

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 20 (1929)
Heft: 14

Artikel: Untersuchungen über Seilzug und Durchgang für den Fall un stetiger Lastverteilungen über die Spannweite eines Seiles
Autor: Engler, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056823>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.01.2025

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

Untersuchungen über Seilzug und Durchhang für den Fall un stetiger Lastverteilung über die Spannweite eines Seiles.

Von Direktor A. Engler, dipl. Ing. und A. Zeindler, dipl. Ing.
Nordostschweiz. Kraftwerke A.-G., Baden.

621.319.22 (004)

Unter Zugrundelegung der unveränderlichen «reduzierten Seillänge», unter welcher die Länge des entspannten Seiles (Seilspannung 0) bei der Temperatur von 0 Grad verstanden ist, solange nicht das Seil über die Elastizitätsgrenze hinaus beansprucht war, wird ein graphisches Verfahren entwickelt, welches gestattet, die Veränderungen der Seilspannung und des Durchhanges eines und desselben zwischen zwei festen Punkten fest eingehängten Seiles bei beliebigen Veränderungen des Belastungszustandes und der Temperatur zu ermitteln. Das Verfahren eignet sich besonders für die Behandlung von Fällen un stetiger Verteilung der Belastung über die Seillänge (Einzellasten neben stetig verteilten Lasten), welche der exakten Berechnung grosse Schwierigkeiten bieten. Das Verfahren ist auf ein spezielles Beispiel aus der Praxis angewendet.

Les auteurs entendent par «longueur réduite» d'un conducteur flexible, celle que prend ce conducteur à 0° et sous une tension mécanique nulle, une fois détaché des points fixes entre lesquels il est tendu normalement. En partant de cette grandeur, ils développent un procédé graphique permettant de déterminer les changements de la tension mécanique et de la flèche du conducteur envisagé, quelles que soient les modifications de la charge et de la température. Cette méthode convient tout particulièrement aux cas où la charge est répartie irrégulièrement sur le conducteur (charges localisées s'ajoutant aux charges régulières) et dont le calcul exact présente de grosses difficultés. Les auteurs appliquent leur procédé à un exemple particulier, tiré de la pratique.

Für den normalen Fall der stetigen Lastverteilung über die ganze Seilspannweite (Seileigengewicht und event. Schneezusatzlast) hat Jobin im Bulletin S. E. V. 1919, No. 6, S. 1 und No. 7, S. 189 brauchbare mathematische Beziehungen zusammengestellt, mit deren Hilfe man für alle Temperaturen und Schneezusatzlasten den Seilzug und Durchhang berechnen kann.

Bei Freiluftstationen kann nun der Fall eintreten, dass zur Vereinfachung des äusseren Aufbaues die Trennstellen eines Schalterpoles durch im Zug der Leitung unmittelbar über dem Schalter aufgehängte Isolatorenketten voneinander elektrisch geschieden werden müssen. Siehe das Beispiel der Figur 1.

Bei den Seilen der Schalterfelder ist infolge dieser Isolatorenketten keine stetige und pro Teilstreckenlänge gleiche Belastung mehr vorhanden. Die Ermittlung von

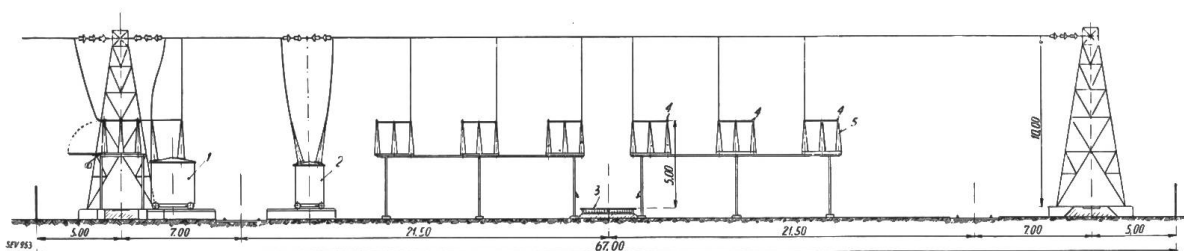


Fig. 1.
Freiluft-Schaltfeld.

- | | |
|-----------------|--------------------|
| 1 = Messgruppe | 4 = Sammelschienen |
| 2 = Oelschalter | 5 = Trenner |
| 3 = Kabelkanal | |

Seilzug und Seildurchhang erfolgt am besten graphisch, da sich die Durchhangskurve in keine einfache mathematische Form kleiden lässt.

