Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 63/64 (1914)

Heft: 3

Artikel: Ueber die Stabilität von Tunnelmauerwerk: unter Berücksichtigung der Erfahrung beim Bau des Hauenstein-Basistunnels

Autor: Wiesmann, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-31496

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: 27.12.2025

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

INHALT: Ueber die Stabilität von Tunnelmauerwerk. — Wettbewerb für eine reformierte Kirche in Zürich-Fluntern. — † Robert Meier. — Schweizerischer Verein von Dampfkesselbesitzern. — Miscellanea: Eidg. Technische Hochschule. XXXIII. Generalversammlung der G. e. P. Der Durchschlag des Hauenstein-Basistunnel. Neue Wasserkraftanlagen in Norwegen. LV. Jahresversammlung des deutschen Vereins von Gas- und Wasserfachmännern. Fortbildungskurs über Hochspannung in Charlottenburg. Pumpanlage mit Humphrey-Pumpen bei Alexandrien. Schiffahrt auf dem Oberrhein. Die Dreihundertjahrfeier der Logarithmentafel. Murgkraftwerk im Schwarzwald. Kasino Langenthal. Der XLII. Kongress französischer Architekten. Zürcherischer Kantonsingenieur. Schiffahrt auf dem Niederrhein. Ferrovia Laviana. Chur-Arosa-Bahn. Einführung der linksufrigen Zürichseebahn in den Hauptbahnhof Zürich. Transitpostgebäude in Zürich und Biel. — Nekrologie: J. Roner. — Literatur. — Vereinsnachrichten: Schweiz. Ingenieur- und Architekten-Verein. G. e. P.: Stellenvermittlung.

Tafel 6: Robert Meier.

Band 64. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und unter genauer Quellenangabe gestattet. **Nr. 3.**

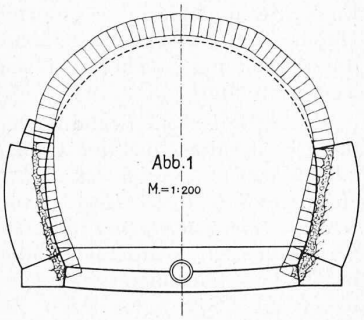
Ueber die Stabilität von Tunnelmauerwerk.

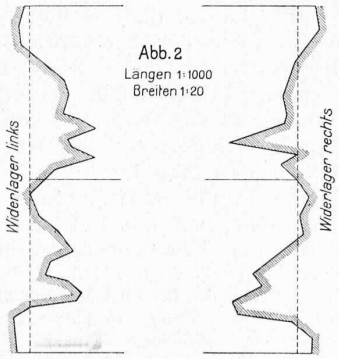
Unter Berücksichtigung der Erfahrungen beim Bau des Hauenstein-Basistunnels.

Von Ingenieur *E. Wiesmann*, Olten.

Das Vorkommen gewisser Gebirgsarten im neuen Hauensteintunnel, die in einigen früher ausgeführten Tunnels trotz ihrer anscheinenden Standfestigkeit später Druckerscheinungen zeigten, welche eine Zerstörung des Mauerwerks zur Folge hatten, gab mir Veranlassung, aus der Baugeschichte und den Berichten über die Wiederherstellungsarbeiten die Ursachen dieser Erscheinungen zu studieren, um solchen üblen Folgen vorbeugen zu können. Es ist also hier vornehmlich die Rede von der Ausmauerung von Gebirgstunnels im nicht absolut standfesten, im sog. gebrächen Gebirge, zum Teil mit einer Neigung zum Blähendwerden, nicht etwa von Erdtunneln und schweren Druckpartien; denn wo solche auftreten, werden umfassende Massregeln getroffen, sodass derartig schwierige Stellen später vollständig zur Ruhe kommen. An nachstehendem lehrreichen Beispiel aus der Rekonstruktion eines Tunnels soll gezeigt werden, worauf es in erster Linie ankommt.

In dem in den siebziger Jahren erbauten zweispurigen Bötzbergtunnel der Linie Brugg-Stein zeigten sich nach der Vollendung stellenweise Deformationen des Mauerwerks. Die Widerlager gingen zusammen und das Gewölbe nahm eine unregelmässige Form an (Abbildungen 1 und 2). Die Abbildung 2 zeigt eine solche Stelle im Horizontalschnitt. Das Gebirge bestand aus Opalinuston, Gipskeuper, Mergel und Molassesandstein und war zum Teil wasserführend.





Man erkennt auf den ersten Blick, dass die Stabilität dieses Tunnelmauerwerks selbst gegen eine verhältnismässig geringe Beanspruchung nicht gesichert war. Es entsprach keineswegs den Anforderungen, die wir heute nach Form und Ausführung an ein Tunnelmauerwerk stellen. Das Widerlagermauerwerk war zu schwach, die innern Lagen bestanden nur aus trockener Füllung und der Fuss der Widerlager war direkt auf das Planum aufgestellt, anstatt in dieses eingelassen. Das schiefe Absetzen des Widerlagerfusses, obwohl einem richtigen theoretischen Grundsatze entsprechend, bietet für sich allein nur geringe Gewähr; denn es ist schwer, beim Bau überall eine vorschriftsmässige, nach hinten geneigte Fundamentsohle zu erzwingen, ausserdem kann das Planum vorzeitig aufgeweicht werden, sodass der keilförmige Zahn wenig oder gar keinen Widerstand gegen eine Verschiebung des Mauerwerks bietet. Die Widerlager fangen vielmehr ganz allmählich an zu gleiten und das Uebel verschlimmert sich dadurch, dass das nachsinkende Gestein sich wie ein Keil zwischen das Gebirge und das Mauerwerk einzwängt.

Wenn eine sorgfältige Kontrolle der Profilbreiten unterbleibt, so wird die Bewegung erst spät wahrgenommen, obgleich sie mit der Erstellung des Mauerwerks einsetzt. So bildet sich dann die Legende vom *nachträglich Druckhaftwerden* aus (meistens eine Verlegenheitserklärung), während bei solider Ausmauerung durch das sogen. Setzen des Gebirges, selbst in ausgesprochenen Druckpartien, der Gebirgsdruck rasch abnimmt.

