

Ausbau Bahnhof Bern RBS – Herausforderungen bei der Planung und der Ausführung des Stollens Laupenstrasse

Roman Gallus
Dr. Erich Pimentel

Basler & Hofmann AG
Institut für Geotechnik (IGT), ETH Zürich

Publikationen

- [1] Ramoni, M., Gallus, R (2021). Ausbau Bahnhof Bern RBS – Projektübersicht und Herausforderungen bei der Planung und der Ausführung des Abschnitts 1 (Bahnhof). GS-Frühjahrstagung, Webinar; Mitteilungen von Geotechnik Schweiz, Heft 180, 1–15.
- [2] Pimentel, E., Anagnostou, G (2019). Design of artificial ground freezing for an access tunnel of a railway station in Switzerland. Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art; ITA World Tunnel Congress, Naples, 1479–1488.

Bauherrschaft:

Regionalverkehr Bern-Solothurn



Projektverfasser und Bauleitung Ausbau Bahnhof Bern RBS:

Planergemeinschaft RBS^{verbindet}



Basler & Hofmann theo hotz partner | architekten

Projektverfasser Gefrierverfahren (Subplaner):

Professur für Untertagbau, Institut für Geotechnik (IGT), ETH Zürich

ETH zürich

Ramoni, M., Gallus, R (2021). Ausbau Bahnhof Bern RBS – Projektübersicht und Herausforderungen bei der Planung und der Ausführung des Abschnitts 1 (Bahnhof). GS-Frühjahrstagung, Webinar; Mitteilungen von Geotechnik Schweiz, Heft 180, 1–15.

Ausbau Bahnhof Bern – Projektübersicht und Herausforderungen bei der Planung und der Ausführung des Abschnitts 1 (Bahnhof)

1 Einleitung

Die Regionalverkehr Bern-Solothurn AG (RBS) realisiert zurzeit das Projekt "Ausbau Bahnhof Bern RBS". Dabei handelt es sich um den Bau eines neuen unterirdischen Bahnhofs bestehend aus zwei Bahnhofskavernen [1] [2] – 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 im 1965 eröffnete RBS-Bahnhof war für 16'000 Reisende/Tag konzipiert und wird aktuell von 60'000 Reisende/Tag frequentiert [3] [4]. Sowohl der bestehende als auch der neue RBS-Bahnhof befinden sich unterhalb der Gleise des Hauptbahnhofs Bern.

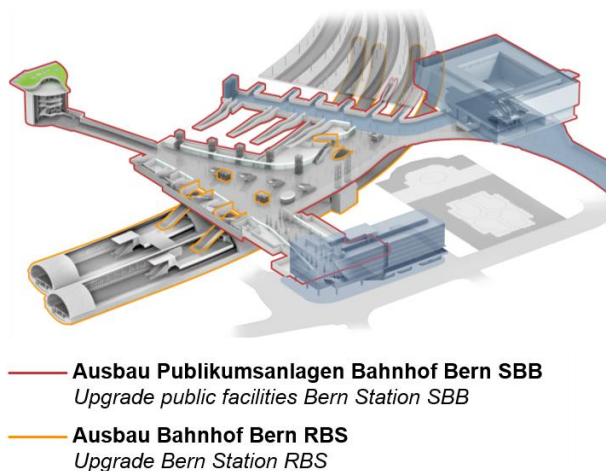


Bild 1: Projekte "Ausbau Publikumsanlagen Bahnhof Bern SBB" und "Ausbau Bahnhof Bern RBS" – Visualisierung [2]

Der Hauptbahnhof Bern ist mit 250'000 Reisende/Tag der zweitgrösste Bahnhof der Schweiz [3] und wird zurzeit im Rahmen des Projekts "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, so dass zahlreiche planerische und ausführungstechnische Schnittstellen in der Planung und in der Ausführung zu berücksichtigen sind.

Nach einer allgemeinen Projektübersicht (Kapitel 2) befasst sich der vorliegende Beitrag ausschliesslich mit dem Abschnitt 1 des Projekts "Ausbau Bahnhof Bern RBS" (Kapitel 3). Dabei werden ausgewählte Herausforderungen aus der Planung und der Ausführung aus Sicht des Projektverfassers aufgezeigt.

2 Projektübersicht

Das Projekt "Ausbau Bahnhof Bern RBS" gliedert sich in neun Abschnitte (Bild 2) [5]:

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).

