Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 85 (1967)
Heft: 51

Artikel: Entwicklung der Methoden im Tiefbahnbau
Autor: Maron, Günter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-69612

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: 25.08.2025

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

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, ZÜRICH

Aktuelle Methoden im städtischen Tiefbau

Kurs des Basler Ingenieur- und Architekten-Vereins vom 7. bis 9. Juni 1967, drittes Heft (vgl. Hefte 47 und 50)

Entwicklung der Methoden im Tiefbahnbau

DK 614.42.002

Von Dipl.-Ing. **Günter Maron**, Frankfurt am Main

1. Einführung

Bei Stadt- und Verkehrsplanern hat sich seit längerer Zeit die Erkenntnis durchgesetzt, dass es utopisch ist anzunehmen, man könne die Städte und hier insbesondere deren Kernbereiche dem ständig wachsenden Kraftfahrzeugverkehr so anpassen, dass ihre Funktionen als Zentren des geistigen, kulturellen, geschäftlichen und administrativen Lebens erhalten bleiben. Die dringende Forderung nach einem leistungsfähigen, schnellen, sicheren, pünktlichen und bequemen, mit einem Wort, attraktiven öffentlichen Personen-Nahverkehrsmittel – als dem wohl einzigen wirtschaftlich vertretbaren Ausweg aus der Verkehrsmisere unserer Städte – führt damit zwangsläufig zu einer vom Individualverkehr der Strassen unabhängigen Schnellbahn, die, zumindest im dichtbebauten Citybereich der Städte, als Tiefbahn zu führen ist.

Aufgabe der folgenden Ausführungen soll es sein, die erprobten Bauweisen für die Herstellung von Tiefbahn-Tunnelanlagen zu erläutern, wobei ich mich vorwiegend auf die Herstellungsmethoden bei der sogenannten «offenen Bauweise» beschränken werde.

2. Offene Bauweise

2.1 Allgemeines, Bauvorbereitung

Am kürzesten wird das Prinzip der offenen Bauweise ausgedrückt durch das englische «cut and cover», das heisst: Einschnitt von oben, Herstellung des Tunnelbauwerkes in der offenen Baugrube und nachträgliches Verfüllen dieser Baugrube.

Wurden in der ersten Zeit des Tiefbahnbaus die Tunnelanlagen meist aus wirtschaftlichen Erwägungen heraus in möglichst geringer Tiefe errichtet (1fache Tiefenlage, «Unterpflasterbahn»), was zum Beispiel bei Mittelbahnsteigen in Stationen den Zugang über eine Verkehrsinsel inmitten der Strasse erforderlich macht, so führte vorwiegend der ständig wachsende Oberflächenverkehr, aber auch der Raumbedarf für Versorgungsleitungen zu der Forderung, die Bahnhöfe in sogenannter 1½facher Tiefenlage zu erstellen (Bild 1). Unabhängig davon, ob für den Bahnbetrieb Mittel- oder Seitenbahnsteige vorgesehen werden, erfolgt der Zugang von den Bürgersteigen der Strasse aus über einen Fussgängertunnel, der darüber hinaus auch ein gefahrloses Unterqueren der Strasse ermöglicht. Der eigentliche Tiefbahntunnel wird bei der offenen Bauweise in der Regel als zwei- oder mehrgleisiger Kastenquerschnitt ausgebildet und liegt rund 10 bis 12 m unter Gelände bei einer Überschüttung von rund 4 bis 6 m.

Die einzelnen Baumethoden bei der offenen Bauweise unterscheiden sich hauptsächlich in der Art der Baugrubeneinfassung und der Baugrubenabdeckung. Als wesentliche, die «offene Bauweise» zwangsläufig belastende Begleiterscheinung erfordern sie jedoch gemeinsam umfangreiche bauvorbereitende Massnahmen zur Freilegung der Trassen. Vom Grunderwerb und den damit im Zusammenhang stehenden Problemen abgesehen, sind dies insbesondere Leitungsverlegungen, Hausabfangungen oder ähnliches und Verkehrslenkungsmassnahmen. Hierauf möchte ich nachfolgend kurz eingehen:

a) Leitungsverlegungen. In den Kerngebieten unserer Städte befindet sich eine Vielzahl verschiedenster Versorgungsleitungen im Strassenland. Überall dort, wo ein sicheres Aufhängen dieser Leitungen in der Tunnelbaugrube nicht möglich ist, ohne eine zügige und wirtschaftliche Ausführung des Tunnelbaues in Frage zu stellen, ist man gezwungen, die Leitungen umzulegen oder, den heutigen Erfordernissen entsprechend, neu zu verlegen. In der Regel werden dabei diese Leitungen einzeln und nach Sparten getrennt im Erdreich verlegt. Bestrebungen, Versorgungsleitungen in begehbaren Sammelkanälen zusammenzufassen, scheiterten, von Ausnahmefällen abgesehen, bisher in den dicht bebauten Innenstadtgebieten an den erheblichen Kosten und den technischen und administrativen Schwierigkeiten, die bei einem derartigen Vorgehen entstünden.

b) Hausabfangungen oder ähnliches. Die Forderung an den planenden Ingenieur, die Trassen von in «offener Bauweise» herzustellenden Tunnelanlagen im allgemeinen in vorhandene Strassenzüge zu legen, steht oft im Widerspruch mit der gleichzeitigen Forderung nach zügiger Streckenführung. So lassen sich Eingriffe in die vorhandene Bausubstanz meist nicht ganz vermeiden. Dabei kann die Frage, ob Abbruch oder Unterfahrung der betroffenen Bauwerke zu wählen ist, nicht immer nur nach rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten ent-

Bild 1. Zweigleisiger Bahnhofquerschnitt in 1½facher Tiefenlage mit Seitenbahnsteigen

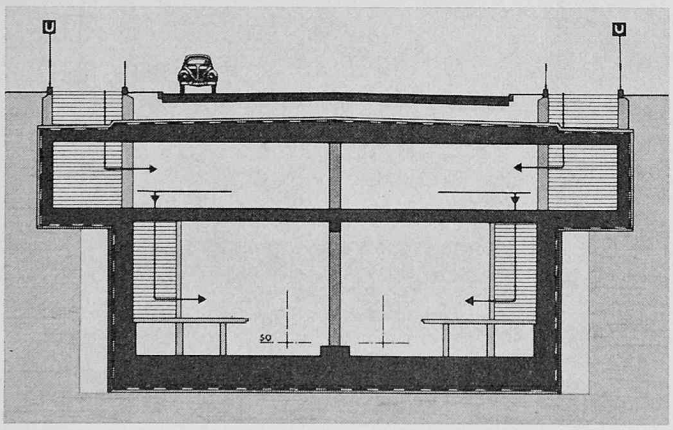


Bild 2. Abfangung einer in die Tunnelbaugrube hineinragenden Gebäude-Ecke in Frankfurt am Main, Grosse Eschenheimer-Strasse

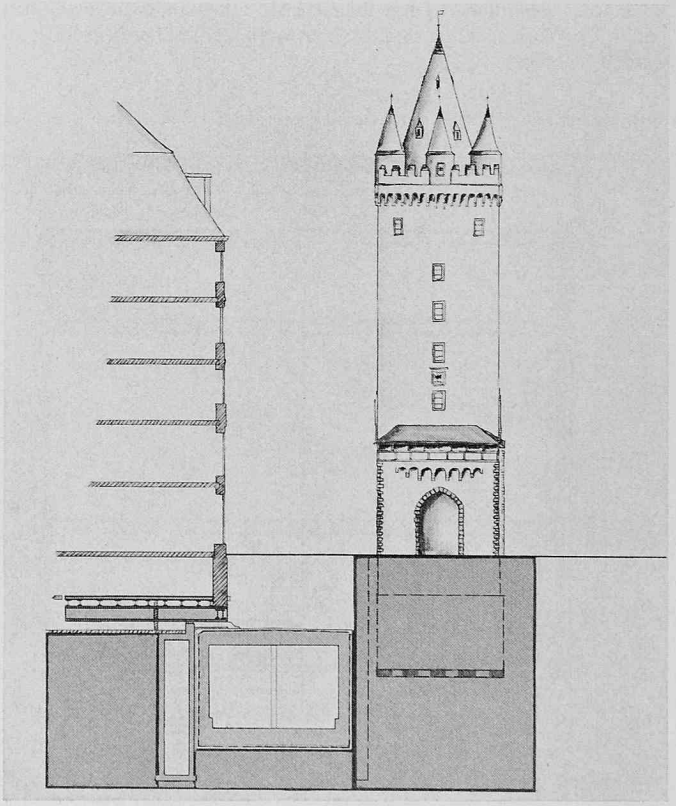


Bild 3. Tunnelbau in abgeböschter Baugrube im Frankfurter Nordweststadt-Zentrum

schieden werden. Im allgemeinen werden bei Hausabfangungen die Hauslasten in recht kosten- und zeitintensiver Arbeit über entsprechende Konstruktionen auf Parallelwände oder Bohrpfähle abgesetzt. Das Bild 2 zeigt eine in Frankfurt/M durchgeführte Hausabfangung, bei der eine etwa 3 m in die Baugrube hineinragende Hausecke über eine Kragkonstruktion auf eine aus Gründen der Gewichtsersparnis als Hohlkasten ausgebildete Parallelwand abgefangen wurde.

c) Verkehrslenkungsmassnahmen. Als eines der wichtigsten Probleme stellt sich in unseren Städten die Führung des Oberflächenverkehrs während der eigentlichen Bauzeit dar. Hier sind oft recht umfangreiche Massnahmen für die Verkehrslenkung zu treffen, wie Verlegung von Strassenbahnlinien, Umleitungen des Kraftfahrzeugverkehrs mit dem Bau oder Umbau von Absperrungen, Beschilderungen, Ampelanlagen usw.

Dass alle diese bauvorbereitenden Massnahmen rechtzeitig vor Beginn der eigentlichen Tunnelbauarbeiten aufeinander abzustimmen und in die Wege zu leiten sind, braucht wohl nicht näher begründet zu werden.

Lassen Sie mich nun auf die eigentlichen Baumethoden der offenen Bauweise eingehen, die ich unterteilen möchte in

1. Bauweise mit Böschungen,
2. Bauweisen mit verschiedenen Arten vom Bauwerk unabhängiger Baugrubenwände («Berliner Bauweise» und «Hamburger Bauweise»),
3. Bauweisen mit Baugrubenwänden als Bestandteil des Bauwerkes («Mailänder Bauweise»),
4. Sonderbauweisen.

2.2 Offene Bauweise mit Böschungen

Dies ist die einfachste, schnellste und bei nicht zu grosser Tiefenlage der Gradiente auch weitaus wirtschaftlichste Methode, ein Tunnelbauwerk zu erstellen. Von ausschlaggebender Bedeutung ist dabei die von der jeweiligen Bodenart abhängige zulässige Böschungsneigung. Die freie, nicht ausgesteifte Baugrube ermöglicht eine weitestgehende Rationalisierung aller Arbeiten für das Tunnelbauwerk, setzt jedoch voraus, dass genügend Platz für den Geländeeinschnitt und den erforderlichen Baustellenverkehr an der Oberfläche zur Verfügung steht.

