

Die Berninabahn

Autor(en): **Bosshard, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **59/60 (1912)**

Heft 13

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-29962>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

INHALT: Die Berninabahn. — Der Durchschlagsvorgang bei den Eisenbahnsammelbremsen mit Uebertragung durch Luft. — Neuere Zürcher Giebel-Häuser. — Berner Alpenbahn. — Miscellanea: Die Gasturbine von Holzwarth. Eidgenössische Technische Hochschule. Die Entwicklung der Fernheizanlagen. Zum Walchenseeprojekt. Solothurn-Schönbühl-Bahn. Ein Torfmoor-Elektrizitätswerk. Welttelegraphen-Denkmal. Rückkauf des Bahnhofs Cornavin in Genf. Regelung der Wasserstände des Bodensees.

Post- und Telegraphen-Gebäude Ennenda, Rheinschiffahrt Basel-Bodensee. Schweiz. Wasserrechtsgesetzgebung. Kurs über elektrische Traktion. Neue Linie St. Gallen-St. Fiden. Abwässerkläranlage in St. Gallen. — Konkurrenzen: Bebauungsplan für das „Waidareal“. — Literatur. — Vereinsnachrichten: Schweiz. Ing.- und Arch.-Verein. Zürcher Ing.- und Arch.-Verein. Techn. Verein Winterthur. G. e. P.: Stellenvermittlung. Tafeln 44 bis 47: Drei Bauten der Architekten Meier & Arter in Zürich.

Band 59.

Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und unter genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 13.

Die Berninabahn.

Von E. Bosshard, Ingenieur

der A.-G. Alb. Buss & Cie., Bauunternehmung in Basel.

(Fortsetzung.)

IV. Bauausführung.

Für jeden Bahnbau von ansehnlicher Länge wird sich die Bauausführung und Inbetriebsetzung in einzelnen Teilstrecken vom Ausgangspunkte aus empfehlen, um die Baukosten, bezw. Materialtransportkosten ermässigen und gleichzeitig früher in die Periode der Betriebseinnahmen kommen zu können. Mehr als für irgend einen andern Bahnbau erschienen streckenweiser Ausbau und Inbetriebsetzung bei der Berninabahn angebracht, die eine stark ansteigende Baustrecke mit sehr teuren Achstransporten aufwies. Ja, auf dem mittleren Teil des Tracé, auf der Strecke Hospiz-Poschiavo, von Km. 20 bis Km. 43, war nicht einmal die Möglichkeit des Achstransportes gegeben. Nur schlechte, holperige Saumpfade ermöglichten es, an einzelnen Punkten mit Maultieren an das Tracé heranzukommen. Der teure Maultiertransport konnte nur für die allernotwendigsten Bedürfnisse des Baues in Frage kommen und es musste mit jenen Hauptarbeiten, welche fremde Materialien benötigten, gewartet werden bis zum sukzessiven Vorrücken der Geleiselegung.

Da die Berninabahn sich an ihren beiden Endpunkten an bestehende Bahnnetze anschliesst, so konnte ihr Bau mit Vorteil etappenweise von beiden Enden aus erfolgen. Es ergaben sich daher für Nord- und Südseite gleichsam zwei parallele Bauperioden; diejenige der Südseite war jedoch wegen der grösseren Tracé-Länge und der bedeutendern Arbeiten um ein volles Jahr länger.

Aus nachstehender Tabelle sind die Eröffnungsdaten der einzelnen Teilstrecken ersichtlich:

Eröffnungsdaten und Längen der Teilstrecken:

nach Programm	Effektiv	Nordseite		Südseite	
		Strecke	km	Strecke	km
1. Juli 1908	1. Juli 1908	Pontresina-Morteratsch	6,351	Tirano-Poschiavo	17,038
1. Juli 1908	18. Aug. 1908	Pontresina-Celerina	3,760	—	—
1. Juli 1909	18. Aug. 1908	Morteratsch-Berninahäuser	3,565	—	—
1. Juli 1908	1. Juli 1909	St. Moritz-Celerina	2,028	—	—
1. Juli 1909	1. Juli 1909	Berninahäuser-Hospiz	6,628	—	—
1. Juli 1909	5. Juli 1910	—	—	Hospiz-Alp Grüm	4,770
1. Juli 1910	5. Juli 1910	—	—	Alp Grüm-Poschiavo	16,541
			22,332		38,349

Die Betriebseröffnung einzelner Teilstrecken, wie St. Moritz-Celerina und Hospiz-Alp Grüm, erlitt eine Verzögerung durch nachträgliche Einschaltung von Varianten, während die Strecke Morteratsch-Berninahäuser früher zur Eröffnung kommen konnte, als im Bauprogramm vorgesehen war. Der Endtermin für die ganze Linie, 1. Juli 1910, konnte bis auf wenige Tage eingehalten werden, was mit Rücksicht auf die abnormal schlechte Witterung in den drei letzten Bausaisons 1908 bis 1910 als schöne Leistung hervorgehoben werden darf.

