



NORD-SÜD STADTBAHN KÖLN Tunnelbau mit Druckluft



- Technik
- Sicherheit
- Geschichte

So nah am Rhein ist der Grundwasserpegel hoch. Damit während der Bauarbeiten kein Wasser in die Arbeitsbereiche eindringt, wird Druckluft eingesetzt.



Inhalt

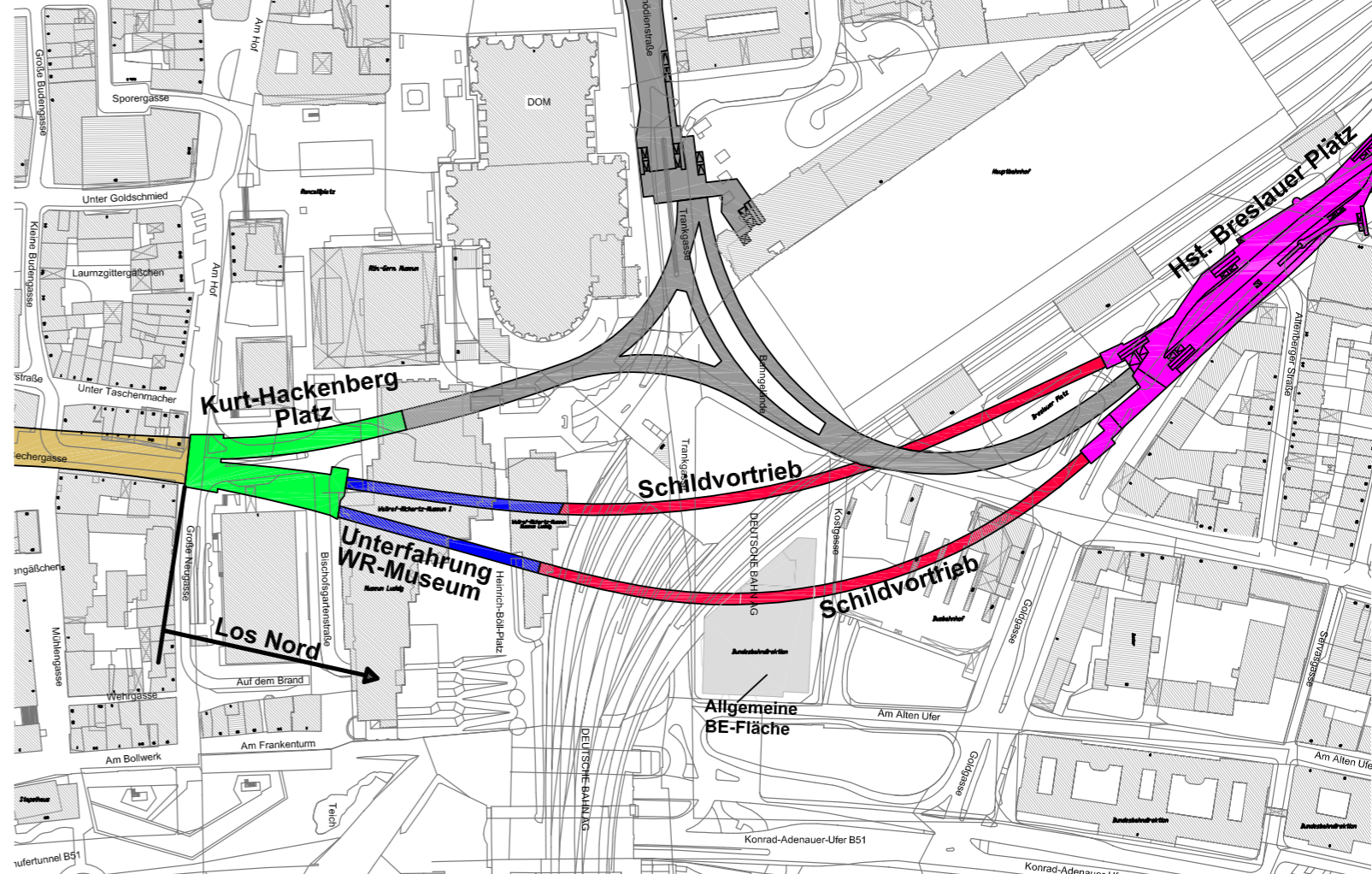
NORD-SÜD STADTBAHN KÖLN
Tunnelbau mit Druckluft

- | | |
|--|--|
| 4 Der Druckluftvortrieb
Unter dem Kurt-Hackenberg-Platz | 14 Das Betonieren
Im Pilgerschritt |
| 6 Museum über Druck
Vorbereitung der luftdichten Arbeitskammer | 16 Die Verbindung
Unter dem Museumskomplex |
| 8 Die Schleusen
Zwischen Normal- und Überdruck | 18 Die Querschläge
Unter dem Chlodwigplatz |
| 10 Druck machen
Druckstärke und Versorgung mit Druckluft | 20 Das Arbeiten
Der Druckausgleich |
| 12 Der Aushub
Alles muss raus | 22 Geschichte mit Überdruck
Versuch, Irrtum und Lösung |

Der Druckluftvortrieb

Unter dem Kurt-Hackenber-Platz

Drei Tunnelbohrmaschinen graben unterirdisch die Röhren der Nord-Süd Stadtbahn. Unter dem Museumskomplex am Kurt-Hackenber-Platz ist der Einsatz von Schildmaschinen jedoch zu riskant. Welche Herausforderungen beim Untertunneln dicht besiedelter Innenstadtbereiche zu bewältigen sind, wird in dieser Broschüre erklärt.



Die im Schildvortrieb gebauten Tunnel werden unter dem Museum miteinander verbunden.



Die Personenschleuse schwebt ein.

Der größte Teil der Nord-Süd Stadtbahn wird unterirdisch im Schildvortrieb gebaut. In Köln kommen insgesamt drei Tunnelbohrmaschinen zum Einsatz, um die weitgehend parallel zueinander liegenden Tunnelröhren vom Breslauer Platz bis zur Nordseite des Museumskomplexes und von Süden her vom Bonner Wall bis zum Kurt-Hackenber-Platz zu bauen.

