

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:	76 (1985)
Heft:	23
Artikel:	Optimierung von Freileitungen mit Computer
Autor:	Weiss, W. / Condrau, L. / Kiessling, F.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-904717

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: 26.01.2026

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

Optimierung von Freileitungen mit Computer

W. Weiss, L. Condrau, F. Kiessling

Der Aufsatz beschreibt ein umfassendes Computerprogramm-System, mit dem bei vorgegebenen topographischen Daten das günstigste Längenprofil von Freileitungen bestimmt werden kann und anschliessend die Masten und die Fundamente berechnet und optimiert werden können.

L'article décrit un système très complet de programmes pour ordinateur pour déterminer le profil longitudinal le plus favorable de lignes aériennes sur la base des données topographiques, puis calculer et optimiser les pylônes et leurs fondations.

1. Einführung

Die Planung einer Freileitung beginnt gewöhnlich mit der Festlegung der Trasse im Feld und der Vermessung, d.h. mit der Ermittlung von Daten zur Produktion des Längenprofils. Zu diesem Zweck müssen grosse Datenmengen erfasst und verarbeitet werden. Das Resultat ist das Längenprofil. Der nächste Schritt ist die Mastaussteilung auf dem Profil: die Auslegung aufgrund bestimmter Kriterien. Dieser Vorgang wird durchgeführt, indem entsprechende Kettenlinien-Schablonen von Hand auf den Längenprofilen zur Bestimmung der Maststandorte und der Seilkurven dienen. Aufgrund der genauen Standorte werden Seil- und Mastkräfte berechnet und Maste entworfen und berechnet.

Dies ist in wenigen Worten das Prozedere, welches zum Entwurf einer Freileitung nötig ist. Seit vielen Jahren werden Berechnungen mit elektronischen Rechnern verschiedenster Grösse durchgeführt. Die Berechnungen erfolgen z.T. mit Tisch- oder Taschenrechnern. Die dazu nötigen Programme lösen jedoch jeweils nur Einzelprobleme. Die grossen Datenmengen, die beim Entwurf einer Freileitung verarbeitet werden müssen, rufen aber nach einem Programmsystem, welches eine kontinuierliche Verarbeitung von Daten erlaubt – von der Vermessung im Feld bis zur fertigen Zeichnung bzw. Berechnung. Ein derartiges Verfahren eliminiert nicht nur eine ganze Reihe von Fehlerquellen, darüber hinaus steht das digitale Profil mit allen weiteren Angaben gespeichert jederzeit zur Verfügung sowohl zur Nachführung oder für Projektänderungen während der Ausführungsphase als auch zur Produktion von Ausführungszeichnungen und evtl. permanenten Speicherung als Datensicherung.

Die Autoren beschreiben, wie sie CAD/CAE beim Entwurf von Freileitungen, zur Produktion der Längen-

profile und zur optimierten Auslegung einsetzen. Dieses Ziel wurde durch die hocheffizienten Vermessungssysteme gefördert, die heute erlauben, die Vermessungsdaten in einem Datenterminal automatisch zu registrieren und direkt dem Programmsystem zuzuführen. Von besonderem Interesse ist die Möglichkeit, Längenprofile zum Entwurf von Freileitungen, wo es die Vegetation erlaubt, digital aus vorhandenen Karten entsprechender Massstäbe oder direkt aus Stereophotomodellen zu entnehmen. In Kapitel 3 und 4 beschreiben die Autoren ferner ein Programmsystem zur Optimierung von Freileitungsmasten und Fundamenten.

2. Auslegung mit dem Programmsystem SPOT

2.1 Erfassung von Terraindaten

Die Terraindaten werden durch eine Vermessung mit Informatik-Theodoliten im Feld ermittelt und automatisch in einem Datenterminal gespeichert. Das im folgenden beschriebene Programm wurde vor allem für automatischen Datenfluss entworfen. Trotzdem ist es möglich, die Vermessungsdaten mit konventionellen Mitteln zu erheben und dem System die aufbereiteten Daten einzugeben. Das Datenformat, welches für die Produktion eines Längenprofils nötig ist, ist in Figur 1 gezeigt. Für jede Abspannstrecke zwischen zwei Abspannmasten muss ein separates File erstellt werden.

In Gebieten mit wenig bis keiner Vegetation können die Terraindaten photogrammetrisch direkt aus Stereomodellen entnommen werden. Mit dieser digitalisierten Information ist es möglich, Längs- und Querprofile nach freier Wahl auszuziehen. Dies ist von besonderem Interesse für das Studium von Varianten.

Adressen der Autoren

W. Weiss, Ing. grad./STV, und L. Condrau,
Ing. HTL/STV, Motor-Columbus Ingenieur-
unternehmung AG, 5401 Baden.
Dr. F. Kiessling, Siemens AG, Unternehmensbereich
Energietechnik E 43 Leitungsbau, D-8520 Erlangen.

