Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 115 (1997)
Heft: 21

Artikel: Innerstädtischer Tunnelbau unter schwierigen Verhältnissen
Autor: Kovári, Kalmán / Kradolfer, Werner
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79246

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: 08.08.2025

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

Kalman Kovari, Zürich, und Werner Kradolfer, Olten

Innerstädtischer Tunnelbau unter schwierigen Verhältnissen

Die beiden Aarauer Stadttunnel der SBB mussten in innerstädtischen Verhältnissen und mit knappster Überdeckung von teilweise nur einigen Dezimetern gebaut werden. Mit den gewählten Baumethoden und Bauhilfsmassnahmen konnten Einschränkungen im Strassenverkehr vermieden werden, und die Häuser blieben während der ganzen Bauzeit bewohnt und erlitten praktisch keine Risse.

Der seit 1858 in Betrieb stehende 460 m lange Doppelspurtunnel am Ende des Bahnhofs der Stadt Aarau bildete das eigentliche Nadelöhr auf der Strecke Zürich-Bern. Dieser alte Tunnel, der auf der Ostseite die Häuser der Altstadt mit einer bis verschwindend geringen Überlagerung unterfährt, wurde bereits dazumal als innerstädtische Baute erstellt. Aus einem Baubericht aus der Zeit entnehmen wir dazu folgenden Beschrieb: «Wie im Eingang schon angedeutet, steigerten sich die Schwierigkeiten der Bauausführung am östlichen Ausgangspunkt des Tunnels in hohem Grade, indem daselbst der Scheitel des Tunnelgewölbes teilweise in den Kellerraum der Wohnhäuser zu liegen kam. Es mussten daher vorerst deren Fundamente, um sich gegen alle Eventualitäten sicher zu stellen, in kleinen Abteilungen unterfangen und auf den natürlichen Felsen abgesetzt werden...» [1]

Der folgende Bericht schildert einige Besonderheiten der Planung und Bauausführung des neuen zweiten Stadttunnels (Tunnel 2) und der Ausweitung des alten Stadttunnels (Tunnel 1). Beide Tunnel verlaufen in einer Jura-Formation mit einer Wechsellagerung von Mergeln und Kalken (Bild 1). Von West nach Ost nehmen der Kalkgehalt und die Gesteinshärte zu. Auf der Ostseite taucht die Felsoberfläche ins Tunnelprofil ab. Die Häuser über dem Tunnel sind dort im Lockergestein fundiert. Der Abstand zwischen Tunnelscheitel und Kellerböden beträgt mancherorts weniger als einen Meter.

Das Lockergestein besteht aus Niederterrassenschottern und zum Teil aus Auffüllungen. Die Schichtung des Felsen verläuft praktisch horizontal mit Schichtstärken von einigen Zentimetern bis mehreren Dezimetern, zum Teil mit feinen siltig-tonigen Zwischenlagen. Die Klüftung ist mässig, jedoch stark unterschiedlich ausgeprägt. Die Kluftöffnungen liegen im Millimeter- bis Zentimeter-Bereich und sind oft mit Ton und Lehm gefüllt.

Im Westen herrscht an der Felsoberfläche angewitterter Mergel, im Osten ein verkarsteter, aber ansonsten gesunder, Kalkstein vor. Solche Verkarstungen wurden bereits beim Bau des bestehenden Tunnels in den alten Plänen dokumentiert und hatten damals zu einem Tagbruch geführt.

Der neue Stadttunnel 2

Der neue Stadttunnel 2 weist eine Ausbruchfläche von rund 100 m² auf. Die für Entwurf und Bauausführung massgebenden Gefährdungsbilder waren:

- Instabilitäten in den Portalbereichen
- Tagbrüche
- Schäden an Gebäuden, Strassen und städtischen Versorgungseinrichtungen infolge übermässiger Setzungen
- das Anfahren von Karsthöhlen mit oder ohne Lockergestein
- Verbrüche im Fels verschiedenen Ausmasses von Steinfall bis Niederbruch

