Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 90 (1999)

Heft: 21

Artikel: Kabelzugberechnungen präziser und schneller

Autor: Sarbach, Ewald

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902002

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: 07.08.2025

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

Kabelzugberechnungen präziser und schneller

In der Schweiz werden Netzkabel fast ausschliesslich in Rohranlagen eingezogen. Ist die zu verbindende Strecke lang und weist die Rohranlage mehrere Richtungsänderungen auf, so muss im Projektstadium ermittelt werden, ob Kabelschächte notwendig sind, und es müssen verschiedene Verlegeparameter bestimmt werden. Der wichtigste ist die Zugkraft. In diesem Beitrag wird ein Rechenprogramm vorgestellt, mit dem Kabelzugberechnungen schneller und – dank Berücksichtigung der Biegesteifigkeit – präziser ausgeführt werden können.

Das Einziehen von schweren Kabeln in Rohranlagen muss vor allem bei langen Strecken mit mehreren Richtungsänderungen unter Bestimmung von geeigneten maschinellen Hilfsmitteln sorgfältig geplant werden. Zu den Hilfsmitteln gehören beispielsweise Verlegefahrzeuge, Zugmaschinen, Kabelraupen und Kabelrollenantriebe. Die wichtigsten Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit die Kabel nicht beschädigt werden, sind:

- die zulässige Zugbeanspruchung und die zulässigen Radialkräfte (Anpressdruck) dürfen nicht überschritten werden
- die minimalen Biegeradien dürfen nicht unterschritten werden

Nach üblicher Praxis wird die Zugkraft abschnittsweise berechnet. Ein Abschnitt besteht entweder aus einem Krümmer oder aus einem geraden Stück einer Rohranlage, vom Ende eines Krümmers bis zum Anfang des nächsten Krümmers. Mit der Rechnung beginnt man auf der Seite des Kabeleinlaufes und schreitet anschliessend von Abschnitt zu Abschnitt bis zum Ende der Rohranlage fort. Die Summe der Kräfte der einzelnen Abschnitte (Elemente) ergibt die maximale Kabelzugkraft. Zur Berechnung der Reibungskraft im Krümmer nahm man vereinfachend an, dass sich das Kabel wie ein hochflexibles Seil verhalte, das heisst, man benutzte die Formeln, die zur Bestimmung der Seilreibung an einem Krümmer oder an einer Rolle gültig sind. Durch dieses Vorgehen werden systematisch zu grosse Werte ermittelt. Im nun vorliegenden Programm wird die Biegesteifigkeit des Kabels berücksichtigt. Der Rechenvorgang der einzelnen Abschnitte ist im folgenden näher erläutert.

Gerade Abschnitte können horizontal verlaufen oder einen Höhenunterschied aufweisen. In diesem Fall gelten die bekannten Gesetze der Reibung eines Körpers auf einer schiefen Ebene. Diese beiden Fälle werden nun beschrieben.

Berechnung der Zugkraft

Auf geraden Strecken ohne Höhenunterschied beträgt die Zugkraft F am Ende eines geraden Abschnittes:

$$F = \mu\, G\, L \qquad (1)$$

wobei F den Endzug [N], μ den Reibungskoeffizienten, G das spezifische Kabelgewicht [N/m] und L die Trasseelänge [m] bezeichnet.

Falls die Kabelstrecke einen Höhenunterschied aufweist, wird sich der Endzug je nachdem, ob auf- oder abwärts gezogen wird, vergrössern oder verkleinern. In diesem Fall gilt die etwas allgemeinere Formel:

$$F = G\, L\, (\mu \cos \beta \pm \sin \beta) \qquad (2)$$

Der Neigungswinkel wird in dieser Gleichung durch β angegeben, das positive Vorzeichen gilt für Aufwärtszug und das negative Vorzeichen für Abwärtszug.

