

GEOMETRISCHE AUSWERTUNG DER MANTELDEFORMATIONEN GROSSER BAUOBJEKTE MIT HYPERBOLOIDMANTEL

A. SÁRDY—GY. HOLÉCZY

Lehrstuhl für Vermessungskunde, Geodätisches Institut, TU Budapest

Eingegangen am 27. November 1978

1. Ziel, Grunddaten und Gesichtspunkte der Auswertung

Für die Planungszwecke der in nächster Zukunft in Ungarn auszuführenden großen Kraftwerke ist ein vielfältiges Forschungs-Zielprogramm in Gang gesetzt worden. Das Programm erstreckt sich unter anderen auch auf die Prüfung von geometrischen, statischen, dynamischen und Fundamentierungsfragen der großen Kühltürme für Kühlsysteme. Dabei sind auch empirische Prüfungen nötig, die zeigen, wie die geplante Form und Abmessungen der Mantelmauer des Bauobjektes durch bei der Ausführung unvermeidliche kleinere oder größere Baufehler verändert werden. Da die Manteldeformation neben der sorgfältigen Ausführung auch von der angewandten Bautechnologie abhängig ist, empfiehlt es sich, diese Prüfungen auch in bezug auf die vorgesehene Bautechnologie durchzuführen. In die Prüfung können natürlich auch mit derselben Technologie ausgeführte Bauten einbezogen werden, die zwar in keinem unmittelbaren Zusammenhang mit den Kühlsystemen für Kraftwerke sind, aber durch ihre gleiche oder ähnliche Mantelkonstruktion weitere wertvolle Informationen geben können. Bei der Projektierung sollen aber nicht nur die infolge von Ausführungsfehlern entstehenden Manteldeformationen in Betracht genommen werden, sondern auch die Einwirkung all der Faktoren (ungleichmäßige Senkung, Sonnenbestrahlung veränderlicher Richtung, starker Wind usw.), durch die die geplante Geometrie endgültig oder vorübergehend verändert wird.

Im Rahmen dieses Forschungsprogrammes wurde der *Lehrstuhl für Vermessungskunde des Geodätischen Instituts der TU Budapest* mit der Durchführung von Prüfungen beauftragt, die Aufschluß über die voraussichtlichen Änderungen in der geplanten Geometrie der Hyperboloid-Mantelmauer großer Kühltürme einerseits infolge von Baufehlern bei der Gleitschalungstechnologie, andererseits der Einwirkung sonstiger Faktoren geben.

Von diesen werden Art und einige Teilergebnisse nur der Prüfungen beschrieben, die sich auf aus Ausführungsungenauigkeiten herrührende Manteldeformationen beziehen. An der Arbeit nahmen von dem Lehrstuhlkollektiv *Dr. Holéczy, Gy., Májay, P., Dr. Márkus, B. und Dr. Sárdy, A.* teil.

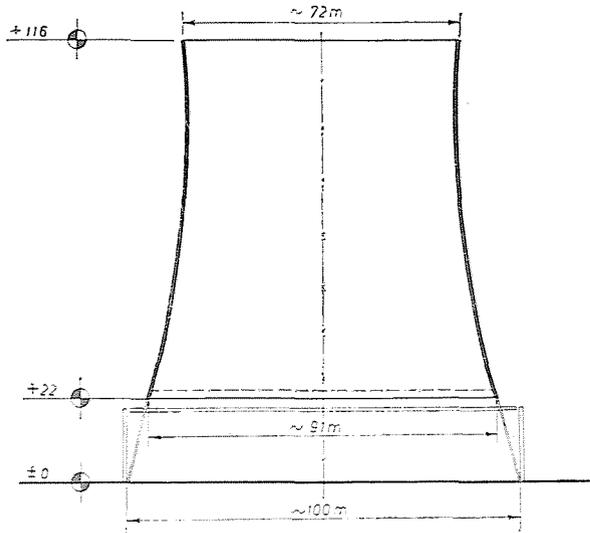


Abb. 1.

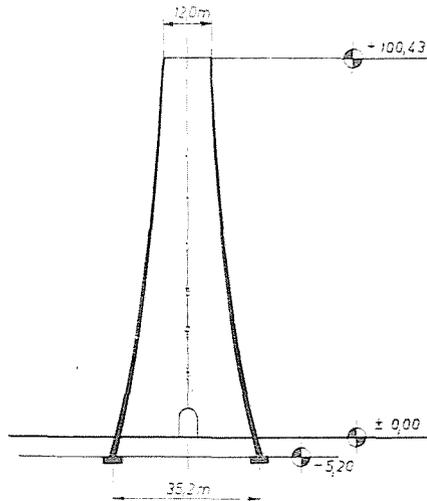


Abb. 2.

Für die Prüfungen wurden drei, in Ungarn im dem SVETHO-Gleitschalungssystem gebaute große Objekte ausgewählt: die Kaminkonstruktion zweier Kühltürme mit gleichen Abmessungen im Wärmekraftwerk »Gagarin« in *Fisonta* (Abb. 1) und der 100 m hohe untere Abschnitt des 250 m hohen Schornsteins im *Tisza*-Wärmekraftwerk in *Leninváros* (Abb. 2). Die laufenden Kontrollmessungen an den genannten Objekte sind während der Bauausfüh-

rung — auf Grund von früheren Aufträgen — ebenfalls von dem Lehrstuhl durchgeführt worden, und so standen für die Prüfungen Meßdaten in großer Anzahl zur Verfügung.

Bei den Kontrollmessungen beider Kühltürme des Wärmekraftwerkes »Gagarin« wurden an den Konturpunkten des Baues die Richtungen der verschiedenen Kreishalbmesser an gleichmäßig verteilten $n = 75$ nummerierten Rahmenstandpunkte, aus dem Fundamentmittelpunkt ausgehend, am Boden bezeichnet. Der durch die benachbarten Halbmesser gebildete Winkel beträgt so praktisch $360^\circ/n$. Durch diese Halbmesser wurden vertikale Ebenen festgelegt, in deren horizontalen Schnittlinien — in durchschnittlich 4 m Höhenabständen — die Änderungen des ursprünglichen Halbmessers gemessen wurden. Am Kühlturm des Kraftwerblocks IV wurden in 22 horizontalen Schnitten insgesamt 1650 Halbmesseränderungen, an dem des Blocks V in 24 Schnitten 1800 Änderungen gemessen.

