MAREES TERRESTRES

BULLETIN d'INFORMATIONS

N° 44

15 juillet 1966

Association Internationale de Géodésie

Commission Permanente des Marées Terrestres

Editeur Prof Paul M E L C H I O R
Observatoire Royal de Belgique
3, Avenue Circulaire
Bruxelles 18

Bulletind'Informations des Marées Terrestres N° 44
Table des Matières .

Le Professeur Rudolf TOMASCHEK (1895-1966)
(R.Lecolazet - P. Melchior - E. Groten) p. 1691 - 1695

T. HONKASALO
Investigation of an Askania earth tide gravimeter 1696

P. MELCHIOR
Un système d'étalonnage automatique programmé pour les stations clinométriques souterraines. 1707

M. SCHNEIDER
Die Bestimmung der T₀ Zeiten von Horizontalpendeln 1710

G. MITTELSTRASS
Ein Vorschlag für eine Nullmethode bei Horizontalpendelregistrierungen 1714

D. SIMON
Uber den Einfluss von Luftänderungen und Meeresgezeiten auf die Ergebnisse der harmonischen Analyse von Horizontalpendelaufzeichnungen 1720

M. BONATZ
Zur Frage der Betriebssicherheit netzspannungsbetriebener Registrieranlagen 1747

M. BONATZ
Der Einflusz der Raumtemperatur auf die Spannungskonstanthalter zu der Askania-Erdgezeitenregistrieranlage 1750

Z.N. AKSENTIEVA, I.A. DITCHKO (Traduction)
Résultats préliminaires des observations sur les variations de la force de pesanteur avec un gravimètre GS 11 à Poltava 1754

D. SIMON
Elastische Nachwirkungen an einem Askania-Gravimeter GS 11 1759

Rudolf TOMASCHEK, l'un des pionniers des recherches modernes dans le domaine des Marées terrestres, premier président de la Commission permanente, vient de disparaître.

Certes, il avait été rudement touché par la maladie et pour cela et aussi pour d'autres raisons, plus secrètes et, sans aucun doute, plus impérieuses à ses yeux d'homme sensible et digne, il avait jugé bon de laisser à d'autres le devoir de suivre la voie qu'il avait si bien commencé de tracer, mais nous n'avions pas perdu l'espoir de le voir se rétablir, siéger encore à nos réunions et nous apporter ses conseils et ses suggestions.

La maladie, hélas, a été la plus forte '

Nous prions sa famille, et particulièrement Madame Tomaschek, de bien vouloir trouver ici les condoléances respectueuses que nous nous permettons de lui exprimer au nom de la Commission permanente des Marées terrestres, dont tous les membres conserveront fidèlement le souvenir de l'homme de haute stature, physique et spirituelle, qui fut leur premier président.

R. Lecolazet.

Rudolf TOMASCHEK (1895 - 1966)

Président de la Commission Permanente des Marées Terrestres (1958 - 1963)

par

Paul MELCHIOR

Le décès du Professeur Rudolf Tomaschek frappe cruellement et remplit de tristesse tous ceux qui, depuis dix ans, ont pu le rencontrer lors de chaque réunion consacrée au problème des marées terrestres.

Nous conserverons du premier Président de la Commission Permanente des Marées Terrestres le souvenir d'un homme courtois et amical, doué d'une vaste et riche culture, passionné de science mais doté aussi de ces qualités du coeur qui font aimer et apprécier.

Nous l'avons retrouvé à l'occasion de chacun des Colloques et Symposiums qui se sont succédés depuis 1956, veillant à la préparation des programmes de recherches, soucieux d'approfondir toutes les possibilités offertes par les techniques modernes, attentif à l'exposé des théories nouvelles. Chacune de ces rencontres fut marquée par la forte personnalité, par le dynamisme souriant de ce Président dont la prestance physique ne le cédait qu'à la bonté affable.

Chacun de nous possède des souvenirs personnels de ses rencontres avec le Professeur Rudolf Tomaschek car il était accueillant à tous et savait écouter et conseiller.

Nous voudrions évoquer ici un de ces souvenirs qui nous est propre, celui d'une longue journée passée dans cette immense Exposition Universelle de 1958 à Bruxelles où nous avons pu échanger avec lui tant d'impressions diverses par lesquelles il exprimait cette sympathie profondément humaine qu'il portait à tous les peuples.

C'est animé de ces mêmes sentiments qu'en 1961, ouvrant le Symposium International des marées terrestres au Palais des Académies à Bruxelles, il répondait aux souhaits d'accueil en rappelant qu'à l'époque où l'Impératrice Marie-Thérèse d'Autriche fondait l'Académie Royale de Belgique : " il existait déjà une Union Européenne, toute spirituelle, qui rapprochait les savants. " Après bien des tribulations, des bouleversements et des catastrophes mondiales, cette union " se réalise, de nos jours, sur une plus grande échelle. Pour nous, savants, qui avons le globe " entier pour objectif et qui considérons notre planète comme notre Patrie, cette union nous " tient d'autant plus à coeur ".

C'est au terme d'une carrière brillante de chimiste et de physicien que Rudolf Tomaschek s'est entièrement consacré à l'étude des marées terrestres et nous voudrions retracer ici brièvement cette évolution qui lui fit parcourir un vaste domaine de la recherche scientifique depuis les débuts d'un siècle fécond en découvertes.

Rudolf Charles Anthony Tomaschek est né le 23 décembre 1895 à Ceské Budejovice (Tchécoslovaquie). La ville s'appelait alors Budweis et Rudolf Tomaschek est né citoyen autrichien. Son père était fonctionnaire, sa mère, fille de notaire Hawelka, était une descendante éloignée de l'astronome Hevelius.

Après avoir fait des études élémentaires dans sa ville natale, R. Tomaschek entre en 1913 à l'Université de Prague d'où il sort en 1918, promu "summa cum laude" docteur en philosophie, ayant présenté une thèse sur les quinones bi-nucléaires.

Il entame donc sa carrière d'homme de science comme chimiste, dans un laboratoire de recherches pétrolières à Brno en Moravie. Il s'intéresse aux phénomènes de luminescence et de phosphorescence. Dès 1919 il entre à l'Institut de Physique de l'Université de Heidelberg où il se consacre à l'étude du problème du mouvement absolu. Il reprend à l'Observatoire Königstuhl l'expérience de Michelson sur la lumière des étoiles fixes et procède à des expériences à haute altitude à la Jungfraujoch. Ses expériences sur la théorie de la relativité ont été mentionnées à l'époque par Von Laue.

En 1924, R. Tomaschek est "Doctor habilitatus" de l'Université de Heidelberg et, à partir de cette époque jusqu'en 1943, il réécrit la nouvelle édition du Manuel de Physique de Grimsehl.

En 1927, il devient professeur extraordinaire de physique expérimentale à l'Université de Marburg/Lahn et consacre une grande partie de son activité et un grand nombre de ses publications à l'étude des terres rares. C'est aussi à cette époque que son intérêt pour le problème de la contraction de Lorentz le porte vers l'étude d'effets gravimétriques très faibles : il construit, avec W. Schaffernicht, un gravimètre bifilaire très sensible et montre que la mesure de petites variations de gravité est possible (1932). Il devient professeur ordinaire et prend successivement la direction de l'Institut de Physique expérimentale à l'Université technique de Dresde (1934) puis à l'Université technique de Munich (1939).

En 1947, il est invité à participer aux recherches entreprises sur les problèmes gravimétriques et leurs applications géophysiques au Centre de Recherches de Kirklington Hall en Grande Bretagne. Il y poursuit des travaux bien connus de tous ceux qui s'intéressent aux marées terrestres. En 1955 il rentre en Allemagne et se retire à Breitbunn, sur la Chiemsee, dans cette Bavière romantique qu'il aimait tant.

De cette époque date sa participation active aux travaux de la Commission permanente des Marées Terrestres de l'Association Internationale de Géodésie.

En 1957, il préside à Bruxelles un premier Colloque International sur les Marées Terrestres qui réunit 17 participants et jette les bases de la coopération internationale dans ce domaine en définissant les buts et les méthodes de recherche.

Lorsqu'à Munich en 1958, est officiellement créée la Commission des Marées Terrestres, Rudolf Tomaschek est appelé unanimement à la présider et il reste à sa tête jusqu'en 1963 lorsqu'il démisionne pour raisons de santé.

A ce titre il préside le Symposium de Trieste en 1959 et le Symposium de Bruxelles en 1961.

Il y apporte aussi des contributions originales nouvelles, fruit de ses expériences dans les stations de Winsford en Angleterre et de Berchtesgaden en Allemagne.

Il a publié, depuis 1931, trente-neuf travaux sur le problème des marées terrestres (cf. Bibliographie Générale des Marées Terrestres).

La disparition de Rudolf Tomaschek est douloureusement ressentie par l'Association Internationale de Géodésie, par la Commission Permanente des Marées Terrestres et surtout par tous ceux d'entre nous qui ont pu s'honorer de son amitié.

Professor Rudolf TOMASCHEK

A short appreciation

by Erwin Groten

It is a honorable task to express an appreciation of Professor Tomaschek and his contributions to physics or geophysics ; but, nevertheless, it is not easy to give a full and well balanced picture of his work and his personality. Moreover, it would be beyond the scope of this short obituary article to summarize his achievements ; they are too widespread in the different parts of science from astronomy and experimental physics to chemistry and geology. Indeed, they represent his broad and manysided field of interest.

Professor Tomaschek started his scientific work at a time when many new ideas and new concepts, like those of Lorentz, Einstein, and others, were emerging in physics ; the modern cosmological development began. These fundamental questions seem to have attracted his interest until his latest days. Even though he was working on so many different topics and his research work was mainly directed to experimental problems such as the feasibility of measuring very small quantities by highly sensitive instruments and similar work, cosmology and related questions seem to have been of main concern to him.

It was highly stimulating to do research and to work under the direction of Professor Tomaschek, Even though only a small part of his research work was directed to purely geophysical problems it seems that his comprehensive knowledge of different scientific fields was indeed well and ideally adapted to the study of such complex questions as crustal behavior and tidal deformations of the solid earth. He considered those problems in most cases from a practical point of view or, more exactly, from the point of view of an experimenter rather than from that of a pure theoretician. Nevertheless, his suggestions and conceptions which were in many cases more of qualitative than of quantitative character seemed to reflect often a striking flair for the real situation and a deep insight into the usually manysided and complex problems of geophysics.

Professor Tomaschek's work has received recognition not only in his own country but by many scientists and scientific institutions in the world. Beyond this, he was not only a well known physicist but also a recognized and remarkable man.

INVESTIGATION OF AN ASKANIA EARTH TIDE GRAVIMETER

by

Tauno HONKASALO

Geodeettinen laitos, Helsinki

The recording of earth tides was started in Finland in September 1964 with an Askania GS 11 gravimeter equipped with a particularly sensitive spring. As the experiences obtained in the course of the first one and the half years may be useful for other observers, they are briefly described here.

1. THE STATION. The gravimeter station is in a half-underground cellar room in Helsinki with coordinates ϕ = 60°10'N, λ = 24°56'EG, h = 12,3 m, g = 981.918 Gal. The gravimeter, the Askania amplifier and the Hartmann & Braun Linecomp recorder are installed on a concrete pillar based on granite rock. The auxiliar instruments are fastened on the brick wall. The room temperature was maintained at + 13° ± 0°5 C with thermostate controlled electric heating. During the winter time a box of 2 x 2 x 2 m of insulating wallboard was built around the apparatus. In summer it was, however, necessary to raise the temperature. Since then the recording has been made at + 18° C.

2. THERMOSTATES OF THE GRAVIMETER. The inner thermostate cannot be used because of its inductive disturbance on the recording. The disturbance is of the order of 6-8 μgal. The outer thermostate does not work without disturbing the recorded curve either. The influence is smaller, about 2 μGal at 37°5 C and heating stage II. The construction of an inner thermostate is quite inconceivable. To be of any use for a double thermostate the inner thermostate would have to be more sensitive and constructed only for adjusting the heat waves produced by the outer thermostate, not for raising the inner temperature as much as 2°5. The thermostate of the Askania-amplifier has no significant effect on the registration curve.

3. WORKING TEMPERATURE OF THE GRAVIMETER. The manufacturer recommends employing an inner temperature of + 40° C, but admits the possibility that an inner temperature of + 35° can give even better results. The gravimeter reading seems to have a maximum value at 22° C and the drift is smallest, practically zero at this temperature, Fig. 1.

These observations seem to indicate that at this temperature, the temperature compensation is best. Later, Dec. 7, 1965, the manufacturer has informed us that the temperature effect has a minimum at + 35°, but points out the difficulties to determine it. Fortunately the optimum inner temperature given by the manufacturer is wrong. The low temperature has namely the advantage that the heating current is small and thus the thermostate disturbance which is proportional to the current is small, only about 1 μGal. The equalizing of the heating times with the intervals is not possible without changing the relay, since the voltage needed is lower than the working voltage of the relay.

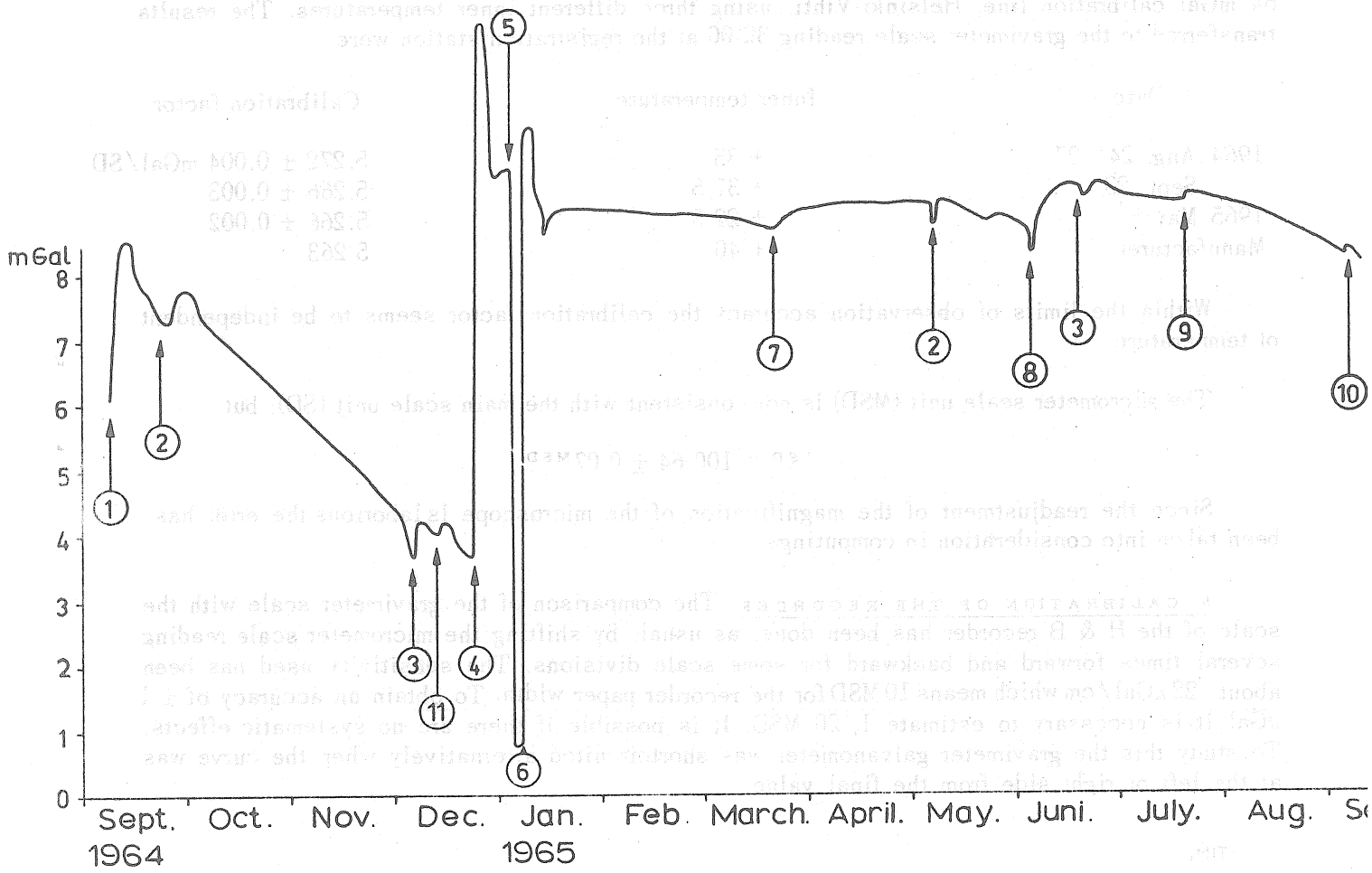


Fig. 1. Drift of the gravimeter.

1. Disconnecting of the inner thermostate
2. Calibration of gravimeter on the calibration line
3. Disturbance in electric net
4. Change of gravimeter temperature from 37°5 to 22°5 C
5. " " " " " 22°5 to 32°5 C
   Examination of the tightness
6. Change of gravimeter temperature from 32°5 to 22°5 C
7. Alteration of room heating system
8. Change of room temperature from 13° to 18°C
9. Change of power supply voltage from 6.34 to 5.99 V
10. Interruption because of examination of amplifier
11. Influence of strong variations of atmospheric pressure on the leaking gravimeter

The recording is being done now at 22°5 inner temperature and using the outer thermostate at heating stage I only. At this temperature the capacity of the battery charger, provided by the manufacturer, is adequate while with an inner temperature of + 40°C it could not keep the gravimeter and the amplifier warm at a + 13°C room temperature.

4. CALIBRATION OF THE GRAVIMETER. The gravimeter has been calibrated at the 64 mGal calibration line, Helsinki-Vihti, using three different inner temperatures. The results transferred to the gravimeter scale reading 32.00 at the registration station were :

Date	Inner temperature	Calibration factor
1964 Aug. 24 - 27	+ 35°	5.272 ± 0.004 mGal/SD
Sept. 23	+ 37.5	5.266 ± 0.003
1965 May 6	+ 22.5	5.266 ± 0.002
Manufacturer	+ 40	5.263

Within the limits of observation accuracy the calibration factor seems to be independent of temperature.

The micrometer scale unit (MSD) is not consistent with the main scale unit (SD), but

$$1^{SD} = 100.64 \pm 0.07^{MSD}$$

Since the readjustment of the magnification of the microscope is laborious the error has been taken into consideration in computings.