Das etwa 100 Meter lange Verbindungsstück zwischen diesen Tunneln liegt unterhalb des Museumskomplexes nördlich des Kurt-Hackenber-Platzes und kann nicht von Schildmaschinen aufgeföhren werden. Der Grund: Das Gebäude ist auf vier sogenannte Schlitzwände gegründet, die mit einem Deckel versehen sind. Darüber befindet sich eine Kiesauffüllung, auf der die Bodenplatte des Museumsbaus ruht. Der Abstand zwischen diesen Wänden ist zu eng, um mit einer Tunnelbohrmaschine hindurchzuföhren.

Die Schlitzwandelemente wurden bereits 1980 in die Erde gebracht, als der Gebäudekomplex errichtet wurde. Schon damals

war ein künftiger U-Bahn-Bau ins Auge gefasst worden, für den diese Vorleistung erbracht wurde. Der Abstand zwischen den Schlitzwänden beträgt jeweils nur sieben Meter. Der kleinere der in Köln eingesetzten Schildbohrer hat jedoch bereits einen Außendurchmesser von 6,80 Meter. Je Seite wären also lediglich zehn Zentimeter Spielraum geblieben.

Eine Tunnelbohrmaschine lässt sich nahezu ohne Abweichungen auf dem vorgegebenen Kurs steuern. Trotzdem wurde das Risiko, dass sich die Maschine zwischen den wahrscheinlich nicht exakt senkrecht gebauten Wänden verkanten oder festföhren könnte, als zu hoch eingestuft.

Es wurde entschieden, das Bauwerk zwischen den paarweise parallel zueinander verlaufenden Schlitzwänden in einem bergmännischen Verfahren herzustellen. Die einzelnen Tunnelabschnitte werden hierbei nicht wie beim Schildvortrieb aus vorgefertigten Elementen (Tübbing) zusammengesetzt, sondern an Ort und Stelle betoniert.

So einfach, wie es sich anhört, ist diese Aufgabe jedoch nicht: Durch die Nähe des Rheins bedingt liegt der Grundwasserpegel in dem betreffenden Baubereich sehr hoch. Es muss Druckluft eingesetzt werden, um zu verhindern, dass das Wasser von unten her in die Tunnel eindringt.

Dasselbe Verfahren, Druckluftvortrieb genannt, wird ebenfalls beim Bau der künftigen Haltestelle Chlodwigplatz angewandt. Diese entsteht in einer Schlitzwandbaugrube mittig zwischen den Tunneln. Unter Druckluft wird dort das Erdreich zwischen Baugrube und Tunnelröhren ausgehoben und eine Spritzbetonsicherung vorgenommen. Ist die Verbindung mit Beton verschalt, werden Schlitzwand und Röhren aufgebrochen.

Wie das Druckluftverfahren genau funktioniert, welche Herausforderungen mit dieser Technik zu bewältigen sind und was das Arbeiten unter Druckluft für diejenigen bedeutet, die diese Arbeiten ausföhren, wird im Folgenden beschrieben.



Hier wird es eng.
Unter Museum und Philharmonie wird der
Druckluftbereich vorbereitet.

Museum über Druck

Vorbereitung der luftdichten Arbeitskammer

Die Tunnel unterhalb des Museumskomplexes werden von Süden nach Norden gegraben. Ausgangspunkt für die Arbeiten ist der „Tunnelblock 303“ unter dem Kurt-Hackenberg-Platz. Er wurde als einer von fünf Tunnelblöcken in einer offenen, von Schlitzwänden umgrenzten Baugrube gefertigt, die nach oben hin wieder mit Erde verfüllt wurde. Auf diese Weise entstand ein circa 15 mal 20 Meter großer Arbeitsbereich, von dem aus später unter Druckluft die beiden Tunnelvortriebe gebaut werden.

Nach Abschluss der Bauarbeiten werden die unterirdische Halle und die anderen Tunnelblöcke als Teil des „Verknüpfungsbauwerks Bechergasse“ dienen. Darin sind Weichenanlagen und Gleisverbindungen der Nord-Süd Stadtbahn untergebracht, die es ermöglichen, aus Richtung Süden die Haltestellen Dom/Hauptbahnhof und Breslauer Platz anzusteuern sowie aus dem Norden kommend die Haltestelle Rathaus.

Zunächst einmal dient die Baugrube auf der südlichen Seite als Zielschacht für die beiden Tunnelbohrmaschinen, die am Bonner Wall gestartet sind. Zeitgleich

wird auf der gegenüberliegenden Seite im Norden der Baugrube die „Arbeitskammer“ für den Druckluftvortrieb eingerichtet. Sie muss luftdicht abgeschlossen sein, damit stabile Druckverhältnisse darin aufgebaut werden können.

Hierfür wird im ersten Schritt die Arbeitskammer durch eine Druckwand aus Stahlbeton abgeschottet, die an Sohle, Decke und Seitenwände des Tunnelblocks anschließt. In die Wand werden mehrere „Schleusen“ integriert, durch die Personen, Material und Arbeitsgeräte sowie das ausgehobene Erdreich aus dem atmosphärischen in den Druckluftbereich hinein- und hinausgelangen. Die hintere Begrenzung der Arbeitskammer bildet die ohnehin vorhandene nördliche Schlitzwand der Baugrube, die rund 80 Zentimeter stark ist.

Dort, wo die Schlitzwände der U-Bahn- und der Museums-Baugrube aufeinanderstoßen, bestehen Fugen, durch die Luft entweichen kann. Um diese abzudichten, wird das umgebende Erdreich durch Zementsäulen verfestigt, die mithilfe eines Hochdruckinjektionsverfahrens in den Boden eingebracht werden.



Der Konzertsaal der Philharmonie.