Wegen der besonders in der ersten Bauperiode räumlich durch die Passhöhe weit getrennten Baustrecken der Süd- und Nordseite sah sich die Bauunternehmung veranlasst, zwei selbständige Baubureaux, in Celerina für die Nordseite und in Poschiavo für die Südseite, zu er-

richten. Bauleiter der Unternehmung für die Nordseite war Oberingenieur W. Siegrist, für die Südseite der Verfasser. Ein grösserer Stab von Ingenieuren und Technikern war über die ausgedehnten Baustrecken verteilt. Untergeordnete Baubureaux befanden sich in Pontresina für die Nordseite und in Brusio und Cavaglia für die Südseite.

Mit der *Generalbauleitung* und der Ueberwachung der Bauarbeiten war von Seiten der Bahngesellschaft Herr D. Nachenius, Direktor der Berninabahn betraut worden, welcher sukzessive durch die Ingenieure Paoni (während des Baues gestorben), Etienne, Kalbermatten und Correvon, dem jetzigen Betriebsdirektor der Berninabahn, assistiert war.

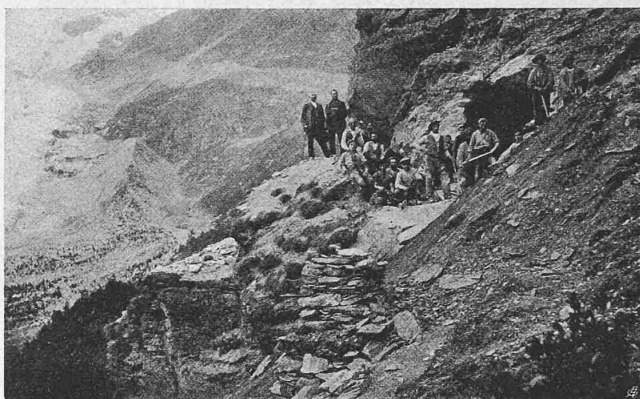


Abb. 43. Untere Stollenmündung des Palü-Tunnels (Km 28,125).

Die *Expropriation* wurde von den verschiedenen Gemeinden selbst durchgeführt. Auf der Nordseite konnte diese ohne jede Mitwirkung der Eidgen. Schätzungskommission erfolgen, während letztere auf der Südseite verschiedene Male ihres Amtes walten musste. In der Gemeinde Brusio musste der zu hohen Ansprüche der Grundbesitzer wegen das für die Bahn benötigte Terrain durchgehends durch die Eidgen. Schätzungskommission expropriert werden.

Im Frühjahr und Sommer 1906 wurde die Expropriation auf den Strecken mit bereinigtem Tracé durchgeführt und es konnten die Bauarbeiten auf Nord- und Südseite am gleichen Tage, d. h. am 16. Juli 1906, in Angriff genommen werden; auf der Nordseite auf der Strecke Pontresina-Morteratsch, auf der Südseite längs des Puschlaversees. Auf den beiden Anfangsbaustrecken der Nord- und Südseite erlitt der Baubeginn der erst spät bereinigten Tracés wegen starke Verzögerungen, was etwelche Verwirrung in das Bauprogramm brachte. Die verlorene Bauzeit konnte später nur durch forcierten Baubetrieb und unter Aufwendung wesentlicher Mehrkosten wieder eingeholt werden.

Ueber die Ausführung der *wichtigern Objekte* mag Folgendes angeführt werden:

Bei den *Tunneln* wurde fast durchgehends das belgische Tunnelbausystem durchgeführt.

Der 689 m lange *Charnadüra-Tunnel* der Nordseite wurde im November 1907 begonnen und im Januar 1909 vollendet. Mit Ausnahme von je 8 m Druckpartie in den Ueberlagerungen bei den beiden Portalen verläuft der Tunnel in verwittertem Gneis und Gneisgranit; die reinen Gneisstrecken machten überall Einbau notwendig. Wegen des einseitigen Gefälles des Tunnels von 30 ‰ konnten von oben nur etwa 150 m gebohrt werden; für die