5. CALIBRATION OF THE RECORDER. The comparison of the gravimeter scale with the scale of the H & B recorder has been done, as usual, by shifting the micrometer scale reading several times forward and backward for some scale divisions. The sensitivity used has been about 22 μGal/cm which means 10 MSD for the recorder paper width. To obtain an accuracy of ± 1 μGal it is necessary to estimate 1/20 MSD. It is possible if there are no systematic effects. To study this the gravimeter galvanometer was shortcircuited alternatively when the curve was at the left or right side from the final value.

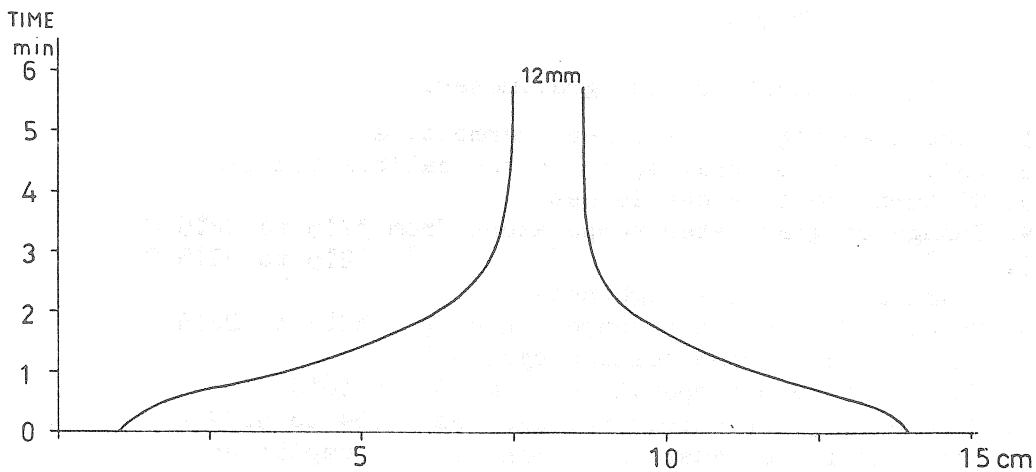


Fig. 2. Records after shortcircuiting the gravimeter.

The curves in Fig. 2 show a systematic difference of about 25 μGal. Though it is easy to avoid this error in calibration by approaching the final values from both directions (Fig. 3) it is not easy to estimate its influence on the recorded curve itself.

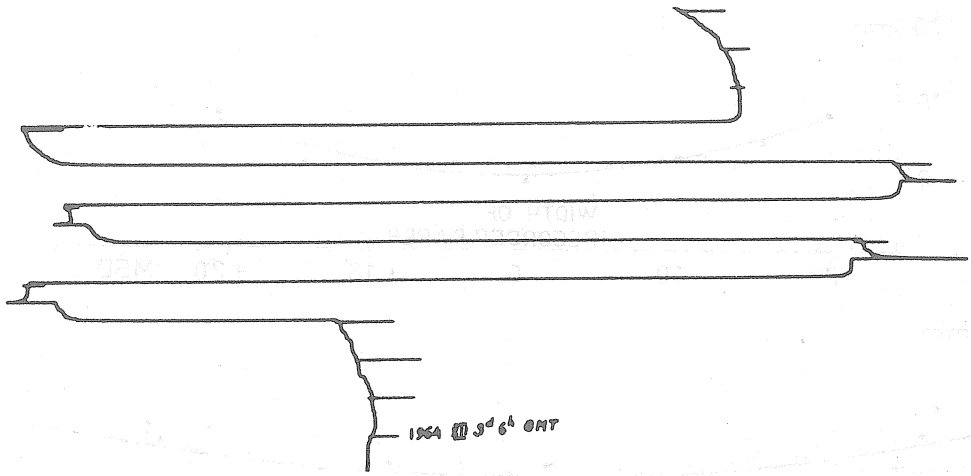


Fig. 3. Calibration of the recorder

The adjusting of the amplification factor of the H & B recorder did not diminish this systematic difference. After one year's operation, bad disturbances appeared in the recorder due to poor functioning of its contact modulator. After a careful adjusting of the modulator also the systematic difference disappeared. Obviously a careful examination of the recorder is necessary. In our case, the recorder was delivered in poorly adjusted shape.

6. LINEARITY OF THE RECORDING. For studying the linearity the H & B recorder was at first compared with a Solartron - digital - voltmeter. No differences were found between these two instruments. Then the digital voltmeter was used instead of the recorder for extending the scale. Tests were carried out using two different sensitivities 23 μGal/cm and 74 μGal/cm. For the reading of the recorder the following equations were derived in both cases

$$R_1 = 12.5 - (2.286 \pm 0.003)\,(M - M_o) - (0.0019 \pm 0.0002)\,(M - M_o)^2 \text{ cm}$$
$$R_2 = 12.5 - (0.7085 \pm 0.0018)\,(M - M_o) - (0.00017 \pm 0.00003)\,(M - M_o)^2 \text{ cm}$$

where

R = reading of the digital voltmeter converted to cm on the recorder paper
M = reading of the gravimeter micrometer, M_o is chosen so that $M - M_o = 0$ when R = 12.5 cm.

Thus the sensitivity changes more than was expected :

at left edge	sensitivity in centre	at right edge
22.69	22.89	23.10 μGal/cm
73.23	73.86	74.49 μGal/cm

i.e. in both cases about 1.7 % on the H & B recorder paper width. Numerical correction before analyzing the results is necessary.

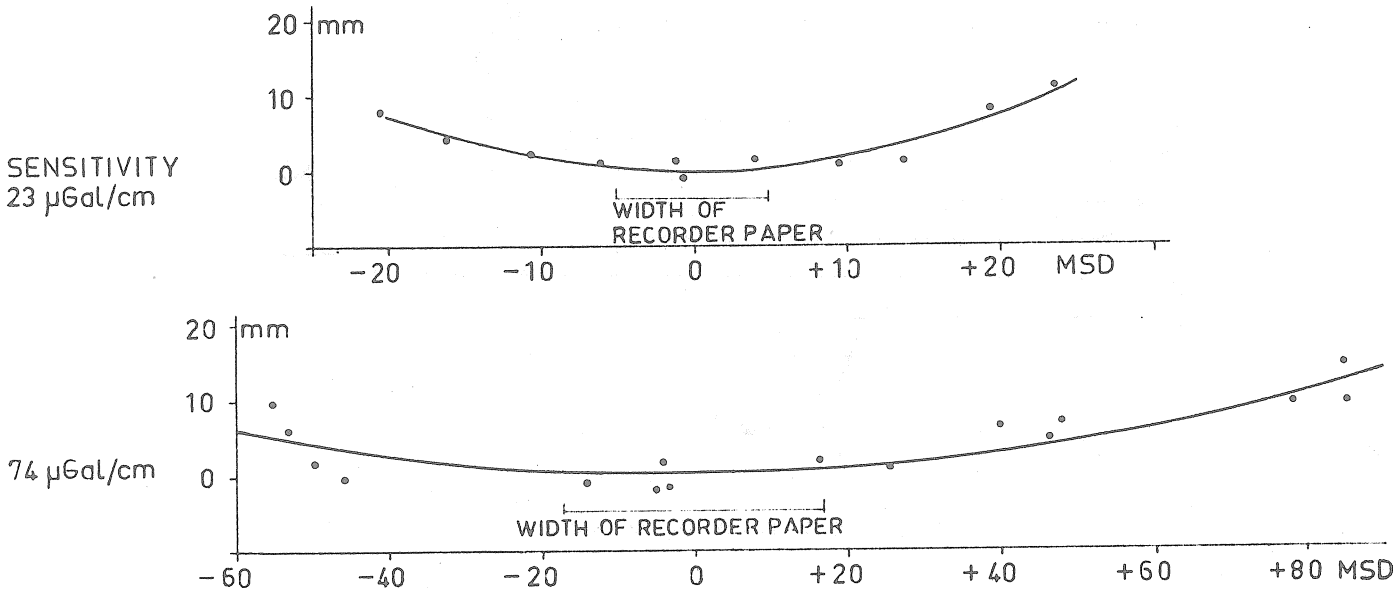


Fig. 4. Residuals after linear adjustment of the comparison of gravimeter scale with linear measure of the recorder paper.

7. POWER SUPPLY. To keep the intensity of light constant in the gravimeter and in the amplifier lamps a transistor voltage stabilisier was provided with the instruments. According to the instructions by Askania a 6.0 V voltage corresponding to about 160 mA current on both lamps was used since this was the point insensitive to the voltage.

The power supply was adjusted to give 6.0 V constant voltage. The control measurements in the course of several weeks showed no changes. After several months' use, however, the voltage was found to have risen 5 per cent though the accuracy of the constancy was declared to be 0.1 per cent. At the same time, the sensitivity of the gravimeter had decreased from 20 µGal/cm to 24 µGal/cm, Fig. 5.

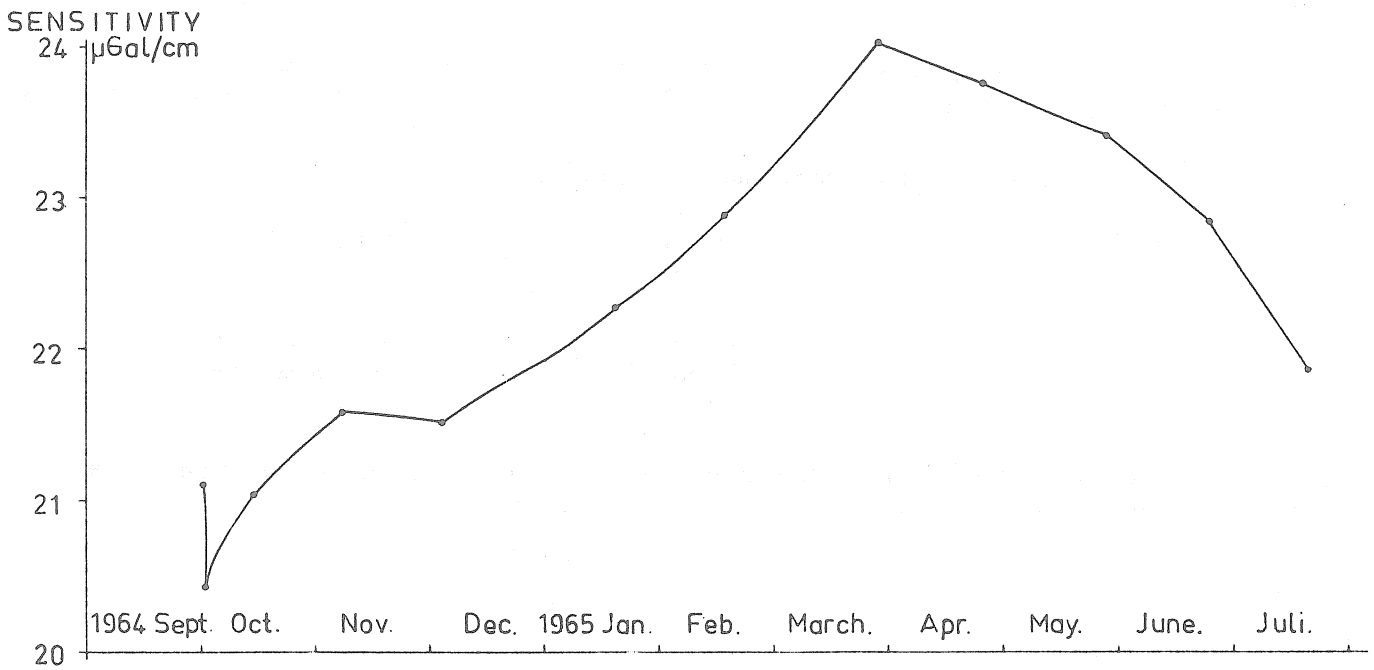


Fig. 5. Sensitivity changes of Askania gravimeter N° 187.

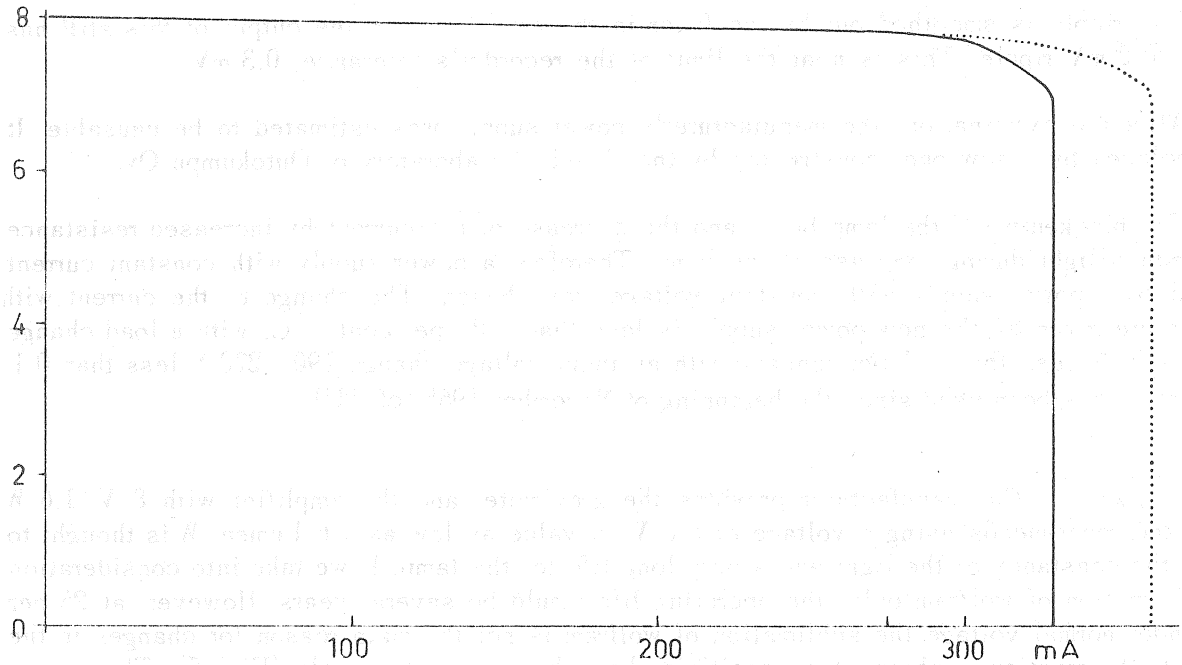


Fig. 6. Voltage of the power supply at different load current.

The power supply proved to be sensitive to temperature changes. These detections gave reason to examine the characteristics of the power supply. According to Fig. 6 the voltage is fairly constant with smaller load current than 300 mA, but then suddenly drops. This point can be changed (dotted curve) by regulating the variable resistor in the emitter circuit of the transistor. Below 300 mA load the dependency on temperature is small on the basis of the characteristic of the zenerdiode used. The instructions of Askania assume the usage of the vertical part of the power supply characteristic to provide constant current. In this part the power supply is no more independent on temperature. In addition the ripple voltage is disturbingly large (Fig. 7), $V_{max} - V_{min} = 330$ mV.

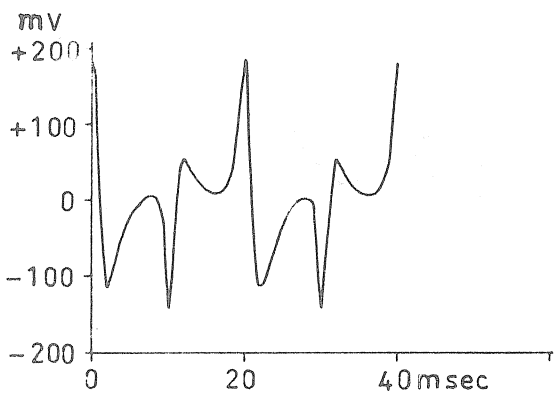


Fig. 7. Ripple voltage by 320 mA load.

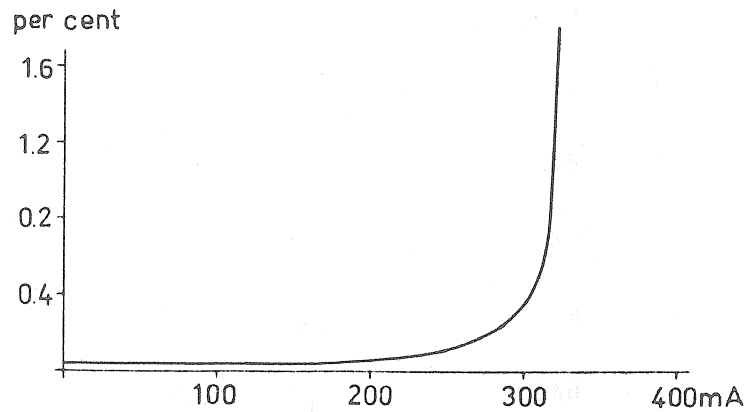


Fig. 8. Increase of the ripple % with increasing load current.

The ripple is smoothed out by the filter in the amplifier, but the output of this still has a 0.1 - 0.2 mV ripple. This is near the limit of the recorder's tolerance, 0.3 mV.

After the examination, the manufacturer's power supply was estimated to be unusable. It was replaced by a new one, constructed by the Physical Laboratory of Outokumpu Oy.

The blackening of the lamp bulbs and the decrease of the current by increased resistance both reduce light during long use of the lamp. Therefore a power supply with constant current instead of a power supply with constant voltage was chosen. The change of the current with temperature given by the new power supply is less than 0.01 per cent/° C, with a load change from 0 - 15 V less than 0.1 per cent and with an input voltage change 190 - 270 V less than 0.1 per cent. It has been used since the beginning of November 1965 (cf. [1]).

8. LAMPS. The manufacturer provides the gravimeter and the amplifier with 8 V/1.6 W lamps and recommends using a voltage of 6.0 V. A value as low as 1.6 Lumen/W is thought to ensure the constancy of the light and a very long life for the lamp. If we take into consideration the sublimation of wolfram only, the operating life would be several years. However, at 25 per cent under normal voltage the sublimation of wolfram is not the main reason for changes in the filament. As mentioned above, the sensitivity has changed continuously (Fig. 5). The reason can lie in the stabilisator, in the lamps, or in the photo-voltaic cells. Because of the parallel coupling to the power supply, it is difficult to know what is caused by the gravimeter, what by the amplifier. We know that the voltage of the power supply has continuously risen during September 1964 - July 1965 from 6.0 to 6.35 V and that the resistance of the lamps has essentially changed. After the new power supply with constant current was taken into use and the lamps of the gravimeter and of the amplifier coupled in series, the control of the lamps has been easy. The digital voltmeter has been used for measuring the voltage of the lamps. The voltage of a constant control resistor, coupled in series with the lamps, shows that no current changes have occurred.