Die Schleusen

Zwischen Normal- und Überdruck

Drei Schleusen verbinden die Arbeitskammer mit der Außenwelt. Durch sie werden Personen, Material und Baumaschinen sowie das ausgehobene Erdreich ohne Druckverlust hinein- und herausgebracht.

Personenschleuse

Die Personenschleuse ist 7,70 mal 1,80 Meter groß und dient dazu, dem menschlichen Körper die allmähliche Anpassung an die jeweiligen Druckverhältnisse zu ermöglichen. Sie besteht aus drei hintereinander liegenden Kammern, in denen unterschiedlich hohe Drücke erzeugt werden können, und bietet Platz für maximal 20 Menschen. Bedient wird die Schleuse von einem Fahrerstand aus, der sich neben dem Schleuseneingang auf der atmosphärischen Seite befindet.

Geräte- und Materialschleuse

Direkt neben der Personenschleuse liegt die Geräte- und Materialschleuse. Durch sie werden alle im Stollen benötigten Maschinen, Werkzeuge und Materialien hinein- bzw. heraustransportiert. Die 10,35 mal 5,30 Meter große Schleuse wird durch Wände aus Stahlbeton gebildet, die von der Sohle bis zur Decke der Tunnelblöcke reichen. Dadurch ist diese Schleuse zugleich Teil der gesamten Druckwandkonstruktion. Sie ist vorne und hinten mit 3,45 mal 4 Meter großen,

hydraulisch betriebenen und druckdichten Stahltoren ausgestattet, die circa 5 Zentimeter dick sind und von denen jedes um die 16 Tonnen wiegt.

Schutterschleuse

Durch die westliche Druckwand führt ein mit zwei Schiebern bestücktes Rohr, das als Schutterschleuse dient (schuttern = Schutt wegräumen). Durch sie wird das abgebaute Erdreich aus dem Überdruckbereich in die Atmosphäre geschleust, wo es in einem Container gesammelt, mit einem Portalkran aus der Baugrube herausgehoben, auf LKW verladen und abgefahren wird.

Maschinen im Druckluftbereich

In der Arbeitskammer dürfen keine Verbrennungsmotoren, sondern lediglich elektrisch betriebene Maschinen eingesetzt werden. Diese Vorsichtsmaßnahme ist erforderlich, da in der Druckluft der Anteil an Sauerstoff bedeutend höher ist als in der normalen Luft. Funkenbildungen sind äußerst gefährlich und würden die Brand- und Explosionsgefahr steigern.



In der Personenschleuse atmet das Druckluftpersonal beim Ausschleusen medizinischen Sauerstoff ein.



Am Kabel: Der elektrisch betriebene Seitenkipplader.

Folgende elektrisch betriebene Maschinen und Fahrzeuge kommen unter dem Museumskomplex zum Einsatz:

- Hydraulikbagger (20 Tonnen) für die Abbrucharbeiten

- Hydraulikbagger (5 Tonnen) für den Aushub
- Seitenkipplader (1,2 Kubikmeter) für den Abtransport des Erdreichs
- Batteriebetriebene Gabelstapler
- Einschienen-Hängbahn



Die Schutterschleuse.



Die Personenschleuse.



Die Materialschleuse.

Druck machen

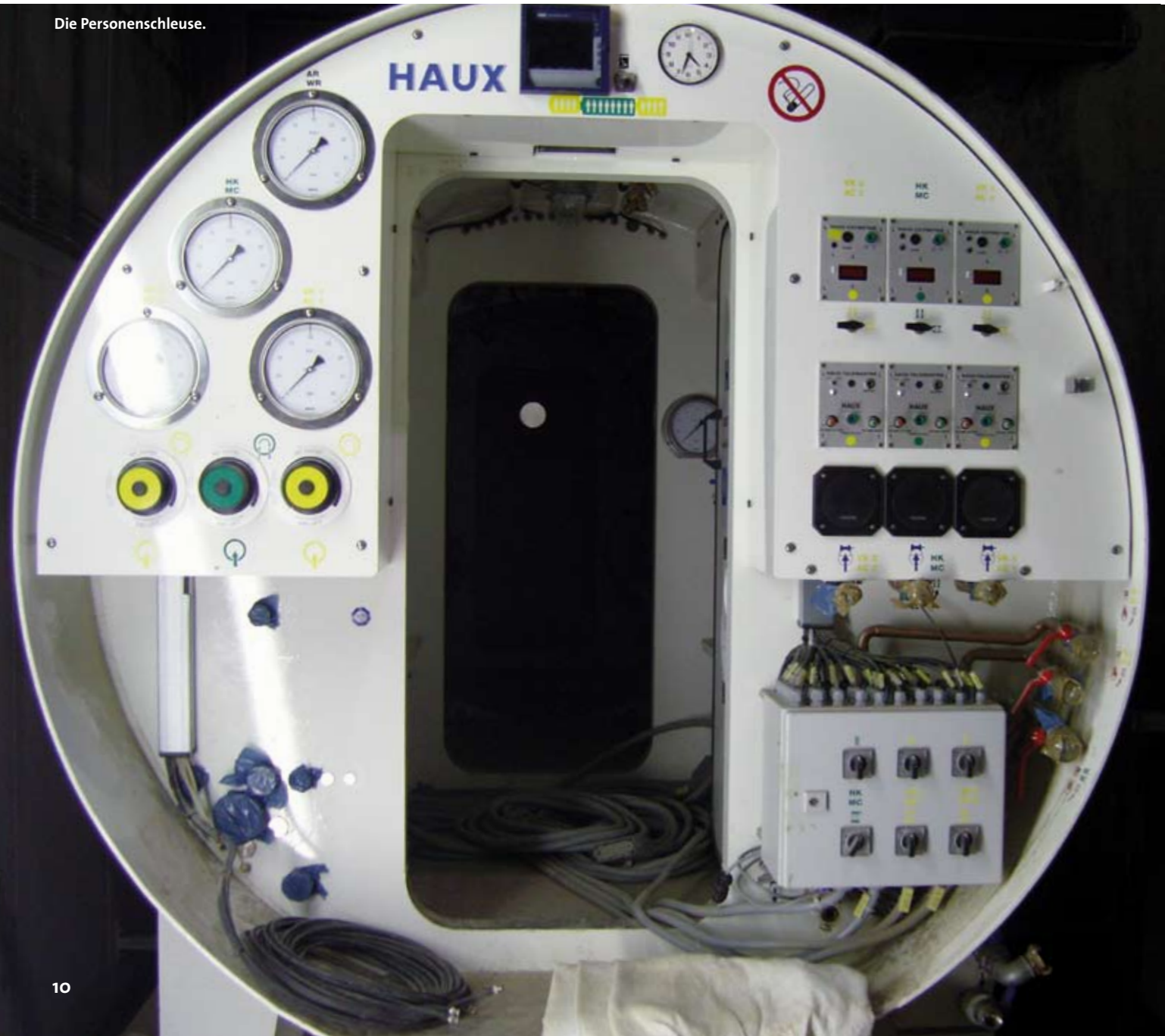
Druckstärke und Versorgung mit Druckluft

