

Kralovopolsky Tunnel in Brno, Tschechien – Erkenntnisse, Erfahrungen und Messergebnisse aus einem flachliegenden Tunnel in Spritzbetonbauweise unter dichter Bebauung

Ing.Vlastimil Horak (Project Manager), Ing.Jan Rozek, Projektleiter, Ing.Lubomir Kosik, Projektant

AMBERG Engineering Brno a.s., Brno, Czech Republic

Kurzfassung

Der Kralovopolsky Tunnel ist ein Straßentunnel mit 2 parallelen Röhren, die sich unterhalb eines stark besiedelten Gebietes der Stadt Brünn befinden. Diese Tunnelröhren sind Bestandteil eines großen Stadtgürtels der Stadt Brünn. Das technische Hauptproblem dieses einzigartigen Tunnels sind seine geologischen Verhältnisse (Neogentone) sowie große Querschnittsflächen, niedrige Überlagerung unter dicht bebauter und besiedelter Oberfläche.

Zum Zeitpunkt der Tagung werden voraussichtlich schon mehr als drei Viertel der Gesamtlänge fertig ausgebrochen. Die Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem Vortrieb und die damit zusammenhängenden geotechnischen Messungen kann man heute mit den Prognosen aus der Projektierung vergleichen und beurteilen.

Die Standardfläche des Vortriebs beträgt ca. 130 m². Die Überlagerung variiert von 4 m bis max. 21 m. Als Vortriebsmethode kommt die Kernbauweise mit etappiertem Ausbruch der beiden oberen und unteren Paramentstollen, des Firststollens und des Kerns mit der Sohle zur Anwendung. Die Felssicherung ist aus Spritzbeton und speziell entwickelten starren Stahlbögen HEBREX ausgeführt. Fast in der ganzen Länge sind massive Bauhilfsmaßnahmen zur Unterstützung eingesetzt worden – Rohrschirme, Jetting, Kompensationshebung der Häuser begleitet selbstverständlich durch ein sehr intensives Monitoring der Setzungen und Deformationen.

Der Baubeginn für die Hauptarbeiten erfolgte im Jahr 2007, Vortriebsbeginn war im Januar 2008, die Inbetriebnahme ist für das Jahr 2012 vorgesehen.

Allgemein

Der geplante Teil des Stadtgürtels (VMO) von Zabovreska nach Dobrovskeho ist ein wichtiger Bestandteil des „Hauptverkehrssystems“ der Stadt Brno/Brünn und zugleich des Straßennetzes der Tschechischen Republik (Straße I/42) sowie des internationalen Straßennetzes (Straße E461).

- Der Bau ergänzt ein radiales Ringnetzsystem mit einer zweckgebundenen abgestuften Funktion.
- Die Realisierung des Stadtgürtels / VMO ist aus der gesamten Sicht ein weiterer Schritt zur Befreiung des Stadtkerns vor dem Durchgangsverkehr

