

# Optimierung von Freileitungen

Autor(en): **Weiss, W. / Condrau, L. / Kiessling, F.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK =  
Mensuration, photogrammétrie, génie rural**

Band (Jahr): **84 (1986)**

Heft 3

PDF erstellt am: **01.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-233032>

## **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.

– une bonne altimétrie?, mais on ne pourra jamais atteindre une équidistance inférieure à 10 ou 20 m; ne faut-il pas chercher une précision juste suffisante pour corriger les déformations dues au relief dans les images spatiales, du type de celles de SPOT?

– une cartographie au trait? mais sur quelle région et est-on prêt à assurer le volume de complètement de terrain nécessaire

– de grandes possibilités thématiques, des spatiocartes? mais avec quelles émulsions

– une surface couverte plus large à chaque orbite? est-ce indiqué, alors que chaque vol de quelques jours demande déjà plus d'un an pour être exploité cartographiquement et de façon partielle

– une meilleure résolution? et est-on prêt à l'accepter au prix d'une réduction de la surface couverte?

A en juger des hésitations actuelles devant les résultats de SPACELAB-1, il semble bien que ce soit effectivement une question décisive; peut être apparaîtra-t-il souhaitable après SPACELAB - 2 de recourir à une chambre de focale double, 600 mm, ainsi que l'IGN l'avait suggéré lors du contrat d'étude que l'ASE lui avait passé en 1975 à ce sujet (voir [2] et [3]). Ne faudrait-il pas aussi étudier les moyens d'améliorer la diffusion des images et de limiter les pertes

actuelles de l'ordre de 20% en résolution lors des duplications?

Si l'on se porte à l'horizon 1995, c'est tout un système spatial à composantes multiples et complémentaires qui va tendre à se structurer et au sein duquel, grâce aux enseignements tirés des premières expériences, SPACELAB devrait figurer en bonne place pour offrir des services que seule sa spécificité lui confère: SPACELAB pourra alors être utilisé en tant que tel ou associé à d'autres systèmes spatiaux numériques, dans le visible, comme SPOT, ou dans les hyperfréquences Radar, comme ERS-1.

D'autres projets comme celui du mini-laboratoire habité HERMES, proposé actuellement par le CNES, interrogeront également la communauté des usagers.

Quels capteurs d'observation de la terre mettre à bord?

Il est probable qu'ensuite, une fois le globe recouvert au moins une fois et pour l'essentiel, par chacun des divers systèmes spatiaux, ce qui, pour les satellites habités doit pouvoir se faire en une quinzaine de vols d'une semaine, de nouvelles réflexions se feront jour pour dégager les systèmes définitifs servant de base à l'observation spatiale de la Terre à des buts cartographiques. Les délais nécessaires à la préparation des systèmes spatiaux et les enjeux en ques-

tion imposent de la part des usagers des temps de réaction très brefs.

Il faut s'efforcer qu'il ne s'écoule plus 10 ans entre le moment où une possibilité nouvelle apparaît à l'issue des recherches, et celui où elle diffuse en production dans l'ensemble des pays intéressés. C'est pour cela qu'il faut se convaincre et convaincre chacun d'éviter de prendre du retard dès le départ, tant dans la préparation, l'évaluation, l'équipement, la formation que dans la programmation de ce qui apparaît possible, dès que la faisabilité en est suffisamment démontrée.

[1] Metric Camera Work Shop:  
Proceedings of a joint DFVLR-ESA workshop –  
fév. 1985.  
European Space Agency (ESA SP-209).

Bulletins d'Information de L'IGN:  
[2] N° 44, p. 50-53 «SPACELAB, ou une autre  
voie» (G. Ducher).  
[3] N° 49, p. 36-37 «Nouvelles de SPACELAB»  
(G. Ducher).

Adresse de l'auteur:

G. Ducher  
Ingénieur général géographe  
Directeur de la Recherche  
Institut géographique national  
2, avenue Pasteur  
F-94160 Saint-Mandé

## Optimierung von Freileitungen

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 Mastausstellung 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. Auf-

grund der genauen Standorte werden Seil- und Mastkräfte berechnet und Masten 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 Grössen 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 hin-

aus 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 Längenprofile 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 Teraindaten

Die Teraindaten werden durch eine Vermessung mit Informatik-Theodoliten im Feld ermittelt und automatisch in einem Datenterminal gespeichert. Das im folgen-

Nachdruck eines Artikels vom Bulletin des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins, Ausgabe 23/1985