Längenprofil								
Pkt. Nr.	Abszisse	Meereshöhe in Achse	Meereshöhe auf Seitenprofil	R = rechts, L = links	Code	Beschreibung		
140141	1062.9	2114.00	2115.00	R	0			
140143	1086.2	2114.00	2114.00	R	0			
140145	1094.5	2112.00	2112.00	R	0			
140147	1105.8	2110.00	2110.00	R	0			
140149	1115.4	2106.00	2106.00	R	6	BACH		
140151	1130.6	2106.00	2108.00	R	0			
140153	1152.7	2106.00	2106.80	R	0			
140155	1162.9	2108.00	2108.50	R	0			
140157	1178.6	2108.00	2108.50	R	0			
140159	1204.0	2107.00	2107.50	R	0			
140161	1228.6	2106.00	2106.00	R	6	STRASSE		
140163	1245.6	2106.00	2106.50	R	6	PTT		

Situation								
Pkt. Nr.	Abszisse	Ordinate	Höhe Boden	Höhe Hindernis	Code	Beschreibung		
140206	1234.5	34.1	2107.00	2107.00	0	HAUSECKE		
140215	1234.7	34.5	2107.00	2107.00	0	HAUSECKE		
140220	1237.0	-5.0	2106.00	2106.00	0	STRASSE		
140214	1241.6	45.5	2107.00	2107.00	0	HAUSECKE		
140213	1243.9	44.8	2107.00	2107.00	0	HAUSECKE		
140207	1248.3	25.8	2107.00	2107.00	0	HAUSECKE		
140209	1251.0	37.0	2107.00	2107.00	0	HAUSECKE		
140208	1253.6	34.4	2107.00	2107.00	0	HAUSECKE		
140179	1254.1	-40.3	2104.20	2104.20	0	PTT		
140218	1256.5	-46.6	2104.00	2104.00	0	PTT		
140204	1257.0	-47.0	2104.00	2104.00	0	FREILEITUNG		

Eine weitere vorteilhafte Möglichkeit zur Ermittlung von Terraindaten besteht in der Auswertung früher produzierter Karten in brauchbaren Massstäben. Nachdem die Trasse festgelegt ist, wird das Längenprofil digital der Karte entnommen und dem System zugeführt.

In allen Fällen, in denen Terraindaten nicht durch Vermessung im Feld ermittelt werden, ist zu empfehlen, während der Bauabsteckung der Maste im Gelände eine Profilkontrolle durchzuführen. Bei geeignetem Vorgehen können die Längenprofile mit wenig Extraaufwand während dieser Tätigkeit kontrolliert werden.

2.2 Produktion der Längenprofile

Auf der Basis des Input-File (Fig. 1) erzeugt das System ein Terraindaten-File und zeichnet ein Längenprofil (Fig. 2). Dieser Plan enthält das Profil in Leitungssachse, ferner in Gebieten, in denen die seitliche Geländeneigung 5% übersteigt, ein Parallelprofil auf einem vorgegebenen Achsabstand. Auf dem Plan unter dem Profil werden die Situationspunkte gezeichnet, z.B. Hindernisse, kreuzende Leitungen usw.

Dieses Profil erlaubt dem Geometer, seine Aufnahme zu überprüfen und

grobe Fehler zu eliminieren. Gleichzeitig ergänzt er die Situation, indem er die gezeichneten Punkte in der richtigen Weise verbindet. Die Reinzeichnung dieser Situationsdetails erfolgt von Hand. Dies ist die einzige verbliebene Tätigkeit für den Zeichner.

2.3 Eingabe von Leitungsdaten

Das Terraindaten-File ist nun vorhanden. Die Charakteristika der Leitung müssen noch festgelegt werden. Zu diesem Zweck wird ein Leitungsdaten-File erstellt, welches die Angaben über den Leiter, die Bedingungen für die Kettenlinienform und Angaben für den Optimierungsprozess enthält, z. B.:

- den Leiter mit seinen physikalischen Eigenschaften
- den Seilzug (Every Day Stress)
- die Umweltbedingungen, Temperaturen, Zusatzlasten
- die Auswahl der Vorschriften bzw. Normen
- die Belastungsannahmen
- die elektrischen Abstände
- Typ und Höhe der zur Verfügung stehenden Maste und Verlängerungen
- die Isolatoren (Typ, Gewicht, Länge)
- Kosten der Maste nach Typen
- Kosten der Fundamente entsprechend den Annahmen über die Bodenverhältnisse entlang der Leitung

Fig. 1
Input, Format für
Längenprofil
(vgl. Fig. 2)

- Kosten der Durchleitungsrechte entlang der Leitung
- Angabe von Gebieten, in denen keine Maste erstellt werden können
- Angaben von vorgegebenen Standorten usw.

Mit diesen Angaben erzeugt das System ein Leitungsdaten-File und druckt eine Liste zu Kontrollzwecken.

2.4 Optimierung der Auslegung

Das System evaluiert die Terrain- und Leitungsdaten und optimiert die Maststandorte, d.h. ihre Verteilung auf dem Längenprofil, den Masttyp und die Masthöhe. Das Programm berechnet eine grosse Anzahl von Lösungen, vergleicht ihre Kosten und präsentiert die billigste als Lösung Nr. 1. Die Ergebnisliste enthält jedoch viele andere Lösungen, auf welche zurückgegriffen werden kann, sollte sich Lösung Nr. 1 aus nicht vorhersehbaren Gründen als nicht realisierbar erweisen.

