Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 38 (1947)

Heft: 22

Artikel: Die 150-kV-Leitung Mörel-Airolo der Rhonewerke A.-G.

Autor: Preiswerk, M. / Hauser, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1061451

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: 04.12.2025

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:
Sekretariat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:
Zürich, Stauffacherquai 36 ◆ Telephon 23 77 44
Postcheckkonto VIII 8481

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

38. Jahrgang | Nr. 22 | Samstag, 1. November 1947

Die 150-kV-Leitung Mörel—Airolo der Rhonewerke A.-G.

Von *M. Preiswerk*, Lausanne, und *W. Hauser*, Olten

621.315.1(494)

Zur Verbindung der Kraftwerke der Aluminium-Industrie-Aktien-Gesellschaft im Wallis mit dem Netz der Aare-Tessin Aktiengesellschaft für Elektrizität ist im Jahr 1946 eine 150-kV-Leitung gebaut worden, die vom Kraftwerk Mörel durchs Oberwallis über den Nufenenpass und durchs Bedrettotal nach Airolo ins Kraftwerk Lucendro führt. Bei dieser Leitung sind entsprechend den Geländeverhältnissen verschiedene Bauweisen angewendet worden. Die Talstrecke im Oberwallis hat Holzmasten, die Hochgebirgsstrecke Winkeleisenkonstruktionen und die Talstrecke im Bedrettotal ausbetonierte Stahlrohrmasten. Die Leiter bestehen auf der Holzmastenstrecke aus Reinaluminiumseilen von 240 mm², in den übrigen Strecken bis auf eine Höhe von 1750 m aus Aldreyseilen 240 mm² und im Hochgebirge aus Stahlaldreyseilen, die 72 mm² Stahl- und 212 mm² Aldrey-Querschnitt haben. Für die Klemmen wurden die von der AIAG entwickelten leichten Konstruktionen und für die Verbindung die Aluthermschweissung verwendet. Die Transportverhältnisse, welche beim Bau dieser höchsten Alpenleitung eine wesentliche Rolle spielten, sind eingehend beschrieben.

Pour la connection des centrales valaisannes de la Société Anonyme pour l'Industrie de l'Aluminium au réseau de l'Aar et Tessin S. A. d'Electricité on a construit en 1946 une ligne à 150 kV, qui conduit de la centrale du Mörel à la centrale du Lucendro, à Airolo, par le Valais supérieur à travers le Col de la Nufenen et la vallée de Bedretto. Pour les supports de cette ligne, différents systèmes constructifs ont été adoptés suivant la configuration du terrain. Le tronçon bas du Valais supérieur est équipé avec des poteaux en bois, le tronçon de haute montagne avec des pylônes en treillis de fer et celui de la vallée de Bedretto avec des treillis porteurs en tubes d'acier remplis de béton. Les conducteurs sont en aluminium pur de 240 mm² sur le tronçon avec poteaux en bois, en Aldrey de 240 mm² jusqu'à une altitude de 1750 m et en Aldrey/acier, avec 72 mm² d'acier et 212 mm² d'Aldrey, sur le tronçon de haute montagne. Les pinces adoptées sont celles étudiées par la SAIA même et les jonctions ont été exécutées selon le procédé Alutherm. Les conditions de transport, qui jouèrent un rôle de premier ordre dans la construction de la ligne, sont décrites en détail.

Die Leitung Mörel—Airolo führt vom Kraftwerk Mörel der Rhonewerke A.-G., einer Tochtergesellschaft der Aluminium-Industrie A.-G. (AIAG), durch das Oberwallis über den Nufenenpass und durch das Bedrettotal nach Airolo in das Kraftwerk Lucendro der Aare-Tessin A.-G. für Elektrizität; sie ist damit direkt an die Gotthardleitung angeschlossen. Das Kraftwerk Mörel seinerseits ist durch eine 65-kV-Leitung mit dem Verteilnetz und den übrigen Kraftwerken der AIAG verbunden, die wiederum mit den Anlagen der wichtigsten Kraftwerkunternehmungen im Wallis zusammenarbeiten können.

Im Kanton Wallis werden in 37 Kraftwerken über 2 Milliarden kWh jährlich erzeugt. Dies ist weit mehr, als im Kanton selbst auch bei Vollbeschäftigung der Industrie verwertet werden kann. Deshalb muss immer, besonders aber in Zeiten schlechter Beschäftigung der Industrie, Energie von hier in Mangelgebiete der Schweiz oder ins Ausland geleitet werden können. In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass hauptsächlich im Sommer die vorhandenen Transportmöglichkeiten Engpässe aufweisen, so dass in den Werken der AIAG und ihrer Tochtergesellschaften erhebliche Energiemengen unbenützt blieben, während gleichzeitig in Konsumgebieten der Ostschweiz und im Ausland Mangel herrschte. Diese Tatsache gab den Anstoss zum Studium einer neuen Verbindungsleitung vom Wallis nach den wichtigen schweizerischen Verkehrszentren und damit zum Bau der Nufenenleitung.

Zwei leistungsfähige, bestehende Verbindungsleitungen ermöglichten bis heute einen Energieaustausch mit Netzen grosser Uebertragungs- und Verbrauchskapazität, nämlich mit den Bernischen Kraftwerken über die Gemmileitung [1]) und mit der S. A. L'Energie de l'Ouest-Suisse über die Anschlussleitung zum Kraftwerk Chandoline. Diese Verbindungsleitungen führen prinzipiell in westlicher Richtung, so dass eine Leitung in entgegengesetzter Richtung den Wünschen nach neuen Austausch- und Absatzgebieten am besten Rechnung trug.

Die Wahl des Kraftwerks Mörel als Ausgangspunkt der in östlicher Richtung aus dem Wallis führenden Leitung ist dadurch gegeben, dass die Rhonewerke A.-G. in diesem Teil des Oberwallis noch Kraftwerke erstellen kann, welche an diese Leitung angeschlossen würden. Bei der Prüfung der Frage des Endpunktes der Leitung drängte sich ein Anschluss an die Gotthardleitung als günstige Lösung auf. Sie eröffnet den Weg sowohl nach Norden ins Zentrum Mettlen und darüber hinaus an die Grenze von Deutschland und Frankreich, als auch südwärts nach Italien. Wenn auch die Uebertragungskapazität der Gotthardleitung in naher Zukunft erreicht sein

[1]) *Köchli, W.*: Die Gemmileitung der Bernischen Kraftwerke A.-G. Bull. SEV Bd. 36(1945), Nr. 5, S. 130...135.

wird, so durfte dies kein Hinderungsgrund sein, da doch in absehbarer Zeit die projektierte zweite Alpenleitung zur Ausführung gelangen und später die Leistungsfähigkeit durch Erhöhung der Betriebsspannung gesteigert werden wird.

Der Anschluss an die Gotthardleitung konnte entweder über den Furkapass oder den Nufenenpass erreicht werden. Die Trasse über den Nufenenpass erwies sich als günstiger, weil einerseits die Leitung über eine weniger lange Strecke auf grossen Höhen von über 2000 m ü. M. geführt werden konnte und anderseits der Anschluss an die Gotthardleitung in der bestehenden Freiluftschaltanlage des Kraftwerks Lucendro leicht zu verwirklichen war.

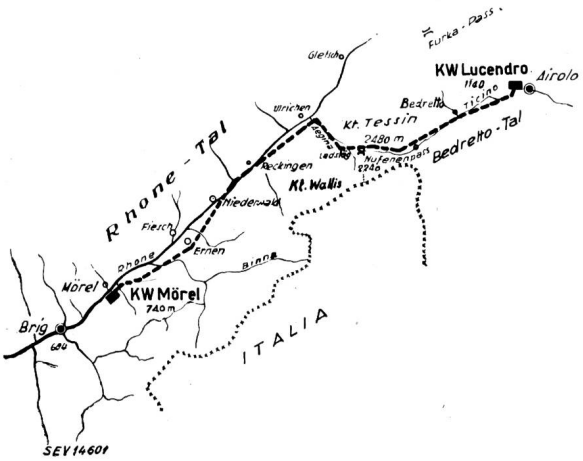

Fig. 1
150-kV-Leitung Mörel—Airolo, Situationsplan
Maßstab 1 : 800 000

Aus dem Situationsplan Fig. 1 ist die Trasse der 52,05 km langen Leitung ersichtlich. Die Leitung steigt von 740 m ü. M. (Mörel) auf 2480 m (Nufenenpass), um bis Airolo wieder auf 1140 m zu fallen. Massgebend für die Trassewahl war das Bestreben, grösstmögliche Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit zu erreichen und doch den Wünschen von Heimat- und Naturschutz, sowie vielen von Behörden und Militär aufgestellten Bedingungen zu entsprechen. Bei einer reinen Verbindungsleitung zwischen zwei Netzen, wie die Nufenenleitung eine solche darstellt, ist die Wahl der maximal zu übertragenden Leistung und der damit im Zusammenhang stehenden Spannung schwierig. Es ist selbstverständlich, dass die Leistungsfähigkeit einer Leitung nicht auf Grund eines momentan in Aussicht genommenen Energietransportes bestimmt werden kann, sondern unter Annahme der möglichen zukünftigen Entwicklung der Energieverschiebung und des Austausches auf dieser Leitung. Um einer späteren grösseren Entwicklung gerecht zu werden, entschloss man sich zum Bau einer Einfachleitung mit einer Uebertragungsspannung von 150 kV. Im weiteren ergaben die Berechnungen, dass für die Leiter ein Sollquerschnitt von 240 mm² Aluminium oder Aldrey das Optimum darstellte. Man wollte sich zum vorneherein auf genormte Querschnitte beschränken, so dass eine Wahl nur zwischen den beiden Querschnitten 185 mm² und 240 mm² möglich war. Unter Berücksichtigung der Korona- und ohmschen Verluste erwies sich 240 mm² als vorteilhafter. Dieser Leiter darf mit ca. 500 A belastet werden. Wenn von ohmschem Verlust und Spannungsabfall abgesehen wird, ist theoretisch eine Uebertragungsleistung bis über 100 000 kVA möglich. Um diese grosse Uebertragungsleistung erreichen zu können, wurde der im Kraftwerk Mörel vorläufig aufgestellte 50 000-kVA-Transformator 65/150 kV in weiten Grenzen regulierbar gewählt zur Kompensierung des relativ grossen Spannungsabfalls. Wie einleitend bemerkt, ist die Spannung des Uebertragungsnetzes der AIAG bis Mörel 65 kV.

Die Vorarbeiten für das generelle Projekt fallen in das Jahr 1944 und führten anfangs 1945 zur Eingabe an das Eidg. Starkstrominspektorat zwecks Erlangung einer generellen Genehmigung. Nachdem im Sommer 1945 die Trasse auf Grund der Einsprachen verschiedener Behörden bereinigt worden war, konnte im Herbst 1945 mit den Detailvermessungen begonnen werden. Der eigentliche Baubeschluss erfolgte Ende 1945.