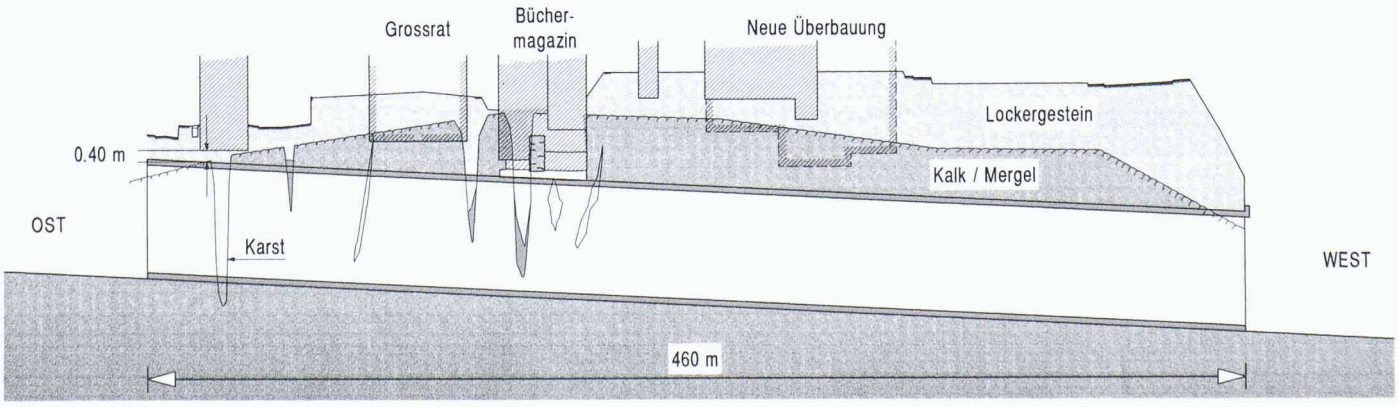
Angesichts der äusserst geringen Überdeckung waren im Normalfall nicht das Kräftespiel, sondern die Gefährdungsbilder das bestimmende Element bei der Entscheidungsbildung.

Den gegebenen Verhältnissen trugen ein Teilausbruch mit Kalottenvortrieb und ein in einem späteren Arbeitsschritt folgender Strossenabbau am besten Rechnung. Das Lösen des Gebirges erfolgte mit einer Teilschnittmaschine des Typs Eickhoff von 40 Tonnen Gewicht, die allerdings in den härtesten Kalken, mit Druckfestigkeiten zwischen 100 und 150 N/mm², ihre Leistungsgrenze erreichte.

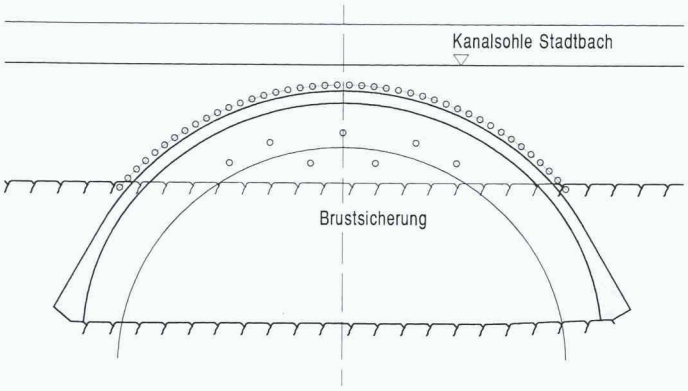
Um den genauen Felsverlauf sowie das Vorhandensein von Verkarstungen vor Ort zu ermitteln, wurden laufend vorauseilende Erkundungsbohrungen gemacht. Entsprechend der Felsüberdeckung, der Überbauung, der Verkehrsflächen und der geologischen Verhältnisse wurden verschiedene Ausbruchklassen festgelegt. Die zeitweilige Sicherung bestand aus einer durch Baustahlgewebe bewehrten Spritzbetonschale mit Stärken von 10-25 cm, aus Swellex-Ankern von 3,0 m Länge sowie aus Gitterträgern. Die Abschlagslänge betrug einen bis maximal fünf Meter. Wo wegen der fehlenden Felsüberdeckung Ankerungen nicht möglich waren, durfte die Abschlagslänge einen Meter nicht überschreiten.

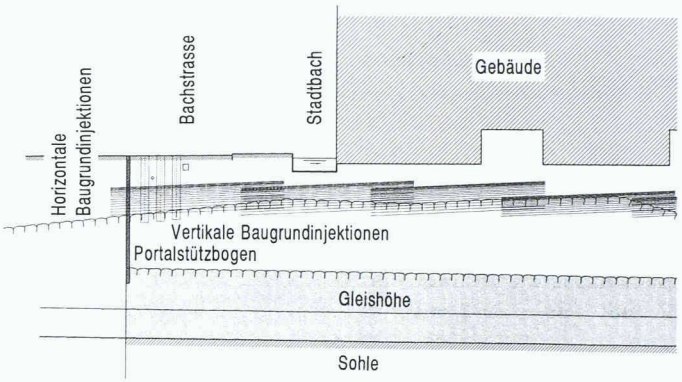
Rohrschirm unter Strassen und Häusern auf der Ostseite

Besondere Bauhilfsmassnahmen waren für den Vortrieb mit der sehr knappen Überdeckung und dem Lockergestein in den beiden Portalbereichen notwendig. Die Lösung für die Bewältigung des Vor-



1
Längenprofil Stadttunnel 1





2
Rohrschirm als Bauhilfsmassnahme beim Kalottenvortrieb des neuen Tunnels 2 unter Strassen und Gebäuden auf der Ostseite (Querschnitt, Längsschnitt)

triebs beim Ostportal bestand im Einbau eines Rohrschirms auf einer Länge von 60 m (Bild 2). Zunächst wurde versucht, das Lockermaterial vorgängig von der Oberfläche und von der Portalbaugrube aus mit einer Zement-/Opalit-Mischung zu injizieren. Das Vorhaben wurde jedoch wegen ungenügenden Erfolgs aufgegeben.