Als nächsten Schritt berechnet das System die Seilstatik für die verschiedenen Belastungsannahmen der günstigsten Lösung. Es wird z. B. eine Liste der Abstände zum Boden bzw. zu Hindernissen berechnet und ausgedruckt. Die Berechnung berücksichtigt nicht nur alle verlangten Belastungsfälle aufgrund der verschiedenen Zusatzlasten und Bedingungen, sondern u.a. auch den Bruch einer Isolatorkette auf einem zuvor bestimmten Mast sowie ungleiche Eislast.

2.5 Zeichnung des Längenprofils

Nach der erfolgreichen Berechnung der vorhergehenden Schritte ist das System bereit, die Ergebnisse zu zeichnen bzw. zu drucken.

Der wichtigste Output ist das Längenprofil. Es enthält außer den Maststandorten und den Kettenlinienkurven alle für die Projektausführung notwendigen Angaben (Fig. 2). Es ist zudem mit allen Details gespeichert. Projektänderungen, Mastverschiebungen usw. können mit kleinstem Aufwand ausgeführt, und eine revidierte Version des Profils und der Ergebnislisten kann in kürzester Zeit gezeichnet bzw. gedruckt werden.

Das Mastauslegungsprogramm ist ein sehr flexibles Instrument zum Entwurf von Freileitungen. Seine Anwendbarkeit wird durch andere Programme, die auf dieselben Daten-Files zurückgreifen, zudem wesentlich erweitert. Dies ist vor allem der Fall mit dem Programmsystem DBANK zur

36
T 30

37
A 23

CURTINATSCH

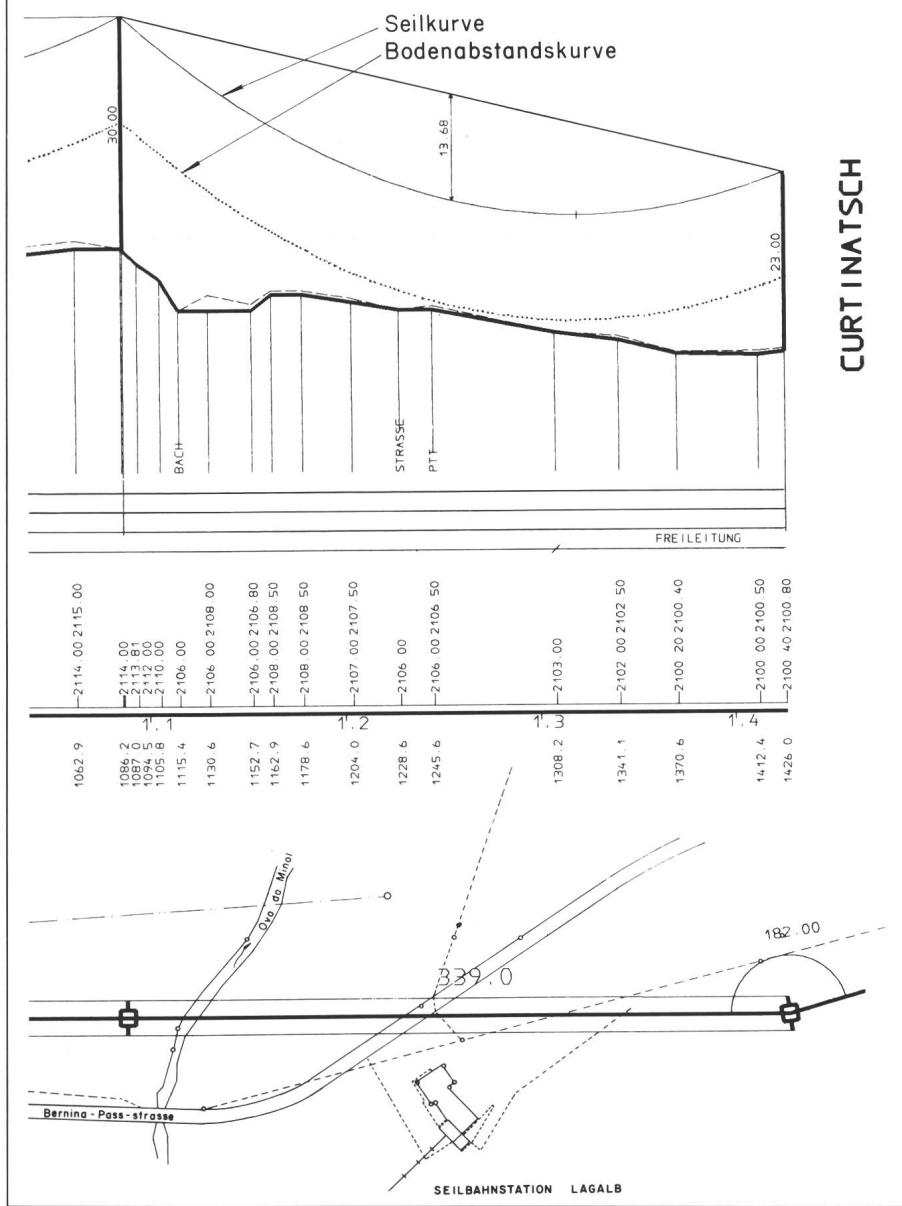


Fig. 2 Längenprofil mit Auslegung

Die angegebenen Zahlen betreffen die Distanz vom Ausgangspunkt sowie die Höhe in Achse und auf Seitenprofil (vgl. Fig. 1)

Berechnung von Kräften auf die Maste und der Reglagedaten, welches im folgenden beschrieben wird.