Der Bau musste während der kurzen schneefreien Zeit, die beim Nufenenpass etwa von Ende Juni bis Oktober dauert, ausgeführt werden. Deshalb wurde

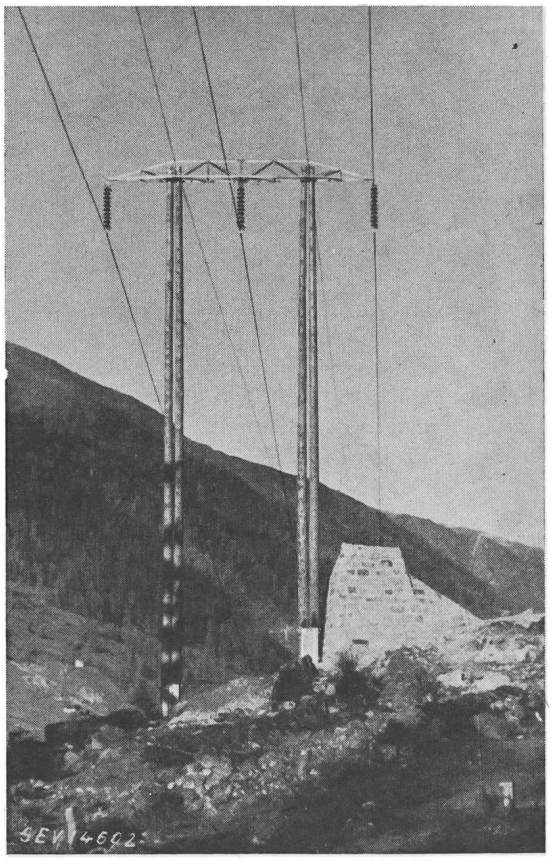

Fig. 2
Holztragmast der Talstrecke, durch Mörtelmauer gegen Lawinen geschützt

die total 52,05 km lange Strecke für Projekt und Ausführung in zwei Teile aufgeteilt. Der im Kanton Tessin liegende Teil der Leitung von 17,76 km Länge wurde der Motor-Columbus A.-G., Baden, als bauleitender Firma übertragen, während der im Kanton

Wallis liegende Teil von 34,29 km durch die Aluminium-Industrie A.-G., Lausanne, bearbeitet wurde. Diese Trennung, die auch mit den bisherigen Erfahrungen im Leitungsbau in den betreffenden Gebieten zusammenfällt, ergab sich aus sprachlichen und geographischen Gründen, da die Kantonsgrenze mit der Nufenenpasshöhe zusammenfällt.

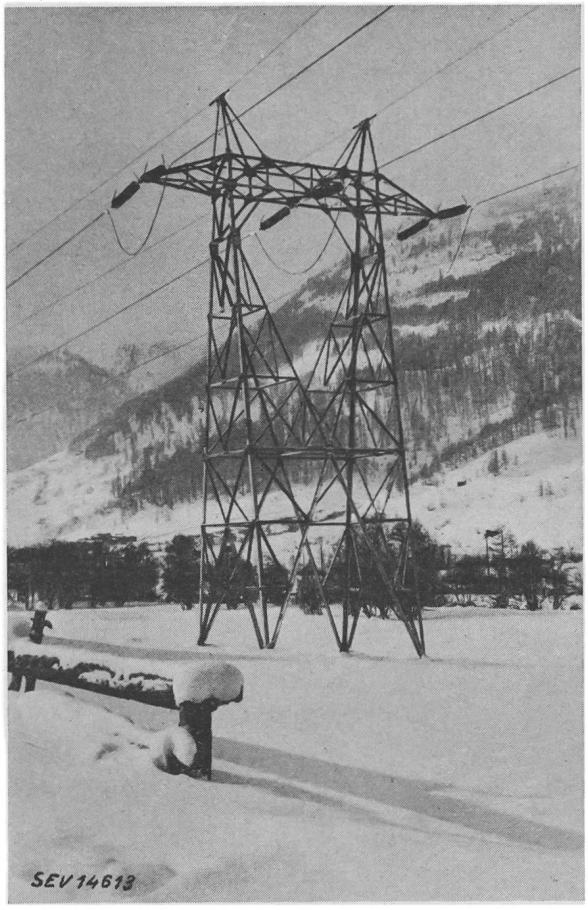

Fig. 3
Abspanneckmast der Talstrecke

Der Abschnitt im Kanton Wallis wurde aufgeteilt in eine Talstrecke von Mörel bis Ulrichen und in eine Gebirgsstrecke von Ulrichen bis Nufenenpasshöhe. Auch der im Kanton Tessin liegende Teil wurde in eine Talstrecke von Airolo bis Piano di Maniò und in eine Gebirgsstrecke von dort bis zur Nufenenpasshöhe unterteilt. Die verschiedenen Abschnitte wurden konstruktiv ganz getrennt behandelt. Ueberhaupt wurde die Leitung in bezug auf Konstruktion den Geländeverhältnissen weitgehend angepasst, was aus der folgenden Beschreibung noch deutlicher hervorgehen wird. Ausser dieser natürlichen Anpassung an die vorherrschenden Verhältnisse wirkte sich auf die Konstruktionsart der Leitung mitbestimmend aus, dass sie nach Möglichkeit im Jahre 1946 fertig erstellt werden sollte. Eine ausgesprochene Materialknappheit, wie die, welche während des Krieges hindernd war, herrschte zwar nicht mehr, jedoch waren nicht alle Materialien in unbegrenzten Mengen erhältlich.

Es wurde gewählt: Einfachleitung mit Leiterbild in einer horizontalen Ebene, darüber zwei Erdseile. Die Talstrecke Wallis wurde in einer gemischten Bauweise, nämlich die Trag- und Trageckmasten im Prinzip aus Holz (Fig. 2), die Abspann- und Abspanneckmasten aus Eisen (Fig. 3) ausgeführt. Auf den Gebirgsstrecken Wallis und Tessin kamen Winkeleisenmasten zur Anwendung (Fig. 4). Die Talstrecke im Tessin wurde mit ausbetonierten Rohrmasten (Fig. 5) ausgeführt, einer Bauart, welche von der Motor-Columbus A.-G., Baden, entwickelt worden ist.

Im folgenden wird nur der im Kanton *Wallis* liegende Teil der Leitung beschrieben, während für den Leitungsabschnitt im Kanton Tessin eine besondere Veröffentlichung in Aussicht steht.

Bevor der Bau und die Konstruktionsart eingehender besprochen wird, soll kurz die Frage der Materialtransporte gestreift werden.

Eine reibungslos arbeitende Transportorganisation ist bekanntlich ein wichtiges Moment beim Bau einer Freileitung. Sämtliches Material für die Ge-

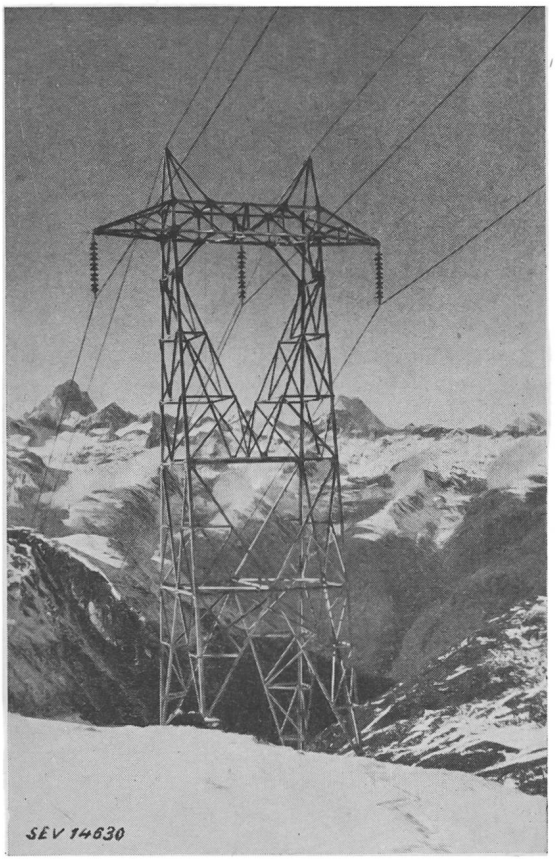

Fig. 4
Tragmast der Gebirgsstrecke bei der Nufenenpasshöhe mit Blick nach Norden (Berner Alpen)

birgs- und die Talstrecke wurde von den Lieferfirmen nach Brig spediert. Brig ist Endstation der Normalspurbahn, und ein Umlad, bzw. Ablad hätte hier auf jeden Fall erfolgen müssen. Ausserdem boten sich günstige Lagerplätze, so dass Brig als Umlade- und Verteilplatz gewählt wurde. Von hier aus erfolgte nach Massgabe der Bedürfnisse der ein-

zelnen Baustellen der Unternehmer oder deren Lagerplätze die Belieferung mit Material, und zwar meistens durch Camions. Total wurden ca. 1200 t Ma-

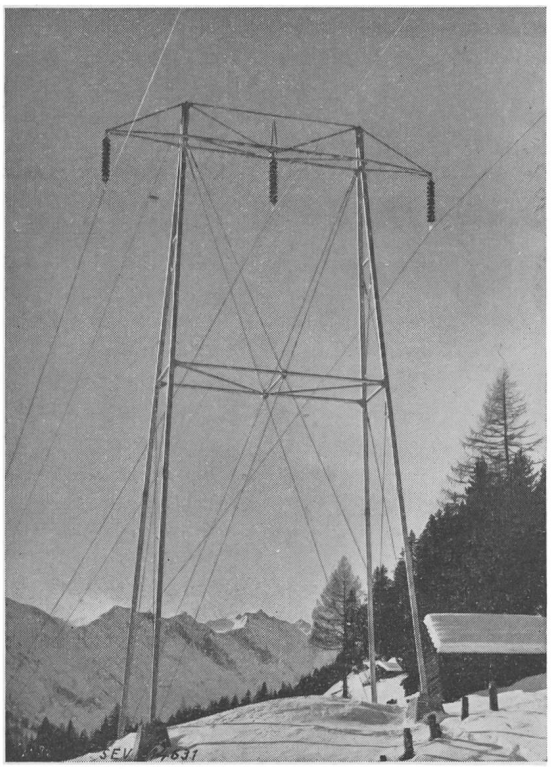

Fig. 5
Tragmast mit ausbetonierten Rohren der Talstrecke Bedretto

terial umgeschlagen und verteilt. Es wird später noch auf die verschiedenen Transportarten eingegangen, die die Bauunternehmer anwenden mussten, um zu den teilweise exponiert liegenden Stützpunkten gelangen zu können.

Talstrecke

Das Oberwallis ist von Niederwald an ausserordentlich lawinengefährdet, und regelmässig gehen jedes Jahr grosse Lawinen zu Tal, worauf bei der Trassierung in erster Linie Rücksicht genommen werden musste. Zwei Beispiele mögen dies belegen: Etwas oberhalb Blitzingen gehen an der gleichen Stelle beidseitig des Tales Lawinen nieder, deren Ausläufer sich in der Nähe der Rhone begegnen und gelegentlich überdecken. Die Leitung musste deshalb im Treffpunkt der beiden Lawinen hindurchgeführt werden, da hier die Wahrscheinlichkeit einer Zerstörung am kleinsten ist. Durch diesen im Sommer kaum erkennbaren Engpass führen jetzt 4 Leitungen. Ferner musste östlich des Dorfes Ritzingen die Leitung, die üblicherweise auf der linken Talseite verläuft, auf die rechte Seite hinübergenommen werden, da sich auf der linken Seite ein breiter Lawinenzug befindet, der wegen seiner convexen Gestalt nicht überspannt werden konnte. Mehrere gefährdete Stützpunkte wurden durch Mauern geschützt (Mörtelmauerwerk). Fig. 2 zeigt einen Tragmast mit Schutzmauer.