Die graphische Behandlung des Problems baut sich folgendermassen auf:

Man zeichnet nach den bekannten Methoden der graphischen Statik das Seilpolygon für den vorausgesetzten Belastungsfall mit Hilfe des Kräfteplanes. Die Vertikalkräfte setzen sich aus dem Leitergewicht, dazu, je nach Voraussetzung, aus der Schneezusatzlast und aus Einzellasten zusammen. Die Polstrahlen sind die Seilzüge am Angriffspunkt der Einzellasten und man erhält durch ihre Zusammen-

setzung die Umhüllende für die Seilkurve. Für jeden vorausgesetzten Seilzug (P) lässt sich nun mit Berücksichtigung der entsprechenden Masstäbe der Durchhang (F) an bestimmter Stelle berechnen. Es lässt sich also eine Kurve des Seilzuges in Abhängigkeit vom Durchhang an bestimmter Stelle zeichnen [$P = f(F)$ -Kurve]. Jeder Durchhangsveränderung entspricht aber auch eine Veränderung der Seillänge. Dieser Zusammenhang wird durch folgende Beziehung ausgedrückt:

$$\Delta l_F = \frac{8}{3a} F^2$$

Dabei bedeuten: Δl_F = Seilverlängerung in cm.
 a = Horizontalabstand der Seilabspannpunkte in cm.
 F = Durchhang in cm.

Man kann eine Kurve $\Delta l_F = f(F)$ zeichnen.
 Jeder Seilzugsänderung entspricht ebenfalls eine Seillängenänderung nach dem Gesetz von Hooke.

$$\Delta l_p = \frac{a}{E} p$$

Dabei bedeuten: Δl_p = Seilverlängerung in cm.
 a = Horizontalabstand der Seilabspannpunkte in cm.
 E = Elastizitätsmodul (für Kupferlitzen ist $E = 1,32 \cdot 10^6$ kg/cm²).
 p = Zugbeanspruchung in kg/cm².

Trägt man zu jedem Wert von P in der Kurve $P = f(F)$ den dazugehörigen Wert von Δl_p im für Δl_F verwendeten Masstab auf und zieht man Δl_p von Δl_F ab, so erhält man eine Kurve, die ihren Verlauf in der Hauptsache unterhalb der Abszisse nimmt. Trägt man die Horizontalabstand a von der Abszisse aus nach unten als Abszissenparallele ein, so ergibt deren Abstand bis zu der oben erwähnten Kurve die sogenannte *reduzierte Seillänge* l_0 . Würde man das vorausgesetzte Kupferseil auf diese, einem bestimmten Durchhang entsprechende, reduzierte Länge abschneiden und zwischen der ebenfalls vorausgesetzten Horizontalabstand a ausspannen, so wäre dazu der der $P = f(F)$ -Kurve entsprechende Seilzug notwendig.

Mit der Temperaturänderung ändert sich die Seillänge ebenfalls: für eine bestimmte Temperatur kann man also eine zur Kurve der reduzierten Seillängenänderung (Δl_0) parallele Kurve (Temperaturkurve) oberhalb oder unterhalb dieser zeichnen. Will man untersuchen, wie sich der Durchhang und der Seilzug bei verschiedenen Temperaturen verhalten, so geht man von einem bestimmten vorausgesetzten Δl_0 aus und zieht, der Konstanz der zugehörigen reduzierten Seillänge l_0 entsprechend, eine Abszissenparallele durch diesen Punkt. Dies kann gemacht werden, weil das Seil bei einer bestimmten Temperatur mit einem bestimmten Seilzug zwischen der Horizontalabstand a gespannt wird, wobei es jedoch, wie erwähnt, eine ganz bestimmte „reduzierte Länge“ besitzt. Verbindet man die Schnittpunkte mit den Temperaturkurven ordinatenparallel mit der $P = f(F)$ -Kurve, so erhält man die den entsprechenden Temperaturen zugehörigen Seilzüge. In Fig. 2 wird das beschriebene Vorgehen allgemein dargestellt.

Der Vergleich von Durchhang und Seilzug kann für dasselbe Seil sowohl für den Fall mit und ohne Schneezusatzlast gezogen werden. Die $P = f(F)$ -Kurven werden dann verschieden voneinander, womit sich für beide Fälle eine besondere Δl_0 Kurve und zugehörige Temperaturkurven konstruieren lassen (Fig. 3).

Um einen Beweis der genügenden Genauigkeit dieser graphischen Methode zu geben, soll das Beispiel einer Freileitung in Bezug auf Durchhang und Seilzug bei verschiedenen Temperaturen mit und ohne Schneezusatzlast zuerst nach dem entwickelten Vorgehen und dann mit Hilfe der Formel von Jobin untersucht werden.

Die Voraussetzungen sind:

$a = 5700$ cm (Spannweite).

$\gamma_0 = 28,9 \cdot 10^{-3}$ kg/cm³ (fiktives spezifisches Gewicht des Kupferseils von 1 cm² Querschnitt, inkl. 2 kg Schnee pro m).

