Erfahrungen und Messungen an den Tragseilen der Kabelkrane und Betonierbühnen beim Bau der Staumauer Räterichsboden

Autor(en): **Wyss, Th. / Bosshart, H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **69 (1951)**

Heft 34

PDF erstellt am: **01.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-58910

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

69. Jahrgang Nachdruck von Bild oder Text nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet
Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich Nummer 34

Erfahrungen und Messungen an den Tragseilen der Kabelkrane und Betonierbühnen beim Bau der Staumauer Räterichsboden

DK 621.87.085,3

Von Prof. Dr. sc. techn. TH. WYSS, EMPA, Zürich, und Dipl. Ing. H. BOSSHART, in Firma Locher & Cie., Zürich

1. Allgemeines

Mit Rücksicht auf die zahlreichen im Alpengebiet im Bau befindlichen oder projektierten Staumauerbauten mag es von Interesse sein, hier einige Untersuchungen und Erfahrungen an einem Bauelement zu veröffentlichen, das für die Errichtung dieser grossen Bauwerke immer wieder Verwendung findet. Es handelt sich um das Drahtseil in seiner Verwendung als Tragseil von Kabelkranen, Betonierbühnen, oder bei Luftseilbahnen, die zur Erschliessung solcher Baustellen dienen, und an dem oft sehr schwere Lasten hängen. Insofern das Drahtseil Bestandteil einer grossen Baumaschine bildet, ist der projektierende Ingenieur nicht an bestimmte Vorschriften gebunden (im Gegensatz zu Anlagen für den Personentransport), sondern er kann für die Bemessung dieser Tragelemente und für die Beurteilung der Sicherheit in erweitertem Masse vom erreichbaren Wissen über ihr Verhalten ausgehen, soweit es als gesichert gilt.

In einer früheren Veröffentlichung [1]) wurden eine Reihe von Ergebnissen der an der EMPA durchgeführten Untersuchungen an Stahldrahtseilen über den Einfluss sekundärer Biegung und innerer Pressungen bekannt gegeben. Später [2]) folgten nähere Angaben über die Biegebeanspruchungen an Tragseilen von Schwebebahnen im Bereich der Auflast. Schon beim Bau der Lucendro-Talsperre kamen einige der neu gewonnenen Erkenntnisse über die Berechnung der Tragseile zur Anwendung.

Eine willkommene Gelegenheit, einen vertieften Einblick in das Arbeiten der Tragseile bei grossen Spannweiten zu erhalten, zeigte sich nun beim Bau der Staumauer Räterichsboden. Auf Anregung der Firma Locher und in Zusammenarbeit mit der EMPA wurden hier im Auftrag der Bauunternehmung Staumauer Räterichsboden (Locher & Cie., Frutiger Söhne, Züblin & Cie. und Bürgi & Huser) eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt. Ueber das Verhalten der betreffenden Tragseile beim einfachen Zugversuch sowie bei Querbelastung wurde bereits berichtet [2]). Nachfolgend sollen nun die Ergebnisse der Messungen am Bauwerk selbst sowie die mit den Tragseilen während der Bauperiode gemachten Erfahrungen bekanntgegeben werden.

Beim Bau der Staumauer Räterichsboden-Grimsel in den Jahren 1948 bis 1950 wurde ein System von Kabelkranen und Betonierbühnen errichtet. Dabei übernahmen die Betonierbühnen den Beton von den längs der Staumauer verlaufenden Kabelkranen, transportierten ihn in Querrichtung zur Mauer und verteilten ihn an der Einbringstelle (Bild 1). Die gesamten auf Drahtseilen geführten Lasten betrugen total 180 t. Dazu kamen die Eigengewichte der Tragseile von rund 120 t. Die Spannweiten betrugen 450 bis 580 m.

Bei der Projektierung und Bemessung der Anlage, bei der Wahl der Seile, bei der Bestimmung der Durchhänge, Seilzüge und Beanspruchung der Seile, bei der Festlegung der Abstützungen und Verankerungen, sowie bezüglich der Vorkehrungen für die Montage stellten sich zahlreiche Probleme, deren zweckmässigste Lösung mit Hilfe praktischer Erfahrungen — soweit sie zur Verfügung standen — rechnerischem Nachweis und Versuchen in der EMPA und auf der Baustelle gesucht wurde. Der Gesichtspunkt der Betriebsicherheit stand dabei im Vordergrund. Ausserdem durfte in Anbetracht des Ausmasses der Anlage auch die Forderung der wirtschaftlichen Bemessung nicht aus dem Auge gelassen werden.

2. Anordnung der Seile, statisches System, Wahl der Seilquerschnitte

Gegen die wasserseitige Flucht waren zwei brückenartige Betonierbühnen B_1 und B_2 (Bild 2), von 40 und 31 t Leergewicht mit einer Leistungsfähigkeit von je 60 m³ Beton/h angeordnet. Sie wurden durch zwei Bleichert-Kabelkrane K_2 und K_3 von je 9 t Tragkraft beschickt, die seinerzeit schon beim Bau der Spitallammsperre verwendet wurden. Zur Bestreichung der wasserseitigen Flucht wurde noch ein Kabelkran K_1 zu 4 t Tragkraft eingesetzt und zur Betonierung des luftseitigen Mauerfusses ein radialfahrbarer Kabelkran K_4 mit 7 t Nutzlast (Bild 3).

Auf der rechten Talseite liessen sich die Seile direkt im Fels des Talhanges verankern, während auf der linken Talseite Abstützungen von 20 bis 27 m Höhe nötig waren. Diese wurden als Pendelstützen ausgebildet; sie trugen drehbar gelagerte Kabelschuhe, über die die Seile liefen und an denen sie festgeklemmt waren (Bilder 4 und 5). Sämtliche Seile wurden beidseitig fest verankert; die bei Luftseilbahnen übliche konstante Spannung der Seile mit Hilfe von Spanngewichten konnte bei der vorhandenen Summation grosser Seilzüge (total rd. 1100 t) nicht mehr in Frage kommen.

In statischer Hinsicht handelt es sich im vorliegenden

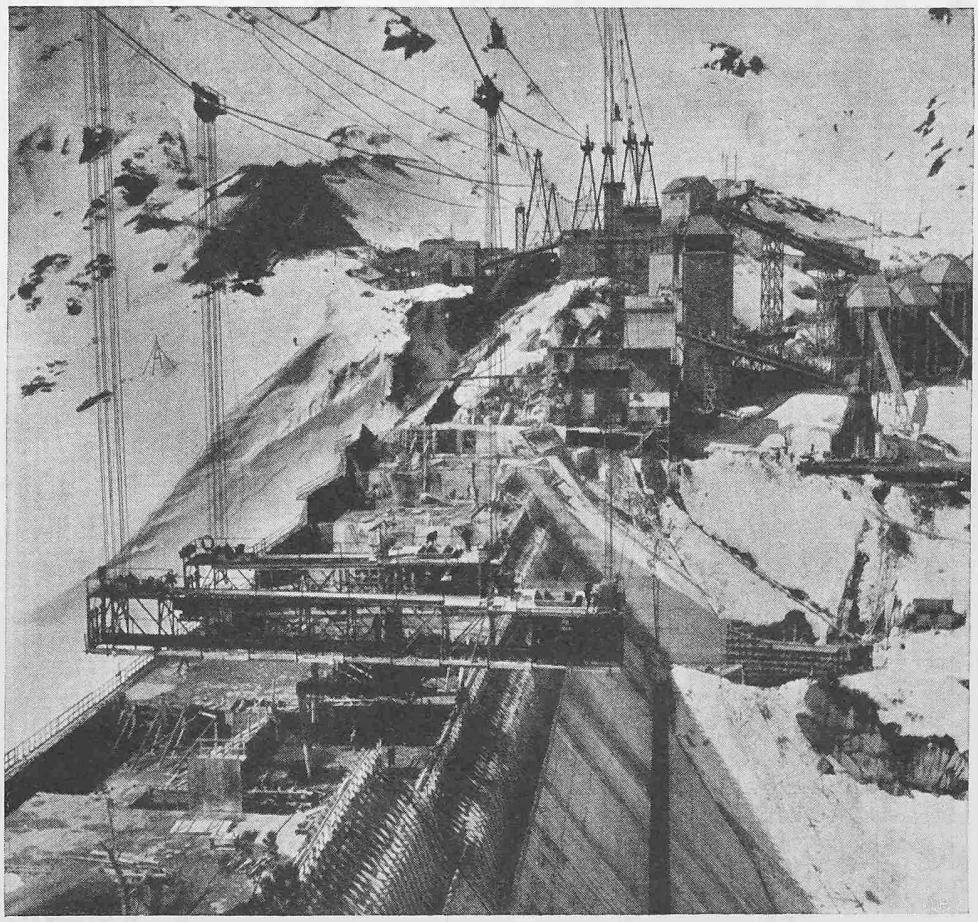

Bild 1. Staumauer Räterichsboden. Anordnung der Tragseile für die Betonierbühnen. Im Vordergrund die Bühnen B_1 und B_2, im Hintergrund die Pendelstützen, darunter die Betonaufgabestelle, rechts davon die Betonieranlage

[1]) SBZ 1949, Nr. 14, 15, 16.
[2]) SBZ 1949, Nr. 38.