Im unteren 100 m-Abschnitt des Schornsteins des *Tisza*-Wärmekraftwerkes wurden in einer prinzipiell ähnlichen Anordnung die horizontalen Halbmesser selbst, insgesamt der Zahl 1036 gemessen. Die Halbmesserrichtungen wurden hier nicht auf dem Gelände festgelegt, sondern in jeder Meßhöhe durch nummerierte Rahmenstandpunkte bezeichnet. Zur Auswertung wurden auch hier — mit praktisch ausreichender Annäherung — einerseits die durch die benachbarten Halbmesser gebildete Winkel als $360^\circ/n$, andererseits die Halbmesser gleicher Nummer in den übereinander liegenden Meßhöhen als in derselben vertikalen Ebene befindlich betrachtet.

Für die Auswertung wurden als Grunddaten nicht die unmittelbaren Meßergebnisse benutzt, sondern deren Abweichungen von den Sollwerten. Diese Halbmesserabweichungen DR werden als positiv betrachtet, wenn der Ist-Halbmesser größer als der geplante ist.

Es soll noch erwähnt werden, daß — nach den Untersuchungen bei den vorherigen Messungen — der mittlere Fehler der als Meßergebnis betrachteten Halbmesserabweichung auch mit zunehmender Höhe des kontrollierten Horizontalschnittes etwas zunimmt und einen Wert von $\pm 1,6$ mm bis $\pm 1,9$ mm ausmacht [1]. Die Auswertung wurde daher mit mm Genauigkeit durchgeführt, ferner wurden die Abweichungen der durch Meßergebnisse festgelegten Punkte von einer regelmäßigen Kurve oder Fläche rein als Deformation betrachtet.

Für die Verarbeitung der großen Datenmenge wurden rechentechnische Hilfsmittel angewandt. Die keinen Zeilendruck erfordernden Rechenaufgaben wurden mit einem Rechner *EMG-666*, die tabellarische Zusammenstellungen erfordernden mit einer Rechenanlage *ODRA 1024* gelöst. Parallel zur numerischen Auswertung wurden die Ergebnisse auch graphisch verarbeitet, den programmierbaren Teil der graphischen Verarbeitung mit Hilfe eines *Zeiss Cartimat III* gezeichnet.

Im Sinne des Auftrages wurden für alle drei Bauten die zur Verfügung stehenden Daten sowohl nach Horizontalschnitten, wie auch nach vertikalen Meridianschnitten gesondert, und zum Schluß für die ganze Fläche gemeinsam ausgewertet.

Die große Menge der Ausgangsdaten sowie numerischen Ergebnisse kann hier nicht mitgeteilt werden. Nach der Beschreibung der Auswertung werden daher Zahlenwerte nur über den Bauobjekt Kühlturm des Blocks V im Wärmekraftwerk »Gagarin« angegeben, — aber auch von diesen nur jene, die zu der Charakterisierung der Schnitte oder Flächen bzw. zur Wahrnehmung der Größenordnung der Deformationen notwendig sind. Einige Zahlenwerte der Flächenauswertung werden aber für alle drei Objekte angegeben.

Dementsprechend wurden von den Ausgangsdaten am Anfang von Tabelle 1 die laufende Nummer *NO* der einzelnen Horizontalschnitte und ihre Höhe *M* über der Bau-Bezugshöhe, ferner, von den Meßergebnissen *DR* nur die gemessene größte positive (+ MAX) und die größte negative (— MAX) Halbmesserabweichung sowie die aus den Absolutwerten der Halbmesserabweichungen gebildete durchschnittliche Halbmesserabweichung angegeben. Zu der Höhe *M* des Horizontalschnittes 1 bemerken wir, daß der Bau des Betonmantels (Schlotkonstruktion) von einem auf etwa 22 m hohe Stahlbetonstützen gestützten Stahlbetonkranz ausging.

2. Die Auswertung der Horizontalschnitte

Die Schnittlinie der Mantelmauer des Baues mit einer in beliebiger Höhe angenommenen horizontalen Ebene ist eine dem Kreis nahestehende, jedoch wellenartig schwankende, geschlossene Kurve, die im weiteren horizontale Deformationskurve genannt wird.

Die Lage der hinreichend dicht angenommenen Punkte von gleichmäßiger Verteilung der horizontalen Deformationskurve wird in einem polaren Koordinatensystem durch die Meßergebnisse festgelegt. Der Koordinatennullpunkt ist der Durchstoßpunkt der durch den Gründungs-Mittelpunkt des Bauwerks durchgehenden Vertikalen (der geplanten Achsenlinie) durch die horizontale Schnittebene; ihre Nullrichtung ist die Halbmesserrichtung des letzten einbezogenen numerierten Punktes, also des *n*-ten Punktes.

Um die einzelnen Phasen der Auswertung zu vereinfachen wurde an dieses polare Koordinatensystem auch ein rechtwinkliges Koordinatensystem angepaßt, so daß die Nullpunkte zusammenfallen, und die Richtung der +*X*-Achse mit der Nullrichtung des polaren Koordinatensystems identisch sei. Diese Koordinatensysteme werden im weiteren Planungs-Koordinatensysteme genannt.

Aus der Bautechnologie folgend gestalten sich Ort und Form der horizontalen Deformationskurve im allgemeinen auf gemeinsame Wirkung von drei Komponenten aus [2]:

1. Der Mittelpunkt (die Achsenlinie) der sich aufwärts bewegenden Gleit-
schalung verschiebt sich in horizontalem Sinne.

2. Bei konischen Mänteln (mit veränderlichem Halbmesser) tritt neben diesen eine sog. Durchschnittshalbmesser-Abweichung auf, das heißt, Abweichung des arithmetischen Mittels der Ist-Halbmesser von dem Soll-Halbmesser.

3. Schließlich unterliegt auch die Schalung selbst einer Formänderung.

Die Folge der horizontalen Verschiebung des Schalungsmittelpunktes ist, daß die Achsenlinie des ausgeführten Bauwerks praktisch eine Raumkurve sein wird. Nach den Erfahrungen setzt sich die horizontale Projektion der Achsenlinie— infolge der im Laufe des Baues bei der Steuerung der Schalung angewandten Korrekturen — aus Spiralkurvenabschnitten zusammen [3].