Die Hauptabmessungen der Walliser Talstrecke sind:

Länge	28 659	m
Höhenunterschied	860	m
Anzahl Stützpunkte	178	
Anzahl Abspannstrecken	24	
Kleinste bzw. grösste Spannweite	50	m bzw. 750 m
Mittlere Spannweite	160,5	m

Tragwerke

Die guten Erfahrungen, die die Rhonewerke A.-G. mit der im Kriegsjahre 1943 fast vollständig in Holz erstellten Leitung Mörel—Turtmann gemacht hat, veranlassten sie auch hier, für die Talstrecke vorwiegend Holztragwerke aufzustellen. Dabei wurde am Grundsatz, eine möglichst einfache und rasche Auswechslung der Stangen zu gewährleisten, konsequent festgehalten. Deshalb wurden nur die Trag- und Trageckmasten in Holz mit Eisentraversen, die Abspann- und Abspanneckmasten dagegen ganz in Winkeleisen vorgesehen, da eine Stangenauswechslung bei den letztgenannten sehr zeitraubend wäre. Die meisten Trag- und Trageckmasten haben je zwei gekuppelte Gestänge, und jede einzelne Stange ist getrennt an der Traverse befestigt. Jede der vier Stangen kann somit einzeln ausgewechselt werden, ohne dass dabei der Stützpunkt seinen Halt verliert. Einen fertigen Tragmast zeigt Fig. 6, einen Trageckmast Fig. 7 und 8. Das Befestigungsdetail der Traverse an den Stangen ist aus Fig. 9 für den Tragmast und Fig. 10 für den Trageckmast ersichtlich.

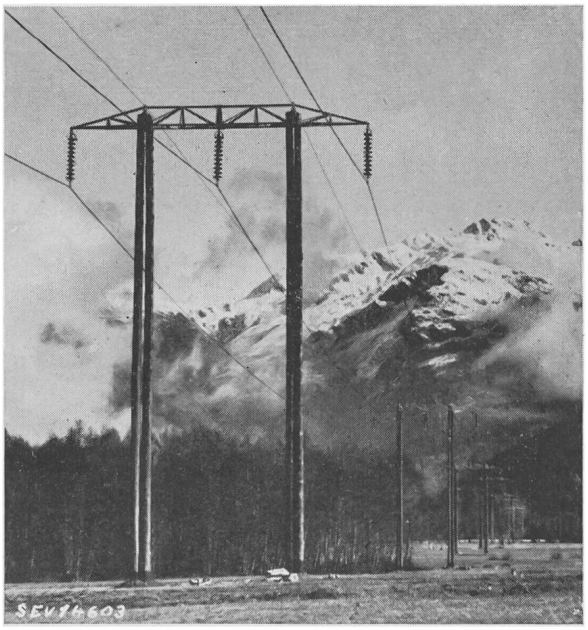

Fig. 6
Holztragmast mit 3 Reinaluminiumleitern von je 240 mm² und 2 Erdseilen von je 50 mm²

Die Berechnungen für die Talstrecke wurden unter Zugrundelegung einer Zusatzlast von 2 kg/m und einer Seilspannung von max. 8 kg/mm² bei Reinaluminium, bzw. 12 kg/mm² bei Aldrey (Montagespannung 2,43 kg/mm², bzw. 3,5 kg/mm²) durchgeführt. Die Ergebnisse für die Tragmasten sind im Schema Fig. 11 dargestellt, worin der Stangendurch-

messer auf Bodenhöhe in Funktion der Masthöhe und Spannweite aufgetragen ist. Daraus ist ersichtlich, dass für die Dimensionierung der Tragmasten

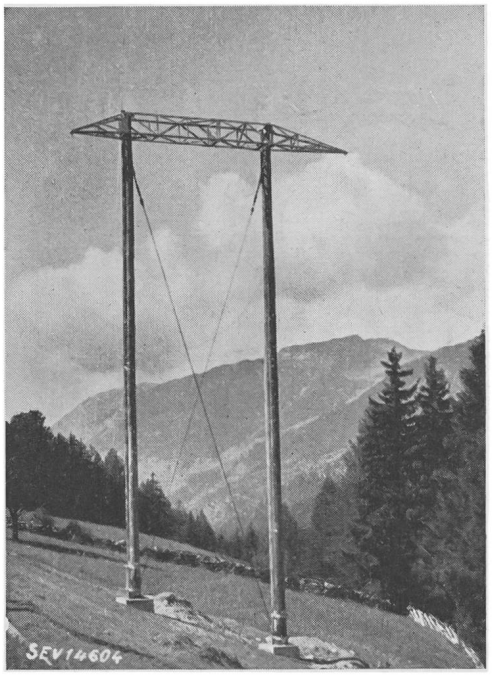

Fig. 7
Trageckmast mit Fundamentsockeln

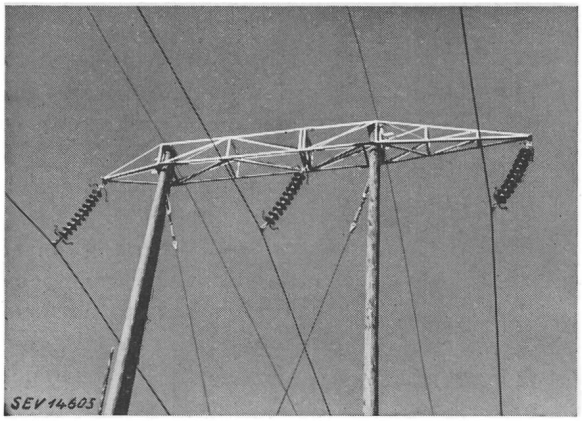

Fig. 8
Trageckmast, Oberteil

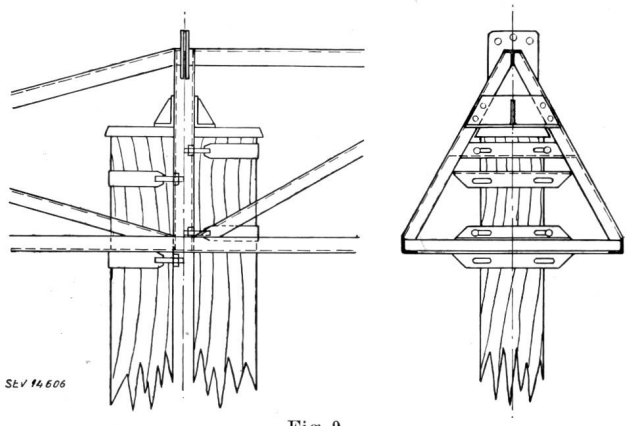

Fig. 9
Tragmast, Befestigung der Traverse an den Holzstangen
Maßstab 1 : 25

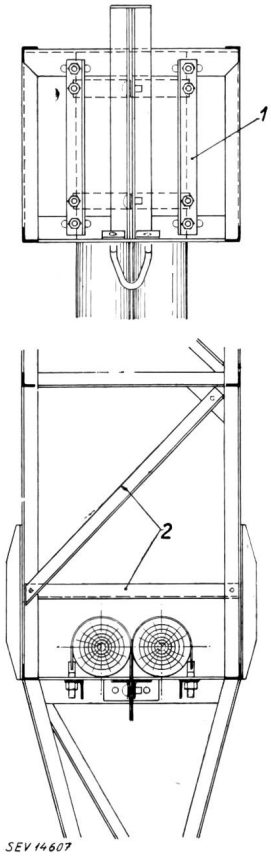

Fig. 10
Trageckmast, Befestigung der Traverse an den Holzstangen
Maßstab 1 : 25
1 Je nach Stangendurchmesser verschiebbar
2 Demontierbar

die seitliche Windbeanspruchung meistens massgebend ist. Die Kuppelstangen sind daher quer zur Leitungsebene angeordnet.

Jeder Stützpunkt bekam seine genau dimensionierten Stangen zugeteilt. Aus Fig. 11 ist zu sehen, dass teilweise recht beachtenswerte Durchmesser nötig waren, da Spannweiten bis 300 m und Stützpunkthöhen bis 17 m vorkamen.

Total benötigte die Leitung ca. 650 Stangen von 15...21 m Länge mit einem Einzelgewicht von 600...800 kg, total 548 m³ Holz. Die Verteilung und der Trans-

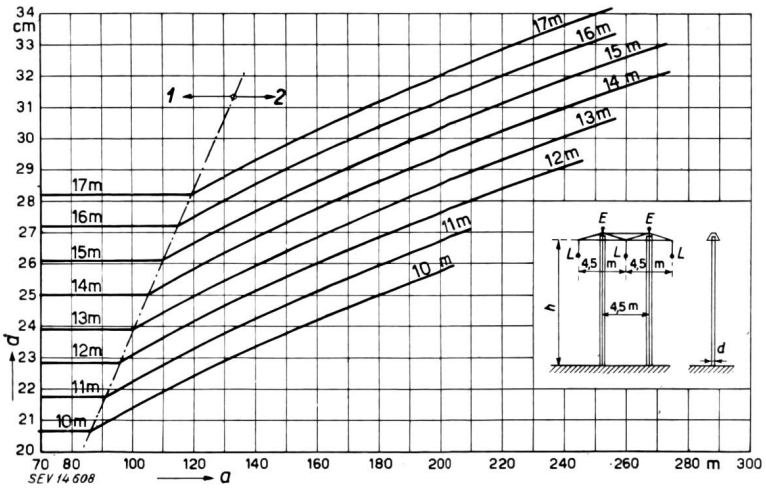

Fig. 11
Minimale Stangendurchmesser für T-Masten mit Kuppelstangen

1 Links von der strichpunktierten Linie: Wind + 2 % max. Seilzug massgebend; *2* Rechts von der strichpunktierten Linie: Wind senkrecht zur Leitung massgebend

d Stangendurchmesser auf Bodenhöhe; *a* Spannweite; *E* Erdseile; *L* Leiter; *h* Höhe der Stangen über dem Boden, 10...17 m, als Parameter

port dieser extrastarken Stangen bis zu den einzelnen Stützpunkten erforderte grosse Arbeit. Von Brig aus erfolgte der Transport ausschliesslich durch Camions, und im nichtfahrbaren Gebiet wurden die

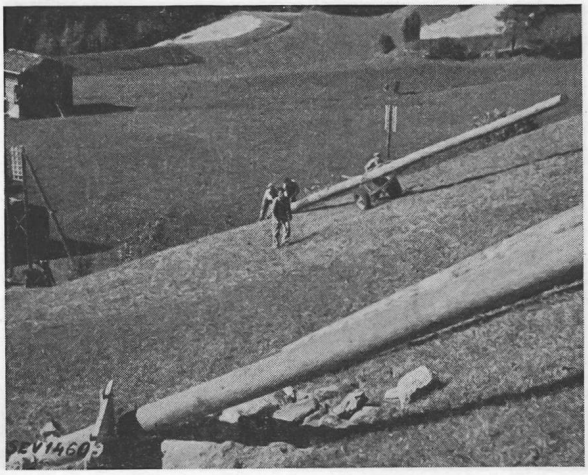

Fig. 12
Stangentransport mit Wagen und Winde

Stangen meistens auf Zweiräderwagen geladen und mit einer Winde hangaufwärts bewegt. Fig. 12 zeigt diese Transportart in steilem Gelände.