Für Berechnungen der Zugkraft an Krümmungen wird, wie erwähnt, in der bis anhin üblichen Handrechnung die Formel für hochflexible Seile verwendet. Es gilt dann also:

$$F_E = F_A\, e^{\mu\alpha} \qquad (3)$$

mit den Zugkräften F_E und F_A am Ende und am Anfang der Kurve, dem Kurvenwinkel α und dem Reibungskoeffizienten μ.

Nun weiss man aus Erfahrung, dass ein biegesteifes Kabel im Krümmer bei Zug kleinere Reibungskräfte aufweist als ein biegeweiches Seil. Je biegeweicher ein Seil ist, um so mehr schmiegt es sich dem Krümmer an, und wegen des grösseren Umschlingungswinkels nimmt die Reibungskraft zu. Wie die Biegesteifigkeit eines Kabels berücksichtigt werden kann, wird im folgenden näher beschrieben.

Berücksichtigung der Biegesteifigkeit

Der grundsätzliche Unterschied zwischen den Reibungskräften ohne und mit Einbezug der Biegesteifigkeit kann anschaulich dargestellt werden, wenn statt eines Krümmers eine Rolle verwendet wird. Wird um eine festgehaltene Rolle ein hochflexibles Seil (entspricht Kabel mit Biegesteifigkeit ~0) mit dem Umschlingungswinkel $\alpha = \pi/2$ gelegt (Bild 1a) und mit einem Gewicht belastet, so beträgt die Zugkraft $F = G\, e^{\mu\alpha}$, $\alpha = \pi/2$. Für ein biegesteifes Kabel ist die Zugkraft F' kleiner (Bild 1b) als F, weil $\alpha' < \alpha$.

Für ein biegesteifes Kabel gilt

$$F' = G \cdot e^{\mu\,[\alpha - (\beta_1 + \beta_2)]} \qquad (4)$$

wobei die Winkel $\beta_1 = f(G, R, M)$ und $\beta_2 = f(F', R, M)$ von G, F', R und der Biegesteifigkeit M des Kabels abhängig sind (Bild 1).

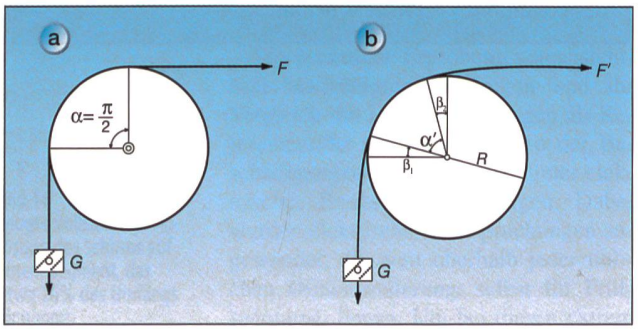

Bild 1 a: Umschlingungswinkel α bei hochflexiblem Kabel, b: Umschlingungswinkel α' bei biegesteifem Kabel

Adresse des Autors
Ewald Sarbach, Dipl. Ing. ETH, Studer Draht- und Kabelwerk AG, 4658 Däniken

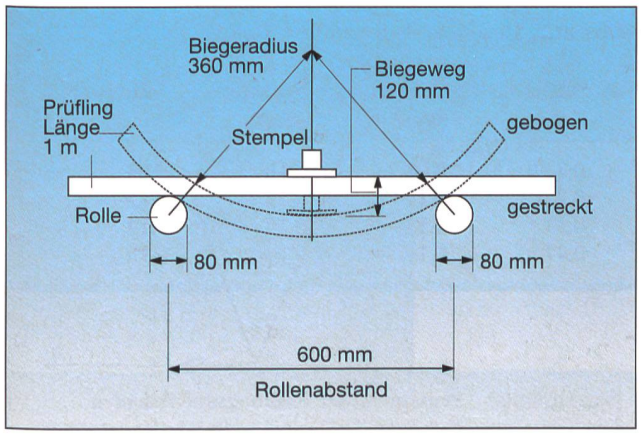

Bild 2 Versuchsanordnung für die Bestimmung der Biegesteifigkeit am Kabel, Masse in mm