Die Auswertung der Horizontalschnitte richtete sich auf die Bestimmung der in der Meßebeene wirksamen, obenerwähnten drei Komponenten. Die Schwerpunktfrage dieser Auswertung ist, welcher Punkt der Schnittebene als Mittelpunkt der deformierten Schalung betrachtet werden soll, der zugleich auch den Punkt der Achsenlinie des Bauobjektes in der betreffenden Höhe angibt. Es wird zweckmäßig sein, auf diese Frage eine Antwort zu geben, die einerseits mit der Deutung der Durchschnittshalbmesser-Abweichung im Einklang ist und zugleich eine reelle Deutung der Schalungs- bzw. Mantelmauerdeformation gibt, andererseits eine einfache Berechnung dieser Komponenten ermöglicht.

Diese Anforderungen werden durch die Anwendung des Ausgleichskreises erfüllt, bei der die durch Messungen bestimmten Punkte symmetrisch verteilt sind ([2], [4] und [5]). Zur Auswertung der Horizontalschnitte wurde daher dieses Verfahren angewandt. In diesem Falle wird der Mittelpunkt des Ausgleichskreises als Achsenpunkt der deformierten Konstruktion und zugleich des Baues betrachtet. Seine Koordinaten werden im rechtwinkligen Planungs-Koordinatensystem aus den einfachen Zusammenhängen:

$$DY = \frac{2 [DR_i \sin IR_i]_1^n}{n} \quad (1)$$

$$DX = \frac{2 [DR_i \cos IR_i]_1^n}{n} \quad (2)$$

berechnet, wo IR_i der Richtungswinkel des zu der Halbmesserabweichung DR_i gehörenden Halbmessers ist. Nach diesen werden der lineare Wert D und

der Richtungswinkel IR_D der horizontalen Verschiebung der Schalung aus den Zusammenhängen

$$D = \sqrt{DY^2 + DX^2} \quad (3)$$

$$IR_D = \text{arc tg} \frac{DY}{DX} \quad (4)$$

berechnet.

Der Durchschnittshalbmesser ist in diesem Falle der Halbmesser des Ausgleichskreises. Die Durchschnittshalbmesser-Abweichung RO wird sich aus dem Zusammenhang

$$RO = \frac{[DR_i]^n}{n} \quad (5)$$

als arithmetischer Mittelwert der Halbmesserabweichungen ergeben.

Die Deformation der Schalung bzw. der Mantelmauer, die wir im weiteren Kreisdeformation nennen werden, stellt die Normaldistanzen der durch Messungen bestimmten Punkte von dem Ausgleichskreis dar. Ihr Zahlenwert DRH_i wird mit dem Zusammenhang:

$$DRH_i = DR_i - D \cos (IR_i - IR_D) - RO \quad (6)$$

berechnet.

Übrigens ist der Ausgleichskreis ein Kreis, für den die Quadratsumme der Kreisdeformationen ein Minimum ist. Eine weitere Eigenschaft des Ausgleichskreises ist im vorliegenden Falle, daß die Summe der Kreisdeformationen in den durch Messung bestimmten Punkten Null ergibt. So ist der Ausgleichskreis gleichzeitig auch annähernd die Flächenausgleichslinie der Deformationskurve. Dementsprechend ergibt die Fläche des Ausgleichskreises annähernd die Fläche der durch die Deformationskurve begrenzten ebenen Figur.

Zur numerischen Auswertung der horizontalen Schnitte wurde ein Maschinenprogramm aufgestellt, nach dem durch den elektronischen Rechner für jeden Schnitt in tabellarischer Zusammenstellung folgende Daten gedruckt wurden; die laufende Nummer NO und die Höhe M über der Gründungshöhe des Schnittes; die rechtwinkligen Koordinaten DY , DX und die polaren Koordinaten D , ID_D des Achsenpunktes; die laufende Nummer p des der Richtung IR_D am nächsten liegenden Halbmessers; die Durchschnittshalbmesser-Abweichung RO ; die Extremalwerte $+MAX$ und $-MAX$ der Kreisdeformationen; die einzelnen Kreisdeformationen in der Reihenfolge ihrer laufenden Nummer von 1 bis n .

Im zweiten Teil der Tabelle 1 wurden von den angeführten Ergebnissen nur die Zahlenwerte von D , IR_D , $+MAX$ und $-MAX$ und zur weiteren Infor-

Tabelle 1

NO	1.				2.						3.			4.		
	M (m)	DR (mm)			D (mm)	IR (°)	RO (mm)	DRH (mm)			DRV (mm)			DRF (mm)		
		+MAX	-MAX	±K				+MAX	-MAX	±K	+MAX	-MAX	±K	+MAX	-MAX	±K
1	23,22	9	-34	13	2	6	-13	20	-21	6	33	-50	14	29	-17	10
2	25,77	13	-34	11	3	29	-9	24	-22	8	10	-34	10	35	-8	13
3	28,43	20	-47	19	9	34,8	-14	32	-28	13	16	-33	13	41	-23	15
4	31,41	18	-65	31	6	97	-30	49	-33	14	-3	-47	25	42	-40	16
5	39,30	37	-82	26	3	4	-22	62	-57	16	8	-45	18	60	-58	17
6	43,19	58	-94	44	7	289	-42	67	-53	16	-11	-72	39	46	-73	26
7	50,70	28	-79	32	2	51	-29	59	-47	17	-2	-51	24	45	-53	18
8	53,65	46	-54	18	3	125	-10	55	-45	17	15	-25	8	67	-32	19
9	56,60	35	-82	31	14	92	-26	63	-49	20	15	-58	21	55	-61	22
10	62,45	40	-78	28	9	94	-23	67	-51	17	5	-41	18	55	-60	19
11	65,82	30	-81	29	9	104	-27	56	-52	15	1	-48	18	44	-66	21
12	74,02	35	-76	21	21	90	-9	41	-57	17	22	-35	14	39	-66	19
13	75,72	54	-55	16	10	75	0	56	-48	16	22	-14	8	62	-46	16
14	79,49	61	-47	19	11	77	7	56	-48	16	38	-11	13	67	-33	19
15	81,94	32	-56	15	16	80	0	36	-41	12	32	-17	9	35	-37	14
16	85,75	66	-25	16	6	101	11	58	-39	14	44	3	16	65	-29	15
17	87,64	56	-26	15	4	98	10	48	-32	12	31	1	15	53	-27	13
18	91,76	43	-26	16	4	169	12	33	-37	12	46	-4	18	36	-33	13
19	95,87	44	-20	19	1	189	17	28	-37	11	53	-11	22	29	-31	12
20	98,61	40	-29	14	7	103	10	29	-32	12	40	-12	15	21	-42	13
21	103,80	78	-27	24	3	300	22	53	-48	15	65	2	27	55	-41	16
22	107,83	92	-22	35	4	263	35	56	-54	14	73	7	40	63	-44	15
23	111,73	82	-11	39	4	170	39	47	-47	12	78	14	44	47	-46	13
24	116,30	67	-20	29	4	172	28	36	-46	12	62	6	32	21	-60	18
	MAX	92	-94	44	21	—	-42	67	-57	20	78	-72	44	67	-73	26
	MITT.V.	45	-49	23	7	—	19	47	-43	14	29	-24	20	46	-43	16
									ER—		35	-41	13			

G.V./11.