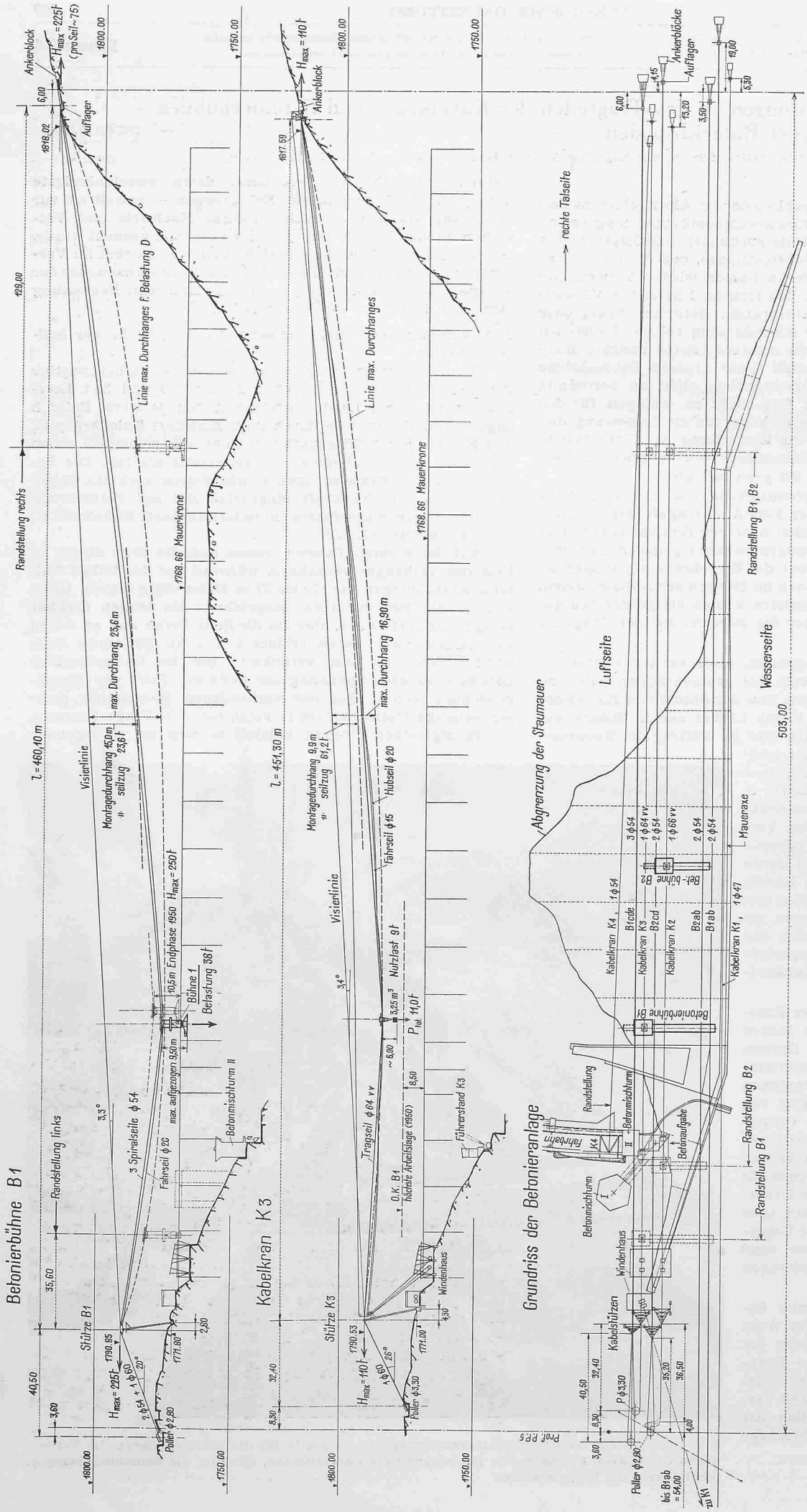

Bild 2. Staumauer Räterichsboden. Uebersichtsplan 1 : 2000 der Tragseile für die Betonier- und Kabelkrane

Fall um ein Spannungsproblem zweiter Ordnung. Seine Lösung ist in allgemeingültiger Form in einem Aufsatz von Professor Dr. *F. Stüssi*: «Statik der Seile» [3]), veröffentlicht worden und musste nur sinngemäss auf den vorliegenden Fall angewendet werden.

Infolge der topographischen Verhältnisse bereitete die Plazierung der Verankerungen einige Schwierigkeiten (Bild 6). Ausserdem mussten die Abstützhöhen und damit die Durchhänge begrenzt werden, woraus sich hohe Seilzüge ergaben. Bei den Kabelkranen K_2 und K_3 wurden Seile von 64 bis 66 mm Durchmesser verwendet mit einem Sicherheitsverhältnis (Bruchlast geteilt durch max. Seilzug) $n = 3$. Bei den Betonierbühnen mit maximalen Aufhängelasten von 26 bis 40 t pro Aufhängung wurden als Tragelemente zwei bis drei Spiralseile von 54 mm Durchmesser pro Aufhängung gewählt, und zwar wurden diese Seile in geringem Abstand voneinander angeordnet, so dass sie von starren zwei- bzw. dreirilligen Rollen befahren werden konnten (Bild 7).

Die dreirilligen Rollen sind auf der schweren Seite der Betonierbühne 1 zur Anwendung gekommen. Die Rollenbatterien wurden so aus acht zwei- bzw. dreirilligen Rollen gebildet. Dadurch wurden die Rollendrücke pro Seil um das entsprechende Vielfache reduziert. Auf Balanciers wurde verzichtet, was voraussetzte, dass die Seile genau gleich vorgespannt und von Zeit zu Zeit nachreguliert wurden. Die Erfahrung erwies diese Lösung als zweckmässig, indem die Differenzen in den Seilkräften nie so gross wurden, dass sie sich nachteilig ausgewirkt hätten.

[3]) Abhandlungen des IVBH, Bd. 6.

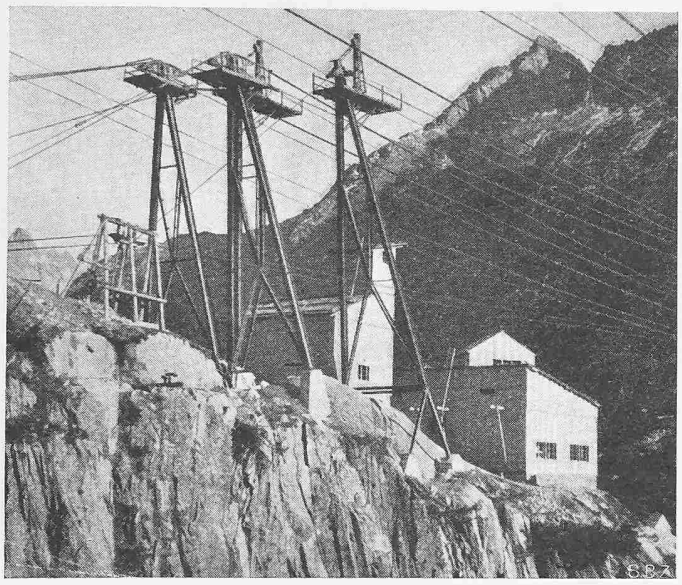

Bild 4. Pendelstützen auf der linken Talseite, darunter Windenhäuser für die Kabelkrane