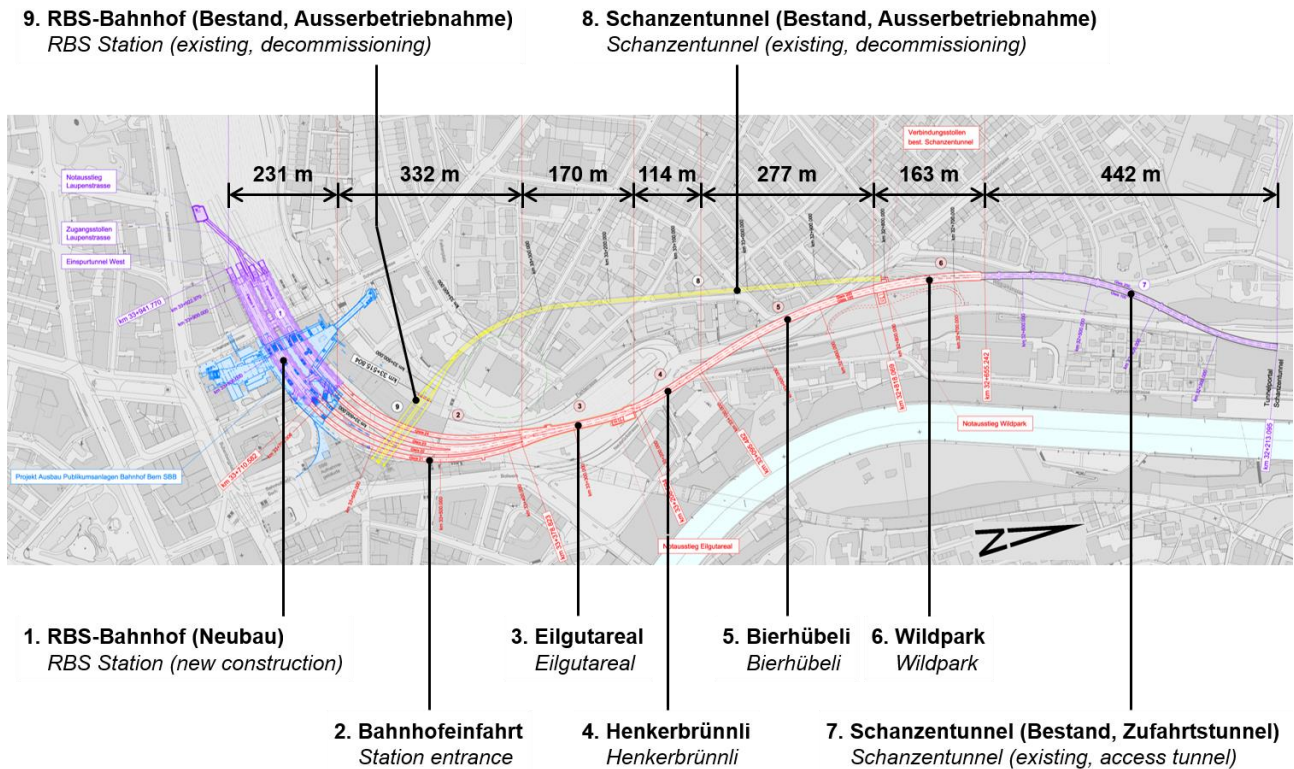


Bild 2: Projekt "Ausbau Bahnhof Bern RBS" – Abschnitte (Situation) [7]

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

Das Projekt "Ausbau Bahnhof Bern RBS" wurde vom Bundesamt für Verkehr BAV im Mai 2017 bewilligt [1]. Die Bauarbeiten starteten im Juli 2017 [3]. Im Abschnitt 1 konnten bis März 2021 (Zeitpunkt des Verfassens des vorliegenden Beitrags) der Schacht Laupenstrasse (Kapitel 3.2), der Stollen Laupenstrasse (Kapitel 3.3) und die ersten zwei Paketen der setzungsmindernden Massnahmen beim PostParc (Kapitel 3.5) realisiert werden. Die Bauarbeiten für das Hauptlos (Bahnhofskavernen, Kapitel 3.1) starteten im Februar 2021. Zurzeit laufen intensive Installationsarbeiten. Die Inbetriebnahme des neuen RBS-Tiefbahnhofs soll im Dezember 2027 erfolgen [6]. Das Bauende ist für Juli 2030 geplant [7].

Die Gesamtkosten für das Projekt "Ausbau Bahnhof Bern RBS" belaufen sich auf 614 Millionen CHF [1] [3]. Diejenige für den Rohbau des Abschnitts 1 betragen 390 Millionen CHF [8].

3 Abschnitt 1 (Neubau RBS-Bahnhof)

3.1 Bahnhofskavernen

Die Hauptobjekte des Abschnitts 1 sind die zwei Bahnhofskavernen, die 200 m (Nord-Kaverne) respektive 210 m (Süd-Kaverne) lang, 26 m breit und 17 m hoch sind und einen Abstand zueinander von 5–10 m aufweisen (Bild 3 und Bild 4 links). Die sich darin befindenden, 12 m breiten Perrons liegen 23 m unterhalb der südlichen Gleise (1–8) des Hauptbahnhofs Bern respektive 17 m unterhalb der neuen SBB-Personenunter-führung. Aus diesen Niveau-Differenzen 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 der Bestrebung 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 unter-querenden Hauptobjekte sind (von Westen nach Osten, Bild 3 unten):

- 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 so genannte "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.
- Der so genannte "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 mit 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 links). Ferner befindet sich ein sogenanntes "Funktionsgebäude" am westlichen Ende jeder Bahnhofskaverne (Bild 3).

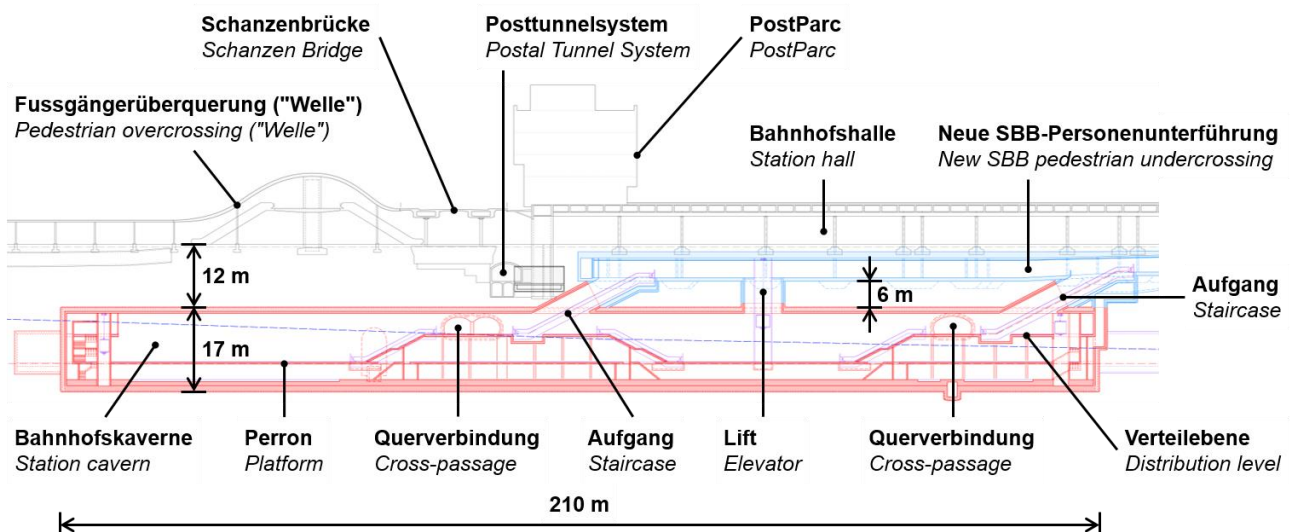
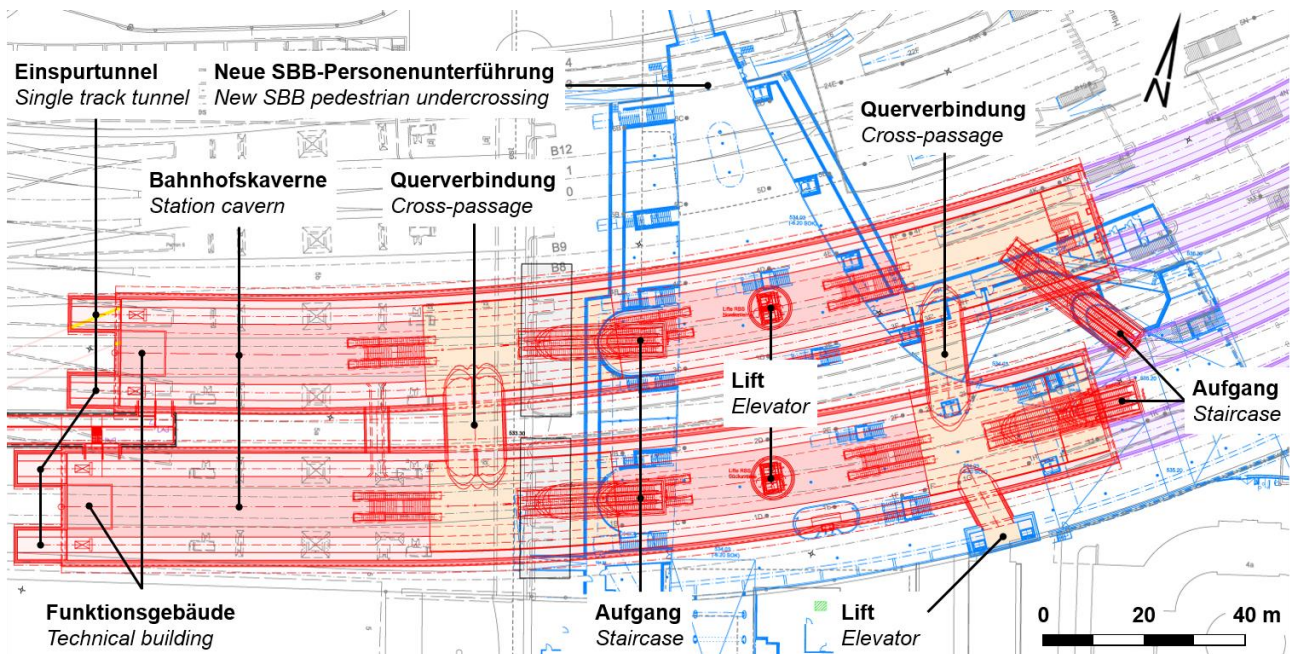