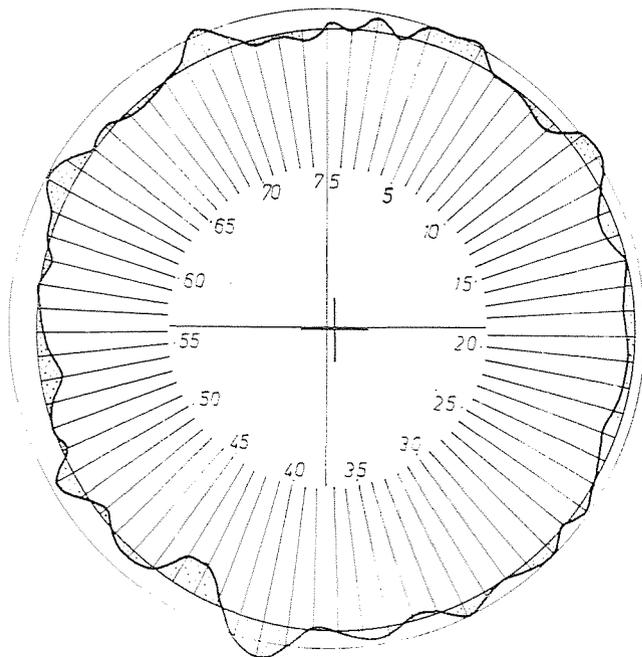
 $M = 65,82\text{ m}$ $R = 38,012\text{ m}$ 

Abb. 3.

mation der Durchschnittswert K der absoluten Werte der Kreisdeformationen angegeben.

Die numerischen Tabellen für die Auswertung der Horizontalschnitte enthalten die Daten, aus denen eine volle Information über die Schnitte erhalten wird. Desungeachtet wurden die Auswertungsergebnisse auch graphisch verarbeitet. Bei diesen ist zwar die Ablesungsgenauigkeit geringer, ein großer Vorteil ist jedoch, daß sie über den ganzen einen raschen Überblick geben.

In den Zeichenblättern, die je einen Horizontalschnitt darstellen, sind neben den zur Identifizierung des Schnittes nötigen Daten folgende angeführt: die Höhe M und der auf die Mittellinie der Mantelmauer bezogene Soll-Halbmesser R des Schnittes; die Halbmesserrichtungen, jede fünfte mit ihrer laufenden Nummer; die Deformationskurve, durch eine kontinuierliche Kurve angenähert; der geplante Kreis; schließlich der Ausgleichskreis mit durch ein Kreuz bezeichnetem Mittelpunkt. (Zur besseren Anschaulichkeit werden die Flächenteile zwischen dem Ausgleichskreis und der Deformationskurve bei positiver Deformation in roter, bei negativer Deformation in gelber Farbe gehalten.)

In den Abbildungen sämtlicher Schnitte ist der Halbmesser des geplanten Kreises — unabhängig von der wirklichen Größe — 100 mm. Im Verhältnis zum geplanten Kreise sind die durch Messungen bestimmten Halbmesserabweichungen DR im Maßstab 1 : 5 aufgetragen. Der Maßstab der von den Zeichnungen abmeßbaren Daten, DY , DX und DRH ist auch 1 : 5. Werden von dem zeichnerischen Halbmesser des Ausgleichskreises 100 mm subtrahiert, erhält man die Durchschnittshalbmesser-Abweichung RO im Maßstab 1 : 5.

Die Ausführung der zeichnerischen Verarbeitung ist in Abbildung 3 dargestellt, die den Horizontalschnitt II des Blocks V des Wärmekraftwerkes »Gagarin« zeigt.

3. Die Auswertung der vertikalen Meridianschnitte

Die durch die geplante vertikale Achsenlinie des Bauobjektes gelegte Ebene schneidet aus der Mantelmauer eine Kurve unregelmäßiger Form — die vertikale Deformationskurve — heraus. Mit kleinerer oder größerer Abweichung verläuft diese in der Nähe der geplanten Meridiankurve.

Die Lage der Punkte in den Kurven in den für die Messung gewählten, an durchschnittlich gleichmäßig angeordneten vertikalen Ebenen mit etwa 4 m Höhenabstand werden durch die Halbmesserabweichungen DR festgelegt, u. zw. in je einem rechtwinkligen Planungs-Koordinatensystems in vertikaler Ebene. Die gemeinsame vertikale Achse dieser Koordinatensysteme ist die Vertikale im Fundamentmittelpunkt, ihr gemeinsamer Nullpunkt ist der in der Baugrundhöhe liegende Punkt dieser Achse; ihre andere Achse ist — für jede vertikale Ebene gesondert — die durch den Nullpunkt laufende horizontale Gerade.

Den Ansprüchen der auf die geometrische Auswertung folgenden statischen Prüfungen gemäß wurden für die Auswertung der Meridianschnitte die Halbmesserabweichungen DR als Resultanten zweier Komponenten betrachtet. Die eine ist in derselben vertikalen Ebene konstant und drückt die zu sich selbst parallele Verschiebung d.h. die Meridianverschiebung ER horizontal in Richtung des Halbmessers der geplanten Meridiankurve aus. Die andere Komponente ist ein veränderlicher Wert und drückt die Deformation der Meridiankurve, die Meridiandeformation DR' aus.

Die Auswertung der vertikalen Meridianschnitte, nach Schnitten getrennt, war auf die Bestimmung der erwähnten zwei Komponenten abgerichtet. Die Schwerpunktfrage der Auswertung ist in diesem Falle die Deutung der Meridianverschiebung ER . Es ist zweckmäßig, die Meridianverschiebung ER als für den geprüften Meridianschnitt gültige Durchschnittsabweichung des Halbmessers zu deuten. Bei der Bestimmung soll aber der Umstand in Betracht genommen werden, daß die Höhendifferenzen der benachbarten Meßhöhen nicht gleich sind; in der vertikalen Deformationskurve sind also die

durch Messungen bestimmten Punkte nicht gleichmäßig verteilt. Dementsprechend soll der geplante Meridian um einen Wert ER verschoben werden, damit der erhaltene Ausgleichsmeridian gleichzeitig eine Flächenausgleichslinie der Deformationskurve ergibt. Die Meridiandeformation DRV ist daher als der horizontale Abstand der durch Messungen bestimmten Punkte von dem Ausgleichsmeridian zu deuten.