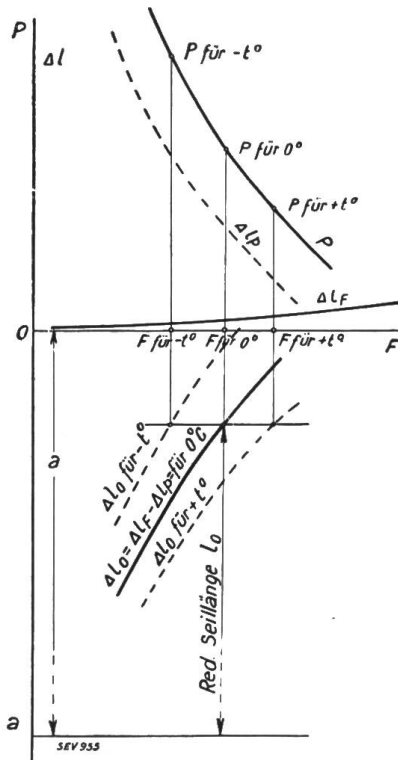


Fig. 2.

Graphische Darstellung der Beziehung zwischen Seilzug P und Durchhang F bei verschiedenen Temperaturen.

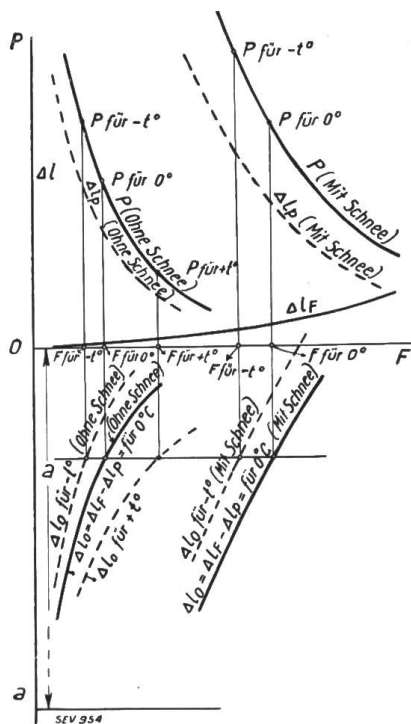


Fig. 3.

Graphische Darstellung der Beziehung zwischen Seilzug P und Durchhang F bei verschiedenen Temperaturen, für die Fälle mit und ohne Schneezusatzlast.

$\gamma = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ (spezifisches Gewicht des Kupferseils).

$t_0 = 0^\circ \text{C}$ (Ausgangstemperatur).

$P_0 = 2000 \text{ kg}$ (Seilspannung bei t_0 und γ_0).

$a = 1,7 \cdot 10^{-5}$ (Linear-Wärmeausdehnungskoeffizient pro 1°C).

$E = 1,32 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$ (Elastizitätsmodul).

In Fig. 4 sind der Kräfteplan und das Seilpolygon für diesen Fall gezeichnet.

Der Durchhangsmaßstab ergibt sich folgendermaßen:

Längenmaßstab: $1 \text{ cm} = 670 \text{ cm}$,

Kraftmaßstab: Vertikalzug: $1 \text{ cm} = 39,2 \text{ kg}$ mit Schnee,
 $1 \text{ cm} = 12,1 \text{ kg}$ ohne Schnee,

Horizontalzug: $1 \text{ cm} = 0,217 P \text{ kg}$ ($P = \text{Seilzug}$);

Durchhangsmaßstab für den Fall mit Schneebelastung:

$$1 \text{ mm} = \frac{670 \cdot 39,2}{0,217 P} = \frac{121000}{P} \text{ mm.}$$

Der Kräfteplan setzt sich zusammen aus den Einzelkräften, die, im Schwerpunkt einer bestimmten Seillänge angreifend, die stetige Belastung ersetzen. Die ganze Spannweite ist in 6 Teilstücke von je 9,5 m eingeteilt. Das Gewicht pro m inkl. Schneezusatzlast ist 2,89 kg. Die in jedem Schwerpunkt dieser 9,5 m langen Teilstücke angreifende Einzelkraft ist $9,5 \cdot 2,89 = 27,45 \text{ kg}$. Ohne Schnee ist die Einzelkraft $9,5 \cdot 0,89 = 8,46 \text{ kg}$. Mit Hilfe des Durchhangsmaßstabes erhält man den Durchhang für einen bestimmten Seilzug und damit die Punkte für die $P = f(F)$ -Kurve. Setzt man angenähert den Horizontalzug gleich dem Seilzug, was in diesem Fall noch innerhalb der Genauigkeitsgrenzen der graphischen Methode liegt, so ergibt sich:

Durchhang F nach Zeichnung = 9,7 mm mit dem Maßstab multipliziert:

$$F = \frac{0,97 \cdot 121000}{P} \text{ cm} = \frac{117400}{P} \text{ cm.}$$

Für $P = 3000 \text{ kg}$ ist $F = 39,1 \text{ cm}$

„ $P = 2600 \text{ kg}$ „ $F = 45,1 \text{ cm}$

„ $P = 2000 \text{ kg}$ „ $F = 58,7 \text{ cm}$

„ $P = 1600 \text{ kg}$ „ $F = 73,4 \text{ cm}$.