Bei besonders hohen Stützpunkten oder langen Spannweiten wurden die Tragmasten mit Sockeln versehen. Auch sämtliche Trageckmasten sind auf

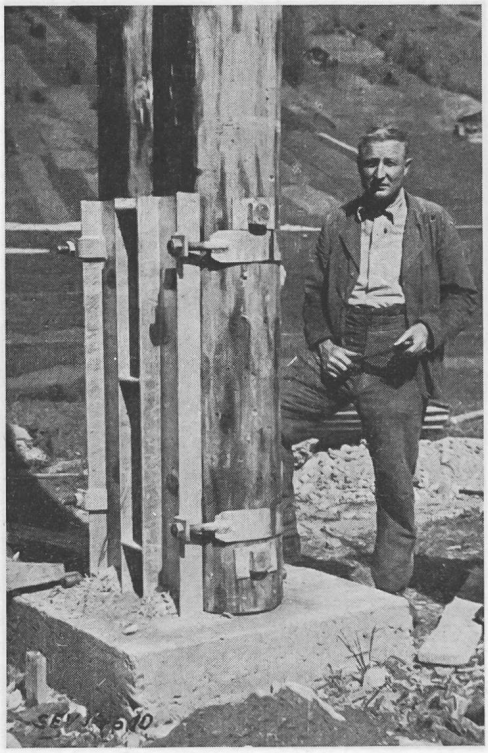

Fig. 13
Sockel eines Holztragmastes

Sockel gestellt, da beträchtliche Druck- oder Zugkräfte durch die Stangen resp. die Verspannung und damit durch die Fundamente aufgenommen werden müssen. Die Konstruktionsart dieser Sockel ist aus Fig. 13 und 14 für Tragmasten und aus Fig. 15 für Trageckmasten ersichtlich. Es handelt sich um eine geschweisste, feuerverzinkte Konstruktion, aus U-

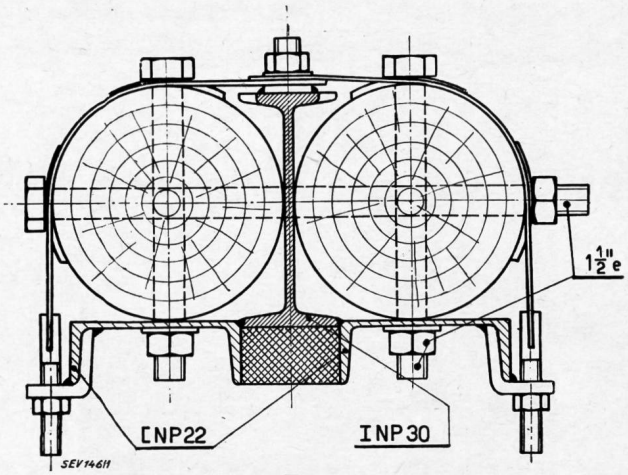

Fig. 14
Schnittzeichnung eines Sockels für Tragmasten
Maßstab 1 : 10

und T-Eisen, die ein relativ kleines Gewicht des Sockels ermöglichte.

Die Abspanneckmasten in Winkeleisen (Fig. 3) haben die bei horizontaler Leiteranordnung übliche Form. Die ersten 3 Tragwerke beim Kraftwerk Mörel sind für 6 Leiter gebaut, um einer allfälligen Erstellung einer zweiten Leitung Rechnung zu tragen. Das Gelände oberhalb des Kraftwerks ist durch das Dorf, die Bahn und die Strasse bereits so belegt, dass die Führung einer zweiten Leitung auf neuer Trasse mit sehr grossen Schwierigkeiten verbunden wäre. Eine weitere Sonderkonstruktion wurde beidseitig der 750 m langen Ueberquerung der Binnaschlucht gewählt. Hier wurden Einzelmasten aufgestellt, um einen Leiterabstand von 10 m zu erhal-

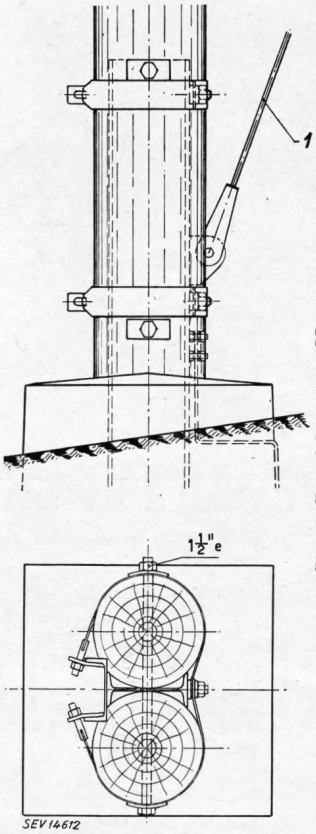

Fig. 15
Sockel für Trageckmast
Maßstab 1 : 25
1 Verspannung

ten. Ferner mussten bei der Kreuzung mit der Trasse der Furka-Oberalpbahn Eisentragmasten verwendet werden.

Leiter, Isolatoren und Armaturen

Für Tragwerke aus Holz ist beim gewählten Querschnitt Reinaluminium das gegebene Leitermaterial, da die Spannweiten und Leiterzüge relativ klein bleiben. Das verwendete Seil hat einen Querschnitt von 240 mm², einen Durchmesser von 20,1 mm und einen Aufbau von 37 Drähten von je 2,87 mm Durchmesser. Die Reinaluminiumseile wurden in Fabrikationslängen von ca. 2000 m angeliefert, also nicht in angepassten Längen. Nur bei langen Spannweiten, z. B. über die Binnaschlucht, wurde ein Aldreyseil gleichen Querschnitts und Aufbaus verwendet, da hier, um die Durchhänge zu vermindern, die Spannung auf ca. 13 kg/mm² bei 2 kg/m Zusatzlast erhöht wurde.

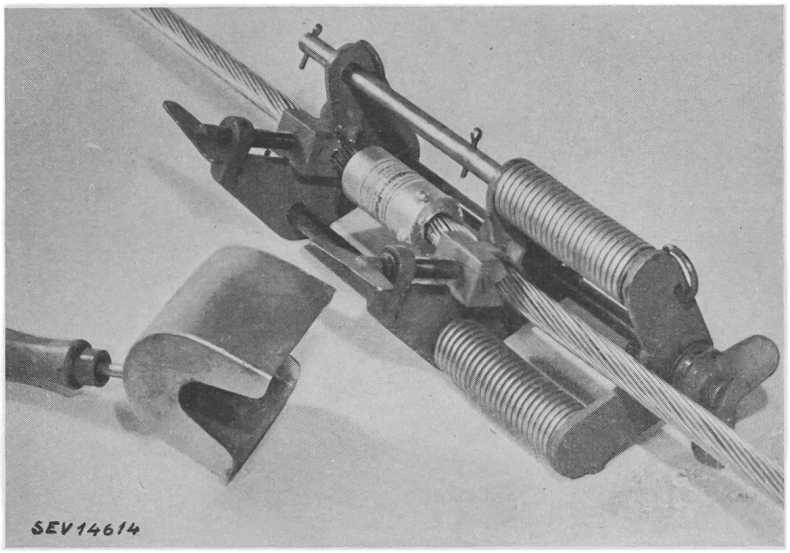

Fig. 16
Alutherm-Schweissapparat
bereit zum Verschweissen zweier Seilenden

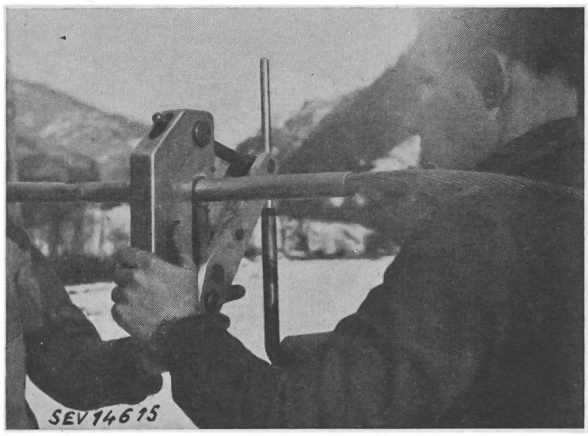

Fig. 17
Verstärkung der Alutherm-Schweißstellen in den Spannweiten mit Rohrverbinder
Einkerben mit Handpresse

Um elektrisch einwandfreie Verbindungen zu erhalten, wurden die Leiterseile nach dem von der AIAG entwickelten Aluthermschweissverfahren geschweisst [2]). Da bei der Schweißstelle die ursprüngliche Seilfestigkeit etwas zurückgeht, hat man die Verbindungen in der Spannweite mit übergeschobenen Aluminiumrohren, die beidseitig der Schweissstelle mit den Seilen verkerbt wurden, mechanisch verstärkt. Fig. 16 zeigt den Spannapparat, mit welchem der nötige Druck auf die zu verschweissenden Seile erzeugt wird, und Fig. 17 die Kniehebelpresse beim Kerben des Verstärkungsrohres. Beide Werkzeuge sind in der Handhabung sehr einfach, haben geringes Gewicht und sind deshalb den leitungsbaulichen Anforderungen voll gewachsen. In Fig. 18 ist ein auf diese Weise hergestellter Rohrverbinder, z. T. aufgeschnitten, dargestellt.

Die Talstrecke ist durchgehend mit Kappen-Bolzen-Isolatoren ausgerüstet. Die Tragkette besteht aus 10, die einfache Abspannkette aus 11 und die Doppelkette aus 22 Elementen. In der Regel wurden einfache Abspannketten bei Reinaluminiumseil,

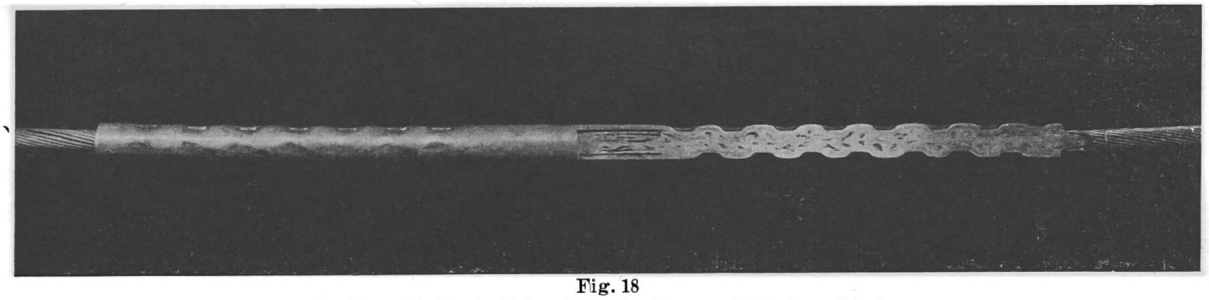

Fig. 18
Fertige Alutherm-Schweissverbindung mit Rohrverbinder
(teilweise aufgeschnitten)

[2]) *Schiltknecht, Adolf:* Das Alutherm-Schweissverfahren zur Verbindung von Leitern aus Aluminium und Aluminium-Legierungen. Bull. SEV Bd. 35(1944), Nr. 2, S. 41...47.