Meistens zeigen sich die Veränderungen durch Abbrennen der Kanten zuerst im Gewölbe. *Das führt oft zum voreiligen Schluss, dass das Gewölbe nicht stark genug sei.* Der Fehler liegt aber anderswo. Kehren wir zur angedeuteten Ausbesserung des schadhaft gewordenen Tunnelmauerwerks im Bötzberg zurück. Aus Abbildung 1 ist der Vorgang ersichtlich: *Kräftige Widerlager, vertiefte Fundamente,* ausnahmsweise Einziehen eines Sohlengewölbes. Das ziemlich stark deformierte Gewölbe wurde fast überall stehen gelassen. Die ausgebesserten Strecken haben sich gut gehalten, weil bei den Rekonstruktionsarbeiten nach richtigen Grundsätzen vorgegangen wurde. Wären die *Widerlager* von Anfang an stärker ausgeführt worden, so wäre eine Zerstörung des Mauerwerks nicht eingetreten. Es ist ferner ersichtlich, dass es sich hier nicht um starken Gebirgsdruck handelte, sonst wären die schadhaft gewordenen Tunnelstrecken längst eingestürzt. *In Gebirgstunnels wird der auftretende oder zu erwartende Gebirgsdruck in den meisten Fällen überschätzt.*

Die richtige Formgebung der Ausmauerung in Bezug auf Stabilität (Unverrückbarkeit) ist für gewöhnlich viel wichtiger als die Festigkeit der einzelnen Teile gegen grossen Druck. Dieser Grundsatz soll natürlich nicht die Mauerwerksqualität als unwichtig hinstellen. Man soll eben das eine tun und das andere nicht lassen.

Aktiver und passiver Erddruck.

Bei Erdtunnels lässt sich auf Grund der Erddrucktheorie die Belastung (aktiver Erddruck) annähernd richtig bestimmen [1]). Der Widerstand der Erdwandungen (Gegendruck, Reaktion oder auch passiver Erddruck genannt) gegen das Mauerwerk kann wegen der Weichheit des Materials und der Unsicherheit der Wirkung nicht in Rechnung gezogen werden, daher muss das Mauerwerk so dimensioniert werden, dass es den aktiven Kräften allein Stand hält.

Bei Gebirgstunnels liegen die Verhältnisse anders. Infolge der Lagerungsverhältnisse und der Unregelmässigkeit der Ablösungen, die das Mauerwerk belasten, ist der Verlauf der Drucklinie im Tunnelmauerwerk schwer festzustellen. Hingegen werden durch die Reaktion der Felswände (passiver Erddruck) gewisse Drehmomente, die im freistehenden Mauerwerk auftreten würden, aufgehoben und *die Drucklinie wird gezwungen, innerhalb des Mauerungsprofils zu verlaufen.* Auf diese ungemein wichtige Hilfe ist indes nur dann mit Sicherheit zu zählen, *wenn das Tunnelmauerwerk satt an das Gebirge angemauert wird.* Nicht überall wird dieser Grundsatz befolgt. Es erscheint deshalb geboten, bei diesem Gedanken etwas länger zu verweilen und durch eine ganz einfache theoretische Untersuchung das Prinzip klarzulegen.

[1]) Vergleiche «Statische Berechnung von Tunnelmauerwerk», von Dr. Ing. Otto Kommerell, Berlin 1912, und «Die Dimensionierung des Tunnelmauerwerks», von Ing. A. Bierbaumer, Leipzig und Berlin 1913.

Denken wir uns eine Kette aus steifen Stäben (Abbildung 3), die gelenkartig miteinander verbunden sind. Die Kette werde durch eine Druckkraft 0—1 gegen eine widerstandsfähige Wand gepresst. Der Druck pflanzt sich durch die Stäbe 1—2, 2—3 und 3—4 fort. Eine Ablenkung der Stabkräfte ist nur möglich durch die Reaktionen R_1, R_2 und R_3. Wenn der Druck 0—1 zunimmt, so wachsen die genannten Reaktionen proportional. Endlich ist einleuchtend, dass, wenn der Stützpunkt 4 ausweichen könnte, die Stabilität der ganzen Kette gestört würde. Aehnlich verhält es sich mit dem Tunnelmauerwerk (Abbildung 4). An einer festen Gebirgswand stellt sich die Reaktion, auch *passiver Erddruck* genannt, in der erforderlichen Grösse ein, während in einem gegebenen Falle dem *aktiven Erddruck* ein bestimmter Wert zukommt. Die Stabilität des Tunnelmauerwerks ist nur dann gesichert, wenn es erstens zwischen den Punkten 1 und 4 satt angemauert ist, sodass die Felswand die erforderliche Reaktion wirklich auch ausüben kann, und wenn zweitens der Fusspunkt 4 des Mauerwerks nicht ausweichen kann.

Beim Ausbruch eines Tunnelprofils treten im First nicht selten grössere glockenförmige Nachbrüche auf, deren Ausfüllung mit Mörtelmauerwerk nicht immer durchgeführt werden kann. Man muss sich dann mit einer trockenen Auspackung begnügen. Wenn die satte Ausmauerung bis zum Punkt 1 erheblich über die Kämpferhöhe hinausreicht, so ist das freie Gewölbestück 1—0 imstande, eine ziemlich grosse Belastung aufzunehmen, ohne dass eine besonders grosse Gewölbestärke erforderlich wird.

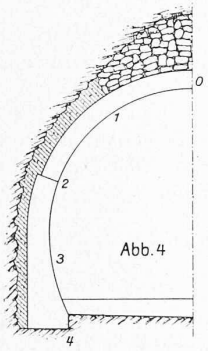


Abb. 4

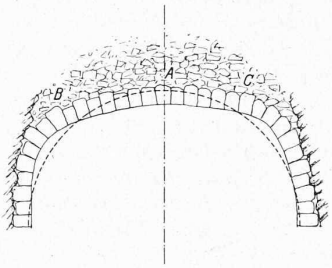


Abb. 5

Der Unterschied zwischen aktivem und passivem Druck geht deutlich aus Abbildung 5 hervor. Sie zeigt aus dem eingangs besprochenen Tunnel stark deformiertes Gewölbe, das ausgewechselt werden musste. Im Scheitel *A* haben wir einen ziemlich grossen aktiven Druck, dem das Gewölbe widerstanden hätte, *wenn* sich in den Punkten *B* und *C* ein entsprechender passiver Druck hätte bilden können.