Kabeltyp			Biegesteifigkeit [Nm]
XDMZ-Z	3×1×240/27 Al	12/20 kV	756
XDMZ-Z	3×1×150/24 Al	12/20 kV	491
XDMZ-Z	3×1×50/19 Al	12/20 kV	212
XDMZ	1×240/27 Al	12/20 kV	177
XDMZ	1×150/24 Al	12/20 kV	88
XDMZ	1×50/19 Al	12/20 kV	28
XKDT	1×240/35	12/20 kV	197
XKDT	1×50/35	12/20 kV	91
GKN	3×240/240	0,6/1 kV	381
GKN	3×50/50	0,6/1 kV	29
A2XSY	1×95 RE	12/20 kV	68[1)]
NA2XS2Y	1×150 RM	12/20 kV	204[1)]
A2XS2Y	1×150 RE	12/20 kV	234[1)]
A2X2Y	4×150 SE	0,6/1 kV	450[1)]
NAEKEBA	3×150 RM	12/20 kV	881[1)]

Tabelle I Biegesteifigkeit verschiedener Kabeltypen

[1)] Die Messwerte dieser Kabeltypen sind [1] entnommen.

Da sich ein Kabel beim Biegen wesentlich anders verhält als ein Balken, kann man seine Biegesteifigkeit nicht rechnerisch bestimmen. Legt man ein Kabel über zwei Rollen und drückt man in der Mitte des Rollenabstandes mit einem Stempel auf das Kabel, so lässt sich die Biegesteifigkeit als das Produkt der Stempelkraft mal den halben Rollenabstand, für einen vorgegebenen Biegeweg, definieren. Die Abmessungen der Versuchsanordnung sind im Bild 2 dargestellt.

In Tabelle I sind Messwerte für verschiedene Kabeltypen zusammengestellt.

Die vom Praktiker meistens vertretene Meinung, ein Mittelspannungskabel mit Drahtschirm sei biegeweicher als ein Kabel mit einem geschlossenen Aluminiumschirm, wird nicht bestätigt. Das Gegenteil trifft zu: Beispielsweise beträgt die Biegesteifigkeit des Kabels XDMZ (1×240/27 Al, 12/20 kV) 177 Nm, jene des Kabels XKDT (1×240/35, 12/20 kV) 197 Nm. Dieser Unterschied kommt dadurch zustande, dass der geschlossene Aluminiumschirm eine Stärke von nur 0,25 mm besitzt, während die Drähte des Drahtschirms einen Durchmesser von 1 mm aufweisen. Aufschlussreich ist auch ein Vergleich mit dem in Deutschland häufig verwendeten Mittelspannungskabel mit massivem Al-Leiter. Beispielsweise ist die Biegesteifigkeit des Kabeltyps A2XS2Y 1×150 RE nach Tabelle I 234 Nm, jene des Typs XDMZ (1×150/24 Al) 88 Nm. Der im Querschnitt gleiche 3-Leiter-Kabeltyp weist jedoch eine Biegesteifigkeit von 491 Nm auf. Für drei häufig verwendete Kabeltypen kann die Biegesteifigkeit Bild 3 entnommen werden.

Kabelzugberechnung

Rohranlagen, in die Kabel eingezogen werden, können für die Berechnung in Einzelelemente (Bild 4) unterteilt werden. Bild 4 zeigt eine Anlage, die aus einer geraden Strecke (1–2) und einem Krümmer (2–3) besteht. Falls sich links von der Kabelstelle 1 noch weitere Kabelabschnitte befinden, soll angenommen werden, dass die von ihnen verursachte Kraft bereits in F_n berücksichtigt wurde. Die Zugkraft S_1 am Ende des geraden Elementes setzt sich aus der Kraft F_{1-2} des Abschnitts 1–2, der Kraft F_n und der Kraft F_R einer eventuell vorhandenen Stossraupe zusammen:

$$S_1 = F_n + F_{1-2} - F_R$$
$$= F_n - F_R + G\,L\,(\mu \cos\beta \pm \sin\beta) \qquad (5)$$

wobei nach (2) das positive Vorzeichen für Steigung, das negative für Gefälle gilt. Der Winkel β beschreibt die Neigung der Strecke 1–2 zur Horizontalen