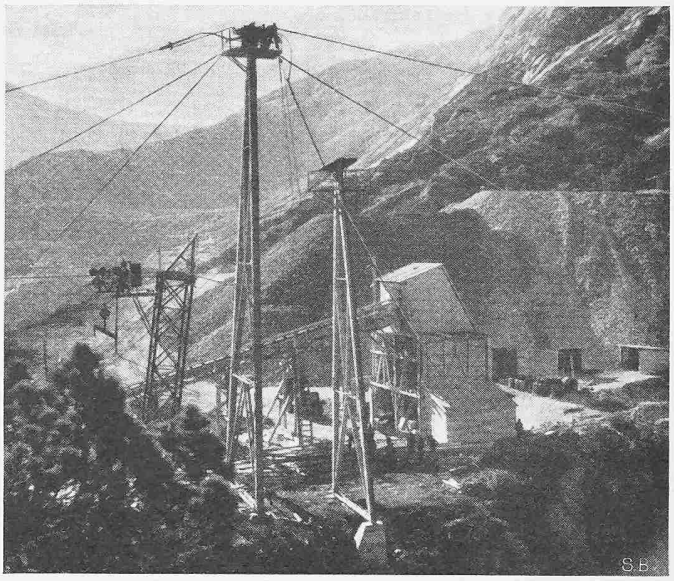

Bild 5. Montage der Pendelstützen: Auflegen der Tragseile auf die Kabelschuhe

3. Seilbeanspruchungen

Bei der Wahl der Seile und der Festlegung der zulässigen maximalen Seilkräfte stellte sich die Frage nach der Beanspruchung eines Seiles, bzw. der Beanspruchung der einzelnen Drähte infolge der Zugkraft, der Biegung unter den Rollen und der Pressungen zwischen den Rollen und den Drähten. Weiter war festzustellen, wie gross diese Beanspruchungen werden dürfen, ohne dass die Dauerhaftigkeit und die Sicherheit des Seils beeinträchtigt werden. Es handelt sich dabei um sehr komplexe Probleme, über die keine exakten, allgemein anerkannten und in der Erfahrung bestätigten Kriterien vorhanden sind. Ueblicherweise werden einfache Faustregeln angewendet. Als Unterlagen zur Ermittlung der Seilbeanspruchungen dienten die Ergebnisse der in der EMPA durchgeführten Untersuchungen, von denen einige Ergebnisse bereits in den Veröffentlichungen [1]) und [2]) bekanntgegeben worden sind.

Auf der Baustelle Räterichsboden kamen die auf Tabelle 1 aufgeführten Tragseile zur Verwendung, wobei es sich teils um Spiralseile, teils um voll verschlossene Stahldrahtseile handelt.

Die EMPA hat zwei Seile eingehend untersucht, deren Hauptdaten auf folgender Seite angegeben sind. Bei

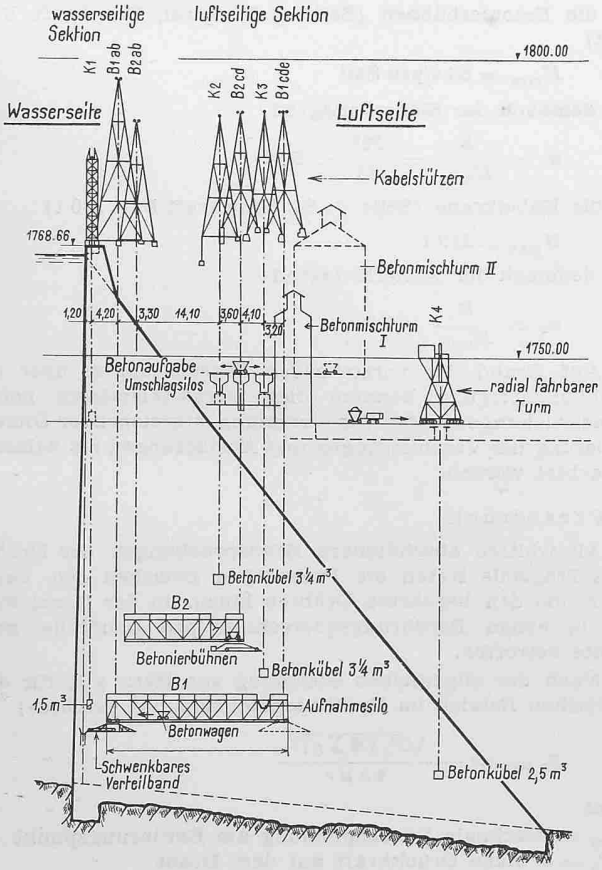

Bild 3. Anordnung der Kabelkrane K_1 bis K_4 und der Betonierbühnen B_1 und B_2 mit den zugehörigen Kabelstützen, 1 : 1250

Tabelle 1. Verwendete Tragseile

Seil	Durchmesser mm	Aufbau	Metallquerschnitt F cm²	Gewicht g_0 kg/m	Bruchlast t	Herkunft Bemerkung
$B_{1\,ab}$	2 · 54	Spiral 61 · 6	17,2	14,6	225	Schweiz
$B_{2\,ab}$	2 · 54	Spiral 61 · 6	17,2	14,6	225	Schweiz
$B_{2\,cd}$	2 · 54	Spiral 61 · 6	17,2	14,6	225	Schweiz
$B_{1\,cde}$	3 · 54	Spiral 61 · 6	17,2	14,6	225	Schweiz
K_1	1 · 47	Spiral 61 · 5,4	13,0	10,9	165	Schweiz
K_2	1 · 66	voll verschlossen	27,0	25,0	340	Deutschland gebrauchter Zustand
K_3	1 · 64	voll verschlossen	25,3	23,8	340	England
K_4	1 · 54	Spiral 61 · 6	17,2	14,6	225	Schweiz

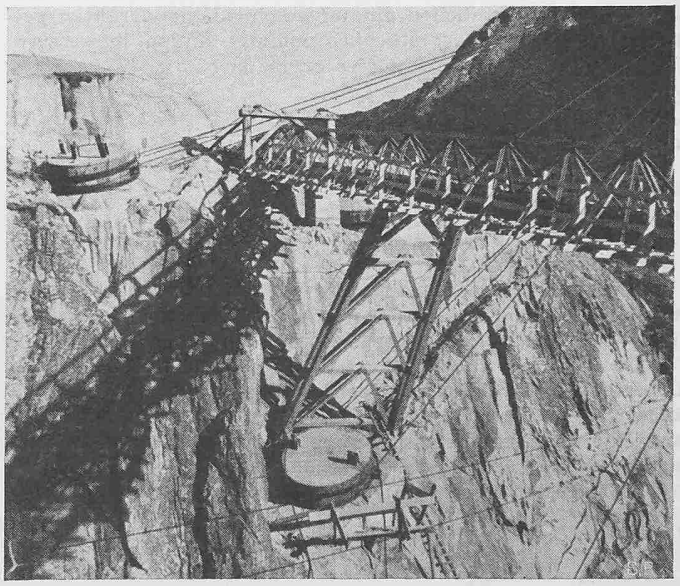

Bild 6. Seilverankerungen durch Poller von 2,8 m Durchmesser, teilweise in der Felswand einer Seitenschlucht angebracht

Bild 7. Anordnung der Laufrollen der Betonierbühnen

R_{11} = Krümmungsradius der Mittellinie des Drahtes ∽ 30 cm
R_{12} = Krümmungsradius des Drahtes im Querschnitt = 0,3 cm
R_{21} = Laufradius der Scheibe = 21 cm
R_{22} = Radius der Rille = 2,7 cm

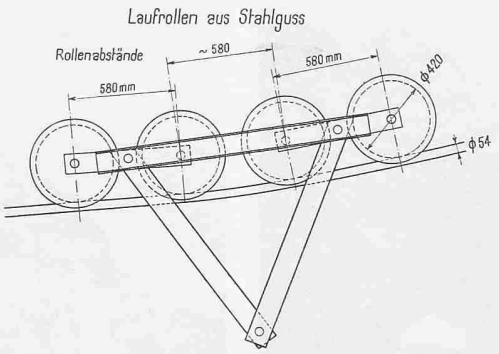

Bild 7a. Masstab 1 : 40

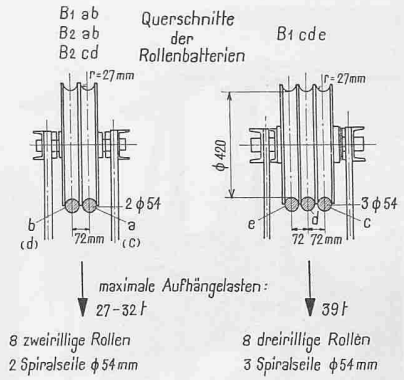

Bild 7b. Masstab 1 : 30

beiden Seilen wurde das Spannungsdehnungs-Diagramm mit Entlastungen bis 100 t Zugkraft aufgenommen, sowie die Biegespannungen infolge Querlasten von 1,0 und 2,0 t durch Spannungsmessungen ermittelt.