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
140165	1308.2	2103.00	2103.00	R	0	
140167	1341.1	2102.00	2102.50	R	0	
140169	1370.6	2100.20	2100.40	R	0	
140171	1412.4	2100.00	2100.50	R	0	
150001	1426.0	2100.40	2100.80	R	0	

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
140205	1258.0	12.6	2105.50	2105.50	0	FREILEITUNG
140183	1288.2	-39.8	2103.00	2103.00	0	STRASSE
140190	1393.2	-40.5	2097.50	2097.50	0	FUSSWEG
140181	1405.9	5.9	2100.50	2100.50	0	MAST
140185	1411.4	-26.9	2098.00	2098.00	0	FREILEITUNG
150001	1422.3	-40.0	2097.00	2097.00	0	WINKELPUNKT

Abb. 1: Input, Format für Längenprofil

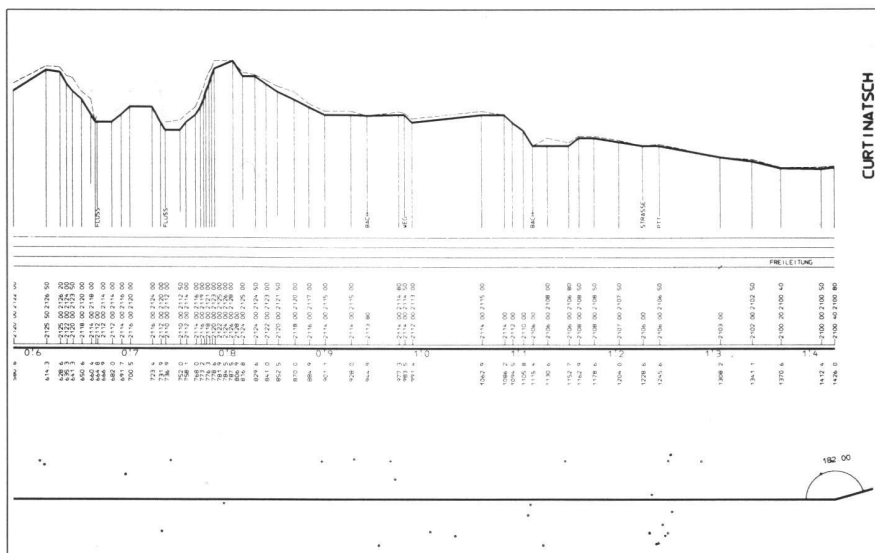


Abb. 2: Längenprofil ohne Auslegung

den 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 Abb. 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.

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 (Abb. 1) erzeugt das System ein Terraindaten-File und zeichnet ein Längenprofil (Abb. 2). Dieser Plan enthält das Profil in Leitungsachse, 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