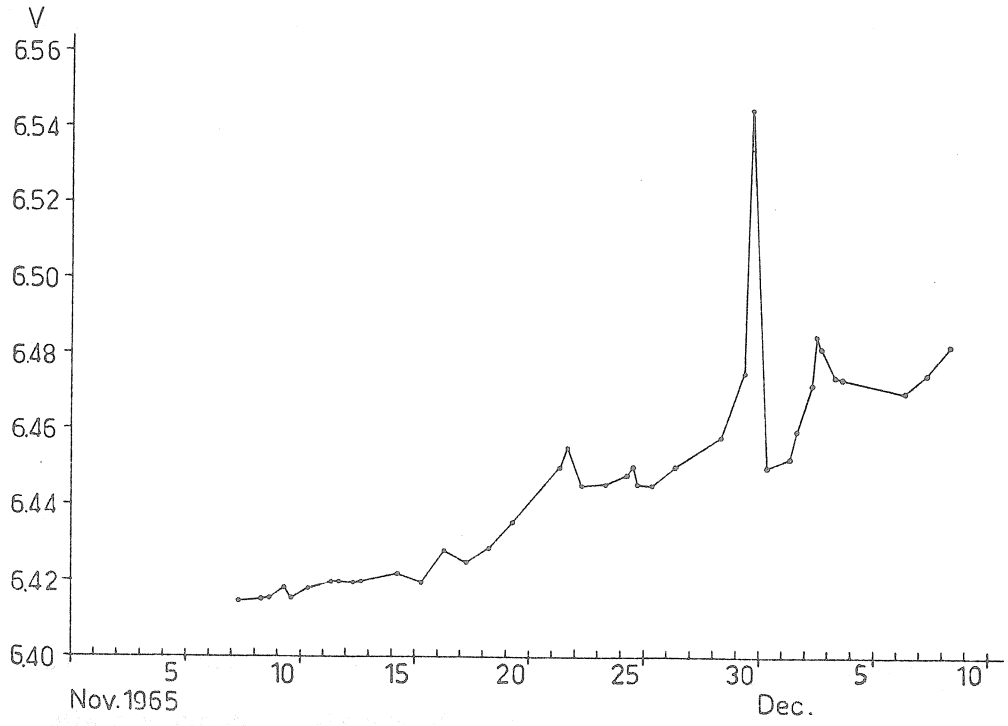


Fig. 9. Voltage of the gravimeter lamp with a constant 161 mA current.

Fig. 9 shows the voltage of the gravimeter lamp after 13 months' use. Because of bad disturbances in recording, the lamp was removed from the gravimeter. A microscopic examination showed the changes in the filament. Also the lamp of the amplifier showed the same indications though this voltage had changed less.

A recrystallization of wolfram or some other effects had made the surface of the filament rough and its structure brittle. Quite of its own accord, the filament broke during the examination. The bulbs had not blackened at all.

The manufacturer had provided the instrument with 3 spare lamps. All of them showed from the beginning such rapid changes that no regular recording was possible. One bulb blackened in three days, the resistance of the second one changed 1.5 per cent in three first days, the third one showed irregular changes of the order of 1 per cent. New lamps, sent by the manufacturer, are better. During a period of two months, the voltage of the gravimeter lamp has changed from 6.015 V to 6.030 V, of the amplifier lamp from 5.730 V to 5.735 V. The sensitivity has been constant within the limits of observation accuracy. The replacing of the lamps and the adjustment of them so that the slit is uniformly lighted is difficult because of poor fastenings. However, accurate adjustment is more recommendable than replacing the resistor, which is coupled in series with one of the photo-voltaic cells in the gravimeter, by a more suitable one, as recommended by the manufacturer's instructions for use. The experiences above show that the lamps of the gravimeter and of the amplifier must meet very strong demands. It is necessary to examine the lamps carefully before putting them into use. These tests are, however, hardly valid for a period of two years, as had been thought of the tests with seagravimeter lamps [2]. It is obviously necessary to control the changing of the lamp filaments continuously and replace the lamp with a new one immediately when it shows indications of irregular alterations. We do not now expect a lamp to be good enough for recording for as long a period as a whole year. The Finnish lamp specialists of the firm Oy Airam Ab have suggested the use a rhenium wolfram alloy for filaments as this prevents the recrystallization of wolfram at the temperatures which prevail in this case. In addition, they call attention to the extraordinary high demands for an exact geometric form of the filament.

9. ATMOSPHERIC PRESSURE. At the end of the year 1964 there were exceptionally large variations of atmospheric pressure. The drift corrections, derived with Pertsev-filter, was plotted against the atmospheric pressure, Fig. 10. The correlation was obvious. Certainly the Pertsev-filter has reduced the influence of the air pressure changes, but since these changes, e.g. in November, seem to be periodical, it is difficult to estimate the remaining influence of atmospheric pressure variations on the analyzed results.

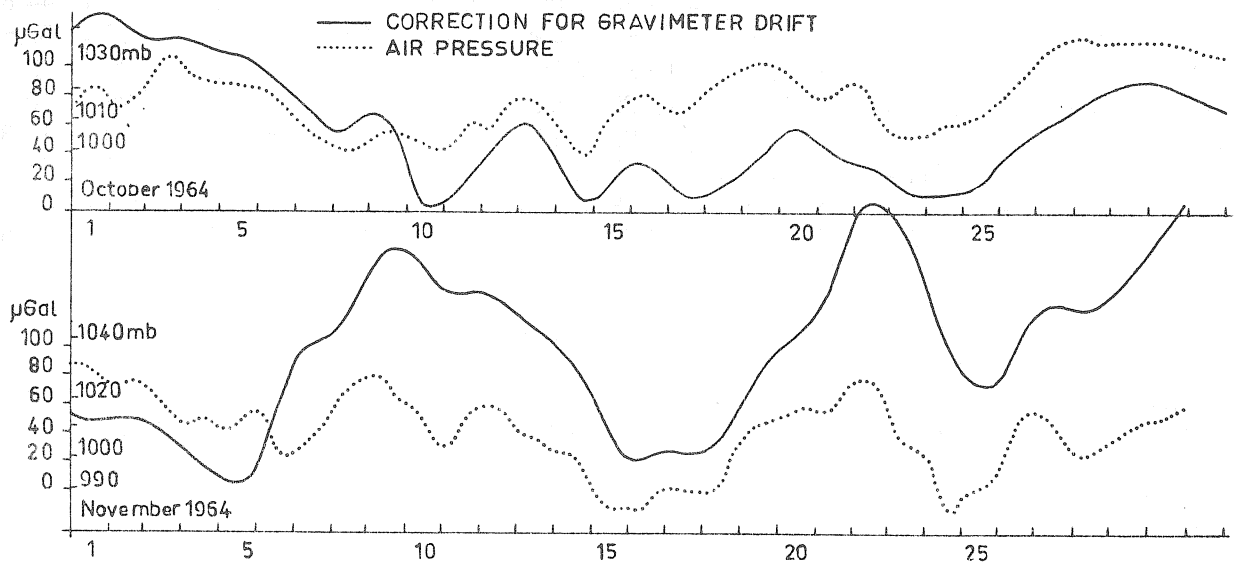


Fig. 10. Dependence of drift on atmospheric pressure. Linear drift 2.105 μGal/hour substructed.

The gravimeter was examined and tightened with vacuum grease. The tightening of the gravimeter has been made unnecessary difficult by making too many holes in the gravimeter box. The 12 fastening screws go through the lid inside the tightening ring ! The tightened gravimeter was tested in a pressure chamber. The 150 mmHg pressure variations cause about 20 μGal changes on the gravimeter reading but the influence is over in 10 minutes (cf. [3] and [4] p. 59). The gravimeter is not absolutely tight, but fulfils the requirements given in the instruction book. What influence these small leakings have, is still unclear to us.

10. RECORDINGS. Regular recording was started September 24, 1964. We have endeavoured to record as continuously as possible. The following interruptions have occurred :

Date	Reason
Dec. 5-7, 1964	Disturbance in electric current
Dec. 21, 1964-Jan. 13, 1965	Examination and reparation the leaking gravimeter box, examination of backlash of the recorder.
May 6, 1965	Recalibration of gravimeter on the gravity calibration line.
June 17-18, 1965	Disturbance in electric current
Aug. 7, 1965-Jan. 26, 1966	Disturbance in recorder, examination and repairing of it, examination of the stabilisator and replacing of it with a new one. Examination of lamps.

11. ANALYSING OF RECORDS. The recordings have been analysed in the International Centre of Earth Tides in Brussels. The results of 15 first analyses are as follows

Provisional results of harmonic analysis

N°	Mean epoch	K_1		O_1		Q_1		M_1		J_1	
		δ	κ	δ	κ	δ	κ	δ	κ	δ	κ
1	1964 Oct. 10	1.081 −	11.80	1.093 −	5.58	1.017 −	22.27	1.923 +	29.80	18.502 +	16.27
2	21	1.062 −	9.02	1.100 −	7.45	1.277 −	24.83	2.251 −	29.05	1.626 +	21.55
3	31	1.174 −	6.55	1.208 −	7.00	0.942 −	2.43	1.965 +	9.62	0.092 −	164.45
4	Nov. 11	1.180 −	6.74	1.256 −	7.33	0.979 −	8.39	1.356 −	2.46	1.842 +	5.47
5	1965 Jan. 29	1.205 +	3.24	1.112 −	3.59	1.041 +	8.32	0.888 −	20.92	1.171 +	51.96
6	Feb. 8	1.274 +	3.33	1.106 −	1.39	1.102 +	2.01	0.524 +	142.18	2.310 −	1.78
7	19	1.271 +	3.57	1.102 −	3.84	1.032 +	17.70	2.071 +	7.76	1.203 +	14.80
8	March 1	1.301 +	1.04	1.068 −	3.30	1.087 +	20.06	1.550 −	22.22	5.160 +	44.87
9	12	1.401 −	0.87	1.061 −	6.60	1.498 +	12.09	0.867 −	72.30	1.612 −	50.69
10	22	1.473 −	0.36	1.063 −	9.63	2.365 +	42.07	2.038 +	20.22	1.629 +	3.32
11	April 2	1.416 −	2.87	1.018 −	13.25	1.649 +	25.26	0.876 +	8.33	0.226 +	10.63
12	12	1.276 −	3.84	1.049 −	4.95	1.146 +	45.68	2.573 +	63.57	1.080 +	11.38
13	May 23	1.244 −	6.03	1.157 −	5.17	1.327 −	15.07	1.745 −	16.46	1.469 −	25.01
14	July 4	1.244 −	6.56	1.177 −	6.69	1.263 −	5.92	1.362 −	68.76	1.555 −	44.13
15	15	1.165 −	5.78	1.054 −	0.25	1.109 +	24.42	2.579 +	34.07	2.385 −	15.62
Mean		1.251 −	3.28	1.108 −	5.73	1.256 +	7.91				
Theor. ampl. (μGal)		37.67		26.76		5.13		2.10		2.10	

N°	Mean epoch	M_2 δ	M_2 κ	S_2 δ	S_2 κ	N_2 δ	N_2 κ	L_2 δ	L_2 κ	$2N_2$ δ	$2N_2$ κ
1	1964 Oct. 10	1.177	− 9.90	1.172	− 15.68	1.213	+ 7.91	1.936	+ 33.24	1.326	− 65.40
2	21	1.136	− 9.43	1.212	− 17.39	1.024	− 2.85	2.922	− 27.61	1.737	− 27.94
3	31	1.092	− 11.81	1.246	− 13.89	1.080	− 4.84	3.785	− 66.97	0.582	+ 50.16
4	Nov. 11	1.063	− 10.39	1.274	− 13.24	1.076	+ 1.07	1.559	− 59.26	0.828	+ 31.29
5	1965 Jan. 29	1.111	− 3.17	1.090	− 7.43	1.125	− 3.25	1.345	− 8.99	2.022	− 10.75
6	Feb. 8	1.172	− 2.57	1.094	− 7.52	1.234	+ 2.77	6.511	+ 63.79	2.256	+ 7.88
7	19	1.152	− 5.47	1.180	− 9.81	1.204	+ 4.93	2.261	− 51.13	2.636	− 1.57
8	March 1	1.124	− 6.71	1.248	− 9.34	1.067	− 3.36	1.157	− 7.28	2.011	− 12.54
9	12	1.167	− 7.59	1.252	− 10.61	1.081	+ 5.23	0.674	+ 143.70	1.282	− 79.64
10	22	0.972	− 9.83	1.027	− 12.93	1.414	+ 29.60	4.503	+ 118.64	7.974	− 66.34
11	April 2	0.997	− 5.04	0.971	− 12.64	1.612	+ 43.05	10.096	+ 41.42	120.680	− 87.42
12	12	1.068	− 5.38	0.917	− 12.65	1.165	+ 40.39	7.485	− 178.57	26.205	− 38.69
13	May 23	1.070	+ 0.09	1.241	− 13.04	0.954	+ 2.94	1.594	− 48.49	2.730	+ 7.46
14	July 4	1.208	− 4.53	1.210	− 15.57	1.284	− 7.70	1.251	− 143.06	1.409	+ 3.26
15	15	1.171	− 4.00	1.219	− 10.17	1.064	+ 6.47	1.450	+ 50.37	2.011	+ 34.68
Mean		1.112	− 6.38	1.157	− 12.13	1.173	+ 8.16				
Theor. ampl. (μGal)		18.49		8.61		3.54		0.52		0.47	

If we take the theoretic amplitude as the weight of the observation we get

from diurnal components K_1, O_1, Q_1 :	$\delta = 1.196$
from semi-diurnal components M_2, S_2, N_2 :	$\delta = 1.132$
Weighted mean	$\delta = 1.176$

The inner accuracy has been about + 0.8 μGal. The real accuracy is, however, much lower because of

1. difficulties in calibration of the recorder
2. leaking of the gravimeter box during the first months
3. linearity of the recorder scale not being corrected.

In the table above we see an obvious correlation between the different components. At our high latitude the amplitude of the components L_2 and $2N_2$ are smaller than the observation accuracy and the components M_1 and J_1 so near it that these components cannot be determined on the basis of our records. Through the correlation these components have distorted the results of head component and have not increased the accuracy.

REFERENCES

[1] M. BONATZ
Der Einfluss von Schwankungen des Stromes für die Beleuchtung der Photozellen auf die Messwertanzeige des Askania-Gravimeters GS 11 Nr. 116.
Bull. Inform. Marées Terrestres N° 42, 1965.

[2] K. GRAMATZKI
Neuerliche Verbesserungen am Askania-Seegravimeter.
Askania-Warte N° 64, 1964.

[3] R. SCHULZE
Gravimeter und ihre Fehler.
Askania-Warte Nr. 63, 1964.

[4] W. BETTAC
Messungen grosser Schwereunterschiede mit einem nicht astesierten Federgravimeter mit veränderbarer Masse (Askania-Gravimeter GS 12).
DGK, Reihe C, Heft 55, München 1963.

UN SYSTEME D'ETALONNAGE AUTOMATIQUE PROGRAMME POUR LES STATIONS CLINOMETRIQUES SOUTERRAINES

par

P. MELCHIOR

Les conditions d'observations des mouvements lents du sol (marées terrestres) nécessitent le choix de sites profonds qui, de ce fait, sont généralement éloignés de l'Institut qui procède aux recherches.

Dans le cas des pendules horizontaux à enregistrement photographique, un personnel non spécialisé peut assumer la tâche hebdomadaire de l'échange du papier.

Il reste cependant à contrôler très régulièrement la sensibilité des instruments, ce qui requiert un personnel entraîné à la manipulation des appareils. Ce contrôle s'obtient généralement par mesure de la période à l'aide d'un chronomètre, après qu'une très légère impulsion ait été donnée au pendule.

Il convient de répéter cette opération au moins toutes les 2 semaines.

Pour lever cette difficulté, le Centre International des marées terrestres a longuement expérimenté une méthode simple que nous présentons ici et qui donne toute satisfaction.

1. On a d'abord vérifié après une longue expérience qu'un pendule horizontal peut être mis en station permanente sur une crapaudine dilatable sans perdre sa stabilité en azimut.
   L'expérience a été faite à Warmifontaine pendant un an, avec le pendule VM 22. La crapaudine est placée sur un support d'acier en forme de champignon (Fig. 1), dont la pointe est scellée dans le rocher à l'aide d'un dérivé phénolique.

2. On a construit une petite horloge à programme spéciale, représentée par la figure 2 et qui comprend :

(a) un moteur hebdomadaire commandant la rotation d'un disque gradué en 7 jours et de 2 en 2 heures.
Ce disque porte sur la tranche des logements permettant de placer jusqu'à sept contacts amovibles.
Chaque contact de ce genre fait basculer un contacteur à mercure et le maintient déséquilibré pendant une durée de deux heures.

(b) un moteur de vitesse 30 minutes est enclanché par le basculement du contacteur à mercure et fait tourner un bras de levier de 48 cm de manière à amener le godet de mercure régissant la pression dans les crapaudines de la position "BAS" initiale à la position "HAUT" en un demi tour soit en 15 minutes.
Les contacts placés sur le disque central de ce système interrompent la rotation lorsque la position "HAUT" est atteinte et le godet reste dans cette position pendant 2 heures.
Lorsqu'après ces 2 heures le contacteur à mercure du dispositif (a) retombe en position normale, le moteur (b) renvoie, en 15 minutes, le godet de mercure en position "BAS" où il s'arrête à nouveau jusqu'à ce qu'un autre contact fasse basculer à nouveau le contacteur.

Nous avons inséré deux contacts par semaine, placés de telle sorte que les deux étalonnages qu'ils nous assurent se produisent en dehors des heures d'activité minière.

On voit apparaître, sur la courbe de marée, un décalage dont la mesure fournit la valeur de la sensibilité (fig. 3).

A titre d'exemple nous donnons, ci-joint, le tableau des mesures de sensibilité ainsi obtenues pour le pendule VM 22 au cours des derniers mois écoulés.

