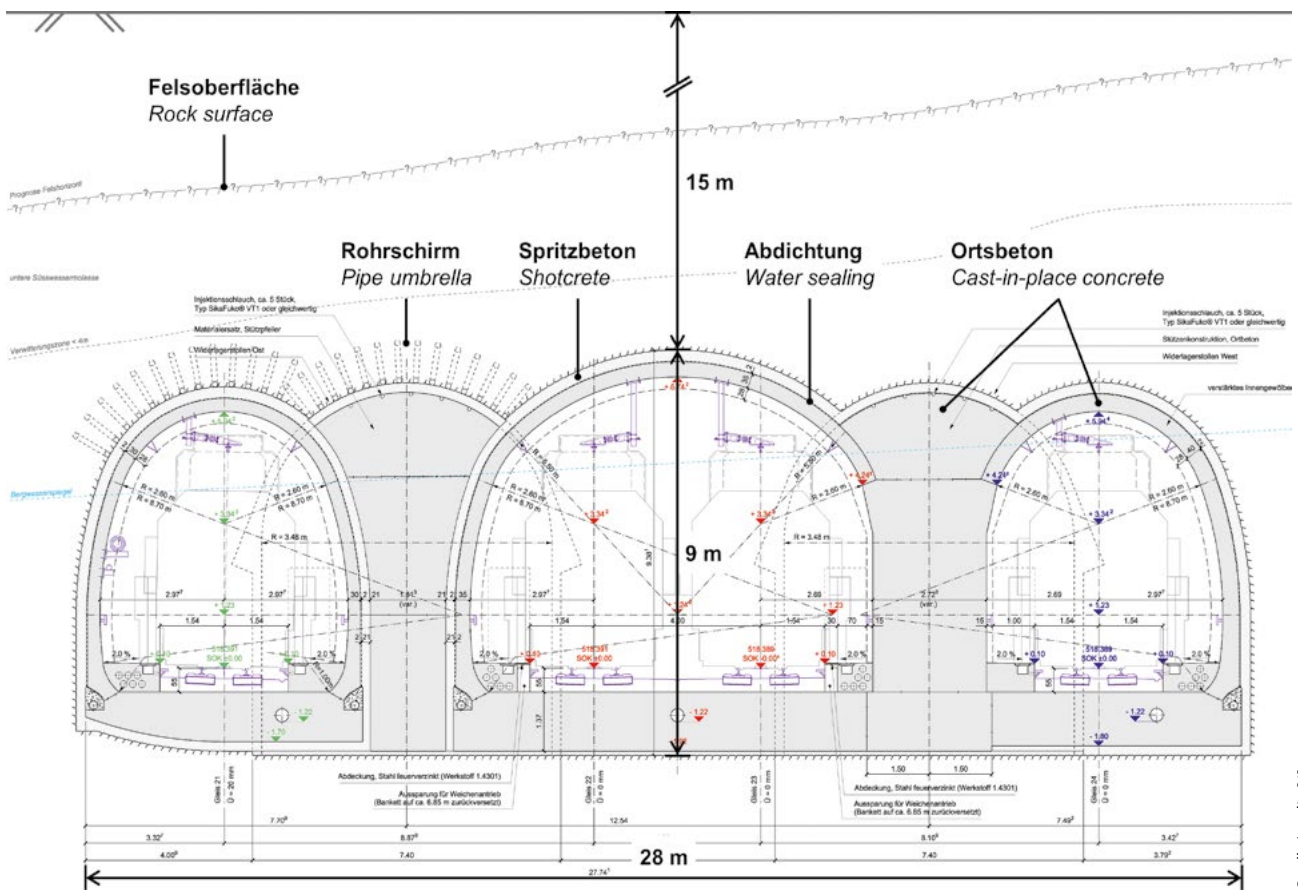
for this purpose, additional tunnels are excavated into the rock in which a support structure is concreted into (Fig. 16). A similar procedure is also required for the construction of the «eyewear profile» structure (Fig. 17).

The settlements predicted by means of 2D FE calculations and a recalculation of the existing RBS Station have shown that the angle vaulted ceiling thereof has to be reinforced beforehand. This reinforcement consists of shear connectors drilled into the ceiling. Additionally, a steel auxiliary structure is installed, which can absorb some of the forces when needed.

4.2 Eilgutareal – Section 3

The 170 m long Section 3 is located underneath the Eilgutareal storage sidings and the road entrance to the SBB site from the Neubrücke-Strasse (Fig. 2). This section is where the four tracks merge to form two tracks between the widening of the station entrance (Section 2, Chapter 2) and the double-track tunnel (Sections 4–7, Chapter 4.3–4.6). The structure extends for a length of 150 m, with a width of 11.5–27 m, a depth of 21 m and four underground levels (Fig. 18): The lowest level houses the RBS track system; the other levels house technical rooms, rail technology systems and RBS and SBB employee parking lots. There is an emergency exit on the south side of the structure. The structures are waterproofed according to the drainage principle.

In the upper region as well as in form of a channel near to the access shaft, the structure lies through partially water-bearing soils. These are mainly ice-dammed lake deposits and moraine deposits as well as artificial backfilling close to the surface. The thickness of the soil layers varies between 7 m (west side) and 18 m (east side), and therefore the structure has to contend with mixed geology. The groundwater level is 7 m below the surface here.