In den Innenstädten mit ihrer dichten Bebauung ist diese Bauweise daher nur in Sonderfällen möglich. Zweckmässig angewandt wird sie in letzter Zeit bei der vorausschauenden, verkehrsmässigen Erschliessung neu zu bebauender Gebiete. Als Beispiele können genannt werden Tunnelabschnitte in der Frankfurter Nordweststadt (Bild 3), in Berlin-Britz, in einem Sanierungsgebiet von Stockholm, in Hamburg, Essen, Moskau und anderen Städten, in denen diese Bauweise mit Erfolg praktiziert wurde.

2.3 Offene Bauweise mit verschiedenen Arten vom Bauwerk unabhängiger Baugrubenwände («Berliner Bauweise» und «Hamburger Bauweise»)

Hier möchte ich die in der deutschen Fachterminologie als «Berliner» und «Hamburger» Bauweise bezeichneten Methoden erläutern. Gemeinsames Merkmal ist, dass erst nach Durchführung des gesamten Bodenaushubs der Baugrube das Tunnelbauwerk betoniert wird und die Baugrubenwände nicht Bestandteile desselben werden. Man unterscheidet hier zunächst verschiedene Arten der

2.31 Baugrubenumschliessungswände

a) Am weitaus gebräuchlichsten sind die *Trägerbohlwände.* Die wohl älteste im Tiefbahnbau angewandte Baugrubenumschliessung ist die sogenannte «Berliner Wand», die sich bereits zu Beginn des Untergrundbahnbaus um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert in Berlin bewährt hat. Es werden in Abständen von 1,5 bis 2,5 m I-Träger (Normalprofile) in den Boden gerammt, und zwar bis rund 1,5 – 3 m unter die Baugrubensohle. Gleichzeitig mit dem Erdaushub werden Holzbohlen zwischen die Trägerflansche eingezogen und festgekeilt.

Bilder 5a bis 5d. Schematische Darstellung einiger Bauzustände bei der «Hamburger Bauweise»

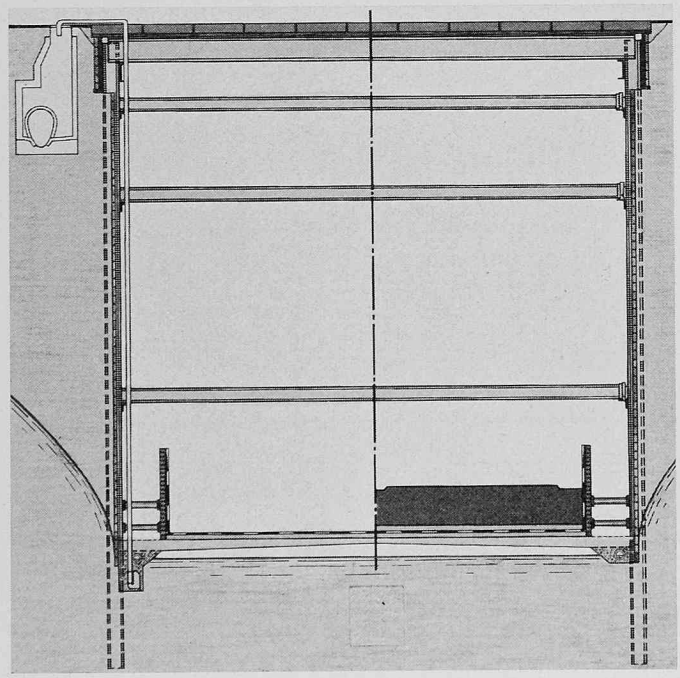
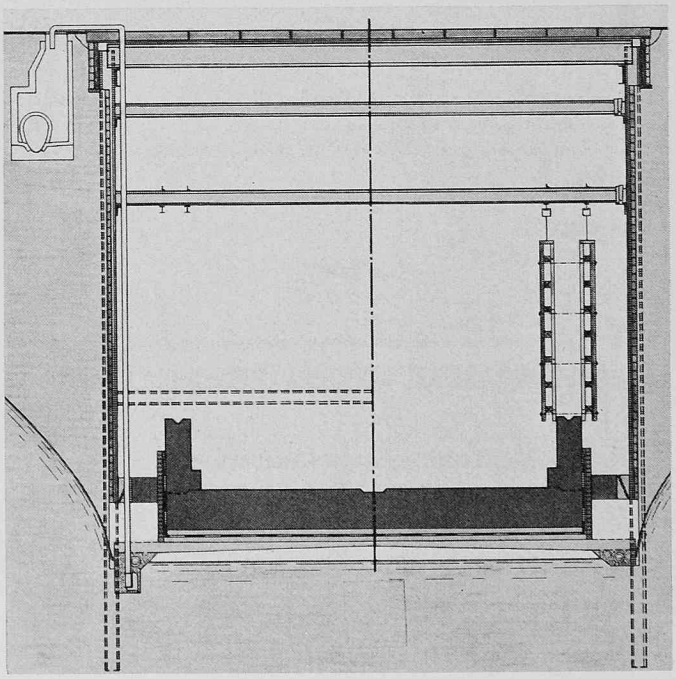


Bild 5b



Bei der *Berliner Bauweise* wird eine rund 10 cm starke Wandschutzschicht direkt gegen die mit herausstehenden Nägeln versehenen Bohlen betoniert, darauf die Bitumen-Pappabdichtung aufgebracht und der Beton der konstruktiven Tunnelwand bei nur einseitiger innenliegender Schalung dagegenbetoniert. Die mit einem Trägerschutzblech versehenen Rammträger können nach Beendigung aller Arbeiten gezogen werden. Die Bohlen verbleiben im Boden.

Die Anwendung dieser Bauweise ist an gewisse Voraussetzungen gebunden: Es muss ein für Rammungen geeigneter Boden vorhanden sein, da Abweichungen von der Träger-Sollage zwangsläufig auch die Wandstärken des Tunnelbauwerkes verändern. Ausserdem muss sichergestellt sein, dass während des Rammvorgangs keine wesentlichen Verformungen an den Trägern, besonders auch im nicht sichtbaren Teil unterhalb der Baugrubensohle, auftreten, da sonst beim späteren Ziehen der Träger die Gefahr besteht, dass die Dichtungshaut beschädigt wird. Werden die Baugrubenträger nicht gerammt, sondern in vorgebohrte Löcher eingesetzt, wie zum Beispiel auf der Baustelle «An der Hauptwache» in Frankfurt/Main, wo nahezu alle Baugrubenträger im Bohrverfahren eingebracht werden mussten (Bild 4), so können diese Risiken weitgehend vermieden werden. Der anstehende Boden sollte trocken sein oder durch eine geeignete Wasserhaltung gut entwässert werden können, da für das einwandfreie Aufbringen einer bituminösen Abdichtung das Vorhandensein einer trockenen Dichtungsrücklage (Schutzbeton) notwendig ist.

Die geologischen Verhältnisse einer Vielzahl von Städten gestatten die Herstellung von Tunnelanlagen nach der Berliner Bauweise. So wurden nach dieser Methode fast alle Tunnelanlagen in Berlin, aber auch Anlagen in Hamburg, Toronto, Tokio, um nur einige zu nennen, gebaut.

Nach dem 2. Weltkrieg wurde bei der Wiederaufnahme des U-Bahnbaus in Hamburg, veranlasst durch ungünstige Baugrundverhältnisse, die Berliner Bauweise abgewandelt zu einem Verfahren, das heute meist als *Hamburger Bauweise* (Bild 5) bezeichnet wird. Die Baugrubenwand selbst besteht aus einer Trägerbohlwand wie bei der Berliner Bauweise. Allerdings werden wegen des günstigeren Tragverhaltens und der besseren Rammbarkeit meist IPB-Profile (Breitflanschträger) verwendet. Zwischen der Trägerbohlwand und dem eigentlichen Tunnelbauwerk verbleibt jedoch ein Arbeitsraum von rund 0,80 m. Die Wandabdichtung wird in diesem Arbeitsraum gegen die in zweiseitiger Schalung betonierte und entsprechend vorbereitete Tunnelwand nachträglich geklebt und durch eine gemauerte Schutzschicht oder in anderer geeigneter Weise gegen mechanische Beschädigungen geschützt. Während der Verfüllung des Arbeitsraumes mit geeignetem Boden werden die Holzbohlen wieder ausgebaut, und nach Beendigung der Arbeiten werden die Träger gezogen. Im Gegensatz zur «Berliner Bauweise» ohne Arbeitsraum ist diese Bauweise auch bei schwierigen Boden- und Grundwasserverhältnissen anwendbar. Sie gestattet die massgerechte Herstellung der Tunnelwände auch bei stärkeren Verrammungen, die risikolose Wiedergewinnung von Rammträgern und Bohlen, die Anordnung geeigneter Wasserhaltungen im Arbeitsraum und die Durchführung von Dichtungsarbeiten ohne Beeinträchtigung durch möglicherweise die Baugrubenwand durchdringendes Wasser. Nachteilig ist die um den doppelten Arbeitsraum breitere Baugrube mit den entsprechenden zusätzlichen Aufwendungen für Bodenaushub und Verfüllung, Fahrbahnabdeckung, Aussteifungskonstruktionen usw.

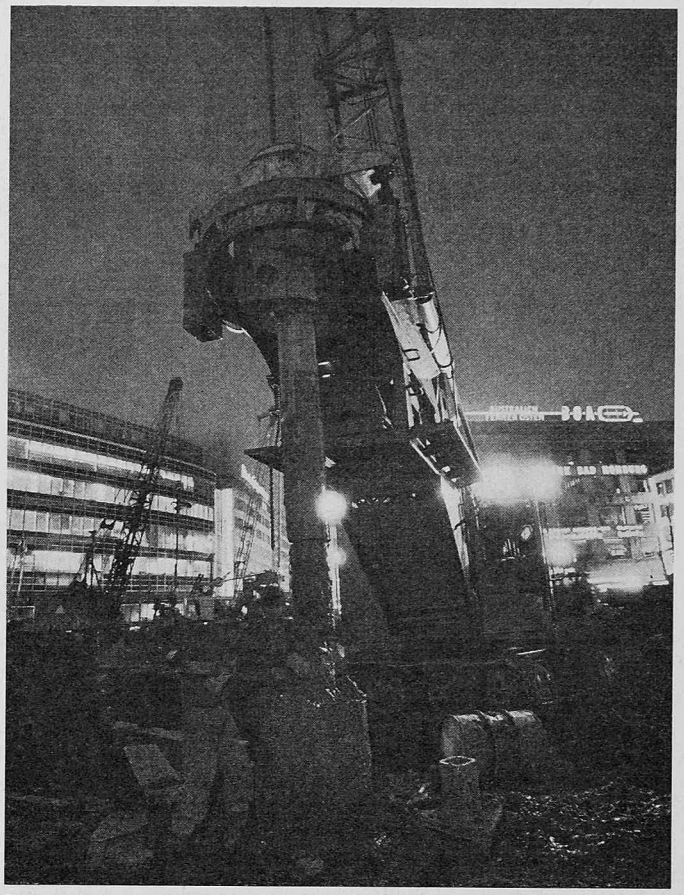


Bild 4. Bohrarbeiten mit einem Calweld-Gerät am Platz «An der Hauptwache» in Frankfurt am Main. Photo K. Meier-Ude, Frankfurt. Alle übrigen Photos Bildarchiv des Frankfurter Stadtbahnbauamtes