Die Seilverlängerung in Abhängigkeit vom Durchhang wird nach folgender Formel berechnet:

$$\Delta l_F = \frac{8}{3 a} F^2; \text{ für } a = 57 \text{ m}$$

wird

$$\Delta l_F = 0,0468 F^2 \text{ cm.}$$

Für $F = 70$ cm	ist $\Delta l_F = 2,28$ cm
„ $F = 50$ cm	„ $\Delta l_F = 1,17$ cm
„ $F = 30$ cm	„ $\Delta l_F = 0,421$ cm
„ $F = 20$ cm	„ $\Delta l_F = 0,187$ cm
„ $F = 10$ cm	„ $\Delta l_F = 0,047$ cm

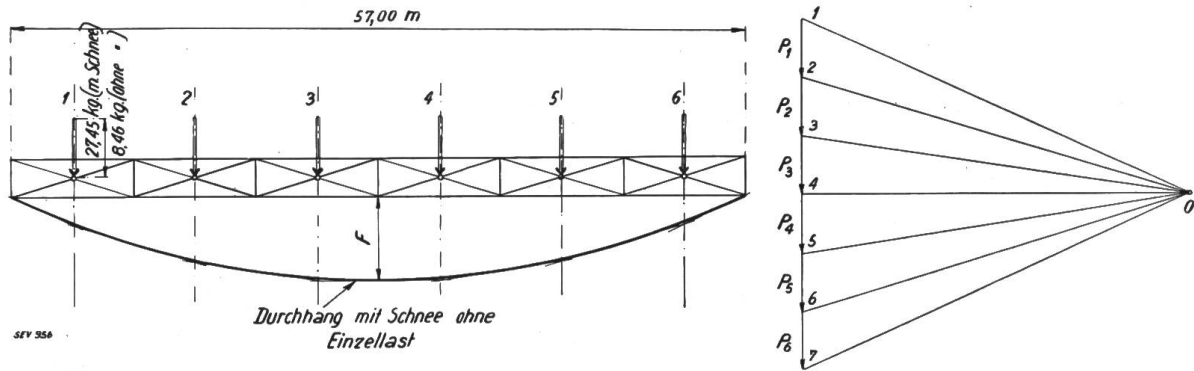


Fig. 4.

Kräfteplan eines Seiles mit stetig verteilter Last.

Die Seilverlängerung in Abhängigkeit von der Zugsbeanspruchung ergibt sich aus:

$$\Delta l_p = \frac{a}{E} p = \frac{5700}{1,32 \cdot 10^6} p = 4,32 \cdot 10^{-3} p \text{ cm}$$

Für $P = 3000$ kg	ist $\Delta l_p = 12,95$ cm
„ $P = 2600$ kg	„ $\Delta l_p = 11,23$ cm
„ $P = 2000$ kg	„ $\Delta l_p = 8,64$ cm
„ $P = 1600$ kg	„ $\Delta l_p = 6,92$ cm
„ $P = 1200$ kg	„ $\Delta l_p = 5,18$ cm
„ $P = 800$ kg	„ $\Delta l_p = 3,46$ cm.

Die Längenänderung des Seiles infolge Temperaturänderung nimmt folgende Werte an:

Der Temperaturkoeffizient ist $a = 1,7 \cdot 10^{-5}$

Für $a = 57$ m wird die Längenänderung pro $^{\circ}\text{C}$:

$$57 \cdot 1,7 \cdot 10^{-5} = 0,097 \text{ cm}$$

für $t = -25^{\circ}$	0°	15°	40°
wird $\Delta l_t = -2,42$ cm	0 cm	1,45 cm	3,88 cm.

Für den Fall ohne Schneebelastung wird der Durchhang:

$$F = \frac{0,97 \cdot 670 \cdot 12,1}{0,217 P} = \frac{36200}{P} \text{ cm.}$$

Für $P = 2600$ kg	ist $F = 13,9$ cm
„ $P = 2400$ kg	„ $F = 15,0$ cm
„ $P = 2000$ kg	„ $F = 18,0$ cm
„ $P = 1600$ kg	„ $F = 22,6$ cm
„ $P = 1200$ kg	„ $F = 30,0$ cm
„ $P = 800$ kg	„ $F = 45,1$ cm.

