

Sichere und schadlose Ausführung innerstädtischer Tunnelvortriebe

Das Beispiel City-Tunnel Leipzig

Andreas Irgartinger, Projekte Freie Hansestadt Bremen und City-Tunnel Leipzig, Bereichsleiter, DEGES Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH, Berlin, Deutschland



Das Projekt City-Tunnel Leipzig verbindet den Hauptbahnhof mit dem Bayerischen Bahnhof und unterquert hierbei den zentralen Bereich der teilweise denkmalgeschützten Innenstadt. Der Tunnel wurde mit einer Tunnelbohrmaschine aufgeföhren; die Stationen überwiegend in der Schlitzwand-Deckel-Bauweise hergestellt. Zur Sicherung der insgesamt 61 zu unterföhrenden Gebäude wurden aufgrund der sehr oberflächennahen Linienföhhrung aktive Sicherungsmaßnahmen erforderlich. Hierfür wurde das Compensation-Grouting-Verfahren eingesetzt. Durch Einpressen von Zementsuspension in verschiedenen Phasen werden hierbei Baugrundinhomogenitäten ausgeglichen und die Gebäude im Rahmen der vorab definierten Grenzwerte angehoben, um die Auswirkungen auf die Gebäude durch die Durchföhhrung der Tunnelbohrmaschine (TBM) zu minimieren. Die Messwertanalyse zeigt, dass sich der Einsatz der aktiven Sicherungsmaßnahmen bewährt hat. Dies wird anhand eines charakteristischen Beispiels (Messehaus am Markt) aufgezeigt.

Safe and harmless drive of inner city tunnels – The Leipzig city tunnel as an example: *The Leipzig City Tunnel project links the main railway station to the Bayerisch station and crosses under the city centre, parts of which are under preservation orders. The tunnel was driven by a tunnel boring machine, the stations being constructed predominantly by the slotted wall and cover method. Because the line runs close to the surface active measures were required to secure the total of 61 buildings, under which the tunnel passes. The compensation grouting method was used for this purpose. Inhomogeneities in the subsoil are compensated by injection of cement suspension in different phases and the building raised within the limits defined in advance in order to minimise the effects of the passage of the tunnel boring machine (TBM) on the buildings. Analysis of the measured values shows that use of the active securing measures was effective. This is illustrated with the aid of a characteristic example.*

Die Realisierung des Projekts erfolgt unter einer gemeinsamen Bauherrenschaft. Dies sind die Deutsche Bahn AG und der Freistaat Sachsen, wobei der Freistaat Sachsen als verantwortlicher Bauherr die Rohbauarbeiten des Tunnels und der Stationen inklusive deren Ausbau eigenständig abwickelt. Er wird hierbei durch die DEGES (Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH) vertreten.

Der bahnspezifische Tunnelausbau mit der Anbindung an das bestehende Netz sowie die netzergänzenden Maßnahmen werden von der Deutschen Bahn mit der Einbindung der DB Projektbau GmbH übernommen.

Die Gesamtaufwendungen für das Projekt City-Tunnel Leipzig werden derzeit mit circa 960 Mio. € prognostiziert.

Das Kernstück

Das Rohbaulos „City-Tunnel Leipzig Los B“ ist das Kernstück des zukünftigen City-Tunnels. Das Streckenlos verbindet den Haltepunkt Bayerischer Bahnhof mit dem Hauptbahnhof und führt über die Haltepunkte Wilhelm-Leuschner-Platz und Markt.

Die Haltepunkte wurden mit Ausnahme des Bayerischen Bahnhofs in Deckelbauweise erstellt. Der Baugrubenverbau wurde im Schlitzwandverfahren mit Wandstärken von 100 bis 150 cm bis in 35 m Tiefe ausgeföhrt. In

der Trasse des neu zu errichtenden Haltepunkts Bayerischer Bahnhof liegt der im Jahr 1844 als gemauertes Bogenbauwerk errichtete Portikus (Bild 1).

Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen kam ein Sondervorschlag zur Ausführung, den historischen, denkmalgeschützten Portikus aus dem Baufeld zu verschieben.

Somit konnte der Bau des Haltepunkts unabhängig von Sicherungsmaßnahmen an der

Bild 1. Portikus mit Baugrubenverbau Bayerischer Bahnhof.