Der Rohrschirm bestand aus Stahlrohren von 150 mm Durchmesser, die entlang der Ausbruchlinie im Axabstand von 30 cm im oben anliegenden Lockergestein eingebaut wurden. Die untersten beiden Rohre wurden in den Fels eingebunden, um Risiken wegen der unruhigen Felsoberfläche abzudecken. Die Rohrlänge betrug 9 m und die Überlappung der Rohre 3 m. Das Aufspreizen des Rohrschirms nach vorne ermöglichte das Ansetzen der jeweils nächsten Rohrschirmetappe. Der Ausbruch im Schutze des Rohrschirms erfolgte in Etappen von einem Meter. Die Sicherung bestand aus Gitterbögen und einem armierten Spritzbetongewölbe. Der Rohrschirm darf als eine in Tunnel-Längsrichtung wirksame, der Ortsbrust vorauseilende, steife Ausbruchsicherung aufgefasst werden. Die Rohre sind vor der Brust im noch nicht ausgebrochenen Material eingebunden und hinten auf der Spritzbetonschale abgestützt. Um ein allfälliges Auslaufen des Lockermaterials zwischen den Rohren zu verhindern, waren die Stahlrohre mit Injektionsventilen versehen, durch die Zementmaterial in den Baugrund eingepresst wurde. Um ein Ausbrechen des Lockermaterials an der Brust zu verhindern, wurde gleichzeitig mit dem Bohren des Rohrschirms eine Brustsicherung mit glasfaserverstärkten Kunststoffstäben eingebaut.

Für den Stadttunnel Aarau trug der Rohrschirm damit wesentlich dazu bei, dass die Deformationen an der Terrainoberfläche und bei den Gebäudefundamenten sehr gering blieben. Die Messungen haben Setzungen von 1 bis 3 mm ergeben.

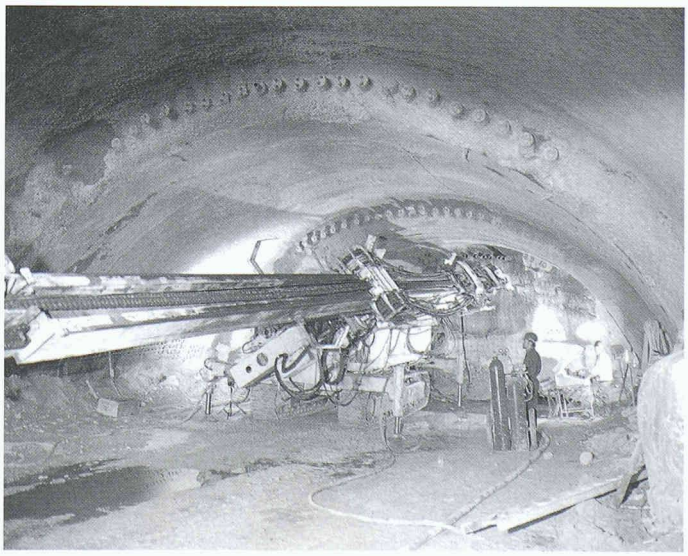
Das Erstellen einer Rohrschirmetappe benötigte in zweischichtiger Arbeit ungefähr drei Wochen. Die Rohre wurden mit einer Casagrande-Maschine mit einer Bohrlafette von 17 m Länge gebohrt. Dieser Vorgang benötigte 8–10 Schichten, das nachfolgende Injizieren aus den Rohren 6–10 Schichten und der Ausbruch und die Sicherung mit einem Abschlag von 1 m Länge pro Arbeitstag weitere 12 Schichten.