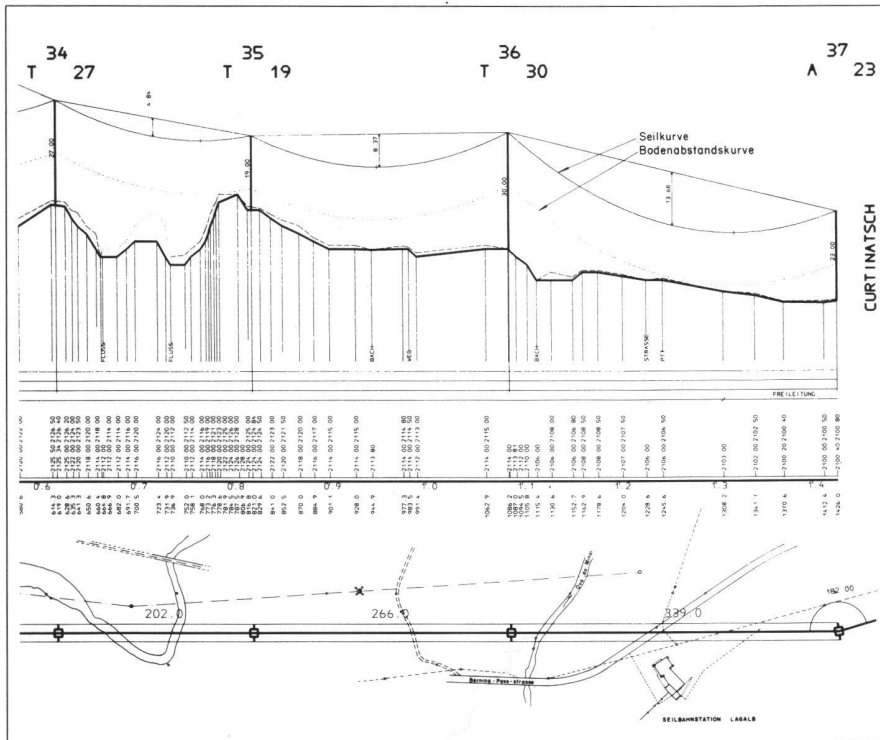


Abb. 3: Längenprofil mit Auslegung

SEILKRAFTTABELLE LEITERSEIL : 600 AD									
IDENTNR.: 34 35 36 37 38 39									
MASTNUMMER	00032	00033	00034	00035	00036	00037	00038	00039	00040
MASTTYP	A 2	T 1	T 1	T 1	T 1	T 1	T 1	T 1	T 1
MASTHÖHE (M)	32.0	19.0	27.0	19.0	30.0	23.0	23.0	23.0	23.0
RICHTUNGSÄNDERUNG (GOH)	222.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
HOCHENDIFFERENZ (M)	24.0	-40.0	-9.0	1.0	20.0	3.0	3.0	3.0	3.0
EFFEKTIVE SPANNWEITE (M)	328	214	214	405	202	266	339	339	249
AQUIVALENTE SPANNWEITE (M)	297	316	316	316	316	316	316	316	256
EDS (N/H2)	34.33	34.33	34.33	34.33	34.33	34.33	34.33	34.33	34.33
ZUSATZLAST SCHNEE (N/H)	88.29	49.05	49.05	49.05	49.05	49.05	49.05	49.05	49.05
SEILSPANNUNG BEI (N/H2)	102.54	75.59	75.59	75.59	75.59	75.59	75.59	75.59	72.47
ZUSATZLAST (N/H)	19.32	19.32	19.32	17.90	17.90	20.34	20.34	17.90	19.32
WINDLAST (N/H)	19.32	19.32	19.32	17.90	17.90	20.34	20.34	17.90	19.32
KRAFTTABELLE BEI ZUSATZLAST (N)									
HORIZONTAL C	123047	90705	90705	90705	90705	90705	90705	90705	86961
LONGITUDINAL L	-31960	0	0	0	0	0	0	0	-3707
TRANSVERSAL T	36750	0	0	0	0	0	0	0	25033
HORIZONTAL L+T	68610	0	0	0	0	0	0	0	28741
VERTIKAL V	17048	24874	21632	16386	32095	24604	24604	24604	24604
LONGITUDINAL LB	121215	89355	90705	90705	90705	90705	90705	90705	86093
TRANSVERSAL TB	21155	15595	0	0	0	0	0	0	12781
HORIZONTAL LB+TB	142370	104950	90705	90705	90705	90705	90705	90705	102581
VERTIKAL VB	-1954	25870	19462	26210	18549	19700	13745	15324	29283
KRAFTTABELLE BEI EDS+WIND (N)									
HORIZONTAL C	41202	41202	41202	41202	41202	41202	41202	41202	41202
LONGITUDINAL L	25426	11581	11062	9223	11675	12375	13641	13641	13641
VERTIKAL V	10795	11274	9376	7295	14136	40791	40791	40791	40791
LONGITUDINAL LB	40588	40588	40588	40588	40588	40588	40588	40588	40588
TRANSVERSAL TB	13814	11612	4332	7446	7446	3812	3812	5607	12266
MAXIMALLAST AUF KETTE	123165	34658	30038	27368	27368	27368	27368	27368	27368
MOTOR - C O L U M B U S INGENIEURUNTERNEHMUNG AG CH 5401 BADEN SCHWEIZ									

Abb. 4: Seilkräftetabelle

LEITERSEIL 600 AD									
600.00 (MM2)									
DURCHHAENGE IN (M) BEI :									
MAST- TYP NR.	SPANNWEITE EFF. REQ.	-5 GRAD C	0 GRAD C	5 GRAD C	10 GRAD C	15 GRAD C	20 GRAD C	25 GRAD C	30 GRAD C
A 00032	214 316	4.34	4.43	4.52	4.61	4.70	4.79	4.87	4.96
T 00033	405 316	15.53	15.87	16.19	16.52	16.84	17.15	17.46	17.77
T 00034	202 316	3.84	3.93	4.01	4.09	4.17	4.24	4.32	4.40
T 00035	266 316	6.65	6.80	6.94	7.08	7.22	7.35	7.49	7.62
T 00036	339 316	10.84	11.00	11.30	11.53	11.75	11.97	12.19	12.40
A 00037									

Abb. 5: Reglagetabelle, ebenes Terrain

- 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
- Kosten der Durchleitungsrechte entlang der Leitung
- Angaben von Gebieten, in denen keine Masten 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 Isolatorreihe 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 (Abb. 3). 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 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 dieselben Daten zurück und berechnen verschiedene Werte. Die im folgenden beschriebenen drei Module sind die am meisten benutzten.