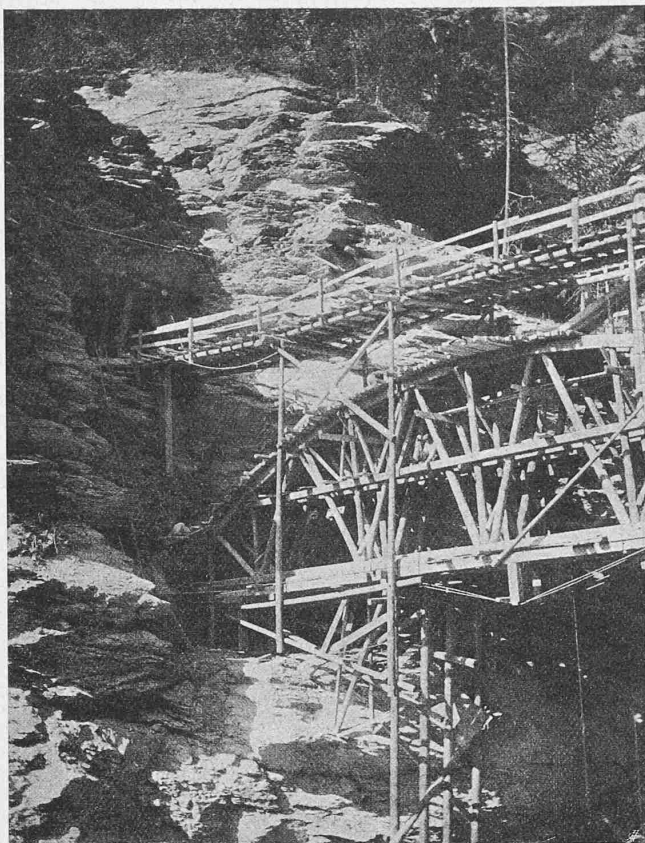


Abb. 46. Untere Cavagliasco-Brücke, Beginn der Mauerung.

Lüftung der von unten gebohrten Tunnelröhre von 540 *m* Länge diente ein durch einen zehnpferdigen Benzinmotor angetriebener Ventilator. Die Bohrung erfolgte durchgehend von Hand; als Sprengstoff kam der leichteren Lüftung wegen fast ausschliesslich 80% iger Dynamit zur Verwendung, im Vortrieb Sprenggelatine. Der mittlere Tagesfortschritt betrug bei Tag- und Nachtbetrieb pro Vortrieb rund 1,00 *m*. Eine starke Verzögerung der Arbeiten im Charnadüra-Tunnel verursachte eine Einsprache der Gemeindebehörden von St. Moritz und Celerina, auf Grund welcher die Arbeit im Tunnel bezw. das Sprengen während der Sommer- und Wintersaison zur Nachtzeit eingestellt werden musste.

Die Gesteungskosten für Ausbruch im Vortrieb stellten sich im Mittel auf 28 Fr. pro *m*³ und für den Vollausbuch auf 19 Fr. Die Mauerung mit Schichtensteinen in Granit im Gewölbe kostete durchschnittlich 32 Fr. Diese Granit-schichtensteine wurden aus den Findlingen bei Montebello hergestellt und mussten rund 12 *km* weit herbeigeführt werden. Da diese Steinzufuhr wegen noch nicht verlegtem Geleise oder im Winter zeitweise wegen Schnee nicht möglich war, musste für etwa 250 lfd. *m* Gewölbe zur Verwendung von Betongewölbesteinen in Portlandzement Zuflucht genommen werden, welche auch während des Winters im frostfreien Tunnelinnern hergestellt werden konnten. Wegen der hohen Materialpreise kam dieses Tunnelgewölbemauerwerk in Betonformsteinen wesentlich höher zu stehen; die Betonformsteine kosteten etwa 31 Fr. pro *m*³ und das Gewölbemauerwerk in denselben rund 42 Fr. Im Charnadüratunnel konnten nur 199 lfd. *m* unausgemauert gelassen werden; 490 lfd. *m* wurden verkleidet. Die Kosten pro lfd. *m* Tunnelröhre ohne allgemeine Unkosten betragen im Durchschnitt 620 Fr. für Tunneltyp III und 760 Fr. für Typ IV.

Auch in den Tunneln der Südseite waren die Gesteinsverhältnisse grösstenteils ungünstig; sehr wenig Steinmaterial der Tunnelröhre konnte direkt für die

Mauerung verwendet werden. In den obern Tunnel war der härteste Augengneis zu durchbohren, der wohl ein sehr gesundes, aber ein sehr schwer zu bearbeitendes und speziell zu Gewölbesteinen nicht verwendbares Steinmaterial ergab. Infolge zahlreicher nässender Stellen und ungünstiger horizontaler Schichtung musste auch in diesen Tunneln in Augengneis wider Erwarten weitgehende Ausmauerung stattfinden. Einbau konnte dagegen fast gänzlich unterbleiben. Die untern Tunnel zwischen Puntalto und Poschiavo führten grösstenteils durch äusserst harte Moräne mit eingelagerten grossen Findlingen; es musste sehr gut eingebaut werden und speziell in den Tunneln dieser Strecke kam das Druckprofil IV zur Verwendung.