Jetting-Verfahren auf der Westseite

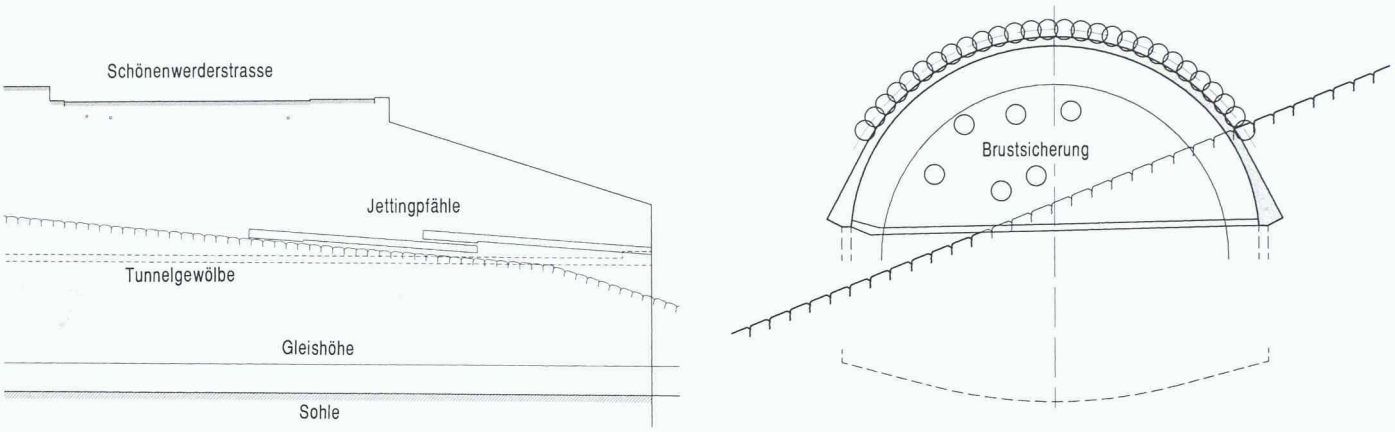
Beim Westportal schneidet die Felsoberfläche schleifend das Tunnelprofil auf einer Länge von rund 20 m. Infolge der starken Verwitterung und Auflockerung des Gesteins war die Felsoberfläche nicht klar feststellbar. Da bei diesem Portal eine ausreichende Überdeckung vorhanden ist, wurde als Bauhilfsmassnahme Jetting gewählt (Bild 4). Um die Eignung dieser Methode im vorhandenen inhomogenen Lockermaterial aus verwittertem Fels mit Schrobben und viel feinkörnigem und bindigem Material abzuklären, wurde vorgängig in der Portalbaugrube ein horizontaler Probepfahl erstellt und ausgegraben. Der vorgefundene Pfahldurchmesser variierte zwischen 20 und 50 cm, im Durchschnitt wurden etwa 40 cm erreicht.

Im Schutze des Jetting-Gewölbes, das wegen der vereinzelten Einschnürung der Pfähle Öffnungen aufwies, wurde die Kalotte nur meterweise ausgebrochen und mit einer Spritzbetonschale gesichert. Damit das Lockermaterial an der Brust nicht einbrach und die Stabilität des Jettinggewölbes gefährdete, wurden horizontale Brustpfähle im Jettingverfahren angeordnet.

Insgesamt wurden 3 Jettingetappen von je 11 m Länge ausgeführt. Die Pfahllänge betrug 15 m, die Überlappung 4 m. Im Vergleich zur Rohrschirmmethode beanspruchte das Tunneljetting etwas weniger Zeit, weil die Injektionsarbeiten entfielen. Die Bauzeit betrug für eine Vergleichslänge von 6 m bei zweischichtigem Einsatz knapp zwei Wochen gegenüber deren drei beim Rohrschirm.



3
Rohrschirmetappen mit Aufspreizung der Rohre für den Bohransatz der jeweils folgenden Etappe, Kalottenvortrieb neuer Tunnel 2



4
Tunneljetting als Bauhilfsmassnahme im Lockergestein auf der Westseite des neuen Tunnels 2 (Querschnitt, Längsschnitt)

Die Jettingmethode hat sich beim Westportal in Aarau bewährt. Wegen der knappen Überdeckung von 3 bis 4 m im Hang über dem Portal lag sie aber an der Grenze ihrer Einsatzmöglichkeit. Der hohe Druck beim Jettingvorgang bewirkte Hebungen im Hang über dem Portal. Die grössten Setzungen auf der Strassenoberfläche infolge des Tunnelausbruchs betrugen 50 mm.