Bild 5c

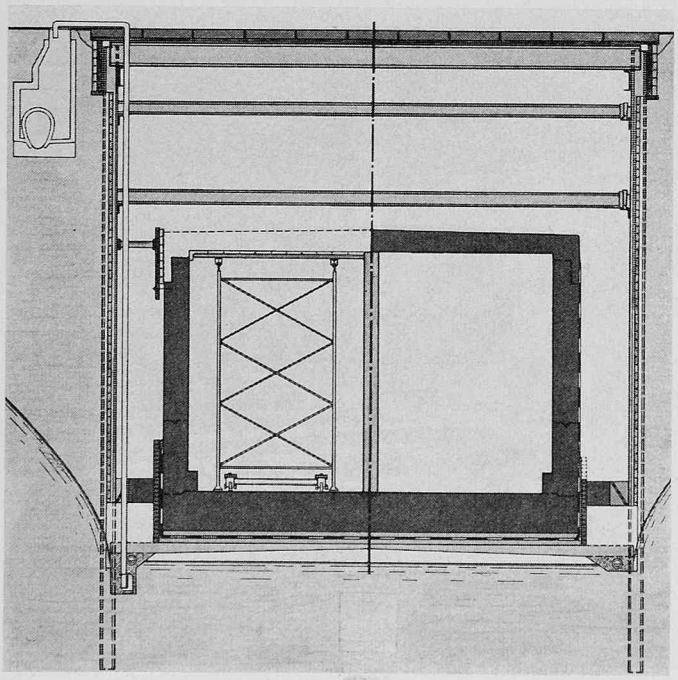
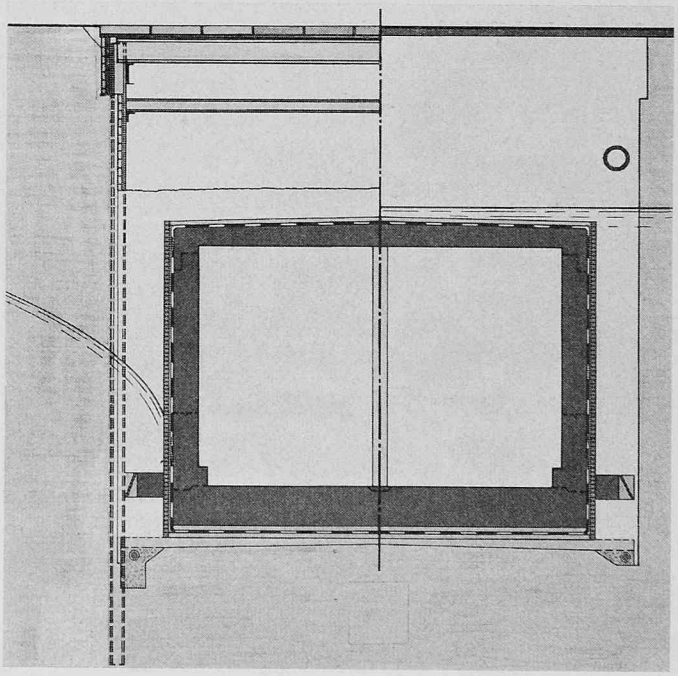


Bild 5d



Generell gesehen ist die Ausführung ohne Arbeitsraum (Berliner Bauweise) überall dort wirtschaftlicher, wo sie ohne grössere Schwierigkeiten technisch durchführbar ist. Vergleichsrechnungen in Frankfurt/Main ergaben, dass sie bei sonst gleichen Verhältnissen Einsparungen von rund 5 bis 10% der Rohbaukosten gegenüber der Ausführung mit Arbeitsraum (Hamburger Bauweise) bringt. Trotzdem zwingen die Baugrundverhältnisse viele Städte, zum Beispiel Hamburg, Frankfurt/Main, Köln, Essen, München, dazu, sich der Hamburger Bauweise zu bedienen.

Neben ihrer Wirtschaftlichkeit liegt ein wesentlicher Vorteil der Trägerbohlwände in ihrer fast unbegrenzten Anpassungsfähigkeit. Hindernissen im Boden, kreuzenden Leitungen, Strassenbahnschienen usw. kann leicht ausgewichen werden, da der gegenseitige Rammträgerabstand durchaus variabel ist. Nachteilig wirkt sich bei den Trägerbohlwänden aus, dass das Anpassen, Schneiden, Einziehen und Verkeilen der Bohlen und das allfällige Hinterstopfen von Boden eine vorwiegend manuelle Tätigkeit ist, die zur Vermeidung von Setzungen besonders sorgfältig durchgeführt und dementsprechend kontrolliert werden muss, und die sich einer arbeitslohnsparenden Rationalisierung weitgehend entzieht. Das Tempo des Bodenaushubes, insbesondere bei normalen Baugrubenbreiten, wird fast stets nur von der Leistung der Einbohlungsarbeiten bestimmt.

Zur Vermeidung von Setzungsschäden an benachbarter Bebauung können bei der Trägerbohlwand die Rammträger enger gesetzt, die Bohlen verstärkt, die Abstände der Steifenlagen verringert oder die Steifen selbst vorgepresst werden. Dies sind alles Massnahmen zur Verminderung der Deformation der Aussteifungselemente. Oft reichen diese Sicherungsvorkehrungen noch nicht aus, um alle möglicherweise auftretenden Setzungsschäden zu vermeiden. Dabei ist natürlich nicht an Grosschäden oder Zusammenstürze gedacht, sondern an die lästigen Kleinschäden, die zu verhindern ein öffentlicher Bauherr ein mehr ideelles als materielles Interesse hat. Hier sind gerade im letzten Jahrzehnt zwei Verfahren für die Herstellung von deformationsarmen Baugrubenwänden entwickelt und mit gutem Erfolg in verschiedenen Städten beim Bau unterirdischer Verkehrsanlagen erprobt worden. Es sind dies in *Schlitzbauweise* hergestellte Stahlbetonwände und Bohrpfahlwände.

b) Allein in Frankfurt/Main sind in den letzten zwei Jahren beim Bau der U-Bahn rund 16 000 m² *Schlitzwände* bei ungünstigsten Bodenverhältnissen, zum Teil unmittelbar neben hochbelasteten Fundamenten benachbarter Bebauung, hergestellt worden. Im Boden vorhandene teilweise sehr harte Felsbänke mit einer Mächtigkeit von 1 bis 2 m wurden dabei durch Perforationsbohrungen und Meisselungen mit Rollmeisseln und schweren Fallmeisseln beseitigt. Bei Schlitztiefen bis zu 24 m lagen – mit Ausnahme einiger Lamellen – die Abweichungen der Wände von der Soll-Lage im Rahmen der vorgegebenen Toleranzen von 1% der Tiefe bzw. maximal 15 cm.

c) Der gleiche Effekt einer deformationsarmen Baugrubenwand lässt sich auch mit einer *Bohrpfahlwand* erzielen.

Um ein späteres, hindernisfreies Verlegen von Versorgungsleitungen zu ermöglichen, werden Schlitz- und Bohrpfahlwände meist nur bis rund 1 bis 2 m unter Strassenoberfläche betoniert; der Rest wird zweckmässig als Bohlwand zwischen kurzen, in die Betonwände eingelassenen Trägerstücken ausgebildet. Vielfach werden Schlitz- und Bohrpfahlwände auch als Bestandteil des bleibenden Bauwerkes verwendet. Hierauf wird später noch einzugehen sein.

d) Vereinzelt sind auch *stählerne Spundwände* als Baugrubenwände beim Tiefbahnbau verwandt worden. Bei Vorhandensein besonderer geologischer und hydrostatischer Verhältnisse, bei der Gefahr hydraulischer Grundbrüche und in anderen Sonderfällen kann ihre Anwendung ratsam oder sogar zwingend notwendig sein. So sind beispielsweise in Berlin sämtliche Flussunterfahrungen der U-Bahn in mit Spundwänden umschlossenen Baugruben ausgeführt worden. Auf weitere Anwendungsbeispiele in Hamburg, Tokio und Rotterdam kann hier nur hingewiesen werden.

Abschliessend kann zu den Baugrubenwänden gesagt werden, dass die Wahl der im Einzelfall zweckmässigsten Ausführungsart eine der wichtigsten Entscheidungen bei der offenen Bauweise ist und eingehender Untersuchungen bedarf. Auch Kombinationen von abgeböschter Baugrube und unten- bzw. oben- liegender kurzer, meist nicht ausgestreifter Baugrubenwand sind möglich und bisweilen auch ausgeführt worden.

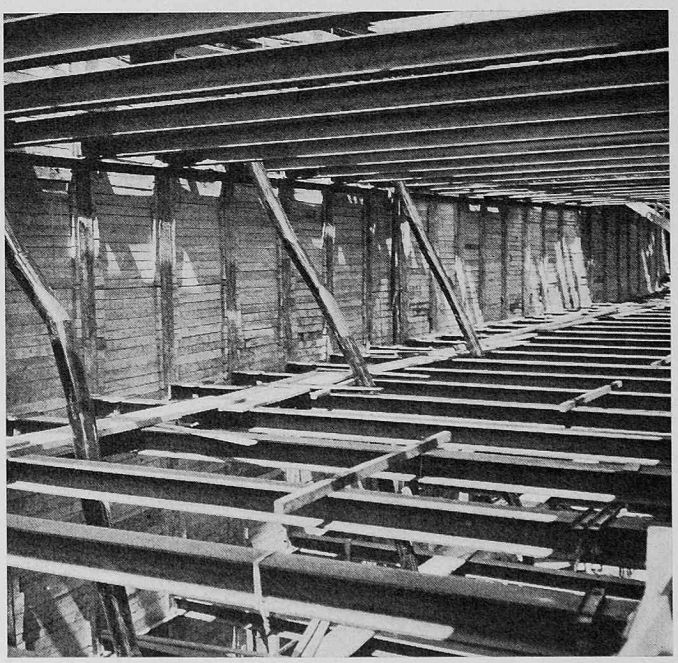
Die weiteren Arbeitsvorgänge ähneln sich bei den Methoden mit und ohne Arbeitsraum weitgehend und sollen nachfolgend am Beispiel der Hamburger Bauweise dargestellt werden.

2.32 Fahrbahnabdeckung

Bereits anfangs wurde gesagt, dass Hauptnachteil der offenen Bauweise die Störung des Oberflächenverkehrs ist. In dem Bestreben, diese Störungen möglichst gering zu halten, müssen oft grosse Teile der in den Strassenzügen liegenden Baugruben mit provisorischen Fahrbahnbrücken abgedeckt werden. Die Brücken bestehen in der Regel aus im Abstand von rund 2 m verlegten Stahlträgern, die auf den Baugrubenumschliessungswänden auflagern. Bei sehr breiten Baugruben, zum Beispiel in Bahnhofsbereichen, kann es zweckmässig sein, zusätzliche Mittelunterstützungen in Form von Unterzügen zu schaffen, die die Lasten über Mittelrammträger in den Untergrund weiterleiten. Die eigentliche Fahrbahnabdeckung kann aus Holz, Stahlbeton oder Stahl bestehen. In Frankfurt haben sich beispielsweise Stahlbeton-Fertigteilplatten mit einer griffigen, leicht geriffelten Oberfläche in den Abmessungen 1 × 2 m, 16 cm dick, sehr gut bewährt. Holzabdeckungen mit einer Verschleisschicht aus Bohlen sind zwar preisgünstiger, erweisen sich jedoch bei feuchtem Wetter als wenig rutschfest. Selbstverständlich können auch Strassenbahnen über entsprechende Fahrbahnkonstruktionen geführt werden.