Bild 3: Bahnhofskavernen – oben: Situation; unten: Längsschnitt [6]

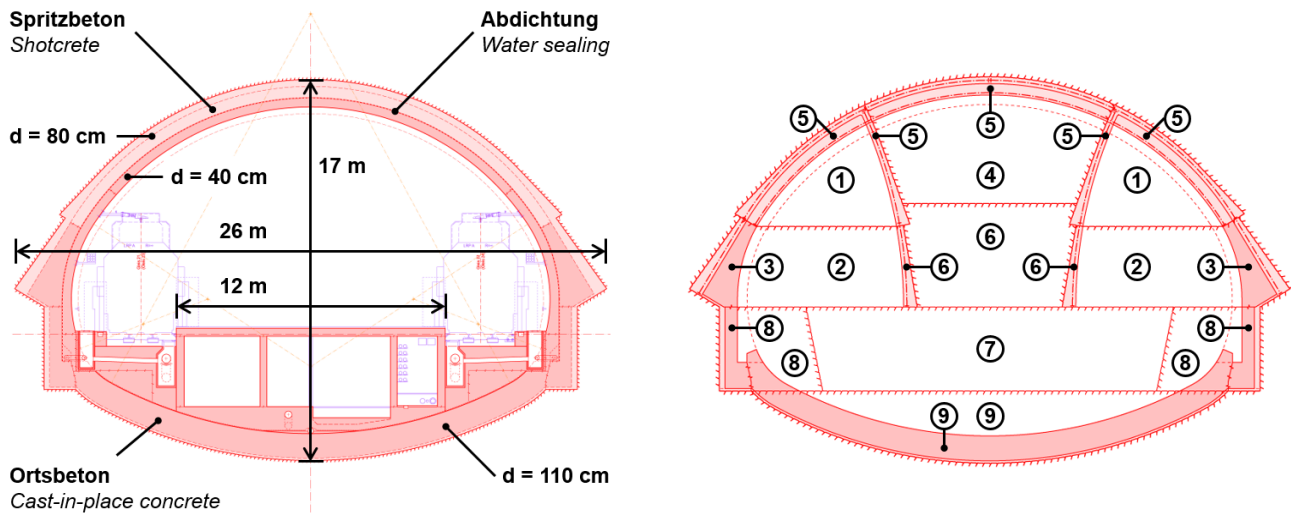


Bild 4: Bahnhofskavernen – links: Normalprofil; rechts: Teilausbrüche und Arbeitsschritte (Querschnitt) [6]

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 Projekts (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 4 rechts):

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 (Ortsbeton, $d = 50$ – 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;
8. Ausbruch und Sicherung (Spritzbeton, $d = 25$ cm) der seitlichen Teile der Strosse und paralleles Betonieren der Aussenwände (Ortsbeton, $d = 55$ cm) der Strosse;
9. Ausbruch der Sohle und paralleles Betonieren des Sohlgewölbes (Ortsbeton, $d = 110$ cm).

Die Abschlagslänge ist beschränkt auf 1–2 m für die Paramentstollen 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 voraussehlende 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, $d = 80 \text{ cm}$) 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 Vollausbuch 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 Ausbruchsicherung 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 links). Die Querverbindungen, die Aufgänge und die Liftschächte, die sich oberhalb der Bergwasserdrainage der Bahnhofskavernen befinden, werden vollabgedichtet 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 Ortsbeton ausgeführt ($d = 40 \text{ cm}$, Bild 4 links), wobei die Oberfläche eine rippenartige Struktur hat (Bild 5). Die Rippen sind 33 cm breit und 12 cm tief. In ihren 67 cm breiten Zwischenräumen nimmt die Rippenstruktur Lichttechnik, Brandmelder und Akustikelemente auf. Eine solche langfristig sichtbare Oberflächenstruktur ist im Untertagbau nicht üblich. Deren Realisierung ist sehr anspruchsvoll und stellt hohe Anforderungen insbesondere an die einzusetzende Schalung.