Ueber Aeusserungen des Gebirgsdruckes in Gebirgstunnels.[1])

Nach dem Auffahren eines Stollens im Gebirge können wir in den meisten Fällen keine Druckerscheinungen an den Stollenwandungen wahrnehmen; denn würden daselbst Druckkräfte von der Grösse walten, wie sie gewissen Vorstellungen entsprechen, so wäre eine Begehung des Stollens unmöglich. Oft bleibt der Stollen ohne Auskleidung unverändert bestehen (absolut standfestes Gebirge), oder es genügt ein verhältnismässig schwacher Einbau, um ihn zu sichern (ziemlich standfest). Die Schwerlast der Ueberlagerung wird vom Hohlraum ferngehalten, indem sich in den Wandungen eine eigenartige Verteilung der Spannungen einstellt. Wir erkennen als Ursachen für dieses Verhalten: 1. Die unendlich grosse Tragfähigkeit der Körper unter festem Einschluss, desgleichen eine vermehrte Tragfähigkeit bei beschränkter Verschiebungsmöglichkeit; 2. die Kohäsion; 3. die innere Reibung und daraus folgend 4. das stabile Druckgefälle, schliesslich 5. die natürliche Gewölbebildung oder Verspannung.

Beim Bau des Hauensteintunnels konnten wir durchaus nichts entdecken, was mit diesen Ansichten im Widerspruch gewesen wäre. Das Gestein im Hauensteintunnel ist meist kalkhaltiger Mergel; es erwies sich durchwegs als ziemlich standfest, obwohl das Material keine grosse Druckfestigkeit besitzt. Wenn sich trotzdem das Gebirge als standfest erwies, so verdankt es dies der *innern Reibung*[1]), vermutlich bedingt durch den grossen Kalkgehalt und die Trockenheit[2]) des mergeligen Gesteins. *In der Frage über Standfestigkeit des Gebirges spricht die innere Reibung die entscheidende Rolle.* Sogar Granit, dem gewiss eine grosse Druckfestigkeit zukommt, kann druckhaft werden, wenn er von feinen Rissen durchsetzt ist, die mit seifiger, kaolinartiger Masse gefüllt sind, wodurch die innere Reibung zum Teil aufgehoben wird, während anderseits Kalkstein von viel geringerer Druckfestigkeit standfest bleibt. Es ist diese Erkenntnis (auch beim Bau des Hauensteinbasistunnels) von grosser finanzieller Tragweite, indem bei richtiger Beurteilung des Gebirges, stabiler Ausmauerung, verbunden mit einem raschen Bauvorgang, die Tunnelmauerung ohne unverhältnismässig grosse Kosten erstellt werden kann.

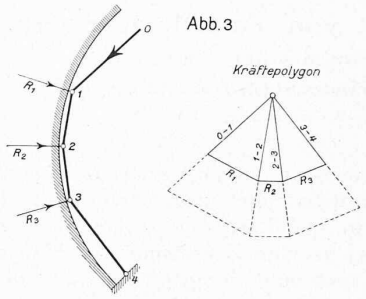


Abb. 3

Nach dem Auffahren des Hohlraumes zeigen sich oft *Abblätterungen*, die in sprödem Gebirge unter Knall abspringen (Bergschläge), während im milden Gebirge sich Platten von ähnlicher Form allmählich ablösen, und zwar an den Ulmen häufiger als an der Decke, während im First hie und da glockenförmige Nachbrüche entstehen. Durch satt anliegenden Einbau bezw. Ausmauerung wird die Entstehung solcher Ablösungen und Nachbrüche zum Teil verhindert.

An den Stollenwandungen befinden sich die oben genannten Kräfte und der Gebirgsdruck nahezu im *labilen* Gleichgewicht. *Es braucht deshalb der Einbau oder die Ausmauerung in der Regel keinen grossen Druck gegen das Gebirge auszuüben, um den labilen Gleichgewichtszustand herbeizuführen.* Anderseits bilden sich oft nach dem Ausbruch des Hohlraumes in den verschiedensten Richtungen Risse und Sprünge, deren Zahl täglich zunimmt. Man sagt gewöhnlich: „Das ist der Einfluss von Luft und Feuchtigkeit." Bei genauer Beobachtung findet man aber in den meisten Fällen, dass es nicht die Feuchtigkeit, sondern ein Austrocknen der Stollenwände ist, was durch Schwinden des Materials solche Risse hervorbringt, wodurch eine vermehrte Oberflächenspannung eintritt, die eine Abblätterung und das Auftreten von Bergschlägen begünstigt[3]). In gewissen Strecken im Hauensteintunnel zerfiel z. B. das Tertiär in rhombische Stücke und zwar zeigte sich ein stärkerer Zerfall in den obern Teilen des Profils als in der Nähe der Sohle, wo die Luft mit dem fliessenden Wasser in Berührung kam[4]). Wasseraufnahme bewirkt hingegen

[1]) Vergl. E. v. Willmann «Ueber einige Gebirgsdruckerscheinungen in ihrer Beziehung zum Tunnelbau», Leipzig 1911; Karl Brandau in Kassel: «Der Einfluss des Gebirgsdruckes auf einen tiefen, im Erdinnern liegenden Tunnel», Schweiz. Bauzeitung, Band LIX, Seite 277; E. Wiesmann «Ueber Gebirgsdruck», Schweiz. Bauzeitung, Band LX, Seite 87.

[1]) Der der Erddrucktheorie entnommene Reibungswinkel φ kommt hier nicht zur Geltung. In geschichtetem Gestein folgt eine allfällige Bewegung vorgeschriebener Bahnen.

[2]) Nässe vermindert sehr oft die Reibung, hebt sie aber nicht immer ganz auf.

[3]) Die Austrocknung ist mit einem Gewichtsverlust verbunden, liesse sich somit leicht nachweisen.

[4]) Selbst in einem wasserfreien Stollen wird die Luft nach und nach nahezu mit Wasserdampf gesättigt. Nehmen wir beispielsweise eine konstante Lüftung von 2 m^3/sek an und bewerten die Wasserdampfaufnahme der Luft im Stollen auf 5 *g* auf den Kubikmeter, so beläuft sich der tägliche Wasserentzug auf $2 \times 0{,}006 \times 3600 \times 24 = 1037$ *kg*.

meistens eine Vergrösserung des Volumens. Davon soll weiter unten die Rede sein.

Wie schon gesagt, spielt bei der Erhaltung des Gleichgewichts der in den Stollenwandungen wirkenden Kräfte das stabile Druckgefälle eine grosse Rolle. Wäre es nicht stabil, so würde sich nach Vollendung der Ausmauerung der Ueberlagerungsdruck gegen dasselbe geltend machen. Im Gegenteil verschwindet der Druck später zum Teil durch das sog. Setzen des Gebirges.