Quelle/credit: [6]

17 Bahnhofsanfahrt – Querschnitt Brillenprofil (Blick in Vortriebsrichtung)
Station entrance – cross section of «eyewear profile» (looking in direction of advance)

Im oberen Bereich sowie in Form einer Rinne beim Zugangsschacht liegt das Bauwerk in teilweise wasserführenden Lockergesteinen. Dabei handelt es sich vorwiegend um Rücktausedimente und Moränenablagerungen sowie, oberflächennah, um künstliche Auffüllungen. Die Mächtigkeit der Lockergesteine variiert zwischen 7 m (Westseite) und 18 m (Ostseite), sodass das Bauwerk in gemischter Geologie zu liegen kommt. Der Grundwasserspiegel liegt 7 m unterhalb der Geländeoberkante.

Aufgrund der geringen Überdeckung (< 2 m), der anstehenden Geologie und der erforderlichen Abmessungen des unterirdischen Bauwerks wird dieser Abschnitt als Tagbautunnel in der Deckelbauweise erstellt (Bild 18 und Bild 19). Der Deckel ist auf überschnittene Bohrpfähle (Ø = 1,3 m, L = 24 m) gelagert und wird in drei Etappen realisiert, um den Erfordernissen des Bahnbetriebs des Hauptbahnhofs Bern (kürzestmögliche Ausserbetriebnahme der Abstellgleise) Rechnung zu tragen. Im Bereich der minimalen Bauwerksbreite überbrückt der 1,2 m starke Deckel die gesamte Spannweite stützenfrei, während im Bereich der Aufweitung eine zusätzliche Abstützung mit Scheiben vorgesehen ist.

Der Aushub unter dem Deckel erfolgt vom angrenzenden Zugangsschacht her. Die im Zugangsschacht dreilagige und im Tagbau einlagige Spriessung der Bohrpfahlwände erfolgt

Due to the small cover (< 2 m), the geology and the dimensions required for the underground structure, this section is created as a cut-and-cover tunnel (Figs 18 and 19). The cover is mounted on overcut bored piles (d = 1.3 m, L = 24 m) and is created in three stages in order to account for the requirements of railway operation in Bern Central Station (shortest possible interruption to operation of the storage sidings). In the region where the structure is at its thinnest, the 1.2 m thick cover spans the entire width without supports, whereas in the region of the widening, an additional support means with vertical slabs is provided.

The excavation work under the cover starts from the adjacent access shaft. The bored pile walls are braced with double ROR profiles at a distance of 4.5 m. This bracing consists of three layers in the access shaft and one layer in the open-cut tunnel. When choosing the support concept, requirements relating to construction logistics also had to be taken into consideration in addition to the static requirements. For this purpose, the ceiling of the fourth underground level, for example, is implemented as an additional bracing layer and suspended on the cover of the open-cut tunnel by means of temporary steel profiles. This steel structure as well as additional, temporary piles for supporting the cover are only used during the construction phase and are taken down once the inner support structure has been completed.

mit doppelten ROR-Profilen in einem Abstand von 4,5 m. Neben den statischen Anforderungen mussten bei der Wahl des Stützkonzepts vor allem die Randbedingungen aus der Baulogistik mitberücksichtigt werden. Dazu wird beispielsweise die Decke des vierten Untergeschosses bereits im Bauzustand als zusätzliche Spriesslage erstellt und mittels temporärer Stahlprofile am Deckel des Tagbaus aufgehängt. Diese Stahlkonstruktion sowie zusätzliche, temporäre Pfähle zur Abstützung des Deckels dienen nur dem Bauzustand und werden nach Erstellung des inneren Tragwerks wieder zurückgebaut.

4.3 Henkerbrännli – Abschnitt 4

Der Abschnitt 4 ist 114 m lang und befindet sich unterhalb der Neubrücke und der Strassenkreuzung Henkerbrännli (Bild 2). In diesem Abschnitt ist der Tunnel zweispurig (mit einem maximalen Ausbruchquerschnitt von 119 m²), und die Überdeckung beträgt 9–11 m (Bild 20). Der Tunnel wird zweischalig ausgebaut und teilabgedichtet.