Bild 5: Bahnhofskavernen – Visualisierung des Gewölbes mit rippenartiger Struktur [2]

3.2 Schacht Laupenstrasse

Der Schacht und der Stollen Laupenstrasse (Kapitel 3.3), die sich westlich der Bahnhofskavernen befinden (Bild 6), dienen einerseits als Angriffsstelle in der Bauphase und andererseits 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 Schanzentunnel (Strassentunnel) im Westen gegeben.

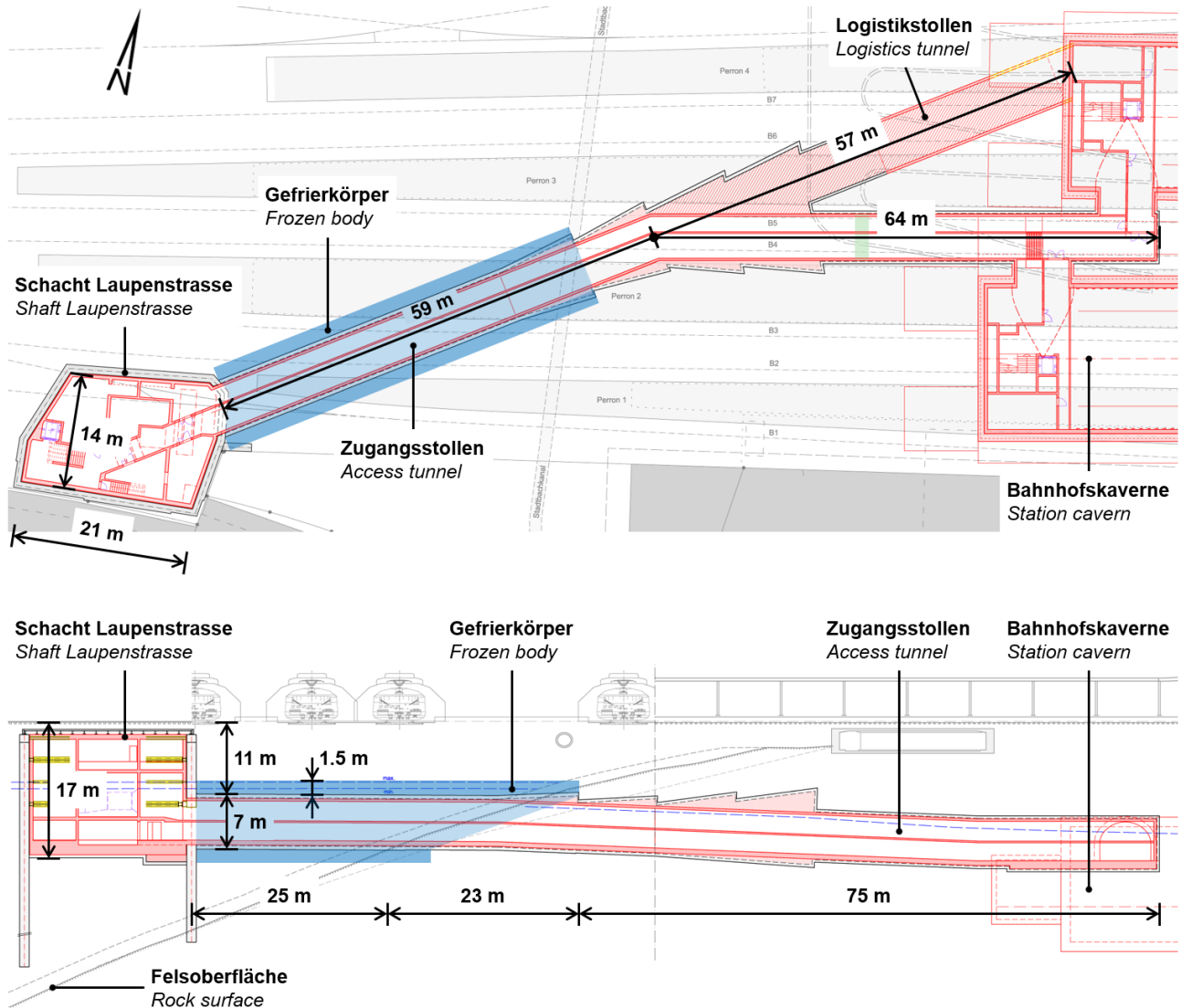


Bild 6: Schacht und Stollen Laupenstrasse – oben: Situation; unten: Längsschnitt [6]

Der Schacht liegt im wasserführenden Lockergestein (Bild 6 unten). Dabei handelt es sich vorwiegend um glaziale und fluvioglaziale Ablagerungen (Rückzugschotter, 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 vier Spriesslagen (Bild 7 links) sowie einer Spriessplatte aus Stahlbeton ausgesteift. Eine fünfte, zusätzliche Spriesslage wurde im Bauzustand bis zur Betonierung der Spriessplatte benötigt. Nachher wurde 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 7 rechts). 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 Schachtoffnung) und direkt in die Schlitzwand (Nordseite) abgetragen. In Querrichtung besteht die Hilfsbrücke aus einer Verbundkonstruktion (Stahlquerträgern mit darauf liegenden Betonplatten). Für den Endzustand wird die Schachtdecke als Bahnbrücke ausgebildet.