Ein weiterer Vorgang, der eine Beanspruchung der Ausmauerung hervorrufen kann, ist die Auflockerung und Loslösung des Materials im Gewölbescheitel, die im Querschnitt gewöhnlich eine parabolische Form zeigt. Diese Vorstellung bildet den Ausgangspunkt für die statische Berechnung des Tunnelmauerwerks. Im Gebirge kommt es aber gewöhnlich nicht zur plötzlichen Glockenbildung (Kamin), sondern es brocken nach und nach Stücke ab. Man kann aber meistens diese Art des Nachbrechens durch dicht anliegenden Einbau und durch rasch nachfolgende satte Ausmauerung verhindern.

Eine andere Art der Beanspruchung des Tunnelmauerwerks hat seinen Grund im Treiben der Ulmen, namentlich bei *horizontaler Lagerung*[1]). Ueber diese ist jedoch zu bemerken, dass sie nicht in allen Fällen die Standfestigkeit des Gebirges beeinträchtigt. Wo sie ihren Grund darin hat, dass die ursprüngliche Lage der Schichtung wenig oder gar nicht gestört wurde, kann man bei horizontaler Lagerung eine gute Standfestigkeit erwarten. Wo hingegen das Gebirge zum Druckhaftwerden neigt, da wird diese Neigung durch eine horizontale Schichtung begünstigt. Ferner zeigt die Sohle im mergeligen Gestein, viel häufiger als man gewöhnlich annimmt, ein Aufschwellen infolge von Wasseraufnahme, ohne dass es sich um eigentlich blähendes Gebirge handelt.

Schliesslich sei noch auf das Loslösen grosser Blöcke hingewiesen, wodurch das Tunnelmauerwerk eigenartig beansprucht werden kann. Die Blöcke bewegen sich nach durch Risse und Sprünge vorgeschriebenen Bahnen. Sie treten meist im obern Teil des Profils auf und erzeugen oft einen schiefen, seitlichen Schub auf das Gewölbe. Man begegnet diesen Beanspruchungen durch Verstärkung und sattes Ausmauern des Gewölbes.

Neben den geologischen Erhebungen ist eine genaue Beobachtung des Verhaltens des Einbaues von grösster Wichtigkeit, um die Aeusserungen des Gebirgsdruckes zu erkennen und dessen Grösse abzuschätzen.

Dies sind die wesentlichen Gesichtspunkte, die für die Wahl der Tunnelprofile und das Anbringen von Verstärkungen massgebend sind.

Mauerstärken und Profiltypen.

Bekanntlich werden von den Bahnverwaltungen Normalien für Tunnelprofile, mit stufenweise zunehmenden Mauerstärken aufgestellt, die je nach dem Verhalten des Mauerwerks zur Anwendung kommen.

Die innere Begrenzungslinie ist durch das Lichtraumprofil bedingt. Dies führt normalerweise bei einspurigen Tunnels auf ein elliptisches Tunnelprofil, bei zweispurigen Tunnels zu einer Profilform, die sich dem Kreis nähert. Die Abstufungen werden in der Regel nach den Gewölbestärken klassifiziert. Für einspurige Tunnels gelten beispielsweise die Gewölbestärken 0,35, 0,40, 0,50 und 0,70 *m* (Simplontunnel) und für zweispurige 0,40, 0,50, 0,65, 0,80 und 0,90 *m* (Hauenstein-Basistunnel). Gewöhnlich sind die Widerlager etwas stärker ausgebildet als das Gewölbe. Diese Dimensionen haben sich im Laufe der Zeit teils rein empirisch entwickelt, teils beruhen sie auf statischer Berechnung für gewisse angenommene Belastungsverhältnisse. Es liegt nicht im Rahmen dieses Aufsatzes, näher auf solche Berechnungen einzugehen, hingegen sollen hier einige charakteristische Eigentümlichkeiten hervorgehoben werden.

1. Die Ausmauerung älterer Tunnels geschah nach Tunneltypen, bei denen Widerlager und Gewölbe in *gleicher Stärke* durchgeführt wurden. *Darin ist wohl häufig der Grund für später auftretende Schäden zu suchen.*

In richtiger Erkenntnis, dass die Widerlager stärker beansprucht werden als das Gewölbe, und dass *der Verlauf der Drucklinie in den Widerlagern grössern Schwankungen unterworfen ist als im Gewölbe*, werden jene heute stärker ausgebildet als dieses[2]). Der passive Druck der Felswände zwingt die Drucklinie im Mauerwerk zu verlaufen. Je geringer die Sicherheit ist, dass die passiven Kräfte zur Geltung kommen, um so kräftiger müssen die Widerlager ausgestaltet werden. In Erdtunnels, wo passive Kräfte ganz aus der Rechnung fallen, sind sehr starke Widerlager erforderlich, um den aktiven Kräften gegenüber die Stabilität der Tunnelmauerung zu sichern.

Zur Bestätigung dieser Ansicht mögen zwei Zitate aus der Literatur über Tunnelbau folgen: „Die am häufigsten vorkommenden Beschädigungen oder mehr Verdrückungen der Mauerung besteht im Zusammengehen der Widerlager, indem diese in den Tunnel hineinverschoben werden.“ (Handbuch der Ingenieurwissenschaften 1912, Band I, Abt. 5, S. 320.) — „Es ist aber für die Ausgestaltung des Tunnelquerschnittes von wesentlichem Belang festzustellen, dass durch die *Verstärkung der Widerlager* die Stabilität des Tunnelmauerwerks mehr gefördert wird, als durch eine Vergrösserung der Dimensionen eines mit derselben Stärke ausgeführten Tunnelgewölbes.“ (A. Bierbaumer. Die Dimensionierung des Tunnelmauerwerks, Seite 70.)

2. Das Sohlengewölbe hat meistens den Zweck, die Stabilität des Tunnelmauerwerks zu erhöhen. Wo sich der Gebirgsdruck an der Sohle geltend macht, sollte ein stark gewölbtes Sohlengewölbe von der gleichen Stärke wie das Firstgewölbe erstellt werden. Sein Horizontalschub muss vom Gebirge aufgenommen werden, wenn die Widerlager nicht ausserordentlich schwer ausgebildet werden, darum müssen diese satt an das Gebirge angemauert werden. Trockene Auspackung und sog. Polster können den Bestand des Widerlagermauerwerks direkt gefährden, weil sie die Wirkung des passiven Gebirgsdrucks herabsetzen, wenn nicht geradezu ausschliessen. In den meisten Fällen ist die Stabilität der Tunnelmauerung durch kräftige Widerlager mit vertieften Fundamenten hinlänglich gesichert. Diese Massnahme macht ein Sohlengewölbe im neuen Hauensteintunnel fast durchweg entbehrlich.