In der Fig. 5 sind die entsprechenden Kurven aufgezeichnet. Auf die Konstruktion der Kurven $\Delta l_p = f(p)$ wurde verzichtet, um die Zeichnung nicht zu überlasten. Die Δl_o -Kurven wurden deshalb direkt gezeichnet.

Fällt man das Lot durch den der Voraussetzung entsprechenden Punkt $P_0 = 2000$ kg und zieht im Schnittpunkt mit der Δl_0 (mit Schnee)-Kurve die Horizontale, so erhält man folgende Seilzüge und Durchhänge:

$t_0 = 0^\circ$	$P_0 = 2000$ kg mit Schnee;	$F = 58,7$ cm
$t = 0^\circ$	$P = 1665$ kg ohne Schnee;	$F = 21,5$ cm
$t = -25^\circ$	$P = 2190$ kg „ „	$F = 16,5$ cm
$t = 15^\circ$	$P = 1360$ kg „ „	$F = 26,4$ cm
$t = 40^\circ$	$P = 900$ kg „ „	$F = 40,2$ cm.

Die Formel von Jobin zur rechnerischen Behandlung desselben Problems lautet:

$$p^3 + p^2 \left[\frac{\gamma_0^2 a^2 E}{24 p_0^2} + \{ (t - t_0) a E \} - p_0 \right] = \frac{\gamma^2 a^2 E}{24},$$

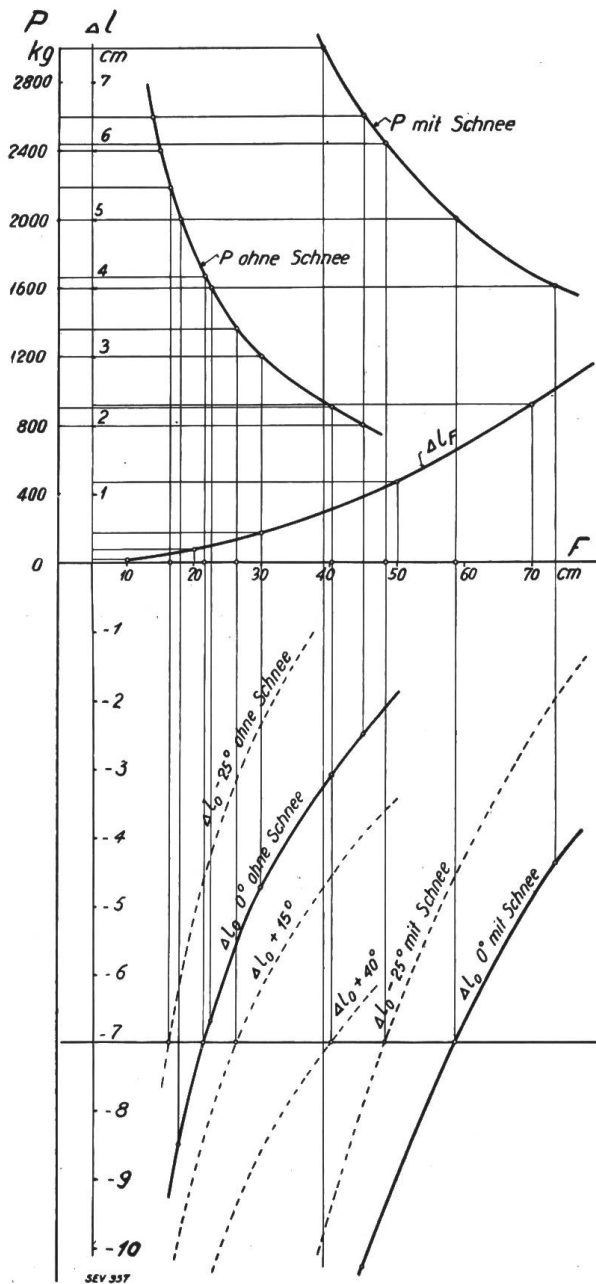


Fig. 5.

Graphische Darstellung der Beziehung zwischen Seilzug und Durchhang des nach Fig. 4 belasteten Seiles.

eine Gleichung dritten Grades, die am besten und genau genug mit Hilfe des Rechenschiebers gelöst werden kann. Den

Durchhang erhält man aus: $F = \frac{\gamma a^2}{8 p}$.

Setzt man die entsprechenden Werte ein, so erhält man:

$t_0 = 0^\circ$	$P_0 = 2000$ kg mit Schnee;	$F = 58,7$ cm
$t = 0^\circ$	$P = 1670$ kg ohne Schnee;	$F = 21,6$ cm
$t = -25^\circ$	$P = 2190$ kg ohne Schnee;	$F = 16,5$ cm
$t = 15^\circ$	$P = 1360$ kg ohne Schnee;	$F = 26,6$ cm
$t = 40^\circ$	$P = 900$ kg ohne Schnee;	$F = 40,2$ cm.