**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 (Abb. 4). Ein weiteres Modul erlaubt eine Sortierung der Kräfte nach bestimmten Kriterien. Der Statiker wird dadurch in die Lage versetzt, eine erste Näherung einer Masttypeneinteilung zu erreichen.

**Reglagedaten:** Die Durchhänge der Leiter und Erdseile für jede Spannweite werden für zehn frei wählbare Temperaturen errechnet (Abb. 5). Dabei wird das Recken und Kriechen der Seile kompensiert. Auf Wunsch kann eine Berechnungsvariante aktiviert werden, welche Durchhänge und Korrekturmaste 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 Senkrechtstellen der Ketten im ersten Anlauf (Abb. 6).

**Mastliste:** Dieses Modul druckt eine sehr praktische Mastliste aus, die mit den wichtigsten Mastangaben in vielseitiger Weise im Leben eines Projektes benutzt werden kann. Auf Wunsch kann eine Variante des Berechnungsganges die Länge der Leiter und Erdseile ermitteln und im Rahmen einer kombinierten Mastliste ausdrucken (Abb. 7).

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

SONELGAZ, ALGERIE						DEC.1978		LIGNE 220KV TIARET - OUED SLY						HYP.ACC REP. F					
LEITERSEIL		ALU-ACIER		411.00 (MM2)															
MAST-BEZ./ SPANNWEITE EFF. EQU.		REGULIERMASSE BEI TEMPERATUR																	
				5 GRAD C		10 GRAD C		15 GRAD C		20 GRAD C		25 GRAD C		30 GRAD C		35 GRAD C			
TE	1R	VISIERMASS:	VORW. (M)	10.51	10.66	10.80	10.95	11.09	11.23	11.37									
382	446	DURCHHANG (M)	(M)	10.51	10.66	10.80	10.95	11.09	11.23	11.37									
5	2	VISIERMASS:	RUECKW. (M)	13.07	13.21	13.36	13.50	13.64	13.79	13.93									
		VERSETZMASS:	ROLLE (MM)	-14.12	-14.08	-14.05	-14.03	-14.00	-13.98	-13.96									
		VERSETZMASS:	LOT (MM)	-7.09	-7.28	-7.47	-7.66	-7.86	-8.05	-8.24									
429	446	VISIERMASS:	VORW. (M)	15.80	15.98	16.17	16.35	16.53	16.71	16.89									
		DURCHHANG (M)	(M)	13.25	13.44	13.62	13.81	13.99	14.16	14.34									
5	3	VISIERMASS:	RUECKW. (M)	15.81	16.00	16.18	16.36	16.54	16.72	16.90									
		VERSETZMASS:	ROLLE (MM)	-49.84	-50.33	-50.82	-51.32	-51.82	-52.33	-52.84									
		VERSETZMASS:	LOT (MM)	-15.01	-15.44	-15.92	-16.39	-16.85	-17.33	-17.80									
425	446	VISIERMASS:	VORW. (M)	15.90	15.68	15.26	16.04	16.21	16.39	16.56									
		DURCHHANG (M)	(M)	12.96	13.14	13.32	13.50	13.67	13.85	14.02									
5	4	VISIERMASS:	RUECKW. (M)	15.69	15.87	16.05	16.23	16.40	16.58	16.75									
		VERSETZMASS:	ROLLE (MM)	-59.71	-60.02	-60.33	-60.64	-60.95	-61.26	-61.58									
		VERSETZMASS:	LOT (MM)	-13.99	-14.37	-14.76	-15.15	-15.54	-15.93	-16.33									
446	446	VISIERMASS:	VORW. (M)	16.91	17.11	17.31	17.50	17.69	17.88	18.07									
		DURCHHANG (M)	(M)	14.21	14.41	14.60	14.80	14.99	15.18	15.37									
5	5	VISIERMASS:	RUECKW. (M)	16.94	17.14	17.34	17.53	17.72	17.91	18.10									
		VERSETZMASS:	ROLLE (MM)	34.88	35.38	35.88	36.38	36.89	37.41	37.94									
		VERSETZMASS:	LOT (MM)	-0.50	-0.37	-0.22	-0.07	0.08	0.25	0.43									
516	446	VISIERMASS:	VORW. (M)	21.89	22.16	22.42	22.69	22.95	23.21	23.47									
		DURCHHANG (M)	(M)	19.13	19.40	19.67	19.93	20.19	20.45	20.71									
TE	6	VISIERMASS:	RUECKW. (M)	19.10	19.37	19.63	19.89	20.15	20.41	20.67									
TE	6	VISIERMASS:	VORW. (M)	4.72	4.81	4.90	4.98	5.07	5.15	5.23									
260	389	DURCHHANG (M)	(M)	4.72	4.81	4.90	4.98	5.07	5.15	5.24									
5	7	VISIERMASS:	RUECKW. (M)	7.44	7.53	7.62	7.70	7.79	7.87	7.96									
		VERSETZMASS:	ROLLE (MM)	49.82	50.87	51.86	52.90	53.93	54.96	55.97									
		VERSETZMASS:	LOT (MM)	-3.87	-3.98	-4.16	-4.28	-4.39	-4.50	-4.62									
446	389	VISIERMASS:	VORW. (M)	16.59	16.85	17.11	17.36	17.62	17.87	18.12									
		DURCHHANG (M)	(M)	13.87	14.13	14.38	14.64	14.89	15.14	15.39									
5	8	VISIERMASS:	RUECKW. (M)	16.58	16.84	17.10	17.36	17.61	17.86	18.11									
		VERSETZMASS:	ROLLE (MM)	-103.47	-106.01	-108.79	-111.39	-114.03	-116.71	-119.43									
		VERSETZMASS:	LOT (MM)	-30.70	-32.25	-34.03	-35.65	-37.32	-39.03	-40.79									
293	389	VISIERMASS:	VORW. (M)	8.71	8.82	8.93	9.04	9.15	9.26	9.36									
		DURCHHANG (M)	(M)	6.00	6.11	6.22	6.33	6.43	6.54	6.65									