Um das Grundwasser aus dem Baubereich herauszuhalten, wird in der Arbeitskammer ein Luftdruck erzeugt, der ebenso hoch ist wie der Wasserdruck.



Von der atmosphärischen Seite aus werden die Druckverhältnisse gesteuert.

Die Personenschleuse.



Der mittlere Grundwasserstand unter dem Museumskomplex liegt bei 38 Metern über Normalnull (müNN). 0,00 müNN entspricht der Höhe des Meeresspiegels in Amsterdam und ist die Grundlage sämtlicher Höhenmessungen und Angaben in Westeuropa. Die Tunnelbauarbeiten finden abhängig vom jeweiligen Rheinwasserstand in etwa zwölf Metern Wassertiefe statt.

Um unterhalb des Grundwasserspiegels in einer trockenen Baugrube arbeiten zu können, muss ein Luftdruck erzeugt werden, der dem Druck des von außen anstehenden Wassers entspricht. Im Ostvortrieb wird bei der größten Aushubtiefe mit einem mittleren Überdruck von bis zu 1,17 bar gearbeitet. Im Anschluß daran wird die tiefer liegende Weströhre gebaut. Damit erhöht sich der mittlere Überdruck im gesamten Druckluftarbeitsbereich auf 1,32 bar.

Steigt der Grundwasserstand, muss auch der Luftdruck gesteigert werden. Der für den Bau der Nord-Süd Stadtbahn festgelegte Grenzwert für den Wasserpegel liegt bei 41,50 müNN. In dieser Situation wäre in der Oströhre ein Überdruck von 1,52 bar und in der tiefer liegenden Weströhre von 1,67 bar nötig. Eingerichtet wurde die Anlage sicherheitshalber jedoch für Drücke bis maximal 1,85 bar.

Der berechnete maximal zu erwartende Druckluftverbrauch in dem Arbeitsbereich unterhalb des Museumskomplexes liegt bei circa 42 Kubikmetern pro Minute ($m^3/Min.$). Hinzu kommen etwa 20 Kubikmeter pro Minute für Schleusungen und zusätzliche Frischluftzufuhren.

Zur Versorgung des Arbeitsbereiches mit Druckluft dient eine Kompressorenstation, die auf einer Fläche zwischen Hauptbahnhof und Trankgasse eingerichtet ist. Sie besteht aus acht Elektro- und sechs Dieselmotorkompressoren für die Gewährleistung der Luftversorgung bei Stromausfall, aus Luft-Aufbereitungsanlagen, drei Luftkesseln zur Zwischenspeicherung der Druckluft und zwei Notstrom-Aggregaten zur Steuerung der Kompressorenanlage bei einem Stromausfall. Insgesamt steht eine Leistung von 2 mal 150 $m^3/Min.$ Lufterzeugung zur Verfügung. Die Druckluft gelangt über ein Rohrleitungsnetz zu den Schleusen und in die Arbeitskammer.

Im Normalbetrieb reichen die acht Elektromotorkompressoren für die Erzeugung der Druckluft aus. Sie werden automatisch gesteuert und produzieren abhängig vom Bedarf. Wird darüber hinaus Druckluft gebraucht, schalten sich die Dieselmotorkompressoren zu. Bei einem Stromausfall springen sie automatisch an und über-

nehmen die Druckluftversorgung allein. Die Luftaufbereitungsanlagen und die Steuerung der gesamten Anlage werden dann durch das Notstrom-Aggregat gespeist.

Der Luftdruck in der Arbeitskammer wird durch Sensoren gemessen und permanent mit den Soll-Werten abgeglichen. Bei Abweichungen öffnen sich automatisch Regelventile, die in der Nähe der Druckwand auf der atmosphärischen Seite angebracht sind. Sie lassen die in den Leitungen anstehende Luft in die Arbeitskammer strömen. Sobald der Soll-Druck erreicht ist, schließen die Regelventile sich wieder.



Die Notfallstation.

Der Aushub

Alles muss raus

Der Raum zwischen den Schlitzwänden und dem Deckel unterhalb des Museumskomplexes wird von oben nach unten in mehreren Aushubphasen bis auf die endgültige Tiefe ausgeschachtet.



Hydraulikbagger mit Meißel.



Abbau des Erdreichs.



Der Arbeitsbereich unter Druckluft: 1 Personenschleuse 2 Materialschleuse 3 Schutterschleuse 4 Einschienen-Hängebahn

Vorarbeiten

Zunächst werden Öffnungen in den oberen Teil der nördlichen Baugrubenschlitzwand des Kurt-Hackenberg-Platzes gebrochen. Der Meißel eines Hydraulikbaggers stemmt die entsprechenden Profile aus dem Beton heraus.