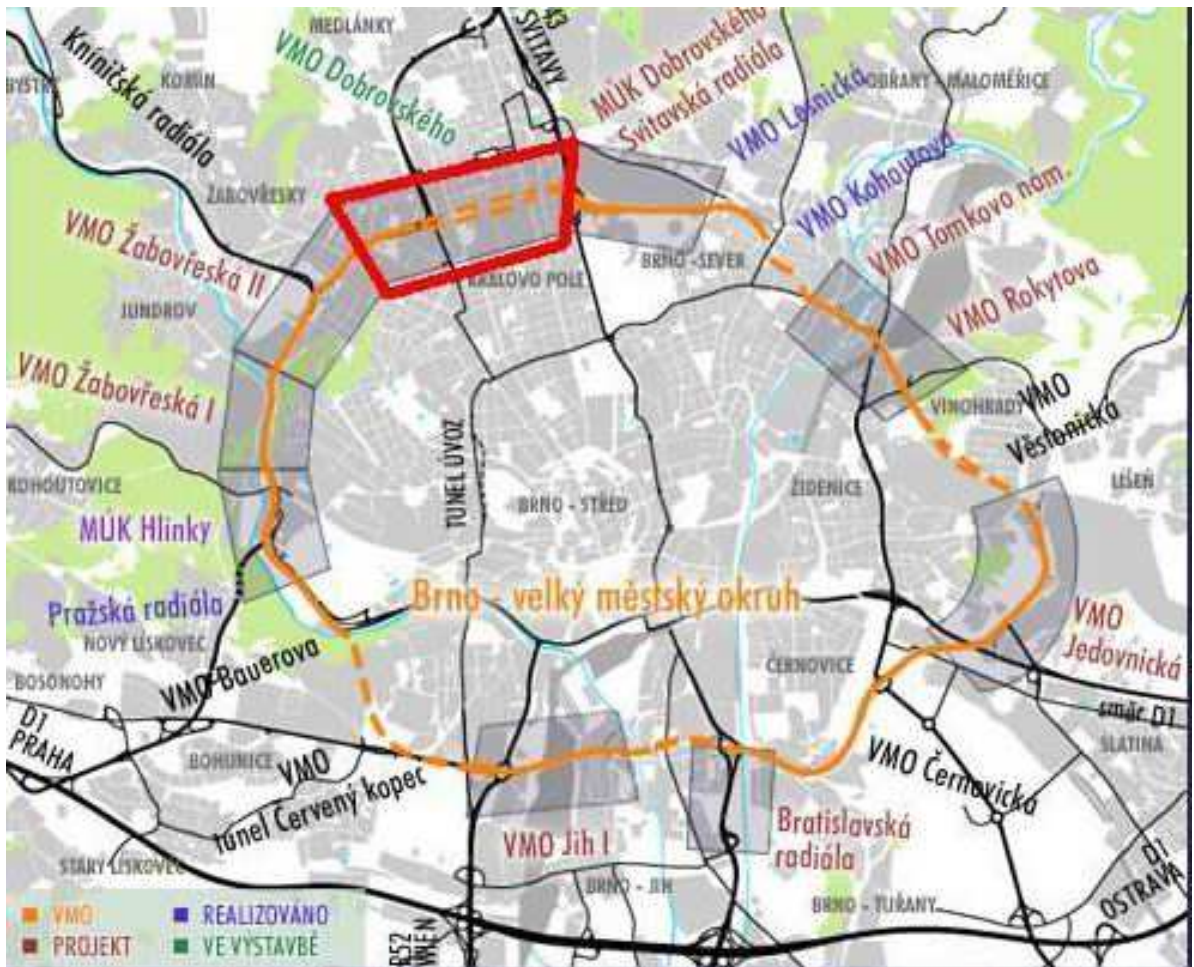


Bild 1 : Stadtgrütel Brno



Bild 2 : Bezugsgebiet Tunneltrassen Luftbildaufnahme

Fakten des Tunnelprojekts

Tunnelröhre I: Gesamtlänge 1.237 m

Untertagbau 1.019 m lang, Tagbau mit ausgesteiften Baugruben in Zabovresky 168 m lang und in Kralovo Pole 50 m lang.

Tunnelröhre II Gesamtlänge 1.258 m

Untertagbau 1.060 m lang, Tagbau mit ausgesteiften Baugruben in Zabovresky 149 m lang und in Kralovo Pole offene Baugrube 49 m lang.

Beide Tunnelröhren sind in der West – Ost – Richtung angelegt. Die Distanz zwischen den Tunnelröhren variiert zwischen 6 und 70 m.

Das Längsprofil beider Tunnels muss auf die bestehenden Anschlüsse angepasst werden und wird maßgeblich beeinflusst durch einen bestehenden, wichtigen Kanalisationshauptstrassenkanal und vor allem durch die Geologie (siehe Bild 3). In beiden Tunnels gibt es in dem unteren Teil einen Tiefpunkt, der mit einer Wanne ausgerundet wird. Dies bedeutet, dass sowohl beim Vortrieb als auch während des Betriebes das Abwasser ständig gepumpt werden muss.