Bild 6. Provisorische Fahrbahnabdeckung und Strassenbahngleisabfangung über eine 21 m tiefen Baugrube «An der Hauptwache» in Frankfurt am Main

Bild 7. Aussteifung einer normalen Tunnelbaugrube



Das Bild 6 zeigt eine derartige Fahrbahnabdeckung an der Baustelle Hauptwache in Frankfurt/Main. Da fast der gesamte innerstädtische Strassenbahnverkehr den Platz an der Hauptwache kreuzt – insgesamt sind es 12 verschiedene Linien – konnte eine Umleitung oder Sperrung des Verkehrs nicht in Erwägung gezogen werden. Es wurden hier im Verlauf von 16 Nächten während der kurzen nächtlichen Betriebspause der Strassenbahn 290 lfm Gleisabfangungen eingebaut.

Der nichtschienengebundene Verkehr wird im allgemeinen während der Einbauzeit über Umleitungsstrecken geführt oder aber die Abdeckung selbst muss bei einer Teilsperrung der Strasse in einzelnen Abschnitten eingebracht werden.

2.33 Baugrubensicherung und Erdaushub

Unter der Fahrbahnabdeckung wird der weitere Boden ausgehoben, wobei gleichzeitig zur Aufnahme des Erddruckes in dem statisch erforderlichen Umfang Aussteifungen eingebracht werden. Die früher allgemein gebräuchliche Rundholzsteife wird auch noch heute – namentlich bei schmalen Baugruben – gern verwendet. Bei breiteren Baugruben werden jedoch zur Vermeidung von Mittelrammträgern, die sich bei den nachfolgenden Arbeiten als sehr störend erweisen, meist Breitflanschträger vorgezogen (Bild 7). Im Normalfall genügt ein einfaches Verkeilen der Steifenköpfe gegen die Rammträger oder gegen Stahlgurtungen an Schlitz-, Bohrpfahl- oder Spundwänden. Sollen auch die elastischen Verformungen der Steifen zur Vermeidung von Setzungen der Randbebauung ausgeschaltet werden, so presst man mit Hilfe hydraulischer Pressen die Steifen auf die gewünschte, statisch ermittelte Druckkraft vor.

Für die wirtschaftliche Bemessung der Baugrubenaussteifung einschliesslich der Baugrubenumschliessungswände ist der richtige Ansatz der Erddruckkräfte von ausschlaggebender Bedeutung. Durch entsprechende Versuche sollten daher die in die statische Berechnung aufzunehmenden Bodenkennwerte, Verteilung des Erddruckes, Auswirkungen von Zusatzlasten auf den Erddruck usw. eindeutig bestimmt werden. Im allgemeinen wird in Deutschland bei rolligen Böden eine rechteckförmige Verteilung des Erddruckes auf Trägerbohlwände angenommen, wobei dieses Rechteck dem Coulombschen Dreieck flächengleich ist. Bei Trägerbohlwänden mit vorgespannten Steifen und bei Schlitz- und Bohrpfahlwänden wird allgemein von der dreieckförmigen Coulombschen Erddruckverteilung ausgegangen. Die Auswertung von kürzlich in Frankfurt/Main durchgeführten Steifendruckmessungen an einer Bohrpfahlwand bei einer rund 19 m tiefen Baugrube ergab eine von den üblichen Rechnungsannahmen durchaus abweichende Erddruckverteilung (Bild 8). Dieses Beispiel soll nur noch einmal verdeutlichen, wie ausserordentlich wichtig die möglichst der Wirklichkeit nahekommende Annahme von Erdbelastungen für die wirtschaftliche Bemessung von Baugrube und Bauwerk ist.

Obwohl bei der Bemessung der Baugruben-Aussteifungselemente auf jeden Fall angestrebt werden sollte, dass der eigentliche Bauwerksraum steifenfrei bleibt, ist es jedoch oft nicht zu vermeiden, dass eine Steifenlage im Bereich des Tunnelkörpers liegt, die dann erst nach entsprechender Umsteifung auf Sohle oder unteren Wandteil des Tunnels entfernt werden kann (vgl. Bilder 5).

Innerhalb der Baugrube wird der Boden meist durch Schaufellader gelöst und längs zu Baggerschächten transportiert. Auf der Fahrbahnabdeckung oder dem Gelände stehende Greifbagger übernehmen den Vertikaltransport und das Beladen der Abfuhrlastwagen. Sofern das Material dazu geeignet ist, wird es meistens unmittelbar für die Verfüllung anderer Tiefbahnbaugruben verwendet. Anderenfalls sind rechtzeitig geeignete Kippen für die recht erheblichen Aushubmengen bereitzustellen.

In letzter Zeit haben sich besonders bei breiteren Baugruben Rückverankerungen in Form von gerammten oder im Spülbohrverfahren eingebrachten Injektionszugankern durchgesetzt, und zwar sowohl bei Trägerbohlwänden als auch bei Bohrpfahl- und Schlitzwänden. Die Anker bestehen meist aus ∅ 26 mm Rundstählen St 80/105 und werden mit 25 bis 30 t angespannt. Besonders bei bindigen Böden ist allerdings eine ständige Kontrolle erforderlich, da infolge des Kriechverhaltens des Bodens die Ankerkräfte schnell nachlassen können und die Stähle entsprechend nachgespannt werden müssen. Die steifenfreie Baugrube erweist sich für die weiteren Arbeitsvorgänge als ausserordentlich vorteilhaft, während von Nachteil sein kann, dass die Anker meist in eine Vielzahl fremder Grundstücke eingreifen und je nach geltendem Recht gegebenenfalls die Genehmigung jedes betroffenen Grundstückeigentümers einzuholen ist.

2.34 Wasserhaltung

Sofern die Baugrube im Bereich von Grund- oder Schichtenwasser liegt, ist eine entsprechende Wasserhaltungsanlage zu installieren. Bei der Berliner Bauweise werden dazu in der Regel ausserhalb der Baugrube Brunnen gesetzt und mit Unterwassertauchpumpen bestückt, bei der Hamburger Bauweise liegen diese Brunnen meist im Arbeitsraum. Kommen Feinsand-, Schluff- oder ähnliche Bodenschichten vor, so ist bisweilen eine Vakuumwasserhaltung zweckmässig, bei geringem Anfall von Wasser genügt oft eine offene Wasserhaltung. Schwierigkeiten bereiten besonders bei starkem Wasseranfall die Ableitung des Wassers zu geeigneten Vorflutern und die Bereitstellung unabhängiger Energiequellen für die Pumpen, die bei Ausfall

Bild 8. Auswertung von Steifendruckmessungen an einer Bohrpfahlbaugrubenwand in der Frankfurter Innenstadt

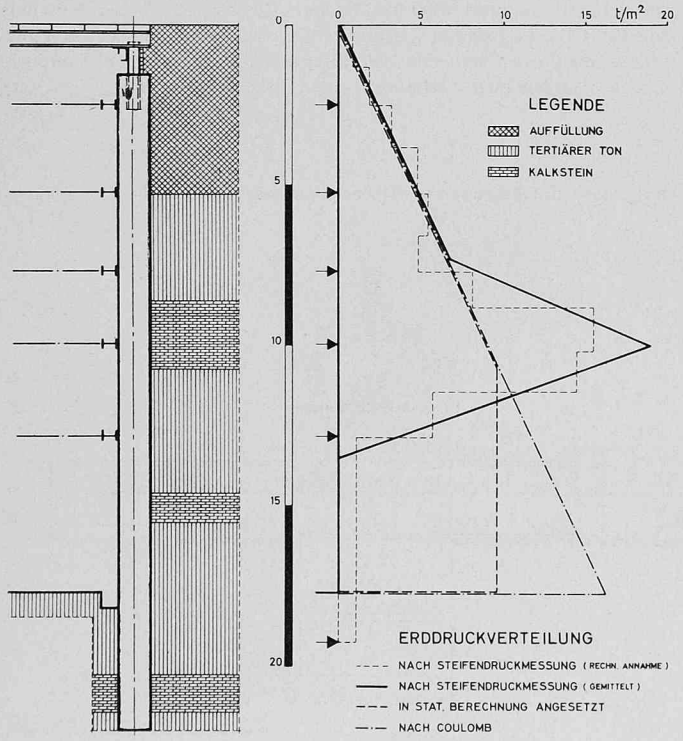


Bild 9. Dreigleisiges Tunnelbauwerk, im Vordergrund zur Aufnahme von Weichenanlagen stützenfrei ausgebildet

des normalen Stromes unverzüglich in Funktion treten müssen, wenn grössere Schäden am Bauwerk vermieden werden sollen.

2.35 Abdichtung

Bei im Grundwasser liegenden Tunnelbauwerken ist die Art der Abdichtung meist von zentraler Bedeutung für die Konstruktion des Bauwerkes und den Arbeitsablauf bei dessen Herstellung. Ausschlaggebend ist dabei die Funktion, die der Abdichtung zugewiesen wird: Entweder nur als Isolierung gegen aussen anstehendes Druck- oder Sickerwasser oder aber gleichzeitig als elektrische Isolation des umgebenden Erdreiches gegen vagabundierende Ströme der Gleichstrombahn. Wert und Notwendigkeit der Aussenhautabdichtung für die zweite Funktion sind gerade in den letzten Jahren in Deutschland heftig umstritten worden; jedoch scheint sich eine Entwicklung abzuzeichnen, die der Abdichtung nur die Aufgabe der Trockenhaltung des Bauwerkes zuweist, während das Austreten von Streuströmen in anderer Weise verhindert wird.

Trotz der stürmischen Entwicklung im Kunststoffwesen beherrscht, zumindest in Deutschland, die seit Jahrzehnten bewährte mehrlagige Bitumenpappabdichtung unter Zuhilfenahme von Metallfolien an gefährdeten Stellen weitgehend das Arbeitsfeld, aber auch Abdichtungen mit Jute-Bitumen-Bahnen sind mehrfach ausgeführt worden.

In letzter Zeit sind verschiedene Städte in Deutschland dazu übergegangen, auch bei Vorhandensein von drückendem Wasser auf eine gesonderte Abdichtungshaut ganz zu verzichten und die Dichtigkeit des Bauwerkes durch einen wasserdichten Beton zu erzielen. Die Entwicklung der Betontechnologie und die Möglichkeit, durch Fugenbänder Arbeits- und Dehnungsfugen sicher abzudichten, lassen diesen Weg als durchaus gangbar und entwicklungsfähig erscheinen. Derartige Tunnelanlagen in wasserdichtem Beton wurden in Deutschland zunächst in Hamburg, später auch unter anderem in Stuttgart, Köln, Frankfurt, Essen und München hergestellt.