Im Bereich der östlichen Tunnelröhre wird die Schlitzwand in dieser ersten Phase bis auf ein Niveau zwischen 32,10 und 33,90 Metern über Normalnull abgebrochen. In der westlichen Tunnelröhre wird eine Ebene zwischen 31,90 und 32,30 Metern über Normalnull erreicht. Danach werden die in diesem Bereich noch vorhandenen Schlitzwand-Teile der alten Museums-Baugrube abgebrochen. Dann können die Ausschachtungsarbeiten beginnen.

Der Aushub

Für den Aushub der Tunnelröhren wird der Boden mithilfe eines Hydraulikbaggers abgegraben und mit einem Seitenkipplader abtransportiert. Beide Geräte funktionieren elektrisch. Der Seitenkipplader bringt das abgebaute Erdreich zu

einem Übergabetrichter. Von hier aus transportiert ein Förderband den Boden zur Schutterschleuse, durch die er in die Atmosphäre ausgeschleust wird. Dort belädt ein Radlader einen Schutterkübel, der mit einem Kran an die Oberfläche gehoben wird. Dann wird das Erdreich auf LKW verladen und abtransportiert.

Nachdem der obere Teil der Tunnelröhren freigeräumt ist, müssen die freigelegten seitlichen Schlitzwände erst einmal gesichert werden. Dazu werden Steifenlagen aus Stahlträgern angebracht. Die horizontalen Verstrebungen stützen die Wände gegeneinander ab. Sie werden mit einer „Einschienen-Hängebahn“, die an der Unterseite des Schlitzwanddeckels zum Transport von Lasten montiert wurde, oder einem Seitenkipplader zu den Einbaorten gebracht.

In ähnlicher Weise werden die unteren Schlitzwandabschnitte bis auf das endgültige Aushubniveau der beiden Tunnel gesichert.



Der Abraum wird in den Übergabetrichter gekippt.

Das Förderband transportiert das abgebaute Erdreich hoch zur Schutterschleuse.

Der tiefste Punkt, den die Sohle in der Weströhre erreicht, liegt bei 25,67 Metern und in der Oströhre bei 27,70 Metern über Normalnull.

Die Ausschachtungsarbeiten gehen bis an den nördlichen Rand der Museumsbebauung. Nach ihrem Abschluss werden die Sohlen beider Röhren mit einer Sauberkeitsschicht aus Beton versehen.

Die Aushub- und Aussteifungsarbeiten in der Ost- und der Weströhre erfolgen nicht zur gleichen Zeit, da die letzten Grabungen in der Weströhre in größerer Tiefe stattfinden und eine Erhöhung des Luftdrucks erfordern.

Um ein Abströmen der Druckluft unter den Schlitzwänden des Ostvortriebs hindurch (sie sind flacher gegründet als die des Westvortriebs und mit diesem über die Druckluftarbeitskammer im Block 303 verbunden) zu verhindern, werden Sohle, Decke und Wände des Ostvortriebs erst komplett fertiggestellt. Anschließend wird die Weströhre ausgeschachtet.

Das Betonieren

Im Pilgerschritt

Die Betonage der Tunnelröhren unterhalb der Museumsbebauung findet von Nord nach Süd, also entgegengesetzt zur Grabungsrichtung, statt.

Die Tunnelröhren werden aus rechteckigen Blöcken zusammengesetzt, die jeweils um die zehn Meter lang sind. Der Übergangsbereich zwischen den Wänden und den Decken der Blöcke ist innen als sogenannte Voute abgeschrägt.

Die einzelnen Blöcke werden an Ort und Stelle in mehreren Arbeitsschritten betoniert: zunächst die Sohle mit den unteren Wandabschnitten, danach die oberen Wandabschnitte einschließlich der Decke. Nach Fertigstellung der unteren Betonierarbeiten können die darüber liegenden Aussteifungen ausgebaut

und anschließend die oberen Betonagen ausgeführt werden.

Die einzelnen Tunnelblöcke werden nicht direkt hintereinander, sondern im sogenannten Pilgerschrittverfahren gegossen:

Zunächst baut man nur jeden zweiten Abschnitt, zeitlich versetzt werden dann die Lücken geschlossen.

Das für die Betonierarbeiten nötige Schal-, Bewehrungs- und Gerüstmaterial gelangt über die Materialschleuse in

die Arbeitskammer und wird dort mit einem batteriebetriebenen Gabelstapler oder mit der Einschienen-Hängebahn an den Einbauort transportiert. Der Beton wird über eine Rohrleitung direkt an den Einsatzort gepumpt.

Die Wände der Tunnel schließen ohne Zwischenraum an die Schlitzwände an. Lediglich ein kleiner Spalt bleibt zwischen den Tunneldecken und den Schlitzwanddeckeln erhalten. Sie werden anschließend mit Feinzement verpresst, so dass sich hier weder Wasser noch Gase sammeln können.



Das Schneidrad steckt noch im Boden. Wenn der Druckluftvortrieb beendet ist, wird es demontiert.



Die Verbindung Unter der Philharmonie

Die beiden Druckluftvortriebe enden am nördlichen Rand der Museumsbebauung. Hier geht die viereckige Tunnelform direkt wieder in einen kreisrunden Querschnitt über, der dem Querschnitt der Schildvortriebsröhren entspricht. Um den Tunnelbau an dieser Stelle fortsetzen zu können, sind umfangreiche Vorarbeiten notwendig, denn in diesem Bereich steht eine mit Lücken versehene Reihe von Bohrpfählen, die zur Stützung des dort verlaufenden Bahndamms dient. Daran schließt sich lockerer Kiesboden an.

Um diesen Streckenabschnitt für den Tunnelvortrieb ausreichend zu stabilisieren, werden zwischen die Pfähle sowie in den Kies dahinter Zementsäulen injiziert, so dass im Erdreich zwei dichte Blöcke von zehn bis elf Metern Länge entstehen. Aus diesem festen Körper werden nun die Verbindungsstücke aus den beiden Druckluftvortrieben heraus kreisförmig aufgebrochen. Die Ausbruchsquerschnitte werden mittels Spritzbeton gesichert und mit einer Betonschale ausgekleidet.