3. Programmsystem zur Berechnung von Kräften auf Maste und der Reglagedaten (DBANK)

Dieser Teil des integralen Programmsystems ist im wesentlichen ein

Berechnungsprogramm, welches auf die Daten-Files zurückgreift, die vorher im Rahmen des Auslegungsprogrammes SPOT erstellt wurden. Es berechnet Kräfte auf Maste, Reglagedaten, Mastlisten usw. Die relevanten Daten sind die Leiter-Charakteristika, Belastungsannahmen, Umgebungsbedingungen (Wind, Temperatur, Zusatzlasten), Spannweiten, Höhenunterschiede, Leitungswinkel usw. Verschiedene Module greifen auf die-

selben Daten zurück und berechnen verschiedene Werte. Die im folgenden beschriebenen drei Module sind die am meisten benützten.

Seilkräftetabelle: Dieses Modul berechnet longitudinale, transversale und vertikale Kräfte auf die Maste entsprechend den gewünschten Belastungsannahmen und erstellt eine fortlaufende Liste der Annahmen und Ergebnisse für alle Masten der betreffenden Leitung (Fig. 3). Ein weiteres Modul erlaubt eine Sortierung der Kräfte nach bestimmten Kriterien. Der Statischer wird dadurch in die Lage versetzt, eine erste Näherung einer Masttypeneinteilung zu erreichen.

Reglagetabellen: Die Durchhänge der Leiter und Erdseile für jede Spannweite werden für zehn frei wählbare Temperaturen errechnet (Fig. 4). Dabei wird das Recken und Kriechen der Seile kompensiert. Auf Wunsch kann eine Berechnungsvariante aktiviert werden, welche Durchhänge und Korrekturmasse ermittelt für Reglageoperationen in gebirgigem Terrain, wo die Isolatorketten stark ausgelenkt werden, solange die Leiter in Rollen hängen. Die ermittelten Werte erlauben dem Montageunternehmer das Senkrechstellen der Ketten im ersten Anlauf (Fig. 5).

Mastliste: Dieses Modul druckt eine sehr praktische Mastliste aus, die mit den wichtigsten Mastangaben in vielseitiger Weise im Leben eines Projektes benützt werden kann. Auf Wunsch kann eine Variante des Berechnungsganges die Länge der Leiter und Erdseile ermitteln und im Rahmen einer kombinierten Mastliste ausdrucken (Fig. 6).

Das beschriebene Programm DBANK ist außer der eigentlichen Projektierung von Leitungen auch sehr praktisch für die Nachrechnung von bestehenden Leitungen für den Fall der Spannungserhöhung oder für die Nachrechnung von Unternehmerberechnungen.

4. Mast- und Fundamentberechnung

Aus den Daten der obengenannten Programme werden die für die Berechnung der Maste und Fundamente erforderlichen Kräfte aussortiert. Hinzu kommen noch Datenpakete, die speziell für die Berechnung der Maste er-

forderlich sind, wie z.B. Sicherheitsfaktoren, Lastfaktoren, Materialkennwerte, Grenzspannungen, Profiltabellen, Windlasten, Formfaktoren usw.

Grundsätzlich können zwei Arten der Berechnung unterschieden werden: Berechnung von «normalen» Masttypen (z.B. Tannenbaum- oder Donau-Maste) und die Berechnung von Spezialmasten (spezielle Portalmaste usw.). Aus wirtschaftlichen Gründen werden heute, vor allem im Ausland, breitbeinige Gittermaste verwendet. Die statische Berechnung und Konstruktion sind sehr arbeitsintensiv. Deshalb wurden schon frühzeitig für die Berechnung spezielle Programme entwickelt. Solche Programme wurden während der letzten Jahre mit Erfolg angewendet und mit zunehmenden Möglichkeiten in der Computertechnologie ständig erweitert und angepasst. Heute kann gesagt werden, dass fast sämtliche aufwendigen Rechenarbeiten vom Computer ausgeführt werden, was dem Ingenieur mehr Zeit für Planung und Optimierungen verschafft.

4.1 Berechnung von Gittermasten

Für die Berechnung eines Gitterma-
tes aufgrund der gegebenen Belastun-
gen muss zuerst die Mastgeometrie
entworfen und festgelegt werden. So-
wohl klimatische Bedingungen, Um-
weltanforderungen und die Belegung
der Maste als auch vorhandene Nor-
men haben wesentlichen Einfluss auf
das Mastbild. Im nächsten Schritt wer-
den die Kräfte in jedem einzelnen Teil
bei jeder erforderlichen Belastung be-
stimmt. Damit ist die Grundlage für
die Bemessung gegeben. Die statische
Berechnung kann mit den anerkannten
Regeln der Statik durchgeführt werden.
Bei der Bemessung und der
Profilwahl müssen die jeweiligen Nor-
men und die erhältlichen Profilarten
berücksichtigt werden. Die Nachrech-
nung des definitiven Mastes ermög-
licht schliesslich, die Fundamentkräfte
zu bestimmen.