3. Eine starke Ueberhöhung der elliptischen Tunnelprofile ist nicht zu empfehlen. Dadurch werden nur die Widerlager sozusagen nach oben verlängert. In den Ulmen nimmt infolgedessen der aktive Seitendruck zu, das Gewölbe sucht nach oben auszuweichen, wenn der First schwach belastet ist oder wenn er nicht durch passiven Gegendruck gehalten wird. Man begegnet dann diesem Uebelstand durch Verstärkung des Gewölbes.

Einem intensiven Scheiteldruck entspräche am besten das parabolische Profil. In der Tat kam diese Form, wahrscheinlich unter dem Einfluss dieser Vorstellung, im La Sagne-Tunnel zur Ausführung. Es zeigte sich indessen, dass jene Mauerung schadhaft wurde, und zwar gingen die Widerlager oben zusammen unter Hebung des Gewölbescheitels. Gibt es ein lehrreicheres Beispiel, um die Vorstellung von einem grossen Vertikaldruck in Gebirgtunnels, die lange Zeit den Tunnelbau beherrschte, zu widerlegen?

4. Nicht bloss die Mauerstärke, sondern namentlich die *Form des Profils* sollte sich nach den geologischen

[1]) Vergl. den früher zitierten Aufsatz von Karl Brandau und besonders die Abbildungen auf Seite 69 der Schweiz. Bauzeitung von 1909, Band LIII.

[2]) Vergleiche «Die Dimensionierung des Tunnelmauerwerks» von A. Bierbaumer, Seite 70.

Verhältnissen richten. Aus diesem Grunde entbehrt es der Logik, wenn man einen, für eine bestimmte Bahnverwaltung geltenden Normaltyp festsetzt. Denken wir uns eine Bahnlinie, die im Hochgebirge beginnend bis hinunter an die Dünen der Meeresküste führt und Tunnels im Hochgebirge, im Vorgebirge, Hügelland, durch Moränen und Dünen aufweist, so müssen in dieser Linie verschiedene charakteristische, den Verhältnissen angepasste Tunnelprofile zur Anwendung kommen und nicht etwa ein einziger Normaltyp mit den gebräuchlichen Abstufungen der Mauerstärken. Wie das gemeint ist, werde an einer Reihe von Normalprofilen, anlehnend an bewährte Ausführungen gezeigt.

a) *Die kapillare Schwellung* infolge von Wasseraufnahme auf physikalischem Wege. Sie wird hauptsächlich in mergeligem Stein beobachtet.

b) *Die chemische Schwellung* (*Hydratation*) besteht darin, dass gewisse Gesteinsarten (Anhydrite) das Wasser chemisch binden und dabei eine Vergrösserung ihres Volumens erfahren, wie z. B. gebrannter Kalk beim Löschen. Sehr bekannt und gefürchtet ist in dieser Beziehung der Anhydrit, der im Jura in der Keuper- und mittleren Muschelkalkformation, beide dem Trias angehörend, vorkommt. Anhydrit ist wasserfreier, schwefelsaurer Kalk nach der chemischen Formel $CaSO_4$. Er hat ein mittleres

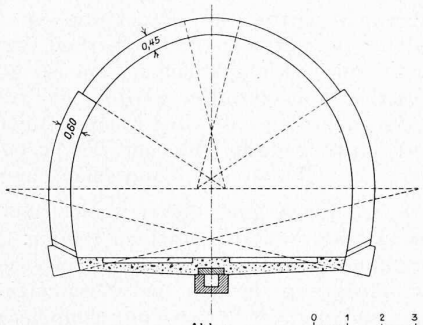


Abb. 6
Felsprofil der Gotthardbahn

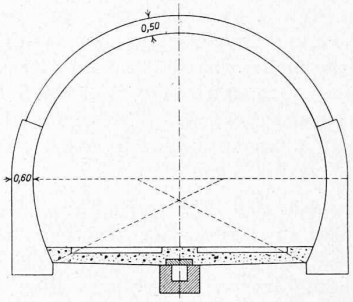
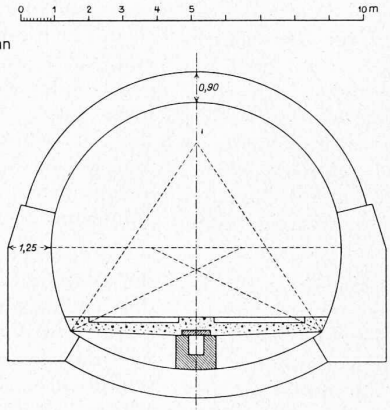


Abb. 7
Profil im gebrächen Gebirge
(Hauenstein-Basistunnel)



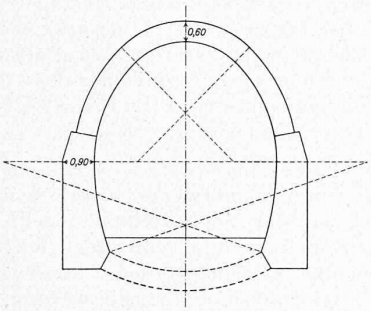


Abb. 8
Profil im Hügelland
(nach A. Bierbaumer)

Abb. 9
Profil im rolligen, druckhaften Gebirge
(Hauenstein-Basistunnel)

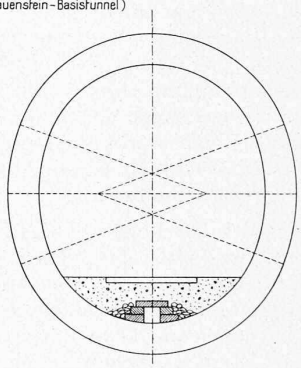


Abb. 10
Profil im Lehm & Schwimmsand
(Czernitzer Tunnel)

Das Charakteristische, worauf es in erster Linie ankommt, kann an dem einspurigen Profil ebensogut angedeutet werden, wie am zweispurigen.

Eine Ausmauerung, gleichviel ob einspuriges oder zweispuriges Tunnelprofil, mit Widerlagern von der gleichen Stärke wie das Gewölbe, eignet sich nur für das reine Verkleidungsprofil in absolut standfestem Felsen. Wenn im gleichen Tunnel das Gebirge stark wechselt, so ist die Mauerung je nach den Verhältnissen in den Widerlagern und Fundamenten zu verstärken. Nur in ganz schwierigen Fällen wird man sich zur Anwendung eines Profils mit anders geformter innerer Begrenzungslinie entschliessen. Oben genannte Serie von Normalprofilen ist mit entsprechenden Erläuterungen in den Abbildungen 6 bis 10 dargestellt.