2.36 Herstellen des Tunnelbauwerkes

Gerade bei der Herstellung des Tunnelbauwerkes sind seit dem letzten Krieg erhebliche Rationalisierungsentwicklungen zu verzeichnen. Dies trifft ganz besonders auf die heute allgemein verwendeten, Kosten und Bauzeit sparenden, grossflächigen Wand- und Deckenschalungssysteme zu. Bei grösseren Tunnellängen mit nahezu gleichbleibendem Querschnitt haben sich verfahrbare Schalwagenzüge aus Stahlrohr- oder Profilstahlkonstruktionen, die oft das gleichzeitige Betonieren von Wänden und Decke ermöglichen, bestens bewährt.

Auch die Bewehrungsarbeiten konnten durch Verwendung grossflächiger, fabrikmässig vorgefertigter Bewehrungselemente, die sich dem statisch ermittelten Momentenverlauf des Tunnelrahmens in jeder gewünschten Weise anpassen und damit eine optimale Stahlausnutzung ermöglichen, weitestgehend rationalisiert werden.

Wurde der Beton in früherer Zeit meistens in besonderen Betonbereitungsanlagen hergestellt und zur Einbaustelle gepumpt, so wird heute in vielen Städten wegen des fehlenden Platzes für derartige Mischanlagen Lieferbeton verwendet und direkt oder mit Hilfe von Förderbändern zur Einbaustelle gebracht. Es lassen sich hier ganz erhebliche Einzelleistungen erzielen. In Frankfurt/Main wurden beispielsweise beim Betonieren einer besonders voluminösen Tunnelsohle im Hauptwachenbereich 3400 m³ Beton in 31 Stunden eingebracht; das entspricht einer mittleren Leistung von 110 m³/h. Dabei wurden besonders in den verkehrsarmen Nachtstunden Spitzenleistungen von 200 m³/h und mehr erzielt.

Der Bau von Tunnelanlagen ausschliesslich mit Stahlbetonfertigteilen hat sich wegen der Schwierigkeiten beim Transport und Verlegen der meist sehr schweren Einzelteile gegenüber der wirtschaftlicheren Ortbetonbauweise bisher nicht allgemein durchsetzen können. Eine Ausnahme bildet ein rund 300 m langes Tunnelstück in Hamburg, das kürzlich fast durchweg mit Fertigteilen hergestellt wurde. Bei im Grundwasser liegenden Tunneln werden die Abmessungen der Bauwerksteile oft zusätzlich durch die Forderung nach Auftriebssicherheit bestimmt, so dass die Vorteile moderner, massensparender Betonbauweisen, wie zum Beispiel vorgespannter Konstruktionen, kaum genutzt werden können.

2.37 Restarbeiten

Nach Fertigstellung des Tunnelbauwerkes werden die restlichen Isolierungen aufgebracht, der Boden im Arbeitsraum verfüllt, die Wasserhaltungsanlagen nach und nach ausgeschaltet und ausgebaut, die Baugrube über dem Tunnel bei gleichzeitigem Ausbau der Aussteifungselemente verfüllt und verdichtet und schliesslich die Fahrbahnbrücken ausgebaut und die Ramm- oder Bohrträger gezogen, wobei zur Vermeidung von Lärm und Erschütterungen neuerdings häufig geräuschlos arbeitende hydraulische Ziehgeräte zum Einsatz kommen. Zuletzt wird die Strasse in ihrer endgültigen Form wieder hergestellt.

Beispiel: Kreuzungsbauwerk Hauptwache in Frankfurt/Main

Bevor ich mich weiteren Baumethoden für den Tiefbahnbau zuwende, möchte ich an einem Beispiel aus der Stadt Frankfurt/Main die für Ingenieur und Architekt schier unbegrenzten Gestaltungsmöglichkeiten bei der beschriebenen Bauweise darstellen:

Am Platz «An der Hauptwache» kreuzt eine zweigleisige, in Nord-Süd-Richtung verlaufende U-Bahnlinie eine viergleisige, in Ost-West-Richtung verlaufende Gemeinschaftsstrecke der U-Bahn sowie der V-Bahn der Deutschen Bundesbahn (Bild 10). Da die Gleisanlagen in verschiedenen Ebenen geführt werden, entsteht ein dreigeschossiges Bauwerk. In der untersten, der D-Ebene, liegt der 100 m lange Bahnhof der Nord-Süd-Linie, in der darüberliegenden C-Ebene liegt zukünftig der viergleisige Bahnhof von U- und V-Bahn. Die Umsteigebeziehungen zwischen allen Strecken werden mit festen Treppenanlagen und Fahrtreppen geschaffen. Die darüberliegende B-Ebene (Bild 11) umfasst den gesamten Platz an der Hauptwache. In einer Fläche von rund 15 000 m² entstehen hier nicht nur die notwendigen Verkehrswege für die Passanten zur Unterquerung der Strassen dieses Platzes und als Zugang zu den Bahnanlagen, sondern ein Bereich von rund 9000 m² Fläche wird wirtschaftlicher Nutzung zugeführt. Verkaufsläden vielfältiger Art, Reisebüros, Gaststätten und Imbisstuben usw., teilweise mit direktem Zugang zu den Kellergeschossen anliegender Gebäude, sollen diesen Platz über seine Ver-

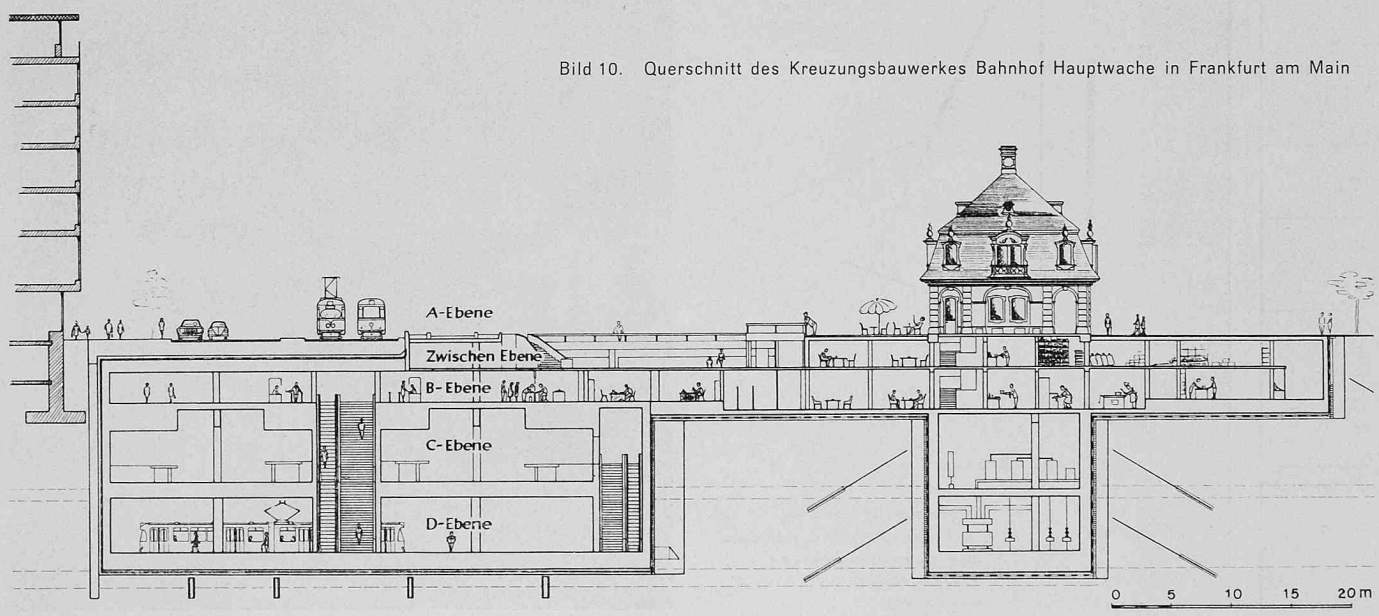


Bild 10. Querschnitt des Kreuzungsbauwerkes Bahnhof Hauptwache in Frankfurt am Main

kehrsfunktion hinaus zu einem attraktiven Mittelpunkt der Stadt werden lassen. Dies wird unterstützt durch grosszügige Treppenabgänge (Bild 12) in die teilweise zweigeschossige B-Ebene, weite Öffnungen in der oberen Decke, die gleichsam diese unterirdische Ebene als Fortsetzung der Platzoberfläche empfinden lassen, in das Gesamtbauwerk mit einbezogene terrassenartige Aufbauten und, last not least, durch das als Zentrum gedachte Hauptwachengebäude, das in seiner ursprünglichen, 1730 entstandenen Form wieder aufgebaut wird. So sollen sich historisches Bauwerk und moderne Verkehrsanlage zu einer harmonischen Synthese verbinden.

Mit den Bauarbeiten, die, bedingt durch den Oberflächenverkehr, in zwei Bauphasen abgewickelt werden müssen, wurde im August 1965 begonnen. Die Rohbauarbeiten werden etwa Anfang 1968 beendet sein, die Betriebsaufnahme für die Nord-Süd-Linie der U-Bahn ist für den Sommer 1968 vorgesehen.

Bei diesem besonders umfangreichen U-Bahn-Los fallen unter anderem folgende Bauleistungen an: 16000 m² Trägerbohlwände, 985 Baugrubenträger, die meist im Bohrverfahren einzubringen waren, 9250 m² Schlitzwände, 16500 m² provisorische Fahrbahnabdeckungen, 280000 m³ Bodenaushub, 90000 m³ Stahlbeton für das Tunnelbauwerk, 81000 m² Bitumenpappabdichtung, drei- bis fünflagig, 45 Wasserhaltungsbrunnen. Auf der Baustelle sind während der Hauptarbeiten 300 bis 500 Bauarbeiter tätig.

Nach diesem Beispiel darf ich mich den weiteren Methoden der offenen Bauweise zuwenden, und zwar:

2.4 Bauweisen mit Baugrubenwänden als Bestandteil des Bauwerkes («Mailänder Bauweise»)

Beim Bau der Untergrundbahn in Mailand ist vor nahezu einem Jahrzehnt eine neue Baumethode, meist als «Mailänder Bauweise» bezeichnet, entwickelt worden. Hier werden zunächst Betonwände im Schlitzverfahren eingebracht. Dann wird der Boden zwischen den beiden Schlitzwänden im Schutze einer provisorischen Aussteifung bis etwa zur Unterkante der Tunneldecke ausgehoben. Danach wird die Tunneldecke eingeschalt, die Bewehrung der Schlitzwände in die Tunneldecke abgebogen und die Tunneldecke selbst betoniert. Nach Erreichen der notwendigen Festigkeit wird die Baugrube oberhalb der Decke verfüllt, die Strasse wieder hergestellt und zur Benutzung freigegeben. Erst danach wird der Boden unterhalb der Tunneldecke ausgehoben, auf Lastwagen über Rampen an dazu geeigneten Stellen zutage gefördert, und abschliessend die Tunnelsohle, meist in Form von Sohlgewölben, eingebracht.