Abb. 6: Reglagedaten, gebirgiges Terrain

Kräfte aussortiert. Hinzu kommen noch Datenpakete, die speziell für die Berechnung der Maste erforderlich 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 Gittermastes aufgrund der gegebenen Belastungen muss zuerst die Mastgeometrie entworfen werden. Sowohl klimatische Bedingungen, Umwelthanforderungen und die Belegung der Maste als auch vorhandene Normen haben wesentlichen Einfluss auf das Mastbild. Im nächsten Schritt werden die Kräfte in jedem einzelnen Teil bei jeder erforderlichen Belastung bestimmt. 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 Normen und die erhältlichen Profilartern berücksichtigt werden. Die Nachrechnung des definitiven Mastes ermöglicht schliesslich, die Fundamentkräfte zu bestimmen. Die Berechnung der einzelnen Lastfälle hängt im wesentlichen vom Masttyp ab, z.B. Winkelmast, Tragmast, Endmast usw. Im weiteren müssen die mastspezifischen Gegebenheiten, wie Wind- und Gewichtsspannweite, Leitungswinkel, Mastgeometrie, Belegung, elektrische Abstände, berücksichtigt werden. Ferner müssen die Kräfte den seilstatischen Anforderungen (Durchmesser, Gewicht, Fläche und Zugspannungen) entsprechen.

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 Abzweigsmaste, 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 Mastversuchen haben diese Berechnungen mehrfach bestätigt. Ziel der Berechnung ist, eine optimale



ENEE TEGUCIGALPA HONDURAS  
230 KV LINE EL CAJON - SUYAPA

DNR.: 44053  
PAGE 2  
12.04.1985

ID. NO.	TOHER NO.	TYPE	NOMINAL HEIGHT (M)	SPAN (M)	DIFF. OF HEIGHT (M)	LINE ROUTE ANGLE (GON)	SECTION LENGTH (M)	EQ. SPAN	REMARKS
6	05004	T 0	23.0	159	-2	178	515	514	
7	05005	S 0	20.0	476	12	200			
8	05006	S 0	32.0	418	-55	200			
9	05008	T 0	23.0	425	77	207	1053	419	

Abb. 7: Mastliste

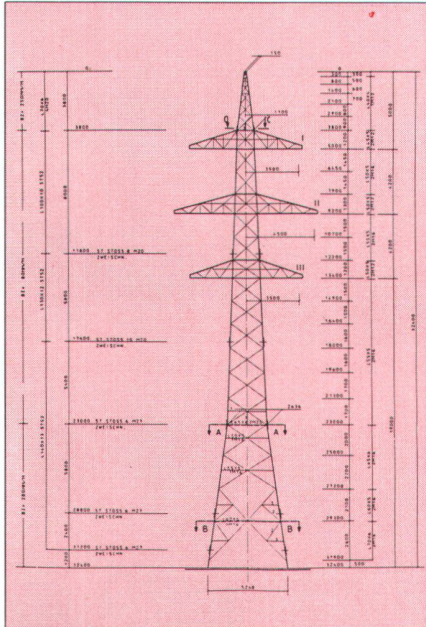


Abb. 8: Mastbild mit CAD gezeichnet

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 geometrischen 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 (Abb. 8). Die Daten können für eine Weiterverarbeitung auf das CAD-System übernommen werden.