Besonders ungünstige Verhältnisse wies der 32 *m* lange obere Cavagliasco-Tunnel auf. Derselbe durchschneidet eine wasserführende Geröllhalde; anscheinend anstehender Fels stellte sich als loses grosses Blockmaterial heraus, das wahrscheinlich von einem frühern grossen Bergsturz herührt. Während der Ausföhrung des Tunnels bildete sich oben an der Halde ein Abriss und die Geröllhalde kam in Bewegung. Die zwei ersten nach Typ IV 0,60 *m* stark erstellten Gewölberinge wurden bis auf 0,25 *m* eingedrückt. Es wurde dann zu stärkern, je nach Materialverhältnissen bis zu 2,20 *m* starkem Mauerwerk, sowohl in den Widerlagern als im Gewölbe übergegangen. Besondere Sorgfalt wurde auf das talseitige Widerlager verwendet, das den ganzen seitlichen Schub auf den Tunnel aufzunehmen hatte. Dessen Fundament wurde, speziell bei den Portalen, verstärkt bis zum genügende Festigkeit aufweisenden Terrain hinuntergeführt. Ferner wurde, um einen dem Gleichgewicht näher kommenden Zustand herbeizuföhren, die Geröllhalde oben durch Entnahme von Material entlastet und der Tunnel talseits durch Aufbringen von Material und Steinpackung belastet. Durch diese Vorsichtsmassregeln konnten der Tunnel und die Halde endlich zur Ruhe gebracht werden. Ein günstiger Umstand war die Lage des Tunnels in einer Kurve von 60 *m* Radius mit talseitigem Zentrum. Erst nach Vollendung des übrigen Tunnelmauerwerks wurden die beiden eingedröckten Gewölberinge rekonstruiert. Das Wasser der Halde wurde möglichst tief gefasst, und durch eine längs des bergseitigen Widerlagerfundamentes verlaufende Sickerdohle in den Cavagliasco abgeleitet.

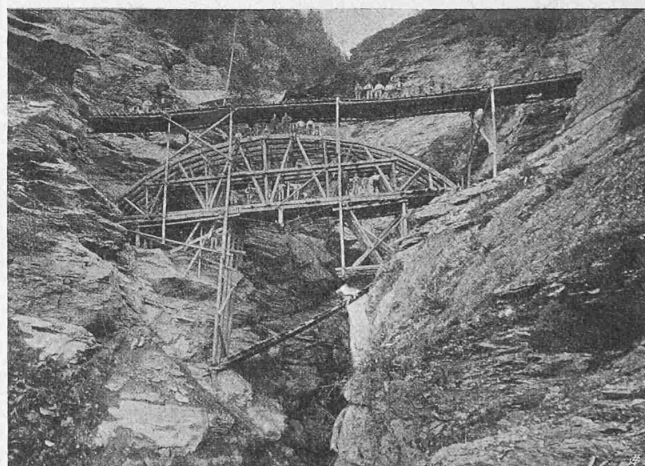


Abb. 45. Untere Cavagliasco-Brücke, Lehrgerüst mit dem in Bahnaxe darüber geföhrten Dienststeg.

Nachträgliche Aenderungen wurden auch beim 20 *m* langen untern Cavagliasco-Tunnel, sowie beim 254 *m* langen Palü-Tunnel vorgenommen. Kurze, längs des projektierten Tracé vorgetriebene Strecken schlossen ungünstige Gesteinsschichtung auf bei wenig Vorland, sodass die bergseitige Verschiebung beider Tunnelaxen für ratsam gefunden wurde (Palü-Tunnel vergl. Abb. 43).

Die Kosten der Tunnel im harten Augengneis stellten sich naturgemäss höher als im viel weichern und dennoch nur leichten Einbau erfordernden Gestein des Charnadür-Tunnels. Zu den Mehrkosten haben beigetragen die höhern Arbeitslöhne, die in den während $\frac{3}{4}$ Teilen des Jahres sehr unwirtschaftlichen Regionen zwischen Cavaglia und

In den Augengneis-Tunneln betrug der Fortschritt im Stollen pro Vortrieb und pro Tag mit zwei Schichten 0,60 bis 1,00 m. Durchschnittliche Kosten (ohne allgemeine Unkosten) pro m^3 Ausbruch im Vortrieb rund 32 Fr., pro m^3 Vollausbau rund 20 Fr., pro m^3 Widerlagermauerwerk 23 Fr. und pro m^3 Gewölbemauerwerk 41 Fr.

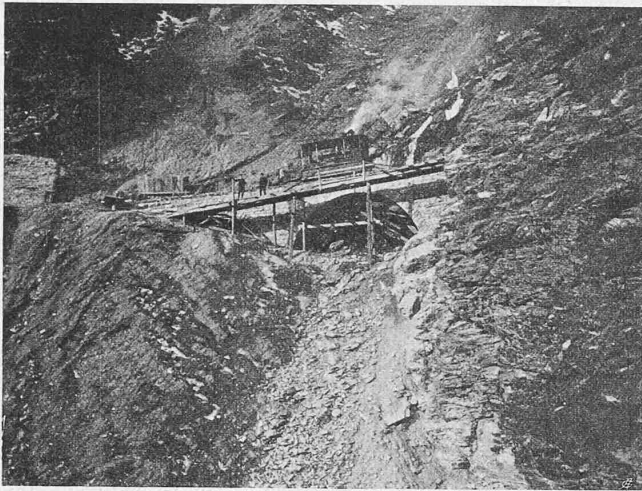


Abb. 47. Lehnenviadukt bei Km. 40,8 (vergl. Abb. 44 links).