Hauptdaten der untersuchten Seile

1) Spiralseil	∅ =	54,7 mm
Drahtfestigkeit	β_z =	170 kg/mm²
Trägheitsmoment	J_u =	313 000 mm⁴
Trägheitsmoment	J_v =	3 880 mm⁴
Elastizitätsmodul des Seils	E_1 =	12 050 kg/mm²
2) Voll verschlossenes Seil	∅ =	64 mm
Zugfestigkeit des Formdrahtes	β_z =	130 kg/mm²
Zugfestigkeit der Runddrähte	β_z =	170 kg/mm²
Trägheitsmoment	J_u =	700 000 mm⁴
Trägheitsmoment	J_v =	3 235 mm⁴
Elastizitätsmodul des Seils	E_1 =	11 740 kg/mm²

a) Seilbiegung

Die Versuchswerte für die Spannungen in den äusseren Drähten infolge Seilbiegung unter einer Rolle stimmen mit den theoretischen Formeln von Isaachsen weitgehend überein, wenn in diesen Formeln der Koeffizient = 0,6 gewählt, d. h. wenn gesetzt wird:

$$(1) \qquad \sigma_{b\,\max} = 0{,}6\,\frac{Q}{2}\,\frac{d}{2}\sqrt{\frac{E}{J_v S}}$$

bei verschieblichen Drähten, Spiralseil, bzw.

$$(2) \qquad \sigma_{b\,\max} = 0{,}6\,\frac{Q}{2}\,\frac{\delta}{2}\sqrt{\frac{E}{J_u S}}$$

bei unverschieblichen Drähten, voll verschlossenes Seil;

dabei bedeuten:
σ_b die Biegebeanspruchung im Draht
Q die Querlast (Rollendruck)
d den Seildurchmesser
δ den Drahtdurchmesser
S die Seilkraft
J_v das Trägheitsmoment des Seils bei verschieblichen Drähten
J_u das Trägheitsmoment des Seils bei unverschiebl. Drähten

Bei den Spiralseilen wurde mit verschieblichen, bei den voll verschlossenen Seilen mit unverschieblichen Drähten gerechnet. Für die Gesamtbeanspruchung in den äussersten Drähten eines Seilquerschnittes ergibt sich:

$$(3) \qquad \sigma_z + \sigma_b = \sigma_{\max}$$

$$(4) \qquad \sigma_z = \frac{S_{\max}}{F \cos\varphi}$$

hierin bezeichnen:
σ_z die Zugbeanspruchung im Seil
F den metallischen Querschnitt des Seils
φ den Schlagwinkel

Der Einfluss der benachbarten Rollen kann dabei in den meisten Fällen vernachlässigt werden, da die Biegespannungen längs dem Seil rasch abfallen.

Da sich die Spannung in einem äusseren Draht beim Ueberfahren durch jede einzelne Rolle von σ_z auf $\sigma_z + \sigma_b$ ändert, tritt für den Draht die Gefahr des Ermüdungsbruches auf. Für die Ermüdungsspannung kann auf Grund von Versuchen in der EMPA die Spannung für eine Million Lastwechsel gesetzt werden. Hierfür gilt nach [1])

$$(5) \qquad \sigma_{\text{Bruch}} = \sigma_0 \left\{ 1 + \alpha \frac{A}{B} \right\}$$

$$\frac{A}{B} = \frac{\sigma_z}{\sigma_z + \sigma_b}$$

$\alpha = \sim 1{,}1$ bis 1,3 (aus Versuchen der EMPA)

Bei Annahme einer 1,5fachen Sicherheit soll die zulässige Spannung angenähert gleich der Proportionalitätsgrenze des Drahtes werden und es kann gesetzt werden:

$$(6) \qquad \sigma_{\text{zul}} = \frac{\sigma_0}{1{,}5} \left\{ 1 + \alpha \frac{A}{B} \right\} \leq \frac{\beta_z}{2} \sim \sigma_p$$

$$(7) \qquad \sigma_z + \sigma_b < \sigma_{\text{zul}}$$

Damit die äusseren Drähte infolge Seilbiegung nicht auf Druck beansprucht werden, was zur Gefahr des Stauchens führt, gilt ferner die Bedingung:

$$(8) \qquad \sigma_b < \sigma_z$$

Der gefährdete Querschnitt befindet sich am Ende der befahrenen Seilstrecke. Aus den Bedingungen (7) und (8) ist bei bekanntem Rollendruck Q eine obere und eine untere Grenze für den zulässigen Seilzug gegeben, wie aus dem Diagramm Bild 9 leicht herauszulesen ist. Darin sind in Funktion von S aufgetragen die Beanspruchungen σ_z, die Beanspruchungen σ_b bei zwei verschiedenen Werten für Q, die Kurven $\sigma_z + \sigma_b$, sowie die Werte σ_{zul} mit $\sigma_p \sim {}^1/_4\,\beta_z$ als obere Grenze, ferner die Stauchpunkte als untere Grenze.

b) Grösste Seilzugkräfte

Die für die Erreichung der obersten Betonierkote notwendigen und für die Vorspannung der Seile massgebenden maximalen Seilzüge $H_{\max}$ betrugen:

für die Betonierbühnen (Seile ∅ 55 spiral, Tragkraft B = 225 t)

$$H_{\max} = 83 \text{ t/pro Seil}$$

und demnach der Sicherheitsgrad

$$n_z = \frac{B}{H_{\max}} = \frac{225}{83} = 2{,}70$$

für die Kabelkrane (Seile ∅ 64, Tragkraft B = 330 t)

$$H_{\max} = 110 \text{ t}$$

und demnach der Sicherheitsgrad

$$n_z = \frac{B}{H_{\max}} = 3{,}0$$

Auf Grund der vorstehenden Betrachtungen über die Ermüdungsbiegung konnten diese verhältnismässig hohen Beanspruchungen unter Voraussetzung hinreichender Dimensionierung der Verankerungen und Abstützungen als zulässig betrachtet werden.

c) Pressdruck

Als weitere abschätzbare Beanspruchungen der Drähte eines Tragseils treten die Pressungen zwischen den Laufrollen und den berührten Drähten hinzu. In der Regel werden in einem Berührungsquerschnitt pro Laufrolle zwei Drähte betroffen.

Nach der allgemeinen Gleichung von Herz gilt für den elastischen Bereich im Berührungsmittelpunkt gemäss [1])

$$(9) \qquad p_{0\,\max} = -\frac{\sqrt{P_0\,[E\,\Sigma\varrho]^2}}{4\,\pi\,\mu\,\nu}$$

wobei
$p_{0\,\max}$ = maximale Druckspannung am Berührungspunkt
P_0 = örtliche Druckkraft auf dem Draht
$\Sigma\varrho$ = Summe der Hauptkrümmungen
$\mu\nu$ = Hilfswerte

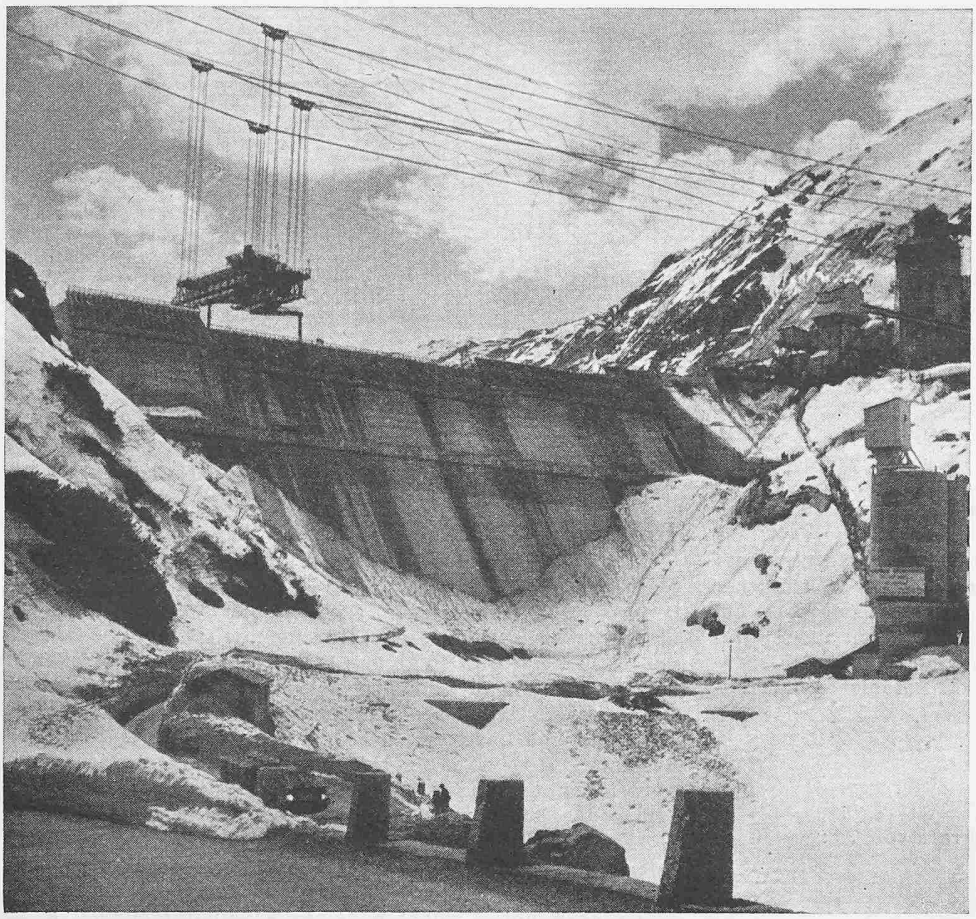

Bild 8. Gesamtansicht der Transportanlage von der Luftseite der Staumauer gesehen