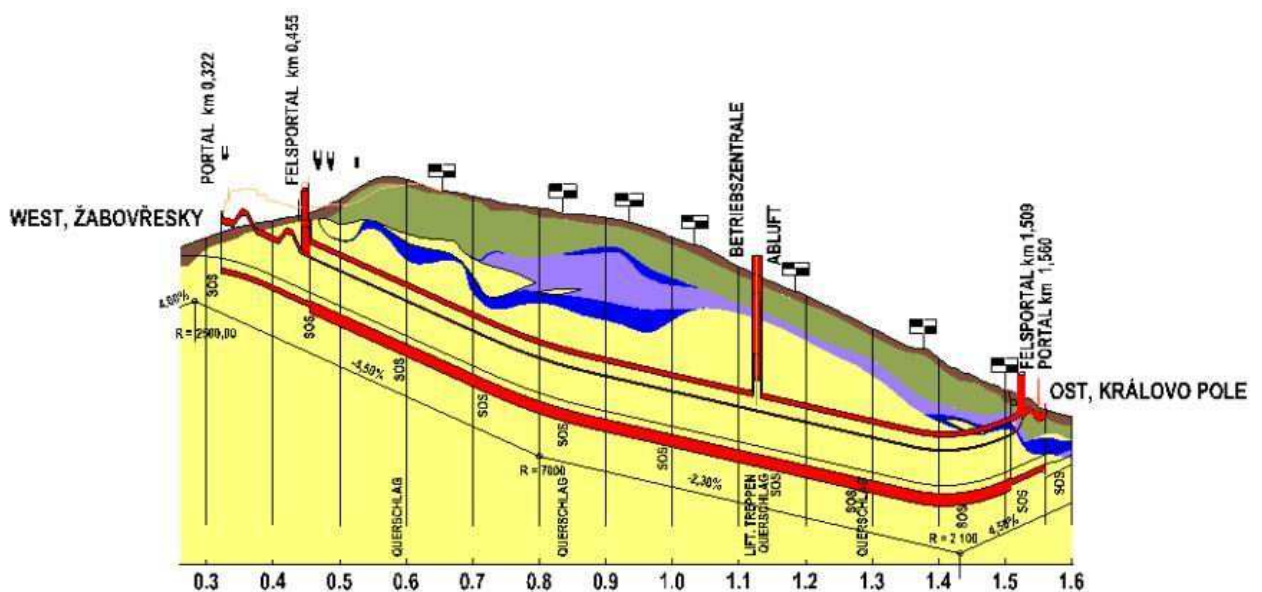


Bild 3 : Längsprofil mit der Geologie

Tunnelauskleidung und Ausrüstung

Das Tunnelprofil beinhaltet zwei Räume: den Verkehrsraum und über der Zwischendecke einen Raum für die Tunnelabluft. Es ist ein zweischaliger Ausbau mit einer Rundumabdichtung vorgesehen.

Tunnelprofil – technische Daten

Breite der Fahrspuren im Tunnel

2 x 3,50 m

Höhe des Fahrraums

4,50 m

Fläche des Verkehrsraumes	57,95 m ²
Raum für die Abluft	12,0 m ²
Felssicherung 350 mm dick	11,95 m ³ /m ¹
Innenschale min. 450 mm dick	32,53 m ³ /m ¹
Tunnelausbruchsprofil	130 m ²

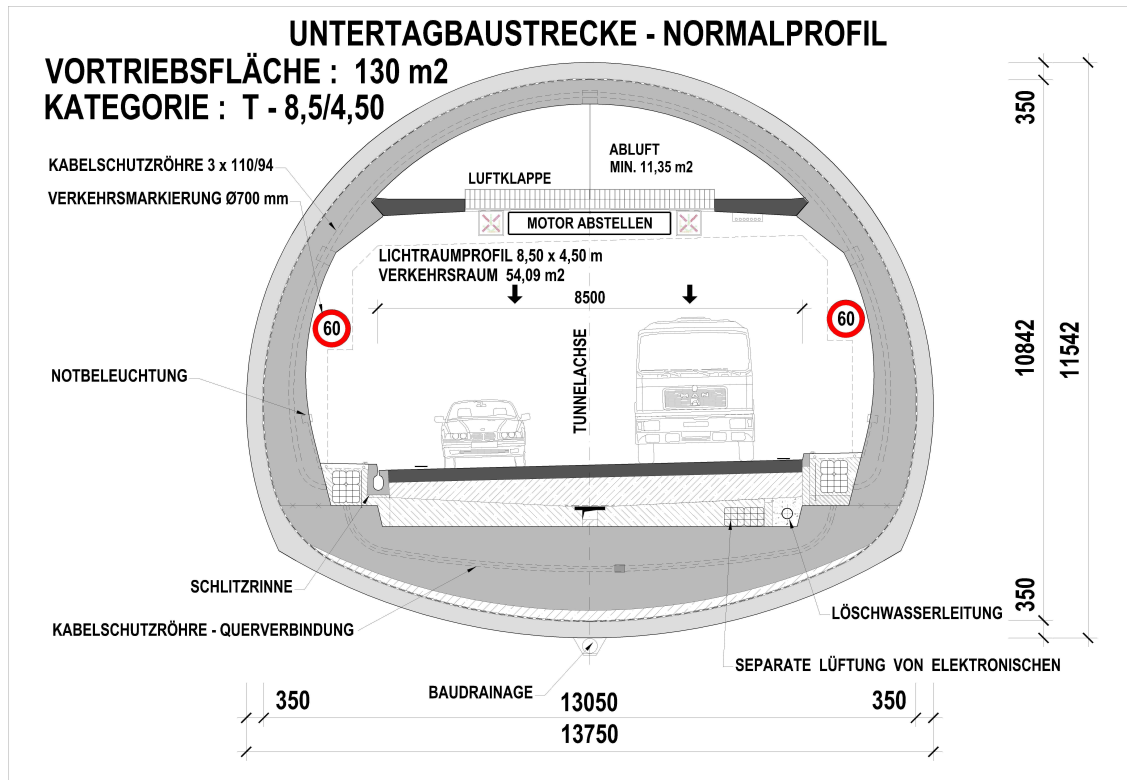


Bild 4 : Normalprofil – Untertagbaustrecke

Tunnellüftung

Es wurde eine Halbquerlüftung entworfen. Die frische Luft wird durch die Tunnelportale angesaugt. Die Abluft wird in der Lüftungszentrale, die ca. im Drittpunkt des Tunnels liegt, zentral abgesaugt. Die Ausblasung in die Atmosphäre erfolgt mit erhöhter Geschwindigkeit über zwei 25 m hohe Abluftkamine. Die Entlüftung beider Tunnelröhren wird getrennt und völlig unabhängig voneinander erfolgen. Die installierte Abluftkapazität ermöglicht es, 300 m³ /s von jedem Ort in beiden Röhren abzusaugen. Die Absaugungslüfter werden mit 100% Reserve installiert (zwei Lüfter im Betrieb, zwei Lüfter als Reserve).