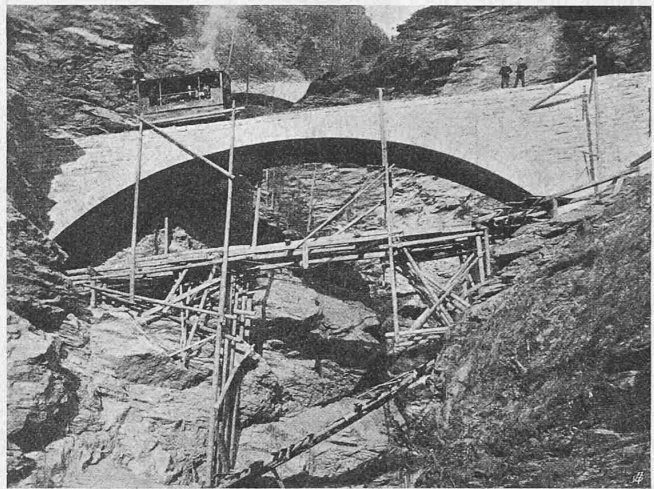


Abb. 48. Untere (dahinter obere) Cavagliasobrücke.

Hospiz bezahlt werden mussten. Leider waren sämtliche Tunnel zu kurz, als dass man auch an den Arbeitsstellen im Tunnelinnern von den äussern Witterungsverhältnissen, namentlich vor den häufigen, jede Ritze durchdringenden Schneestürmen, vollständig unberührt gewesen wäre. Die Arbeiten in jenen hochgelegenen Tunnel wurden denn auch nur in einem Winter, 1908—1909, mit Ausnahme

Diese Tunnel liegen alle im einseitigen Gefälle von 70 ‰, was die Arbeitskosten ebenfalls sehr ungünstig beeinflusste, namentlich die Materialförderung verteuerte und die Lüftung in der grösstenteils von unten betriebenen stark ansteigenden Tunnelröhre erschwerte.

Vor Durchbruch der Tunnel wurde mit Rücksicht auf die erschwerte Lüftung fast ausschliesslich Dynamit,

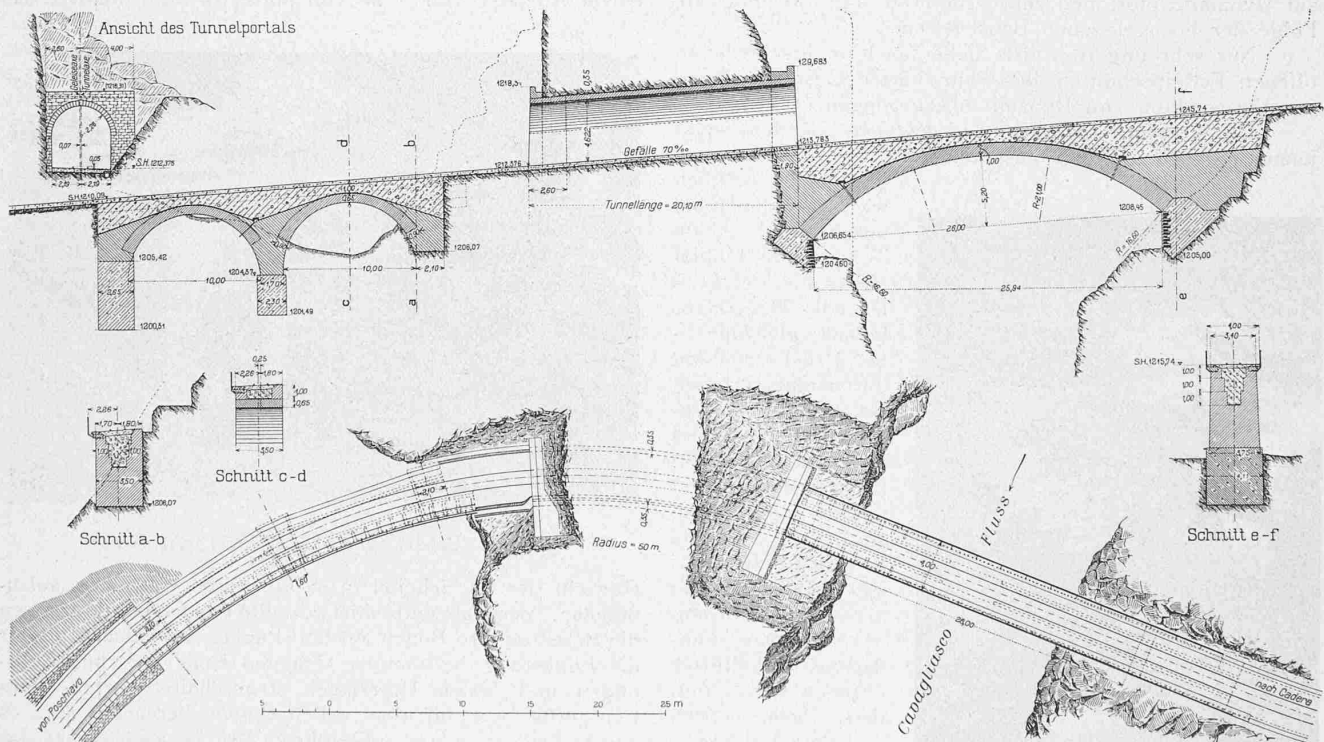


Abb. 44. Lehnenviadukt bei Km. 40,8 mit anschliessendem Tunnel und untere Cavagliasobrücke. — Grundriss und Schnitte. — 1:500.