Doppelketten bei Aldreyseil verwendet. Die wichtigsten Eigenschaften der von der Cie Générale d'Electro-Céramique, Bazet (France), gelieferten Isolatorenelemente Typ CT 254 sind:

Bruchfestigkeit	9 t
Elektromech. Bruchlast	7 t bei 70 kV (9,15...10,9 t)
Durchschlag unter Oel	120 kV (124 kV)
Trockenüberschlag	77 kV (85 kV)
Nassüberschlag	46 kV (52 kV)

Die angegebenen Werte sind garantiert, die effektiv erreichten mittleren Prüfwerte der Materialprüfanstalt des SEV (Prüfbericht Nr. 20824) sind in Klammern beigefügt.

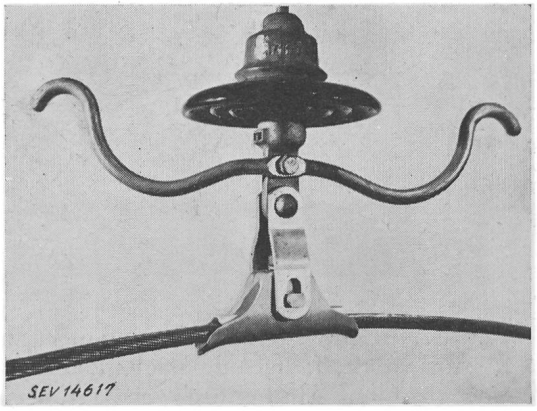

Fig. 19
Tragklemme AIAG

Die verwendeten Armaturen, Trag- und Abspannklemmen sind seinerzeit von der AIAG unter Berücksichtigung der besonderen Eigenschaften von Leichtmetallseilen entwickelt worden und haben sich auf sehr vielen Leitungen ausgezeichnet bewährt. Sie sind speziell auf Grund der Erfahrungen bei schwingenden Leitungen konstruiert worden, und tatsächlich sind Schwingungsbrüche auf den damit ausgerüsteten Leitungen noch nie aufgetreten. Fig. 19 und 20 zeigen die Trag- und die Abspannklemme.

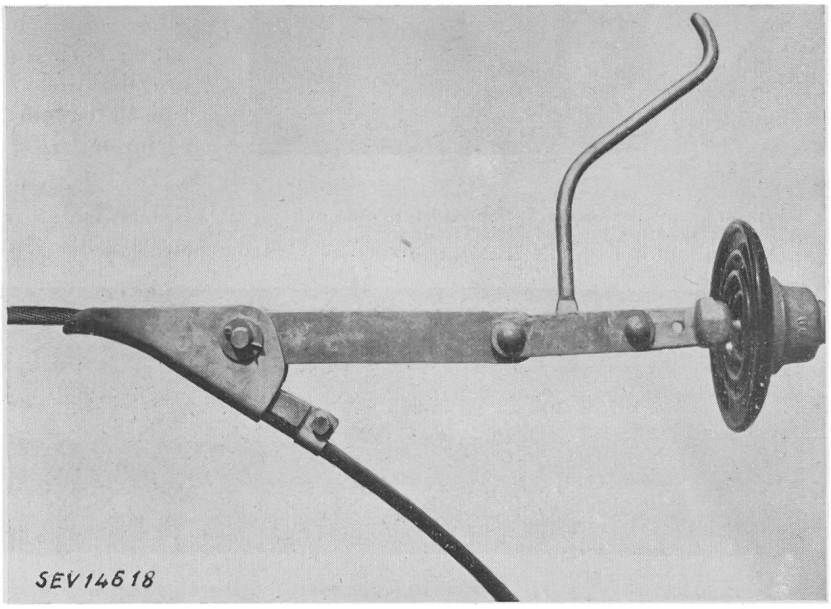

Fig. 20
Abspannklemme AIAG für Reinaluminium und Aldrey

Die *Erdseile* haben einen Querschnitt von 50 mm² und eine garantierte Bruchfestigkeit von 120 kg/mm². Die Befestigung an den Abspanneckmasten erfolgte

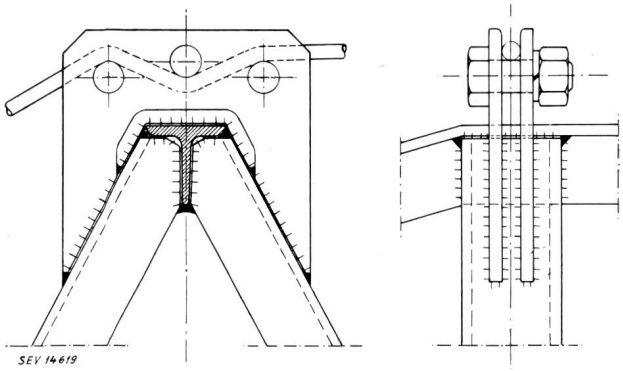

Fig. 21
Erdseilbefestigung bei Tragmasten
Maßstab 1 : 5

mit den bekannten +GF+-Klemmen, diejenige an den Tragmasten durch eine Klemmvorrichtung nach Fig. 21. Das Einschlaufen zwischen die drei Schrauben erfolgte mit Hilfe eines Apparates. Das regulierte, also gespannte Seil wurde zuerst unter die mittlere Schraube gelegt und dann beidseitig mit Hilfe des Apparates hochgehoben, bis die seitlich angeordneten Schrauben eingesteckt werden konnten.

Bau -und Montagearbeiten

Die für die Montage zur Verfügung stehende Zeit war äusserst knapp bemessen, insbesondere für die höhergelegenen Regionen von Niederwald bis Ulrichen. Der Winter 1945/46 war im Oberwallis äusserst schneereich gewesen, und es waren zeitweise über 2 m gesetzter Schnee gemessen worden. Mit den Aushub- und Fundationsarbeiten konnte erst nach der Schneeschmelze anfangs Mai 1946 begonnen werden. Zu Beginn des Monats Juni erfolgten die ersten Anlieferungen von Material (Stangen, Eisenteile zu Abspanneckmasten etc.), so dass mit dessen

Verteilung auf die einzelnen Stützpunkte begonnen werden konnte.

Der Fundamenttyp für die aufgelösten Abspanneckmasten ist in Fig. 22 dargestellt; derjenige für die Tragmasten (es wurden nur ungefähr 5 % der Tragmasten mit Fundamenten ausgerüstet) ist ein einfacher Block von ca. 80 × 80 cm Querschnitt bei ca. 2 m Tiefe je nach den Bodenverhältnissen. Für

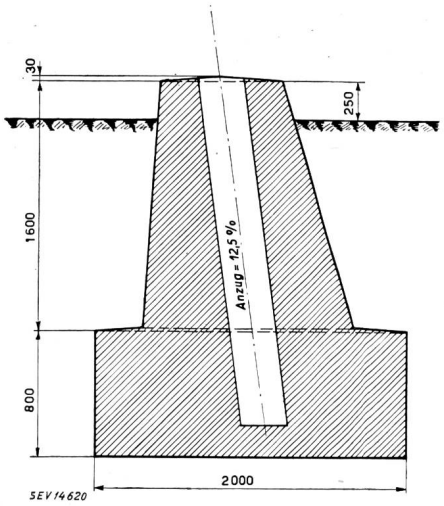

Fig. 22
Fundamente der Abspann- und Abspanneckmaste
Maßstab 1 : 50

die gesamte Strecke waren 820 m³ Beton mit 200 kg Portlandzement/m³ nötig.

Nach Fertigstellung der Fundamente wurden die Löcher für die Tragmasten ausgehoben. Stangen und der Mast fertig aufgebaut. Die Montage der Tragmasten erfolgte teilweise mit Stichel in der üblichen Art (Fig. 23) oder mit einer provisorisch aufgestellten Hilfsstange. Die Traverse wurde mit einer Kombination von Flaschenzug und Kippeinrichtung etwas höher als die aufgestellten Stangen aufgezogen und nachher auf diese herabgelassen.

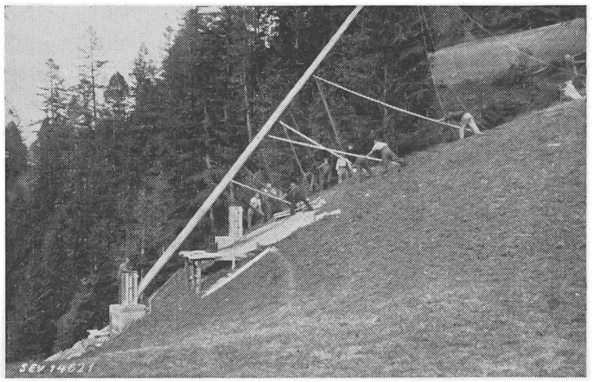

Fig. 23
Holztragmast mit Sockel, Stangenstellen

Die Seilmontage stellte besonders grosse Anforderungen, da das Gelände teilweise sehr unwegig war. Die Seile wurden deshalb zum grössten Teil von Hand oder mit Zugtieren ausgezogen. In wenigen Fällen, z. B. über Tobel oder bei Flussüberquerungen, wurde Winde und Hilfsseil verwendet.

Die obere Talstrecke von Ulrichen bis Niederwald war am 15. November betriebsbereit, die untere von Niederwald bis Mörel am 20. Dezember 1946.

