Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 129 (2003)
Heft: 39: Löcher unter dem Flughafen

Artikel: Tunnelbau im Pfahlwald
Autor: Graf, Urs / Schorno, Alfred / Landis, Werner / Maurhofer, Stefan
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-108822

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Urs Graf, Alfred Schorno, Werner Landis, Stefan Maurhofer

Tunnelbau im Pfahlwald

In einer Bahn mit dem etwas verwirrenden Namen Sky-Metro werden Passagiere und Besucher (die Terrasse soll bereits ein Anziehungspunkt sein) im Flughafen Zürich seit einigen Wochen zum neu eröffneten Dock E hinaus- und wieder zurückbefördert. Durch Luftkissen in der Schwebe gehalten, gleiten die seilgezogenen Kompositionen über Fahrbahnen aus poliertem Beton.

Da die grossen, ebenen Flächen, die ein Flughafen in Anspruch nimmt, meist auf Schwemmmaterial liegen, ist der Baugrund bei fast allen Flughäfen der Welt schlecht. So auch in Zürich. Siltig-tonige sowie feinsandige, gletschernahe Seeablagerungen mit einzelnen Moräneblöcken prägen den Untergrund. Der Grundwasserspiegel liegt nur knapp unter dem Terrain.

Situation und Längenprofil

Für die Verbindungsbahn zum einige hundert Meter von den bestehenden Flughafengebäuden entfernt liegenden neuen Dock E wurde eine vollständig unterirdische Linienführung gewählt (Bild 1). Im Grundriss waren die Trassierungselemente durch die zwei Bahnhofhallen (Airside-Center und Dock E) und die Pfahlfundamentgruppen des Docks A gegeben. In einer weiten Linkskurve drehen die Tunnels unter dem Tarmac nach Norden, um dann in gerader Linie das Dock E zu erreichen. Der Abstand zwischen den beiden Röhren beträgt 8 bis 11 m, ihre Länge etwa 880 m.

Das Längenprofil wird durch Zwangspunkte unter dem Dock A (20 cm unter einer Dükerleitung) und einem minimalen vertikalen Ausrundungsradius von 5000 m (kein Abheben der Zugseile aus den Rollen) bestimmt. Die zwei Tunnelröhren unterqueren den Gepäcksortierkeller des Docks A mit rund zwei Metern Scheitelabstand. Die Längsneigungen zum Tiefpunkt betragen 4,3 % resp. 1,2 %. Die Piste 10/28 wird mit einem Scheitelabstand von etwa 10 m unterfahren.

Abgeleitet von dynamischen Vibrationsuntersuchungen an den Flugzeugen, die starten und landen, wurde die maximal zulässige Setzung der Piste mit 1,5 cm festgelegt. Unter dem diffizilen automatischen Gepäcksortiersystem des Docks A waren ebenfalls maximal 1,5 cm bzw. 1/1000 differenzielle Setzungen einzuhalten.

Tunnelbau

Die Ausschreibung der zwei separaten Tunnelröhren sah einen bentonitgestützten Hydroschildvortrieb mit wasserdichter einschaliger Tübbingverkleidung von 30 cm Stärke und einem Innendurchmesser von 5,40 m vor (Bild 2). Als Option war ein EPB-Vortrieb (Earth Pressure Balanced) zugelassen. Im Übergangsbereich vom Dock E zum bergmännischen Tunnel liegt die 80 m lange Startbaugrube mit den technischen Vortriebsinstallationen wie Energieversorgung, Separation, Tübbinglager usw. In dieser Baugrube wurden parallel zum Vortrieb die zwei achteckigen Tagbautunnel als Übergang vom tief fundierten Dock zu den schwimmenden Tunnelröhren erstellt (Bild 3). Zirka 24 m lange Schleuderbeton-Rammpfähle und ein genau abgestimmtes Auffüll-, Schütt- und Grundwasserkontrollprogramm erlaubten es, die Setzungen klein (ca. 2 cm) zu halten und sie mit den nachträglich eingebrachten Fahrbahnkonstruktionen auszugleichen.