einer Einstellung von wenigen Tagen am Jahreswechsel, ohne Unterbruch gemäss Programm durchgeführt; in den andern Wintern wurde es für vorteilhafter gefunden, oberhalb Cavaglia, 1700 m ü. M., die Arbeiten von Weihnachten bis etwa Ende Februar gänzlich ruhen zu lassen.

im Vortrieb Sprengelatine als Sprengstoff verwendet. Nach Durchbruch des Stollens wurde für den Ausbruch der Strosse gewöhnlich sofort zu einem Sicherheitssprengstoff, hauptsächlich Cheddit, übergegangen, trotz der dadurch in dem harten Gestein verursachten Steigerung der Arbeits-

kosten. Bei allen Vorsichtsmassregeln hatten einige Unglücksfälle die Gefährlichkeit der Handhabung des Dynamits in den dort vorherrschenden niedrigen Temperaturen nur zu deutlich dargetan. Auf jenen Baustrecken war fast beständig auch am Tage, bis in den Hochsommer hinein, die Gefriertemperatur des Dynamits und daher die stete Gefahr unerwünschter Explosion vorhanden. Es brauchte nicht einmal der Unachtsamkeit eines Arbeiters, um einen Unglücksfall herbeizuführen. Es ist nie vollständig zu vermeiden, dass beim Sprengen unexplodierte Dynamitreste oder Teile durch einen Nachbarschuss vorzeitig weggetragener Dynamitladungen in das Schuttmaterial gelangen können. In jenen niedrigen Temperaturen gefrieren nun solche Dynamitreste sehr schnell und es braucht nur

der etwas heftigen Berührung mit Pickel oder Schaufel, um eine Explosion herbeizuführen, die in der Regel den Augen der betreffenden Arbeiter gefährlich werden.

Alle schwereren Unglücksfälle, die bei der Berninabahn vorgekommen sind, waren mit einer einzigen Ausnahme auf Dynamitexplosionen zurückzuführen und die indirekte Folge der hochgelegenen Baustrecken.

Nur sehr ungern wurde daher auch in verschiedenen offenen Felseinschnitten des sehr harten Gesteins wegen zur Verwendung von Dynamit übergegangen.

Die grösseren *Brücken und Viadukte* wurden wenn immer möglich auf den anstehenden Felsen fundiert; wo dies nicht möglich war, wurde auch bei anscheinend gutem Terrain die Fundamentsohle der Pfeiler oder Widerlager behufs gleichmässiger Druckverteilung durch eine kräftige Betonplatte mit einbetoniertem Schienenrost hergestellt. Irgendwelche Bewegungen oder Risse sind denn auch bei keinem grösseren Objekt der Berninabahn festgestellt worden.

Ungünstige Fundations-Verhältnisse ergaben sich besonders beim obern Cadera-Viadukt,

Km. 35,500, beim untern Cadera-Viadukt, Km. 39,400, und am Lehnenviadukt beim Cavagliasco, Km. 40,800.

Einzelne Pfeiler und Widerlager dieser Objekte mussten an den sehr steilen leicht rutschenden Geröllhalden 10 bis 12 m tief fundiert werden.

Etwelche Schwierigkeiten bot auch die Erstellung der beiden Cavagliasco-Brücken, des an dieser Stelle sehr unzugänglichen wilden felsigen Gebietes der Cavagliascoschlucht wegen. Der aufgeschlossene Felsen erwies sich auf der rechten Schluchtseite als sehr unzuverlässiger Natur und es

musste speziell für die obere Brücke ein grosser Abtrag gemacht werden, um ein gutes Bogenauflager zu finden. Ferner musste die ganze Brücke gegenüber dem Projekt um rund 1,50 m gegen die rechte Schluchtseite verschoben werden. Die beiden Cavagliasco-Brücken befinden sich in einer

Horizontaldistanz von nur 50 m voneinander; der vertikale Höhenunterschied zwischen den beiden Brückenfahrbahnen beträgt 30 m.

Aus konstruktiven Gründen erhielten beide Brücken genau die gleiche Spannweite, d. h. einen

Stichbogen von 26 m Weite und 5,20 m, also $\frac{1}{5}$ der Spannweite, als Pfeilhöhe. Für beide Brücken konnte so das gleiche Lehrgerüst benützt werden. Das feste Auflager desselben bildete eine Art Sprengwerk mit einem Hängewerk in der Mitte mit eisernen Zugstangen. Vier Lehrgerüstbogen in einem Abstand von 1 m von Mitte zu Mitte hatten das



Abb. 50. Eingewölbte obere Cavagliasco-Brücke.