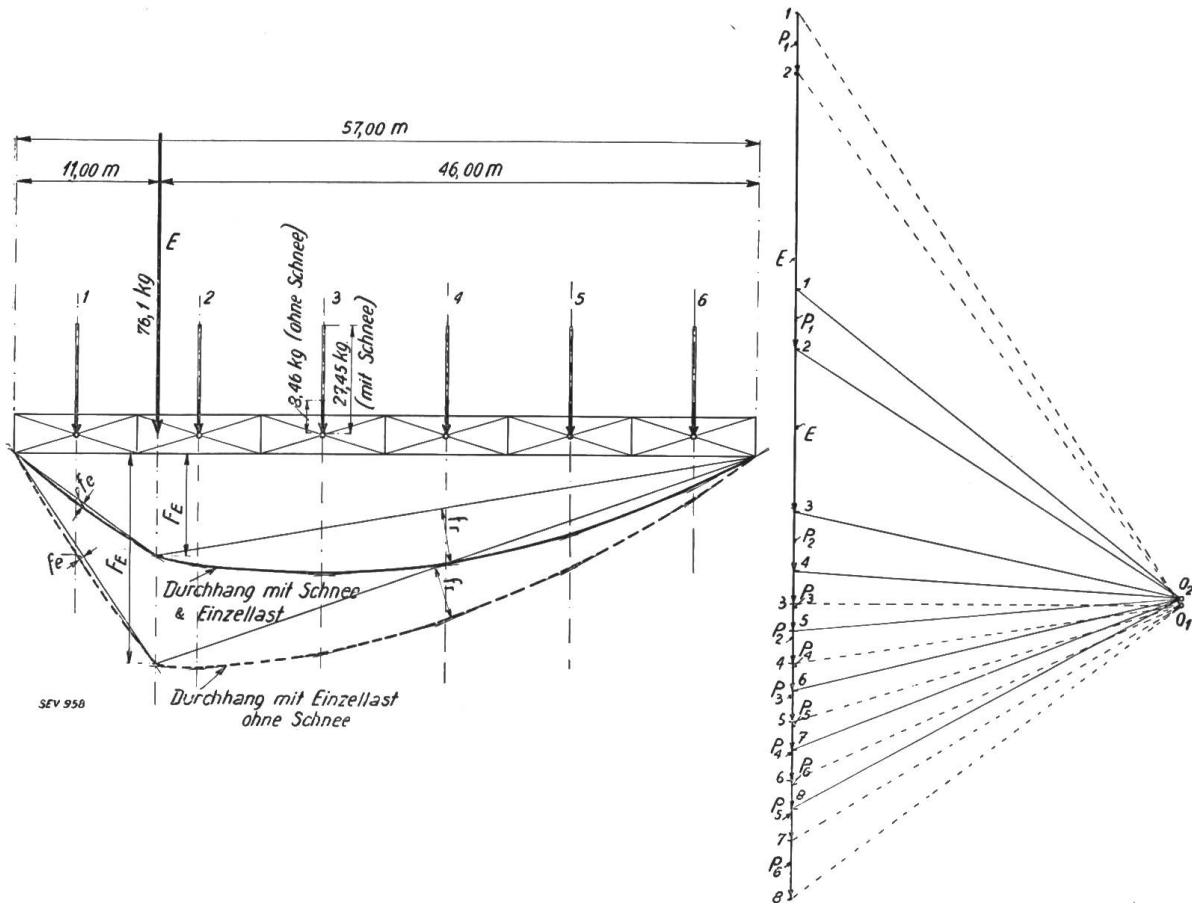
Die Uebereinstimmung ist praktisch genügend genau; die graphische Methode bietet aber noch den Vorteil, dass sie jeden schwerwiegenden Fehler sofort aufdeckt und dass die Ausgangsbedingungen P_0 und t_0 ohne irgendwelche Aenderung der Zeichnung variiert werden können. Der maximal zulässige Seilzug ist sofort ersichtlich und kann als Ausgangsbedingung festgelegt werden.

Wertvoll ist jedoch diese graphische Berechnungsmethode erst dann, wenn, wie eingangs erwähnt, die mathematischen Mittel versagen. Im folgenden sollen Durchhang und Seilzug ermittelt werden für das in Fig. 1 dargestellte Beispiel.

Wie aus Fig. 1 ersichtlich ist, besteht die Einzellast im Zuge der Leitung aus 4 Motorisolatoren und total ca. 10 m Verbindungsseil mit einem Querschnitt von 100 mm².

Gewicht der Einzellast: 4 Motorisolatoren zu 16,8 kg = 67,2 kg
 10 m Seil zu 0,89 kg/m . . . = 8,9 kg
 Totalgewicht = 76,1 kg.