Irngartinger:

Sichere und schadlose Ausführung innerstädtischer Tunnelvortriebe – Das Beispiel City-Tunnel Leipzig



Bild 2. Ausfahrt in die Station Hauptbahnhof am 31.10.2008.

Bild 3. Gebäudespezifische, zulässige Winkelverdre- hungen.

| Umfang der aktiven Gebäudesicherung | | | |
|---|--------------------|------------|--------------------------------|
| Gebäude-Nr. (siehe Gebäude-dokumentation) | Straße | Hausnummer | Grenzwert der Winkelverdröhung |
| 13 | Windmühlenstr. | 18-20 | 1 / 1100 |
| 14 | Windmühlenstr. | 16 | 1 / 1050 |
| 15 | Überbau Härteistr. | | 1 / 1050 |
| 17 | Härteistr. | 3 | 1 / 1050 |
| 20 | Windmühlenstr. | 14 | 1 / 1050 |
| 21 | Windmühlenstr. | 10-12 | 1 / 1000 |
| 25 | Petersstr. | 43 | 1 / 1150 |
| 26 | Petersstr. | 39-41 | 1 / 1100 |
| 28 | Petersstr. | 17-23 | 1 / 750 |
| 29 | Petersstr. | 15 | 1 / 1000 |
| 30 | Petersstr. | 1-13 | 1 / 1000 |
| 33 | Markgrafenstr. | 2 | 1 / 1050 |
| 34 | Petersstr. | 48 | 1 / 1000 |
| 35 | Petersstr. | 46 | 1 / 1100 |
| 36 | Petersstr. | 36-44 | 1 / 600 |
| 37 | Petersstr. | 32-34 | 1 / 1200 |
| 38 | Petersstr. | 30 | 1 / 1150 |
| 39 | Petersstr. | 28 | 1 / 750 |
| 40 | Petersstr. | 26 | 1 / 1200 |
| 41 | Petersstr. | 24 | 1 / 1150 |
| 42 | Petersstr. | 22 | 1 / 1150 |

denkmalgeschützten Bausubstanz ausgeführt werden. Nach Fertigstellung des Bayerischen Bahnhofs wurde der Portikus wieder in seine ursprüngliche Lage zurückverschoben.

Die in geschlossener Bauweise herzustellen- den unterirdischen Strecken wurden als zwei eingleisige Tunnelröhren nacheinander mit einer Schildvortriebsmaschine (Außendurchmesser 9 m) mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust und Stahlbetontübbingausbau aufgeföhren.

Die Stahlbetontübbings mit 40 cm Stärke und einem Außendurchmesser von 8,70 m haben die Anforderungen für einen Beton mit erhöhter Brandbeständigkeit zu erfüllen.

Das gewählte Schildmaschinenkonzept mit hydraulischer Förderung (Hydro-/Mixschild) wurde auf die Anforderungen des Leipziger Bodens abgestimmt. Bei einer Überdeckung zwischen 8 und 16 m und der Unterföhierung von 61 Gebäuden mit einer teilweisen Überdeckung unter 4 m im innerstädtischen Bereich war ein setzungsarmer Vortrieb Voraussetzung.

Oberflächennahe Tunnelbaumaßnahmen sind durch vortriebsbedingte Senkungen an der Geländeoberfläche gekennzeichnet. Diese Setzungen werden durch verschiedene Einflussfaktoren hervorgerufen, unter anderem durch Entspannung des Bodens an der Ortsbrust, durch Nachfall des Bodens in den vom Schildschwanz freigegebenen Hohlraum oder auch durch Verformungen der Tunnelauskleidung.

Infolge der sensiblen Bebauung wurden an das Setzungsverhalten der Röhren extrem hohe Anforderungen gestellt und somit das Compensation-Grouting-Verfahren eingesetzt. In diesem Verfahren wurden aus Schächten heraus Hebungsinjektionen unterhalb der betroffenen Bebauung durchgeführt.