Ausweitung des bestehenden Stadttunnels 1

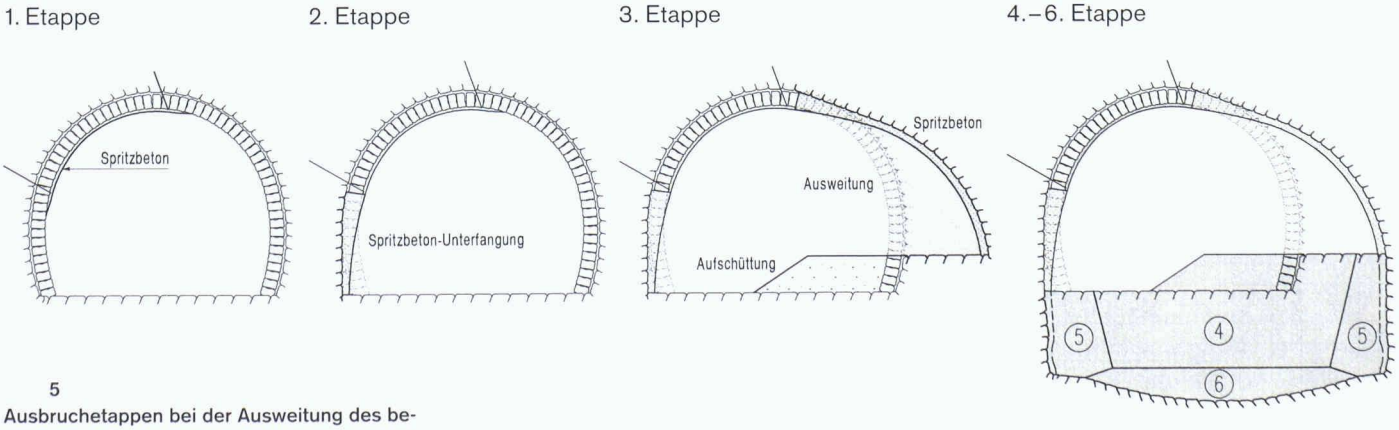
Die zweite grosse Bauaufgabe war die Ausweitung des bestehenden Stadttunnels 1. Sie konnte nach Umlegung des Bahnverkehrs in den neuen Tunnel in Angriff genommen werden. Zu den bestehenden 40 m^2 Querschnittsfläche mussten zusätzlich 60 m^2 ausgebrochen werden.

Das Längenprofil des alten, auszuweitenden Tunnels (Bild 1) sieht ähnlich aus wie das des neuen Tunnels, nur sind die Überdeckungen im Osten noch knapper, und die Gebäude sind teilweise direkt auf das Natursteingewölbe des Tunnels aus dem letzten Jahrhundert fundiert. Zwischen dem Kellerboden einiger dieser alten Gebäude, einem Naturboden, und der Ausbruchlinie lagen nur gerade 40 cm Lockergestein. Die Verkarstungen entlang dieser Tunnelröhre waren wesentlich ausgeprägter als entlang des neuen Tunnels. Für den Bauvorgang wurde ein schrittweises Vorgehen gewählt. Dabei wurde der Grossteil des Natursteingewölbes demoliert und nur der Zwickel zwischen 10 und 12 Uhr an Ort und Stelle belassen. Der neue Vortrieb musste so vor sich gehen, dass die obenliegenden Gebäude keinen Schaden nehmen konnten (Bild 5).

Besondere Beachtung musste dem mit Lockermaterial verfüllten Hohlraum zwischen dem Naturstein-Tunnelmauerwerk und der ursprünglichen Ausbruchlinie geschenkt werden. Um ein sattes Anliegen sicherzustellen, wurde dieser Hohlraum hinter dem verbleibenden Teil des Naturstein-Mauerwerks mit Zementinjektionen verfüllt.