1

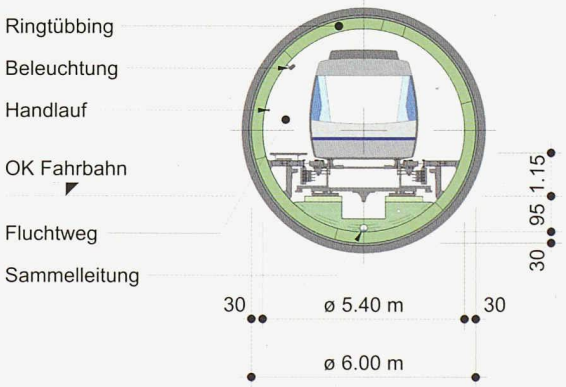
Situation Flughafen Zürich. Die Sky-Metro fährt die Passagiere vom neuen Airside-Center (im Bau) zwischen den Docks A und B unter der Piste 10/28 hindurch zum neuen Dock E. Unten im Bild der Strassentunnel (vgl. Artikel auf Seite 6)
(Bilder und Pläne: Ingenieurgemeinschaft Jet Partners)

2

Schnitt durch einen der beiden separaten Tunnels. Hellgrün die polierten Betonbahnen, auf denen die Bahn mit Hilfe von Luftkissen gleitet. Beim Bau der beiden Röhren (und auch nachher noch) dürfen die Setzungen auf der darüber liegenden Piste 10/28 nirgends mehr als 1,5 cm betragen. Mst. 1:200

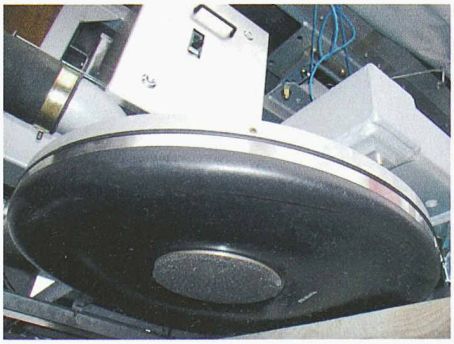
3

Startbaugrube vor dem Dock E. Die linke der beiden achteckigen Tagbauröhren enthält die Einbringöffnung für die Sky-Metro. Im Hintergrund die zu unterquerende Piste 10/28 und die Docks A und B



4

Die seilgezogene Luftkissenbahn Sky-Metro verkehrt vollautomatisch ohne Zugpersonal. Die Fahrzeit vom Airside-Center zum Dock E beträgt bei einer Maximalgeschwindigkeit von 48 km/h 2 Minuten. Bei einer Zugfolgezeit von 2,5 Minuten können in der Stunde 4500 Personen befördert werden (ausbaubar auf 6750 P/h durch Kompositionen mit drei statt zwei Waggons)



5, 6

Eine Komposition der Sky-Metro wird in den Untergrund gehievt. Seitlich erkennbar die dicht an dicht aufgereihten, tellerförmigen Luftkissenerzeuger. Unten im Detail: Die Luft wird von oben eingeblasen, tritt aus dem Spalt bei der kleineren Scheibe in der Mitte aus und hebt beim Entweichen unter dem Gummi des Tellers die Komposition um etwa 0,2 Millimeter an

Beim zweiten Mal schneller

Mit knapp 4 m Scheitelüberdeckung begann man im September 2000 mit dem 146 Arbeitstage dauernden Vortrieb. Ein Bentonitausbläser in einer Auffüllzone nach dem Start stellte die einzige sichtbare Störung an der Oberfläche dar. Sowohl die Piste wie das Dock A wurden störungsfrei unterfahren. Nach dem Durchschlag im März 2001 wurde die Tunnelbohrmaschine teilweise zerlegt und in die Startgrube zurücktransportiert. Grösster Brocken war der Schild mit einem Gewicht von 190 Tonnen.

Dank Verbesserungen an Geräten und bei der Organisation wurde die zweite Tunnelröhre mit einer mittleren Vortriebsleistung von etwa 9,5 m/Tag in nur 92 Arbeitstagen aufgefahren. Die Spitzenleistungen lagen bei 20 m pro Tag. Mit 1000 m langen Betonpumpleitungen wurde anschliessend die Unterkonstruktion der Luftkissenbahn-Gleitflächen eingebracht. Deren Kote liegt 15 cm unter der fertigen Fahrbahn. Diese wurde anschliessend im Auftrag des Bahnsystem-Lieferanten erstellt. Die Ansprüche an die Ebenheit der polierten Betonoberflächen liegen im Millimeterbereich (Bilder 2, 4, 5 und 6).