Für das erste Element ist F_R gleich der Abzugskraft des Kabels ab Trommel. Für den Krümmer gilt nach (4)

$$F = S_1\, e^{\mu\,[\alpha-(\beta_1+\beta_2)]} \qquad (6)$$

Die Verkleinerung des Umschlingungswinkels um β_1 und β_2 (Bild 1b) des im Krümmer anliegenden Kabels ist proportional zur Biegesteifigkeit M und indirekt proportional zum Radius R und den Zugkräften S_1 und F (Bild 4). Die Biegesteifigkeit wird definiert als Stempelkraft mal halben Rollenabstand (Bild 2) und hat die Dimension eines Momentes. Also:

$$\beta_1 + \beta_2 = \frac{M}{R}\left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{F}\right) \qquad (7)$$

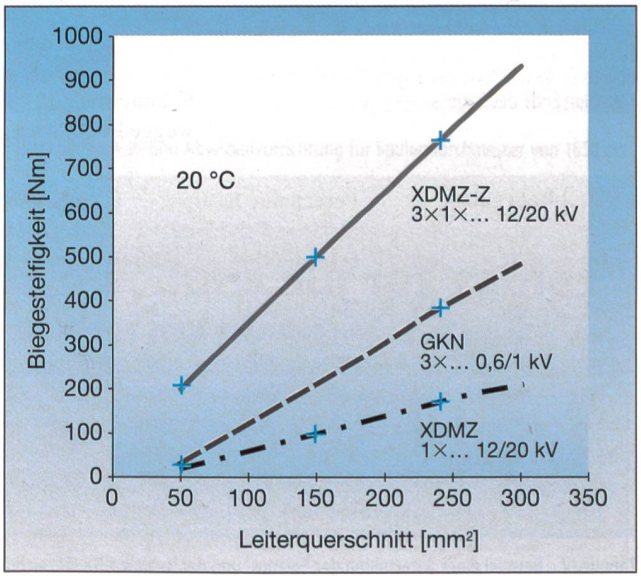

Bild 3 Biegesteifigkeit in Abhängigkeit des Leiterquerschnitts

XDMZ-Z
Dreileiter-Tri-Delta-Kabel, 20/12 kV

GKN
Dreileiter-Niederspannungs-Netzkabel

XDMZ
Einleiter-Kabel, 20/12 kV

Kabeltypen			Messwerte Reibungskoeffizient μ, Einzug in Kunststoff PE-Rohre nicht geschmiert tiefster Wert	höchster Wert	Mittelwert	geschmiert tiefster Wert	höchster Wert	Mittelwert
XDMZ-Z	3×1×...	12/20 kV	0,16	0,28	0,23	0,08	0,10	0,09
XDMZ	1×...	12/20 kV	0,19	0,28	0,22	0,12	0,19	0,15
XKDT	1×...	12/20 kV	0,30	0,35	0,33	0,13	0,16	0,14
GKN	3×...	0,6/1 kV	0,46	0,49	0,47	0,14	0,16	0,15

Tabelle II Reibungskoeffizienten für verschiedene Netzkabel-Typen

Da die zu bestimmende Kraft F im Exponenten vorkommt, lässt sich Gleichung (6) nicht in geschlossener Form auflösen. Das Rechenprogramm benutzt die Gleichungen (5), (6) und (7), um die Berechnung schrittweise von Element zu Element durchzuführen, wobei der in einem Rechenschritt berechnete Wert F jeweils der Kraft F_n des nächsten Iterationsschritts entspricht.