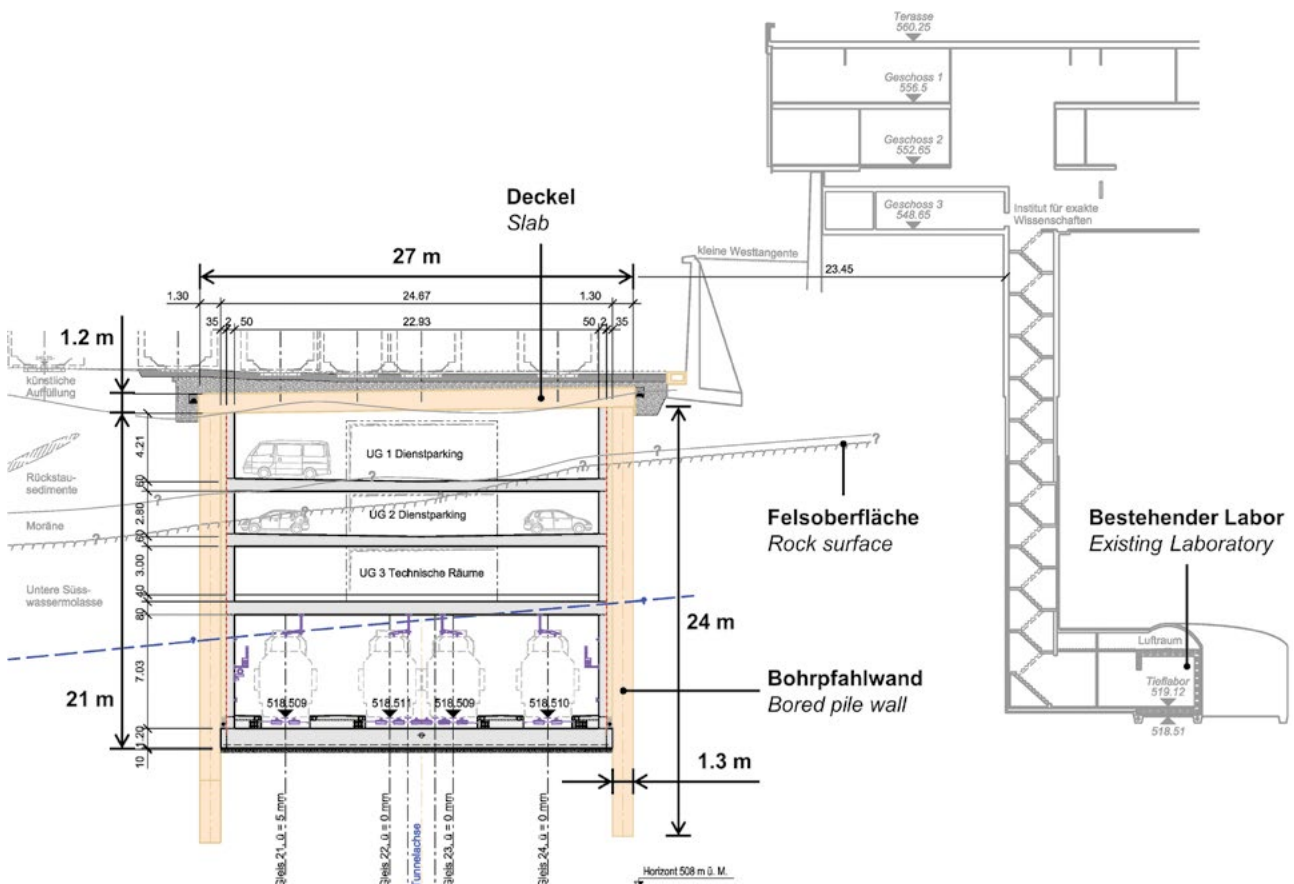
Auf der Westseite (Richtung Eilgutareal) befindet sich die Klotte vollumfänglich im Lockergestein (dieselben Lockergesteine wie im Abschnitt 3, Kapitel 4.2) mit gesättigten Sandlinsen, während in der Strosse und in der Sohle Fels erwartet wird. Richtung Abschnitt 5 (Kapitel 4.4) steigt die Felsoberfläche bis zum Tunnelfirst.

4.3 Henkerbrännli – Section 4

Section 4 is 114 m long and located below the Neubrücke and the Henkerbrännli crossroads (Fig. 2). In this section, the tunnel has two tracks (with a maximum excavation cross-sectional area of 119 m²) and the cover is 9–11 m (Fig. 20). The tunnel has two-layered lining and is partially waterproofed.

On the west side (towards Eilgutareal), the top heading extends fully within soils (the same soils as in Section 3, Chapter 4.2) with saturated sand lenses, whereas the bench and invert are expected to be in rock. The top of the rock layer rises to the level of the tunnel roof as it approaches Section 5 (Chapter 4.4).

Tunnelling starts at Section 5 and takes the form of mechanically assisted tunnelling in soft ground during top heading excavation (Fig. 20). A double, grouted pipe umbrella (35 + 22 pipes, 15 m long and with 5 m overlap), systematic face bolting (43 face bolts, 16 m long and with 6 m overlap) and pre-drilling of drainage pipes (3 pipes, 35 m long and with 5 m overlap) are provided as preventive auxiliary measures. The excavation support consists of shotcrete, steel arches and backfilling concrete with a total thickness of 35 cm. Where necessary, the top heading abutments are reinforced with micropiles.



18 Eilgutareal – Querschnitt (Blickrichtung West)
Eilgutareal – cross section (looking west)



Quelle/credit: Planergemeinschaft RBS

19 Eilgutareal – Betonierarbeiten Deckel (Blickrichtung Hauptbahnhof Bern)
Eilgutareal – concreting works for cover (looking towards Bern Central Station)

Der Vortrieb erfolgt vom Abschnitt 5 her als maschinenunterstützter Vortrieb im Lockergestein (MUL) im Kalottenvortrieb (Bild 20). Als vorausseilende Bauhilfsmassnahmen sind ein doppelter ausinjizierter Rohrschirm (35 + 22 Rohre mit 15 m Länge und 5 m Überlappung), eine systematische Ortsbrustankerung (43 Ortsbrustanker mit 16 m Länge und 6 m Überlappung) sowie vorausseilende Drainagebohrungen (3 St. mit 35 m Länge und 5 m Überlappung) vorgesehen. Die Ausbruchsicherung besteht aus Spritzbeton, Stahlbogen und Hinterfüllbeton mit einer Gesamtstärke von 35 cm. Wo erforderlich, werden die Kalottenwiderlager mit Mikropfählen verstärkt.