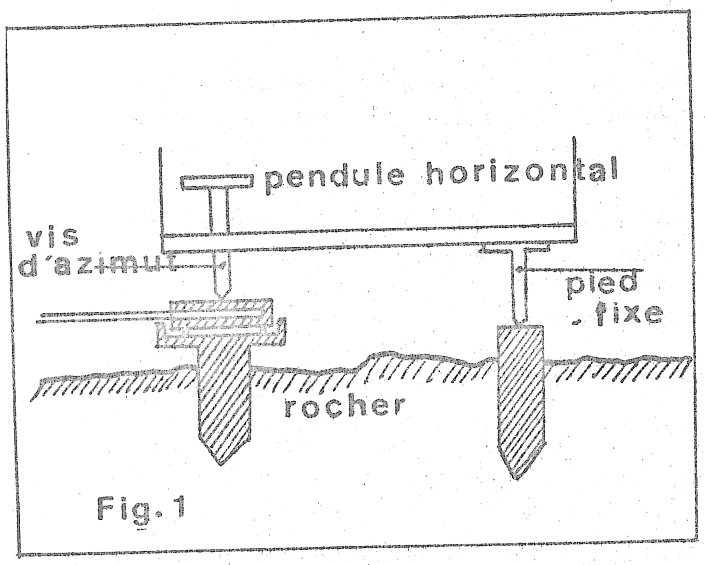


Fig. 1

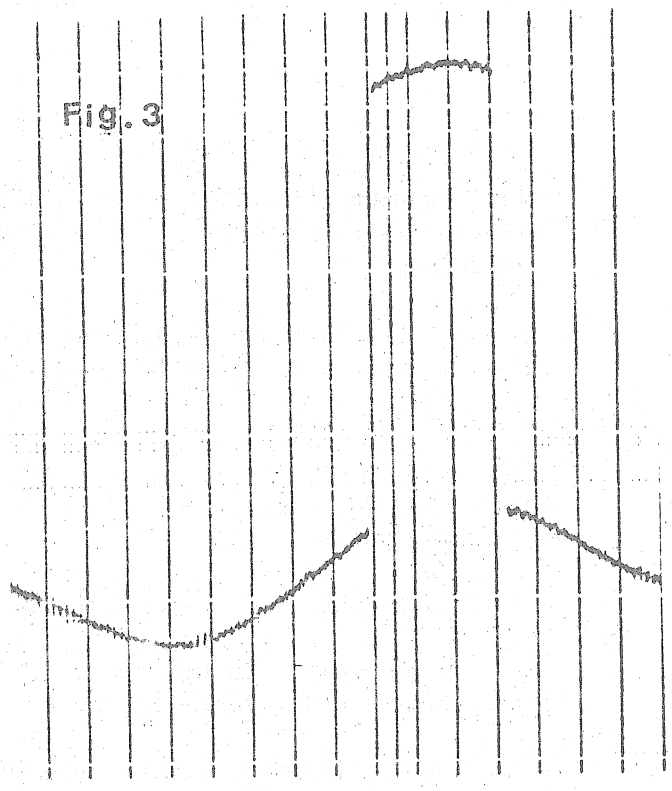


Fig. 3

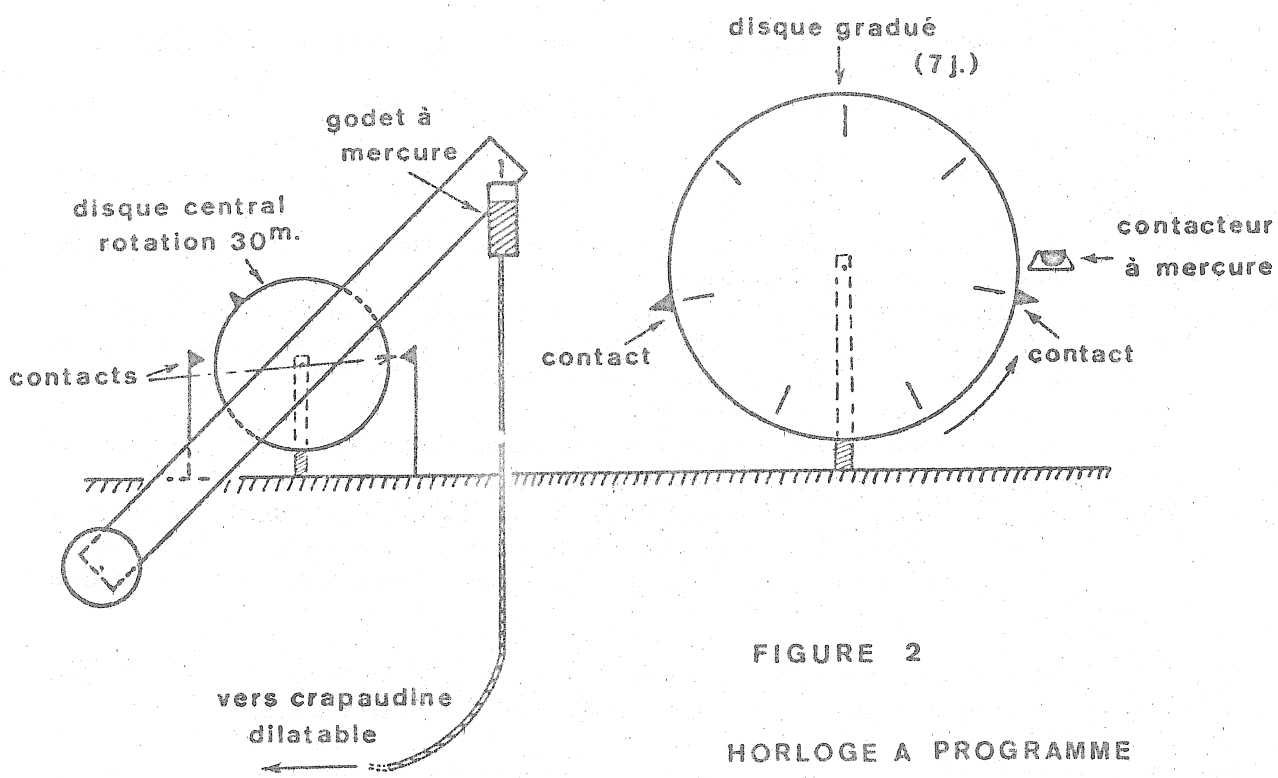


FIGURE 2

HORLOGE A PROGRAMME

ETALONNAGES AUTOMATIQUES PROGRAMMES

STATION WARMIFONTAINE
APPAREIL VM 22 - COMPOSANTE EW

SENSIBILITE EXPRIMEE EN MSECA/MM
E ECART ENTRE LES DEUX DEPLACEMENTS

EPOQUE	MESURE MOYENNE	MSECA/MM	E/2
1965 12 1	529	1.1278	0.0074
1965 12 8	516	1.1451	0.0011
1965 12 12	538	1.1068	-0.0010
1965 12 15	522	1.1429	-0.0077
1965 12 26	542	1.1007	0.0030
1965 12 29	542	1.1007	0.0071
1966 1 5	536	1.1121	-0.0125
1966 1 9	539	1.1058	0.0062
1966 1 12	547	1.0906	0.0030
1966 1 16	549	1.0866	-0.0030
1966 1 19	540	1.1048	-0.0052
1966 1 23	549	1.0838	0.0128
1966 1 26	549	1.0858	-0.0119
1966 1 30	556	1.0721	-0.0135
1966 2 2	554	1.0761	0.0155
1966 2 9	550	1.0838	-0.0099
1966 2 13	558	1.0682	-0.0077
1966 2 16	554	1.0759	-0.0020
1966 2 20	557	1.0710	0.0009
1966 2 23	552	1.0807	0.0010
1966 2 27	558	1.0682	0.0076
1966 3 2	559	1.0662	0.0000
1966 3 6	571	1.0447	0.0028
1966 3 9	560	1.0643	0.0057
1966 3 13	552	1.0797	0.0059
1966 3 16	565	1.0558	-0.0028
1966 3 20	564	1.0568	-0.0038
1966 3 23	558	1.0681	-0.0038
1966 3 30	568	1.0497	0.0033
1966 4 3	571	1.0447	0.0009
1966 4 6	567	1.0521	0.0065
1966 4 10	563	1.0586	0.0057
1966 4 13	568	1.0493	0.0074
1966 4 16	568	1.0493	0.0112
1966 4 19	575	1.0365	0.0146
1966 4 24	566	1.0530	0.0018
1966 4 27	578	1.0311	-0.0088
1966 5 3	581	1.0258	0.0053
1966 5 7	576	1.0347	-0.0054
1966 5 14	576	1.0347	0.0000
1966 5 18	576	1.0347	-0.0018
1966 5 25	589	1.0119	0.0052
1966 5 29	596	1.0000	-0.0034
1966 6 1	583	1.0223	-0.0214
1966 6 5	593	1.0051	-0.0172
1966 6 8	603	0.9884	0.0033
1966 6 12	613	0.9723	-0.0031
1966 6 16	606	0.9835	0.0017

DIE BESTIMMUNG DER T_o ZEITEN VON HORIZONTALPENDELN

durch

M. Schneider

Institut fur Theoretische Physik und Geophysik, Freiberg

In den letzten Jahren sind die erdgezeitenbedingten Lotschwankungen in Freiberg mit Vertikalpendeln und mit Horizontalpendeln nach Tomaschek-Ellenberger beobachtet worden [3]. Die Verwendung der verschiedenen und unabhängigen Messprinzipien hat zu quantitativ übereinstimmenden Ergebnissen geführt. Im Rahmen dieser Untersuchungen ist die Neigungsempfindlichkeit der Horizontalpendel auf dynamischem Wege, das heisst, unter Verwendung ihrer Eigenperiode, bestimmt worden.

Die dynamische Bestimmung der Neigungsempfindlichkeit von Horizontalpendeln erfolgt in bekannter Weise aus der Beziehung $E = (T_o/T)^2$, wobei $1/E$ die mechanische Vergrösserung, T_o die Periode der Eigenschwingung des Pendels um die horizontal gelegte Drehachse und T die Eigenperiode des Pendels in Arbeitsstellung bedeuten. Um während des laufenden Betriebes so weit wie möglich quantitativ verbindliche Angaben über den Skalenwert der Neigungsregistrierungen liefern zu können, ist ausser der laufenden Messung der Eigenperiode des Horizontalpendels die Kenntnis der T_o-Zeit erforderlich. Nur für kürzere Messperioden ist es angebracht, die T_o-Zeit erst nach Beendigung der Messserie zu ermitteln. Sie ist von der Massenanordnung des beweglichen Systems abhängig und für die gebräuchlichen Pendeltypen im allgemeinen kleiner als eine Sekunde.

Bei der Aufstellung der Horizontalpendel an den Erdgezeitenstationen Berggiesshübel, Freiberg und Tiefenort hat sich folgender Arbeitsablauf bewährt. Es wird von vornherein die Arbeitslage des Pendels festgelegt, das heisst das Azimut des Pendelarmes in der mittleren Gleichgewichtsstellung und die Eigenperiode des Systemes bzw. gegebenenfalls die - allerdings oft klein gewählte- Dämpfung. Mit Hilfe eines Theodoliten wird die Drehachse des Gehänges so fixiert, dass bei einer Drehung des Theodoliten um die Kippachse der obere und der untere Drehpunkt im vertikalen Strich des Fadenkreuzes bleiben. Das Auflagestück für die T_o-Bestimmung am Pendelarm, das im allgemeinen eine Schneide oder verstellbare, angespitzte Schrauben besitzt, wird daraufhin so auf dem Pendelarm befestigt, dass Schneide bzw. Schraubenspitzen in der Drehachse des Systemes liegen.

Nach einer Kontrolle der Eigenperiode, die unter Umständen eine geringfügige Korrektur mittels einer Fussschraube oder Verstellvorrichtung erfahren muss, und einer darauffolgenden nochmaligen Überprüfung der Drehachsenlage, die meist keine weiteren Veränderungen erforderlich macht, werden die Aufhängefäden entfernt und die T_o-Zeiten durch je nach Streuung mindestens fünf bis zehn Mal wiederholte Messung von 500 Schwingungen auf einer eigens zu diesem Zwecke vorhandenen Tragvorrichtung gemessen. Die benutzten Uhren sind genau zu eichen. Die Messung erfolgt im Messraum bei der Temperatur der späteren Pendelregistrierungen. Sie ist automatisch, zum Beispiel photoelektrisch, möglich, wurde aber bisher stets visuell ausgeführt. Die Schwingungsamplituden werden sehr klein gewählt. Sie betragen im Mittel weniger als etwa ein Bogengrad, so dass die Amplitudenkorrektion im Bereich des Messfehlers, das heisst bei 2.10^{-5} s liegt ; die Korrektion infolge des Abrollvorganges an der gekrümmten Schneide ist etwa von derselben Grössenordnung.

Nach der T_o-Bestimmung wird der Pendelarm wieder montiert. Durch eine zweckmässige Ausbildung der Fadenklemmstücke am Pendelarm und am Pendelbock wird eine weitestgehend gleichbleibende Lage der ca. 50 µm starken Aufhängefäden erreicht. Bei dem Horizontalpendelapparat nach Schweydar erfolgt eine Führung der Fäden durch Rollen, die sich hinter dem Klemmstück am Pendelbock befinden. Die Fadenenden werden am Pendelarm jeweils mittels einer an den Faden angelöteten, an einem Ende spitz auslaufenden Lasche eingehängt und durch eine Schraube angeklemmt. (Bei der T_o- Bestimmung ist zu beachten, dass sich die beiden Laschen am Pendelarm befinden und Lasche einschliesslich Lötzinn gleiches Gewicht und gleiche Gestalt besitzen). Die Horizontalpendel nach Tomaschek sind nach verschiedenen Versuchen mit Klemmstücken versehen worden, deren Klemmebenen senkrecht auf der von Drehachse und Pendelarm des Systems bestimmten Ebene in Richtung der Aufhängefäden liegen. Durch Einkerbungen auf den entsprechenden Seiten der Klemmplatten wird bei sorgfältiger Montage die reproduzierbare Lage der Fäden auch hinsichtlich horizontaler Verschiebungen in der Klemmebene sicher gewährleistet. An den Horizontalpendeln nach Tomaschek-Ellenberger werden die Fäden in einer durch Pendelarm und Drehachse aufgespannten Ebene geklemmt. Durch das Fehlen einer Feinverstellvorrichtung oder Fadenführung ist die Reproduzierbarkeit der Drehachse bei der Montage dieses Pendels nach der T_o-Bestimmung nicht ohne weiteres gewährleistet und bedarf einer sorgfältigen Kontrolle.

Das Einziehen der Fäden erfolgt stets nach demselben Schema. Der Pendelarm wird ausserhalb des Pendels so gehalten, dass das Lot in der Klemmebene des unteren am Pendelarm befindlichen Klemmstückes liegt. Der Faden wird mit einem Gewicht belastet, das der Belastung des Gehänges während der Messungen entspricht, in diesem Klemmstück eingeklemmt und die torsionsfreie Lage festgehalten. In diesem Zustand werden Pendelarm und Faden am Pendelbock etwa in Arbeitslage befestigt und der Faden am unteren Ende vorläufig festgeklemmt. Danach wird das obere Klemmstück vom Pendelbock entfernt und ausserhalb des Pendels so gehalten, dass beim Einbringen des anderen Fadens dieser, ohne ihn zu knicken, aus dem Klemmstück heraustritt. Nach Fixieren der torsionsfreien Lage wird der Faden, mit einem entsprechenden Gewicht belastet, im oberen auf dem Pendelarm befindlichen Klemmstück befestigt. Die Länge der Aufhängefäden wird nach Lehren festgelegt.

Die Werte der Eigenperiode und des Azimutes der mittleren Gleichgewichtslage werden auch bei sorgfältiger Montage von der ursprünglich gewählten abweichen und müssen durch Verstellen der entsprechenden Fussschrauben oder Vorrichtungen korrigiert werden. Durch kleinste Änderungen in der Länge der Aufhängefäden, am Horizontalpendel nach Tomaschek durch vertikales bzw. horizontales Verschieben der Fadenklemmstücke, wird die durch die Schneide bzw. durch die Schraubenspitzen relativ zum Pendelarm fixierte ursprüngliche Drehachse des Systemes parallel zur Verbindungslinie des oberen und des unteren Drehpunktes des Systems gestellt. Um Druckstellen an den Fäden zu vermeiden, werden diese erst dann in den Klemmstücken endgültig befestigt.

Die Abweichungen der neuen von der alten Lage der Drehachse können je nach Sorgfalt der Montage 0,1 bis 0,2 mm betragen. Sie werden mit Hilfe eines Theodoliten ausgemessen. Ihr Einfluss auf die T_o-Zeiten wird danach rechnerisch ermittelt.

Bezeichnet man mit Θ (s) das auf die Drehachse im Schwerpunktabstand s und mit Θ_o das auf die parallele Drehachse durch den Schwerpunkt bezogene Trägheitsmoment des Gehänges, mit m die Masse und mit g die Schwerebeschleunigung, dann folgt die Korrektion ΔT_o in erster Näherung durch Differentiation aus

$$T_o^2 = 4\pi^2 \cdot \frac{\Theta(s)}{mgs}$$

Beachtet man $\Theta(s) = \Theta_o + m.s^2$, so wird bei konstanten Werten m und g, was stets erfüllt ist,

$$2\,T_o \,.\, dT_o = \frac{4\pi^2}{mg} \,.\, \left[m - \frac{\Theta_o}{s^2} \right] \,.\, ds = \frac{4\pi^2}{mgs} \,.\, \frac{2m.s^2 - \Theta(s)}{s} \,.\, ds = \frac{4\pi^2\,\Theta(s)}{mgs} \left[\frac{2m.s^2}{\Theta(s)} - 1 \right] \frac{ds}{s}$$

Daraus folgt unter Eliminierung des Trägheitsmomentes durch den direkt messbaren Wert T_o sowie durch Übergang zu endlichen Differenzen

$$\Delta T_o = \frac{T_o^2}{2s} \left(\frac{8\pi^2 s}{g T_o^2} - 1 \right) . \Delta s$$

Durch diese Abschätzung ergeben sich Korrektionen der T_o-Zeiten in der Grössenordnung 10^{-4} s. Sie liegen ausserhalb des Bereiches der Beträge, um die die T_o-Zeiten bei den Wiederholungsmessungen nach Beendigung der Messreihen streuen und sollten unbedingt beachtet werden.

Falls die alte und die neue Lage der Drehachse in einem Winkel zueinander stehen, kann das bei der T_o-Bestimmung wirksam gewesene Trägheitsmoment Θ_a aus den Hauptträgheitsmomenten Θ_1 und den Orientierungswinkeln γ_1 der Drehachse gegenüber den Hauptträgheitsachsen zu $\Theta_a = \Theta_1 \cos^2\gamma_1$ berechnet werden. Ein Richtungscosinus ist aus konstruktiven Gründen praktisch stets gleich null. Die Drehachse bildet mit Sicherheit nur einen kleinen Winkel β mit der Horizontalen. Es gilt in ausreichender Näherung unter Verwendung der früheren Schreibweise $\Theta_a = \Theta(s) \,.\, \cos^2\beta$. Wegen $T_o^2 : T_{oa}^2 = \Theta(s) : \Theta_a$, worin T_{oa} die sich bei der Bewegung um die Drehachse mit dem zugehörigen Trägheitsmoment Θ_a ergebende Eigenperiode darstellt, folgt daraus $T_o = T_{oa}/\cos\beta$. Durch geeignete Montage des Gehänges kann dieser Einfluss stets vernachlässigbar klein gehalten werden.