## 4.2 Berechnung von Spezialmasten

Spezielle Umstände, Ausnahmelasten 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

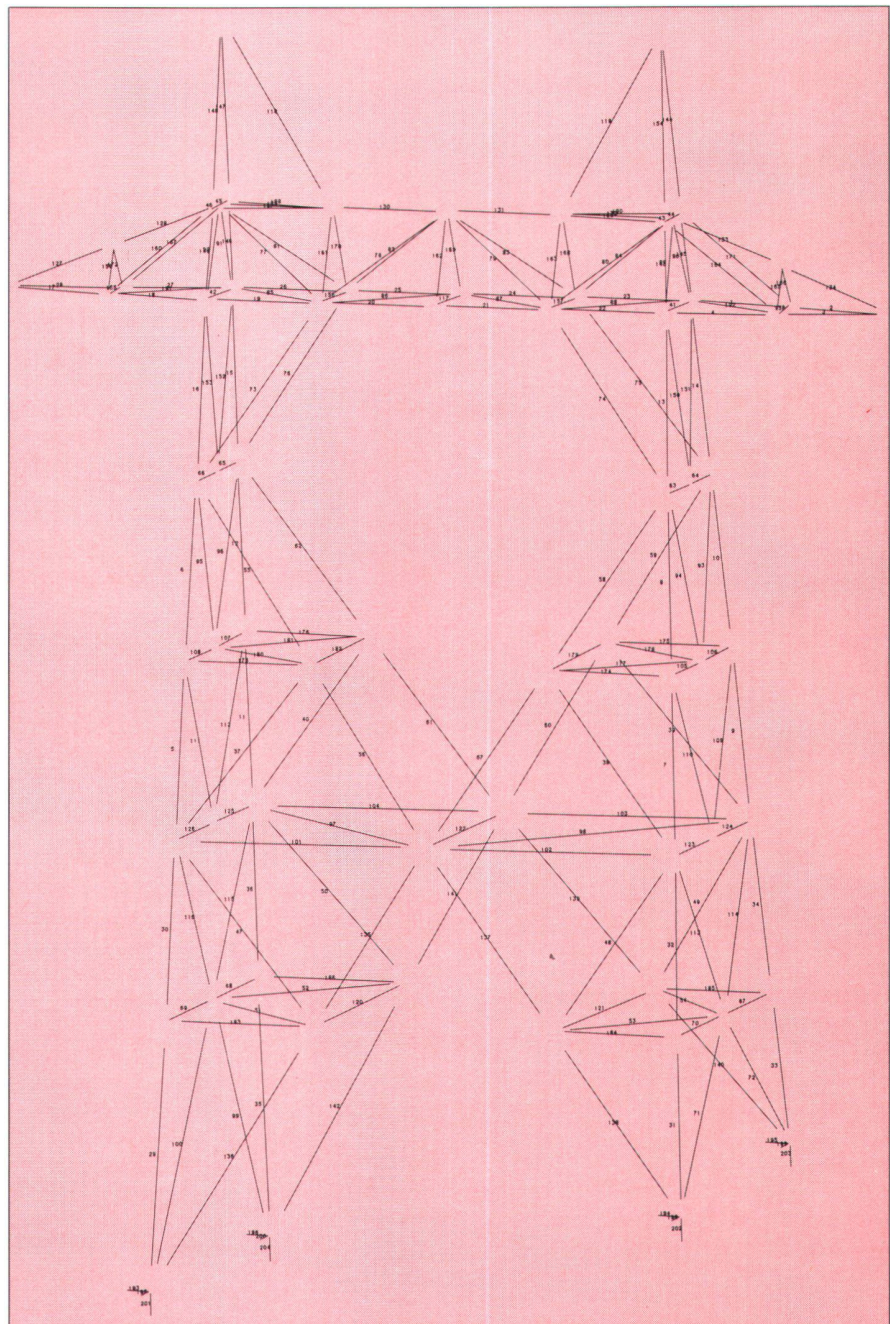


Abb. 9: Plot eines 400-kV-Mastes mit Stabnumerierung



Stab Nr.	Anfangsknoten	Endknoten	Profil Typ	Material	Qualität	Querschnittsfläche	Trägheitsradius	Massgebender Lastfall Zug	Vorhandene Zugspannung	Ausnutzung bzw. Zug in %	Zulässige Schlankheit	Effektive Schlankheit	Massgebender Lastfall Druck	Zulässige Druckspannung	Vorhandene Druckspannung	Ausnutzung bzw. Druck in %					
JOB:ED24	STAB	AK	EK	LAENGE	PRO	MAT	NACHWEISE	SIA	161	KURVE	C	16:11:53	PAGE	2	LA-Z	LA-V	LF	SIGMAK-V	SIGMAK-Z	SIGMAK-V	(%)
28	96	106	2.414	3	1	6.190E-03	3.490E-02	3	1.293E 08	36.4%	200	69	3	-2.130E 08	-1.822E 07	8.6%	46.3%				
29	51	64	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%					
30	64	78	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%					
31	55	69	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%					
32	69	81	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%					
33	57	71	2.414	3	1	6.190E-03	3.490E-02	3	-1.375E 08	38.7%	200	69	3	-2.130E 08	-1.375E 08	64.6%					
34	71	83	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%					
35	61	76	2.414	3	1	6.190E-03	3.490E-02	3	-1.375E 08	38.7%	200	69	3	-2.130E 08	-1.375E 08	64.5%					
36	76	86	2.414	3	1	6.190E-03	3.490E-02	3	-8.413E 07	23.7%	200	103	3	-1.341E 08	-8.413E 07	62.7%					
37	112	114	3.034	5	1	4.030E-03	2.940E-02	3	-7.515E 07	21.2%	200	103	3	-1.341E 08	-7.515E 07	56.0%					