Zur Steuerung des Luftaustritts in den Portalen Zabovresky und Kralovo Pole werden zusätzlich Längslüfter installiert. Dadurch kann der Austrag von verunreinigter Luft aus beiden Ausfahrtportalen minimiert werden.

Lüftungs- und Betriebszentrale

Für das gewählte Tunnelquerlüftungssystem und andere technologische Anlagen ist es notwendig, entsprechende Räume zu errichten, vor allem für die Lüfter. Diese kommen in ein relativ stark besiedeltes Wohngebiet zu liegen. Die unterirdische Lüftungs- und Betriebszentrale wird 14 x 44 m groß sein, das Niveau des untersten Stockwerkes liegt 25,50 m unter Terrain. Es werden fünf unterirdische und ein oberirdisches Geschoss sowie zwei Abluftkamine gebaut. Die Tunnelröhre II wird mit der Zentrale durch drei Stollen verbunden – einen Fluchtweg mit einem Kabelkanal und über dem Fluchtweg zwei Lüftungsstollen durch einen Luftmaschinenraum direkt in die Kamine.



Bild 5 : Vortrieb mit geteiltem Ausbruch

Sicherheitsausrüstung

Die beiden Tunnelröhren sind durch vier Querverbindungen verbunden. Eine dieser Querverbindungen ist mit einem Notausstieg (Treppe und Lift) verbunden

In beiden Tunnels werden einseitige Pannenbuchten von 40 m Länge errichtet.

Rechts in Fahrtrichtung werden insgesamt sechs Nischen mit SOS-Schränken und Hydrantennischen in jedem Tunnel mit einer Standardausstattung bis max. 150 m ausgeführt.

In beiden Tunnelröhren und den Fluchtwegen einschließlich der unterirdischen Räume der Lüftungs- und Betriebszentrale wird ein Löschwasserleitungssystem errichtet.

Die Entwässerung wird so ausgebildet, dass sich ein möglicher Treibstoff-Brand nicht ausbreiten kann. Die Abwasser-Behälter werden an den tiefsten Stellen

beider Tunnels angeordnet. Die Pumpaggregate einschließlich des Schutzes, der Fernsteuerung und der Sicherung weisen eine 100 % ige Reserve auf (Redundanz).

Aus der Sicht der betrieblichen Sicherheit von Personen im Tunnel, erfüllt der Tunnel die Anforderungen der EU-Richtlinie Nr. 2004/54 bei weitem, da die nationalen tschechischen Vorschriften noch härter definiert sind. In Brno ist seit dem 1999 eine Tunnelzentrale (CTD) mit einem ständigen Bedienungspersonal im Betrieb. Zurzeit werden von dieser Zentrale drei bestehende Tunnels und der Stadtringsverkehr gesteuert.

Geologie

Im Tunnelprofil ist die Abfolge der geologischen Einheiten relativ gleichbleibend: Deckschichten sind Lößlehme und anthropogenen Aufschüttungen, Dicke 3 bis 10 m, im unteren Horizont mit vereinzelt Lagen wasserhaltiger Schotter- bis Sandterrassen. Darunter schließen sich die Neogentone (s.g. Brünner Tegel) an, Tiefe einige Zehn Meter (der Felsuntergrund wurde auch mit einer 60 m tiefen Bohrungen nicht gefunden.). Der Tunnel kommt über die ganze Länge in diese Tone zu liegen. Das Gebirgswasser ist in den Schottersandlagen auf dem Oberhorizont des Tons in Form der Staubecken in den lokalen Vertiefungen gebunden. Die Konsistenz der Tone ist weich bis fest. Aus der Sicht der Plastizität sind „Tegel“ hochplastisch und in Verbindung mit dem Grundwasser stark drückend. Die Überlagerung in beiden Tunnels ist beinahe gleich, sie liegt bei 4 m bis max. 21 m. Höhenmäßig sind beide Tunnels in den Tonen so platziert, dass eine minimale undurchlässige Dicke der Tonschicht über dem Ausbruch von ca. 2 bis 3 m immer gewährleistet werden kann.