Die Berechnung der einzelnen Last-
fälle hängt im wesentlichen vom Mast-
typ ab, z.B. Winkelmaст, Tragmast,
Endmast usw. Im weiteren müssen die
mastspezifischen Gegebenheiten, wie
Wind- und Gewichtsspannweite, Leit-
ungswinkel, Mastgeometrie, Bele-
gung, elektrische Abstände, berück-
sichtigt werden. Ferner müssen die
Kräfte den seilstatistischen Anforderun-
gen (Durchmesser, Gewicht, Fläche
und Zugspannungen) entsprechen.

SEILKRAEFTETABELLE LEITERSEIL : 600 AD						
IDENTNR.:	34		35		36	
MASTNUMMER	00032		00033		00034	
MASTTYP	A 2		T 1		T 1	
MASTHOEHE (M)	32.0		19.0		27.0	
RICHTUNGSAENDERUNG (GON)	222.0		200.0		200.0	
HOEHENDIFFERENZ (M)	-24.0		-40.0		-9.0	
EFFEKTIVE SPANNWEITE (M)	328	214	214	405	405	202
AEQUIVALENTE SPANNWEITE (M)	297	316	316	316	316	316
EDS (N/M2)	34.33	34.33	34.33	34.33	34.33	34.33
ZUSATZLAST SCHNEE (N/M)	88.29	49.05	49.05	49.05	49.05	49.05
SEILSPANNUNG BEI						
ZUSATZLAST (N/M2)	102.54	75.59	75.59	75.59	75.59	75.59
WINDLAST (N/M)	19.32	19.32	19.32	17.90	17.90	17.90
KRAEFE BEI ZUSATZLAST (N)						
HORIZONTAL C	123047	90705	90705		90705	
LONGITUDINAL L	-31860		0		0	
TRANSVERSAL T	36750		0		0	
HORIZONTAL L+T	68610		0		0	
VERTIKAL V	17048	25874		21632		
LONGITUDINAL LB	121215	89355	90705	90705	90705	90705
TRANSVERSAL TB	21155	15595	0	0	0	0
HORIZONTAL LB+TB	142370	104950	90705	90705	90705	90705
VERTIKAL VB	-1954	25870	19462	26210	18549	19700
KRAEFE BEI EDS+WIND (N)						
HORIZONTAL C	41202	41202	41202	41202	41202	41202
TRANSVERSAL T	25426		11581		11062	
VERTIKAL V	10795		11274		9376	
LONGITUDINAL LB	40588	40588				
TRANSVERSAL TB	13814	11612	4332	7446	7446	3812
MAXIMALLAST AUF KETTE	123165	34658			30038	

Fig. 3 Seilkräftetabelle

LEITERSEIL		600 AD		600.00 (MM2)		D U R C H H A E N G E						
MAST-TYP	SPANNWEITE NR.	EFF.	AEQ.	I -5 GRAD	C I	O GRAD	C I	5 GRAD	C I	10 GRAD	C I	15
A 00032	214	316	I	4.34	I	4.43	I	4.52	I	4.61	I	I
T 00033	405	316	I	15.53	I	15.87	I	16.19	I	16.52	I	I
T 00034	202	316	I	3.84	I	3.93	I	4.01	I	4.09	I	I
T 00035	266	316	I	6.66	I	6.80	I	6.94	I	7.08	I	I
T 00036	339	316	I	10.84	I	11.08	I	11.30	I	11.53	I	I
A 00037			I		I		I		I		I	I

Fig. 4 Reglagetabelle, ebenes Terrain

SONELGAZ, ALGERIE DEC. 1978 LIGNE 220KV TIARET - OUED SLY HYP. ACC REP. F																
LEITERSEIL		ALU-ACIER		411.00 (MM2)		R E G U L I E R M A S S E B E I T E M P E R A T U R										
MAST-BEZ./ EFF. EQU.	SPANNWEITE	I	5 GRAD	C I	10 GRAD	C I	15 GRAD	C I	20 GRAD	C I	1	2	3	4		
TE 382 1R	VISIERMASS: DURCHHANG	(M)	10.51	I	10.66	I	10.80	I	10.95	I	I	I	I	I		
446	(M)	I	10.51	I	10.66	I	10.80	I	10.95	I						
S 429	VISIERMASS: RUECKW. (M)	I	13.07	I	13.21	I	13.36	I	13.50	I						
446	VERSETZMASS: ROLLE (MM)	I	-14.12	I	-14.08	I	-14.05	I	-14.03	I						
	VERSETZMASS: LOT (MM)	I	-7.09	I	-7.28	I	-7.47	I	-7.66	I						
	VISIERMASS: VORW. (M)	I	15.80	I	15.98	I	16.17	I	16.35	I						
	DURCHHANG (M)	I	13.25	I	13.44	I	13.62	I	13.81	I						
S 425	VISIERMASS: RUECKW. (M)	I	15.81	I	16.00	I	16.18	I	16.36	I						
446	VERSETZMASS: ROLLE (MM)	I	-49.84	I	-50.33	I	-50.82	I	-51.32	I						
	VERSETZMASS: LOT (MM)	I	-15.01	I	-15.46	I	-15.92	I	-16.39	I						
	VISIERMASS: VORW. (M)	I	15.50	I	15.68	I	15.86	I	16.04	I						
	DURCHHANG (M)	I	12.96	I	13.14	I	13.32	I	13.50	I						