Um das Problem mit hinreichender Annäherung zu lösen wird vorausgesetzt, daß sich die Halbmesserabweichung DR zwischen zwei durch Messungen bestimmten Punkten der vertikalen Deformationskurve mit der Höhe linear ändert. Diese Annahme steht — zumindest prinzipiell — im Einklang mit der Wirkung der zur plangemäßen Steuerung der Schalung angewandten Korrektur auf die Ausgestaltung der Mantelmauer den Meridian entlang.

Dieser Annahme entsprechend ist an der linken Seite von Abbildung 4 der Abschnitt der geplanten Meridiankurve und Deformationskurve zwischen zwei benachbarten Meßhöhen schematisch dargestellt. Die Fläche der durch die Kurven und die zu diesen gehörenden Halbmesserabweichungen DR_i und DR_{i+1} begrenzten ebenen Figur wird als Produkt aus dem arithmetischen Mittelwert der beiden Halbmesserabweichungen und aus der Höhendifferenz DM erhalten. Dieses stimmt aber mit der Fläche des an der rechten Seite der Abbildung dargestellten Trapezes überein.

Zur Lösung der Aufgabe darf also das rechtwinklige Koordinatensystem M, DR benutzt werden, in welchem die geplante Meridiankurve durch den entsprechenden Abschnitt der Achse M und die Deformationskurve durch eine Zickzacklinie ersetzt wird, die man durch die geradlinige Verbindung der durch Messungen bestimmten Punkte erhält. Die Bestimmung der Verschiebung ER des Ausgleichsmeridians beschränkt sich auf diese Weise auf die Bestimmung einer Ausgleichsgeraden. Diese liegt parallel zu der Achse M in

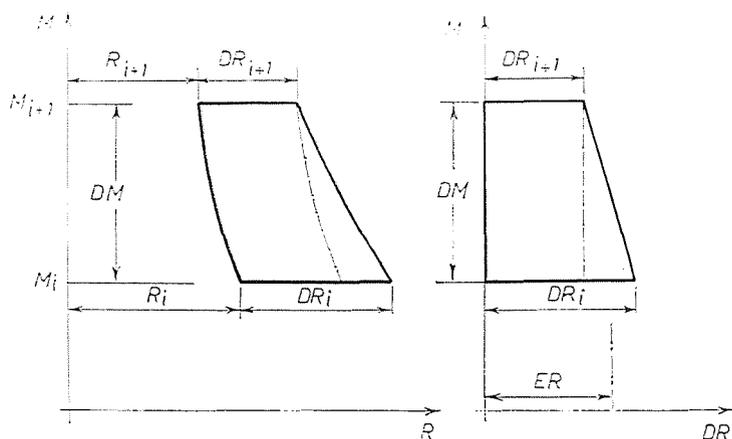


Abb. 4.

einer Entfernung ER , so daß die Ausgleichsgerade eine Flächenausgleichslinie der Zickzacklinie darstellt.

Dementsprechend wird die Meridianverschiebung ER erhalten, indem wir die vorzeichenrichtige Fläche der durch die Ersatz-Zickzacklinie der Deformationskurve und durch die Achse M , ferner durch die Halbmesserabweichung DR_0 des Anfangsniveaus der Höhe M_0 und durch die Halbmesserabweichung des Schlußniveaus der Höhe M_n begrenzten ebenen Figur berechnen und mit der Höhendifferenz $M_n - M_0$ dividieren:

$$ER = \frac{1}{2} \cdot \frac{(M_1 - M_0)DR_0 + \dots + (M_{i+1} - M_{i-1})DR_i + \dots + (M_n - M_{n-1})DR_n}{(M_n - M_0)} \quad (1)$$

Die für die gemessenen Punkte gültigen Meridiandeformationen DRV werden durch den Ausdruck

$$DRV_i = DR_i - ER \quad (2)$$

gegeben.

Man erhält ein gleiches Ergebnis auch durch die Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate. Werden die Meßergebnisse M als fehlerlos betrachtet, so hat die analog zur Fehlergleichung angeschriebene Deformationsgleichung die Form:

$$DRV_i = -ER + DR_i.$$

Damit die auf dieser Grundlage berechnete Ausgleichsgerade zugleich Flächenausgleichslinie der Zickzacklinie sei, werden den einzelnen Deformationen Gewichte p_i zugeordnet. Zur Lösung der Aufgabe ist so die Bedingung

$$[p_i \cdot DRV_i^2] = \min$$

zu erfüllen.

Die Normalgleichung hat also die Form:

$$[p_i]ER - [p_i \cdot DR_i] = 0,$$

woraus die gesuchte Meridianverschiebung ER durch das gewogene arithmetische Mittel gegeben wird:

$$ER = \frac{[d_i \cdot DR_i]_0^2}{[p_i]_0^2} \quad (3)$$

Werden die Gewichte mit den Werten

$$p_0 = 0,5 (M_1 - M_0)$$

$$p_i = 0,5(M_{i+1} - M_{i-1}) \quad (i = 1, 2, \dots, n - 1)$$

$$p_n = 0,5(M_n - M_{n-1})$$

angenommen, dann ist

$$[p_i]_0^n = (M_n - M_0)$$

und (3) stimmt mit (1) überein.

Sind die Höhenunterschiede der Meßhöhen gleich, ergibt sich mit den angenommenen Gewichten

$$p_0 = p_n = 0.5$$

$$p_1 = p_2 = \dots = p_{n-1} = 1$$

für die Berechnung der Meridianverschiebung ER der einfachere Zusammenhang:

$$ER = \frac{0.5 DR_0 + [DR_i]_1^{n-1} + 0.5 DR_n}{n - 1} \quad (4)$$

Die Ergebnistabellen der Auswertung sind durch den Zeilendrucker ähnlich der Horizontalschnittauswertung so erstellt worden, daß die Punkte gleicher Höhe der Meridiane die Zeilen der Tabelle bilden. Die zu den einzelnen Meridianen gehörenden Deformationen ergeben sich also in den Spalten der Tabelle. In jeder Tabellenspalte wurden unten durch einen Zeilenabstand getrennt die Verschiebungen ER der einzelnen Meridiane angegeben.