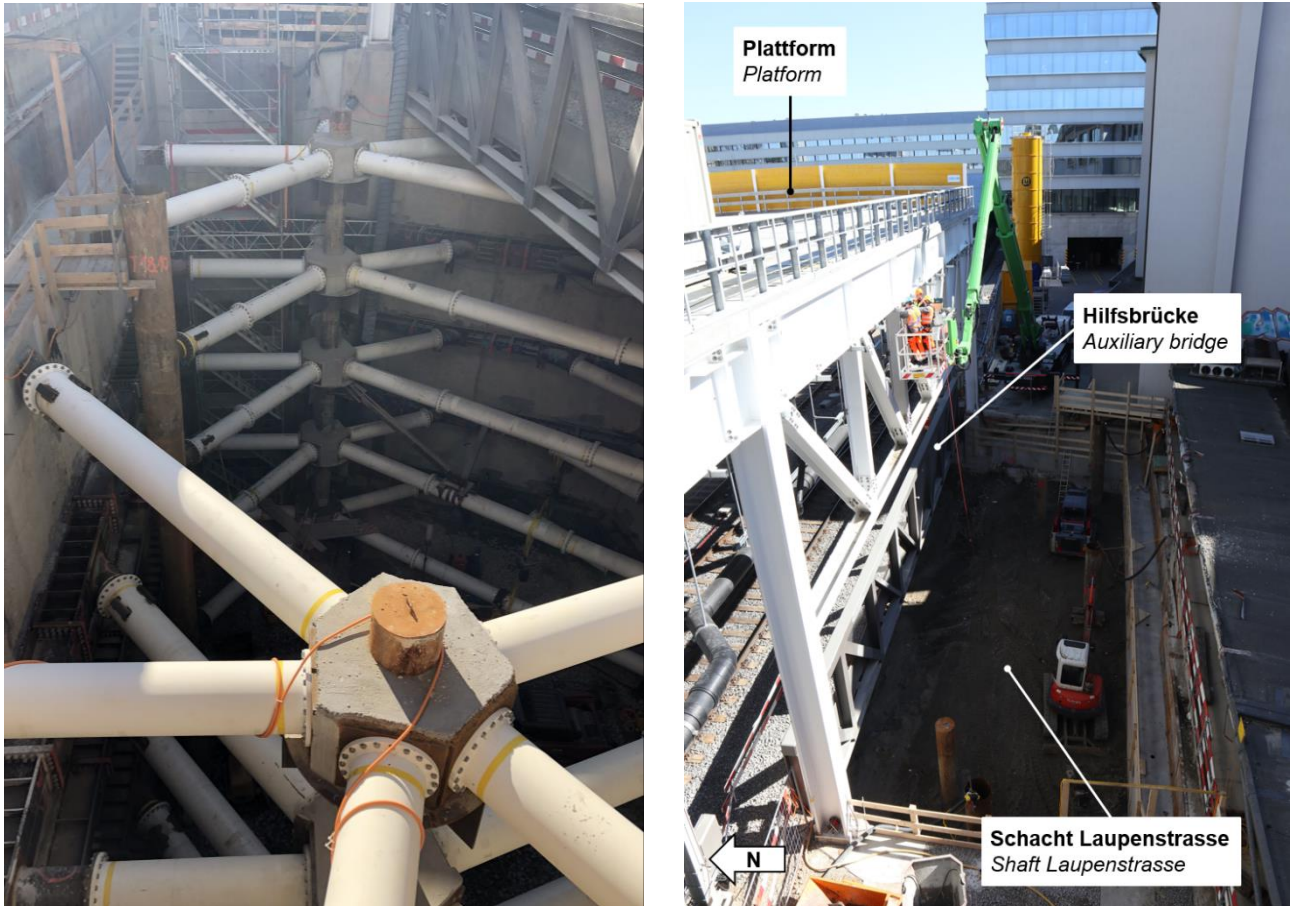


Bild 7: Schacht Laupenstrasse – links: Blickrichtung West; rechts: Blickrichtung Ost [9]

3.3 Stollen Laupenstrasse

Der Stollen 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 6 unten). Er besteht aus zwei Teilen:

- Der sogenannte "Zugangsstollen" (Bild 6 oben) ist 123 m lang und wird sowohl im Bau- als auch im Endzustand benötigt. Die Anbindung 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 vollabgedichtet.
- Der sogenannte "Logistikstollen" (Bild 6 oben), 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 6 unten). 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).



Bild 8: Stollen Laupenstrasse – links: Vortrieb am Anfang der Lockergesteinsstrecke; rechts: Ausbruchsicherung in der Lockergesteinsstrecke [9]



Bild 9: Stollen Laupenstrasse – links: Vortrieb in der Felsstrecke; rechts: Ausbruchsicherung in der Felsstrecke [9]

Der Vortrieb des Stollens erfolgte ab dem Schacht Laupenstrasse (Bild 8 links). In der Lockergesteinsstrecke und in der Übergangszone erfolgte der Vortrieb im Vollausbuch in Etappen à 1 m. Die Ausbruchsicherung besteht in diesem Bereich aus Spritzbeton ($d = 45 \text{ cm}$) und Gitterträgern (Bild 8 rechts). Als vorauseilende Bauhilfsmassnahme diente ein Gefrierkörper. In der Felsstrecke wurde ebenfalls im Vollausbuch mit Abschlagslängen von 1 m vorgetrieben (Bild 9 links). Eine Ausnahme stellen die letzten 15 m der Aufweitung dar, wo aufgrund der Querschnittsgrösse respektive Risikoüberlegungen auf Kalottenvortrieb mit zweiteiliger Unterteilung der Kalotte umgestellt wurde. In der Felsstrecke wurde systematisch ein Rohrschirm als vorauseilende Bauhilfsmassnahme implementiert, da das Vorhandensein von verwittertem Fels oberflächennah nicht ausgeschlossen werden konnte. Die Ausbruchsicherung besteht ebenfalls aus Spritzbeton ($d = 30 \text{ cm}$) und Gitterträgern (Bild 9 rechts). Eine Ortsbrustankerung und Mikropfähle für die Verstärkung der Kalottenwiderlager wurden als Zusatzmassnahmen wo erforderlich eingebaut.

Mit dem Gefrierkörper wurde der Baugrund rund um den Hohlraum und im Kern verfestigt, versteift und abdichtet. Die Dicke des Gefrierkörpers ausserhalb des Stollenprofils betrug 1.5 m (Bild 6 unten). Der Gefrierkörper war zwischen 30 m (Sohle) und 58 m (First) lang und wurde im Fels eingebunden. Für seine Realisierung (Solegefrieren) wurden 26 Gefrierlanzen im Umfang und 16 Gefrierlanzen im Kern benötigt (Bild 10 links). Der Abstand der Gefrierlanzen war 1 m. Bei der Anordnung der Gefrierlanzen wurden die potentiellen geometrischen Konflikte mit der Spriessung des Schachtes Laupenstrasse berücksichtigt sowie eine möglichst kleine Beschädigung der Bewehrung der Schlitzwände aufgrund der durchdringenden Kernbohrungen angestrebt. Die zulässige Bohrungenauigkeit der gesteuerten Bohrungen (Bild 10 rechts) für die Gefrierlanzen betrug maximal 20 cm. Die Gefrierlanzen im Kern wurden vor dem Vortriebsbeginn abgeschaltet. Ein Auftauen des Kerns wurde durch die aussenliegenden Gefrierlanzen (die während des Vortriebs weiter betrieben wurden) verhindert, da somit radial keine Wärmezufuhr zum Kern erfolgen konnte (der Wärmezufluss in Längsrichtung des Stollens war 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 (um den Start des Vortriebs freizugeben) betrug 20–30 Tage.