Im Pfahlwald

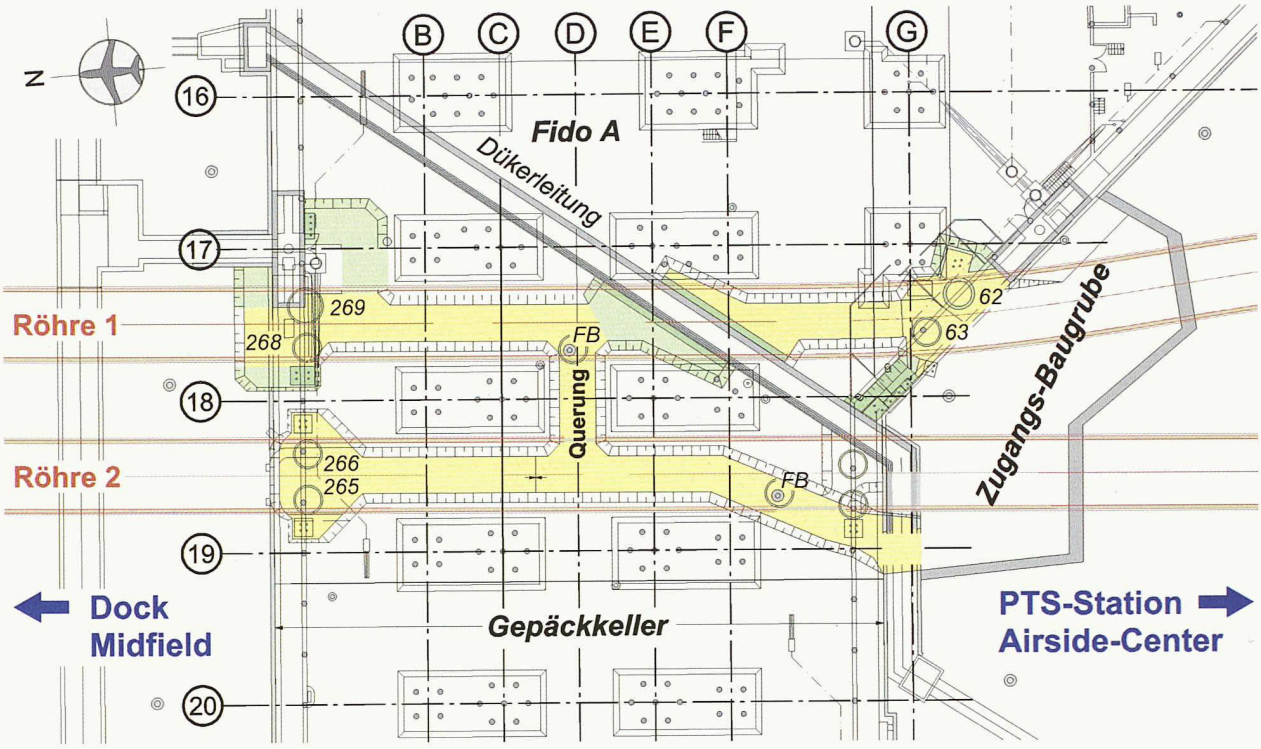
Das Fingerdock A mit dem darunter liegenden Gepäckkeller wird von der Sky-Metro unterquert. Die Überdeckung vom Scheitel der Tunnelröhre bis Unterkante des Gepäckkellers beträgt zwischen 2,5 und 4,0 m. Bei der gewählten Lage der Tunnels zwischen den Pfahlgruppen der Stützenfundation waren acht der bestehenden tragenden Schleuderbetonpfähle im Weg (Bild 7).

Die Vorabklärungen mit Herstellern von Tunnelbohrmaschinen zeigten, dass das Durchbohren der 45 cm dicken, armierten Pfähle im Hydroschildvortrieb nicht möglich war. Es kamen nur zwei Möglichkeiten in Betracht: entweder die Zerkleinerung und Bergung der Hindernisse durch den Bohrkopf hindurch oder die vorgängige Entfernung der Pfähle. Terminliche und sicherheitstechnische Gründe gaben den Ausschlag für die zweite Variante.