Zur zahlenmäßigen Information wurden im dritten Teil der Tabelle 1 die Werte $+MAX$ und $-MAX$ nach Meridiandeformationszeilen je Zeile sowie der Durchschnitte ihrer absoluten Werte je Zeile angegeben. Weiterhin wurden die Extremalwerte von ER und der Durchschnitt der Absolutwerte angegeben.

In den Zeichnungen je eines Meridianschnittes wurden, neben den zur Identifizierung nötigen Daten dargestellt: die Ausgleichs-Meridiankurve, deren Verschiebung ER im Maßstab 1 : 5 dargestellt und auch numerisch angegeben ist; die Meridiandeformationen DRV_i gleichfalls im Maßstab 1 : 5; schließlich die Deformationskurve, bei deren Zeichnung die durch Messung bestimmten Punkte mit Geraden verbunden wurden, da die Krümmung dieser Abschnitte in dem gegebenen Maßstab nicht wahrnehmbar ist.

Die zeichnerische Verarbeitung wird an einem Beispiel in Abbildung 5 gezeigt, wo der Meridianschnitt 44 des Blocks V im Wärmekraftwerk »Gagarin« dargestellt ist.

4. Auswertung der Bauflächen

Im Rahmen der Oberflächenauswertung waren einerseits die Daten der Ausgleichsoberfläche der effektiv deformierten Wandfläche zu bestimmen, andererseits die auf diese bezogenen Oberflächendeformationen festzustellen.

Unter Berücksichtigung der Gesichtspunkte der statischen Prüfungen war einerseits vorgeschrieben, daß — in Übereinstimmung mit dem Projekt —

G. V. 44.

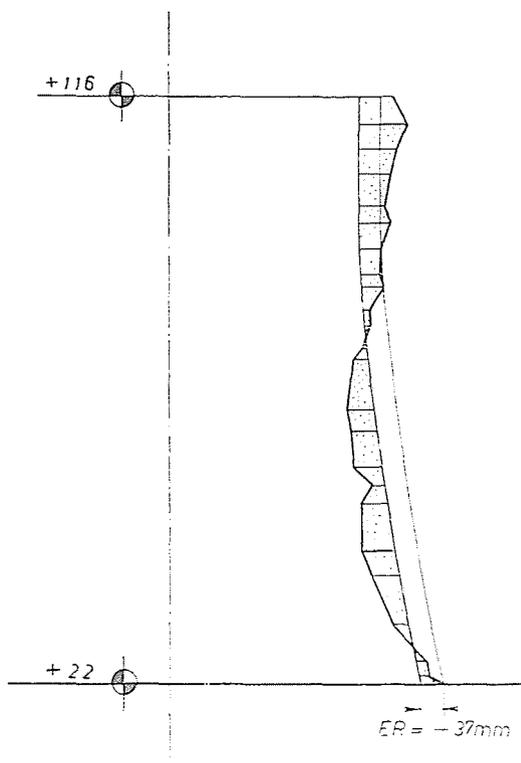


Abb. 5.

auch die Ausgleichsfläche eine Rotationsfläche mit vertikaler Achse sein, andererseits, daß die Gleichung der Meridiankurve der Ausgleichsfläche in der Form mit der Gleichung des geplanten Meridians übereinstimmen soll, sich darin also nur die Zahlenwerte der Koeffizienten ändern.

Auch bei dieser Auswertung wurde die Methode der kleinsten Quadrate angewandt. Dementsprechend ist die Ausgleichsfläche jene Fläche, für die — unter den obigen Bedingungen — die Quadratsumme der Oberflächendeformationen ein Minimum ist. Ähnlich der Interpretation der Kreis- und der Meridiandeformation wird auch die Oberflächendeformation so definiert, daß diese die horizontale Radialentfernung zwischen den Wandoberflächenpunkten und der Ausgleichsfläche bedeutet.

Daher sind — unter Anwendung der Ausgleichung vermittelnder Beobachtungen — die Horizontalverschiebung der Drehachse der Ausgleichsfläche, die Koeffizienten der Meridiankurvengleichung und schließlich die Oberflächendeformationen zu bestimmen. Die Bedingungen für die Ausgleichs-

fläche können so durch entsprechendes Anschreiben der Bestimmungsgleichungen berücksichtigt werden.

Die Bedingung für die Koeffizienten der Meridiankurvengleichung wird dann erfüllt, wenn zum Aufschreiben der Bestimmungsgleichung die Gleichung der geplanten Meridiankurve benutzt wird. Diese hat für den Schornstein des *Tisza*-Wärme kraftwerkes die Form:

$$R_0 = A_0 - B_0 M + \sqrt{C_0 M^2 - D_0 M + E_0}. \quad (1/a)$$

und für die beiden Kühltürme des Wärme kraftwerkes »Gagarin« die Form:

$$R_0 = a_0 \sqrt{\frac{(M - c_0)^2}{b_0^2} + 1}. \quad (1/b)$$

Durch die Gleichungen (1/a) und (1/b) wird der geplante Halbmesser R_0 des in einer Höhe M über dem Nullniveau des Bauwerks angenommenen Horizontalschnittes angegeben. Die Zahlenwerte der Koeffizienten für den Schornstein des *Tisza*-Wärme kraftwerkes sind: $A_0 = 11,7613 \text{ m}$, $B_0 = 7,0795 \cdot 10^{-2}$, $C_0 = 5,01193 \cdot 10^{-3}$, $D_0 = 0,748491 \text{ m}$ und $E_0 = 28,3140 \text{ m}^2$; für die beiden Kühltürme des Wärme kraftwerkes »Gagarin«: $a_0 = 35,68 \text{ m}$, $b_0 = 102,134 \text{ m}$ und $c_0 = 103,300 \text{ m}$. Mit den unteren Nullindizes dieser Koeffizienten wird darauf hingewiesen, daß es sich — zum Unterschied von den aus der Ausgleichung abzuleitenden Koeffizienten — um Koeffizienten der bei der Projektierung benutzten Gleichung handelt.