Vortriebsmethode

Es läuft ein Vortrieb in Kernbauweise mit einer vertikalen und horizontalen Brustteilung (Ulmenstollen, Paramentstollen). Die Ausbruchsicherung der einzelnen Teilausbrüche besteht aus starrem Stahlausbau und Spritzbeton. Eine Ortsbrustsicherung ist nicht erforderlich (erfolgt nur in Portalbereichen durch GFK Anker). Die definitive tragende Innenschale besteht aus Stahlbeton.

Die Vortriebe erfolgen über die kritischen Bereiche im Schutz eines Rohrschirmes (ca. 15% der ganzen Länge).

Die Setzungsmulde breitet sich laut den numerischen Modellen und Prognosen im Bezug auf die Überlagerung bis zu einer max. Entfernung von ca. 25 bis 30 m von der Tunnelachse aus. Es wurden max. Setzungen bis ca. 110 mm unmittelbar über der Tunnelachse im Bereich der minimalen Überlagerung, sonst max. 70 bis 90 mm prognostiziert.

Es wurde eine detaillierte Dokumentation der gefährdeten Objekte in der Trasse beider Tunnelröhren ausgearbeitet, die eine Kartei von ca. 260 Häusern umfasst. Ca. 160 Häuser werden (nach einer Zustandsaufnahme vor Beginn der Bautätigkeiten) während des Vortriebes beobachtet und gemessen.

Zum Schutz der Bebauung wurden an besonders kritischen Abschnitten von der Oberfläche aus vertikale bzw. leicht geneigte Jetsäulen erstellt, um die Setzungsmulde zu begrenzen. Zusätzlich wurden auch Kompensationsinjektionen durchgeführt.

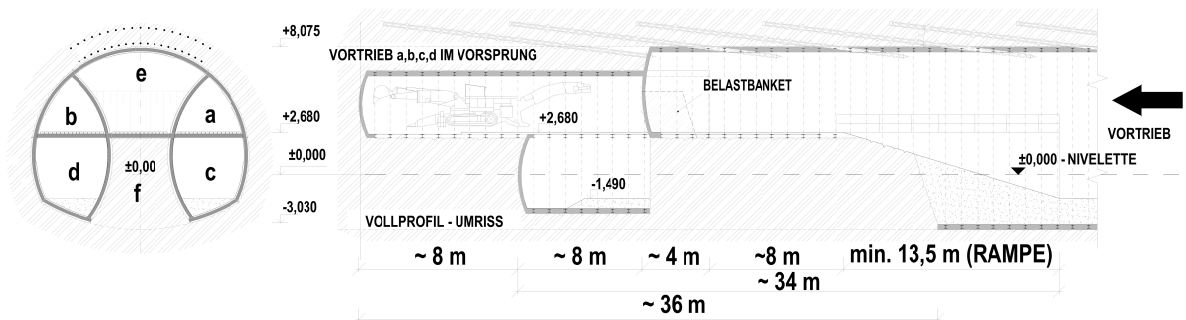


Bild 6 : Vortriebsmethode (Ausbruchart)

Sondierstollen für die Tunnelröhren

Die tatsächliche Auswirkung des Vortriebes auf die Bebauung wurde beim Vortrieb der Versuchsstollen geprüft. Es wurden insgesamt drei Sondierstollen mit einer Gesamtlänge von 2 000 m vorgetrieben. Die Stollen wurden ursprünglich als ein Bestandteil der zukünftigen Tunneln gebaut. Sie wurden mit einer für die großen Tunneln vorgesehenen Bauweise ausgeführt, so dass damit bereits Erfahrungen gesammelt werden konnten. Der Vortrieb erfolgte von 2001 bis 2003.

Tunnelvortrieb – Planung und Realität

Der Tunnelvortrieb der Hauptausbrüche begann im Januar 2008 mit einer Verspätung von mehr als 18 Monaten. Die Ursachen für diese Verzögerung sind vor allem im juristischen Vorgehen einzelner Bewohner und übergeordneter Interessenvertretungen gegen das Bauwerk zu sehen. Bis heute sind noch nicht alle Verfahren letztinstanzlich abgeschlossen!

Die im Projekt der Felssicherung vorgeschlagenen Stahlbogen HEB 200 wurden durch die für diesen Tunnel speziell entwickelten Stahlbogen HEBREX 200 ersetzt. Im Prinzip sparen diese Profile ca. 10% des Stahlgewichtes und bringen die deutlich bessere Mitwirkung mit dem Spritzbeton.