4.4 Bierhübeli – Abschnitt 5

Im 277 m langen Abschnitt 5 befindet sich der Doppelspurtunnel im Nahbereich der ansteigenden Neubrückstrasse Richtung Bierhübeli (Bild 2). In diesem Abschnitt nimmt die Überdeckung von 11 m bis auf 25 m zu. Auch hier wird der Tunnel zweischalig ausgebaut und teilabgedichtet.

Der Vortrieb erfolgt als maschinenunterstützter Vortrieb im Fels (MUF) von der Baugrube im Wildpark (Abschnitt 6, Kapitel 4.5) her. Die Abmessungen des Tunnels sowie das Vortriebs- und Sicherungskonzept sind grundsätzlich dieselben wie für den Abschnitt 4 (Kapitel 4.3, Bild 20). Die

4.4 Bierhübeli – Section 5

The 277 m long Section 5 comprises the double-track tunnel close to where the Neubrückstrasse rises towards Bierhübeli (Fig. 2). In this section, the cover rises from 11 m to 25 m. Here, too, the tunnel has a double-layered lining and is partially waterproofed.

Excavation work takes the form of mechanically assisted tunnelling in rock, starting at the construction trench in Wildpark (Section 6, Chapter 4.5). The dimensions of the tunnel and the excavation and support concept are in principle the same as for Section 4 (Chapter 4.3, Fig. 20). The main differences are that the pipe roofing umbrella in Section 5 is a single (31 pipes, 13 m long and with 3 m overlap) as opposed to a double system and that the face bolting is less dense (15 face bolts, 16 m long and with 6 m overlap). The decision to use a single pipe roofing umbrella over the entire length of Section 5 was made for the following reasons: better control of geological hazards (e.g. cave-in); uniformity of the excavation and support concept over two sections (with a total length of 391 m); uniformity of decision-making; greater cost and schedule security.

4.5 Wildpark – Section 6

Section 6 is located in the region of the so-called Wildpark and comprises the 163 m long, two-track junction from the

Hauptunterschiede bestehen darin, dass der Rohrschirm im Abschnitt 5 einfach (31 Rohre mit 13 m Länge und 3 m Überlappung) und nicht doppelt ausgeführt wird und dass die Ortsbrustankerung weniger dicht ist (15 Ortsbrustanker mit 16 m Länge und 6 m Überlappung). Der Entscheid, einen einfachen Rohrschirm über die gesamte Länge des Abschnitts 5 einzubauen, wurde aus folgenden Gründen getroffen: bessere Beherrschung der geologisch bedingten Gefährdungsbilder (z. B. Niederbruch); Vereinheitlichung des Vortriebs- und Sicherungskonzepts über zwei Abschnitte (mit einer Gesamtlänge von 391 m); Vereinheitlichung der Entscheidungsfindung; grössere Kosten- und Termisicherheit.

4.5 Wildpark – Abschnitt 6

Der Abschnitt 6 befindet sich im Bereich des sogenannten Wildparks und beinhaltet die 163 m lange, zweispurige Abzweigung ab dem bestehenden RBS-Schanzentunnel (Bild 2), die im Tagbau in einer offenen Baugrube (Bild 21) realisiert wird. In diesem Abschnitt wird zudem ein Notausstieg mit technischen Räumen erstellt.

Die Baugrube erstreckt sich über eine Länge von 165 m, ist 22–40 m breit und bis zu 31 m tief, wobei sich die obere Hälfte im Lockergestein befindet (Bild 21). Der Baugrubenabschluss besteht aus überschnittenen und aufgelösten Bohrpfahlwänden, die mit bis zu fünf Ankerlagen rückverankert sind (Bild 22). Zudem kommen noch rückverankerte Rühlwände, Mikropfahlwände und Nagelwände zum Einsatz.

Um die neue Zulaufstrecke in die bestehende RBS-Infrastruktur schleifend einzubinden, sind die vorherige Freilegung und der Abbruch des bestehenden RBS-Schanzentunnels unter Betrieb erforderlich. Für die sehr anspruchsvolle und einzigartige Massnahme wird das bestehende, unbewehrte Gewölbe vorgängig mittels HEB-Stahlbögen alle 0,8 m sowie einer Längsaussteifung mit überlappenden Gewindestangen und Schalungsgittern als Schutz vor Abplatzungen verstärkt (Bild 23). Die Freilegung des bestehenden Gewölbes erfolgt schonend und unter ständiger Überwachung durch geodätische und Erschütterungsmessungen sowie regelmässige visuelle Kontrollen und Rissaufnahmen. Der Abbruch erfolgt nach vorheriger Segmentierung der Gewölbeabschnitte in Querrichtung während Totalsperren am Wochenende. Aus bahnbetrieblichen Gründen sind dazu mehrere Wochenenden vorgesehen. Die nachfolgenden Bauarbeiten für den Neubau der Abzweigung erfolgen mit wenigen Ausnahmen unter Bahnbetrieb.

Der Tagbautunnel (Neubau) weist eine Überdeckung von 20 m auf. Er besteht aus einem halbkreisförmigen Gewölbe mit einem Durchmesser von 13 m, welches auf 2,5 m hohe, gewölbte Wände übergeht und durch eine 1 m dicke horizontale Bodenplatte abgeschlossen wird (Bild 21).