Fig. 24
Leitungstrasse im Aeginental von oberhalb Ladstäg (Mast 192)

Eisenteile wurden fortlaufend transportiert, so dass etappenweise mit der Montage der Tragmasten und mit dem Aufstellen der Gittermasten begonnen werden konnte. Die Eisenmasten wurden in üblicher Weise in zwei Etappen montiert. Die vier Füsse wurden bis zum ersten Querverband zusammengestellt und eingegossen. In der zweiten Etappe wurde

Gebirgsstrecke

Der als Gebirgsstrecke bezeichnete Abschnitt der Leitung befindet sich im Aeginental und im Anstieg zum Nufenenpass. Das Aeginental zweigt als Seitental des oberen Rhonetales bei Ulrichen nach Süden ab und ist besonders in seinem mittleren Teil sehr wild und ausserordentlich lawinen- und stein-

schlaggefährdet. Die Trasse der Leitung wurde aus diesem Grunde weitgehend naturgegebenen Verhältnissen angepasst. Um einerseits den Lawinenzügen auszuweichen und anderseits die links der Aegina liegenden Waldbestände zu schonen, liegt die Trasse in der untersten Gefällstufe rechtsufrig. Im weiteren Verlauf geht sie auf die linke Talseite über, auf der sie bis zum Ladstäg, wo der eigentliche Aufstieg zur Nufenenpasshöhe beginnt, verbleibt. Um den überall niedergehenden Lawinenzügen auszuweichen, wurde die Leitung seitwärts am Hang hoch über dem Talboden angeordnet und die Masten auf Felsen gestellt, zwischen denen die Lawinen durch natürliche Couloirs kanalisiert sind, die mit den Seilen überspannt werden konnten. Auf einer Strecke von ca. 1,2 km Länge, direkt vor dem Ladstäg, hingegen ist der Hang ohne Felsen und ohne Couloirs. In diesem Teil mussten daher grosse Lawinenverbauungen erstellt werden; sie werden später beschrieben. Für die Lage der Stützpunkte war die Forderung nach grösster Lawinensicherheit der Leitung massgebend, woraus sich sehr unterschiedliche Spannweiten ergaben, die zwischen 120 m und 650 m variieren. Der Charakter des Aeginentales geht aus Fig. 24 hervor. Diese Aufnahme wurde oberhalb Ladstäg talauswärts gemacht.

Die Hauptabmessungen der Walliser Gebirgsstrecke sind:

Länge	5630 m
Höhenunterschied	880 m
Anzahl Masten	19
Anzahl Abspannstrecken	5
Kleinste, bzw. grösste Spannweite	120 m bzw. 650 m
Mittlere Spannweite	313 m

Bauart der Leitung

Die Tragwerke sind in der üblichen Art in Profilstahl mit aufgelösten Fundamenten gebaut. Die Grundform der Masten bis 16 m Höhe ist aus Fig. 25, jene für grössere Höhen aus Fig. 26 ersichtlich.

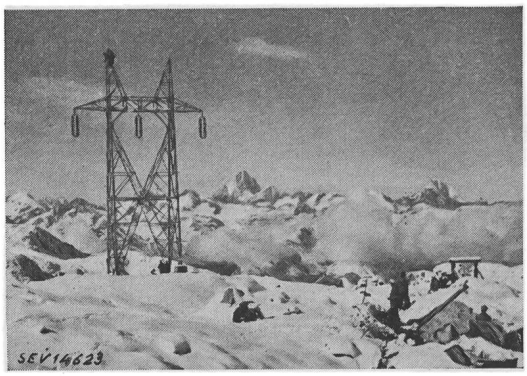

Fig. 25
Abspannmast auf Nufenenpasshöhe
Mastspitze auf Kote 2500 m, Blick gegen Berner Alpen, rechts Seilzugmaschine

Die Leiterabstände betragen in der Regel 5,5 m und wurden bei der grössten Spannweite von 650 m auf 6,5 m erhöht. Bemerkenswert sind bei der gewählten Konstruktion die grossen Erdseilspitzen. Sie wurden bei den Trag- und Abspannmasten so abgestuft, dass das Erdseil vom Leiter einen Abstand von 5 m aufweist. Dieser relativ grosse Abstand wurde gewählt, um eine möglichst «blitzschützende» Anordnung von Erdseil und Leitung zu erhalten, da die Nufenenpasshöhe als sehr gewitterreich gilt. Die Trag- und Abspannketten wurden ausserdem mit Hörnern ausgerüstet.

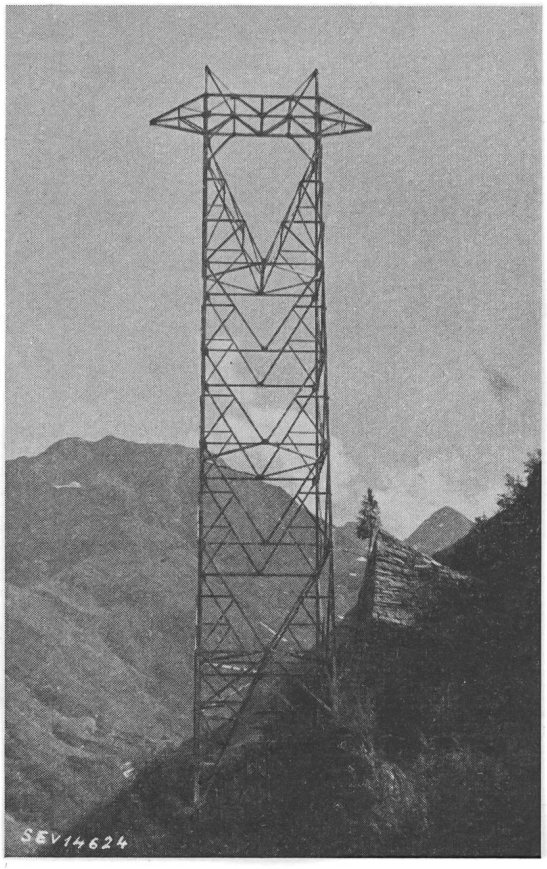

Fig. 26
Tragmast im Aeginental
30 m hoch, mit Lawinenschutz

Der Berechnung der Masten sind die schweizerischen Vorschriften für Weitspannleitungen mit Abspannmasten [3]) und folgende verschärfenden Annahmen zu Grunde gelegt worden:

a) Die Tragmasten müssen die Hälfte des maximal auftretenden, einseitigen Zuges irgendeines Leiters aufnehmen können. Diese Forderung ergab sich aus der Ueberlegung, dass bei einem Leiterbruch für den Tragmast keine Einsturzgefahr bestehen soll.

b) In der Verordnung [3]) wird verlangt, dass das ungünstigste Moment, das durch den Bruch von zwei Leitern entstehen kann, für die Berechnung des Mastes massgebend sein soll. Im vorliegenden Fall wurde als ungünstigstes Moment der Bruch von zwei beliebigen Seilen (Erdseile oder Leiter) der Berechnung zugrunde gelegt. Tatsächlich ergibt sich das grösste Moment durch den einseitigen Zug eines äussern Leiters und denjenigen eines Erdseiles.

c) Die Zusatzlast für Leiter- und Erdseile wurde nach Höhenlage der Leitung folgendermassen abgestuft:

3 kg Schneezusatzlast/m für eine Höhe bis 1900 m ü. M.
5 kg Schneezusatzlast/m für eine Höhe von 1900...2100 m
8 kg Schneezusatzlast/m für eine Höhe von 2100...2300 m
12 kg Schneezusatzlast/m für eine Höhe von 2300...2500 m

Leiter und Armaturen

Im untern Teil der Gebirgsstrecke (Zusatzlast 3 kg Schnee/m) konnte ein Aldreyleiter von 240 mm²

[3]) Verordnung über Starkstromanlagen 1933, S. 91...106.

Querschnitt Verwendung finden. Die grösseren Schneezusatzlasten von 5 kg/m an erforderten jedoch ein stärkeres Seil, und es wurde dafür ein Verbundseil Stahl-Aldrey von folgendem Aufbau gewählt:

36 Aldrey-Drähte zu 2,74 mm Durchmesser, entsprechend einem Querschnitt von . . .	212 mm²
12 Stahl-Drähte zu 2,74 mm Durchmesser, entsprechend einem Querschnitt von . . .	72 mm²
Totalquerschnitt	284 mm²

Für die Aldrey-Drähte wurden 30 kg/mm² Zerreissfestigkeit garantiert, für diejenigen aus Stahl 120 kg/mm². Versuche ergaben eine mittlere Zerreissfestigkeit des Seiles von 17 t. Dieses Resultat ist sehr gut. Stahl und Aldrey haben relativ grosse Dehnung, die für beide Metalle 5...7 % beträgt. Beim Zerreissversuch trat der Bruch nach vollständiger Ausnützung dieser Dehnungen gleichzeitig in Stahl und in Aldrey auf, was für die guten Eigenschaften dieser Kombination spricht. Um Verbindungen in den Spannweiten zu vermeiden, wurden die Seile in angepassten Längen verlegt. Die obere Belastungsgrenze des Seiles wurde durchgehend mit ca. 25 kg/mm² angenommen. Bei den verschiedenen Zusatzlasten fielen deshalb die entsprechenden Montagespannungen verschieden gross aus. Sie variierten zwischen 2,8...7,5 kg/mm², wobei sich die grösste Montagespannung im untern Teil der Leitung mit kleinerer Schneezusatzlast, die kleinste im obersten Teil der Leitung ergab.

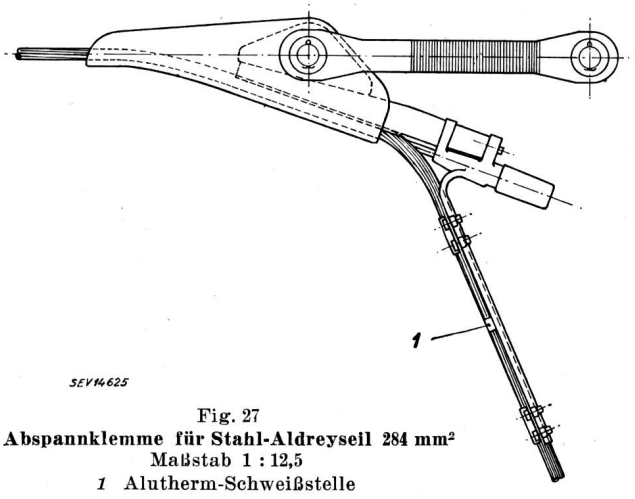

Fig. 27
Abspannklemme für Stahl-Aldreyseil 284 mm²
Maßstab 1 : 12,5
1 Alutherm-Schweißstelle

Im Aufstieg zum Nufenenpass mussten zwischen den Masten 191 und 193 zum Ueberspannen lawinengefährdeter Hänge grosse Spannweiten von 650 m bzw. 450 m vorgesehen werden. Es kann nun vorkommen, dass die Sonne längere Zeit nur eine Seite der Spannweite bestrahlt und sie von allfälliger Zusatzlast entlastet, während die im Schatten liegende noch behangen bleibt. Bekanntlich verändert sich der Bodenabstand der Leiter bei einseitig auftretender Zusatzlast gegenüber demjenigen bei gleichmässig verteilter Zusatzlast und könnte unter ein zulässiges Mass sinken. Durch Modelluntersuchungen, die bei Motor-Columbus durchgeführt wurden, wurde der nötige Bodenabstand bei verschiedenen einseitigen Zusatzlasten bestimmt. Auf Grund dieser Versuche mussten die in Frage kommenden Masten um 4...6 m höher gewählt werden.

Die verwendeten Tragklemmen sind die gleichen wie auf der Talstrecke. Fig. 27 stellt die Abspannklemme dar. Die Stahlseele ist bei dieser Klemme für sich in einer Konusklemme gefasst, die am Presskeil befestigt ist und diesen in den Klemmenkörper hineindrückt. Die elektrische Verbindung in der Schlaufe ist durch eine Aluthermschweissung einwandfrei gelöst. Die Montage der Klemme ist etwas zeitraubend, wird aber kompensiert durch die wirklich einwandfreien mechanischen und elektrischen Eigenschaften.