Der Baugrund ist geprägt durch geologische Erosions- und starke Akkumulationsprozesse im Pleistozän mit ihren Auswirkungen auf die tertiäre Schichtenfolge. Insgesamt wurden 13 quartäre und 10 tertiäre Schichten auskartiert. Im Allgemeinen handelt es sich um Lockergesteine, die sowohl bindige, gemischtkörnige als auch rollige Bereiche enthalten. Die während des Vortriebs zu durchföhrenden Lockergesteine mit eingelagerten Sandsteinbänken und Sandsteinblöcken beziehungsweise Tertiärquarziten, welche Druckfestigkeiten von bis zu 242 MN/m² aufweisen, reichen im Hangenden von sandigen Mittel- bis Grobkiesen der quartären Flussschotter bis hin zu den feinsandigen, tonigen Schluffen der tertiären Grüngrauen Schluffe. Dazwischen eingeschaltet befinden sich bereichsweise Mittel- bis Feinsande sowie Wechselfolgen von Schluffen, Tonen und Feinsanden.

Die TBM war mit einem weitgehend geschlossenen Schneidrad mit Spüldüsen ausgestattet, um einer Verklebung des Schneidrads beim Durchföhren der plastischen Tone im Grüngrauen Schluff vorzubeugen. Weiterhin war ein Brecher vorgesehen, der Steine mit einer Kantenlänge bis 800 mm zerkleinern konnte.

Als Startpunkt der Vortriebsanlage diente der in offener Bauweise herzustellende Haltepunkt Bayerischer Bahnhof, wobei zunächst die Ost-röhre aufgefahren wurde. Nach Einfahren der Vortriebsmaschine in die Haltepunkte Wilhelm-Leuschner-Platz und Markt wurde die komplette Anlage jeweils durch die zu diesem Zeitpunkt bereits im Rohbau in Schlitzwand-/Deckelbauweise erstellten Haltepunkte geschoben, um den jeweils nächsten Abschnitt auffahren zu können.

Der Tunnelvortrieb erfolgte unterhalb des Grundwassers und bedingte eine wasserdichte Ausführung der Tunnelröhre. Kritisch zu betrachten waren hierbei alle Schnittstellen wie Ortsbrust, Schildschwanzdichtung, Tübbingfugen und die Ein- und Ausfahrvorgänge der Schildmaschine in den Haltepunkten.

Das Auffahren der westlichen Röhre erfolgte analog der ersten Röhre nach der Demontage der Vortriebsanlage am Hauptbahnhof und Rücktransport zur Startbaugrube am Bayerischen Bahnhof. Das Nachlaufsystem wurde durch die bereits erstellte Tunnelröhre zurückgezogen.

Der Abschluss der Schildfahrt erfolgte mit dem Ausfahren in die Station Hauptbahnhof (Bild 2) am 31. Oktober 2008. Die nachlaufenden Arbeiten für den Rohbau und Ausbau der Haltepunkte sowie der Tunnelstrecken erfolgten bis Ende 2013.

Planungsparameter für die Gebäudesicherungsmaßnahmen

Von den insgesamt 61 zu unterquerenden Gebäuden sind 22 denkmalgeschützt. Hierbei sind beispielsweise hervorzuheben das Museum der Bildenden Künste, das Gebäude Stentzlers Hof

(Baujahr 1914 bis 1916) oder das Hotel Mariott, welches einen Abstand zwischen der Tunnelbohrmaschine und dem Fundament von lediglich 2,90 m aufweist.

An 31 der insgesamt 61 Gebäuden wurden aktive Sicherungsmaßnahmen geplant und ausgeführt.

Auf Basis der Bodengutachten und von Berechnungen der Entwurfsplanung wurden für die Ausführungsplanung als planerische Vorgabe gebäudespezifische Grenzwerte vorgesehen.

So gab es unter anderem die bauvertragliche Vorgabe, eine maximale Setzung von 20 mm an der Geländeoberkante nach der ersten Schildfahrt und eine maximale Setzung von 30 mm an der Geländeoberkante nach der zweiten Schildfahrt einzuhalten. Gebäudespezifische maximal zulässige Winkelverdrehungen zeigt das Bild 3. Hierbei ist hervorzuheben, dass Winkelverdrehungen bis zu 1 : 1.200 ($\tan \alpha$ des Setzungswinkels) während der gesamten Sicherungsmaßnahme und der Schildfahrt einzuhalten waren.

Um diese Grenzwerte der Winkelverdrehung einhalten zu können, sollten die Gebäude vor der Durchfahrt der TBM im Rahmen von Vorhebungen um circa 50 % der prognostizierten Setzungen angehoben werden.

Ausführung der Gebäudesicherungsmaßnahmen

Wie bereits ausgeführt, kam das Compensation-Grouting-Verfahren zum Einsatz.