Der Grundwasserspiegel liegt in Mailand unterhalb des Tunnelbauwerkes, so dass auf eine Dichtung verzichtet werden konnte. Der ausserordentliche Vorteil dieser Baumethode besteht besonders darin, dass Baugrubenwände und -aussteifung, nämlich die Tunneldecke, bereits Bestandteile des endgültigen Bauwerkes sind und dass der Oberflächenverkehr nur kurze Zeit unterbrochen wird. Ihre wirtschaftliche Anwendbarkeit setzt jedoch geeignete Boden- und Grundwasserverhältnisse voraus; dennoch ist anzunehmen, dass dieser bestechend einfachen Methode sicherlich noch ein sehr weitgehendes Anwendungsfeld offensteht.

Es soll in diesem Zusammenhang noch ein anderes Beispiel angeführt werden, bei dem eine Bohrpfahlwand als tragender Bestandteil in die Tunnelkonstruktion mit einbezogen wurde, und zwar ist dies der U-Strab-Tunnel am Stuttgarter Staatstheater (Bild 13). Hier wurde zunächst auf der einen Tunnelseite die Pfahlwand und die Hälfte der späteren Tunneldecke hergestellt. Nachdem der Verkehr auf diesen Teil der Decke verlegt war, konnten die zweite Pfahlwand und die andere Hälfte der Tunneldecke gebaut werden. Danach wurden die beiden Tunneldeckenhälften zusammengespannt und die Erde ohne weitere Belästigung des oberirdischen Verkehrs ausgehoben. Allerdings erhielt dieses Bauwerk eine Abdichtung und eine zusätzliche, den Wasserdruck aufnehmende Innenkonstruktion.

Auch in Wien wurden in grösserem Umfang unterirdische Verkehrsanlagen hergestellt, bei denen Schlitz- oder Bohrpfahlbaugrubenwände zugleich Bestandteile des Bauwerkes sind.

2.5 Sonderbauweisen

Nur der Vollständigkeit halber mögen hier noch zwei Sonderbauweisen benannt werden, deren Anwendung in speziell gelagerten Fällen vorteilhaft oder notwendig ist:

Da beim Bau der U-Bahn in Rotterdam die Wasserbewegungen von Ebbe und Flut eine Abdeichung des Flusses und damit eine Absenkung des Wassers nicht zuliessen, musste der Tunnel nach der *Versenkungsmethode* gebaut werden. So wurden Stahlbetontunnelstücke in einem Trockendock hergestellt und zur Einbaustelle im Flussbett oder aber in einem durch Spundwände gesicherten, eigens hierfür hergestellten Kanal eingeschwommen und auf Stahlbetonpfähle mit verstellbarem Kopf abgesenkt. Bei dieser ingenieurtechnisch hochinteressanten Lösung mussten teilweise die Tunnelabschnitte unter den Steifen des Kanals u-boot-artig weitertransportiert werden.

Liegen ganz besonders ungünstige Baugrundverhältnisse vor, kommt unter Umständen die Anwendung von *Caissons* in Frage. So wurde beispielsweise in Tokio bei der Hibiya-Station in einem sehr weichen, schlammigen Lehm ein dreigeschossiges, 19 m breites und 16 m hohes Bauwerk rund 21 m tief in der Senkkastenmethode hergestellt. Wegen ihrer Aufwendigkeit und des erforderlichen Platzbedarfes dürfte diese Bauweise jedoch nur in seltensten Fällen ihre Berechtigung haben.

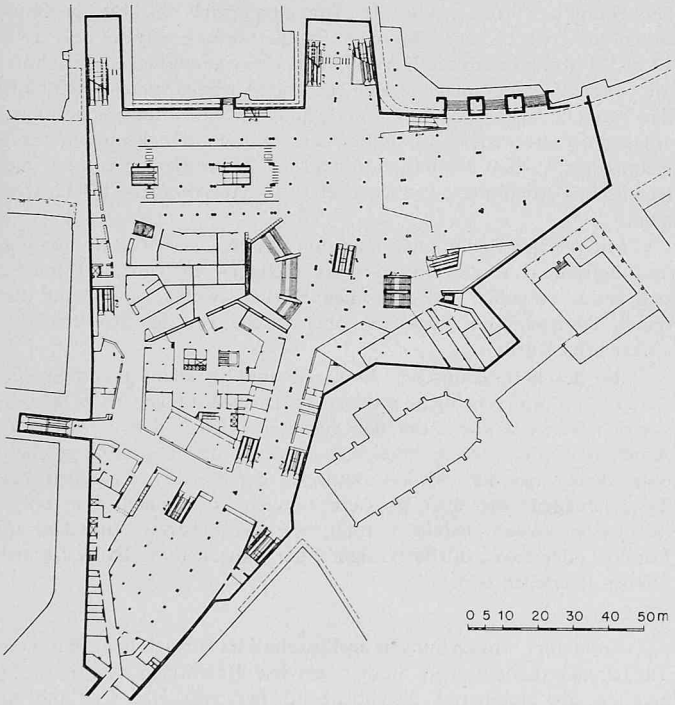
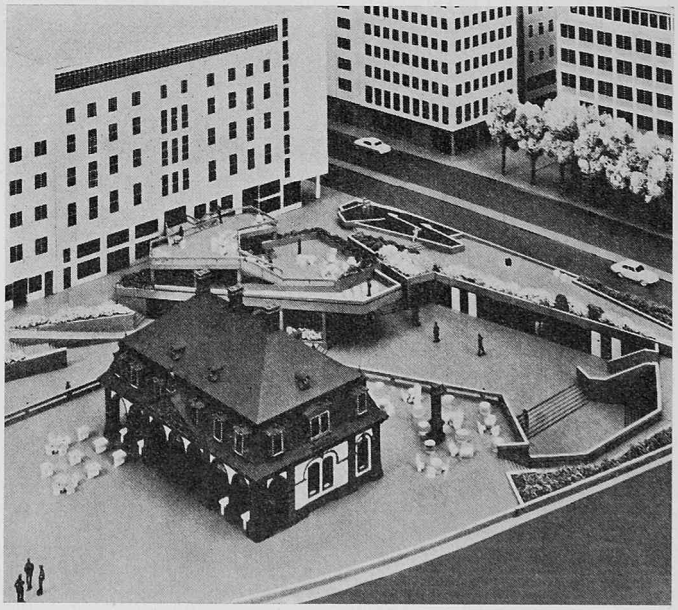


Bild 11. Unterirdische Fussgängerebene (B-Ebene) am Platz «An der Hauptwache» in Frankfurt am Main

Bild 12. Modellbild der zukünftigen Platzgestaltung «An der Hauptwache» in Frankfurt am Main



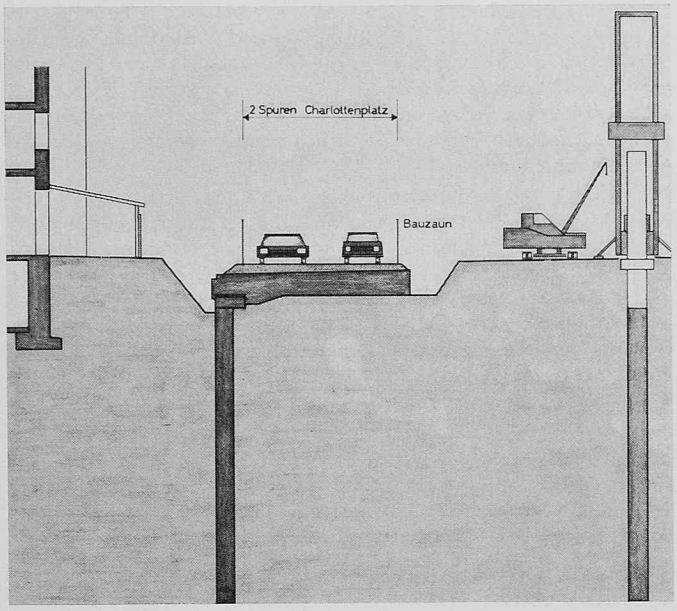


Bild 13a

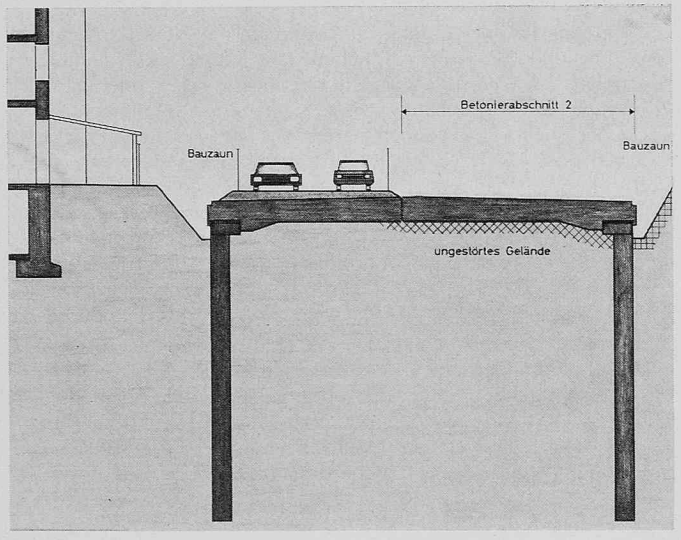


Bild 13b

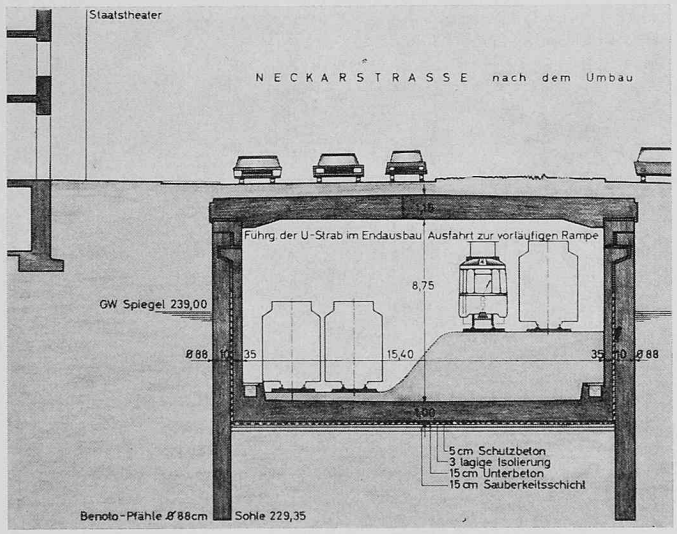


Bild 13c

Bilder 13a bis 13c. Bauvorgänge beim Bau des Strassenbahntunnels am Stuttgarter Staatstheater, unter Verwendung einer Bohrpfahlbaugrubenwand als tragenden Bestandteil des Tunnelbauwerkes

3. Geschlossene Bauweisen

Über die Methoden der geschlossenen Bauweisen bei Herstellung unterirdischer Verkehrsanlagen wird an anderer Stelle eingehend berichtet, so dass hier nur die in Lockergesteinen vorwiegend in Frage kommenden Methoden, nämlich der Schildvortrieb und eventuell auch die Gefriermethode anzuführen sind. Im Schildvortrieb sind U-Bahn-Tunnel unter anderem in London, Paris, Moskau, Leningrad, Kiew und verschiedenen Städten in Japan und Amerika hergestellt worden. In Deutschland wurde dieses Verfahren angewandt bei einigen Tunnelabschnitten in Hamburg, einem Tunnelabschnitt in Berlin und zurzeit bei einem Abschnitt in München.