Die Vortriebsstrecken enden an zwei Schildmänteln, den stählernen Hüllen des Tunnelbohrers „Carmen“, der vom Breslauer Platz aus die beiden Röhren Richtung Süden aufgefahren hat. Nach Fertigstellung der maschinellen Vortriebsstrecken wurde die Maschine ausgebaut. Die Schildmäntel können nicht geborgen werden und bleiben im Erdreich zurück. Sie erhalten im Zuge des Ausbaus ebenfalls eine Innenschale aus Beton und stellen so den Anschluss an die nördliche Schildvortriebsstrecke her.

Auch die Schneidräder mussten im Boden verbleiben. Sie bilden das letzte Hindernis zwischen den Tunneln, die die Schildmaschine „Carmen“ aufgefahren hat, und denen des Druckluftvortriebs. Sie werden zerteilt und abtransportiert.

Die Querschläge Unter dem Chlodwigplatz

Die Haltestellen der Nord-Süd Stadtbahn entstehen im Schutz von Schlitzwandbaugruben. Am Chlodwigplatz (und auch an einigen anderen Stationen) verlaufen die im Schildvortrieb gebauten Tunnelröhren östlich und westlich dieses Schlitzwandkastens. Um eine Verbindung zwischen den Tunneln und der späteren Haltestelle herzustellen (sogenannte Querschläge), müssen die Tunnelröhren und die Schlitzwände an den hierfür vorgesehenen Stellen aufgebrochen werden.

Auch hier muss das Grundwasser aus dem Baubereich herausgehalten werden. Am Chlodwigplatz geschieht dies ebenfalls mithilfe von Druckluft. Die Druckluftkammer ist dabei im Südbereich der Baugrube untergebracht. Von hier aus wird das Erdreich zwischen den Tunnelröhren und dem Schlitzwandkasten auf ganzer Länge von Süden nach Norden hin abgetragen. Schrittweise werden die Arbeitsbereiche mit Aussteifungen gesichert und anschließend betoniert. Nach Abschluss dieser Arbeiten können die benötigten Öffnungen zwischen den Röhren, in denen die Bahngleise verlaufen werden, und den Bahnsteigen innerhalb der Haltestelle herausgeschnitten werden.



Die Tunnelröhre von außen.



Um eine Verbindung zwischen den Tunneln und der späteren Haltestelle herzustellen, müssen die Röhren und die Schlitzwände an den hierfür vorgesehenen Stellen aufgebrochen werden.



Das Arbeiten

Der Druckausgleich

Nur Menschen mit besonderer Tauglichkeit dürfen in den Druckluftbereich.

Wer unter Druckluft arbeitet, ist einem Luftdruck ausgesetzt, der deutlich über dem normalen (atmosphärischen) Wert liegt.

Ein- und Ausschleusen

Damit der Körper sich an diese Verhältnisse anpassen kann, müssen die Arbeiter vor Betreten des Druckluftbereichs eine Schleuse passieren, in der der Druck schrittweise erhöht wird. Der zu schnelle Übergang vom Normal- zum Überdruck kann wegen mangelnden Druckausgleichs unter anderem Ohren-, Kopf- oder Zahnschmerzen hervorrufen.

Noch wichtiger ist das Ausschleusen, um den Überdruck langsam wieder auf das Normalmaß zu reduzieren. Unter erhöhtem Luftdruck werden die Gase, aus denen sich die Atemluft zusammensetzt, vom Blut und den Geweben des Körpers verstärkt aufgenommen. Das gilt insbesondere für den Stickstoff.

Wird der Druck herabgesetzt, werden die im Körper gebundenen Gase wieder freigesetzt. Geht die Druckminderung langsam genug vor sich, geschieht das über die Ausatmung, ohne dass Beschwerden auftreten. Fällt der Druck jedoch zu schnell ab, bildet der Stickstoff Gasblasen im Gewebe und in den Körperflüssigkeiten – vergleichbar den Kohlensäureblasen in einer Sprudelflasche, die geöffnet wird. Die Folgen können beispiels-

weise Gelenk- und Muskelschmerzen, Schwindelanfälle oder Atemstörungen sein. Um das Ausschleusen und somit den Stickstoffabbau zu beschleunigen, atmet das Druckluftpersonal beim Ausschleusvorgang medizinischen Sauerstoff.