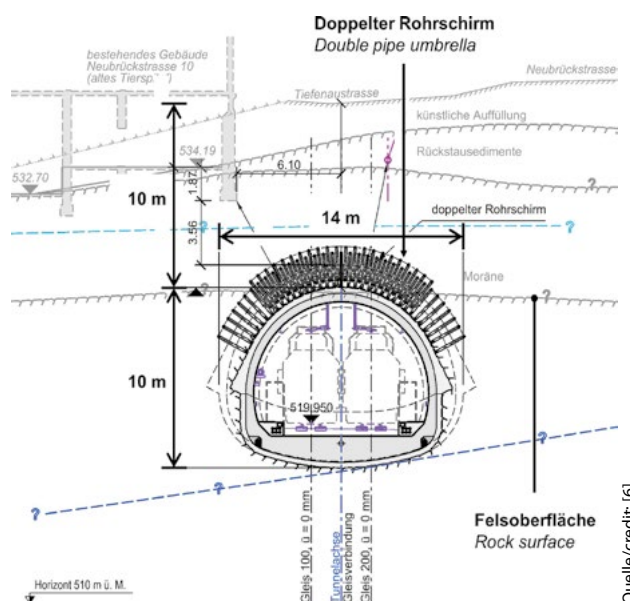
Da aufgrund des Bahnbetriebs maximal ein Gleis für wenige Wochen in den Sommerferien total gesperrt werden

existing RBS Schanzentunnel (Fig. 2). This fork is constructed using the cut-and-cover method in an open construction trench (Fig. 21). In this section, an emergency exit with technical rooms is also provided.

The construction trench extends for a length of 165 m, with a width of 22–40 m and depth of 31 m, the upper half of the trench extending through soil (Fig. 21). The construction trench is supported with overcut and undercut bored pile walls that is back-anchored by means of five layers of rock bolts (Fig. 22). In addition, back-anchored soldier pile walls, micropile walls and soil nail walls are used.

In order to link the new access line with the existing RBS infrastructure, the existing RBS Schanzentunnel has to be uncovered and demolished while still in operation. This highly demanding and exceptional measure requires the existing, non-reinforced vault to be reinforced beforehand by means of HEB steel arches every 0.8 m as well as longitudinal bracing with overlapping threaded rods and formwork mesh as protection against spalling (Fig. 23). The existing vault is opened carefully and with continuous monitoring by means of geodetic and tremor measurements as well as regular visual inspections and crack monitoring. Demolition takes place after segmentation of the vault portions in the transverse direction during total closure of the tunnel at weekends. For railway operation reasons, several weekends are planned for this. The subsequent construction works for the new junction takes place while the railway is still operating, with few exceptions.

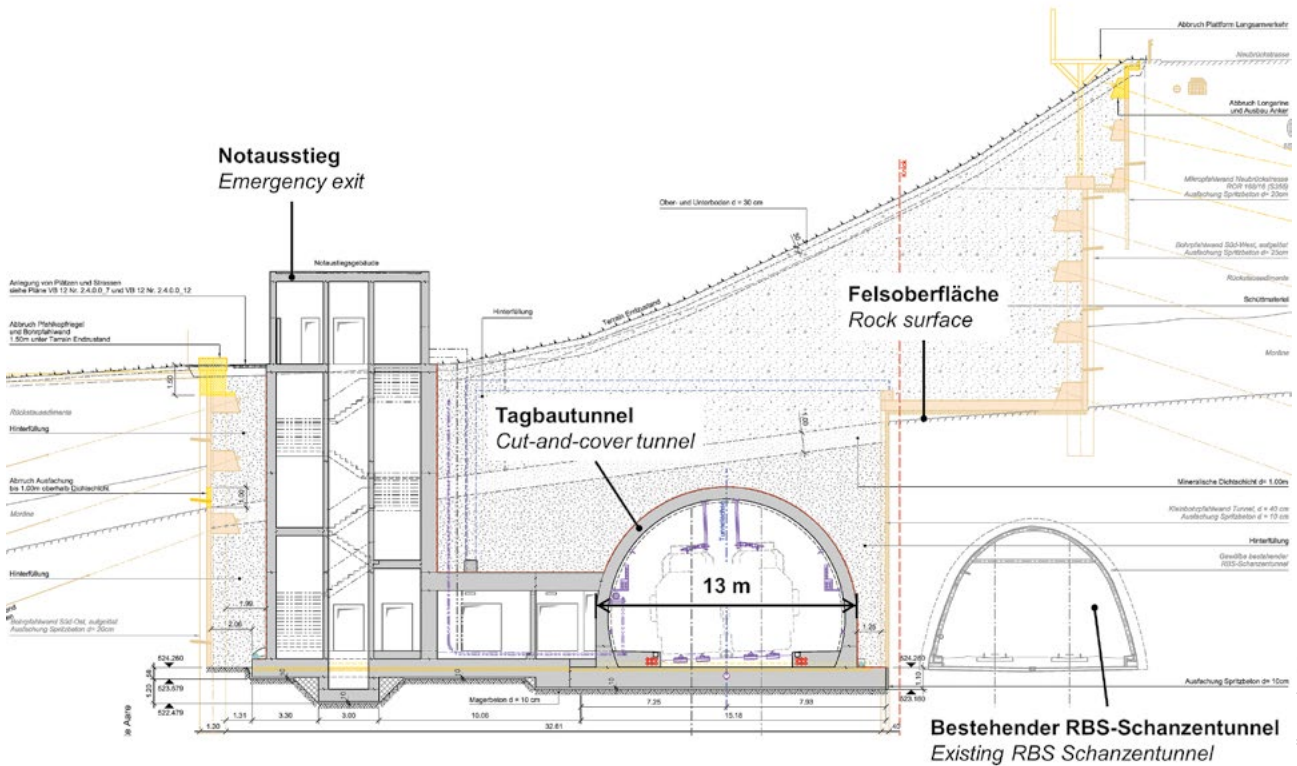
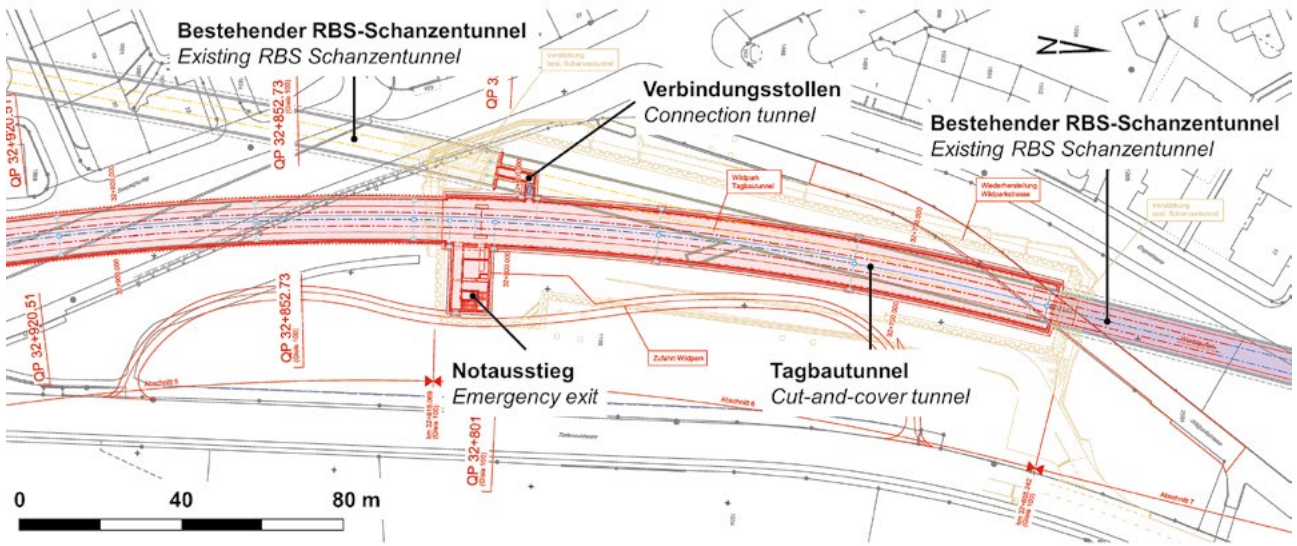
The cut-and-cover tunnel (new) has a cover of 20 m. It consists of a semicircular vault with a diameter of 13 m, which runs over 2.5 m high, curved walls, and finally there is a 1 m thick, horizontal floor slab (Fig. 21).