4. Arbeitsfortschritte und Kosten

4.1 Allgemeines

Von ausschlaggebender Bedeutung, mit welcher Geschwindigkeit in einer Stadt eine Tiefbahn gebaut werden kann, ist natürlich in erster Linie die Höhe der jeweils zur Verfügung stehenden Mittel. Neben einer intensiven und bis ins Detail gehenden Planung und Bauvorbereitung ist für ein schnelles und wirtschaftliches Bauen die Grösse der jeweils zur Ausführung vorgesehenen Abschnitte von gewisser Bedeutung. Aus den Erfahrungen in deutschen Städten kann gesagt werden, dass bei Ausführung in offener Bauweise ein Optimum bei Tunnelabschnitten (sogenannten Baulosen) von rund 600 bis 800 m Länge erreicht wird. Dies entspricht im allgemeinen einem Bahnhof mit dazugehörigem Streckentunnel.

Wenn nachfolgend aus der Erfahrung beim Bau von Tiefbahnanlagen in Deutschland einige Angaben über mittlere Arbeitsfortschritte und Kostenrelationen gemacht werden, so wird vorausgesetzt, dass diese Angaben nur mit allem Vorbehalt betrachtet werden. Die Abhängigkeit vom Baugrund und den sonstigen örtlichen Verhältnissen beeinflussen Bauzeiten und Kosten in weit stärkerem Mass, als dies sonst bei Ingenieurbauwerken üblich ist, so dass auch erhebliche Abweichungen von den angegebenen Durchschnittswerten durchaus nicht aussergewöhnlich sind.

4.2 Bauzeiten

Bei der Aufstellung von Bauzeitenplänen hat sich für die Tunnelrohbauarbeiten die Darstellung in Weg-Zeit-Diagrammen als auch während der Bauausführung leicht überschau- und kontrollierbar bestens bewährt (Bild 14). Neuerdings findet auch die Netzplantechnik mit ihrer exakten Erfassung der gegenseitigen Abhängigkeiten mehr und mehr Anwendung.

Die dem eigentlichen Tunnelrohbau vorhergehenden vorbereitenden Massnahmen wie Leitungsverlegungen, Hausabfangungen, Verkehrslenkungen usw. nehmen in der Regel einen Zeitraum von einem halben bis einem Jahr in Anspruch. Für die Arbeiten des Tunnelrohbaues kann man vom ersten Rammschlag bis zur Wiederherstellung der Strassen über der Tunnelbaugrube mit üblichen Bauzeiten von etwa 10 bis 15 Monaten für die normale Strecke und etwa 12 bis 18 Monaten für die Herstellung der zweigeschossigen Bahnhöfe mit ihren Zugangsanlagen rechnen. Die Ausbauarbeiten innerhalb der Tunnelanlagen, dass heisst Verlegung der Gleis- und Sicherungsanlagen im Strecken- und Bahnhofsbereich und architektonischer und technischer Ausbau der Bahnhöfe und der Zugangsanlagen sowie die technischen Abnahmen, Probebetrieb usw. dauern etwa 7 bis 12 Monate.

Mit welchen Zeiten muss man nun zwischen erstem Rammschlag und Betriebseröffnung einer Strecke rechnen? In Tabelle 1 finden sich einige Angaben aus deutschen Städten, wobei jedoch nur die reinen Tunnelanlagen, nicht der oberirdische Teil der Strecken, berücksichtigt wurde.

Bei der bergmännischen Bauweise sind in Deutschland in der letzten Zeit zwar erhebliche mittlere Vortriebsleistungen beim Schildvortrieb erzielt worden; mit den vorbereitenden und nachfolgenden Arbeiten werden jedoch Bauzeiten benötigt, die insgesamt gesehen etwa denen bei der offenen Bauweise entsprechen. Lediglich bei Tunnelanlagen, die über grössere Längen ausschliesslich in bergmännischer Weise erstellt werden, wie beispielsweise Strecken in London oder Paris, dürfte bezüglich der Bauzeit diese Bauweise der offenen überlegen sein.

4.3 Kosten

Trotz aller Abweichungen im Einzelfall haben sich beim Bau von Tiefbahnen in deutschen Städten gewisse Relationen von Kostenanteilen als annähernd gleichbleibend herausgestellt. Für die in offener Bauweise errichteten Tunnelbauten kann etwa folgende Aufteilung der Gesamtkosten gegeben werden:

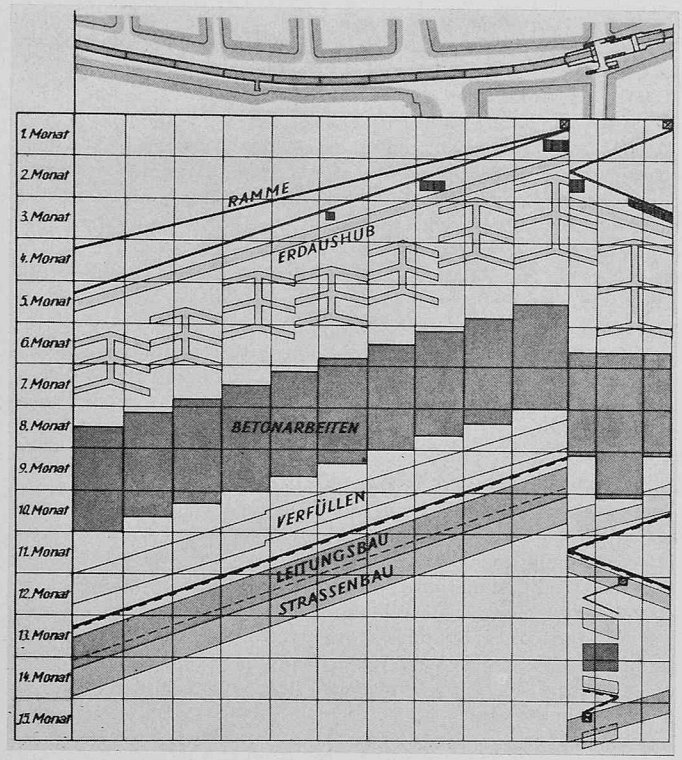


Bild 14. Schema eines Bauzeitenplanes in Form eines Weg-Zeit-Diagramms

a) Bauvorbereitungsmassnahmen — 10 ÷ 20%
Leitungsverlegungen, Hausabfangungen, Verkehrsumleitungen usw.
b) Tunnelrohbau — 55 ÷ 65%
c) Tunnelausbau — 10 ÷ 15%
Bahnhofsausbau und Streckenausbau
d) Strassenbau — 2 ÷ 8%
e) Planung, Bauleitung, Verwaltung — 5 ÷ 10%

Bezogen auf den Preisstand von 1966 haben sich in Deutschland beim Bau von U-Bahn-Anlagen in offener Bauweise je nach den örtlichen Verhältnissen mittlere Gesamtkosten von etwa 30 bis 60 Mio DM/km Strecke ergeben. Auf den eigentlichen Tunnelrohbau entfallen davon im Durchschnitt nur rund 60%. Diese Rohbaukosten gliedern sich etwa wie folgt auf, Ausführung in Berliner oder Hamburger Bauweise vorausgesetzt:

a) Baustellengemein- und Sonderkosten — 13 ÷ 18%
(Einrichtung, Geräte, Bauleitung, techn. Bearbeitung)
b) Baugrubenherstellung — 35 ÷ 45%
(Baugrubenwände, -abdeckung, -aussteifung, -aushub, -verfüllung)
c) Wasserhaltung — 2 ÷ 8%
d) Stahlbetonarbeiten für das Tunnelbauwerk — 30 ÷ 40%
e) Dichtungsarbeiten — 3 ÷ 6%

Der vorherrschende Anteil der Aufwendungen für die Baugrube wird aus dieser Zusammenstellung ersichtlich, und hier wiederum ist die Wahl der Baugrubenwandkonstruktion von wesentlichem Einfluss. Dies mag verdeutlicht werden an einem Kostenvergleich aus Frankfurt/Main, wo bei ungünstigsten Bodenverhältnissen für ver-

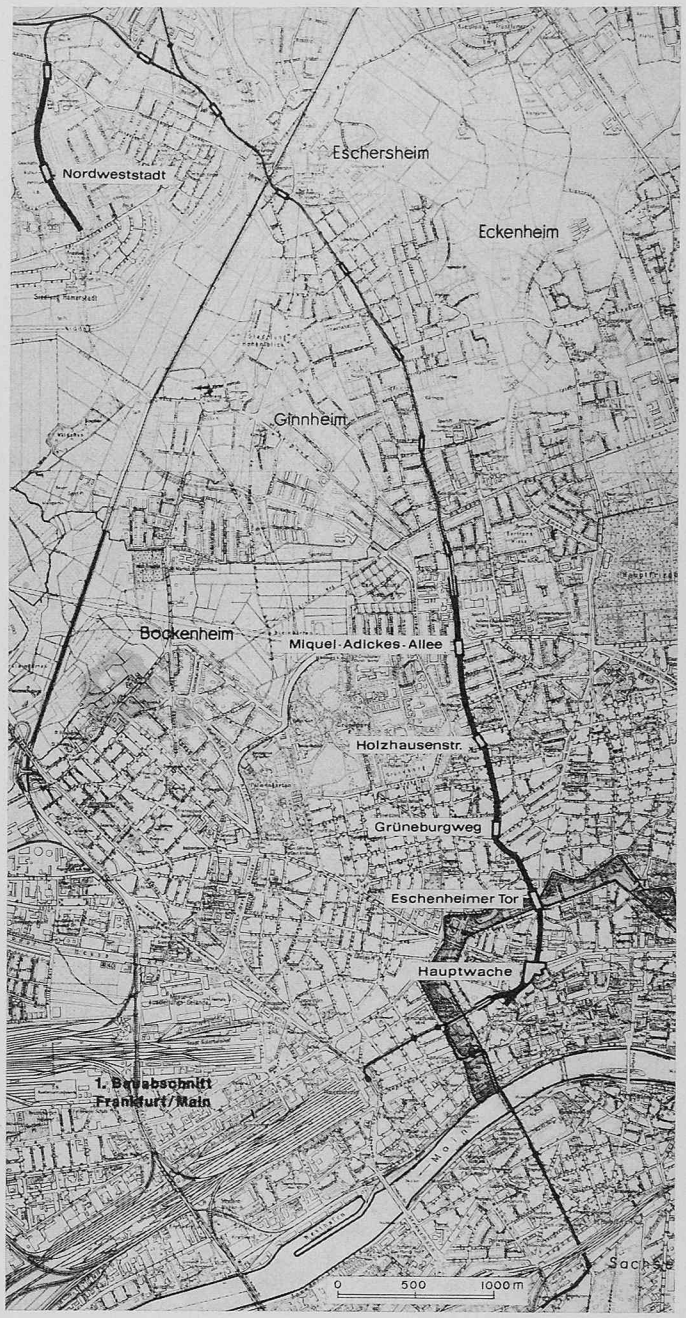


Bild 15. Die U-Bahn in Frankfurt am Main, erster Bauabschnitt (Hauptwache—Nordweststadt)