Der Zugang zu den Pfählen für die Abfangs- und Bergungsarbeiten erfolgte durch eine 10 m tiefe Zugangsbaugrube und zwei 3,2 m hohe Hilfsstollen (Bild 8). Die Anordnung der Hilfsstollen über den Tunnelaxen ermöglichte es, allfällige weitere Hindernisse auf drei Vierteln der zukünftigen Tunnelbreite zu erfassen (so z. B. zwei alte Stahlfilterbrunnen). Die Ausbruchsicherung bestand aus einem 15 bis 20 cm starken Stahlfaserspritzbeton, der lokal mit einer Netzbewehrung verstärkt wurde. Aus Sicherheitsgründen wurden der Ausbruch und die Ausbruchsicherung in kurzen Etappen von rund einem Meter Länge erstellt. In den senkrechten Anschnitten bei den Seitenwänden war der kompakt gelagerte siltig-sandige Baugrund auf diese Höhe kurzfristig standfest.

Entfernen der Hindernisse

Als Ersatz für die acht abzubrechenden Schleuderbetonpfähle wurden je vier Injektionsbohrpfähle bis in die Moräne abgeteuft und darüber ein Abfangriegel

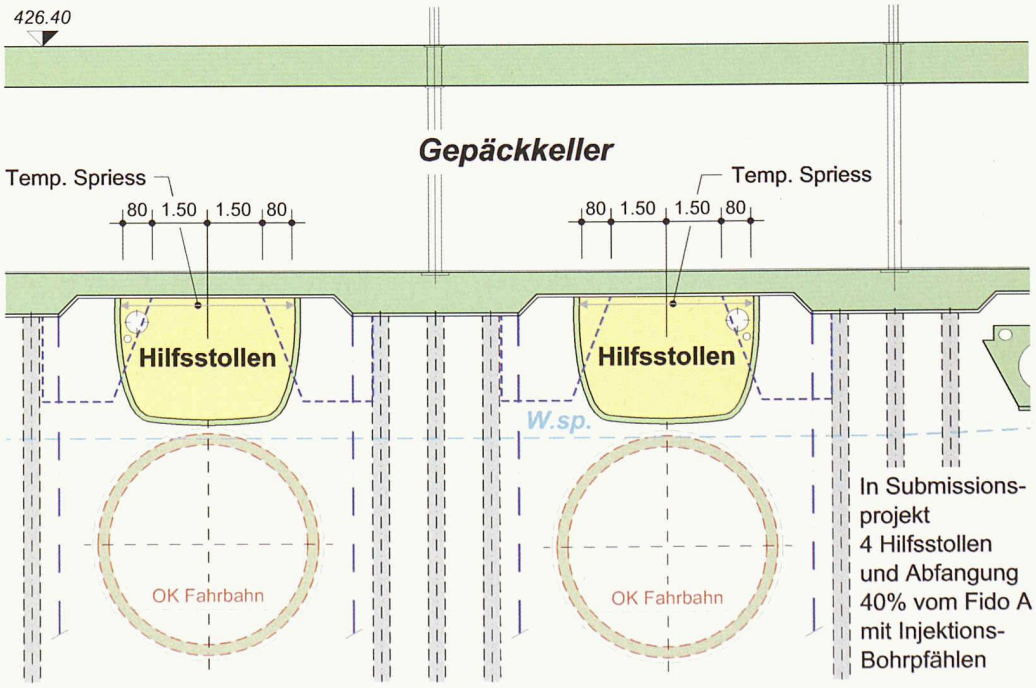


7

Grundriss mit den zwei Tunnelröhren der Sky-Metro (orange) im «Pfahlwald» unter dem Dock A. Die darüber liegenden Hilfsstollen (hellgrün) dienten der vorgängigen Entfernung von 8 Pfählen und 2 Filterbrunnen, die im Weg waren. Daneben, klein und meist quadratisch angeordnet, jeweils 4 als Ersatz eingebrachte Injektionsbohrpfähle. Mst. 1:600

8

Schnitt durch die Tunnelröhren unter dem Dock A. Die Hilfsstollen (diese wurden anschliessend mit einem Leichtbeton aufgefüllt) dienten der Bergung der alten Pfähle. Dies musste vorgängig geschehen, weil sie im Hydroschildvortrieb mit der Tunnelbohrmaschine nicht hätten durchbohrt werden können. Mst. 1:200



Grosse Investitionen
Am 25. Juni 1995 genehmigten die Stimmberechtigten des Kantons Zürich einen Kredit von 873 Mio. Fr. für die Ausführung der 5. Bauetappe am Flughafen Zürich. Zusammen mit den Beiträgen der weiteren Flughafenpartner FIG (heute Unique), Swissair und SBB wurden damit direkte Investitionen von 2,1 Mrd. Fr. ausgelöst.
In den Heften Nr. 27-28/1998 sowie Nr. 48/2002 hat tec21 bereits über das Dock E (damals noch Midfield) berichtet.