Der Reibungskoeffizient μ von Netzkabel-Typen kann der Tabelle II entnommen werden. Es handelt sich um Labormesswerte, die mit einer Präzisions-Messeinrichtung ermittelt wurden.

Wie zu erwarten ist, findet man recht unterschiedliche Reibungskoeffizienten, wenn nicht geschmiert wird. Die Unterschiede sind im wesentlichen bedingt durch das Mantelmaterial und durch die Extrusionsgüte. Die in der Tabelle II aufgeführten Kabeltypen XKDT und GKN sind mit identischem PE-Mantelmaterial gespritzt, weisen aber eine unterschiedliche Oberflächengüte auf. Die Kabeltypen XDMZ besitzen ein hartes, zähes Mantelmaterial mit sehr glatter Oberfläche, so dass der Reibungskoeffizient auch im ungeschmierten Zustand wesentlich kleiner als bei üblichem PE-Mantelmaterial ist. Durch Schmierung wird der Einfluss der Oberflächengüte praktisch aufgehoben. Als Schmiermittel sind die auf Wasserbasis hergestellten Kabelschmiermittel gut geeignet (z. B. LUP-P von 3M). In Abhängigkeit der Kabelgeometrie kann der Reibungskoeffizient im geschmierten Zustand jedoch um rund 40% reduziert werden. Die Schraubenform des Tri-Delta-Kabels (Kabeltyp XDMZ-Z) bewirkt, dass das Schmiermittel besser am Kabel haften kann und beim Ziehen unter die Auflagefläche gedrückt wird, während bei den runden Formen (Kabeltypen XDMZ, XKDT, GKN) die Schmiermasse von der Auflagefläche weggedrückt wird.

Einzugslänge [m]	Praxisgerechte Reibungskoeffizienten Kabeltyp Tri-Delta	Runde Kabeltypen
bis 300	0,12	0,19
301 bis 600	0,13	0,20
601 bis 1200	0,15	0,23
1201 bis 2000	0,17	0,26

Tabelle III Längenabhängige Reibungskoeffizienten

In der Praxis wird das Kabel am Eingang des Rohres geschmiert. Die Schmiermasse streift sich teilweise am Rohr ab, und die Schmierwirkung verringert sich am Anfang des Kabels um so stärker, je länger die Einzugsstrecke ist. Der resultierende Reibungskoeffizient ist deshalb längenabhängig. Tabelle III gibt entsprechende Werte für runde und Tri-Delta-förmige Kabeltypen an, die sich bei guter Schmierung in der Praxis bewährt haben.

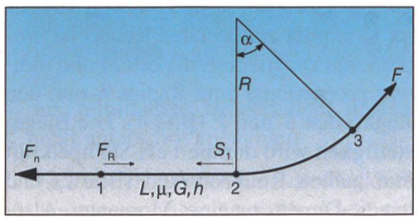

Bild 4 Element einer Rohranlage, bestehend aus einer geraden Strecke (1–2) und einem Bogen (2–3).

F_n Kraft auf n-tes Kabelelement, F_R Kraft einer eventuellen Stossraupe, L Kabellänge der geraden Strecke (1–2), μ Reibungskoeffizient des Kabels, G Gewicht des Kabels, h Höhenunterschied zwischen 1 und 2, S_1 Kraft am Ende der geraden Strecke, R Radius des Bogens (2–3), α Winkel des Bogens, F Zugkraft auf Kabel am Ende des Bogens

Radialkräfte im Bogen

Es muss sichergestellt werden, dass in den Bögen (Krümmern), die auf das Kabel wirkenden Radialkräfte die zulässigen Werte nicht überschreiten. Je nach Kabelkonstruktion liegen die zulässigen Werte meistens im Bereich zwischen 10000 und 20000 Nm. Wird das Kabel über Verlegerollen gezogen, so muss der Anpressdruck pro Verlegerolle bestimmt und mit dem zulässigen Maximalwert verglichen werden. Falls der zulässige Wert überschritten wird, müssen der Walzendurchmesser oder die Rollenzahl vergrössert werden.