Bei der Aufhängung der Systeme ist in allen Fällen runden Drähten von höchstens 50 µm Durchmesser gegenüber Bändern der Vorzug gegeben worden, da sich diese bei einer Auslenkung des Gehänges aus der mittleren Ruhelage verwinden und eine unangenehme Abhängigkeit der Neigungsempfindlichkeit von dem Betrag der Auslenkung hervorrufen können (vergl. auch Graf [1] und Mittelstrass [2]). Die Erfahrung, dass die Eigenperioden von solchen Horizontalpendeln, deren Aufhängefäden nur wenig gegen die effektive Drehachse geneigt sind, insbesondere der Horizontalpendel nach Tomaschek, eine geringe und meist kaum feststellbare Abhängigkeit von der Schwingungsamplitude aufweisen, ist durch die speziellen Untersuchungen von Mittelstrass zum Einfluss der Fadenaufhängung bestätigt worden [2].

Mit der Messung der Eigenperiode T der Horizontalpendel in Arbeitslage ist unvermeidlich eine Störung des Messbetriebes verbunden. Nachwirkungserscheinungen können je nach der Art der Anregung des Systems zu den Schwingungen zuweilen noch mehrere Tage lang die Qualität der Registrierungen beeinträchtigen. Überall dort, wo Horizontalpendel älterer Bauart eingesetzt sind, die auf direktem Wege oder durch einen relativen Anschluss an einmal gewonnene absolute Neigungswerte nicht geeicht werden können, ist die Schwingungszeitmessung der einzige Weg, um die Neigungsempfindlichkeit der Geräte zu gewinnen. Verwendet man die entsprechende Sorgfalt auf die Bestimmung der T_o-Zeiten und der Eigenperioden, können damit nach den gesammelten Erfahrungen durchaus quantitativ zuverlässige Messergebnisse erhalten werden.

LITERATUR

[1] GRAF, A.
Verhalten und Eichung der Münchener Horizontalpendel.
Int. Ass. Geod., Perm. Comm. Earth Tides, Third Int. Symp. on Earth Tides, Trieste, July 6-11, 1959, S. 91-98.

[2] MITTELSTRASS, G.
The suspension of simple horizontal pendulums.
Marées Terr. Bull. Inf. (1966) 43, S. 1633 - 1641.

[3] SCHNEIDER M.
Lotschwankungsmessungen mit Vertikalpendeln in Freiberg/Sa.
Obs. Roy. Belg. Comm, Nr. 236, Sér. Geophys. Nr 69 (1964), S. 262-273.

EIN VORSCHLAG FÜR EINE NULLMETHODE BEI HORIZONTALPENDELREGISTRIERUNGEN

von

G. Mittelstrass

Horizontalpendel messen die Komponente der Lotrichtungsschwankung, die senkrecht zum Pendelarm des Horizontalpendels wirkt. Ändert sich die Lotrichtung um den kleinen Betrag ρ'', so wird dadurch der Pendelarm um den Winkel ϕ'' gedreht. Zwischen Neigung ρ'' der Lotrichtung und dem Drehwinkel ϕ'' des Pendelarmes besteht die Beziehung

$$\rho'' \approx \left(\frac{T_o}{T_1}\right)^2 \cdot \phi'' \qquad (1)$$

wobei T_o und T_1 die Schwingungszeiten des vertikal hängenden Pendelarmes und des Pendels in Arbeitsstellung sind [1]. $(T_o/T_1)^2$ bezeichnet man als die Empfindlichkeit des Pendels.

Um die Gezeiten im einzelnen studieren zu können, müssen sie in möglichst grossem Massstabe registriert werden. Der Winkel ϕ'' selbst ist bedingt durch die Empfindlichkeit des Pendels, aber sein Betrag und die Veränderungen können nur aus einer genauen und unverzögerten Registrierung, die andrerseits möglichst wenig auf störende Einflüsse ansprechen soll, mit der erforderlichen Exaktheit entnommen werden. Betrachten wir zunächst die konventionelle Registriermethode.

Die Pendeldrehungen werden auf photographischem Wege gemessen. Hierzu reflektiert ein auf dem Pendelarm angebrachter Spiegel das Licht einer Einfadenlampe auf das Registriergerät, das in ungefähr 5 m Entfernung vom Pendel steht. Da sich vor dem Pendelspiegel eine Linse von 5 m Brennweite befindet, entsteht auf dem Registriergerät das Bild der Einfadenlampe (ein senkrechter Strich). Durch Ausblendung fällt dann ein punktförmiger Lichtfleck auf das Photopapier. Ist D die wirksame Entfernung zwischen Pendeldrehachse und Photopapier, so entspricht dem Winkel $\Delta\phi''$ ein linearer Ausschlag Δy auf dem Photopapier von

$$\Delta y = \frac{2D}{\rho''} \cdot \Delta\phi'' \qquad (2)$$

Δy bzw. y ist dann die eigentliche Messgrösse der Registrierung. Aus (1) und (2) ergibt sich die Eichgleichung der Pendelmessung.

Nimmt man nun die Ausmessgenauigkeit von Δy mit $\pm$ 0,1 mm an, so errechnet sich aus (2) ein kleinster messbarer Winkelausschlag $\Delta\phi''$ für die Entfernung D = 5 m von ungefähr 2". Dieser Wert ist eine Konstante der Messstation und unabhängig von der Empfindlichkeit des Pendels. Eine Steigerung der Messgenauigkeit auf photographischem Wege ist daher fast nur durch Erhöhung der Pendelempfindlichkeit möglich. Hiergegen bestehen aber Bedenken.

Wie die Untersuchungen des Verfassers in [2] u. [3] zeigen, ist bei Pendelmessungen über den gesamten Registrierbereich, wie sie z. B. bei Gängen auftreten, nicht mit einer konstanten Empfindlichkeit zu rechnen. Vielmehr treten Änderungen auf, die ihre Ursache in der Pendelaufhängung selbst haben. Die Biegungssteifigkeit und die oft nicht torsionsfreie Einspannung des Aufhängematerials bewirken bei Drehungen des Pendelarmes eine Verformung des Aufhängematerials. Diese Verformung verringert die Pendelempfindlichkeit, und zwar symmetrisch zur Nullstellung. Diese Änderungen lassen sich dabei ausdrücken als Funktion der Registrierstelle y. Die Verformung ist nur abhängig vom Drehwinkel ϕ'' des Pendelarmes. Ihre Auswirkung auf die Empfindlichkeit des Pendels wächst jedoch quadratisch mit der Empfindlichkeit selbst. Da mit der Empfindlichkeitszunahme zugleich meist die Pendelgänge wachsen, erscheint es vorteilhafter, Lotschwankungsmessungen bei möglichst geringen Pendelempfindlichkeiten vorzunehmen. Eine Genauigkeitssteigerung ist dann jedoch nur möglich, wenn man das "Auflösungsvermögen" (2) der Station vergrössern kann. Eine andere Möglichkeit, die Verformungen des Aufhängematerials auszuschalten, bietet die von Melchior vorgeschlagene Nullmethode bei Pendelregistrierungen [6]. Melchior empfiehlt, die Nullmethode photoelektrisch zu verwirklichen. Hierbei kann man jedoch nicht von der hohen Pendelempfindlichkeit abgehen. Verwendet man für die Nullmethode jedoch Differentialtransformatoren oder Messwertaufnehmer, so kann man mit geringen Pendelempfindlichkeiten auskommen. Die Messwertaufnehmer sind beim Bau von Vertikalpendeln bereits eingesetzt worden [4], [5]. Über erste Erfahrungen, die bei ihrem Einsatz bei Horizontalpendelregistrierungen gemacht wurden, soll nachstehend berichtet werden.

Differentialtransformatoren ermöglichen es, Strecken in eine der Streckenlänge proportionale Gleichspannung umzuwandeln. Den prinzipiellen Aufbau eines solchen Messwertaufnehmers zeigt Abbildung 1. Der mit Gleichstrom gespeiste Messwertaufnehmer erzeugt in einem eingebauten Oszillator die Trägerfrequenz der Primärwicklung. Der bewegliche Eisenkern M induziert in der Sekundärspule eine der Stellung des Kernes proportionale Schwingung, die in einem anschliessenden Demodulator und Filter auf eine Gleichspannung reduziert wird. Die Ausgangsgleichspannung ist für die Mittellage des Kernes, d.h. wenn er die Lage der Abb. 1 hat, Null Volt. Je nach der Richtung der Kernbewegung wird sie dann positiv oder negativ (Abbildung 2). Oszillator, Demodulator und Filter sind bei dem vom Verfasser benutzten handelsüblichen Gerät in einem Zylinder von 2,22 cm Länge und 1,4 cm Durchmesser untergebracht. In der Mitte des Zylinders ist eine 3,2 mm grosse Bohrung vorhanden, in die Kerne unterschiedlichen Durchmessers eingeführt werden.

Die Empfindlichkeit des Messwertaufnehmers ist durch die verwendeten Bauelemente bedingt. Der benutzte Differentialtransformator hatte bei einer Eingangsspannung von 24 Volt eine Ausgangsspannung von 38,65 Volt/cm Weg oder 3,865 Millivolt/μ. Dieser Wert ist nur wenig abhängig von der Eingangsspannung. Es empfiehlt sich jedoch, diese über einen Konstanter ausreichend zu stabilisieren. Die Einlaufzeit nach dem Einschalten infolge Erwärmung beträgt mehrere Stunden. Nach 24 Stunden betrug der Gang 0,25 μ/24 Std. Durch einen nachgeschalteten Verstärker lässt sich die Ausgangsspannung wesentlich vergrössern. Sie kann dann einem digitalen Voltmeter oder einem Gleichspannungsschreiber zugeführt werden. Auf diese Weise konnten Wegänderungen von 0,01 μ noch sicher nachgewiesen werden.

Ein solcher Differentialtransformator lässt sich auch bei Horizontalpendelregistrierungen verwenden, wenn man den sehr leichten Kern am Pendelarm und das Gehäuse am Pendelgestell befestigt (Abbildung 3). Es bestehen dann folgende Justierbedingungen : Der Kern muss frei beweglich sein in der Bohrung des Gehäuses und sich in dessen Mitte befinden. Die Ausgangsspannung soll für die Mittellage nahezu null sein. Beide Justierbedingungen lassen sich mechanisch ohne grossen Aufwand verwirklichen.

Drehbewegungen führen zu Lageänderungen und zu Richtungsänderungen des Kernes im Gehäuse. Da bei geringen Pendelempfindlichkeiten die Lageänderungen des Kernes nur bis zu wenigen μ maximal betragen, wirken sich Richtungsänderungen des Kernes nicht aus. Da das Auflösungsvermögen des Messwertaufnehmers noch sicher 0,01 μ beträgt, ergibt sich für den Winkel $\Delta\phi''$ ein kleinster Wert bei r = 10 cm Abstand des Kernes von der Drehachse von 0,02". Dieses Auflösevermögen ist also hundertmal grösser als das der photographischen Registriermethode. Die Pendelempfindlichkeit kann demnach entsprechend herabgesetzt werden.

Versuche mit Registrierung der Pendelausschläge wurden mit dieser Anordnung im Labor vorgenommen. Hierbei wurden künstlich Neigungen ρ'' = 0,1580" mit einem Eichgerät ähnlich der Brüsseler Eicheinrichtung [1], [3] erzeugt. Es zeigte sich, dass erst mit dem Einbau einer elektromagnetischen Dämpfung [6] Dauerregistrierungen möglich waren. Die sinusförmigen Pendelneigungen wurden mit einem Gleichspannungsschreiber gemessen. Der Pendelausschlag auf dem Registrierpapier betrug im Mittel 17,1 mm $\pm$ 0,36 mm für eine Einzelmessung bei geringfügiger Vergrösserung der elektrischen Spannung. Trotz der Dämpfung ist die Registrierkurve ziemlich breit ; die ruhigen Stunden der Nachtzeit unterscheiden sich deutlich von der Unruhe des Tages. Durch einen ruhigeren Aufstellungsort und eine etwas stärkere Dämpfung liesse sich eine Genauigkeitssteigerung erreichen. Eine Rückwirkung des Differentialtransformators auf den Pendelarm selbst konnte nicht nachgewiesen werden.

Um unmittelbare Registrierungen auf Lochstreifen zu erhalten, muss die Spannung einem digitalen Voltmeter mit einem verschlüsselten Ausgang für Lochstreifenregistrierungen zugeführt werden. Damit entfällt ein Ausmessen und Ablochen der Registrierkurven.

Der Messwertaufnehmer lässt sich auch als Nullgerät verwenden. Abweichungen der Ausgangsspannungen von Null Volt müssen dann solange zu Neigungen des Horizontalpendels führen, bis der Pendelarm seine Sollstellung wieder angenommen hat und die Ausgangsspannung Null Volt erreicht wird. Die Neigungen des Pendels werden dabei sehr einfach mit einer Quecksilberdruckmembran erzeugt. Die Verschiebungsrichtung und damit die Höhe der Quecksilbersäule über dem Eingang der Membran wird von dem Messwertaufnehmer gesteuert. Dies im einzelnen zu erreichen, ist eine Aufgabe der Regelungstechnik.

Da der Verfasser leider zur Zeit nicht die Möglichkeit hat, diesen Gedanken weiter durchzuführen, sollte durch diesen Vorschlag eine Anregung zum Bau eines Pendels mit dieser Nullmethode gegeben werden.

Zusammenfassung.

Um bei Horizontalpendelregistrierungen die nachteiligen Verformungen des Aufhängematerials bei Pendeldrehungen zu vermeiden, ist zur Messung eine Nullmethode vorteilhaft. Als hierfür geeignete Messelemente werden Differentialtransformatoren empfohlen. Über erste Versuche ihrer Anwendung bei Horizontalpendelregistrierungen wird berichtet.

Summary

In order to avoid systematical errors of the suspension of horizontal pendulums with their rotation, it is advantageous to measure the inclinations with a zero method. It is possible to use for this method differential transformers. This paper gives first results of their application to horizontal pendulums.

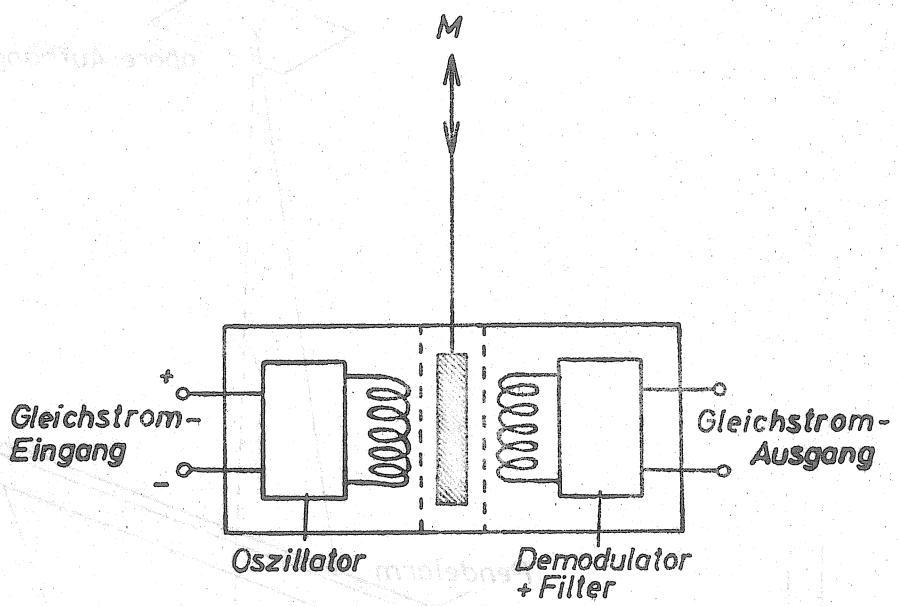

M
+
Gleichstrom-
Eingang
-
Gleichstrom-
Ausgang
Oszillator
Demodulator
+ Filter

Abb 1

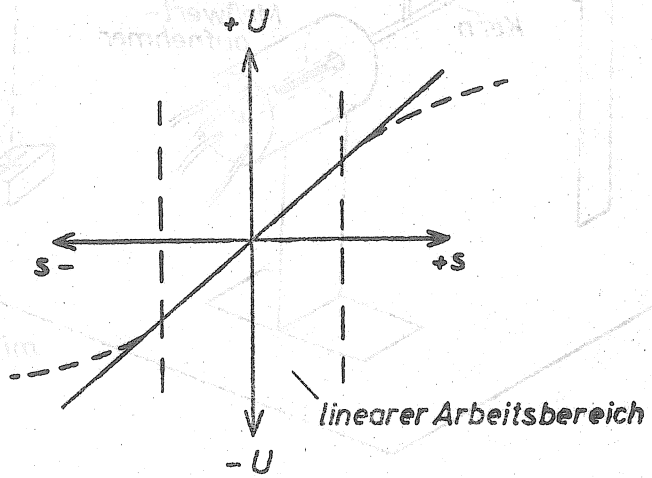

+U
s -
+s
-U
linearer Arbeitsbereich

Abb 2

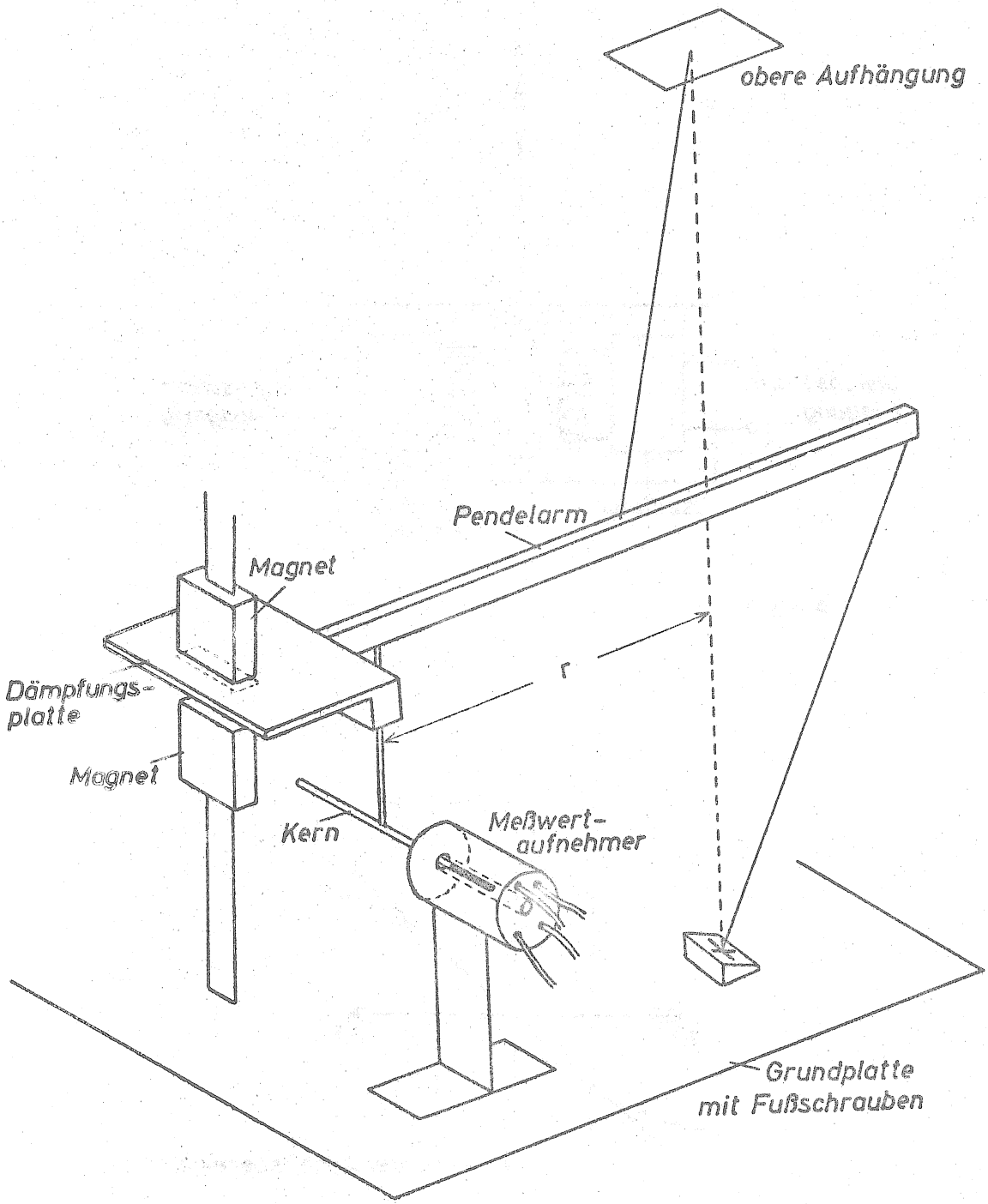

obere Aufhängung
Pendelarm
Magnet
r
Dämpfungs-
platte
Magnet
Kern
Meßwert-
aufnehmer
Grundplatte
mit Fußschrauben

Abb 3

LITERATURVERZEICHNIS

[1] VERBAANDERT J.
L'étalonnage des pendules horizontaux.
Rolletino di Geofisica teorica ed applicata Vol. IV, 16 décembre 1962.