Isolatoren

Auf der ganzen Gebirgsstrecke kamen Motor-Isolatoren zur Anwendung, und zwar der Typ VK 4, dessen Eigenschaften hinreichend bekannt sind [4]), so dass nicht näher darauf eingetreten werden muss. Bis zu einer Höhe von 1900 m ü. M. wurden pro Tragkette 4 und pro Doppelabspannkette 8 Elemente verwendet. Ueber 1900 m ü. M. wurden die Ketten auf 5 bzw. 10 Elemente verlängert.

Erdseile

Entsprechend der verschieden grossen Schneezusatzlast wurden Erdseile von folgenden Querschnitten ausgelegt:

80 mm²	bei 3 kg/m	Schneezusatzlast
100 mm²	bei 5 kg/m	Schneezusatzlast
120 mm²	bei 8...12 kg/m	Schneezusatzlast

Die maximale Beanspruchung liegt jeweils bei ca. 60 kg/mm². Abgespannt wurden die Seile mit Hilfe von +GF+-Klemmen üblicher Bauart, wobei zusätzlich eine Sicherungsschlaufe gemacht wurde, die ein «Abfahren» des Seiles auf jeden Fall verunmöglicht. Bei den Tragmasten kam die gleiche Befestigung zur Anwendung wie bei der Talstrecke.

Transport-, Bau- und Montagearbeiten

Der Weg von Ulrichen ins Aeginental war vor Beginn der Arbeiten ein Saumweg und nur im unteren Abschnitt etwas breiter ausgebaut. Das Transportproblem war sehr schwierig zu lösen, umsomehr, als alle Transporte in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit bewältigt werden mussten. Für einen reinen Maultiertransport war die Materialmenge zu gross und für die Erstellung einer Seilbahn war die Trasse der Leitung ungünstig. Wäre die Seilbahn parallel dazu geführt worden, so hätte sie einen steilen, unwegigen Hang traversieren müssen. Ferner hätte bei Mast 181 ein starker Leitungswinkel die Aufteilung der Seilbahn bedingt. Deren Bau hätte aus diesen Gründen kostbare Zeit beansprucht und eine Verzögerung der eigentlichen Bauarbeiten gebracht. Deshalb wurde für die erste Etappe von Ulrichen bis Gelmer ein Traktor mit Anhänger eingesetzt. Der Weg hatte dort ursprünglich eine Breite von 1,6...2 m; er konnte innerhalb 3 Wochen durchgehend auf 2...2,2 m ausgebaut und ausgebessert werden. Im Verlauf der weiteren Arbeiten wurde der Weg bis Hohsand verbreitert. Damit waren rund

[4]) *Motor-Columbus A.-G.:* Aufbau und Berechnung der Motor-Isolatoren (Vollkern-Isolatoren). Bull. SEV Bd. 22 (1931), Nr. 9, S. 201...209.

5 km Luftlinie und 600 m Höhendifferenz fahrbar. Pro Fahrt konnten 1...3 t transportiert werden, wobei die zu ladende Menge vom Zustand des Weges abhing. Bei Regenwetter konnte der Traktor wegen Rutschgefahr in den grossen Steigungen nicht fahren.

Im obersten Abschnitt von Ladstäg bis Nufenenpasshöhe wurde eine Bauseilbahn erstellt, da in dieser Partie der Saumweg der Leitungstrasse nicht folgte. Die beschriebenen Verhältnisse sind in Fig. 28 dargestellt, in welcher die Transportmenge graphisch über den Transportweg aufgetragen ist. Um die Transportmenge zu reduzieren, wurde versucht, Sand und Kies im Aeginental selbst zu gewinnen. Tatsächlich konnte an drei Stellen gutes Material gefunden werden.

Anfangs Mai konnte mit den Fundationen der drei untersten Masten der Gebirgsstrecke begonnen werden. Diese liegen rechtsufrig, abseits des normalen Saumweges. Für den Transport des Materials wurde eine kleine Seilbahn eingerichtet. Die Fundamente haben ähnliche Form wie jene der Talstrecke. Da sie jedoch stärker beansprucht sind, wurde die Tiefe vergrössert und das ganze Fundament armiert.

Die Grösse der Fundamente ist bekanntlich stark von der Bodenbeschaffenheit abhängig. Deshalb wurde zuerst ein minimales Fundamentloch ausgehoben und auf Grund des vorgefundenen Materials die Grösse des Fundamentes bestimmt. Im Fels wurden die Fundamente durch Verankerungseisen mit dem Gestein verbunden.

Die Fundamente wurden anfänglich in der Höhe um ca. 30...40 cm kürzer gehalten, und der Rest wurde beim Eingiessen der Mastfüsse aufbetoniert. Auf diese Art stellt die nachträglich betonierte Partie ein ansehnliches Betonvolumen dar, das durch das Betoneisen mit dem alten Beton gut verbunden ist. Ausserdem verläuft die Trennung zwischen altem und neuem Beton in einer horizontalen Ebene, was ein Eindringen von Wasser praktisch ausschliesst, im Gegensatz zu senkrecht liegenden Trennungen. In Fig. 29 sind die Fundamente eines Abspannmastes vor dem Eingiessen zu sehen.

Die Mastenmontage war im Prinzip die gleiche wie bei den Masten für die Talstrecke. Hauptsache war hier eine einwandfreie Organisation des Transportes, damit keine Stücke verloren gingen, was bei den obersten Masten besondere Aufmerksamkeit verlangte, da hier die Materialien zuerst mit dem Traktor, dann mit Mauleseln und schlussendlich mit der Seilbahn transportiert, also dreimal umgeladen werden mussten.

Die Seiltrommeln konnten mit dem Traktor nur bis zu einer Stelle unterhalb des Mastes 189 transportiert werden. Die Seile wurden von hier aus über alle Masten in der ganzen Länge ausgezogen. Die Zugmaschine befand sich auf der Nufenenpasshöhe hinter dem Mast 197. In Fig. 25 ist der oberste Abspannmast 197 mit der dahinterliegenden Zugmaschine zu sehen (der erste Schneefall war bereits da, als mit dem Seilzug begonnen werden konnte). Es handelte sich um eine leichte Zugmaschine, die zerlegt mit Maultier und Seilbahn stückweise hinauftransportiert werden konnte. Nachher wurde die Zugmaschine beim Mast 191 aufgestellt, und die Seile wurden von Mast 185...191 gezogen. Anschliessend folgte das Stück 179...185, wobei sich die Zugmaschine unterhalb des Mastes 179 befand (vgl. Fig. 28).

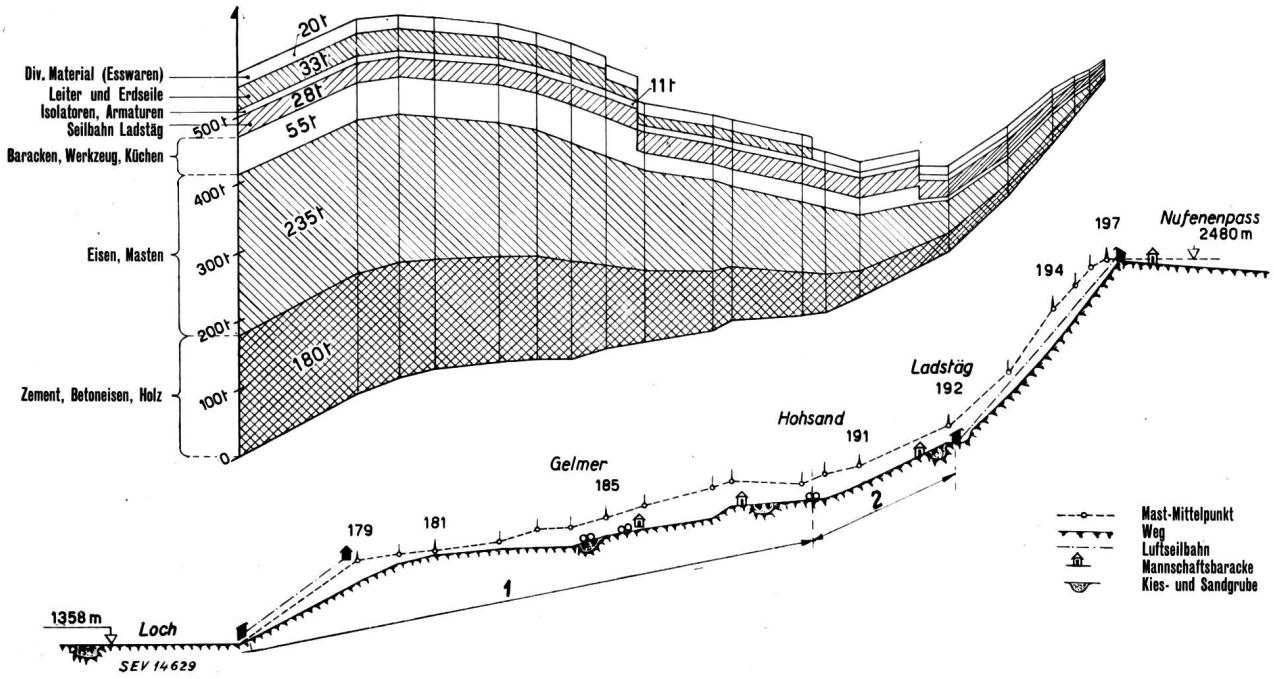

Fig. 28
Materialtransportgewichte der Gebirgsstrecke
(über Transportweg aufgetragen)
1 mit Traktor befahrbare Strecke; *2* Maulesel-Transport

Lawinenschutz

Wie bereits in den Erläuterungen über die Trasse erwähnt wurde, durchquert die Leitung vor dem Lad-

stäg einen breiten Lawinenhang. Die darin stehenden Tragwerke mussten durch Mauern geschützt werden. Die Grösse dieser Schutzmauern wurde auf Grund des ausserordentlich schneereichen Winters 1945/46 festgelegt, in welchem auf der in Frage stehenden

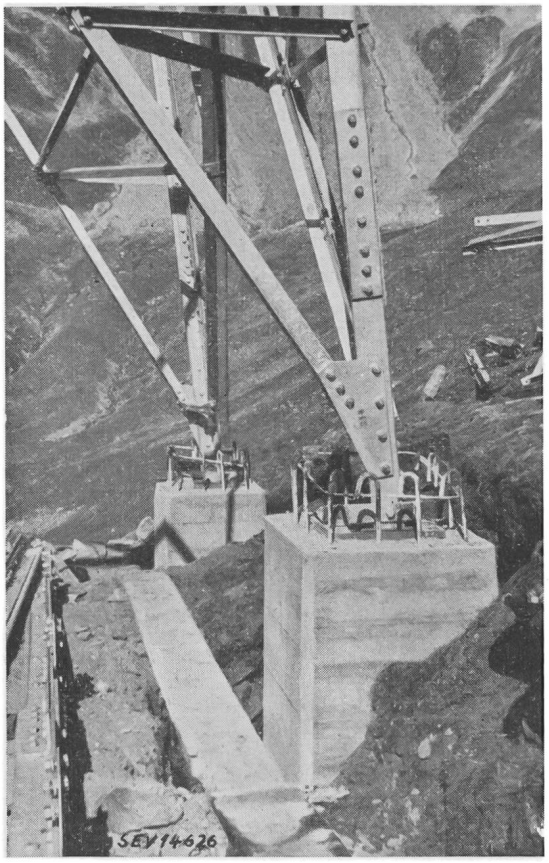

Fig. 29
Fundament vor Eingiessen, bzw. Aufbetonieren

Strecke bis gegen 6 m gesetzter Schnee gemessen wurden. Es war anfänglich beabsichtigt, die Masten durch Barrieren in einer Eisenkonstruktion mit Querbalken aus Holz zu schützen. Dies hätte jedoch wiederum die Transportmenge erheblich vergrössert und zudem wären dafür auch weitere Fundationen nötig gewesen. Die Schutzmauern wurden deshalb aus Mörtel- und Trockenmauerwerk aufgebaut, wofür die nötigen Steine direkt oberhalb den jeweiligen Baustellen gewonnen werden konnten. Zusätzlich zu transportieren waren nur noch der erforder-