Um den Unsicherheiten betreffend die Lage des Grundwasserspiegels sowie seinen saisonalen Schwankungen Rechnung zu tragen, wurden oberhalb des Gefrierkörpers respektive des Stollenfirstes vier Manschettenrohre angeordnet (Bild 10 links), die in vier voneinander mit Packern getrennte Abschnitte unterteilt waren und vor sowie während des Auffrierens kontinuierlich mit Wasser beaufschlagt wurden. Ferner, um sicherzustellen, dass sich beim Auffrieren keine ungünstigen Porenwasserdrücke aufbauen konnten, wurden im Kern zwei Entspannungsbohrungen angeordnet. Die Erfolgskontrolle der "Bewässerung" erfolgte mit Piezometern; diejenige der Gefriermassnahme erfolgte mit Temperaturmessketten im Randbereich und ausserhalb des Gefrierkörpers sowie mit den Entspannungsbohrungen im Kern (Dichtigkeitsbeurteilung anhand des Wasseranfalls).

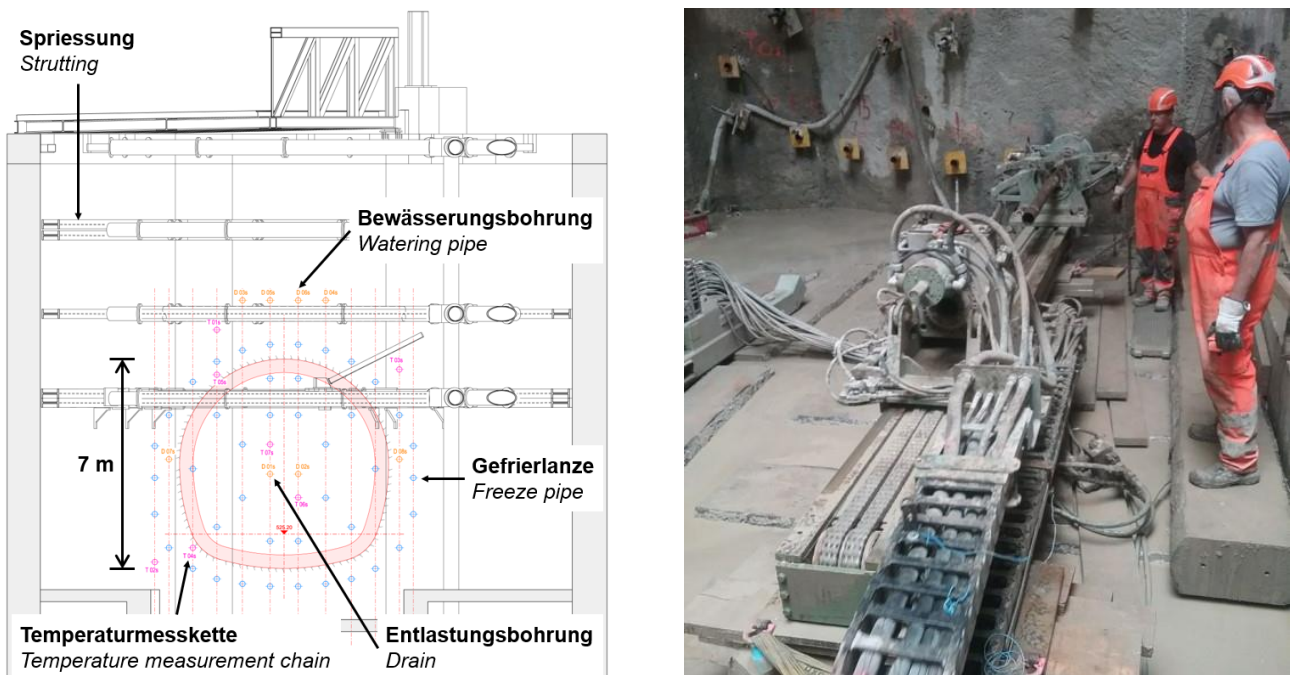


Bild 10: Stollen Laupenstrasse – links: Layout der Gefriermassnahme (Querschnitt, Blick in Vortriebsrichtung) [10]; rechts: Bohrarbeiten für die Gefriermassnahme [9]

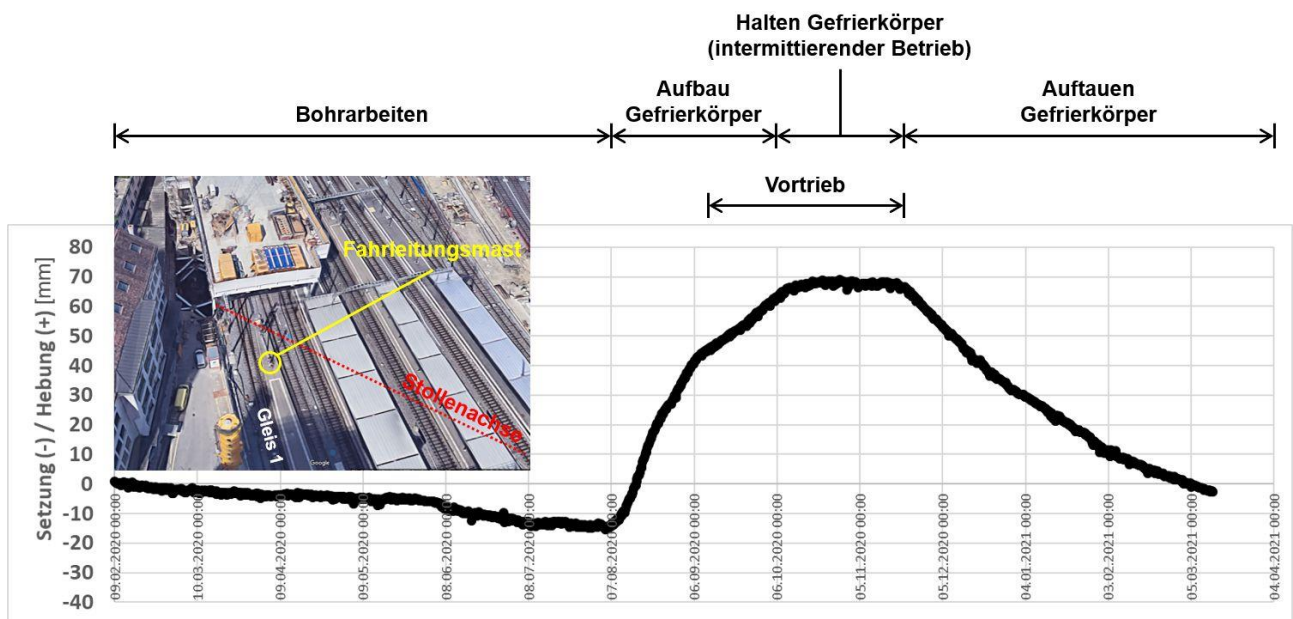


Bild 11: Stollen Laupenstrasse – Hebungen und Setzungen des Fahrleitungsmasts FLM 170