Plastische Verformungen treten auf, wenn dieser Wert näherungsweise

(10) $p_{0\,max} \geq 2\,\beta_z$

d. h. wenn die Vergleichsspannung $\sigma_g \geq 0{,}75\,\beta_z$ oder gleich der Fliessgrenze des Drahtmaterials wird. Vom Wert $2\,\beta_z$ an bleiben die Werte $p_{0\,max}$ auch bei höheren Lasten infolge Fliessen des Materials konstant; es tritt aber dabei ein Auswalzen und Aufhärten des Materials ein, was je nach der Intensität des Betriebes früher oder später zu Drahtbrüchen führt. Die rechnerischen Pressdrücke betrugen bei der betrachteten Anlage bei den Betonierbühnen (Spiralseile ∅ 55) $p_{0\,max} = 440$ kg/mm², bei den Kabelkranen K_2 und K_3 (voll verschlossene Seile) $p_{0\,max} = 75$ kg pro mm² und beim Kabelkran K_4 (Spiralseil ∅ 55) $p_{0\,max} = 350$ kg/mm². Als zulässige Werte werden erachtet:

für nicht permanente Anlagen:

$$p_{0\,zul} = 2{,}4\,\beta_z = 340 \text{ kg/mm}^2$$

für permanente Anlagen:

$$p_{0\,zul} = 2{,}0\,\beta_z = 280 \text{ kg/mm}^2$$

Bei gewöhnlichen Spiralseilen hält es sehr schwer, die Pressdrücke unter das zulässige Mass zu bringen und damit die Gefahr von Drahtbrüchen auszuschalten. Bei den Betonierbühnen, die während dem eigentlichen Betonierbetrieb fast stationär über einem Staumauerblock bleiben, ist allerdings die Gefährdung der Seile von dieser Seite als gering zu betrachten. Es traten denn auch während der ganzen Bauzeit im befahrenen Bereich trotz der hohen Beanspruchungen keine Drahtbrüche auf. Anders dagegen bei Kabelkran K_4, bei dem das Tragseil intensiv befahren wurde; hier war nach achtmonatigem Betrieb ein Drahtbruch auf der Oberseite des Seiles festzustellen. Durch Anwendung verschlossener Seiltypen ergeben sich weitaus günstigere Verhältnisse. Die praktische Anwendbarkeit der oben angeführten Kriterien zur Beurteilung der Seilbeanspruchungen muss vorerst noch durch weitere Versuche und Beobachtungen erprobt werden. In den Tabellen 2 und 3 sind einige rechnerische Ergebnisse zusammengestellt, aus denen hervorgeht, dass mit den effektiven Beanspruchungen sehr weit gegangen wurde, insbesondere mit den Pressdrücken.

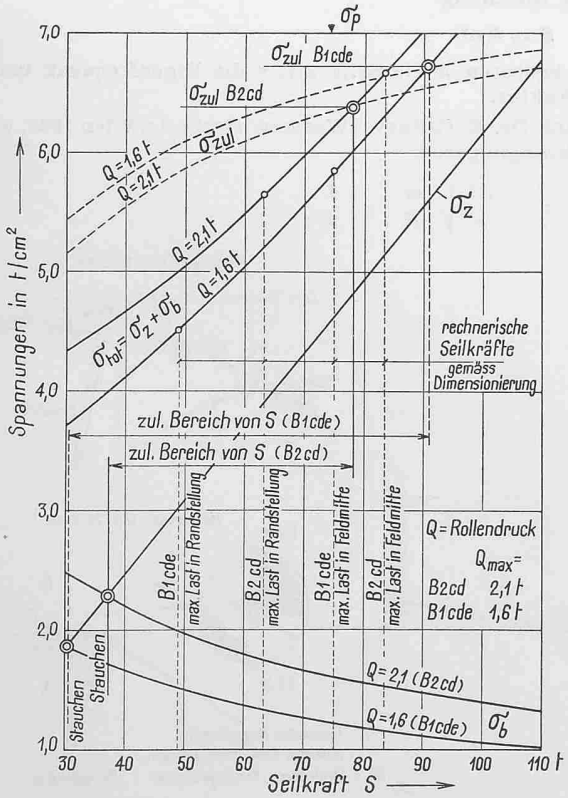

Bild 9. Tragseile zu den Betonierbühnen. Spiralseile 45 mm ∅ (61 × 6 mm). Drahtbeanspruchungen unter den Laufrollen

Tabelle 2. Berechnete maximale Beanspruchungen der Tragseile, Zug- und Biegebeanspruchungen für maximale Lasten in Feldmitte

Seil	S_{max} t	n_z	σ_z t/cm²	σ_b t/cm²	$\sigma_z + \sigma_b$ t/cm²	σ_{zul} t/cm²
a) Betonierbühnen						
$B_{1\,ab}$	79,2	2,85	4,61	1,61	6,22	6,36
$B_{2\,ab}$	81,0	2,78	4,72	1,45	6,17	6,44
$B_{2\,cd}$	83,6	2,79	4,87	1,78	6,65	6,35
$B_{1\,cde}$	74,1	3,03	4,32	1,43	5,75	6,40
b) Kabelkrane						
K_1	58,7	2,8	4,50	2,20	6,70	6,10
K_2*)	93,8	3,6	3,71	2,15	5,86	5,95
K_3	109	3,1	4,31	1,93	6,24	6,14
K_4	78,3	3,0	4,35	1,00	5,35	6,65

*) Laststellung bei Betonaufgabe

Tabelle 3. Flächenpressungen

a) Für Spiralseile bei Verteilung der Last auf zwei Drähte. $R_{11} = 30$ cm, $R_{12} = 0{,}3$ cm, $R_{21} = 21$ cm, $R_{22} = -2{,}7$ cm

Tragseil		$B_{1\,ab}$	$B_{2\,ab}$	$B_{2\,cd}$	$B_{1\,cde}$	K_4
Last Q	kg	1850	1700	2100	1600	1100
$p_{0\,max}$	kg/mm²	418	406	438	400	350

$p_{0\,zul} = 2{,}4\,\beta_z = 2{,}4 \cdot 145 = 348$ kg/mm² für nicht permanente Anlagen.

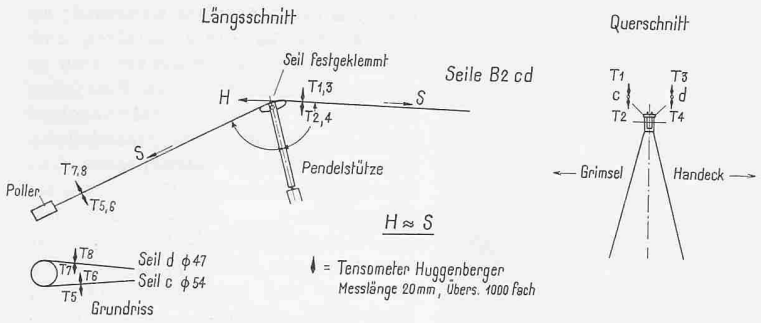

Bild 10. Anordnung der Messinstrumente an den Tragseilen B2 cd der Betonierbühnen

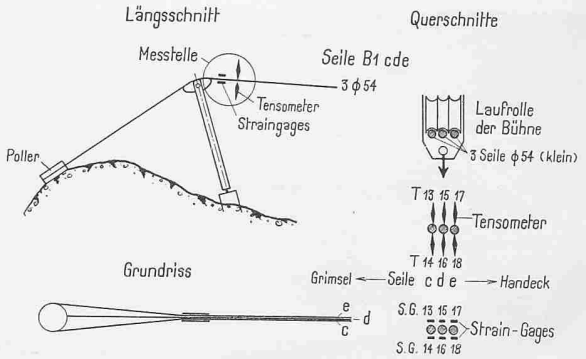

Bild 11. Anordnung der Messinstrumente an den Tragseilen B1 cde der Betonierbühne

b) Für voll verschlossene Seile

R_{11} sehr gross, $R_{12} = 3{,}2$ cm, $R_{21} = 20$ cm, $R_{22} = 3{,}4$ cm
Seil des Krans K_3, $Q = 1{,}83$ t, $p_{0\,\mathrm{eff}} = 74{,}5$ kg/mm²,
$p_{0\,\mathrm{zul}} = 310$ kg/mm²

An den Tragseilen der Anlagen beim Bau der Staumauer Lucendro wurden die Beanspruchungen bereits in ähnlicher Weise nachgeprüft und einige Spannungsmessungen durchgeführt. Es handelte sich bei sämtlichen Seilen um Spiralseile aus gleichen Runddrähten, die ungewöhnlich hoch beansprucht waren. So ergaben sich bei den Betonierbühnen folgende Werte:

$$\sigma_{z\,\max} = 6{,}5 \text{ bis } 6{,}9 \text{ t/cm}^2$$
$$\sigma_z + \sigma_b = 8{,}8 \text{ bis } 9{,}1 \text{ t/cm}^2$$
$$p_{0\,\max} = 600 \text{ bis } 900 \text{ kg/mm}^2$$

Bei den Kabelkranen mit einer Tragkraft von 7 t:

$$\sigma_{z\,\max} = 5{,}3 \text{ t/cm}^2$$
$$\sigma_z + \sigma_b = 7{,}3 \text{ t/cm}^2$$
$$p_{0\,\max} = 700 \text{ kg/mm}^2$$

Die Betonierbühnenseile überstanden den mehrjährigen Betrieb mit verhältnismässig wenig Schäden; die Kabelkranseile erlitten mehrere Drahtbrüche.