Nach heute üblicher Praxis nimmt man für die Berechnung der Radialkräfte im Bogen vereinfachend an, dass die Zugkraft am Bogenanfang gleich gross sei wie jene am Bogenende. Mit dieser Annahme ergibt sich die Radialkraft Z_B' pro Längeneinheit [2]:

$$Z_B' = \frac{F \cdot \sin\left(\alpha/2\right)}{r \cdot \pi \cdot \alpha/360} \qquad (8)$$

Das von uns entwickelte Rechenprogramm kommt ohne die vereinfachende Annahme gleicher Zugkräfte auf beiden

Daten Rohranlage L [m]	α [°]	R [m]	berechnete Kräfte S_1 [kp]	F [kp]	Z [kp/m]	aufsummierte Kabellänge bis jeweils Bogenende [m]
24	90	4,5	34	44	8	31
46	65	6,3	71	85	12	84
224	35	7,5	217	220	29	313
16	90	7,5	229	287	31	341
82	45	7,5	335	373	46	428
24	60	7,5	387	447	54	460
34	85	25,0	467	588	19	531
60	–	–	623	–	–	591

Tabelle IV Beispiel einer Berechnung der Einzugs- und der Radialkräfte. Bezeichnungen im Text.

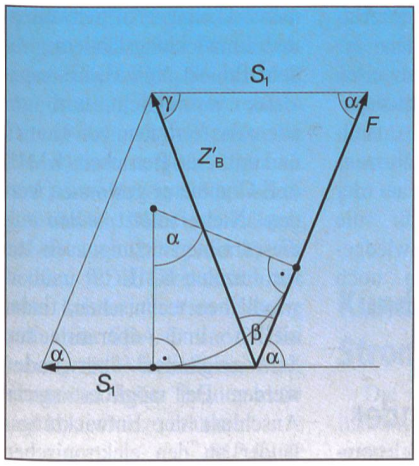

Bild 5 Kräfteparallelogramm zur Berechnung der Radialkraft Z_B'

S_1 ist die Zugkraft am Bogeneintritt und F die Kraft am Bogenaustritt.

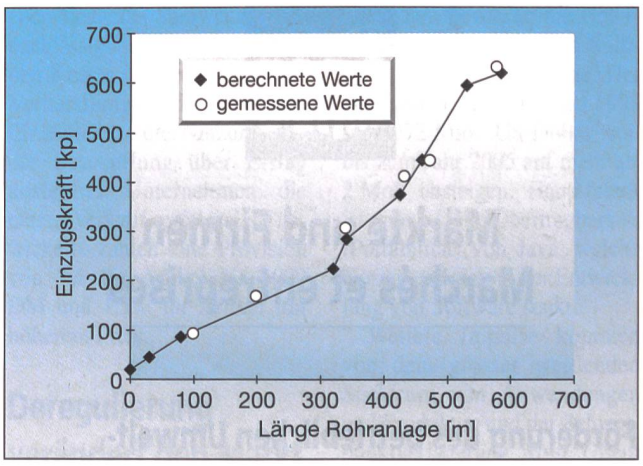

Bild 6 Vergleich von berechneten und gemessenenWerten

Seiten des Kabelbogens aus. Mit den Regeln der Geometrie kann aus Bild 5 die Radialkraft Z_B' abgeleitet werden:

$$Z_B' = \frac{S_1 \cdot \sin\alpha}{\sin\beta} \qquad (9)$$

wobei gilt

$$\mathrm{tg}\,\frac{\beta-\lambda}{2} = \frac{S_1 - F}{S_1 + F} \cdot \frac{1}{\mathrm{tg}\,\frac{\alpha}{2}} \qquad (10)$$