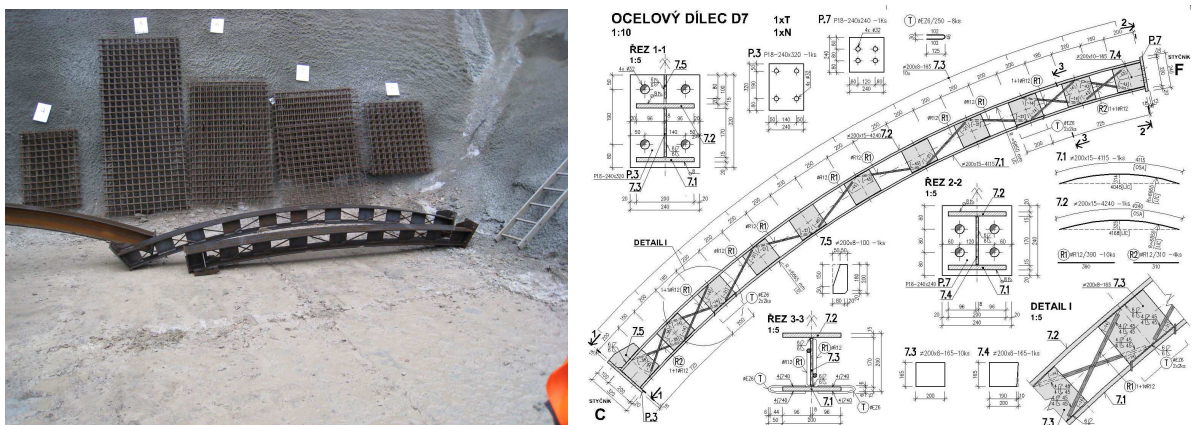


Bild 7 :Stahlbogen HEBREX (HBX 200)

Vortriebsleistungen wurden im Projekt auf 40 – 50 Meter des Vollprofils pro Monat abgeschätzt. Trotz den großen Besorgnissen des Unternehmers, solche Leistungen zu erreichen, sind bis heute die durchschnittlichen Leistungen gegen 43 m pro Monat ohne Problem erfüllt. Die Spitzenleistung betrug 54 m pro Monat.

Bei den höheren Leistungen von über 50 m litt allerdings auch die Qualität der Felssicherung und es kam zu größeren Verformungen.

Wegen des schlechten Zustandes der Auskleidung der Sondierstollens (ursprünglich eine Bestandteile der zukünftigen Tunnels) muss Unternehmer diese abbrechen und komplett austauschen. Hier muss ich darauf aufmerksam machen, dass die Stollenauskleidung (Felssicherung) schon in den Jahren 2001 – 2003 installiert wurde und ihre gewährleistete Lebensdauer max. auf 2 Jahre geplant wurde. Dank der speziellen Abbruchmethoden (Diamantvoreinschnitte, Teilabbruchquerschlitze im Vorsprung etc.) kommt es zu keiner Verzögerung des Vortriebs.

Die Rohrschirme sind durch die speziellen Selbstbohrrohren mit der Zementbohrlochspülung durchgeführt. Dies ermöglicht, eine Röhre in der Länge 17 m komplett in 30 Minuten einzusetzen. Die Rohrschirme sind mit einem Spezialbohrgerät (17 m lange Lafette) erstellt.

Die Verformungen in den Sondierstollen und auch die Setzungen während des Sondierstollenvortriebs an der Oberfläche dauerten fast 18 Monate.

Beim Tunnelvortrieb kann man die Beruhigung der Verformungen im Tunnel schon nach einem Monat (spätestens nach zwei Monaten) feststellen. An der Oberfläche kommt es nach spätestens weiteren zwei Monaten zur Beruhigung.

Erfahrungen mit den ausgeführten Bauhilfsmassnahmen

Im Portalbereich Kralovo Pole, im Bereich von Tm. 50 bis 80 m, haben beide Tunnels sehr geringe Überdeckungen von ca. 5 bis 8 m. Beim Vortrieb der Untersuchungsstollen wurden hier große Probleme signalisiert. Daher wurden im Voraus aus den Sondierstollen heraus massive Injizierungen (PU-Harz) appliziert, um die Wassereintritte zu minimieren.