Aus diesen zahlenmässig abzuschätzenden Werten für die Beanspruchung können auch noch andere Gesichtspunkte von ausschlaggebender Bedeutung sein, so z. B. die richtige Wahl der Seile für einen bestimmten Zweck und die sorgfältige Verseilung im Werk.

Bei dem voll verschlossenen Seil ⌀ 64 mm, das auf der Baustelle Räterichsboden als Tragseil für K_3 verwendet wurde, handelte es sich z. B. infolge Lieferschwierigkeiten um ein Schachtseil mit sehr feindrähtigem Aufbau (Bild 12). Es war den auftretenden Querlasten, die von der Kabelkran-Laufkatze herrührten, nicht gewachsen. Besonders ungünstig mochten sich auch die Taillendrähte der zweiten Drahtlage (Kerbwirkungen) ausgewirkt haben. Tatsächlich war nach der kurzen Betriebsdauer von etwa fünf Monaten die äussere Profildrahtlage über eine grössere Seillänge zerstört und das Seil wurde unbrauchbar. Hingegen befinden sich die Tragseile der Betonierbühnen B_1 und B_2 sowie der Kabelkrane K_1, K_2 und K_4 in einwandfreiem Zustand und können zu analogen Zwecken weiter verwendet werden.

4. Messungen an den montierten Tragseilen

Die nachstehend beschriebenen Messungen auf der Baustelle wurden zu Beginn der Betriebsaufnahme durchgeführt und sollten die folgenden Aufschlüsse bringen:

a) Effektive Zugbeanspruchung der einzelnen Tragseile in Abhängigkeit von der Belastung; Ueberprüfung der statischen Berechnung der Seile;

b) Kontrolle des Elastizitätsmoduls für das ganze Seil;

c) Zusammenwirken der doppelt- bzw. dreifach geführten Bühnentragseile, deren Belastungen nicht durch Balanciers ausgeglichen waren;

d) Plastisches Verhalten der Seile, Streckung im Betrieb;

e) Stosswirkungen im Betrieb.

Als Grundlage dienten die nach der Montage der Seile im Herbst 1948 beobachteten Durchhänge f_0 der unbelasteten Seile. Zunächst wurden an den Tragseilen der Betonierbühnen und an einem Kabelkran-Tragseil verschlossener Bauart auf geodätischem Wege die Durchhänge für verschiedene Belastungen und Laststellungen gemessen, woraus mittels der Beziehung $H = M/y$ die horizontale Seilkraft H berechnet werden konnte. Hierbei ist M das Moment der äusseren Kräfte und y der Durchhang an der in Betracht gezogenen Stelle.

Ferner wurden mittels Tensometer und Strain-Gages (Messtreifen) an einzelnen Drähten an der Seiloberfläche die Dehnungen gemessen, woraus die Zunahme der Drahtspannungen unter Annahme eines Elastizitätsmoduls $E_0 = 2000$ t/cm² bestimmt wurde. Weiter konnten unter Annahme gleicher Spannungsverteilung über den Seilquerschnitt und Berücksichtigung des Schlagwinkels der Drähte auf die Differenzen der Seilkräfte geschlossen werden. Als weitere Messmethode wurden an den Abspannseilen von den Pendelstützen zu den Verankerungen die Eigenfrequenzen des in Schwingung versetzten Seiles registriert. Die Seilkräfte sind unter Vernachlässigung der Dämpfung im wesentlichen proportional zum Quadrat der Eigenfrequenz; für sie gilt die Gleichung

$$S = k\,n^2 \tag{11}$$

Hierin bedeuten S die Seilkraft, n die Eigenfrequenz und k einen Faktor.

Nach Dr. E. Czitary, «Wasserwirtschaft», Wien 1931, wird die Schwingungszeit

$$\tau = \frac{2\,l}{\varkappa}\sqrt{\frac{m'}{H}} = \frac{1}{n} \tag{12}$$

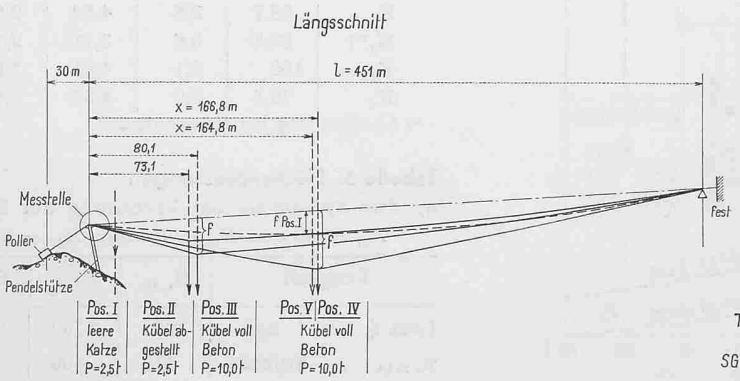

Bild 12a. Laststellungen zur Ermittlung des Horizontalzuges am Tragseil des Kabelkrans K_3 (Bild 15)

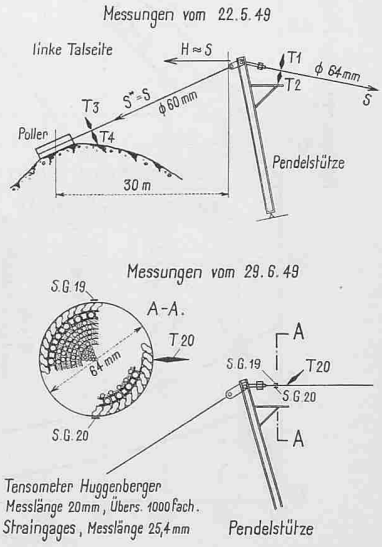

Bild 12b. Anordnung der Messinstrumente am Tragseil des Kabelkrans K_3

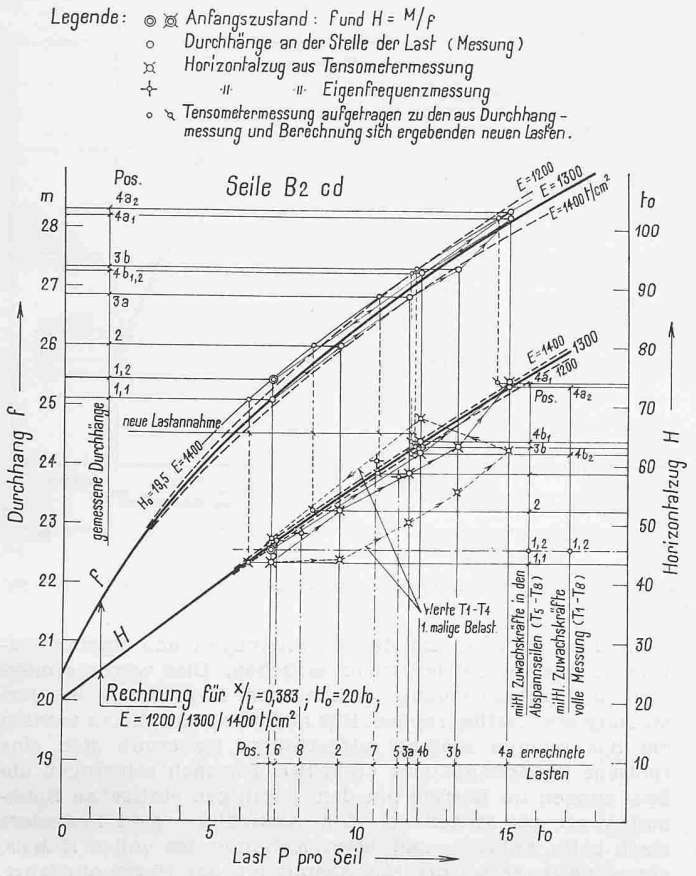

Bild 13. An den Tragseilen B2cd gemessener Durchhang f und Horizontalzug H und Vergleich mit den berechneten Kurven