Die im Vortrieb des Stollens Laupenstrasse gemachten Erfahrungen sind durchgehend positiv. Der Vortrieb konnte ohne besondere Vorkommnisse und unter Aufrechterhaltung des sicheren Betriebs der SBB-Anlagen durchgeführt werden. Besonders erwähnenswert ist die erfolgreiche Umsetzung der Bauhilfsmassnahme "Gefrierverfahren". Der Gefrierkörper konnte erfolgreich aufgebaut und gehalten werden und hat sich wie erwartet verhalten. Die Prognose der erforderlichen Gefrierzeit hat sich als zutreffend erwiesen. Die Bohrarbeiten konnten grösstenteils ohne grosse Schwierigkeiten und unter Einhaltung der geforderten Bohrgenauigkeit ausgeführt werden: Lediglich fünf Bohrungen mussten abgebrochen und wiederholt (Ersatzbohrung) werden. Zwecks kontinuierlicher Überwachung der Verformungen des Bauwerks und der benachbarten Bauten, insbesondere der SBB-Anlagen, wurde ein projektspezifisches Überwachungssystem implementiert. Wie erwartet wurden Setzungen während der Bohrarbeiten, Hebungen beim Aufbau des Gefrierkörpers, praktisch keine Verformungen während des Haltens des Gefrierkörpers sowie aufgrund des Vortriebs und Setzungen beim Auftauen des Gefrierkörpers beobachtet (Bild 11).

3.4 Baulogistik

Der Installationsplatz für den Abschnitt 1 befindet sich in der Nähe des Schachtes Laupenstrasse (Kapitel 3.2). Aufgrund 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 12 und Bild 13 links), um die Ver- und Entsorgung der Baustelle zu ermöglichen sowie Lagerfläche zu kreieren.



Bild 12: Plattform, Schacht Laupenstrasse und Umgebung (Blickrichtung West) [11]

In Bezug auf die Baulogistik sind ferner folgende Platzeinschränkungen beim Schacht Laupenstrasse zu betonen: Aufgrund des Vorhandenseins der Spriessung des Schachtes und der Abdeckung der nördlichen Hälfte des Schachtes durch die Hilfsbrücke (Bild 13 rechts) reduziert sich die freie Grundrissfläche auf 4 m x 11 m; zudem beschränkt sich die freie Arbeitshöhe im Schacht, ebenfalls aufgrund der Spriessung (Bild 10 links), auf 4 m.

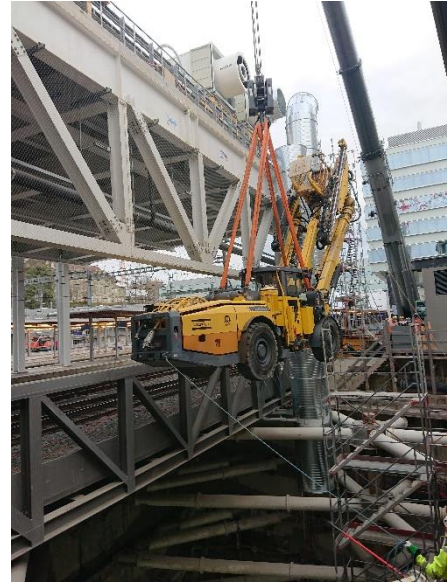


Bild 13: Plattform – links: Plattform mit Förderband; rechts: Herunterlassen Bohrjumbo [9]

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 sogenannte "Reiterbau" von besonderem Interesse, als 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 unten und Bild 14).