Wird zum Aufschreiben der Bestimmungsgleichung die Gleichung (1/a) bzw. (1/b) verwendet, so wird dadurch auch die Forderung erfüllt, daß die Ausgleichsfläche eine Rotationsfläche sein soll. Auch die Vertikallage ihrer Drehachse wird gesichert, wenn die Gleichung der Ausgleichsfläche im geplanten räumlichen rechtwinkligen Koordinatensystem für den Schornstein des *Tisza*-Wärme kraftwerkes in der Form:

$$\sqrt{(X - X_K)^2 + (Y - Y_K)^2} = A - B \cdot M + \sqrt{C \cdot M^2 - DM + E} \quad (2/a)$$

und für die beiden Kühltürme des Wärme kraftwerkes »Gagarin« in der Form

$$\sqrt{(X - X_K)^2 + (Y - Y_K)^2} = a \sqrt{\frac{(M - c)^2}{b^2} + 1} \quad (2/b)$$

angeschrieben wird.

Dabei bedeuten X , Y und M die Koordinaten des laufenden Punktes und X_K , Y_K die beiden Koordinaten, durch die der Ort der vertikalen Drehachse der Ausgleichsfläche bestimmt wird.

Die Meßergebnisse sind aber die Höhe M des Wandflächenpunktes und der auf die Richtung der Achse $+X$ (als Anfangsrichtung) bezogene Richtungswinkel IR , weiters der Halbmesser R , daher hat schließlich die Bestimmungsgleichung der Ausgleichung die Formen für den Schornstein des *Tisza*-Wärme- kraftwerkes

$$\sqrt{(R \cdot \cos IR - X_K)^2 + (R \sin IR - Y_K)^2} = A - B \cdot M + \sqrt{C \cdot M^2 - D \cdot M + E} \quad (3/a)$$

und für die beiden Kühltürme des Wärmekraftwerkes »Gagarin«

$$\sqrt{(R \cdot \cos IR - X_K)^2 + (R \cdot \sin IR - Y_K)^2} = a \cdot \sqrt{\frac{(M - c)^2}{b^2} + 1}. \quad (3/b)$$

In den Bestimmungsgleichungen (3/a) und (3/b) sind R , IR und M Meßwerte: die Achsenverschiebungen X_K und Y_K sowie die Koeffizienten A , B , C , D , E bzw. a , b , c sind die zu bestimmenden Unbekannten.

Aus den Bestimmungsgleichungen werden dann die linearisierten Fehlergleichungen hergestellt. Dazu sei folgendes erwähnt. In der unmittelbaren Messung von M und in der Bezeichnung vom IR dürfen nur Fehler solcher Größenordnung vorkommen, deren Einfluß auf die gesuchten Unbekannten vernachlässigbar ist. Daher haben wir die Daten M und IR bei der Auswertung als fehlerlos betrachtet. Im Vergleich zur entstehenden Deformation kann der Fehler bei der Messung des Halbmessers R bzw. der Halbmesserabweichung DR auch vernachlässigt werden. Somit konnten die Abweichungen der durch Meßwerte bestimmten Punkte der Ausgleichsfläche mit hinreichender Annäherung rein als Deformation, die Fehlergleichung als Deformationsgleichung betrachtet werden. Zur Herstellung der linearisierten Form der Deformationsgleichungen sind die vorläufigen Werte der zu bestimmenden Unbekannten notwendig. Da die Verschiebung der Drehachse voraussichtlich gering ist, wurde als vorläufiger Wert für X_K und Y_K Null angesetzt. Die für die Projektierung benutzten Koeffizienten wurden als deren vorläufige Werte betrachtet. In dieser Annahme werden sich neben den Komponenten dX und dY der Achsenverschiebung auch die aus der Ausgleichung errechneten Änderungen dA , dB , dC , dE und da , db , dc als unmittelbar auf die geplanten Werte bezogene Änderungen ergeben.

Die linearisierten Deformationsgleichungen lauten für den Schornstein des *Tisza*-Wärmekraftwerkes:

$$\begin{aligned} DRF_i = & -(\cos IR_i)dX - (\sin IR_i)dY - dA + (M_i)dB - (K_i \cdot M_i^2)dC + \\ & + (K_i \cdot M_i)dD - (K_i)dE + DR_i \end{aligned} \quad (4/a)$$

und für die beiden Kühltürme des Wärmekraftwerkes »Gagarin«:

$$DRF_i = -(\cos IR_i) dX - (\sin IR_i) dY - \left(\frac{R_0}{a_0}\right) da + \left(\frac{(M_i - c_0)^2 a_0^2}{R_0 b_0^3}\right) db + \\ + \left(\frac{(M_i - c_0) a_0^2}{R_0 b_0^2}\right) dc + DR_i. \quad (4/b)$$

In der Gleichung (4/a) ist

$$K_i = \frac{1}{2\sqrt{c_0 M_i^2 - D_0 M_i + E_0}}.$$

In beiden Gleichungen wird durch DRF_i die Oberflächendeformation bezeichnet. Ihr Vorzeichen ist dem bei den Ausgleichsrechnungen der Messungsverbesserungen üblichen Vorzeichen entgegengesetzt, so wird die deformierte Oberfläche außerhalb der Ausgleichsfläche liegen, falls DRF positiv ist. Der Sinn der in den Deformationsgleichungen vorkommenden sonstigen Bezeichnungen wurde schon früher angegeben.

In Kenntnis der Koeffizienten der Deformationsgleichungen können die Koeffizienten des Normalgleichungssystems und — durch Lösung des Gleichungssystems — ähnlich den gesuchten Änderungen und mittleren Fehlern auch die nötigen Streuungswerte berechnet werden. Bei diesen Berechnungen wurden die Oberflächendeformationen mit dem Gewicht 1 in Betracht genommen.

Für die numerische Auswertung wurde ein Programm aufgestellt, auf dessen Grund durch die Rechenanlage folgende Daten abgedruckt wurden: die Koeffizienten und absoluten Glieder des Normalgleichungssystems; die Elemente der Inversmatrix; die gesuchten Änderungen und die Streuung SO der Oberflächendeformationen mit dem Gewicht 1.

Daraus sind noch berechnet worden: der lineare Wert D und der Richtungswinkel IR_D der Achsenverschiebung; die mittleren Fehler der aus der Ausgleichung erhaltenen Änderungen; die Koeffizienten der Meridiankurvengleichung der Ausgleichsfläche und schließlich die Werte $R - R_0$, d.h. die Differenzen für einige runde Höhenwerte M der mit den ausgeglichenen Koeffizienten berechneten Halbmesser R und der mit den Planungskoeffizienten berechneten Halbmesser R_0 .

Einige kennzeichnende zahlenmäßige Daten sind in Tabelle 2 zu finden. In den letzten zwei Zeilen sind positive und negative Maximalwerte der Differenz $R - R_0$ angegeben.