Darin bezeichnen

$m' = q/(g \cos \alpha)$

α die Steigung der Visierlinie

q das Eigengewicht des Seiles

g die Erdbeschleunigung

l die Feldweite (Länge des Abspannseils)

H den Horizontalzug

$\varkappa$ den Dämpfungskoeffizienten (~ 1)

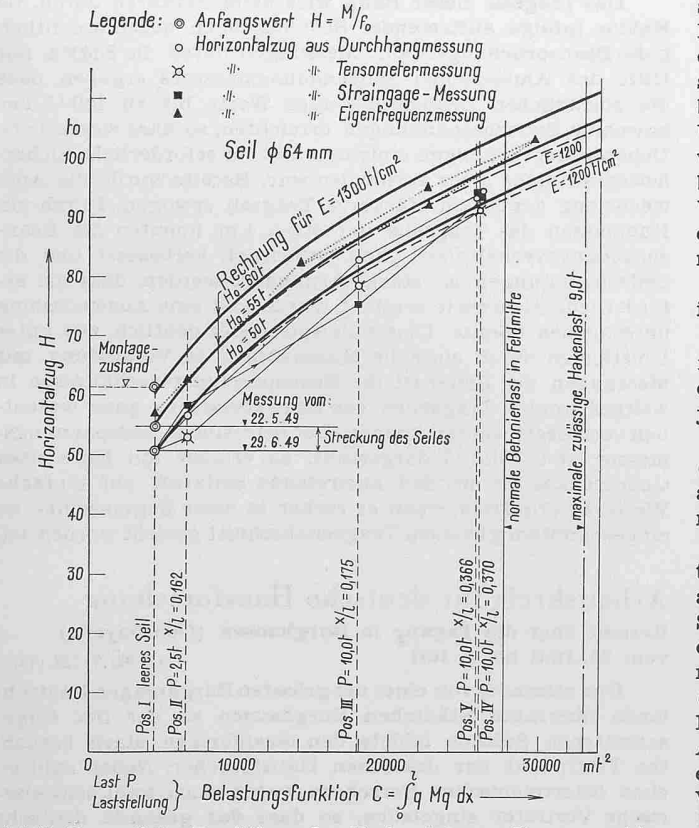

Bild 15. Tragseil K_3; Ermittlung des Horizontalzuges H aus verschiedenen Laststellungen nach Bild 12

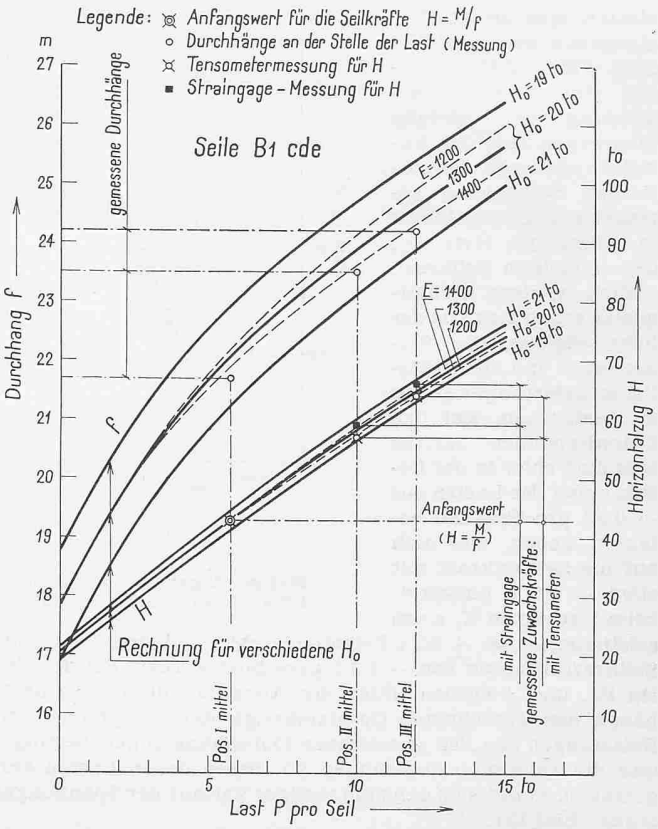

Bild 14. An den Tragseilen B1cde gemessener Durchhang f und Horizontalzug H und Vergleich mit den berechneten Kurven

Für die Auswertung dieser Messungen standen die statische Berechnung für jeden der gemessenen Zustände zur Verfügung, so dass aus dem Vergleich der Messungen untereinander und mit der statischen Berechnung die gewünschten Schlüsse gezogen werden konnten. Ausserdem ergaben sich wertvolle Anhaltspunkte über die verschiedenen Messmethoden.

Die Anordnung der Messinstrumente für einige dieser Messungen (Seile $B_{2\,cd}$, $B_{1\,cde}$ und K_3) sind aus den Bildern 10, 11 und 12a ersichtlich. Die Ergebnisse für die statischen Belastungsfälle, d. h. die Durchhänge und Horizontalzüge, sind für die Tragseile $B_{2\,cd}$ und $B_{1\,cde}$ in Abhängigkeit der Belastungen auf den Bildern 13 und 14 dargestellt, und für das Tragseil K_3 in Abhängigkeit der dort angegebenen Belastungsfunktion auf Bild 15. Die angegebenen Messwerte sind bereits gemittelte Werte der Instrumente auf der Ober- und Unterseite der Seile. Bei den Bühnentragseilen B_1 und B_2 wurden zunächst auch die Mittelwerte zwischen den doppelten bzw. dreifachen Tragseilen aufgetragen, um ein Bild über das Verhalten im Gesamten zu bekommen. Die ungleichen Anteile der einzelnen Seile konnten hernach entsprechend den Differenzen der Zuwachskräfte bestimmt werden.

Die Genauigkeiten der einzelnen Messungen können in ihrer Grössenordnung wie folgt angegeben werden:

a) Durchhangmessung $\pm$ 0,10 m, herrührend vom Messfehler des Theodoliten, von Seilschwankungen usw. Der Fehlereinfluss auf die Bühnentragseile beträgt $\pm$ 0,5 t pro Seil, derjenige auf das Kabelkranseil $\pm$ 0,7 t.

b) Tensometer und Strain-Gage-Messung: $\pm$ 10 kg/cm² (gemessen am einzelnen Draht). Bezieht man diesen Fehler auf den ganzen Seilquerschnitt, so ergeben sich für die Bühnentragseile $\pm$ 0,17 t, für das Kabelkranseil $\pm$ 0,25 t.

Diese, den Messinstrumenten anhaftenden Fehlerquellen, treten aber zurück gegenüber den Abweichungen, die sich aus der ungleichen Spannungsverteilung über den ganzen Seilquerschnitt infolge der inneren Reibungskräfte zwischen den Drähten ergeben. Einzelne Messwerte können daher unregelmässig sein, besonders bei der erstmaligen Seilbelastung (s. z. B. Werte H für T_1 bis T_4 in Bild 13). Bei wiederholtem Belasten und Entlasten und bei Anordnung einer genügenden Anzahl von Tensometern oder Messtreifen (Strain-Gages) ergeben sich Mittelwerte, die durchaus einem gesetzmässigen Verlauf der Spannungen entsprechen.

c) Die Eigenfrequenzmessungen wurden für die Seile $B_{2\,cd}$ (Bild 13) und das Tragseil K_3 (Bild 15) durchgeführt. Sie ge-

statten eine direkte Bestimmung der absoluten Seilkräfte und stellen damit eine wertvolle Ergänzung der übrigen Messungen dar. Die Abweichungen von der statischen Berechnung betragen für einzelne Werte im Maximum etwa 6 % der erreichten Seilkraft.

Eine weitere Fehlerquelle ergab sich aus der Schwierigkeit, die vorhandenen und die zusätzlichen Belastungen genau zu bestimmen. Bei den Betonierbühnen dürften sich die Fehler in der Bestimmung der Lasten auf ± 0,5 t pro Tragseil belaufen haben, was sich auf die Seilzugkraft mit etwa ± 1,7 t auswirkt, beim Kabelkran K_3 muss schätzungsweise ± 0,3 t Belastungsfehler, entsprechend einer Seilkraftdifferenz von ± 1,3 t gerechnet werden. Bei den Seilen $B_{2\,e}$ und $_d$ wurden unter der Annahme, dass die Durchhänge den gerechneten Gesetzmässigkeiten entsprechen, die Belastungen aus den gemessenen Durchhängen neu bestimmt und die Tensometermessungen zu diesen neuen Lasten aufgetragen, womit sich dann ein stetiger Verlauf der Spannungen ergab (Bild 13).