Fig. 5 Reglagetabelle, gebirgisches Terrain

ENEE TEGUCIGALPA HONDURAS 230 KV LINE EL CAJON - SUYAPA									
ID. NO.	TOWER NO.	TYPE	NOMINAL HEIGHT (M)	SPAN (M)	DIFF. OF ROUTE HEIGHT (M)	LINE ROUTE ANGLE (GON)	SECTION LENGTH (M)	EQ. SPAN	
6	03004	T 0	23.0	159	-2	178	515	514	
7	03005	S 0	20.0	476	12	200			
8	03006	S 0	32.0	418	-55	200			
9	03008	T 0	23.0	425	77	207	1053	419	

Fig. 6 Mastliste

Das Programm kann nicht nur den speziellen Anforderungen bezüglich Wind angepasst werden, sondern auch den verschiedenen Belastungsfällen und Belastungskombinationen in verschiedenen Richtungen. Die Berechnung der Kräfte für spezielle Maste, wie Abzweigmaste, Maste mit mehreren Systemen usw., bietet keine Probleme. Die so berechneten Kräfte werden geordnet und für einen bestimmten Schnitt im Mast gruppenweise zusammengefasst. In jedem gewünschten Schnitt können alle Kräfte und Momente berechnet werden.

Mit den berechneten Maximalkräften wird der Mast dimensioniert. Die Windbelastung auf jedem Stab wie auch das Eigengewicht des Stabes werden berücksichtigt. Die Rechnung wird interaktiv so lange weitergeführt, bis das optimale Profil gefunden ist. Dieser Prozess verläuft automatisch. Die Berechnung wird mit der üblichen Fachwerktheorie für normale Maste ausgeführt. Messungen bei Mastversu-

chen haben diese Berechnungen mehrfach bestätigt.

Ziel der Berechnung ist, eine optimale Mastkonstruktion zu erhalten. Neben den zulässigen Spannungen müssen für eine optimale und sichere Bemessung auch die jeweils erforderlichen Knickkurven berücksichtigt werden. Limiten bezüglich minimalen Profilabmessungen können ebenfalls bestimmt werden. Wirtschaftlich interessant wirkt sich auch die Möglichkeit aus, verschiedene Stahlqualitäten zu verwenden. So hat es sich als vorteilhaft erwiesen, für Eckstiele Stahl 52 zu verwenden, während bei den Diagonalen Stahl 37 wegen der hohen Schlankheit wirtschaftlicher ist. Die Materialqualität der Schrauben kann vorgegeben werden. Für die Bemessung der Maste ist meistens die maximale Druckkraft massgebend. Diese hängt von der Schlankheit des Stahles ab. Die normalen Knickkurven werden für die Bemessung beigezogen, wobei Anpassungen an andere Vorschriften,

falls erforderlich, problemlos durchführbar sind. Aufgrund eines Kostenvergleichs der Profile, der Schrauben und der Knotenbleche wählt das Programm die optimale Lösung und stellt dies auf dem Output dar, und zwar das Profil, die Schrauben, die geometrische Daten, den effektiven Zug und Druck, die Lochleibungs- und Abscherspannungen wie auch die massgebenden Lastfälle und Knicklängen. Am Schluss der Berechnung werden die Fundamentkräfte und die Materialauszüge zusammengestellt.

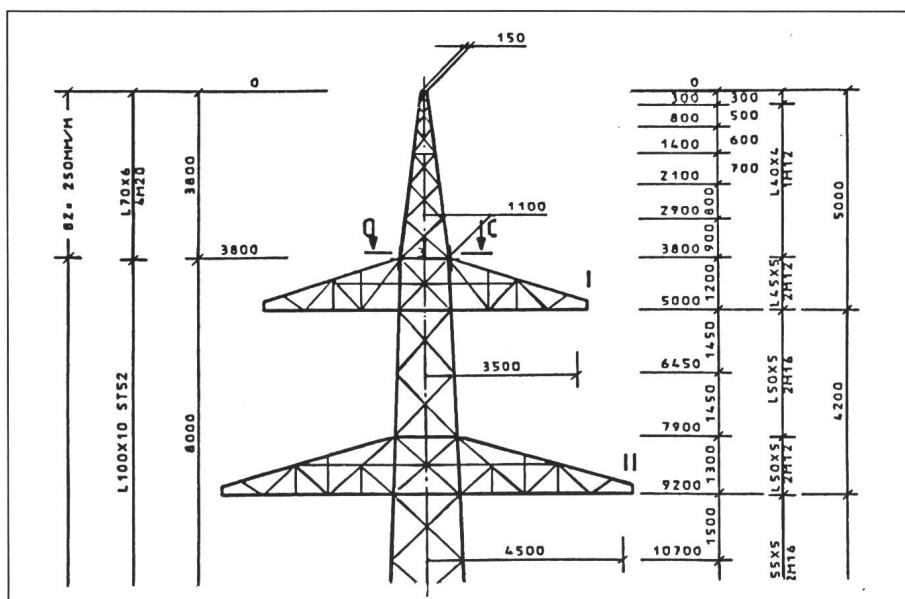
Mit dem Programm können nun die Systemzeichnungen des Mastes erstellt werden, worin alle Daten für die konstruktive Bearbeitung des Mastes enthalten sind (Fig. 7). Die Daten können für eine Weiterverarbeitung auf das CAD-System übernommen werden.