Die Maßnahmen dienen somit nicht vordergründig der Sicherheit des Tunnelvortriebs selbst, sondern erhöhen die Sicherheit für die zu

Bild 4. Anordnung der Bohrschächte im zentralen Bereich der Innenstadt.



Irgartinger:

Sichere und schadlose Ausführung innerstädtischer Tunnelvortriebe – Das Beispiel City-Tunnel Leipzig



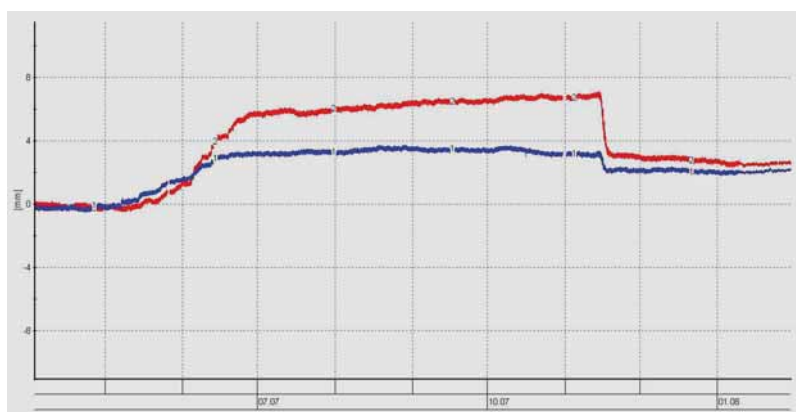
Bild 5. Das Messehaus am Markt.

unterfahrenden Gebäude und mindern Schäden an diesen. Hierzu wurden aus vorab hergestellten Schächten Bohrfächer unter den Gebäuden angeordnet (Bild 4). Es entstanden insgesamt acht Hebungsfelder. Hierbei wird durch sukzessives, gesteuertes Einpumpen von Zementsuspension in die Bohrfächer ein Volumenzuwachs im Baugrund erzeugt. Die einzelnen Bohrlanzen werden separat im Abstand von 1,5 m angefahren und mit einer vorab berechneten Injektionsgutmenge beaufschlagt.

Die Gebäudesicherungsmaßnahmen verlaufen grundsätzlich in folgenden Phasen:

- ➔ Phase 1
Konsolidierung des anstehenden Bodens mit Verfüllung von eventuell vorhandenen Baugrundinhomogenitäten.
- ➔ Phase 2
Herstellung eines Spannungszustands im Boden und Vorhebungen.
- ➔ Phase 3
Durchfahrt der TBM mit der Möglichkeit, bei unplanmäßigen Bewegungen des Gebäudes

Bild 6. Messwertanalyse beim Messehaus am Markt.



durch Einpressen von zusätzlicher Suspension sofort eingreifen zu können.

➔ Phase 4

Gegebenenfalls mögliche Nachverpressung, um gebäudeunverträgliche Verdrehungen und/oder Setzungen nach der Durchfahrt der Tunnelbohrmaschine ausgleichen zu können. Die gesamten Gebäudesicherungsmaßnahmen wurden messtechnisch in einem 24-Stunden/7-Tage-Betrieb online überwacht und ausgewertet. Hierzu wurden in insgesamt 31 Gebäuden 1.350 Hochpräzisionsschlauchwaagen installiert, die nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren funktionieren. Die Messgenauigkeit dieser Schlauchwaagen lag bei 0,1 mm und ermöglichte somit die millimetergenaue Lage- und Höhendefinition des Gebäudes in Real-Time-Auswertung. Diese Messeinrichtungen wurden neben der Beobachtung der Gebäude auch zur Steuerung der Hebungsinjektionen verwendet; vorab definierte Warn- und Alarmwerte kamen hierbei gebäudespezifisch zur Anwendung.

Messwertanalyse

Am Beispiel des Messehauses am Markt (Bild 5) wurden nunmehr die vorliegenden Messwerte ausgewertet und interpretiert.