38	114	116	3.034	5	1	4.030E-03	2.940E-02	3	-7.432E 07	20.9%	200	60	3	-2.385E 08	-7.432E 07	31.2%					
39	116	117	1.750	5	1	4.030E-03	2.940E-02	3	-1.687E 08	47.5%	200	60	3	-2.385E 08	-1.687E 08	70.7%					
40	117	119	1.750	5	1	4.030E-03	2.940E-02	3	-1.687E 08	47.5%	200	60	3	-2.385E 08	-1.687E 08	70.7%					
41	119	120	1.750	5	1	4.030E-03	2.940E-02	3	-7.254E 07	20.4%	200	60	3	-2.385E 08	-7.254E 07	30.4%					
42	120	123	1.750	5	1	4.030E-03	2.940E-02	3	-7.254E 07	20.4%	200	60	3	-2.385E 08	-7.254E 07	30.4%					
43	123	124	1.750	5	1	4.030E-03	2.940E-02	3	-7.254E 07	20.4%	200	60	3	-2.385E 08	-7.254E 07	30.4%					
44	124	126	1.750	5	1	4.030E-03	2.940E-02	3	-7.175E 07	20.2%	200	60	3	-2.385E 08	-7.175E 07	30.1%					
45	126	127	1.750	5	1	4.030E-03	2.940E-02	3	-7.175E 07	20.2%	200	60	3	-2.385E 08	-7.175E 07	30.1%					
46	127	129	1.750	5	1	4.030E-03	2.940E-02	3	-7.238E 07	20.4%	200	60	3	-2.385E 08	-7.238E 07	30.3%					

Abb. 10: Ergebnisse der Mastberechnung

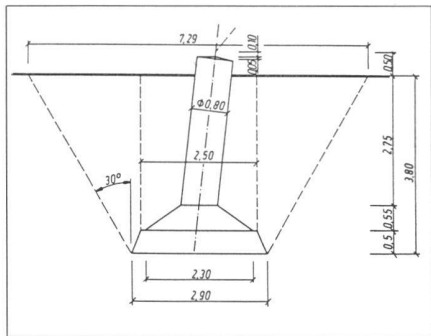


Abb. 11: Einzelfundament mit CAD gezeichnet

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 (Abb. 9, 10). Das System ist eine Zusammenstellung von Programmodulen, abgestützt auf eine einheitliche Datenbasis, welche 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 zulässigen 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 dreidi-

mensionale Berechnung von räumlichen Rahmen erforderlich sind, dies sowohl bei symmetrischer wie bei unsymmetrischer Belastungsanordnung. Gemischte Randbedingungen werden ebenfalls unterstützt.