[2] MITTELSTRASS, G.
The suspension of horizontal pendulums
Bulletin d'Information 43 (1966) S. 1633.

[3] MITTELSTRASS, G.
Konstruktionsprinzipien von Horizontaleinfachpendeln.
Ein Beitrag zum Bau und zur Eichung von Horizontalpendeln.
Wiss. Arbeiten der Lehrstühle für Geodäsie, Photogrammetrie und Kartographie an der Technischen Hochschule Hannover Nr. 26 (1966)

[4] SCHNEIDER, M.
Messung der Lotschwankungen mit Vertikalpendeln in Freiberg/Sa.
Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 79 1965.

[5] GRAF, A.
Das Vertikalpendel anstelle des Horizontalpendels für die Registrierung der Gezeiten und von kleinsten Neigungen.
Bulletin d'Information 34 (1963) S. 1069.

[6] VERBAANDERT J.
L'amortissement électromagnétique des pendules horizontaux.
Communications de l'Observatoire Royal de Belgique N° 236, 1964.

ÜBER DEN EINFLUSS VON LUFTDRUCKÄNDERUNGEN UND MEERESGEZEITEN AUF DIE ERGEBNISSE DER HARMONISCHEN ANALYSE VON HORIZONTALPENDELAUFZEICHNUNGEN

von

Dietrich SIMON

Institut für Theoretische Physik und Geophysik Freiberg

ZUSAMMENFASSUNG

Ein neues Verfahren zur Elimination der harmonischen Luftdruckstörungen gestattet die genaue Bestimmung der Verminderungsfaktoren für die Tiden O_1 und Q_1. Da im Atlantischen Ozean Fluten mit den Perioden von O_1 und Q_1 sehr klein sind, hat man hiermit einen gegenüber den Ergebnissen der Tide M_2 um 35 ‰ genaueren Wert für die von den Meeresgezeiten unverfälschte Gezeitendeformation an der Station Tiefenort. Durch die Elimination des Meeresgezeitenanteils, der von Station zu Station verschieden ist, wird erstmalig die Voraussetzung für den Vergleich der Erdgezeitenresultate verschiedener Stationen erfüllt. Mit Hilfe dieses Verfahrens lassen sich ferner die Phasenbeziehungen zwischen den unregelmässigen Luftdruckstörungen der Horizontalpendelaufzeichnungen und dem örtlichen Luftdruck überprüfen.

1. EINLEITUNG

Ein Vergleich der Differenzenquotienten von Percev'schen Gangkurven des örtlichen Luftdruckes und der Horizontalpendelaufzeichnungen [2] erbrachte wegen der damit verbundenen Ausschaltung der Nebeneffekte eine gute Übereinstimmung von Nullpunkts- und Luftdruckgängen (s. Anlage 1). Zu ihrer Deutung kann die von Tomaschek [1] anderenorts durchgeführte Korrelation mit den barometrischen Belastungsänderungen auf Isoplethen nicht verwendet werden, weil sie in Mitteleuropa doppeldeutig ist. Die Neigungsstörungen lassen sich wegen der vorwiegend westöstlich verlaufenden Wetterbewegungen sowohl durch örtliche Luftdruckschwankungen als auch durch Belastungsänderungen auf Isoplethenachsen, die durch den Beobachtungsort hindurch gehen, erklären [2]. Abb. 2 zeigt die Phasenverschiebungen der Barogramme einer Reihe auf ein und demselben Breitenkreis gelegener Wetterwarten, deren geographische Lage in Abb. 1 zu sehen ist, gegenüber dem örtlichen Luftdruck. Aus der Darstellung geht hervor, wie schnell sich die in Frage stehenden Luftdruckvariationen über Europa hinwegbewegen. Es genügt offenbar nicht, die Luftdrucksituation, wie es von Tomaschek [1] getan wurde, alle 12 Stunden aufzutragen. Für genauere Untersuchungen ist eine bessere zeitliche Auflösung der Vorgänge erforderlich. Zu diesem Zwecke wurden die Autokorrelationsfunktionen für den Zusammenhang von Neigungs- und Luftdruckgangdifferenzen berechnet.

2. KORRELATION DER NICHTHARMONISCHEN KOMPONENTEN DER BAROGRAMME UND HORIZONTALPENDELAUFZEICHNUNGEN.

Mit Hilfe der Autokorrelationsfunktion lässt sich der statistische Zusammenhang zweier Punktfolgen einschliesslich der zugehörigen Regressionskoeffizienten genauer bestimmen. Als Nebenergebnis fallen die Phasenunterschiede der miteinander verglichenen Zeitfunktionen an. Die optimale Genauigkeit der Lagebestimmung des Korrelationsmaximums ist durch die Ausgangswerte beschränkt. Da die Messwerte nur zu jeder vollen Stunde vorlagen, betrug sie $\pm$ 1 Stunde.

Jedesmal wurden zwei Folgen von 5-stündigen Differenzen (je 24 Werte pro Tag) in Schritten von einer Stunde zunächst in der einen Richtung 14 mal gegeneinander verschoben und für jede Stellung der Korrelationskoeffizient berechnet. Anschliessend wurde das gleiche in der entgegengesetzten Richtung wiederholt. Die Ergebnisse sind im oberen Teil der Abb. 3 dargestellt. Zur Uberprüfung der Aussagekraft dieses Verfahrens wurden die Gangdifferenzen der Pendel zusätzlich untereinander verglichen (Abb. 3 unten). Den hiermit erhaltenen Resultaten wurden die in Klammern gesetzten Ergebnisse aus dem Uberkreuzvergleich der Luftdruckkorrelationen gegenübergestellt. Es ergaben sich Lageabweichungen von $\pm$ 1 Stunde. Die maximalen Korrelationskoeffizienten liegen zum Teil beträchtlich höher als die früher gegebenen, bei denen die Phasenverschiebungen graphisch ermittelt wurden [3]. Hinzu kommt die Vergrösserung der Messpunktzahl und damit der Freiheitsgrade auf das 5-fache, was zusammen mit der Verbesserung der Korrelationskoeffizienten eine erhebliche Erhöhung der Signifikanz des statistischen Zusammenhanges bedeutet.

Mit Hilfe der Regressionskoeffizienten findet man die Proportionalitätsfaktoren für die Umrechnung von Druck- in Neigungsänderungen (Tabelle 1), falls die Eichwerte hinreichend genau bekannt sind. Diese Forderung ist für die Schweydar-Pendel (S) im wesentlichen erfüllt. Dagegen liessen die schon mehrfach beschriebenen Schwierigkeiten der Eichung eine exakte Empfindlichkeitsbestimmung der Lettau-Pendel (L) nicht zu. Um überhaupt eine Auswertung der Horizontaldoppelpendelaufzeichnungen zu ermöglichen, werden schon seit längerer Zeit am Institut für theoretische Physik und Geophysik der Bergakademie Freiberg diese Skalenwerte durch den Vergleich der M_2-Tiden von Schweydar- und Lettau-Pendeln abgeschätzt. Sie wurden in der Tabelle mit einem Stern * bezeichnet. Die Proportionalzahlen der Periode Januar bis März 1961 deuten auf eine Azimutabhängigkeit der Luftdruckstörungen hin. Die Hauptstörungerichtung liegt bei N 53° W - S 53° E (Mittel aus K^1 und K^{-1}). Dabei ist S 53° E der Ausschlag bei Druckerhöhung.

Aus der Lage der Korrelationsmaxima ist zu erkennen, dass mit Ausnahme des Pendels L^1 alle übrigen Klinometer dem örtlichen Luftdruck um mehrere Stunden vorauseilen. Der Vorlauf der Pendel von 2 - 5 Stunden ist grösser als die dem Verfahren eigene Ungenauigkeit von $\pm$ 1 Stunde. Das führt notwendig zu der Frage, ob nicht durch die Elimination der harmonischen Komponenten, die bei Pendelaufzeichnungen und Luftdruckkurven unterschiedliche Amplituden und Phasen besitzen, insbesondere durch den Verbleib harmonischer Reststörungen in den Pendelaufzeichnungen zeitliche Verschiebungen des Ganges um mehrere Stunden bewirkt werden können. Nakagawa [4] hat für eine grosse Zahl von Tiden die durch die Gangelimination verursachten Fehler zusammengestellt. Die Addition aller mit den theoretischen Gezeiten multiplizierten Fehler ergibt umgekehrt die mögliche Verfälschung des Ganges. Sie betragt beim Percev'schen Verfahren etwa 1/300 des Wertes der M_2-Tide, also etwa 10^{-2} ms. Da die unregelmässigen Luftdruckänderungen mit 2-3 ms/5h fast in der Grössenordnung der M_2-Tide liegen, ist der

Fehler zu vernachlässigen. Bei der Bestimmung der Phasendifferenzen muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Abweichung der Pendelgänge vom Luftdruck infolge anderer Gerätestörungen die Phasenwerte verfälschen können. Von einer genauen Phasenbestimmung kann erst dann die Rede sein, wenn der Korrelationskoeffizient annähernd gleich 1 ist, d.h. die miteinander verglichenen Kurven einander gleichen.

Vor einer Deutung dieser Resultate soll versucht werden, sie unabhängig davon auf einem anderen Wege zu uberprüfen. Zu diesem Zwecke wenden wir uns den Ergebnissen der harmonischen Analyse der Klinometerregistrierungen zu.

3. VERGLEICH DER HARMONISCHEN STÖRUNGEN DER ERDGEZEITENREGISTRIERUNGEN MIT DEN ENTSPRECHENDEN PERIODISCHEN LUFTDRUCKVARIATIONEN

Da der nichtharmonische Anteil der Luftdruckschwankungen sein Gegenstück in den Pendelaufzeichnungen besitzt, ist anzunehmen, dass auch die regelmässigen Variationen des Luftdruckes mit ganz- und halbtägigen Perioden entsprechende Nullpunktsstörungen hervorrufen. Wäre es möglich, mit Hilfe des oben beschriebenen Verfahrens der Korrelation der Percev'schen Gänge die Phasenverschiebung zwischen Luftdruck und Neigung bis auf Bruchteile von Stunden genau zu bestimmen, so könnte man durch eine harmonische Analyse des Luftdruckes und mit Hilfe der Regressionskoeffizienten eine direkte Luftdruckkorrektion der Analysenresultate durchführen. Wie oben gezeigt wurde, reicht die Genauigkeit der Phasenbestimmung nicht aus. Um trotzdem und unabhängig von diesem Verfahren einen Nachweis für das Vorhandensein eines Luftdruckanteiles in den harmonischen Komponenten der Lotschwankungen zu geben, wurde die folgende Abschätzung versucht.

Es wurde von der Voraussetzung ausgegangen, dass die durch die harmonische Analyse der Klinometeraufzeichnungen gewonnenen Resultate vorwiegend durch zwei Elemente verfälscht werden : durch den Einfluss der Meeresgezeiten und durch die Einwirkungen des Luftdruckes. Während bei der Tide M_2 der fälschende Einfluss der Meeresgezeiten gegenüber dem des Luftdruckes sicher überwiegen wird, ist das bei den ganztägigen Tiden nicht der Fall. Nach Schweydar [5] sind im Atlantischen Ozean Fluten von eintägiger Periode sehr gering.

Für die beabsichtigten Untersuchungen kommen daher die Tiden K_1, O_1 und Q_1 in Frage, wobei aber K_1" sehr ungeeignet ist, da ihre Periode des Sterntages mit der Periode der thermischen Sonnenwelle nahezu zusammenfällt ; hierzu kommt noch die Variabilität der letzteren, die eine Jahresperiode hat, wodurch gewissermassen eine K_1-Welle vorgetäuscht wird" [5,S.48].

Der Grundgedanke des Verfahrens ist, den zeitlichen Gang der Abweichungen der Gezeitenresultate von einem Mittelwert über mehrere Zentraltage hin zu verfolgen und mit dem zeitlichen Verlauf der entsprechenden harmonischen Luftdruckvariationen von Zentraltag zu Zentraltag zu vergleichen. Da der relative Anteil einer harmonischen Luftdruckstörung an der Amplitude der Gesamtschwankung ausser von der Phasendifferenz auch davon abhängt, wie gross die Gezeitenkraft im betreffenden Azimut und für die betreffende Tide ist, wurden die Luftdruckschwankungen auf die gleichen theoretischen Amplituden der zugehörigen Gezeitenneigungen bezogen.

Mit der NS-Komponente, für die die ganztägigen lunisolaren Lotschwankungen durchschnittlich kleiner und somit der relative Anteil der Luftdruckstörungen grösser ist, soll begonnen werden. Um die Resultate der harmonischen Analyse zunächst vom Gezeitenanteil zu befreien, wird eine möglichst gute Näherung für die von den Luftdruckstörungen unbeeinflusste Gezeitendeformation an der betreffenden Station benötigt. Probeweise wurde der zeitliche Mittelwert des Verminderungsfaktors und der Phase der Tide M_2 des Schweydar-Pendels S^2 (NS-Komponente) von $\gamma = 0{,}63$; $\phi = -8^\circ$ gewählt. Die vektoriellen Differenzen zwischen den auf die theoretischen Gezeiten bezogenen Analysenresultaten der einzelnen Tiden und dem Mittelwert der M_2-Tide, zum Beispiel

$$\Delta O_{01} = 0_1 - \vec{\gamma}$$

stellen demnach gewisse komplexe Störvektoren mit bestimmten Beträgen und Argumenten dar. In der obigen Formel ist der Störvektor auf die theoretische Gezeit von 0_1 bezogen, denn $\vec{\gamma}$ bedeutet hier den Gezeitenanteil von 0_1 bezogen auf die theoretische Gezeit von 0_1. Abbildung 4 zeigt die Störvektoren der Tide 0_1 (gestrichelt) für 10 harmonische Analysen der Aufzeichnungen des Pendels S^2. Hinzugefügt wurden die Ergebnisse von leider nur 4 vorliegenden Analysen des Horizontaldoppelpendels nach Lettau L^2. Wie aus der Abbildung zu erkennen ist, haben die Störvektoren beider Pendel annähernd gleiche Beträge, jedoch hinken die Störvektoren des Lettau-Pendels denen des Schweydar-Pendels, wenn man die Frequenz der 0_1-Tide von 13,94°/h berücksichtigt um 2 - 3 stunden nach. Zum Vergleich der Störvektoren mit den Luftdrucktiden beschränken wir uns zunächst auf deren Beträge, da die Phasenverschiebungen zwischen Luftdruck und Neigung nicht genau genug bekannt sind. In Abbildung 5 sind zuerst die tatsächlichen Luftdruckamplituden der 10 harmonischen Analysen in mbar aufgetragen. Bei der Gegenüberstellung mit den Beträgen des entsprechenden Systems von Störvektoren ist zu beachten, dass zum Beispiel ein für alle Tiden gleich grosser Luftdruckanteil je nach seinem Verhältnis zur theoretischen Gezeit der betreffenden Tide die Aufzeichnungen der Gezeiten der festen Erde stärker oder schwächer verfälschen kann. Das System von Luftdruckamplituden (Abb. 5) muss daher auf die theoretischen Gezeiten des betreffenden Azimuts bezogen werden, um es mit den zugehörigen Störvektoren vergleichbar zu machen (Abb. 6). Die folgende Abbildung 7 zeigt die Amplituden der Störvektoren von S^2 für die gleichen Zentraltage. Ein Vergleich derselben mit Abbildung 6 lässt erkennen, dass die richtige Grössenordnung der Luftdruckamplituden getroffen wurde. Bei den ganztägigen Tiden, insbesondere aber bei der eintägigen Mondhaupttide 0_1 ähneln die zeitlichen Schwankungen der Analysenergebnisse einander beträchtlich. Sie haben etwa die gleiche Grössenordnung, wenn man als Umrechungsfaktor 1 mbar = 1 ms setzt. Abbildung 8 bringt die für die Tide 0_1 erhaltenen Resultate der besseren Übersicht halber als direkten Vergleich von Pendel- und Luftdruckwerten. Hinzugefügt wurden die Ergebnisse von 4 vorliegenden Analysen aus Registrierungen des Horizontaldoppelpendels L^2. Ihr zeitlicher Gang ist im wesentlichen der gleiche wie beim Pendel S^2.