betoniert (Bild 7). Mit einem Flachpressenpaket zwischen dem Abfangriegel und der Bodenplatte des Gepäckkellers wurden die vier neuen Pfähle jeweils bis 2400 kN vorbelastet. Als Vorbereitung für die Bergung des unteren Pfahlteiles aus dem Bereich des künftigen TBM-Vortriebes wurden rund um den Pfahl etwa fünf Vakuumlanzen (oder, bei grösseren Tiefen, Kleinfilterbrunnen) versetzt. Anschliessend erfolgte in Unterfangungsbauweise in Etappen von etwa einem Meter die Schachtabtiefung und eine sofortige Sicherung der Schachtwand mit unbewehrtem Spritzbeton. Alle acht Schleuderbetonpfähle konnten mit der beschriebenen Methode ausgebaut werden. Auch zwei Filterbrunnenrohre wurden auf ähnliche Weise geborgen, währenddem man bestehende kurze Rühlwandprofile entweder mit Baumaschinen oder hydraulischen Pressen herauszog.
Nach Abschluss der Sicherungs- und Bergungsarbeiten wurden die Hilfsstollen mit einem pumpbaren, schwindkompensierten Beton CEM I 150 kg/m^3 mit 17 % Luftporengehalt (zur Gewichtsverminderung) aufgefüllt. Die Vorbereitungsarbeiten unter dem Dock A konnten schliesslich mit weniger als 15 mm Gebäudesetzungen vor der Ankunft der Tunnelbohrmaschine beendet werden. Im Rückblick hat es sich als richtig erwiesen, diese Hindernisse vorgängig (und nicht mühsam durch den Bohrkopf des Hydroschildes) zu bergen.

Genau überwachte Setzungen

In der Projektierungsphase wurden Nutzungs- und Sicherheitspläne sowie Kontrollpläne erarbeitet. Die Richtwerte für die zulässigen Setzungen bei den einzelnen zu unterquerenden Bauwerken wurden in diesen Plänen festgelegt. Diese Richtwerte flossen in die Submissionsunterlagen der Bauunternehmer ein und wurden schliesslich werkvertraglich festgelegt. Die Richtwerte stützten sich zusätzlich auf die Erfahrungen, die beim rund 400 m langen Gepäcktunnel gemacht worden waren. Er war ein gutes Jahr zuvor mit der gleichen Tunnelbohrmaschine unter den Gebäuden des Flughafenkopfes vorgetrieben worden.
Es wurde eine Alarmabstufung mit Vorwarn-, Richt- und Extremwerten für die einzelnen Bauteile festgelegt. Bei dieser gleichzeitig und unabhängig laufenden Bauwerksüberwachung wurden die Messungen in bestimmten Intervallen ausgeführt und die Daten per E-Mail allen Beteiligten zur Einsicht und allfälliger Reaktion zugestellt. Die Setzungen beim Vortrieb der Tunnelbohrmaschine betrugen im Bereich bis zur Piste zwischen 10 und 20 mm, auf der Piste lagen sie unter 10 mm.

AM BAU BETEILIGTE

BAUHERRSCHAFT
Flughafen Zürich AG, unique zurich airport, Zürich
BAUINGENIEURE
Jet Partners:
Amberg Engineering AG, Regensdorf
Bächtold Ingenieure, Bern
Ingenieurbüro Eichenberger, Zürich
Höltschi & Schurter, Zürich
Wolf, Kropf & Partner, Zürich
Aeroplan
HBI AG
Haerter + Partner AG
UNTERNEHMUNGEN
ARGE PTS T:
Zschokke Locher AG, Zürich
Prader AG Tunnelbau, Zürich
Wayss & Freytag AG, Frankfurt / Stuttgart
Walo Bertschinger AG, Zürich

Urs Graf, Bächtold AG, Bern, urs.graf@baechtold.ch. Alfred Schorno, Bächtold AG, Bern, alfred.schorno@baechtold.ch. Werner Landis, Eichenberger AG, Zürich, landis@eichenberger-ing.ch. Stefan Maurhofer, Amberg Engineering AG, Regensdorf, smaurhofer@amberg.ch.
Die Autoren waren als Projektingenieure am Bahntunnel beteiligt.