Blähendes Gebirge.

Früher dachte man ganz einfach „Fels ist Fels"; aber seitdem man im Tunnelbau die Sohle und auch andere Profilteile periodisch einmisst und nivelliert, konstatiert man selbst im anscheinend festen Gebirge häufiger als man gemeinhin annimmt, ein Auftreiben der Sohle und sonstige Veränderungen. Es ist dabei wohl zu unterscheiden zwischen Aeusserungen des Gebirgsdruckes rund um das Profil herum, die sich auch in der Sohle geltend machen, und einer Schwellung, d. h. Volumenvergrösserung des Gesteins. Im letztern Falle spricht man von *blähendem Gebirge*. Meistens ist es die Folge von Wasseraufnahme in dieser oder jener Form. Wir kennen vier Hauptursachen der Volumenvergrösserung, nämlich:

spezifisches Gewicht von 3,2. Durch Wasseraufnahme verwandelt er sich in Gips: $CaSO_4 + 2H_2O$. Reiner, wasserfreier schwefelsaurer Kalk nimmt bei dieser Verwandlung 20,9 % seines Gewichtes an Kristallwasser auf. Gips hat das spezifische Gewicht von 2,2 bis 2,4 und da das Gestein bei dieser Umwandlung spezifisch leichter geworden ist, musste eine Volumenvergrösserung stattfinden. Sie beträgt bei vollständiger Umwandlung von reinem Anhydrit in Gips 60 %. Die Druckkräfte, die dabei frei werden, wenn das Material an der Ausdehnung gehindert wird, sind unüberwindlich. Man kann ihnen nur durch Wasserabschluss begegnen. Das erfordert im Tunnelbau eine über das gewöhnliche Mass hinausgehende Sorgfalt. Die Blähungen im Anhydrit treten nicht überall gleich stark auf. In dieser Beziehung verhält er sich ähnlich wie gebrannter Gips, darum soll näher auf das Verhalten dieses allgemein bekannten Körpers eingetreten werden.

Durch Brennen verliert der Gips sein Kristallwasser, er wandelt sich in Anhydrit. Wird er auf 200° C erwärmt, so scheidet er sämtliches Kristallwasser aus. Wenn die Erhitzung bis auf 500° C gesteigert wird, so wird der Gips totgebrannt, d. h. er nimmt nachher kein Wasser mehr auf. Erst nach sehr langer Einwirkung desselben beginnt eine zuerst langsam verlaufende Umwandlung in Gips.

Das gleiche Verhalten zeigt reiner Anhydrit. *Je reiner und je dichter der Anhydrit im Gebirge auftritt, um so geringer ist die Gefahr, dass er infolge von Durchnässung blähend wird.* Hygroskopisch ist er in der Regel nicht,

wenigstens konnte ich im Hauenstein nichts derartiges wahrnehmen.

Sog. „Stuckgips“ [1]) wird beim Brennen unter 170 °C gehalten und behält daher ungefähr ein Viertel seines Kristallwassers. In diesem Zustand bindet er das ihm zugeführte Wasser schnell. Ebenso *schwillt Anhydrit durch chemische Wasseraufnahme verhältnismässig rasch, wenn die Hydratation schon eingeleitet (fortgeschritten) ist.* Wenn vollends Anhydrit fein zerteilt im Mergel vorkommt und so dem Wasser eine grosse Oberfläche bietet, so tritt in kurzer Zeit eine starke Schwellung auf, die noch durch die kapillare Schwellung des Mergels vergrössert wird. In derartigem Gestein hob sich im Hauensteintunnel bei 1850 *m* ab S. P. die Sohle des Stollens innerhalb einer Frist von einigen Wochen um rund einen Meter.

c) Eine andere Art der Schwellung ist die *hygroskopische*, wenn das Gestein die Eigenschaft besitzt, Wasser aus der Luft anzuziehen und dabei blähend zu werden, wie z. B. gewisse salzhaltige Mergel.

Ueber die Stabilität von Tunnelmauerwerk.

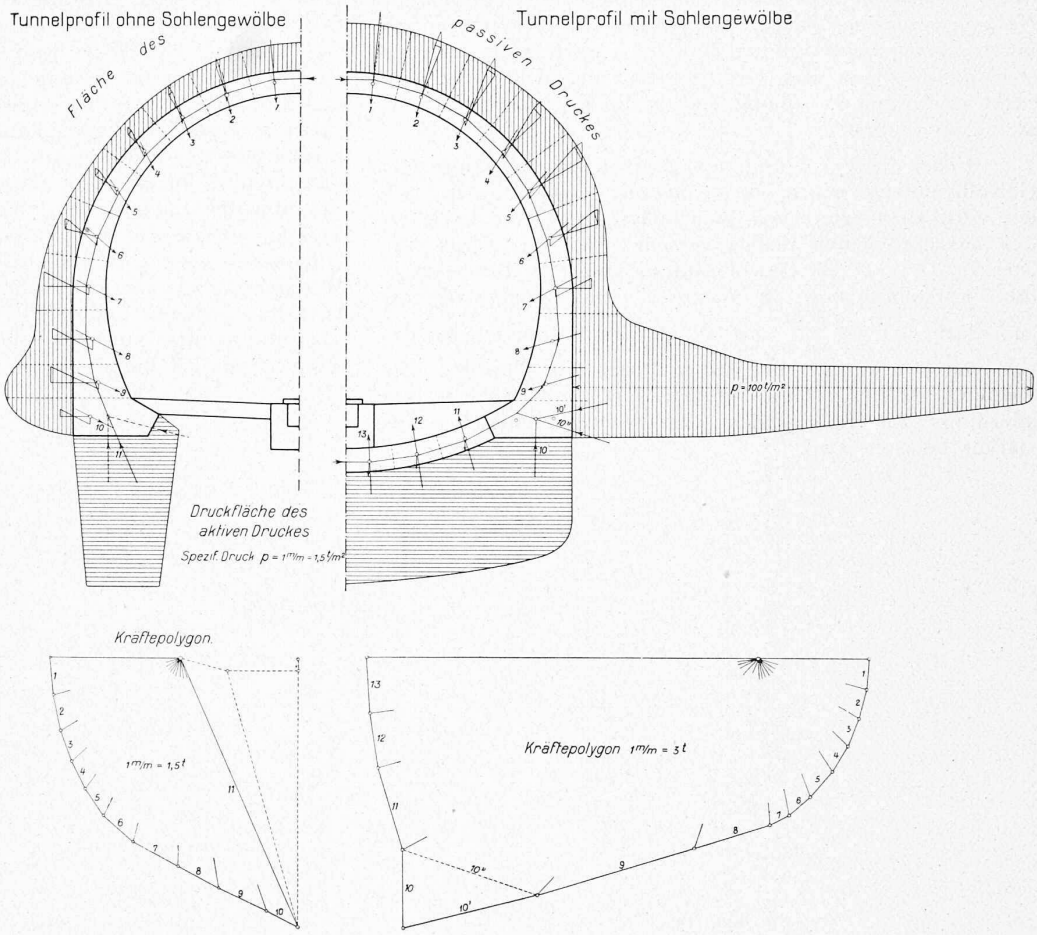


Abb. 11 und 12. — Masstab 1 : 150.