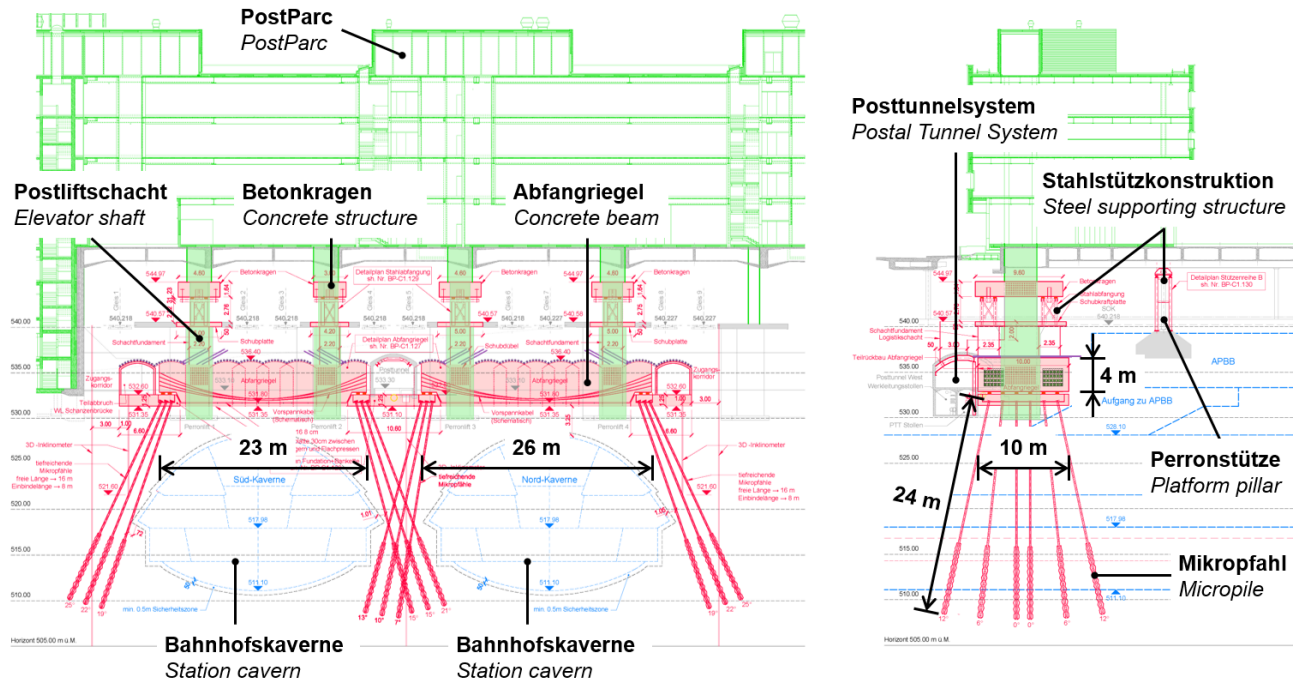


Bild 14: Setzungsmindernde Massnahmen PostParc – links: Längsschnitt (Blickrichtung West); rechts: Querschnitt (Blickrichtung Nord) [8]

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 Postliftschächte beträgt 2–4 m; derjenige zu der Foundation der Perronstützen ist 11 m. Die Foundationslasten 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 3D-FE-Berechnungen unter Berücksichtigung aller Bauphasen und aller Foundationslasten ermittelt. Rechnerisch werden differentielle Setzungen der Postliftschächte von 10–15 mm erwartet. Gleichzeitig wurde der PostParc nachgerechnet, um seine Setzungsempfindlichkeit zu beurteilen. Diese Nachrechnung zeigte, dass differentielle Setzungen 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 wurden zwei unterirdische vorgespannte Stahlbetonträger realisiert. Diese Abfangriegel wurden aus dem bestehenden Posttunnelsystem unterirdisch gebaut (Bild 15 und Bild 16). Die Abfangriegel sind 23 m (Süd) respektive 26 m (Nord) lang, 10 m breit und 4 m hoch und sind mit je zwei Postliftschächten kraftschlüssig verbunden. Jeder Abfangriegel überspannt eine Bahnhofskaverne und ist 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, wurden 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.
2. In einem zweiten Schritt wurden die Vorbereitungsarbeiten für das dritte Massnahmenpaket durchgeführt. Dabei wurden 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 erfolgten 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 ermöglichen, 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.

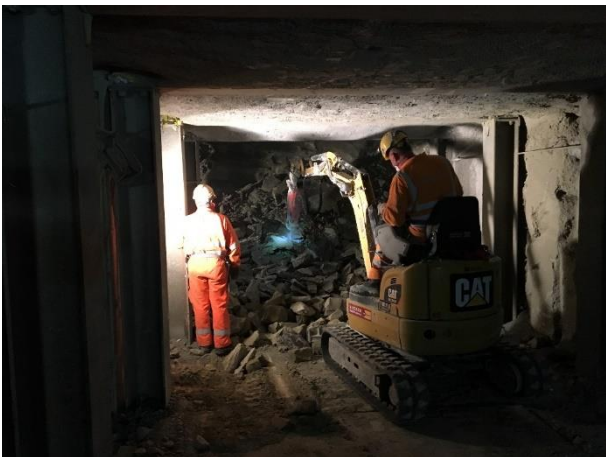


Bild 15: Setzungsmindernde Massnahmen PostParc – links: Vortriebsarbeiten aus dem Posttunnelsystem; rechts: freigelegter ausbetonierter Postliftschacht [9]



Bild 16: Setzungsmindernde Massnahmen PostParc – links: Bewehrungsarbeiten für den Abfangriegel Süd; rechts: Stirnseite des Abfangriegels Süd [9]

Um eine aktive Setzungskompensation an den Perronstützen vornehmen zu können, werden sie bei Bedarf mit Stahltürmen und hydraulischen Pressen abgefangen (Bild 14 rechts). Um den Einfluss auf die Personenhraulik 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 Schlussbemerkungen

Das Projekt "Ausbau Bahnhof Bern RBS" stellt ein weiteres einmaliges Projekt des schweizerischen Untertagbaus dar. Dessen Abschnitt 1 ist in mehrfacher Hinsicht herausfordernd. Der sichere und effiziente Bau der neuen RBS-Infrastruktur in städtischer Umgebung, unter Aufrechterhaltung des Bahnbetriebs des Hauptbahnhofs Bern 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 implementiert werden.

5 Literatur

- [1] <https://www.rbs.ch/der-neue-rbs-bahnhof-bern>; 01.03.2021.
- [2] <https://www.zukunftbahnhofbern.ch/de/home/>; 01.03.2021.
- [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.
- [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] Ramoni M., Reiling S., Lerch S. (2020): "Ausbau Bahnhof Bern RBS – Herausfordernder städtischer Tunnelbau". Swiss Tunnel Congress 2020, Fachtagung für Untertagbau, Luzern; 131–154; FGU Fachgruppe für Untertagbau.
- [6] Ausbau Bahnhof Bern RBS, Ausschreibung; Teilprojekt 1 – Rohbau; Abschnitt 1; Los 1.3 Bahnhof. Planergemeinschaft RBS^{verbundet}, 17.06.2019.
- [7] Ausbau Bahnhof Bern RBS, Ausschreibung; Teilprojekt 1 – Rohbau; Abschnitte 2 bis 6, 8 und 9; Los 2.4 Untertag- und Tagbau. Planergemeinschaft RBS^{verbundet}, 12.04.2019.
- [8] Ausbau Bahnhof Bern RBS, Bauprojekt. Planergemeinschaft RBS^{verbundet}, 31.01.2016.
- [9] Ausbau Bahnhof Bern RBS, Bilddokumentation. Planergemeinschaft RBS^{verbundet}.
- [10] Ausbau Bahnhof Bern RBS, Ausführung; Teilprojekt 1 – Rohbau; Abschnitt 1; Los 1.4 Stollen Laupenstrasse. Planergemeinschaft RBS^{verbundet}, 10.12.2019.
- [11] Google Earth Pro; 01.03.2021.

Autoren:

Marco Ramoni
Dr. sc. dipl. Bau-Ing. ETH/SIA
Basler & Hofmann AG
Bachweg 1
CH-8133 Esslingen

Roman Gallus
MSc ETH Bauingenieurwissenschaften
Basler & Hofmann AG
Bachweg 1
CH-8133 Esslingen