20 Henkerbrännli – Querschnitt (Blick in Vortriebsrichtung)
Henkerbrännli – cross section (looking in direction of advance)

Quelle/credit: [6]

Expansion of Bern RBS Station • Challenging Urban Tunnel Construction



21 Wildpark – Situation (oben) und Querschnitt (unten, Blickrichtung Süd)
Wildpark – situation (top) and cross section (bottom, looking south)

kann, ist die Erstellung der Bodenplatte in vier Längsetappen über mehrere Jahre verteilt erforderlich. Die Verschwenkung vom alten auf das neue Gleis mit Inbetriebnahme des neuen RBS-Bahnhofs erfolgt mittels provisorischer Weichen. Das Tunnelgewölbe kann aufgrund der schneidenden Verbindung zwischen neuem und altem Trasse erst nach der Inbetriebnahme des neuen RBS-Bahnhofs erstellt werden. Der Bau des Tunnelgewölbes sowie die Abdichtung und anschließende Wiederauffüllung erfolgen vollumfänglich unter laufendem Bahnbetrieb.

Because it is only possible to completely close a single track for a few weeks during the summer holidays, the floor slab has to be created bit by bit in four longitudinal sections over several years. The switching from the old to the new track upon commissioning of the new RBS Station is done by means of a temporary set of switch points. Due to the intersecting connection between the new and old line, the tunnel vault can only be created after the new RBS Station has been commissioned. The construction of the tunnel vault as well as the waterproofing and subsequent backfilling take place entirely while the railway is in operation.

Quelle/credit: [6]

4.6 Schanzentunnel (Bestand, Zufahrtstunnel) – Abschnitt 7

Der Abschnitt 7 beinhaltet die Instandsetzung des bestehenden RBS-Schanzentunnels entlang der 442 m, welche zwischen dem Bereich Wildpark (Abschnitt 6, Kapitel 4.5) und dem bestehenden Portal an der Tiefenastrasse verlaufen und weiterbetrieben werden (Bild 2). Dabei werden Unterbau (Tunnelsohle) und Oberbau der bestehenden Bahnanlage neu erstellt. Die Bauarbeiten erfolgen im Dreischichtbetrieb (die Hauptarbeiten nachts) unter einspurigem Bahnbetrieb während der Sommerferien.