Wählt man zwei Messstellen innerhalb des Gebäudes aus, die a) direkt oberhalb der Tunnelröhre und b) in einem Abstand von circa 10 m zur Tunnelröhre liegen, lassen sich folgende Erkenntnisse erzielen:

Die Anhebung des Gebäudes beziehungsweise der ausgewählten Messpunkte auf ihr Zielniveau vor Durchfahrt der TBM dauerte circa zwei Monate, hierbei waren Zielniveaus von circa 3,5 mm (blaue Linie, tunnelfern) und circa 6 mm (rote Linie, tunnelnah) zu erzielen (Bild 6). Nach dem Abschluss der Hebungmaßnahmen ist zu erkennen, dass das Gebäude im Rahmen der Messtoleranzen keine weiteren Veränderungen der Höhenlage erfährt – es liegt ruhig und stabil.

Deutlich zu erkennen ist die Durchfahrt der TBM und die dadurch rasch eintretende Setzung im Dezember 2007. In einer detaillierten Analyse der Messwerte ist erkennbar, dass die TBM eine so genannte Bugwelle vor sich herschiebt. Das heißt, dass die Gebäude kurz vor der Durchfahrt der TBM nochmals im Bereich von mehreren Zehntel Millimetern angehoben werden, bevor sie dann direkt nach Durchfahrt der Tunnelbohrmaschine rasch eine Absetzbewegung vollziehen.

Die Analyse der Messdaten (Bild 6) zeigt weiterhin, dass nach Durchfahrt der TBM keine wesentlichen Gebäudebewegungen mehr zu verzeichnen sind und auch kein Nachverpressen des Baugrunds notwendig wurde.

Das Messehaus am Markt lässt sich als charakteristisches Beispiel für die Gebäudebewegungen in Leipzig bezeichnen. So wurde es in keinem Fall notwendig, bei Durchfahrt der TBM (Phase 3) oder nach Durchfahrt der TBM (Phase

4) weitere Verpressarbeiten vorzunehmen. Dies ist im Wesentlichen der qualitativ hochwertigen Ausführung der aktiven Gebäudesicherungsmaßnahmen in den Phasen 1 und 2 sowie der sehr präzisen Steuerung der TBM (Vortriebsgeschwindigkeit, Nachverpressdrücke für Schildschwanzverpressung) geschuldet.

Die Dokumentation der Gebäudebewegungen war gerade in der Diskussion mit den teilweise sehr besorgten Gebäudeeigentümern von entscheidender Bedeutung, da somit nachgewiesen werden konnte, dass Gebäudeschäden maximal durch die Tunneldurchfahrt entstehen konnten und die Gebäude nach Durchfahrt keine wesentlichen Nachsetzungen verkraften mussten.

Fazit

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass die sensible Bebauung in der Innenstadt und die sehr flache Linienführung des City-Tunnels Leipzig ganz besondere Maßnahmen zur Gebäudesicherung erforderlich gemacht haben. Der Umfang der aktiven Sicherungsmaßnahmen und deren Monitorings war außergewöhnlich hoch.

Die in der Planungsphase erstellten Setzungs- und Verformungsprognosen wurden an keiner Stelle erreicht, somit traten auch an den Gebäuden keine größeren Schäden auf. Lediglich kleinere Schönheitsreparaturen waren erforderlich.

Durch die deutliche Unterschreitung der Verformungsprognosen, die auf eine qualitativ hochwertige Ausführung der Sicherungsmaßnahmen und eine hochprofessionelle Steuerung der Tunnelbohrmaschine zurückzuführen ist, ist nach Abschluss der Tunnelbauarbeiten in Leipzig festzustellen, dass verschiedene Gebäude in der Leipziger Innenstadt heute 2 bis 4 mm höher stehen als vor der Baumaßnahme. Wenn im Ingenieurbau von Mess- und Bautoleranzen im Zentimeterbereich gesprochen wird, zeigen diese Werte, welche „Uhrmacherarbeit“ bei der Gebäudesicherung in Leipzig notwendig war und realisiert werden konnte.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Planungs- und Ausführungsprämisse – „Die Sicherheit für die Menschen oberhalb des Tunnels, für die Menschen innerhalb des Tunnels und für die Gebäude hat zu jedem Zeitpunkt oberste Priorität“ – sich trotz des hohen technischen und finanziellen Aufwands in jedem Fall bewährt hat.

Quellenverzeichnis

- [1] Irgartinger, A.; Dischl, G.: City-Tunnel Leipzig – Eine Vision wird Wirklichkeit. Vortrag auf dem Deutschen Beton- und Bautechniktage 2009, Dresden. In: DBV-Heft Nr. 15, S. 25-26, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Berlin, (2009).
- [2] www.citytunnelleipzig.de