Die gute Übereinstimmung mit den Luftdruckvariationen im Falle der NS-Komponente führt zu der Vermutung, dass sich auch für die EW-Komponente der Luftdruckeinfluss eliminieren lässt, wenn es gelingt, einen guten Näherungswert für den unverfälschten Gezeitenanteil in diesem Azimut zu finden. Wie Abbildung 9 oben zeigt, führt offenbar das bei der NS-Komponente angewendete Verfahren, wobei das Jahresmittel der zugehörigen M_2-Tide als Bezugswert benutzt wurde, nicht zum Ziel. Die mit diesem Gezeitenwert von $\gamma = 0{,}84$; $\phi = -9^\circ$ erhaltenen Störvektoren haben gegenüber den nach der Voraussetzung geforderten Luftdruckanteilen zu grosse Beträge und zeigen über dies keinen Zusammenhang mit deren zeitlichem Gang. Durch Probieren wurde ein geeigneter Bezugswert von $\gamma = 0{,}63$; $\phi = -2^\circ$ gefunden. Wir erhalten eine verhältnismässig gute Übereinstimmung sowohl in der Grössenordnung (wieder mit 1 mbar = 1 ms) als auch im zeitlichen Verlauf der Störungen (Abb. 9 unten).

Die Brauchbarkeit der benutzten Näherungswerte für den reinen Gezeitenanteil zeigt sich überzeugend in den folgenden Anlagen 2 und 3. Hier wurden die Störvektoren aller 4 Pendel für die Tiden Q_1 und O_1 zu einer Zeit berechnet, in der harmonischen Luftdruckschwankungen zum Teil ungewöhnlich grosse Beträge besassen. Für diese Registrierperiode wurden harmonische Analysen für eine Folge von Zentraltagen mit je 48 Stunden Abstand angefertigt. Aus den Anlagen lässt sich folgendes entnehmen :

1. Die Amplituden der Störvektoren sind für je 2 im gleichen Azimut messende Pendel einander sehr ähnlich ; bei den Lettau-Pendeln sind sie ein wenig grösser.

2. Zwischen den Störvektoren der Schweydar-Pendel tritt eine Phasendifferenz von 90° auf. Das beruht wahrscheinlich darauf, dass die theoretische Gezeit der EW-Komponente (S^1) derjenigen der NS-Komponente (S^2) um 90° vorauseilt, die Luftdruckstörung aber bei beiden Pendeln gleichzeitig einsetzt.

3. Der Störvektor von L^2 hinkt demjenigen von S^2 um 2 Stunden hinterher ; bei L^1 haben wir gegenüber S^1 eine Phasenverspätung von 5-6 Stunden. Das stimmt mit den Ergebnissen der Korrelationsrechnung recht gut überein, wenn man beachtet, dass im Messabschnitt Januar bis März 1961 wegen der Unregelmässigkeiten des Ganges von L^1 die Bestimmung des Maximums ungenauer ist als bei den anderen Pendeln.

4. Die zeitlichen Richtungsänderungen der Störvektoren von Zentraltag zu Zentraltag haben gleichen Richtungssinn und annähernd gleiche Beträge.

5. Die Amplituden der Störvektoren weichen durchschnittlich nur wenig von den Beträgen der entsprechenden harmonischen Luftdruckvariationen ab.

Diese Beobachtungen sowie die früher gefundenen Ergebnisse gestatten es, die im betrachteten Zeitraum berechneten Störvektoren als Luftdruckstörungen zu identifizieren. Ihre Beträge erreichen im Falle der Tide O_1 unter den extremen Witterungsbedingungen der Registrierperiode Januar bis März 1961 - 104/63 = 165 % - der Gezeitenschwankung der NS-Komponente (S^2) und - 20/63 = 32 % - der Gezeitenschwankung bei der EW-Komponente (S^1). Im Falle der Tide Q_1 sind sie 4mal grösser. Da die veränderlichen Störvektoren den Luftdruckschwankungen entsprechen, muss der unveränderliche Rest, der Bezugswert also, den Gezeitenanteil als Summe der Einwirkungen von Meeresgezeiten und direkten Wirkungen der lunisolaren Attraktionskräfte darstellen. Mit der Erfahrung [5], dass im Atlantischen Ozean Meeresgezeiten mit den ganztägigen Perioden der Tiden O_1 und Q_1 sehr gering und wesentlich kleiner als die Fluten mit halbmondtägiger Periode sind, haben wir mit den beiden Werten von $\gamma = 0{,}63$; $\phi = -8°$ (NS-Komponente) und $\gamma = 0{,}63$; $\phi = -2°$ (EW-Komponente) eine gute Näherung für die von den Meeresgezeiten unverfälschte Gezeitendeformation an der Station Tiefenort gefunden. Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es möglich, die wahren Gezeitenwerte verschiedener Erdgezeitenstationen miteinander zu vergleichen, da die Störungen durch Meeresgezeiten, die von Ort zu Ort verschieden sind, herausfallen. Das gilt freilich nur für Gebiete, deren Randmeere keine nennenswertenganztägigen Gezeiten mit den Frequenzen von O_1 und Q_1 aufweisen. Für die Station Tiefenort lässt sich der Meeresgezeitenanteil etwa zu $\Delta\gamma = 0{,}22$; $\phi = -17°$ (EW-Komponente) und $\Delta\gamma = 0$ (NS-Komponente) angeben, beträgt also in der EW-Komponente 35 % des reinen Gezeitenanteiles. Diese Werte stellen freilich nur eine erste grobe Abschätzung dar und könnten an Hand eines umfangreicheren Materials verbessert werden. Die Verwendung der Ergebnisse der Tide O_1 zur Elastizitätsbestimmung der Erde geht auf einen Vorschlag Schweydars [5] zurück, der bisher noch nicht verwirklicht werden konnte, weil die mit Hilfe dieser Tide gewonnenen Verminderungsfaktoren eine zu starke Streuung besassen.

Das oben beschriebene Korrekturverfahren lässt sich besonders dann mit Erfolg anwenden, wenn die eigentlichen Luftdruckstörungen nicht von zusätzlichen Störungen durch die übertägige Temperatur (thermische Verbiegungen der obersten Gesteinsschichten, Gerätestörungen) überlagert werden. Hier zeigt sich der Vorteil untertägiger Messstationen. Günstig ist ferner eine Unterbringung beider Klinometer in einem einzigen Gehäuse (Schweydar'scher Pendelapparat), weil dann die Temperaturänderungen nach Durchdringung der Aussenhülle gleichzeitig auf beide Pendel einwirken. Aus diesen Gründen wird das Verfahren zur Korrektur der von Schweydar [6] aus 5-jährigen Registrierungen in einem 189 m tiefen Bergwerk in Freiberg (Sa) erhaltenen Erdgezeitenresultate für geeignet gehalten. Auch hier lässt sich die Korrektionsaufgabe folgendermassen formulieren : " Es sind diejenigen Näherungswerte für die Gezeitenkomponenten der Horizontalpendelregistrierungen gesucht, für die die Beträge der Störvektoren der EW-Komponente, umgerechnet auf die NS-Komponente (d.h. multipliziert mit den Faktoren, die sich aus der Azimutabhängigkeit der theoretischen Gezeiten ergeben), genau so gross sind wie die Beträge der Störvektoren in der NS-Komponente, während die Phasen der Störvektoren beider Azimute eine Differenz von 90° besitzen". Diese Aufgabe lässt sich mit Hilfe elektronischer Rechenmaschinen bei schrittweiser Änderung von Amplituden und Phasen der Näherungswerte leicht lösen. Stehen die Pendel nicht genau in NS- und EW-Richtung, so ist eine entsprechende Korrektur anzubringen. Besteht bezüglich der Luftdruckstörungen eine starke Richtungsanisotropie, so ist das, falls die Temperatureinflüsse nicht überwiegen, aus den Gängen zu erkennen und muss berücksichtigt werden. Die Resultate einer Bearbeitung des Schweydar'schen Materials sollen in einer anderen Arbeit mitgeteilt werden.

Wir wenden uns nun den Phasenbeziehungen zwischen den luftdruckbedingten Gangstörungen der Horizontalpendel und den Schwankungen des örtlichen Luftdruckdruckes zu, um zu versuchen, mit Hilfe der harmonischen Störungen die Resultate der Korrelation der unregelmässigen Schwankungen zu überprüfen. Die Bestimmung der Störvektoren hatte ergeben, dass in der Tat bei den Lettau-Pendeln die Luftdruckstörungen 2 bzw. 5 - 6 Stunden verspätet auftreten, und damit die Ergebnisse der Korrelationsrechnung bestätigt. Es kommt nun darauf an, die genaue Phasenlage der harmonischen Luftdruckvariation in diesem System zeitlich gegeneinander verschobener Störvektoren zu bestimmen, um zu sehen, ob ein Teil derselben der Luftdruckschwankung vorauseilt und ein anderer ihm folgt. Der einfachste Weg hierzu ist, die Luftdruckkurve so zu behandeln, als wäre sie eine Erdgezeitenregistrierung im jeweiligen Azimut. Es werden also harmonische Analysen des Luftdruckes für die gleichen Zentraltage mit den gleichen Reduktionen auf Greenwich usw. und die theoretischen Phasen des betreffenden Azimuts angefertigt. Dann ist die Abweichung der Phase der positiven Luftdruckschwankung vom Argument des Störvektors die gesuchte Phasendifferenz im Falle der EW-Richtung, während bei der NS-Richtung von der Phase des Luftdruckes noch 180° abgezogen werden müssen, da ja nach den Ergebnissen der Korrelationsrechnung ein positiver Pendelausschlag (nach Norden) bei Druckabfall erfolgt.

Anlage 4 bringt einen Phasenvergleich der Störvektoren aller Pendel für die Tiden O_1 und Q_1 mit den Luftdrucktiden. Es zeigt sich in der Tat ein Nachlauf des örtlichen Luftdruckes gegenüber den Störvektoren der Schweydarpendel, der aber bei beiden Tiden nicht gleich gross (1 - 3 Stunden) und insgesamt kleiner als der mittels der Korrelationsrechnung gefundene Wert von 4 - 5 Stunden ist. Bei der Beurteilung dieser Resultate muss berücksichtigt werden, dass die Phasen der Luftdrucktiden wegen der Interpolation eines Teiles der Ausgangswerte unsicher sind. Denn die Luftdruckwerte der 20 km südlich von Tiefenort gelegenen Wetterwarte Kaltennordheim lagen nur zu den meteorologischen Terminen, d.h. von 3^{00} - 21^{00} Uhr Greenwicher Zeit alle 90 Minuten und 21^{00} - 3^{00} Uhr alle 180 Minuten temperaturkorrigiert und mit einer Genauigkeit von 0,1 mbar in den Stationstagebüchern vor. Da für eine harmonische Analyse aber 24 Werte pro Tag benötigt werden, mussten die fehlenden Werte interpoliert werden. Die Interpolationsfehler liegen wahrscheinlich in der Grössenordnung von 0,1 - 0,3 mbar und werden in

erster Linie die kleinen periodischen Luftdruckvariationen verfälschen. Die Verfälschung ist jedoch begrenzt, sonst würden die Amplituden der Störungen nicht so gut mit den Luftdruckamplituden übereinstimmen. Aus diesen Gründen müssen die durch den Phasenvergleich zwischen luftdruckbedingten Pendelstörungen und dem örtlichen Luftdruck erzielten Ergebnisse noch an Hand eines genaueren meteorologischen Beobachtungsmaterials überprüft werden. Es wurden jedoch 2 unabhängige Auswerteverfahren angegeben, mit denen man möglicherweise die Frage entscheiden kann, ob durch meteorologische Luftdruckschwankungen grossräumige Schollenkippungen verursacht werden oder nicht. Die durch einen direkten Phasenvergleich der Pendelgänge bzw. der Störvektoren untereinander gewonnenen Aussagen über das verspätete Auftreten der Luftdruckstörungen bei den Lettaupendeln haben dagegen ein grösseres Gewicht, weil sie aus lückenlosen Pendelregistrierungen abgeleitet wurden.

4. DEUTUNG

Da das letztere Ergebnis auf zwei voneinander unabhängigen Wegen gefunden wurde und daher nicht mehr bezweifelt werden kann, ergibt sich die Frage : wie ist es möglich, dass die Luftdruckstörungen von den zwei Horizontaldoppelpendeln mit 2 bzw. 5 Stunden Verspätung aufgezeichnet werden ? Falls die Bodenneigungen von den Lettaupendeln auf Grund ihrer komplizierteren Bauart wirklich mit so grossen Phasenverspätungen registriert würden, müsste sich das auch bei den gezeitenbedingten Krustenbewegungen zeigen. Tabelle 2 bringt die mittleren Phasenverzögerungen der M_2-Tide gegenüber den theoretischen Phasen für alle Klinometer vor und nach einer Vertauschung der Lettaupendel im Frühjahr 1964. Tatsächlich bemerken wir beim Pendel L^1 eine Phasenverspätung von 13 - 15° gegenüber den anderen Pendeln, die auch nach der Vertauschung wieder auftrat, und somit instrumentenbedingt ist. Diese halbstündige Verzögerung reicht aber keineswegs dazu aus, Phasenverschiebungen von 5 - 6 Stunden zu erklären. Das Lettaupendel L^2 registrierte zudem auf beiden Fundamenten völlig normal. Da bei den Gezeitenneigungen im Gegensatz zu den Luftdruckstörungen keine so grossen Phasenunterschiede auftreten, zum anderen eine derart stark verzögerte Aufzeichnung von Bodenneigungen physikalisch nicht vorstellbar ist, wird vermutet, dass es sich hierbei um adiabatische Temperaturstörungen oder zumindest um die Überlagerung der Einflüsse solcher Störungen und luftdruckbedingter Bodenbewegungen handelt. Eine Begründung dieser Vermutung soll an Hand der Abbildung 10 gegeben werden. Zu genauerem Studium der Einwirkungen der Untertagetemperatur wurden im Juli 1965 die Pendel von ihren Schutzkästen befreit und durch periodisches Ein- und Abschalten des Hauptgrubenlüfters, der sich in einer Entfernung von 3 km befindet, in der Messkammer Druckschwankungen mit Amplituden von 2 - 4 mbar erzeugt. Gleichzeitige Temperaturregistrierungen mit einem Widerstandsthermometer zeigten, dass durch die rasche Kompression bzw. Entspannung der Grubenluft adiabatische Temperaturschwankungen in der Grössenordnung von 0,1 - 0,2° C auftraten, die bei beiden Pendeln zu charakteristischen Störungen führten (Abb. 10). Es wird angenommen, dass diese Störungen mit den in [3] beschriebenen sogenannten Sonntagsstörungen identisch sind, die bei Ventilatorabschaltungen an den in Schutzkästen aus Hartfaserplatten registrierenden Pendeln auftraten. Durch die Verkleidung der Pendel wurden die Störungsamplituden zwar verringert, ihre Kurvenform aber sonst nicht verändert. An dieser Abbildung lassen sich zwei wichtige Beobachtungen machen. Erstens folgen die Pendelstörungen direkt der Temperatur und nicht deren zeitlicher Ableitung, wie man leicht annehmen könnte, wenn man den Effekt durch die unterschiedliche Erwärmung der Fussschrauben beim Einströmen wärmerer Luft in die Messkammer erklärt. Zweitens sind die Temperaturstörungen beim Pendel L^1 wesentlich grösser als bei L^2, obwohl sich die Empfindlichkeiten beider Pendel zu dieser Zeit nur wenig von einander unterschieden. Der Einfluss der Temperaturschwankungen auf die Schweydar-Pendel konnte bei dieser Gelegenheit nicht mehr überprüft werden, weil diese inzwischen an das Geodätische Institut Potsdam zurückgegeben worden waren. Aus früheren Aufzeichnungen ist jedoch bekannt, dass bei den sonntäglichen Ventilatorabschaltungen, die bei den