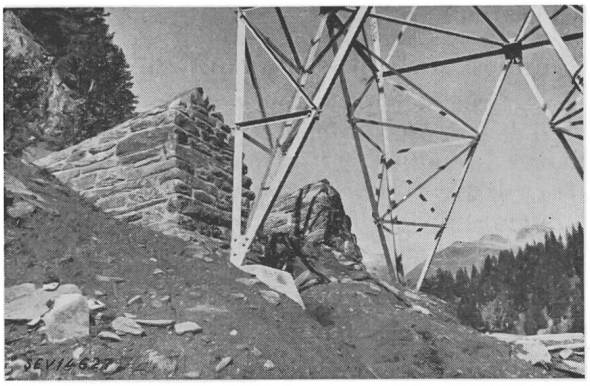

Fig. 30
«Kleine» Lawinenschutzmauern eines Tragmastes

liche Zement und Sand. Es wurden «kleine» und «grosse» Schutzmauern erstellt. Diejenigen Mauern, welche die beiden obern Mastfüsse getrennt schützen, werden als «kleine» bezeichnet (siehe Fig. 30), als «grosse» diejenigen nach Fig. 31, welche den ganzen Mast als solchen schützen. In der Regel besteht der

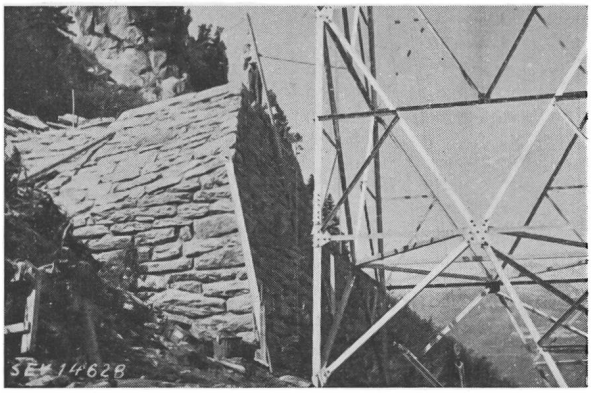

Fig. 31
«Grosse» Lawinenschutzmauer eines Tragmastes

Prozentuale Aufteilung der Kosten

Gebirgsstrecke			*Talstrecke*		
Ausführung	Vorprojekte, Vermessung	1,3	Ausführung	Vorprojekte, Vermessung	2,5
	Unterkunft und Diverses	2,9		Entschädigungen	4,7
	Auslegen und Regulierung (Leiter und Erdseil)	2,9		Auslegen und Regulierung (Leiter und Erdseil)	6,1
	Montage Gittermasten	6,2		Montage der Masten	6,6
	Aushub, Fundamente	20,3		Aushub, Fundamente, inkl. Schutzbauten	11,0
	Auslad, Transporte	11,2		Auslad, Transporte	7,1
	Lawinenschutz	13,5			
Material	Armaturen, Erdungen etc.	2,6	Material	Armaturen, Erdungen etc.	2,9
	Isolatoren	2,7		Isolatoren	7,2
	Leiter, Erdseil	6,2		Leiter, Erdseil	18,5
	Eisenmasten	30,2		Masten: Eisenteile zu Holzmasten 6,4; Holzstangen 9,8; Eisenmasten 17,2	33,4
	Fertige Leitung	100		Fertige Leitung	100

aussen befindliche Teil aus Mörtelmauerwerk, die innere Füllung aus Trockenmauerwerk. Der Inhalt der kleinen Schutzmauern ist im Durchschnitt etwa 60 m³, derjenige der grossen variiert je nach Geländeverhältnissen zwischen 150 m³ bis 350 m³. Sie sind so geformt, dass sie den Mast von Schnee und Lawinendruck entlasten.

Leitungskosten der Tal- und Gebirgsstrecke

Die prozentuale Aufteilung der Leitungskosten auf Material und Ausführung, getrennt für die beiden Leitungsabschnitte der Tal- und Gebirgsstrecke, zeigt Tabelle I. Ein Vergleich zwischen den beiden Abschnitten ist nicht ohne weiteres möglich, da es sich um Leitungen gänzlich verschiedener Ausführung handelt. Immerhin fällt sofort der viel grössere Arbeitsanteil auf der Gebirgsstrecke auf. Interessant ist ferner, dass der prozentuale Kostenaufwand für die Masten für beide Abschnitte ungefähr der gleiche ist. Die relativ kleinen Spannweiten der Leitung auf der Talstrecke wirken sich im grösseren Prozentsatz der Kosten für die Isolatoren aus.

Die effektiven Kosten pro km der Leitung der Talstrecke verhalten sich zu denjenigen der Gebirgsstrecke ungefähr wie 1 : 3,5.

Adresse der Autoren:
M. Preiswerk, Direktor der Aluminium-Industrie-A.-G., Lausanne-Ouchy.
W. Hauser, Ingenieur der Aluminium-Industrie-A.-G., Lausanne-Ouchy; jetzt: Ingenieur der Aare-Tessin A.-G. für Elektrizität, Olten.

Ueber den Spannungsaufbau im Kaskadengenerator und in ähnlichen Spannungsvervielfachern

Von *Th. Gerber*, Bern

621.319.52

Es wird eine Reihe von Schaltungen behandelt, die unter alleiniger Verwendung von Ventilen und Kondensatoren die Erzeugung konstanter Gleichspannung aus Wechselstrom unter gleichzeitiger Spannungsvervielfachung bewirken. Zunächst wird die Theorie des Spannungsaufbaus im Kaskadengenerator (Greinacher) für die m-fache unbelastete und ideale Schaltung entwickelt. Es werden sodann die Resultate für die Zwei- bis Sechsfachschaltung mitgeteilt, für letztere überdies die ausführliche Rechnung. Behandelt wird ferner der Kaskadengenerator mit der Greinacher-Verdopplungsschaltung als Grundstufe. Anschliessend folgt die Berechnung für die Pyramidenschaltung (Schenkel) sowie die erweiterte Pyramiden- und Kaskadenschaltung, die ebenfalls von der Verdopplung bis zur Versechsfachung durchgeführt wird.

Das letzte Kapitel behandelt experimentelle Untersuchungen an einigen der wichtigsten Schaltungen. Die Messungen ergeben weitgehende Uebereinstimmung mit der Theorie. Als Ergänzung dazu wird noch das Verhalten der Schaltungen bei Belastung geprüft. Gemessen werden sowohl Klemmenspannung als auch Grad der Welligkeit in Abhängigkeit von der Stromentnahme. Beigefügte Oszillogramme lassen die Form der Welligkeit erkennen.

L'auteur traite de différents couplages, où il n'est fait usage que de soupapes et de condensateurs, pour la production d'une tension continue constante à partir de courant alternatif, avec multiplication simultanée de la tension. Il développe tout d'abord la théorie de la multiplication de tension par générateurs en cascade (Greinacher) pour le couplage idéal, sans charge, à m étages, puis il indique les résultats pour les couplages doubles à sextuples, avec calcul détaillé dans ce dernier cas. M. Gerber traite ensuite des générateurs en cascade avec circuit de doublage de Greinacher servant d'étage initial et donne le calcul du couplage en pyramide, ainsi que d'une extension du couplage en pyramide et en cascade, également du double au sextuple.

Dans le dernier chapitre, il montre les résultats d'expériences faites avec les principaux modes de couplage. Les mesures concordent fort bien avec la théorie. Pour terminer, M. Gerber examine le comportement des couplages affectés d'une charge. La tension aux bornes et le degré d'ondulation ont été relevés en fonction du courant débité. Des oscillogrammes indiquent la forme des ondulations.

I. Spannungsaufbau in den Kaskadenschaltungen

1. Einschwingungstheorie für die m-fache Kaskadenschaltung

Einleitung

Im Jahre 1920 beschrieb *Greinacher* eine Spannungsvervielfachungsschaltung [1, 2] [1]), die unter der Bezeichnung Kaskadenschaltung bekannt geworden ist (Fig. 1). Sie zeichnet sich vor anderen ähnlichen Schaltungen dadurch aus, dass sie eine gleichmässige Verteilung der erzielten Gleichspannung auf die einzelnen Kondensatoren erreicht. Deshalb ist sie zur Erzeugung von Höchstspannungen geeignet; sie bildet denn auch die Grundlage für die Entwicklung des Kaskadengenerators, wie er in den Jahren 1932...34 von *Cockroft* und *Walton* (Cambridge) [3] und *Bouwers* (Eindhoven) [4] ausgeführt wurde.

Der Spannungsaufbau im Kaskadengenerator wurde seinerzeit von *Greinacher* beschrieben und für spezielle Einschaltbedingungen bis zur Fünffachschaltung berechnet [2, 5]. *Jaggi* stellte sodann die eingehende Theorie für die Zwei- und Vierfachschaltung [6, 7] auf. Im folgenden wird nun die allgemeine Theorie für den *m*-fachen [2]) unbelaste-

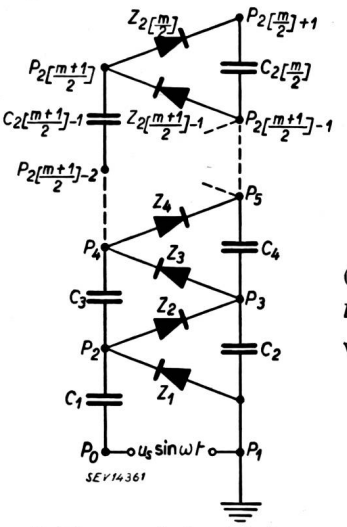

Fig. 1
Allgemeine *m*-fache Kaskadenschaltung
Z Gleichrichterelemente (Ventile); *C* Kondensatoren; *P* Schaltpunkte; u_s Scheitelwert der Eingangswechselspannung

[1]) siehe Literaturverzeichnis am Schluss.

[2]) Eine 2*m*-fache Schaltung wird auch als *m*-stufig bezeichnet. In ihr wird die maximale Gleichspannung durch geradzahlige Vervielfachung erzeugt. Da aber allgemein jede Vervielfachung hergestellt werden kann, wird im folgenden stets nur von einer *m*-fachen Schaltung gesprochen.