Ausbruch in Etappen

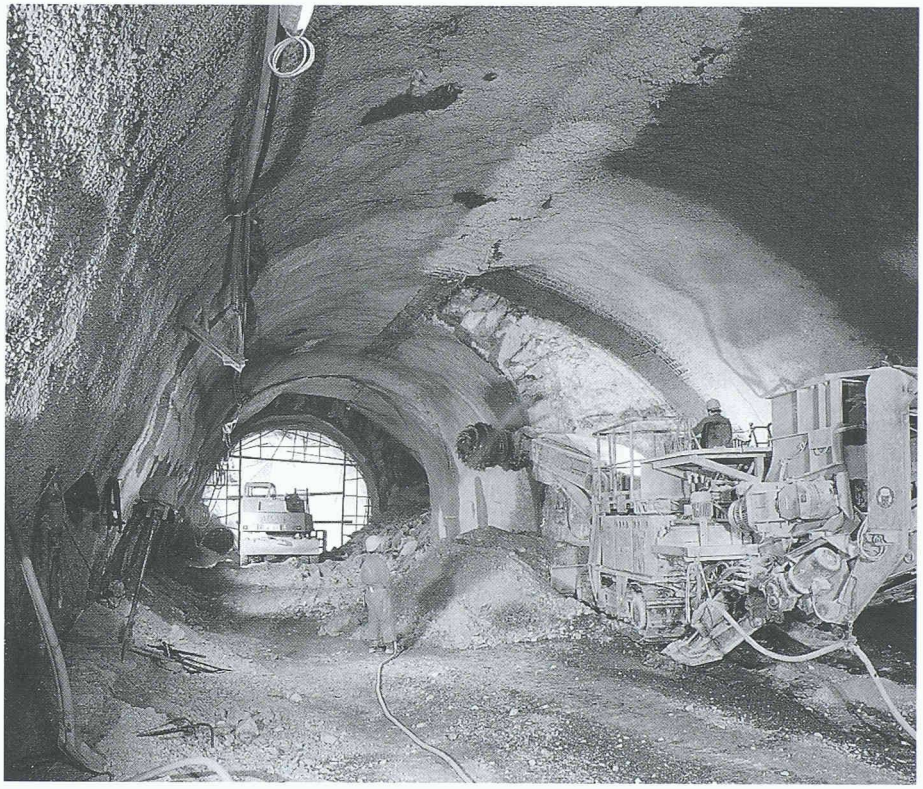
Die erste Etappe der Tunnelausweitung bestand aus der Sicherung des verbleibenden Teils des alten Mauerwerks mit einer einlagig bewehrten Spritzbetonverkleidung von 8 cm Stärke und einigen Ankern. In der zweiten Etappe wurde die Gewölbeunterfangung auf der linken Seite ausgeführt. Der Ausbruch erfolgte fensterweise mit Hilfe eines Hydraulikhammers mit einer Etappenlänge von jeweils vier Metern. Die dritte Etappe bestand aus der seitlichen Ausweitung nach rechts (Richtung Süden). Dazu wurde die gleiche Teilschnittmaschine verwendet wie für den neuen Tunnel. Wegen der beschränkten Einsatzhöhe des Schrämkopfs war ein Ausbruch über die ganze Höhe des bestehenden Tunnels nicht möglich und es musste mit Ausbruchmaterial eine genügend grosse Standfläche für die Maschine aufgeschüttet werden. Der Ausbruch wurde mit Abschlagslängen von einem bis vier Metern ausgeführt. Analog zum neuen Tunnel waren die Felsüberdeckung, die Überbauung an der Oberfläche und die



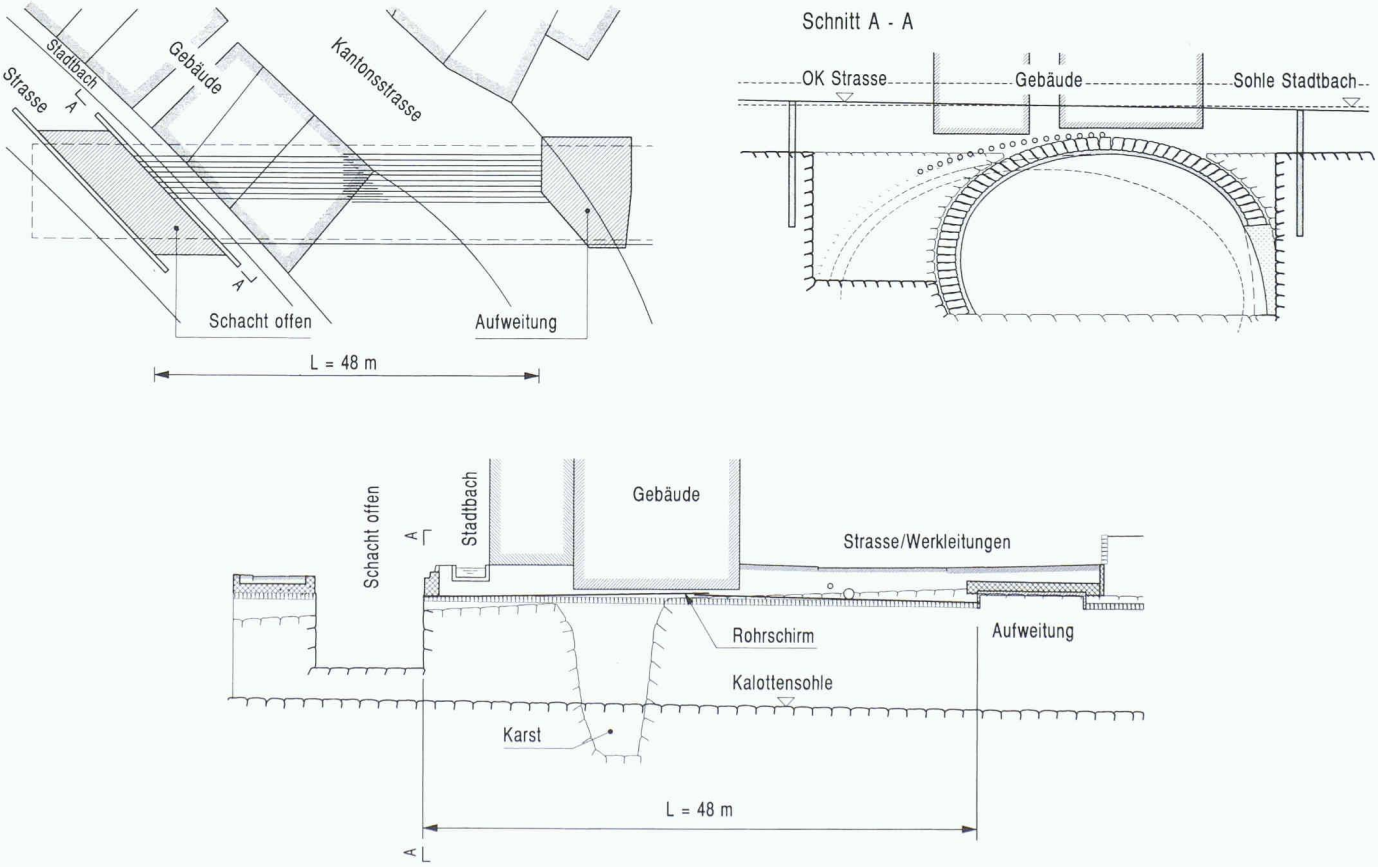
5
Ausbruchetappen bei der Ausweitung des bestehenden Stadttunnels 1