4.2 Berechnung von Spezialmasten

Spezielle Umstände, Ausnahmefälle oder extreme Mastbilder erfordern oft ungewöhnliche Mastkonstruktionen. Zur Berechnung solcher komplexer Strukturen wird ein spezielles Finite-Element-Programmsystem mit interaktiver Datenaufbereitung und grafischen Kontrollmöglichkeiten verwendet. Die so erstellten Daten können ebenfalls zur Weiterverarbeitung im CAD-System verwendet werden. Um Probleme mit der Finite-Element-Methode zu lösen, müssen komplizierte Modelle generiert werden. Der Ausdruck «model generation» beschreibt gesamthaft den Prozess der Generierung von Knotenkoordinaten mit den entsprechenden Freiheiten, die Zusammenhänge der Elemente und deren geometrische Werte, wie auch die Belastungen und die Randbedingungen. Das Programm schliesst dann alle Einzelteile zusammen und gibt dem Benutzer eine effiziente Möglichkeit, das Modell zu generieren, Systemzeichnungen zu erstellen, zu berechnen und die Resultate übersichtlich darzustellen (Fig. 8, 9, 10).

Das System ist eine Zusammenstellung von Programmodulen, abgestützt auf eine einheitliche Datenbasis, welches dem Benutzer von modernen Computeranlagen erlaubt, die Finite-Element-Methode effizient anzuwenden.

Speziell für die Berechnung von Leitungsmasten wurde ein Nachlaufprogramm entwickelt. Es dient vor allem zur übersichtlichen Darstellung der Resultate der verschiedenen Berechnungsphasen. So sind z. B. die zulässi-



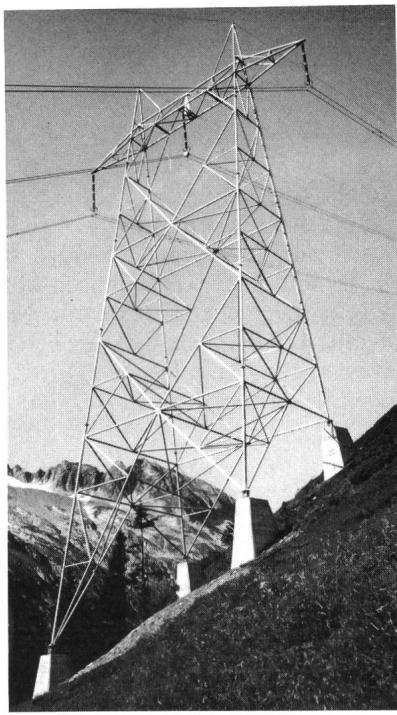


Fig. 8 400-kV-Mast, Lukmanierleitung

gen und die effektiven Druckspannungen für jeden Stab ausgedruckt.

Das Programm hat die Möglichkeit, statische Berechnungen auszuführen unter Berücksichtigung einer kompletten Bibliothek von Elementen, die für eine dreidimensionale Berechnung von räumlichen Rahmen erforderlich sind, dies sowohl bei symmetrischer wie bei unsymmetrischer Belastungsanordnung. Gemischte Randbedingungen werden ebenfalls unterstützt.

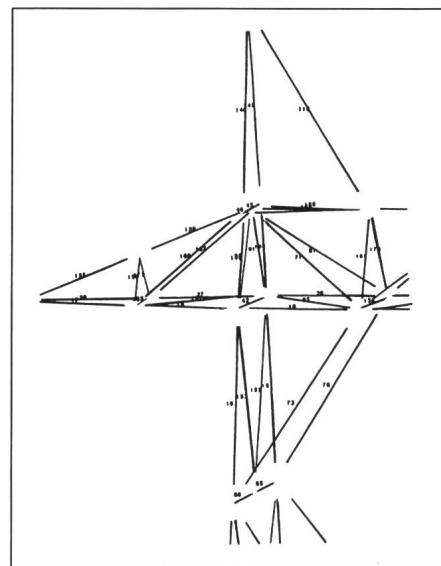


Fig. 9 Plot (Ausschnitt) eines 400-kV-Mastes mit Stabnumerierung

4.3 Erstellen der Konstruktionspläne

Mit den Daten aus den beschriebenen Berechnungen kann das System für die Konstruktion des Mastes auf CAD erstellt werden. Die Konstruktionspläne werden vom Konstrukteur direkt am CAD-Bildschirm hergestellt. Im weiteren besteht die Möglichkeit, Materialauszüge und alle erforderlichen Ansichten und Schnitte zu zeichnen.