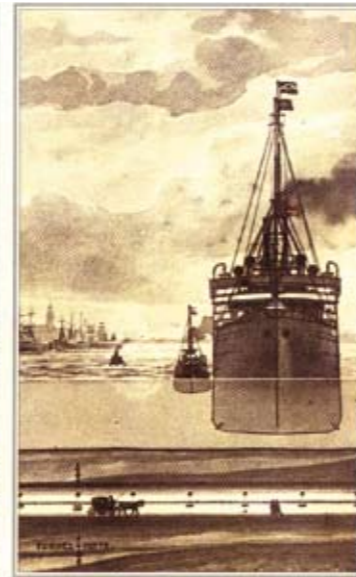
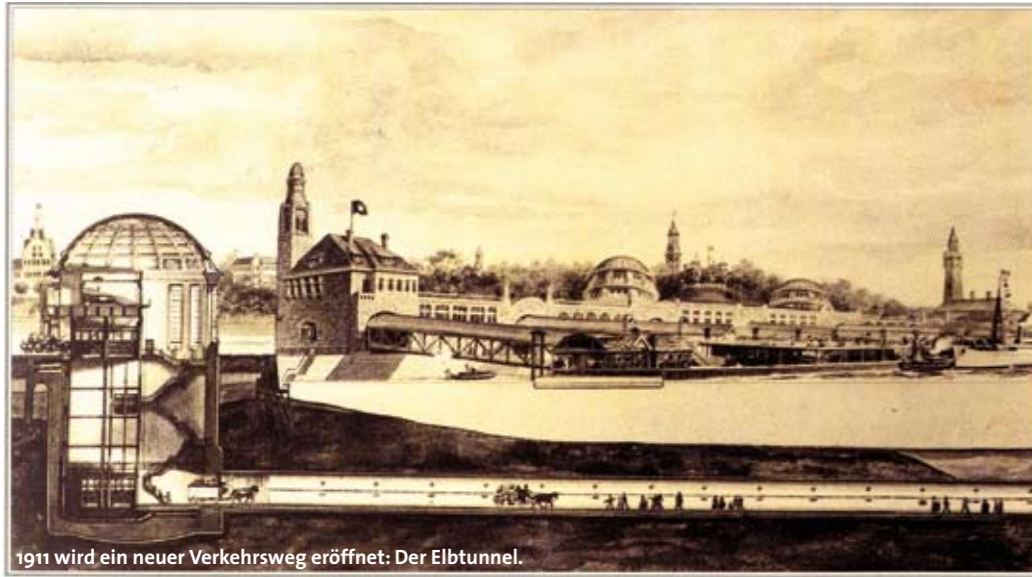
Nur Personen zwischen 18 und 50 Jahren, die eine arbeitsmedizinische Tauglichkeitsprüfung bestanden haben, dürfen unter Druckluft arbeiten. Wer über 50 Jahre alt ist, braucht eine Sondergenehmigung, weil in diesem Alter der Körper den eingelagerten Stickstoff nicht mehr so gut freisetzt. Neben dem Alter sind auch gesundheitliche Beeinträchtigungen wie Übergewicht, Lungenkrankheiten oder Diabetes Ausschlussgründe. In der Regel liegt die Grenze für Druckluftarbeiten bei 3,6 bar Überdruck.

24-Stunden-Schichtbetrieb

Unter dem Museumskomplex wird täglich in drei Schichten gearbeitet. Jede Schicht dauert acht Stunden, einschließlich der Zeit für das Ein- und Ausschleusen. Diese beträgt, je nach der Höhe des Drucks, pro Schicht eine bis einviertel Stunden. Eine vierte Schicht hat jeweils frei, so dass auf diese Weise an sieben Tagen in der Woche gearbeitet werden kann.

Bei Vortriebsarbeiten sind fünf bis zehn Mann pro Schicht unter Druckluft tätig, beim Betonieren der Tunnelröhren steigt die Zahl auf bis zu 16 Mitarbeiter an.





1911 wird ein neuer Verkehrsweg eröffnet: Der Elbtunnel.

Geschichte mit Überdruck

Versuch, Irrtum und Lösung

Druckluft wurde Anfang des 19. Jahrhunderts zum Bau von Brückenpfeilern genutzt. Jahrzehnte später folgte der Einsatz im Tunnelbau.

Mit dem Senkkasten in die Tiefe

1825 begann in London der Bau eines Tunnels zur Unterquerung der Themse. Es war der erste Unterwassertunnel überhaupt – ein gewagtes und für damalige Verhältnisse gigantisches Projekt. Erst 1843, 18 Jahre später, wurde der Bau nach vielen Rückschlägen vollendet. Schon damals machten Wissenschaftler den Vorschlag, Druckluft einzusetzen, um das Wasser aus dem Erdreich zu verdrängen. Doch man verzichtete darauf; stattdessen gruben sich die Arbeiter durch den wässrigen Boden.

Nicht der Tunnel-, sondern der Brückenbau war in den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts der Hauptanwendungsbereich für die Druckluft. Man setzte sie ein, wenn es darum ging, tief unter Wasser Fundamente für die Brückenpfeiler zu setzen. Dafür benutzte man einen Senk-

kasten – französisch „Caisson“. Es handelt sich um einen unten offenen Hohlkasten, der auf den Grund abgesenkt wird. Er bestand zunächst aus Holz, später aus Stahl oder Stahlbeton.

Der Caisson hat an der Unterseite Schneiden, mit denen er in das Flussbett einsinkt. Durch Einblasen von Druckluft wird im Inneren ein Überdruck erzeugt, der das Wasser aus dem Arbeitsraum verdrängt. Die Arbeiter betreten diesen Raum über eine Luftschleuse, die sich der britische Admiral Sir Thomas Cochrane bereits 1830 patentieren ließ. Im Inneren des Kastens werden Schlamm und Geröll abgegraben und über Materialschleusen nach draußen transportiert.

Durch das Abgraben sackt der Caisson im Bereich der Schneiden immer weiter ab. Gleichzeitig wird auf seinem Deckel der

Sockel für den Brückenpfeiler gebaut. Mit zunehmendem Gewicht drückt er den Kasten immer tiefer nach unten. Hat er festen Grund erreicht, wird er mit Mauerwerk oder Beton ausgefüllt.

Die Gefahren der Druckluft

In großem Stil kam diese Technik 1854 beim Bau der Royal Albert Bridge in Cornwall zur Anwendung. Die Arbeitsbedingungen in den Senkkästen waren äußerst hart. Die ohnehin schon anstrengende Arbeit mit Hacke und Schaufel bei langen Arbeitszeiten wurde unter dem Überdruck zur Dauerstrapaze. Besonders gravierend war, dass man die Auswirkungen der Druckunterschiede auf den menschlichen Organismus noch nicht ausreichend kannte, so dass man in der Anfangsphase die nötigen Druckausgleichszeiten nicht beachtete. Die Folge: Immer wieder erkrankten Arbeiter an der

Caisson-Krankheit, die auch „Taucher-“, „Dekompressions-“ oder „Druckluftkrankheit“ genannt wird. Beim Bau der Royal Albert Bridge beispielsweise starben mehrere Arbeiter an Luftembolie, andere litten unter Nasen- und Ohrenblutungen, Gelenkschmerzen und Lähmungen.