geologischen Verhältnisse bestimmend für die Festlegung der Abschlagslängen und der Ankerung. Hingegen wurden keine Ausbruchklassen definiert, sondern der Unternehmer hatte für den Ausbruch einen Mischpreis zu kalkulieren.

Die Ausbruchsicherung bestand aus einer Systemankerung mit Swellex-Ankern zur unmittelbaren Sicherung des Arbeitsraums und einer zweilagigen armierten Spritzbetonschale von 15–20 cm Stärke. Aufgrund der Erfahrungen beim neuen Tunnel konnte die Freigabe für den jeweils nachfolgenden Abschlag erfolgen, wenn der Spritzbeton eine Festigkeit von 5 N/mm^2 erreicht hatte. Mit diesem Vorgehen konnte im zweischichtigen Betrieb pro Arbeitstag ein Abschlag vorgenommen werden, im günstigen Fall sogar deren zwei. Gleichzeitig wurde an zwei Vortriebsstellen gearbeitet. Deren Distanz war aber begrenzt durch die zur Verfügung stehenden Anschlusskabellängen der Teilschnittmaschine beim Hin- und Her-Verschieben und betrug etwa 30 Meter. Die Vortriebsleistung dieser Ausweitung pro Arbeitstag erreichte so zwei bis maximal acht Meter. Das verbleibende Stück des alten Tunnelgewölbes war Bestandteil der



6
Seitliche Ausweitung des bestehenden Tunnels 1 mit der Teilschnittmaschine



7
Rohrschirmverfahren bei der Ausweitung von Tunnel 1 bei verschwindend kleiner Überdeckung unter Strassen und Häusern beim Ostportal (Situation, Querschnitt, Längsschnitt)

Hohlraumsicherung. Auf diese Weise war nun die Kalotte fertig ausgebrochen. Trotz ihrer asymmetrischen Form bestand bautechnisch kein Unterschied mehr zur Kalotte beim Bau des neuen Tunnels. Der Strossenabbau konnte darum in gleicher Weise wie beim neuen Tunnel erfolgen.

Ein besonderes Problem stellte sich in den Zonen, in denen die Felsüberdeckung ungenügend war: es konnten keine Anker versetzt werden. Die Lösung bestand darin, das Natursteingewölbe auf seiner ganzen Abwicklung mit einer armierten Spritzbetonschale von 8 cm Stärke zu versehen und die Abschlagslänge auf einen Meter zu beschränken. Die Spritzbetonschale hatte auch in Längsrichtung eine Tragwirkung und vermochte den Bestand bzw. die Tragfähigkeit des Tunnelmauerwerks im Ausbruchbereich zu gewährleisten.

Unterfahrung von Strassen und Gebäuden auf der Ostseite

Bei diesem Tunnel bestand die schwierigste Aufgabe in der Unterfahrung der Gebäude und der Hauptverkehrsstrasse auf einer Länge von rund 50 m bei geringer bis verschwindender Überdeckung. Nach einer Überprüfung verschiedener Varianten erwies sich wiederum die Rohrschirmmethode als die beste Lösung (Bild 7). Die fehlende Überdeckung erlaubte allerdings keine Aufspreizung des Rohrschirms und demzufolge auch keine etappenweise Ausführung wie beim neuen Tunnel. Aufgrund der guten Resultate in der Bohrgenauigkeit, die die übliche Toleranz von ±2% erheblich unterschritt, wurde auf Vorschlag des Unternehmers beschlossen, 24 m lange parallele Bohrungen für den Rohrschirm auszuführen. So konnten die Rohrschirme von beiden Seiten aus einem offenen Schacht einerseits und aus einer untertägigen Aufweitung des alten Tunnelgewölbes anderseits unter Häusern und Strasse erstellt werden. Dabei drang ein Rohr in einen Keller ein und ein anderes lag schleifend im Kellerboden. Die Bohrungen aus der Aufweitung passierten äusserst knapp eine Kanalisationsleitung. Unmittelbar davor wurde der Bohrvorgang unterbrochen und die genaue Rohrlage vermessen. Bei zwei Rohren war anschliessend eine Nachbohrung notwendig, eines davon konnte nicht mehr weitergeführt werden. Dass die Kanalisationsleitung beschädigt werden könnte, war in Kauf genommen worden; sie wurde darum während des Bohrvorgangs mit einer Fernsehkamera überwacht. Ein Rohr hatte trotz aller Massnahmen die Kanalisationsleitung tangiert. Sie wurde aber innert weniger Stunden mit einem Kanalroboter wieder repariert.