4.4 Fundamentberechnung

Entsprechend der unterschiedlichen Bodenbeschaffenheit sind verschiede-

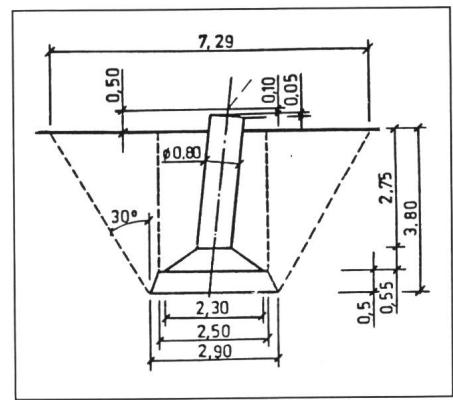


Fig. 11 Einzelfundament mit CAD gezeichnet

ne Fundamentsysteme für Gittermaste mit grosser Spreizung zu entwerfen. Während bei guten Verhältnissen Einzelfundamente zur Anwendung kommen, müssen bei schlechten Verhältnissen z. B. Plattenfundamente verwendet werden.

Die Bemessung von Einzelfundenamen hat zum Ziel, die notwendigen Abmessungen unter Berücksichtigung der gegebenen Bodenkennwerte zu ermitteln und gleichzeitig die niedrigsten Kosten zu erreichen. Die Hauptbelastungen der Fundamente sind die Zug- und Druckkräfte in Richtung der Eckstiele. Massgebend für die Bemessung sind meistens die Zugkräfte. Die zulässige Zugkraft auf das Fundament ist abhängig vom Winkel der inneren Reibung der entsprechenden Böden und der Form der Fundamente (Fig. 11).

Stab Nr.	Anfangsknoten	Endknoten	Profil Typ	Material Qualität	Querschnittsfläche	Trägheitsradius	Massgebender Lastfall Zug	Vorhandene Zugspannung	Ausnutzung bzw. Zug in %	Zulässige Schlankeit	Effektive Schlankeit	Massgebender Lastfall Druck	Zulässige Druckspannung	Vorhandene Druckspannung	Ausnutzung bzw. Druck in %
JOR:ED26 STAB 28	AK 96 EK 106	LAENGE 2.414	PRO 3	MAT 1	NACHWEISE SIA 161 QUER-FL T-RAD 6.190E-03 3.490E-02	KURVE C 16:11:53 LF 3 SIGMAVOR -9.860E 07	PAGE 2 (X) 27.8% LA-Z 200 LA-V 69 LF 3 SIGMAK-Z -2.130E 08	(X) 27.8% LA-Z 200 LA-V 69 LF 3 SIGMAK-Z -2.130E 08 (X) 46.3%	Ausnutzung bzw. Zug in %	Zulässige Schlankeit	Effektive Schlankeit	Massgebender Lastfall Druck	Zulässige Druckspannung	Vorhandene Druckspannung	Ausnutzung bzw. Druck in %
29	51	64	2.414	3	1	6.190E-03	3.490E-02	3 1.293E 08	36.4%	200	69	4	-2.130E 08	-1.822E 07	8.6%
30	64	78	2.414	3	1	6.190E-03	3.490E-02	3 1.218E 08	34.3%	200	69	4	-2.130E 08	-1.635E 07	7.7%
31	55	69	2.414	3	1	6.190E-03	3.490E-02	3 1.292E 08	36.4%	200	69	1	-2.130E 08	-1.175E 07	5.5%
32	69	81	2.414	3	1	6.190E-03	3.490E-02	3 1.218E 08	34.3%	200	69	1	-2.130E 08	-1.141E 07	5.4%
33	57	71	2.414	3	1	6.190E-03	3.490E-02	3 -1.457E 08	41.1%	200	69	3	-2.130E 08	-1.457E 08	68.4%
34	71	83	2.414	3	1	6.190E-03	3.490E-02	3 -1.375E 08	38.7%	200	69	3	-2.130E 08	-1.375E 03	64.6%
35	61	76	2.414	3	1	6.190E-03	3.490E-02	3 -1.457E 08	41.1%	200	69	3	-2.130E 08	-1.457E 08	68.4%

Fig. 10 Ergebnisse der Mastberechnung

Bei Plattenfundamenten werden die Eckstiele in die Platte einbetoniert. Entscheidend für die Bemessung sind wiederum die Bodenkennwerte. Das Programm optimiert die Plattenabmessungen unter Berücksichtigung der Beton- und Armierungsstahl-Quantitäten. Im Resultat-Output sind alle für die Ausführung erforderlichen Größen ersichtlich, wie z.B. Abmessungen, Betonvolumen, Armierungsquerschnitte usw. Die Armierungspläne können anschliessend mit CAD gezeichnet werden.

5. Schlussfolgerung

Das beschriebene integrale Programmsystem für die Optimierung der Auslegung von Längenprofilen ist ein sehr flexibles Werkzeug für die Planung von Freileitungen. Es erlaubt kontinuierliche Behandlung von Daten ebenso wie manuelle Einwirkung an jedem gewünschten Punkt, eliminiert eine Menge Fehlerquellen und produziert Zeichnungen und Ergebnislisten in standardisierter Form. Das

Material für eine projektierte Freileitung kann auf diese Weise präzise und rasch ermittelt werden.

Das Programmsystem für die Berechnung von Masten und Fundamenten dient der Planung von Freileitungen auf der Basis von individuellen lokalen Bedingungen mit dem Ziel, sowohl technisch wie ökonomisch optimale Lösungen für jede Art von Masten und Fundamenten zu erreichen. Es wird seit Jahren erfolgreich für Leitungsprojekte angewendet.