Die Zahlenwerte der Oberflächendeformationen wurden anstatt der Deformationsgleichungen (4/a) bzw. (4/b) mit dem Zusammenhang:

$$DRF_i = DR_i - D \cdot \cos (IR_i - IR_D) - (R - R_0)_i \quad (5)$$

Tabelle 2

	TII		G. IV		G. V	
<i>dX</i>	±0,0058 m	±0,0010 m	<i>dX</i>	±0,0011 m	±0,0003 m	±0,0007 m
<i>dY</i>	±0,0024 m	±0,0010 m	<i>dY</i>	±0,0057 m	±0,0043 m	±0,0007 m
<i>dA</i>	±0,1033 m	±0,0262 m	<i>da</i>	±0,0205 m	±0,0232 m	±0,0008 m
<i>dB</i>	±0,1165 · 10 ⁻²	±0,0214 · 10 ⁻²	<i>db</i>	±0,0940 m	±0,2225 m	±0,0216 m
<i>dC</i>	±0,14118 · 10 ⁻³	±0,00006 · 10 ⁻³	<i>dc</i>	±0,1227 m	±0,4058 m	±0,0155 m
<i>dD</i>	±0,026582 m	±0,001621 m				
<i>dE</i>	±1,2007 m ²	±3,0411 m ²				
<i>SO</i>	±22 mm	±31 mm			±21 mm	
<i>D</i>	6 mm	12 mm			4 mm	
<i>IR_D</i>	202°	207°			86°	
+MAX	±15 mm	±26 mm			±42 mm	
-MAX	±26 mm	±16 mm			±22 mm	

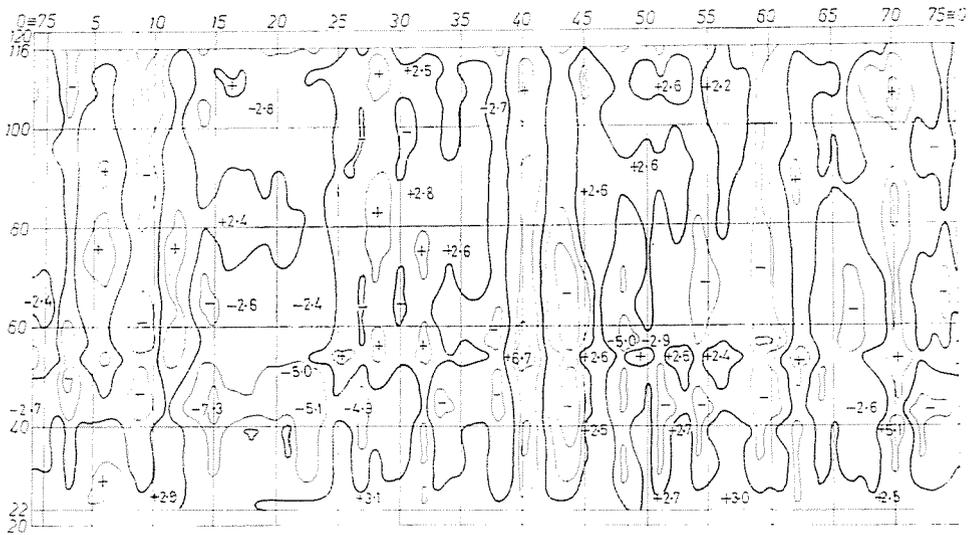


Abb. 6.

berechnet. Aus den Daten der Ergebnistabelle sind für den Kühlturm im Block V des Wärmekraftwerkes »Gagarin« die Maximalwerte der Oberflächendeformationen je Zeile und die Zeilendurchschnitte der absoluten Werte der Oberflächendeformationen im 4. Teil der Tabelle 1 zu finden.

Die flächenmäßige Verteilung der Deformationen ist in Abb. 6 dargestellt. In der Abbildung sind die Isodeformationslinien mit einer Stufung von 25 mm gezeichnet. Die Nulldeformation wurde durch die ausgezogene Linie hervorgehoben.

Die Bewertung der entstandenen Manteldeformationen ist nicht unsere Aufgabe. Zu der Benutzung für einen beliebigen Zweck der zur Orientierung angegebenen zahlenmäßigen Daten möchten wir aber abschließend betonen, daß die Größe der Deformationen durch die Berücksichtigung der Ergebnisse von kontinuierlich und sorgfältig durchgeführten geodätischen Kontrollmessungen bei der Steuerung von Gleitschalungen beträchtlich beeinflusst wird.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprogramms für die Kühlsysteme großer Kraftwerke in Ungarn wurde u. a. die Durchführung empirischer Prüfungen notwendig, um festzustellen, in welcher Weise und in welchem Maße die Geometrie der Mantelmauer großer Kühltürme durch Ungenauigkeiten der Ausführung verändert wird.

Für die numerische Auswertung wurden drei im Gleitschalung ausgeführte Objekte auserwählt.

Es wird die Durchführungsmethode der Prüfungen beschrieben, ferner zur Veranschaulichung der Größenordnung und Art der an den gewählten Objekten auftretenden Deformationen einige kennzeichnende Daten mitgeteilt.

Schrifttum

1. HOLÉCZY, GY.: Kontrolle während des Baues der Geometrie von Bauten mit veränderlichem Profil.* Geodézia és Kartográfia 4/1970 Budapest.
2. HOLÉCZY, GY.: Bestimmung der Formänderung von Gleitschalungen mit großen Durchmesser.* Geodézia és Kartográfia 3/1963 Budapest.
3. HOLÉCZY, GY.: Die geodätische Steuerung des Baues in Gleitschalung.* Geodézia és Kartográfia 2/1968 Budapest.
4. SÁRDY, A.: Ingenieurgeodätische Anwendung des Ausgleichskreises.* Geodézia és Kartográfia 2/1969 Budapest.
5. SÁRDY, A.: Die günstigste Meßanordnung bei der ingenieurgeodätischen Anwendung des Ausgleichskreises.* Geodézia és Kartográfia 4/1969 Budapest.
6. HOLÉCZY, GY.: Bestimmung der vorübergehenden Achsenlinienabweichung bei horizontaler Deformation an Gleitschalungen.* Publikation der Wissenschaftlichen Tagung des ungarischen Geodätischen und Kartographischen Vereins 1971, Budapest.

Dozent Dr. Andor SÁRDY }
 Oberassistent Dr. Gyula HOLÉCZY } H-1521 Budapest

* In ungarischer Sprache