Tabelle 1. U-Bahn-Bau in Deutschland nach dem Kriege

Stadt	Teilabschnitt	Länge der Tunnelstrecke (km)	Baubeginn (Tunnelrohbau)	Betriebseröffnung	Baugeschwindigkeit (km/Jahr)
Berlin	Seestrasse–Tegel	4,9	Okt. 1953	Mai 1958	1,1
	Spichernstrasse–Leopoldplatz	7,1	Juni 1955	Aug. 1961	1,2
	Grenzallee–Britz Süd	2,9	Nov. 1959	Sept. 1963	0,8
	Tempelhof–Alt-Mariendorf	3,5	März 1961	Febr. 1966	0,7
	Insgesamt	18,4	Okt. 1953	Febr. 1966	1,5
Hamburg	Rathaus–Wandsbeck-Gartenstadt	8,8	Okt. 1955	Aug. 1963	1,1
	Schlump–Hagenbecks Tierpark	3,2	Mai 1962	Okt. 1966	0,7
	Berliner Tor–Horner Rennbahn	4,4	Mai 1962	Dez. 1966	1,0
	Insgesamt	16,4	Okt. 1955	Dez. 1966	1,4
Frankfurt	Hauptwache–Nordweststadt–Zentrum	4,0	Juni 1963	voraussichtlich Aug. 1968	0,8

schiedene Ausführungsarten von Baugrubenwänden etwa folgende Aufwendungen entstanden sind:

für Rammträgerbohlwände	rund 100 DM/m²
für Bohrträgerbohlwände	rund 150 DM/m²
für Schlitz- oder Bohrpfahlwände	rund 500 DM/m²

Insgesamt kann man einen ersten, wenn auch sehr groben Überblick über die etwa zu erwartenden Rohbaukosten erhalten, indem die Bodenaushubmengen mit einem mittleren m³-Preis von rund 100 bis 200 DM multipliziert werden. Dabei gilt der untere Wert für günstige Verhältnisse, das heisst leicht aushebbaren Boden, Anwendbarkeit von Rammträgerbohlwänden, geringen Umfang an Fahrbahnabdeckung, günstige Grundwasserverhältnisse, relativ schwache Beeinträchtigung durch benachbarte Bebauung und Verkehr usw., während der obere Wert bei sehr schwierigen Gegebenheiten anzusetzen ist.

Über Kosten von in bergmännischer Bauweise hergestellten Tunnelanlagen wird an anderer Stelle berichtet. Normalerweise erforderten bisher im Schildvortrieb gebaute Tiefbahnbauwerke etwa um 50 bis 100% höhere Gesamtaufwendungen als vergleichbare Projekte in offener Bauweise.

5. Historischer Rückblick und Auswirkung auf die Projektierung

Historisch gesehen kann eigentlich die bergmännische Bauweise für den Tiefbahnbau als die ältere angesehen werden, denn die erste elektrisch betriebene Untergrundbahnstrecke der Welt wurde in London im Untertagebau hergestellt und im Jahre 1890 in einer Länge von rund 4,5 km in Betrieb genommen. Es folgten dann bis zum Zweiten Weltkrieg die Städte Budapest 1896, Glasgow 1897, Paris 1900, Berlin und Boston 1902, Liverpool 1903, New York 1904, Philadelphia 1908, Buenos Aires 1911, Hamburg 1912, Madrid 1919, Barcelona 1923, Neapel und Los Angeles 1925, Tokio 1927, Oslo 1928, Athen 1930, Stockholm 1933, Moskau 1935, die mit nur wenigen Ausnahmen ihre Tunnelanlagen in der offenen Bauweise errichteten.

Es ist erstaunlich, dass die um die Jahrhundertwende entwickelte Berliner Bauweise im Prinzip nahezu unverändert – von der Rationalisierung einzelner Arbeitsvorgänge abgesehen – bis heute mit bestem Erfolg angewandt wird. Erst durch die technische Möglichkeit, von oben her im Schlitz- oder Bohrverfahren Stahlbetonwände herzustellen, die gleichzeitig Baugrubeneinfassung und Bestandteil des Bauwerkes sind, hat sich eine grundlegende Änderung der Baumethode ergeben, die vielleicht in Verbindung mit der betontechnologischen Entwicklung zur einwandfreien Herstellung eines wasserdichten Betons auch unter schwierigen Baustellenverhältnissen geeignet ist, die bewährten konventionellen Methoden nach und nach abzulösen.

Ausser in ihrer Wirtschaftlichkeit liegt ein besonderer Vorteil bei allen offenen Bauweisen darin, dass bei der Trassierung eine möglichst geringe Tiefenlage gewählt werden kann, was sich bei einem etappenweisen Ausbau günstig auf die Rampenlängen auswirkt, dass weiterhin kompliziertere Kreuzungs- und Verzweigungsbauwerke relativ einfach herzustellen sind. Bei Baugrubentiefen über 20 m, das heisst bei mehr als 2½facher Tiefenlage steigen allerdings die Kosten für die Baugrubenherstellung so stark an, dass dann die Anwendung bergmännischer Methoden vorteilhafter sein dürfte. Grundsätzlich sollte jedoch bei der Planung davon ausgegangen werden, dass jeder Meter Tiefe die Attraktivität und damit den Verkehrswert einer Bahnanlage herabsetzt, auch wenn berücksichtigt wird, dass bei grosser Tiefenlage eine wesentlich freiere Streckenführung möglich ist, da die Trasse nicht wie bei der offenen Bauweise weitgehend den Strassenzügen folgen muss.

Zwar stehen beim Entwurf eines Tiefbahnnetzes kaum bautechnische Erwägungen im Vordergrund, jedoch sollten bei der detaillierten Trassenplanung und Gradientenfestlegung so früh wie möglich die Vor- und Nachteile der anwendbaren Baumethoden sorgfältig gegeneinander abgewogen werden, damit in jedem Fall die wirtschaftlichste und verkehrsmässig optimale Lösung gefunden wird, bei der die Summe aus den einmaligen Herstellungskosten und den für einen angemessenen Zeitraum betrachteten laufenden Betriebskosten zu einem Minimum wird.

Allerdings können alle Untersuchungen und Vergleichsrechnungen immer nur einen Teil der möglichen Einflussfaktoren erfassen, so dass die letzten und wichtigsten Entscheidungen letzten Endes wohl stets von der fachlichen Qualifikation, dem technischen Gefühl und der vorausschauenden Phantasie des projektierenden und bauenden Ingenieurs und Architekten abhängen. In diesem Sinne ist allen an derartigen Tiefbahnprojekten beteiligten Ingenieuren und Architekten für die Planung eine glückliche Hand und für die Ausführung nach U-Bahnbauermanier ein herzliches «Glück auf!» zu wünschen!

Adresse des Verfassers: Dipl.-Ing. *Günter Maron*, D-6 Frankfurt-Seckbach, Im Staffel 135.

Unterirdische Verkehrsbauten mit geringer Störung des Strassenverkehrs, dargestellt am Beispiel des Stachus-Umbaues in München

DK 711.7.002

Von Dipl.-Ing. **W. Pollinger**, Reg. Baumeister, München

Ausgehend von den Voraussetzungen der Planung, informiere ich Sie im folgenden über das Projekt selbst, erläutere dann die gewählte Baumethode und ihre Vorteile in bezug auf die Aufrechterhaltung des Verkehrs und gehe abschliessend noch auf die Baudurchführung wesentlicher Bauteile dieser Methode ein.

1. Planungsvoraussetzungen

Der Stachus in München, einer der verkehrsreichsten Plätze Europas, wurde nach dem Kriege auf Grund der hektisch steigenden Verkehrsfrequenzen sehr bald für die Verkehrsplaner das Sorgenkind Nr. 1. Daher ist es nicht verwunderlich, dass alsbald mit Planungen begonnen wurde, mit dem Ziel, die Leistungsfähigkeit dieses weithin bekannten Platzes zu steigern. Die Projekte reichten vom weitausholenden Ringverkehr in einer Ebene bis zu autobahnähnlichen Knotenpunktslösungen in drei und vier Ebenen.

Grundlage aller Planungen war die Einbeziehung der drei hier vorherrschenden Verkehrssysteme, nämlich das für den *Individualverkehr*, der in den letzten Jahren täglich auf 120 bis 140 000 Fahrzeuge angestiegen ist, für die *Strassenbahn*, welche den Stachus in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung kreuzt und zudem aus und zur Westrichtung tangential abzweigt mit täglich bis zu 3600 Strassenbahnzügen, und schliesslich für die bedeutenden *Fussgängerströme*, die den Platz als Passanten oder Fahrgäste überqueren oder tangieren, mit einer Tagesfrequenz von 5 bis 900 000 Menschen.

Die Voraussetzungen für einen durchgreifenden Umbau waren jedoch erst gegeben, als die Gesamtverkehrskonzeption im Rahmen des Stadtentwicklungsplanes feststand, welche schliesslich 1963 vom Stadtrat genehmigt wurde. Die Gesamtverkehrskonzeption gliedert sich dabei auf in:

a) den Verkehrsplan für das übergeordnete Strassennetz,
b) den U-Bahn-Netzlinienplan und
c) den Plan für die einzurichtenden Fussgängerzonen.

Neu zu den Planungsgrundlagen für den Stachusumbau kam demzufolge das unterirdisch geführte Massenverkehrsmittel hinzu, und zwar einmal die
V-Bahn, das ist eine die beiden grossen, im Stadtgebiet liegenden Bahnhöfe (Hauptbahnhof und Ostbahnhof) verbindende Linie, welche die Deutsche Bundesbahn baut und betreibt. Sie stellt keine Stichlinie auf der etwas über 4 km langen Strecke dar, sondern ermöglicht sowohl vom Westen als auch vom Osten her die Durchleitung der Nahverkehrszüge der bestehenden 14 Vorortsstrecken, welche 40 km und mehr in die Region hineinreichen. Zum anderen waren es die geplanten *U-Bahn-Linien*, für welche beim Stachusprojekt nunmehr vorbereitende Baumassnahmen auszuführen sind, und zwar für eine Nord-Süd-Linie sowie eine Ost-West-Linie. Die beiden U-Bahn-Linien erhalten am Stachus einen gemeinsamen Bahnhof, wobei direkte Umsteigemöglichkeiten zum V-Bahnhof zu gewährleisten sind.

2. Ausführungsprojekt

Beginnend im Jahre 1964 wurde nun ein Projekt für den Karlsplatzumbau, ausgehend von der Oberflächengestaltung, erarbeitet. Hierbei galt es, insbesondere die Gleisanlagen für die Strassenbahn und die Fahrbahnen für den Individualverkehr für die ausserordentlich hohen Tagesfrequenzen verkehrsgünstig aufeinander abzustimmen, mehr Fahrspuren und eine Vergrösserung der Stauraumlängen vorzusehen sowie Gleisaufspaltungen, Doppelhaltestellen usw. zu schaffen, um eine optimale Knotenleistung zu erreichen.

Die über 67 m breite Sonnenstrasse, ein Teilstück des künftigen