**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 verschiedene 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 Einzelfundamenten 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 (Abb. 11). Bei Plattenfundamenten werden die Eckstiele in die Platte einbetoniert. Entscheidend für die Bemessung sind wiederum die Bodenkennwerte. Das Programm optimiert die Plattenabmessungen unter Be-

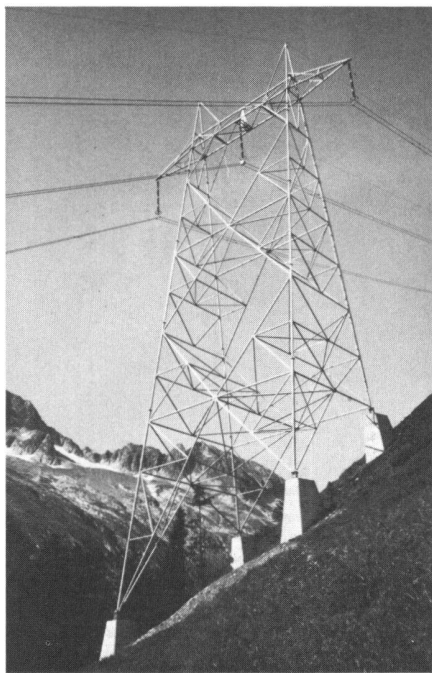


Abb. 12: 400-kV-Mast, Lukmanierleitung

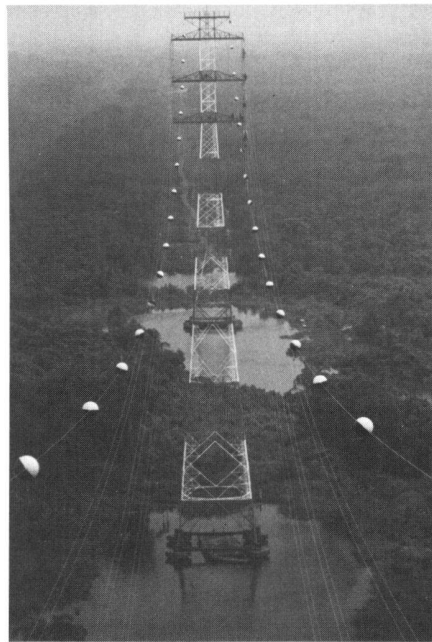


Abb. 13: 330-kV-Mast, Flusskreuzung in Nigeria

rücksichtigung 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,



Abb. 14: 400-kV-Mast, Lukmanierleitung, Fundamentbau



Abb. 15: 400-kV-Mast, Lukmanierleitung, Fundamente mit Lawinenkeil

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.

Adressen der Verfasser:

W. Weiss, Ing. grad./STV und L. Condrau Ing. HTL/STV.

Autor Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, CH-5401 Baden.

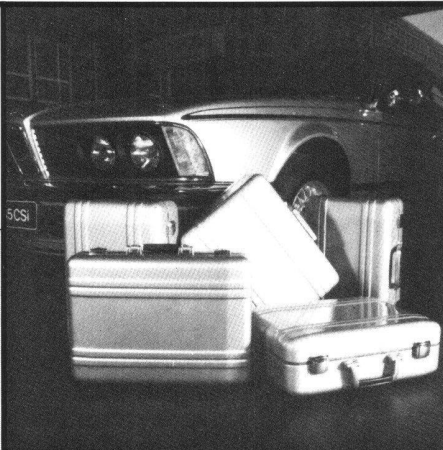
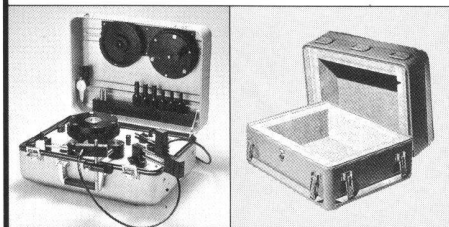
Dr. F. Kiessling,

Firma Siemens AG, Unternehmensbereich Energietechnik

E 43 Leitungsbau, D-8520 Erlangen

## Wertvolles sicher transportieren

Transcase, das Alu-Koffersystem von Knürr für den sicheren Transport hochwertiger und hochempfindlicher Produkte wie: Mess-, Test- und Funkgeräte, Programmierer, Werkzeuge, Datenträger...



**Knürr AG**  
Bruggacherstr. 16  
8117 Fällanden  
Tel. 01/825 07 07  
Telex 59 706

Büro Morges  
1110 Morges  
Rue du Sablon 23  
Tél. 021/72 13 90



- höchste Stabilität
- geringes Gewicht
- formschönes Design
- strahlwasser- und staubdicht (IP 65)
- hoher Oberflächenschutz durch Harteloxal. Fordern Sie Unterlagen.

**knürr**

6/85

Seit 1894

**GRANITI • MAURINO**

Tel. 092 / 72 13 22 - 72 13 23  
Telex 846 453

CH - 6710 Biasca

**MARKSTEINE BORNES**

Verlangen Sie unseren Prospekt

Demandez-nous notre brochure et liste des prix