Der Abstand der Einzellast vom linken Abspannpunkt beträgt 11 m. Im übrigen sind die Werte für a , E und α dieselben, wie im vorstehend durchgerechneten Beispiel ohne Einzellast. In der Fig. 6 sind der Kräfteplan und das Seilpolygon konstruiert. Die Grundlagen für die graphischen Berechnungen der Fig. 7 sind im folgenden zusammengestellt.



Ermittlung der $P = f(F_E)$ -Kurve für Schneelast und Einzellast.

0° C, Schnee

Längenmasstab: 1 cm = 670 cm.

Kräftemasstab:

Horizontalzug: 1 cm = 0,217 P kg,

Vertikalzug: 1 cm = 39,2 kg.

Wie im berechneten Beispiel ohne Einzellast, darf P durch den Horizontalzug H ersetzt werden.

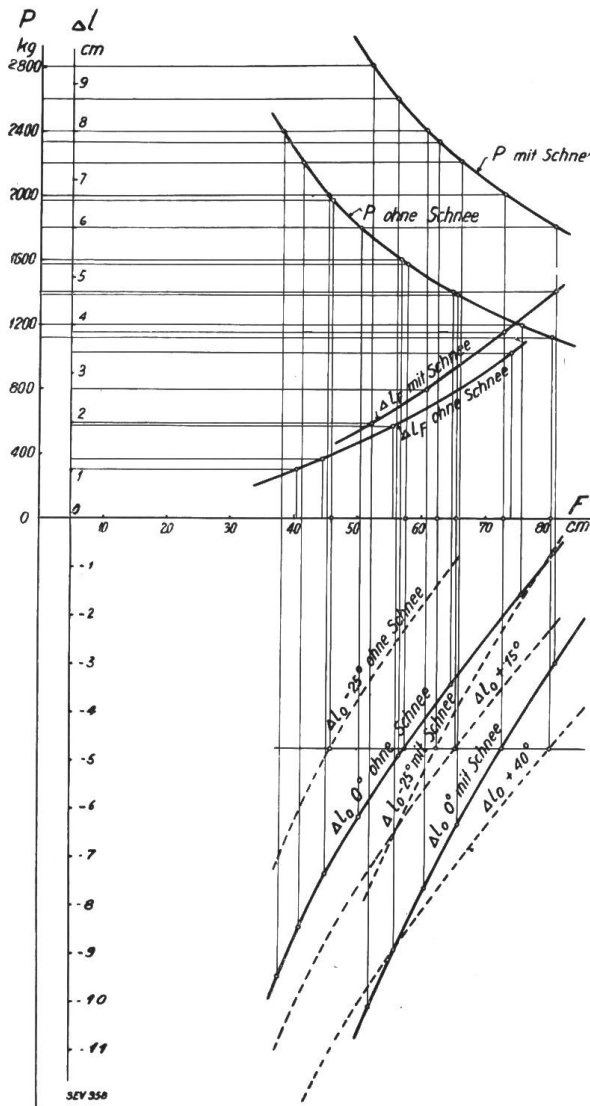


Fig. 7.

Graphische Darstellung der Beziehung zwischen Seilzug und Durchhang des nach Fig. 6 belasteten Seiles.

Durchhangsmaßstab:

$$1 \text{ mm} = \frac{670 \cdot 39,2}{0,217 \cdot P} = \frac{121\,000}{P} \text{ mm.}$$

Nach graphischer Konstruktion ist F_E für Schnee und Einzellast = 12,0 mm am Punkte der Einzellast. Der Durchhang ist also $F_E = \frac{145\,400}{P}$ cm.

- Für $P = 2000$ kg ist $F_E = 72,7$ cm
- „ $P = 2400$ kg „ $F_E = 60,6$ cm
- „ $P = 2800$ kg „ $F_E = 52,0$ cm

Ermittlung der $\Delta l_F = f(F_E)$ -Kurve für Schnee und Einzellast.

Die totale Seillänge setzt sich aus zwei Teilstücken bis zum Aufhängepunkt der Einzellast zusammen. Die Berechnung der Seilen der Teilstücke geschieht aus dem Durchhang F_E und der Teilspannweite. Aus der Länge l der Sehne und dem grössten Durchhang f über der Sehne kann der Teilbogen oder dessen Verlängerung berechnet werden $\Delta l_f = \frac{8}{3 l} F^2$.

$$F_E = 72,7 \text{ cm.}$$

$$\begin{aligned} \Delta l_{E1} &= l_{E1} - a_{E1} = \sqrt{F_{E1}^2 + a_{E1}^2} - a_{E1} \\ &= \sqrt{72,2^2 + 1100^2} - 1100 = 2,43 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta l_{f1} &= \frac{8}{3 l_{E1}} f_1^2 = \frac{8}{3 \cdot 1102,44} 2,74^2 \\ &= 0,02 \text{ cm} \end{aligned}$$

Analog bestimmt man

- und erhält für $F_E = 72,7$ cm
- „ $F_E = 60,6$ cm
- „ $F_E = 52,0$ cm

- $\Delta l_{Er} = 0,58$ cm
- $\Delta l_{fr} = 0,82$ cm
- $\Delta l_F = 3,85$ cm
- $\Delta l_F = 2,66$ cm
- $\Delta l_F = 1,96$ cm

Ermittlung der $P = f(F)$ -Kurve mit Einzellast, ohne Schnee.