d) Endlich das Blähendwerden des Gesteins *beim blossen Kontakt mit der Luft.* Wahrscheinlich beruht diese Erscheinung auf der oxydierenden Wirkung des Sauerstoffs, wäre also auch eine Art chemischer Schwellung. An Mergel mit fein zerteiltem Schwefelkies oder auch Kohle wurde dieses Verhalten schon beobachtet.

Massnahmen in den Anhydritpartien des Hauensteintunnels.

Man wusste zum Voraus nichts genaues über die Grösse der zu erwartenden Druckkräfte, von denen man annehmen musste, dass sie infolge der Trockenlegung der betreffenden Strecken z. T. verschwinden werden. Die Bauleitung wählte deshalb keine allzugrossen Gewölbestärken, sondern verlegte das Hauptaugenmerk auf eine stabile Profilform mit stark vertieftem Fundament; die Tunneldohle wurde armiert. In der ersten der blähenden Strecken (es sind deren drei von einer Gesamtlänge von 800 *m*) wurde die Armierung mit Rundeisen, in den andern mit Schieneneinlagen durchgeführt. Verhältnismässig kurze Strecken wurden mit Sohlengewölbe versehen. Das Mauerwerk ist an sich stabil, somit fällt dem Sohlengewölbe hauptsächlich die Rolle zu, die Tunneldohle festzuhalten; denn wo sie einen starken Auftrieb erfährt, wird sie undicht. Das durchsickernde Wasser verursacht dann ein weiteres Umsichgreifen der Blähung. Auf einer Strecke von 50 *m*, da wo die Sohle des Vortriebstollens sich um 1 *m* gehoben hatte, sind die Schwierigkeiten noch nicht überwunden. Die Tunneldohle hebt sich stetig und in den Widerlagern wurden eine Anzahl Steine zerdrückt, während das Gewölbe keine Schäden aufweist. Im Nachstehenden wird versucht, durch eine statische Untersuchung ein Bild von der Wirkung der Kräfte im betreffenden Tunnelmauerwerk zu entwerfen.

Die Schwellung des Untergrundes übt einen aufwärts gerichteten aktiven Druck auf die Fundamentsohle der Widerlager bezw. das Sohlengewölbe aus. Der Horizontalschub des Sohlengewölbes wird vom Gebirge als Reaktion (passiver Druck) aufgenommen. Abgesehen davon kann man sagen, dass das Tunnelmauerwerk wie eine steife Röhre gegen das Gebirge gepresst wird. Dem Auftrieb wirkt in erster Linie das Gewicht des Mauerwerks und die Reibung an den Felswänden entgegen, in zweiter Linie muss der Ueberschuss als Reaktion vom Gebirge aufgenommen werden. Eigentlich müsste der Fall nach der Elastizitätstheorie untersucht werden. Eine mehr elementare Behandlung genügt indes zur Klarlegung der Druckverhältnisse. Rund um das Profil herum entsteht ein passiver Erddruck. Diesem entspricht die im Mauerwerk verlaufende Drucklinie. Da sich das Gebirge als standfest erwies, kann von der Annahme eines aktiven Druckes von oben abgesehen werden.

Abbildung 11 zeigt den Kräfteplan für das im Gipskeuper zur Anwendung gekommene Spezialprofil *ohne* Sohlengewölbe, für die Annahme, dass an der Fundamentsohle ein nach oben gerichteter aktiver Druck von etwa 32 Tonnen auf 1 m^2 herrsche. In Abbildung 12, dem gleichen Tunnelprofil *mit* Sohlengewölbe, ist ein aktiver spezifischer Druck von 24 t/m^2 angenommen. In beiden Fällen äussert sich ein ziemlich grosser passiver Druck, der am Profil mit Sohlengewölbe in den untern Partien der Widerlager eine beträchtliche Grösse erreicht. Alles übrige ergibt sich aus dem Kräfteplan selbst. Der passive

[1]) Vergl. Dr. A. Moye «Die Gewinnung und Verwendung des Gipses». Hannover 1908.

Druck, der die Drucklinie veranlasst, im Mauerwerk zu verlaufen, kann sich aber *nur dann* in der angedeuteten Weise einstellen, *wenn die Tunnelmauerung satt an das Gebirge angemauert wird.* Wenn z. B. die Widerlager nur mit trockener Hinterfüllung aufgeführt werden, so bauchen sich diese gegen das Gebirge hin aus. Die Drucklinie rückt an die innere Leibung, sodass die Kanten der Mauersteine abbrennen.

Ueber die Verteilung des passiven Druckes längs dem Gewölbeumfang wurde die Annahme gemacht, dass sich der vertikale Gegendruck gleichmässig über die Breite B des ausgebrochenen Profils verteile (Abb. 13). Auf eine Strecke $a\,b = F$ des Gewölberinges von 1 m Breite wirkt die Vertikallast $p \cdot f = p \cdot F \cdot \cos \alpha$ Der Druck senkrecht zur Fläche $a\,b$ ist $\frac{p \cdot f}{\cos \alpha} = p \cdot F$, d. h. die Druckfläche des passiven Druckes verläuft konzentrisch zum Gewölbe. Die Reibung zwischen Gewölbemauerwerk und Gebirge hat allerdings zur Folge, dass der Gewölbescheitel etwas stärker belastet wird.