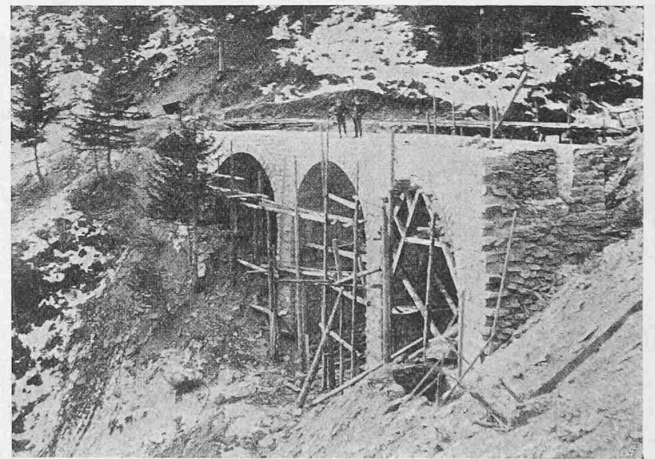


Abb. 51. Unterer Cadera-Viadukt (Km. 39,4) im Bau.

Gewicht des im Scheitel 3,40 m breiten Gewölbes aufzunehmen. Vertikale und schief gestellte Pfosten konzentrierten die Belastung pro Bogen auf fünf Punkte, in welchen die für die Entlastung bestimmten eichenen Keile zwischen Lehrbögen und festem Unterlager eingeschaltet waren. Das Lehrgerüst war für den vollen Bogen berechnet und es wurde bei der zuerst ausgeführten Brücke auch direkt das volle Gewölbemauerwerk, ohne Teilung in konzentrische Ringe, ausgeführt (Abb. 49). Dennoch ergab sich eine nur sehr kleine Einsenkung am Gewölbescheitel von 0,02 m bei der etwa 48 Stunden nach Gewölbeschluss vorgenommenen Lüftung der Lehrbögen. Vor der Verwendung der Lehrbögen für die zweite Brücke wurden die Stossverbindungen derselben sorgfältig nachgesehen und wo es



Abb. 49. Obere Cavagliascobrücke mit seitlichem Dienststeg.

notwendig schien, nachgearbeitet und unterlegt. Vorsichtshalber ist das Gewölbemauerwerk bei der zweiten Brücke in zwei Ringen ausgeführt worden. Wie bei der zweiten Verwendung des gleichen Lehrgerüstes zu erwarten war, ergab sich eine grössere Einsenkung am Gewölbescheitel von total 0,05 m. Der billigeren Materialzufuhr wegen wurden die beiden Cavagliascobrücken erst Ende Juli 1908 in Angriff genommen, nachdem die Teilstrecke Tirano-Poschiavo dem Betriebe übergeben und das Geleise eilig bis in die Nähe der Cavagliasco-Schlucht weiter vorgelegt worden war; bis November gleichen Jahres waren die beiden Brücken vollendet.

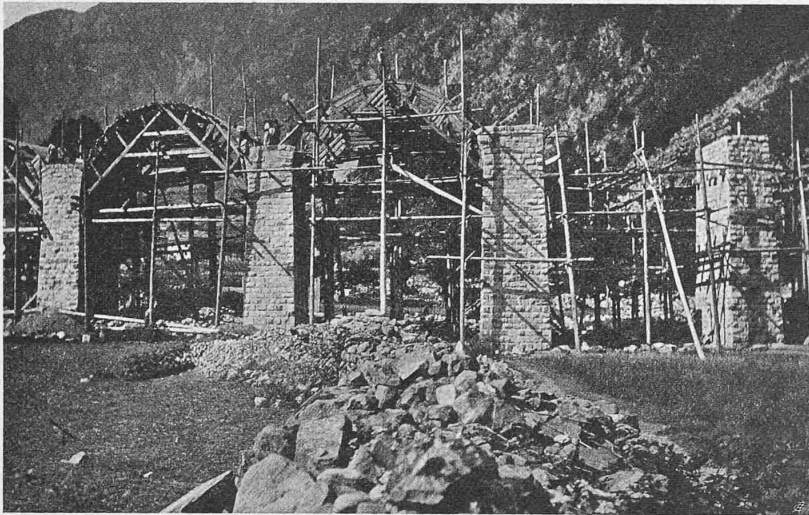


Abb. 52. Aufstellung der Lehrgerüste am Kehr-Viadukt bei Brusio.

Ein günstiger Umstand für die Traversierung der vielen Geröllhalden der Strecke Grüm-Poschiavo war, dass dieselben verhältnismässig wenig Wasser führten. Gefährlichere Rutschpartien traten auf am Palütunnel, wo ein ganzer Felskopf in Bewegung kam, der entlastet und durch eine kräftige Stützmauer oberhalb der untern Traverse unterfangen werden musste, ferner beim untern Portal des obern Veronattunnels, wo der Ruhezustand durch flachere Abböschung wieder hergestellt werden konnte. (Schluss folgt.)

Der Durchschlagsvorgang bei den Eisenbahnsammelbremsen mit Uebertragung durch Luft.

Von Prof. Dr. A. Fliegner, Zürich.

(Fortsetzung.)

Wegen der Annahme konstanter Temperatur wird die Zustandsgleichung der Luft:

$$pv = RT = \text{const.} \quad (17)$$

Dabei hat die Schallgeschwindigkeit den Wert:

$$s = \sqrt{gRT}, \quad (18)$$

und mit dieser isothermischen Schallgeschwindigkeit soll hier allein weiter gearbeitet werden.