Solche Vorfälle wiederholten sich bis in die 1870er Jahre hinein. Erst allmählich erkannte man die Wichtigkeit einer langsamen Dekompression. 1878 schließlich untersuchte und beschrieb der französische Mediziner Paul Bert die Dekompressionskrankheit zum ersten Mal systematisch. Für eine Druckentlastung von einem bar empfahl er eine Dekompressionszeit von 20 Minuten. Das waren erste Schritte hin zu einer wirkungsvollen Druckluftmedizin. Zwar kam es auch danach zu Unfällen und Gesundheitsschäden, wenn Fahrlässigkeit oder technische Defekte einen plötzlichen Druckabfall herbeiführten. Aber die medizinischen und technischen Fortschritte ebenso wie ein geschärftes Bewusstsein für die Gefahren machten die Arbeit unter Überdruck zunehmend sicherer.

Erste Tunnelbauten unter Druckluft

Im Tunnelbau kam das Druckluftverfahren 1879 in Antwerpen zum ersten Mal zum Einsatz. Mit dem Schildvortrieb kombiniert wurde es aber erst 1884, als die Errichtung eines 1,83 Kilometer langen Eisenbahntunnels begann, der



Dekompressionsschleuse.



Bau von Stahlsegmenten für die Tunnelwände.

– als erster internationaler Tunnel – den amerikanischen Bundesstaat Michigan mit dem kanadischen Ontario verband. Zwei Jahre später wurden mithilfe eines Druckluftschildes zwei Tunnelröhren für die Londoner U-Bahn unter der Themse hindurch gegraben. Mit derselben Technik entstand zwischen 1892 und 1897 ebenfalls unter der Themse der Blackwall-Tunnel, mit 1.344 Metern damals der längste Unterwasser-Tunnel der Welt.

Der erste Unterwasser-Tunnel auf dem europäischen Kontinent, der einen großen Fluss unterquerte, war der Sankt Pauli-Elbtunnel (heute als „alter Elbtunnel“ bekannt) in Hamburg, der zwischen 1907 und 1911 entstand. Die beiden 426 Meter langen Tunnelröhren wurden unter Druckluft aufgeföhren, um eindringendes Wasser zurückzuhalten. Der Überdruck lag bei zwei bar. Die Luftverluste betrugen 7.000 bis 10.000 Kubikmeter pro Stunde. Sie verursachten Erosionen im Flussbett, die immer wieder aufgefüllt werden mussten.

Viele Tunnelarbeiter kamen aus dem Ausland, angezogen durch den vergleichsweise guten Stundenlohn, der noch durch eine monatliche Druckluftprämie von hundert Mark erhöht wurde. Gearbeitet wurde 24 Stunden in drei Schichten. Zu den acht Stunden Tunnelarbeit kamen noch eineinhalb Stunden in der Schleuse für den Druckausgleich. Ein automatisch aufzeichnender Druckmesser diente zur Kontrolle der Ein- und Ausschleusungszeiten. Einen freien Tag gab es nur alle sechs Wochen.

Gemessen an den damaligen Verhältnissen wurde auf die Arbeitssicherheit großer Wert gelegt. Ein Hund und ein Affe dienten als Versuchstiere, um die Auswirkungen der Druckverhältnisse zu überprüfen. Trotzdem starben drei Arbeiter an den Folgen der Druckluftkrankheit. Daneben gab es 615 leichte und 74 schwere Erkrankungen. Glück im Unglück hatten die Tunnelbauer, als am 24. Juni 1909 der Überdruck plötzlich in Sekundenschnelle aus dem Tunnel entwich und eine acht Meter hohe Wasserfontäne emporschoß. Etwa 2.600 Kubikmeter Wasser und Sand brachen in die Vortriebsstrecke ein. Die fünfzig bis sechzig Arbeiter unter Tage kamen alle mit dem Leben davon.

Der Weltrekord liegt bei 4,5 bar

Auch in jüngster Vergangenheit leistete man in Hamburg Pionierarbeit in Sachen Druckluftvortrieb. Als zwischen 1997 und 2000 die vierte Elbtunnelröhre entstand, wurde mit einer Tiefenlage der Tunnelröhren von 45 Metern ein Weltrekord aufgestellt. Die Tunnelbauer waren dabei einem Überdruck von 4,5 bar ausgesetzt. Die Druckluftverordnung zieht die Grenze normalerweise bei 3,6 bar. In Hamburg konnten die zuständigen Behörden jedoch Ausnahmegenehmigungen für die achtzig Einsätze erteilen, die unter diesen Extrembedingungen notwendig waren, da ein sorgfältig ausgearbeitetes druckluftmedizinisches Programm vorlag, das auf Erfahrungen im Tieftauchen zurückgriff. Die hier entwickelten Verfahren übernahmen Tunnelbauer in anderen Städten wie London oder Singapur, wo man in ähnlichen Tiefen baut.



Tunnelgerüst mit vernieteten Stahlsegmenten.



Unter dem Chlodwigplatz.

Bauherrin

Kölner Verkehrs-Betriebe AG
Scheidtweilerstraße 38
50933 Köln
Telefon: 0221 / 547 - 0
Fax: 0221 / 547 - 3950
E-mail: info@kvb-koeln.de

InfoCenter der Nord-Süd Stadtbahn Köln

Bechergasse 2
50667 Köln
Telefon: 0221 / 547 - 47 80
Fax: 0221 / 547 - 47 81
E-mail: info@nord-sued-stadtbahn.de

Impressum

Herausgeber:
Kölner Verkehrs-Betriebe AG
Scheidtweilerstraße 38
50933 Köln
Telefon: 0221 / 547 - 33 04
Fax: 0221 / 547 - 31 15
E-mail: presse@kvb-koeln.de

Verantwortlich i.S.d.P.:
Franz Wolf Ramien

Redaktion und Konzept:
Gudrun Meyer
Kölner Verkehrs-Betriebe AG
Unternehmenskommunikation

Gestaltung:
Algermissen Kommunikations-Design

Text: Dr. Wolfgang Krischke
Fotos: KVB, ARGE, Christoph Seelbach