5 Ausserbetriebnahme der bestehenden Anlagen – Abschnitte 8–9

5.1 Schanzentunnel (Bestand, Ausserbetriebnahme) – Abschnitt 8

Der Abschnitt 8 beinhaltet die Ausserbetriebnahme des bestehenden RBS-Schanzentunnels (Bild 2) zwischen dem Bereich Wildpark (Abschnitt 6, Kapitel 4.5) und dem bestehenden RBS-Bahnhof (Abschnitt 9, Kapitel 5.2). Die bahntechnischen Installationen werden rückgebaut. Der Schotteroberbau wird im Tunnel belassen. Der bestehende RBS-Schanzentunnel wird beim Portal zur Baugrube im

4.6 Schanzentunnel (Existing, to be Access Tunnel) – Section 7

Section 7 involves repairing the existing RBS Schanzentunnel along the 442 m extending between the Wildpark area (Section 6, Chapter 4.5) and the existing portal on Tiefenastrasse. This stretch of track will continue to be operated (Fig. 2). The substructure (tunnel floor) and superstructure of the existing railway track is rebuilt. The construction works are carried out in three shifts (the main work takes place at night) with one track remaining operational during the summer holidays.

5 Decommissioning the Existing Facilities – Sections 8–9

5.1 Schanzentunnel (Existing, to be Decommissioned) – Section 8

Section 8 involves decommissioning the existing RBS Schanzentunnel (Fig. 2) between the Wildpark area (Section 6, Chapter 4.5) and the existing RBS Station (Section 9, Chapter 5.2). The railway installations are dismantled. The ballast superstructure is left in the tunnel. The existing RBS Schanzentunnel is sealed off at the portal to the construction trench in Wildpark by means of a concrete wall. A man-sized connection tunnel between the existing tunnel and



22 Wildpark – Baugrube (Blickrichtung Süd)
Wildpark – construction trench (looking south)

Quelle/credit: Planergemeinschaft RBS-verbündet



Quelle/credit: Planergemeinschaft RBS/verbindet

23 *Bestehender RBS-Schanzentunnel – Verstärkung mit Stahlbögen*
Existing RBS Schanzentunnel – reinforcement with steel arches

Wildpark hin mit einer Betonwand verschlossen. Für Unterhaltsarbeiten und Kontrollgänge wird ein begehbare Verbindungsstollen zwischen bestehendem und neuem Tunnel erstellt. Auf der Seite des bestehenden RBS-Bahnhofs wird ebenfalls eine Abschlusswand erstellt. Diese wird mit einem Servicetor mit Tür ausgestattet und stellt einen mit einem Kleintransporter befahrbaren Zugang dar.

5.2 RBS-Bahnhof (Bestand, Ausserbetriebnahme) – Abschnitt 9

Neben dem bestehenden RBS-Schanzentunnel (Abschnitt 8, Kapitel 5.1) wird auch der bestehende RBS-Bahnhof (Bild 2) ausser Betrieb genommen (Abschnitt 9). Alle bahntechnischen Installationen inklusive Gleise und Schotteroberbau werden rückgebaut. Anschliessend wird der bestehende RBS-Bahnhof im Rohbau der SBB übergeben.

6 Schlussbemerkungen

Das Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» wurde vom Bundesamt für Verkehr (BAV) im Mai 2017 bewilligt [1]. Die Bauarbeiten starteten im Juli 2017 [3]. Bis Ende 2019 (Zeitpunkt des Verfassens des vorliegenden Beitrags) konnten der Schacht Laupenstrasse (Abschnitt 1, Kapitel 3.2), Teile der setzungsmindernden Massnahmen beim PostParc (Abschnitt 1, Kapitel 3.5), Teile des Deckels im Eilgutareal (Abschnitt 3, Kapitel 4.2) und Teile der Baugrube im Wildpark sowie die vorgängige Verstärkung des abzubrechenden Gewölbes des bestehenden RBS-Schanzentunnels (Abschnitt 6, 4.5) realisiert werden. Die Bauarbeiten für den Stollen Laupenstrasse (Abschnitt 1, Kapitel 3.2) starteten im Dezember 2019. Der Baubeginn der Hauptarbeiten ist für September 2020 (Zulaufstrecke, Abschnitte 2–7, Kapitel 4) respektive November 2020 (Bahnhofskavernen, Abschnitt 1, Kapitel 3.1) geplant [5] [6]. Die Inbetriebnahme des neuen RBS-Tiefbahnhofs soll

the new tunnel is created for maintenance work and inspection purposes. A wall is also used to seal off the existing RBS Station. It is fitted with a service door with a smaller door and provides access for light commercial vehicles.

5.2 RBS Station (Existing, to be Decommissioned) – Section 9

In addition to the existing RBS Schanzentunnel (Section 8, Chapter 5.1), the existing RBS Station (Fig. 2) is also decommissioned (Section 9). All railway installations including tracks and ballast superstructure are dismantled. Then, the shell of the existing RBS Station is transferred to the SBB.

6 Final Remarks

The project «Expansion of Bern RBS Station» was approved by the Federal Transport Office (BAV) in May 2017 [1]. Construction work started in July 2017 [3]. The Laupenstrasse Shaft (Section 1, Chapter 3.2), parts of the settlement-reducing measures for the PostParc (Section 1, Chapter 3.5), parts of the cover in Eilgutareal (Section 3, Chapter 4.2) and parts of the construction trench in Wildpark as well as the preliminary reinforcement of the vault to be demolished of the RBS Schanzentunnel (Section 6, 4.5) were completed by the end of 2019 (the time at which this report was written). The construction works for the Laupenstrasse Tunnel (Section 1, Chapter 3.2) started in December 2019. The main works are scheduled to start in September 2020 (access line, Sections 2–7, Chapter 4) and November 2020 (station caverns, Section 1, Chapter 3.1) [5] [6]. Commissioning of the new RBS underground station is expected to take place in December 2027 [5]. End of construction is scheduled for July 2030 [6].