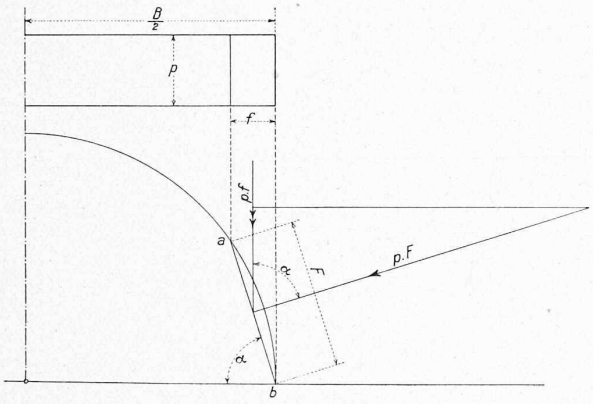


Abb. 13.

Durch den Einfluss der Reibung R wird der Druck auf die äussere Reibung in vertikalem Sinne abgelenkt und zwar am stärksten in einer Wandfläche, die der aufwärts gerichteten Bewegung parallel läuft. Die Ablenkung ist aber gleich Null für die horizontale Lage, also auch gleich Null im Gewölbescheitel (Abb. 14). Im allgemeinen ist die Reibung $R = \mu \cdot P \cdot \sin \alpha$; der Reibungskoeffizient μ wurde mit 0,30 bewertet. Zur Vereinfachung der Konstruktion der Drucklinie wird jeweils die Mittelkraft P' aus P, R und G (Gewicht des Mauerwerks) gebildet.

Schlussbemerkungen.

Zusammenfassend seien die drei Hauptpunkte betreffend Tunnelmauerwerk, die dessen Stabilität verbürgen, nochmals aufgezählt.

1. Die Widerlager sind stärker zu halten als das Gewölbe (auch beim einspurigen Profil, wie z. B. bei den Oesterreichischen Staatsbahnen).

2. Der Widerlagerfuss ist kräftig auszubilden und grundsätzlich in das Planum einzulassen.

3. Sattes Ausmauern namentlich auch der Widerlager an das Gebirge ist unerlässlich.

Die grosse Unsicherheit inbezug auf die Beurteilung des Gebirgsdruckes nach Grösse und Richtung zugegeben, ist doch die Nützlichkeit statischer Untersuchungen der Tunnelmauerung nicht zu verkennen. Sie zeigt, ob das Tunnelmauerwerk inbezug auf Stabilität überhaupt tragfähig ist oder nicht und wie weit die Beanspruchung in dieser oder jener Hinsicht gehen kann; sie verlangt vor allem exaktes Denken, das allein imstande ist, Wahrnehmungen am Bauwerk richtig zu deuten und damit in diese Angelegenheit Klarheit zu bringen.

Wettbewerb für eine reformierte Kirche in Zürich-Fluntern.[1])

Mit dem Urteil des Preisgerichts veröffentlichen wir heute die beiden im I. Rang auf gleicher Stufe prämiierten Entwürfe Nr. 40 von Pestalozzi & Schucan und Nr. 78 von Curjel & Moser; die beiden Entwürfe im II. Rang werden in nächster Nummer folgen. Mit Bezug auf die von verschiedenen Konkurrenten als programmwidrig bezeichnete Situation des Entwurfs Nr. 78 (Seite 35), der den untern Zugang, anstatt wie im Unterlagsplan vorgesehen von der Voltastrasse (wie z. B. Entwurf Nr. 40, Seite 34), von der Gloriastrasse aus vorsieht, haben wir an zuständiger Stelle Aufschluss erbeten und erhalten. Darnach war Art. 1 des „Bauprogrammes" nur hinsichtlich der Stellung der Gebäude, deren „Standort innerhalb des Bauplatzes" bindend, nicht

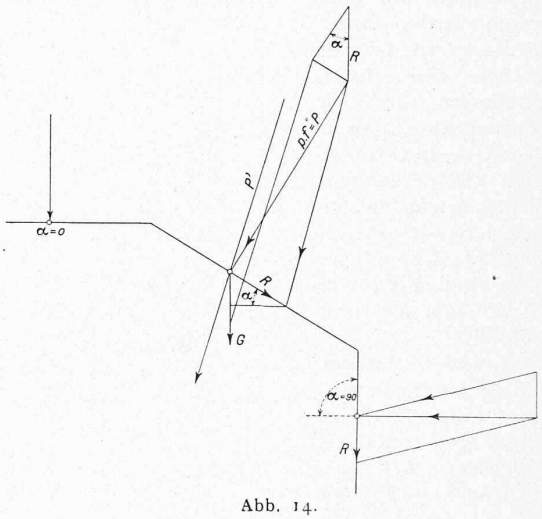
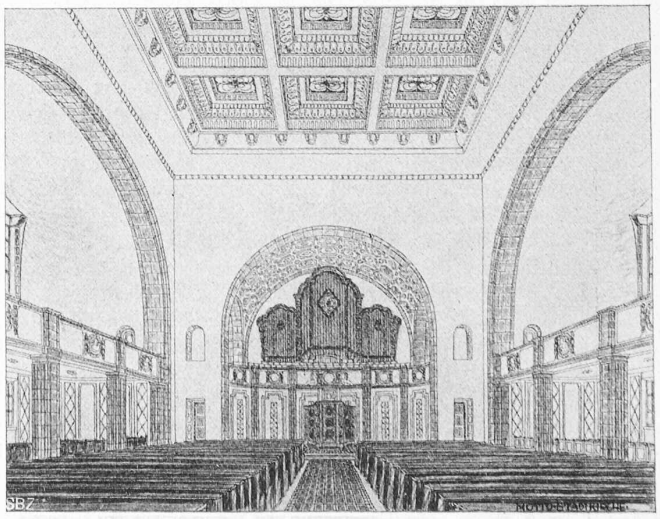


Abb. 14.

aber in bezug auf die Zugänge und weitern Umgebungsarbeiten. Es hätte dies vielleicht im Programm etwas deutlicher gesagt sein dürfen, da jener Weg nach der Voltastrasse im Unterlagsplan doch deutlich abgegrenzt war. Bei der Vergleichung der beiden Lagepläne auf den Seiten 34 und 35 ist zu beachten, dass sie nicht gleich orientiert sind, da im Entwurf Nr. 40 die Hauptaxe senkrecht zu Kantstrasse und Hochstrasse, in Nr. 78 dagegen parallel zur Voltastrasse verläuft. Im Plan zu Nr. 78 ist die Möglichkeit, den Weg von der Voltastrasse nach der Westecke des Bauplatzes hinauf zu führen, ebenfalls angedeutet.

[1]) Vergl. Bd. LXII, S. 311; Bd. LXIII, S. 102, 280, 314; Bd. LXIV, S. 12.



Entwurf Nr. 40. „Stadtkirche". — Kanzelwand und Orgelnische.