und

$$\frac{\beta+\gamma}{2} = 90° - \frac{1}{2}\alpha \qquad (11)$$

Vergleich von Rechnung und Messung

Die Zugkraft an der Kabelziehwinde ist meistens höher als die Zugkraft am Kabel. Die Kraft am Kabel lässt sich mit einer Messbirne, die zwischen dem Zugseil der Zugmaschine und dem Kabel eingebaut wird, ermitteln. Die folgende Rechnung und Messung betrifft einen Einzug eines Tri-Delta-Kabels XDMZ-Z 3×1×95/22 Al, 12/20 kV mit 7 Richtungsänderungen in ein PE-Rohr. Die Kabellänge war 591 m. Die charakteristischen Daten der Rohranlage wie Länge L (Bild 4), Bogenwinkel α und Radius R des Bogens sind in Tabelle IV aufgeführt. S_1 ist die Einzugskraft am jeweils betrachteten Bogenanfang, F am Bogenende und Z die Radialkraft (Anpresskraft) pro Längeneinheit im Bogen. Die Rechnung basiert auf einem Reibungskoeffizient 0,13 (Tabelle III), einer Biegesteifigkeit 330 Nm (Bild 3) und einer Abzugskraft von 20 kp des Kabels von der Trommel. Die Rechnung ergibt eine maximale Einzugskraft von 623 kp, der Messwert betrug 625 kp. Im Bild 6 sind berechnete und gemessene Werte dargestellt.

Hätte man statt ein Tri-Delta-Kabel ein rundes Kabel eingezogen, Typ XKDT-T mit einem Gewicht von 7,57 kg/m und einem Reibungskoeffizienten von 0,2 (Tabelle III), so ergibt die Rechnung eine maximale Einzugkraft von 1995 kp.

Fahrzeug mit Auf-/Abwickelvorrichtung

Zukünftig tritt vermehrt das Problem auf, Kabel aus bestehenden Rohranlagen herauszuziehen und aufzuwickeln (Stahlband-armierte Kunststoffkabel und längere Öl-Papier-Kabel), was mit verfügbaren Einrichtungen teilweise problematisch ist. Diese scheitern häufig an zu hohen Kabeltransportgewichten, an zu grossen Spulendurchmessern, an zu geringen Zug- und Bremskräften oder an einer mangelnden Geländegängigkeit. Ein neues Zugfahrzeug beseitigt diese Einschränkungen und erleichtert so die Verlegung von grösseren Kabellängen. Charakteristisch für das Fahrzeug und die Einrichtung ist die Auf- und Abwickelvorrichtung, die autonom oder auf dem Anhänger oder Zugfahrzeug eingesetzt werden kann. Bild 7 zeigt das Zugfahrzeug und den Anhänger mit montierter Auf- und Abwickelvorrichtung. Fahrzeug wie Einrichtungen können gemietet werden.

Literatur

[1] *Helmut Stöger* et al.: Runde eindrähtige Aluminiumleiter für 20-kV-VPE-Kabel. Elektrizitätswirtschaft, 89(1990)8, 356–366.

[2] *Kurt Zbinden:* Maschinelles Verlegen von Kabeln im Erdreich. Bulletin bcc 2/74.

Bild 7 Geländegängiges Zugfahrzeug mit Auf- und Abwickelvorrichtung für Spulendurchmesser von 1650 bis 3400 mm (Kabeltransporte bis 12 t)

Calcul des tractions sur les câbles

Résultats plus précis et plus rapides

En Suisse, les câbles de distribution sont tirés presque exclusivement dans des conduites. Si la distance à couvrir est longue et si les conduites présentent plusieurs changements de direction, il faut déterminer lors de l'étude du projet si des gouttières de câbles sont nécessaires et il faut définir aussi différents paramètres de pose, le principal étant la force de traction. Dans cet article, l'auteur décrit un programme avec lequel les calculs des câbles se font plus rapidement et – grâce à la prise en considération de la rigidité flexionnelle – avec plus de précision.