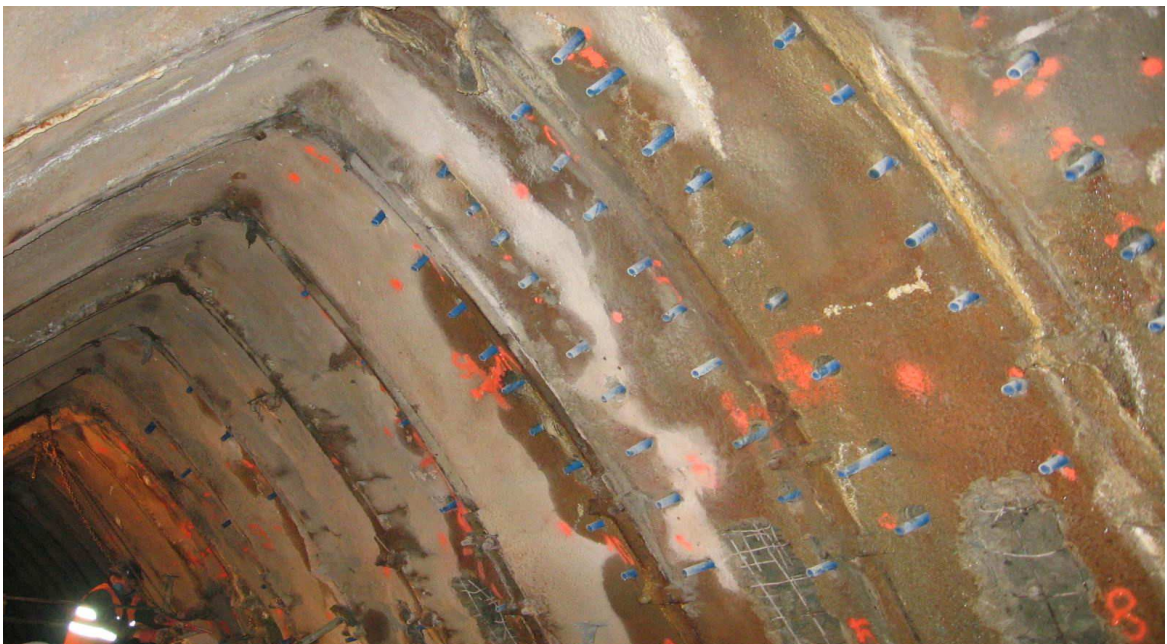


Bild 8 : Injizierung in den Untersuchungsstollen vor der Profilausweitung

Um gefährliche Auswirkungen des Vortriebs auf die Bebauung zu minimieren, wurden an ausgewählten kritischen Abschnitten beidseitig vertikale Jettingwände längs der Hälfte von der Tunnelröhre I durchgeführt.

Die größeren und am meisten beeinflussten und gefährdeten Häuser über dem Tunnel am Anfang des Vortriebs wurden durch die Kompensationsinjizierung angehoben (26 Häuser). Für die Steuerung der Hebung wurden spezielle Messungen durchgeführt. Neun geodätische Totalstationen waren acht Monate im Betrieb. Diese haben jede Stunde automatisch hunderte Punkte auf den Häusern gemessen und die Daten in den zentralen Steuercomputer übertragen. So konnte man die max. vorgeschriebene Hebungsgeschwindigkeit bis 3 mm pro Tag halten und die maximale Setzung gegen 25 mm bei der Neigung der Häuser weniger als 1:1000 erreichen. Die Hebungsinjektionen erfolgten von 7 Schächten aus. Insgesamt wurden von einem Schacht bis zu 21 Hebungskampagnen durchgeführt.