Horizontalzug: 1 cm = 0,217 P kg

Vertikalzug: 1 cm = 12,1 kg

Durchhang: 1 cm = $\frac{670 \cdot 12,1}{0,217 \cdot P} = \frac{37300}{P}$ mm;

nach graphischer Konstruktion ist $F_E = 24,2$ mm.

Der Durchhang ist folglich: $F_E = \frac{905000}{P}$ mm.

Für $P = 2000$ kg ist $F_E = 45,2$ cm

„ $P = 1600$ kg „ $F_E = 56,6$ cm

„ $P = 1200$ kg „ $F_E = 75,4$ cm

„ $P = 2200$ kg „ $F_E = 41,1$ cm

Ermittlung der $\Delta l_F = f(F_E)$ -Kurve ohne Schnee, mit Einzellast.

$F_E = 41,1$ cm $\Delta l_F = 1,01$ cm

$F_E = 45,2$ cm $\Delta l_F = 1,22$ cm

$F_E = 56,6$ cm $\Delta l_F = 1,92$ cm

$F_E = 75,4$ cm $\Delta l_F = 3,42$ cm

Aus diesen Daten kann nun die graphische Berechnung für das Seil durchgeführt werden. Die Fig. 7 zeigt in klarer Weise den Zusammenhang zwischen Temperatur, Schneezusatzlast, Seilzug und Seildurchhang. Will man, wie es für diesen Fall erforderlich ist, möglichst geringe Durchhangsdifferenzen für die möglichen Grenzpunkte haben, so untersucht man, wo die Zugbeanspruchung am grössten wird. Die Annahme von 2 kg Schnee pro m bei 0° entspricht dem neuen Entwurf der Vorschriften für Starkstromanlagen, die Kurve für -25° und Schnee kommt praktisch für die Kontrolle eines oberen Grenzwertes nicht in Frage. Da die Streckgrenze für Kupferseile bei 28 kg/mm² liegt, ist eine grösste Beanspruchung von 20 kg/mm², wie sie bei 0° mit Schnee auftritt, nicht unzulässig. Dieser Seilzug wird deshalb als Anfangsbedingung zugrunde gelegt. In der Fig. 8 sind Durchhang und Seilzug in Funktion der Temperatur dargestellt.

Auf Grund dieser Kurven kann bei der Montage ermittelt werden, mit welchem Zug das Seil bei der betreffenden herrschenden Temperatur gespannt werden muss, damit bei 0° mit Schnee die Beanspruchung von 20 kg/mm² nicht überschritten wird.

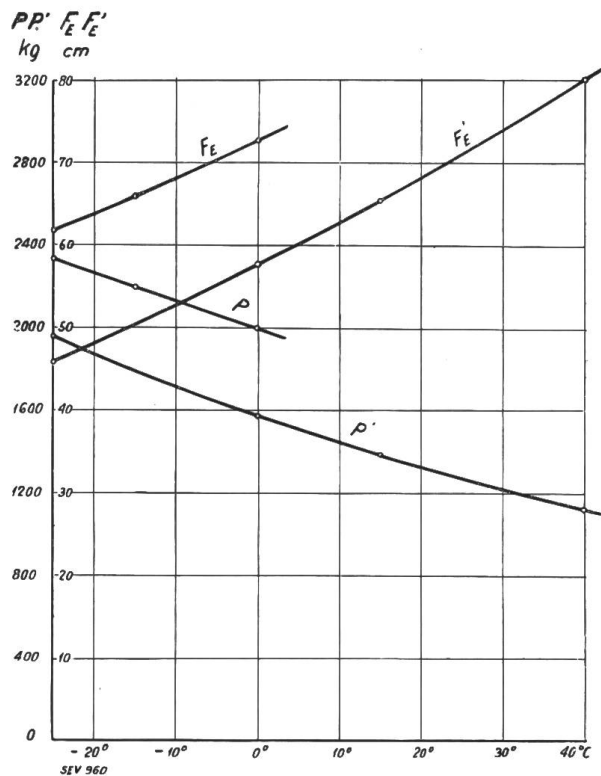


Fig. 8.

Durchhang und Seilzug in Funktion der Temperatur.