Ferner nimmt die Gestalt an:

$$\frac{w}{v} = \frac{wp}{RT} = \text{const.} \quad (19)$$

Da aber T konstant vorausgesetzt ist, so muss das Produkt wp in jedem Augenblick für die ganze strömende Luftmenge je gleich gross sein. Dagegen ändert sich die Konstante im Verlauf des Vorganges stetig. Bezeichnet man nun die augenblicklichen Zustandsgrössen unmittelbar ausserhalb der Unstetigkeitsstelle, wie bisher, mit w_u, p_u , die gleichzeitig am äusseren Ende des Rohres geltenden mit w_e, p_e , so vereinfacht sich die Kontinuitätsgleichung (19) in:

$$wp = w_u p_u = w_e p_e = \text{const.} \quad (20)$$

Wenn man jetzt die Arbeitsgleichung unter (15) mit $w^2/2g$ dividiert, dann nach (18) s einführt und noch (20) berücksichtigt, so kann man sie umformen in:

$$\frac{\lambda}{D} dz = - \frac{2s^2}{w^2_u p^2_u} p dp + 2 \frac{dp}{p} \quad (21)$$

Integriert man diese Gleichung über die ganze strömende Luftmasse zwischen der Unstetigkeitsstelle und dem äusseren Ende des Rohres, also von $z=0$ bis $z=x$, so erhält man für Ueberdruckbremsen:

$$\frac{\lambda}{D} x = \frac{s^2 (p^2_u - p^2_e)}{w^2_u p^2_u} - 2 \lg n \frac{p_u}{p_e} \quad (22a)$$

für Saugbremsen:

$$\frac{\lambda}{D} x = \frac{s^2 (p^2_e - p^2_u)}{w^2_u p^2_u} - 2 \lg n \frac{p_e}{p_u} \quad (22b)$$

Aus der Differentialgleichung (21) folgt noch:

$$\frac{\lambda}{D} \frac{dz}{dp} = - \frac{2s^2 p}{w^2_u p^2_u} + \frac{2}{p} \quad (23)$$

und diese Gleichung zeigt, in Verbindung mit (20), dass für

$$sp = w_u p_u = w_e p_e \quad (24)$$

der Quotient dz/dp verschwindet. Mit von p_u oder p_e aus abnehmendem Druck wachsen hiernach w und z bis zu dem Werte von p , für welchen $w = s$ geworden ist. Dabei erreicht z ein Maximum. Und da nun unmöglich bei noch weiter sinkendem p die Länge z wieder abnehmen könnte, so gelten die Formeln überhaupt nur, bis die Strömungsgeschwindigkeit die isothermische Schallgeschwindigkeit erreicht hat. Eine grössere Geschwindigkeit und ein kleinerer Druck können in einem zylindrischen Rohr bei isothermischer Strömung nicht auftreten. Die in (11) und (12) bei widerstandsloser Bewegung gefundenen Grenzbedingungen für w_u müssen also hier ersetzt werden durch die einzige Bedingung für w :

$$w \leq s \text{ oder } p \geq \frac{w_u p_u}{s} \quad (25)$$

Das ist die Umkehrung eines schon von H. Lorenz gefundenen Ergebnisses, wonach in einem solchen Rohr die Schallgeschwindigkeit nur in den Querschnitten erreicht werden kann, in denen der Quotient $dp/dz = -\infty$ wird.¹⁾

Wenn die Strömung im äusseren Teile der Bremsleitung zur Vereinfachung der Untersuchung als isothermisch verlaufend angenommen wurde, so muss das auch mit den übrigen Teilvorgängen geschehen, sonst ergeben sich an den Enden der bewegten Luftmasse Grenzgebiete, auf denen die Temperatur allmählich aus der konstanten in eine davon endlich verschiedene Temperatur übergeht. Dieser Uebergang lässt sich aber nicht gut näher verfolgen.

Durch die Annahme konstanter Temperatur auch für den unstetigen Beginn der strömenden Bewegung werden

¹⁾ H. Lorenz, „Technische Wärmelehre“, § 12.

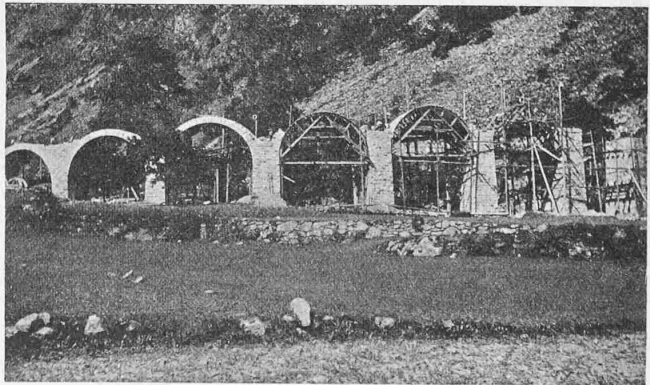


Abb. 53. Kehrviadukt der Berninabahn bei Brusio, im Bau.