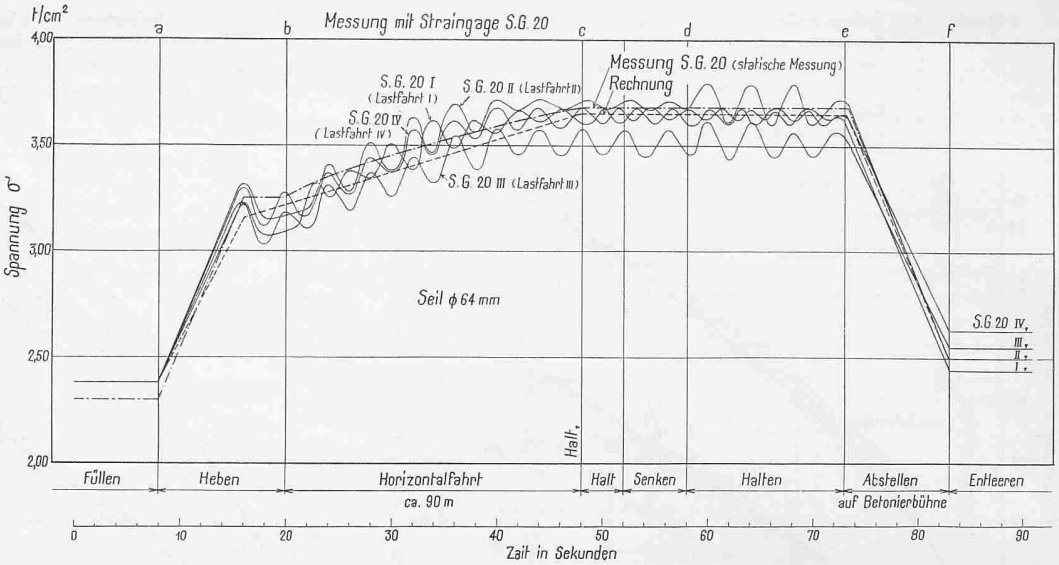

Bild 16. Ergebnisse der Spannungsmessungen am Tragseil des Kabelkrans K_3 während den Lastfahrten I bis IV. Anordnung der Instrumente nach Bild 12

Als Ergebnis der Messungen können wir feststellen: Die Seilkraftbestimmung aus der Durchhangmessung und den Spannungsmessungen ergab sowohl mit Messtreifen wie mit Tensometern Werte, die befriedigend mit der statischen Berechnung übereinstimmen, d. h. die Abweichungen der gemessenen Mittelwerte von der statischen Berechnung liegen für den grössten Teil der Messungen innerhalb 5 %. Die Elastizitätsmoduli der Seile, die im Laboratorium an einem 10 m langen Seilstück zu 1250 t/cm² für ein Spiralseil ∅ 55 mm und zu 1150 t/cm² für ein verschlossenes Seil ∅ 64 mm gemessen wurden, ergeben sich aus den Messungen am eingebauten Seil sichtlich etwas grösser, nämlich zu rd. 1300 bis 1400 t/cm². Die Differenz dürfte vielleicht z. T. auf einen Schlupf der inneren Drähte bei den Versuchen zurückzuführen sein, da die Seilenden dabei nur geklemmt waren. Was das Zusammenwirken der doppelten, bzw. dreifachen Tragseile der Betonierbühnen betrifft, konnten die grössten Abweichungen vom Mittelwert beider Seile im Zeitpunkt der Messungen zu ± 8,5 %, gegen Ende der Bausaison 1949 zu rund 11 % festgestellt werden, was im Rahmen unserer Erwartungen blieb und an den Verankerungen keine unzulässigen Beanspruchungen ergab. Die Streckung der Seile betrug im Mittel nach der ersten Bausaison 0,65 bis 0,85 % der Seillänge, wovon rd. 80 % schon kurz nach Betriebsbeginn erreicht wurden.

Messungen im Betrieb: Am Kabelkran K_3 wurden ausser den statischen Werten auch eine Anzahl Messungen im Betrieb durchgeführt, um die Schwingungen und Spannungsverhältnisse im Betrieb zu untersuchen. Dies wurde ermöglicht durch Anwendung elektrischer Messtreifen in Verbindung mit Oszillographen. Für mehrere Lastfahrten wurden die Spannungen laufend aufgetragen. Es ergab sich eine typische Spannungskurve (Bild 16). Darnach schwingen die Spannungen im Betrieb um den jeweiligen statischen Spannungswert als Mittellage. Die Ausschläge sind besonders stark beim Anheben und beim Anhalten des vollen Kübels, etwas geringer bei der Beschleunigung der Horizontalfahrt. Sie betragen im Maximum etwa 4,5 % der erreichten Seilkraft. Die Fahrgeschwindigkeit des Kranes beträgt 4 m/s. Die Senkgeschwindigkeit 0,75 m/s. Amerikanische Versuche[3]) ergaben für einen Kabelkran von 18 t Tragkraft bei einer Fahrgeschwindigkeit von 6,5 m/s und einer Senkgeschwindigkeit von 1,5 m/s Stösse von 25 % der statischen Seilkraft. Eine weitere Abklärung der Verhältnisse für verschiedene Krane wäre zu begrüssen.

5. Weitere Messergebnisse an einer Schwebebahn für Material- und Personentransporte von 1100 m Spannweite

Das Tragseil dieser Bahn wies beim Befahren durch die Kabine infolge auftretender Schwingungen ausserordentlich hohe Beanspruchungen auf. Messungen durch die EMPA mit Hilfe des Amslerschen Seilspannungsmessers ergaben, dass die zusätzlichen Beanspruchungen Werte bis zu 100 % der normalen Betriebsspannungen erreichten, so dass wesentliche Ueberbeanspruchungen eintraten und der erforderliche Sicherheitsgrad nicht mehr vorhanden war. Bereits wurde die Auswechslung gegen ein stärkeres Tragseil erwogen. Durch ein Nachlassen des Tragseils um etwa 4 m konnten die Beanspruchungsverhältnisse ganz wesentlich verbessert und die Seilschwingungen so stark vermindert werden, dass die erforderliche Sicherheit erreicht wurde und eine Auswechslung unterbleiben konnte. Dieses Beispiel zeigt deutlich, wie unter Umständen durch einfache Massnahmen in Verbindung mit Messungen der Seilkraft die Beanspruchungsverhältnisse in weitgespannten Tragseilen von Schwebebahnen ganz wesentlich verbessert werden können. Der betreffende Seilspannungsmesser ist in Bild 17 dargestellt. Er erlaubt mit Hilfe eines Querdruckes die im Seil auftretende Seilkraft auf einfache Weise zu ermitteln, wenn er vorher in einer Zugmaschine an eingespanntem gleichem Tragseilabschnitt geeicht worden ist.

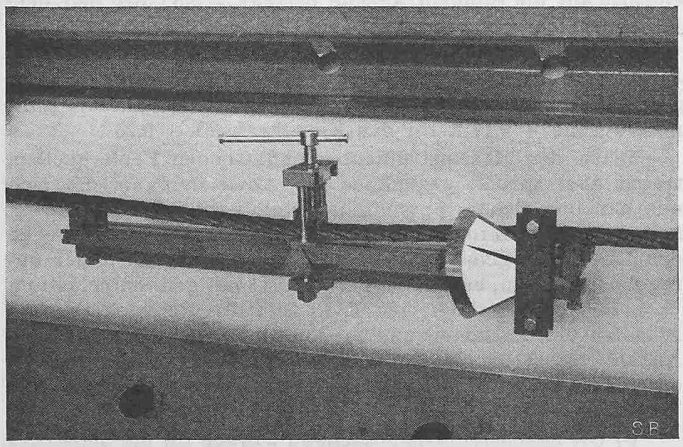

Bild 17. Seilspannungsmesser Amsler während der Eichung

Arbeitskreis für deutsche Hausforschung

Bericht über die Tagung in Burghausen (Oberbayern) vom 29. Juni bis 1. Juli

DK 061.3:728 (43)

Das reizende, von einer der grössten Burganlagen Deutschlands überragte Städtchen Burghausen an der tief eingeschnittenen Salzach bildete den diesjährigen, stark besuchten Treffpunkt der deutschen Hausforscher. Neben zahlreichen österreichischen Forschern waren auch zwei schweizerische Vertreter eingeladen, so dass das gesamte deutsche

[3]) Veröffentlicht in «Proceedings of A.S.C.E.» 1939.