The total cost of the project «Expansion of Bern RBS Station» amounts to CHF 614 million [1] [3].

The project «Expansion of Bern RBS Station» is another example of a unique Swiss underground construction project that presents diverse challenges for all involved. Safe and efficient construction of the new RBS infrastructure in an urban environment while maintaining railway operation (of the SBB and RBS) and partially within existing facilities requires specific, sophisticated and, at times unusual, solutions that could only and can only be implemented through professional and constructive cooperation between all involved.

Literatur/References

- [1] <https://www.rbs.ch/der-neue-rbs-bahnhof-bern/>; 10.01.2020.
- [2] <https://www.zukunftbahnhofbern.ch/de/home/>; 10.01.2020.
- [3] Spring, D. (2018): Ausbau RBS-Bahnhof Bern – Projektentwicklung bis heute und Herausforderungen aus Sicht des Bauherrn. Swiss Tunnel Congress 2018, Fachtagung für Untertagbau, Luzern; 124–137; FGU Fachgruppe für Untertagbau.

im Dezember 2027 erfolgen [5]. Das Bauende ist für Juli 2030 geplant [6].

Die Kosten für das Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» belaufen sich auf 614 Millionen Schweizer Franken [1] [3].

Das Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» stellt ein weiteres einmaliges Projekt des schweizerischen Untertagbaus dar, das in mehrfacher Hinsicht für alle Beteiligten herausfordernd ist. Der sichere und effiziente Bau der neuen RBS-Infrastruktur in städtischer Umgebung, unter Aufrechterhaltung des Bahnbetriebs (der SBB und der RBS) und teilweise im Bestand erfordert spezifische, durchdachte und auch nicht alltägliche Lösungen, die nur dank der professionellen und konstruktiven Zusammenarbeit aller Beteiligten implementiert werden konnten respektive zu implementieren sein werden.

- [4] Ramoni M., Meystre N., Spring D. (2017): The new RBS railway station: the excavation of two large shallow caverns below the railway main station of Bern (Switzerland). Underground solutions, ITA World Tunnel Congress, Bergen; 1–10; Norwegian Tunnelling Society.
- [5] Ausbau Bahnhof Bern RBS, Ausschreibung. Teilprojekt 1 – Rohbau; Abschnitt 1; Los 1.3 Bahnhof. Planergemeinschaft RBS^{verbindet}, 17.06.2019.
- [6] Ausbau Bahnhof Bern RBS, Ausschreibung. Teilprojekt 1 – Rohbau; Abschnitte 2 bis 6, 8 und 9; Los 2.4 Untertag- und Tagbau. Planergemeinschaft RBS^{verbindet}, 12.04.2019.
- [7] Ausbau Bahnhof Bern RBS, Bauprojekt. Planergemeinschaft RBS^{verbindet}, 31.01.2016.
- [8] Ausbau Bahnhof Bern RBS, Ausführung. Teilprojekt 1 – Rohbau; Abschnitt 1; Los 1.4 Stollen Laupenstrasse. Planergemeinschaft RBS^{verbindet}, 10.12.2019.

PROJEKTDATEN

Geografische Lage

Schweiz, Kanton Bern, Gemeinde Bern
RBS-Strecke Worblaufen–Bern,
Bahn-km 32.213–33.942

Bauherr, Projekt- und Oberbauleitung

Regionalverkehr Bern-Solothurn AG (RBS),
Worblaufen/CH

Planung und Bauleitung

Planergemeinschaft RBS^{verbindet}:
Basler & Hofmann AG, Esslingen/CH;
B+S AG, Bern/CH;
Emch+Berger AG, Bern/CH;
Theo Hotz Partner AG, Zürich/CH;
diverse Subplaner

Ausführung/Inbetriebnahme [3] [5] [6]

2017–2030/2027

Kosten [1] [3]

614 Millionen Schweizer Franken

Hauptmengen [7]

Aushub (Tagbau), fest:	170 000 m ³
Ausbruch (Untertagbau), fest	265 000 m ³
Abbruch/Rückbau, fest:	35 000 m ³
Beton/Spritzbeton inkl. Rückprall:	160 000 m ³
Stahl:	16 000 t
Kies (Hinter- und Auffüllung, Planie):	80 000 m ³

PROJECT DATA

Geographical location

Switzerland, Canton of Bern, Municipality of Bern
RBS line Worblaufen–Bern,
rail km 32.213–33.942

Client, project management and senior site management

Regionalverkehr Bern-Solothurn AG (RBS),
Worblaufen/CH

Planning and site management

Planergemeinschaft RBS^{verbindet}:
Basler & Hofmann AG, Esslingen/CH;
B+S AG, Bern/CH; Emch+Berger AG, Bern/CH;
Theo Hotz Partner AG, Zürich/CH;
various subcontractors

Construction/commissioning [3] [5] [6]

2017–2030/2027

Costs [1] [3]

614 million Swiss francs

Key quantities [7]

Excavation (open cut), solid:	170,000 m ³
Tunnelling (underground), solid:	265,000 m ³
Demolition/dismantling, solid:	35,000 m ³
Concrete/shotcrete incl. rebound:	160,000 m ³
Steel:	16,000 t
Gravel (backfilling, grading):	80,000 m ³