Die unterirdische Aufweitung für die Rohrschirmbohrungen am westlichen Ende dieser rund 50 m langen Strecke war notwendig, weil ein offener Schacht aus Platz- und Verkehrsgründen nicht in Frage kam. Da die Kalotte der Aufweitung ins Lockergestein zu liegen kam, war das vorgängige Öffnen der Oberfläche dennoch notwendig, um das Lockermaterial durch einen Beton zu ersetzen. Die Überdeckung war so knapp, dass von unten her eine Kanalisationsleitung freigelegt wurde.

Schlussbemerkungen

Trotz aller Besonderheiten und der praktisch fehlenden Überdeckung wurden während der ganzen Bauzeit lediglich die Kellerräume der Gebäude, insbesondere für die Überwachung, beansprucht. Die darüberliegenden Stockwerke dieser alten Häuser blieben bewohnt, und der Verkehr auf der Kantonsstrasse blieb von den Untertagearbeiten weitgehend unberührt. Mit einem ausgedehnten Überwachungsprogramm wurde sichergestellt, dass keine unzulässigen Deformationen auftraten. Durch die Tunnelbauarbeiten sind keine nennenswerte Schäden entstanden, und die Deformationen hielten sich im Rahmen von wenigen Millimetern. Das Bauprogramm und der Kostenvoranschlag konnten eingehalten werden.

Literatur

[1]
Zschokke Th.: Die Gebirgsschichten, welche vom Tunnel zu Aarau durchschnitten wurden. Ca. 1860, weitere Angaben unbekannt.

Adresse der Verfasser:
Kalman Kovari, Prof. Dr., Institut für Geotechnik, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich, und *Werner Kradolfer*, dipl. Bauing. ETH, Rothpletz, Lienhard+Cie AG, Aarauerstr. 50, 4600 Olten

Stefan Baader, Basel, und Rudolf Roth, Aarau

Portalbauwerke

Portalbauwerke im städtischen Raum stellen hohe Anforderungen an die gestalterische Qualität der Bauten. Dabei sind verschiedene Aspekte der gestalterischen und konstruktiven Konzeption zu berücksichtigen.

Die kürzlich fertiggestellten östlichen Portalbauwerke des Aarauer Stadttunnels stellen die ziemlich genaue Umsetzung des im Jahre 1988 mit dem ersten Preis versehenen Wettbewerbsvorschlags dar. Die Gestaltung der Portalbauwerke war Teil der Wettbewerbsaufgabe im Zusammenhang mit der darüber geplanten Überbauung Behmen II. Die Realisierung der Hochbauten ist wegen der seit dem Wettbewerb völlig veränderten Konjunkturlage ins Stocken geraten. Teile davon dürften nun aber mit einer anderen Nutzung in etwas veränderter Form gebaut werden.

Gestalterische Konzeption

Eine der wesentlichen Prämissen der Wettbewerbsausschreibung bestand darin, dass die im Tagbau zu erstellenden Tunnelvoreinschnitte mit rechteckigem Querschnitt ausser ihren eigenen keinerlei zusätzliche Lasten aufnehmen können. Das bedeutet, dass eine Baustruktur entwickelt werden musste, die es ermöglicht, zusätzliche Lasten seitlich der breiten Tunnelkästen des Portalbauwerks abzugeben. Spantenähnliche Betonscheiben im Abstand von 7,5 m - statisch als Druckbogen wirksam - werden die Vertikalkräfte der oberirdischen Bauten auf den tragfähigen Baugrund ableiten. Der zwischen den zwei Tunnelportalen verbleibende Felskeil dient als Fundament für den schlanken Hochbau darüber. Dieser wird grundrisslich durch die Gleisführung in den beiden Tunnelröhren bestimmt (Bild 1).

Die gestalterische Dramatisierung des Eisenbahn-Doppelportals im Zusammenhang mit geplanten Hochbauten war das Thema der Gesamtüberbauung. Das Gebiet rund um den Bahnhof soll - zusam-