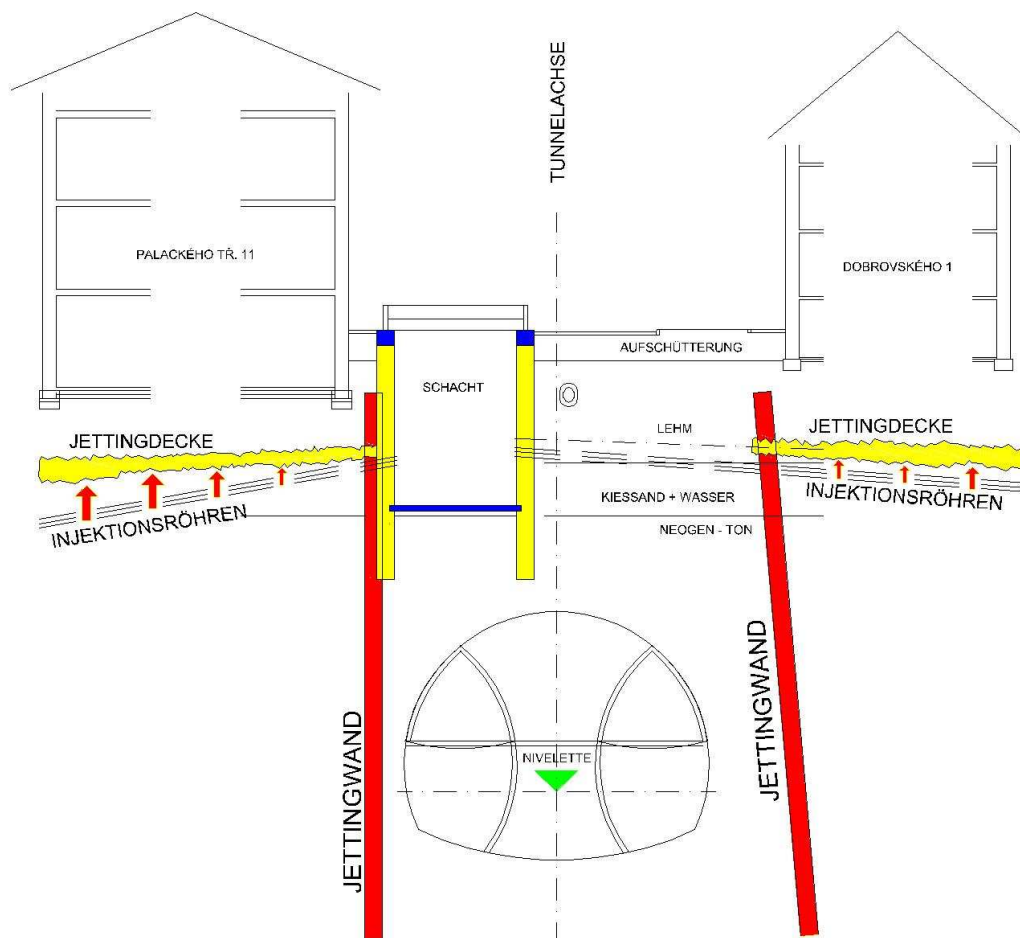


Bild 9 :Jettingwände und Kompensationshebung

Zur Minimierung der Setzungen der neuen Bauten über dem Tunnel (Kreuzung, Brücken, Strassen, Stützmauern und vor allem die neue Kanalisation) wurden mehrere Querschlitzwände (Jettingwände und Pfählwände aus schwachen Beton) in einer Distanz ca. von 10 m durchgeführt. Auf diese Wände stützten sich anschliessend die Rohrschirme ab. Der Tunnel musste durch diese Wände vorgetrieben werden, aber unter den so beidseitig eingespannten Rohrschirmen verursachte der Vortrieb fast keine Setzungen(!)

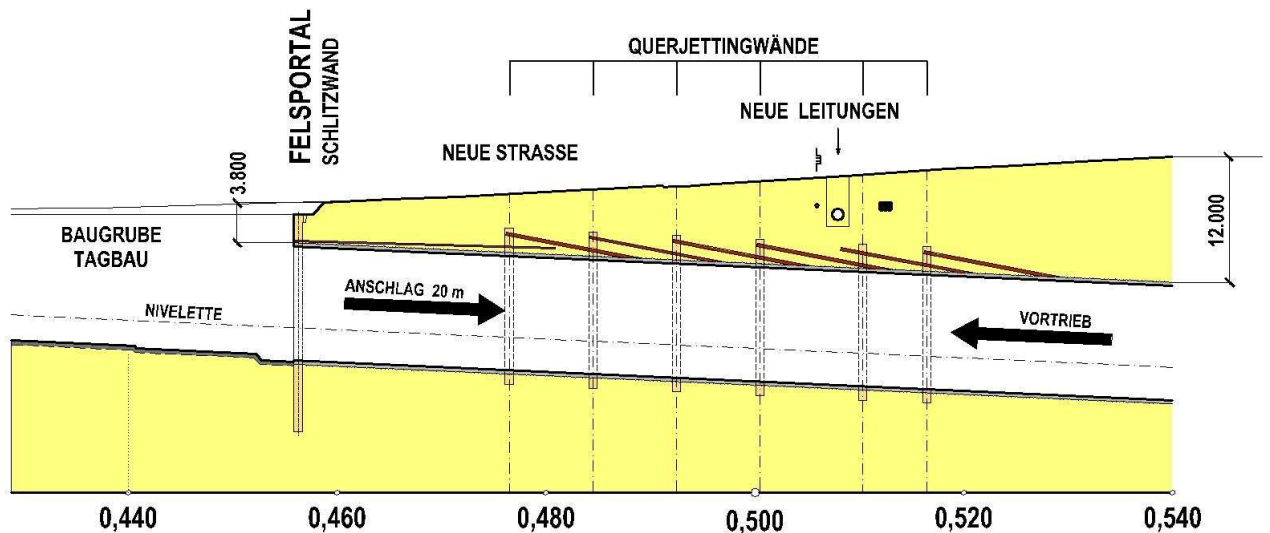


Bild 10 :Querjettingwände und eingespannte Rohrschirme

Schlusswort

Der ausgeführte Vortrieb und vor allem die damit zusammenhängenden intensive Messungen zeigen, dass es möglich ist, einen Tunnel in schwierigen geologischen Bedingungen mit geringer Überdeckung unter dichter Bebauung auch mit der klassischen bergmännischen Vortriebsmethode ohne größere Probleme zu erstellen.

Es ist erfreulich, dass die für das Projekt auf Basis numerischer Modelle berechneten Setzungsmulde und Verformungen der Felssicherung beim Vortrieb (entgegen massiver pessimistischen Prognosen Dritter) nicht übergeschritten wurden.

Eine offensive Kommunikation mit den Bewohnern, die über dem Tunnel wohnen, häufige Hausinspektionen und vor allem sofortige operative Sanierungen kleinerer Schäden (Fenster- und Türverriegelung, Reparatur von Rissen, Wandverkleidungen, etc.) sind nötig und nur durch dieses proaktive Vorgehen ist ein Tunnelbau in so kritischen städtischen Verhältnissen überhaupt erfolgreich machbar.