Lettaupendeln zu den oben erwähnten Störungen führten, die Schweydar-Pendel keine sichtbaren Unregelmässigkeiten zeigten. Wahrscheinlich sind die Doppelpendel nach Lettau auf Grund ihres komplizierteren Gehänges viel temperaturempfindlicher als die Schweydar-Pendel. Auf welche Temperaturschwankungen die Lettau-Pendel noch reagieren, lässt sich an folgendem Versuch zeigen. Die Empfindlichkeit von L^2 wurde vergrössert (Abb. 11a) und die Amplitude der Temperaturstörung des ungeschützten Pendels bei Ventilatorabschaltung gemessen (Abb. 11b) Dann wurde das Pendel durch eine Temperaturschutzhaube aus Kunststoff, die ein Fenster aus dickem Glas besass und am Boden durch Gips und Paraffin druckdicht abgeschlossen war, abgesichert und erneut Temperaturänderungen mit Hilfe des Ventilators erzeugt.
Ein im Innern des Kastens angebrachter Messfühler zeigte lediglich während der Druckänderungen Temperaturschwankungen in der Grössenordnung von 10^{-3} °C an, die durch die Kompression des Kastens wie bei einer Druckdose erzeugt wurden. Auch bei diesen geringfügigen Temperaturschwankungen schlug das Pendel aus (Abb. 11c). Die Amplitude der Pendelstörung nimmt nicht in gleichem Masse ab wie die sie erzeugende Temperaturschwankung (1 : 100), sondern ist grösser. Wahrscheinlich haben wir es im Falle einer allseitig gleichzeitigen Erwärmung mit einem anderen Effekt zu tun. Auf Grund der vorliegenden Beobachtungen wird zur Erklärung des verspäteten Auftretens der Luftdruckstörungen folgendes vermutet : durch die Luftdruckschwankungen unter Tage, die, wie [3] zeigte, den übertägigen ausser im Falle von Ventilatorschaltungen völlig gleich sind, wird in der Umgebung der Pendel die Luftdichte und somit die Temperatur geändert. Die die Pendel früher umschliessenden Temperaturschutzkästen sind zwar nicht druckdicht und lassen die Luft eintreten, verhindern aber einen raschen Temperaturaustausch mit der umgebenden Luft und schirmen einen Teil der kurzperiodischen Temperaturstörungen ab. Die Temperaturänderungen folgen somit dem örtlichen Luftdruck, wirken sich aber auf die Pendel verschieden stark aus. Sind die Resultate der Korrelationsrechnung richtig, dann lassen sich die mehrstündigen Phasenverspätungen der Luftdruckstörungen bei den Lettaupendeln durch die Überlagerung der (dem örtlichen Luftdruck vorauseilenden) Krustenbewegungen mit den (dem örtlichen Luftdruck gleichphasigen) adiabatischen Temperaturstörungen erklären, die sich gemäss Abb. 10 verschieden stark auf die Lettaupendel auswirken. Die folgende Skizze (Abb. 12) zeigt eine solche Überlagerung der harmonischen Komponenten. Im Falle der unregelmässigen Störungen führt diese Überlagerung zu Abweichungen vom ursprünglichen Verlauf beider Störkurven Möglicherweise sind hiermit die starken Verzerrungen des Nullpunktsganges von L^1 im Januar bis März 1961 zu erklären. Für diese Deutung sprechen ausserdem die aus Abb. 10 und 11 abzulesende momentane Reaktion der Pendel auf Temperaturänderungen und die jeweils übereinstimmende Ausschlagsrichtung aller im gleichen Azimut messenden Pendel verschiedener Bauart bei Druckerhöhung. Mit dem Beweis eines mehrstündigen Vorauseilens der luftdruckbedingten Neigungsstörungen der Pendel gegenüber dem örtlichen Luftdruck hätte man im Falle der Station Tiefenort gleichzeitig den Beweis dafür, dass es sich hierbei um Schollenkippungen handelt. Denn bei Druckerhöhung schlagen die Tiefenorter Pendel nach Osten bzw. Süden aus. Da aber, wie Abb. 2 erläutert, in Mitteleuropa die Wetterbewegung vorwiegend von W nach E erfolgt, neigen sich somit die Pendel nicht nach der stärker belasteten Seite hin, wie man es im Falle einer rein elastischen Deformation der Erdkruste verlangen müsste, sondern in der entgegengesetzten Richtung. Dieser Beweis einer Schollenbewegung sagt noch nichts über die Grösse der Schollen aus. Es ist wahrscheinlich, dass sich der Einfluss der Luftdruckschwankungen genau so über die tektonischen Störungslinien hinweg nach dem Inneren des Kontinents zu fortsetzt, wie der Einfluss der atlantischen Meeresgezeiten. Ob dabei die an einzelnen Stellen der Erdoberfläche beobachteten Neigungsrichtungen für eine mehrere 100 km lange Scholle oder nur für kleinere Schollen, die wie die Steinchen eines Mosaiks bei der Bewegung des Untergrundes Kippbewegungen um lokale tektonische Achsen vollführen, repräsentativ sind, kann nur durch Messungen an möglichst vielen Stellen geklärt werden. Für die Erforschung der rezenten Krustenbewegungen sind jedoch auch die Grösse und die Grenzen des Gebietes interessant,

das sich unabhängig von der jeweiligen Neigungsrichtung gleichzeitig mit der Station unter dem Einfluss der Luftdruckänderungen in Westeuropa neigt. Die westlichen Grenzen dieses Gebietes könnten am einfachsten dadurch bestimmt werden, dass man über einen längeren Zeitraum hin von Störung zu Störung die Luftdruckaufzeichnungen der verschiedenen, zum Beispiel im Stationsnetz der Abbildung 1 eingetragenen Wetterwarten, mit den Pendelbewegungen korreliert. Man wird dadurch im Laufe der Zeit eine Reihe von Stationen erhalten, die häufig, und solche, die niemals mit den Neigungsstörungen phasengleich sind. Die Grenze zwischen beiden Gruppen kann als Rand einer solchen Grossscholle im Untergrund angesehen werden. Die östlichen Grenzen lassen sich dagegen an Hand der Registrierungen weiter östlich gelegener Stationen auffinden.

Herrn Prof. Dr. W. Buchheim danke ich für die Ermöglichung der Arbeit und wertvolle Diskussionsbeiträge.

LITERATUR.

1. TOMASCHEK , R.
Schwankungen tektonischer Schollen infolge barometrischer Belastungsänderungen.
Freiberger Forschungshefte C 60 (1959)

2. SIMON, D.
Analyse von Neigungsgängen bei Horizontaldoppelpendeln nach Lettau auf meteorologische Effekte hin.
Freiberger Forschungshefte C 194 (1966)

3. SIMON, D.
Zum Nachweis luftdruckbedingter Krustenbewegungen mit Hilfe von Horizontalpendeln.
Centre Intern. des Marées Terrestres Obs. R. Belg. Bull d'Inform. Nr 40 (1965)

4. NAKAGAWA I.
General Considerations Concerning the Elimination of the Drift Curve in the Earth Tidal Observations.
Quatrième Symp. Intern. sur les marées terrestres. Bruxelles, 5-10 juin 1961, Comm. Obs. R. Belg., Nr. 188, Sér. Géoph. Nr. 58, S. 201 - 209.

5. SCHWEYDAR, W.
Untersuchungen über die Gezeiten der festen Erde und die hypothetische Magmaschicht.
Veröffl. d. Königl. Preuss. Geod. Inst., Neue Folge, Nr. 54, Potsdam, Verl. B.G. Teubner Leipzig 1912.

6. SCHWEYDAR, W.
Lotschwankungen und Deformation der Erde durch Flutkräfte, gemessen mit zwei Horizontalpendeln im Bergwerk in 189 m Tiefe bei Freiberg i. Sa.
Zentralbureau der internat. Erdmess., Neue Folge, Nr. 38 P. Stankiewicz' Buchdruckerei Berlin 1921.

Tabelle 1

Zeit		Korrelationskoeff.	Regressionskoeff.		Empfindlichkeit		Pendelausschläge	
		α	$r_1 \left[\frac{mm}{mbar}\right]$	$r_2 \left[\frac{mbar}{mm}\right]$	$e \left[\frac{10^{-3}\,''}{mm}\right]$		$K^1 \left[\frac{10^{-3}\,''}{mbar}\right]$	$K^{-1} \left[\frac{mbar}{10^{-3}\,''}\right]$
	S^1D	0,774	0,1017	0,0588	S^1	8,12	0,826	0,724
26. 1. 1961 -	L^1D	0,689	0,1405	0,0337	L^{1*}	4,57	0,642	0,738
5. 3. 1961	S^2D	0,804	0,0816	0,0793	S^2	7,82	0,638	1,013
	L^2D	0,776	0,6166	0,0098	L^{2*}	0,874	0,539	1,117

S^1 Schweydarpendel (EW) L^1 Lettaupendel (EW) D = Luftdruck

S^2 " (NS) L^2 " (NS)

Tabelle 2

Mittlere Phasen der M_2 - Tide aus Analysen nach Doodson

A. Vor der Vertauschung der Lettaupendel	EW - Komponente	NS - Komponente
Mittel aus ca. 45 Analysen 1960/63	$S_1 = -9,2°$; $L_1 = -20,4°$	$S_2 = -7,7°$; $L_2 = -7,4°$
B. Nach der Vertauschung der Lettaupendel	**EW - Komponente**	**NS - Komponente**
Zentraltage : 24. VIII. 1964	$S_1 = -8,8°$; $L_2 = -7,6°$	$S_2 = -8,3°$; $L_1 = -21,8°$
3. IX. 1964	$S_1 = -7,1°$; $L_2 = -6,8°$	$S_2 = -7,2°$; $L_1 = -22,6°$
13. IX. 1964	$S_1 = -6,9°$; $L_2 = -6,7°$	$S_2 = -6,7°$; $L_1 = -24,2°$
23. IX. 1964	$S_1 = -8,0°$; $L_2 = -6,9°$	$S_2 = -8,0°$; $L_1 = -25,2°$
Mittel	$S_1 = -7,7°$; $L_2 = -7,0°$	$S_2 = -7,8°$; $L_1 = -23,5°$

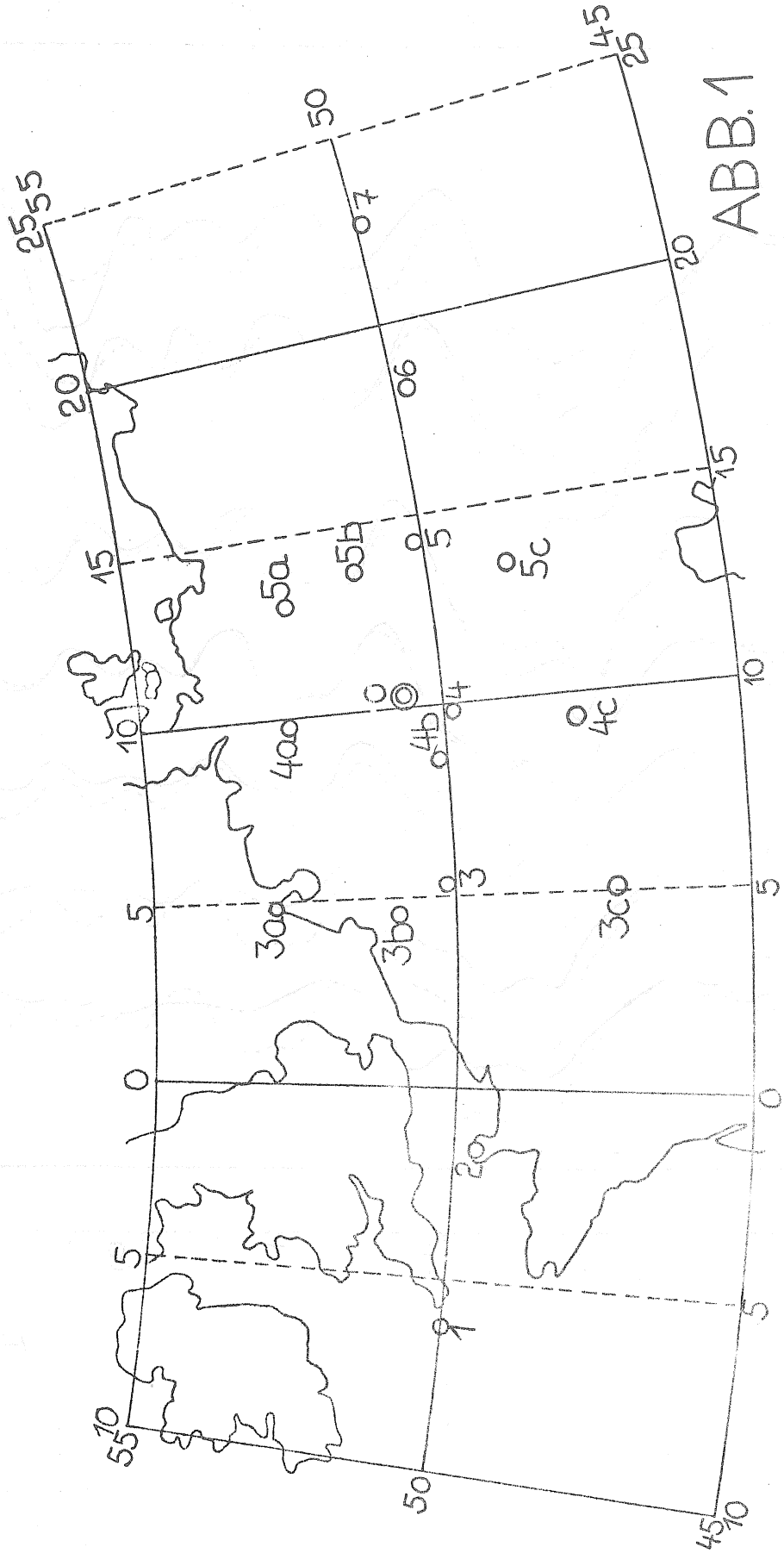


ABB. 1
55
50
45
25
20
15
10
5
0
07
06
05
05a
05b
05c
04
04a
04b
04c
03
03a
03b
03c
02
01

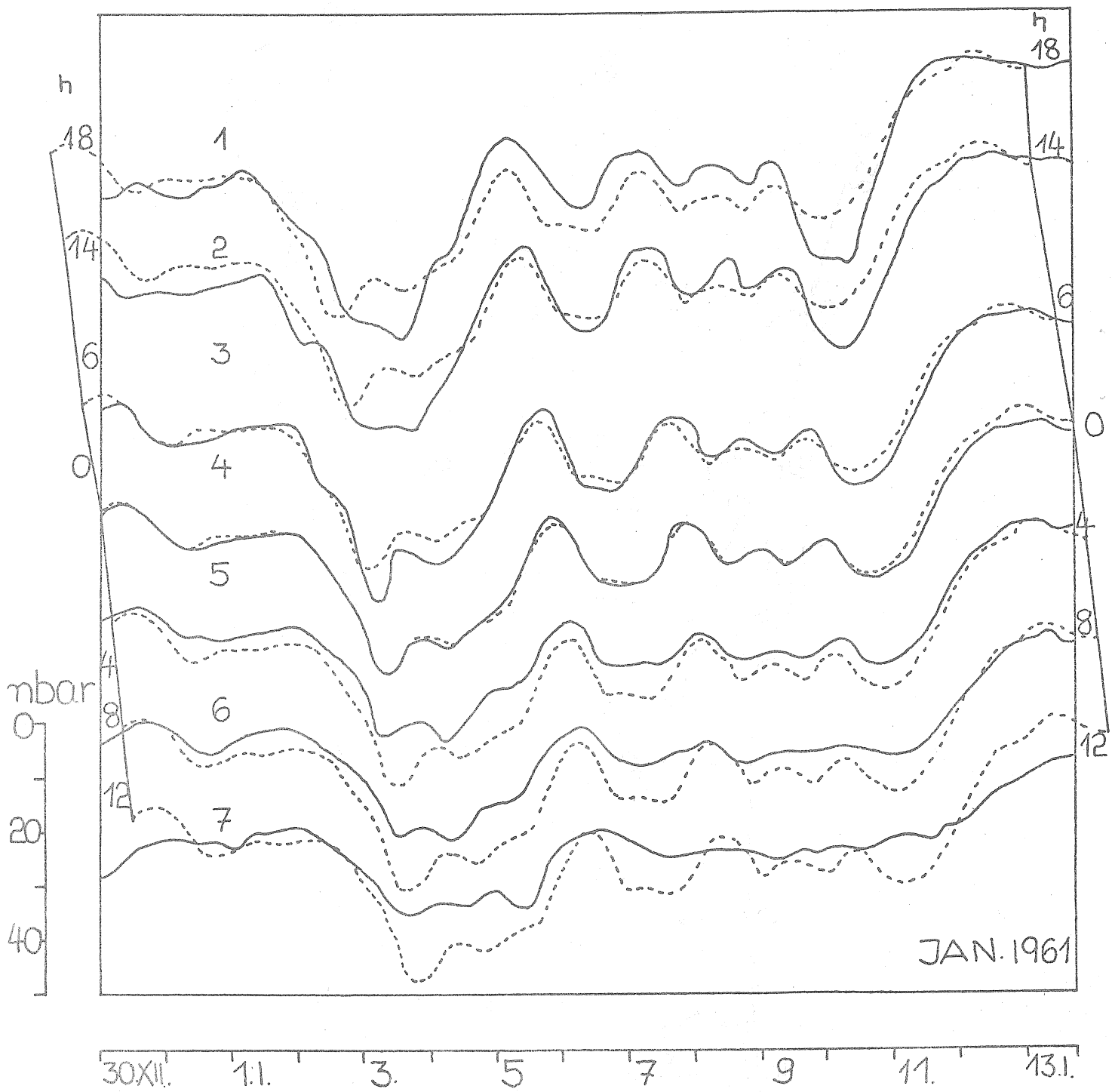
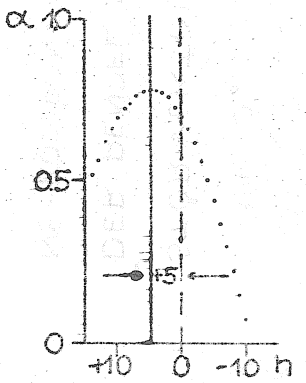
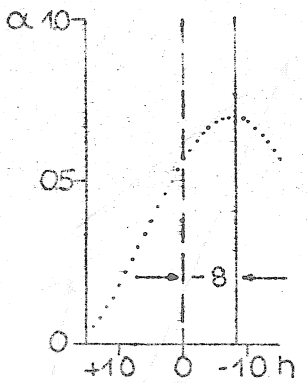


ABB. 2



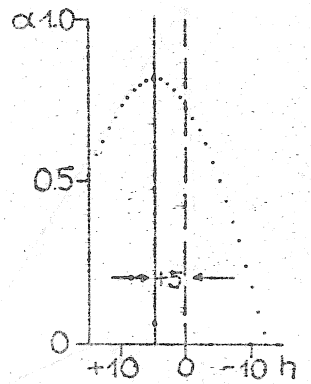
$S_1D = +5\,h$

$\alpha_0 = 0.7735$



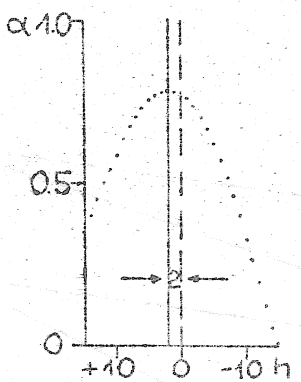
$L_1D = -8h$

$\alpha_0 = 0.6885$



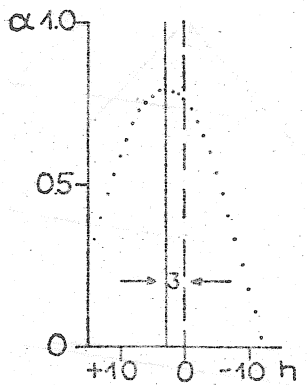
$S_2D = +5\,h$

$\alpha_0 = 0.8044$



$L_2D = +2\,h$

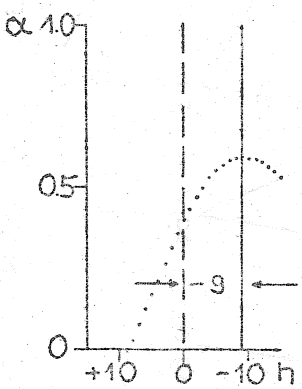
$\alpha_0 = 0.7757$



$S_1L_2 = +3\,h$

$(S_1L_2) = +3\,h$

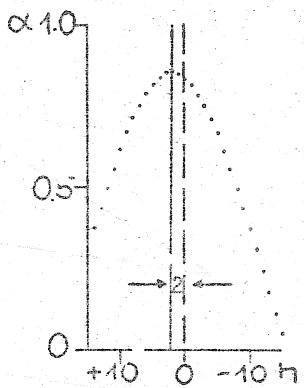
$\alpha_0 = 0.7987$



$L_1L_2 = -9\,h$

$(L_1L_2) = -10h$

$\alpha_0 = 0.5957$



$S_2L_2 = +2\,h$

$(S_2L_2) = +3\,h$

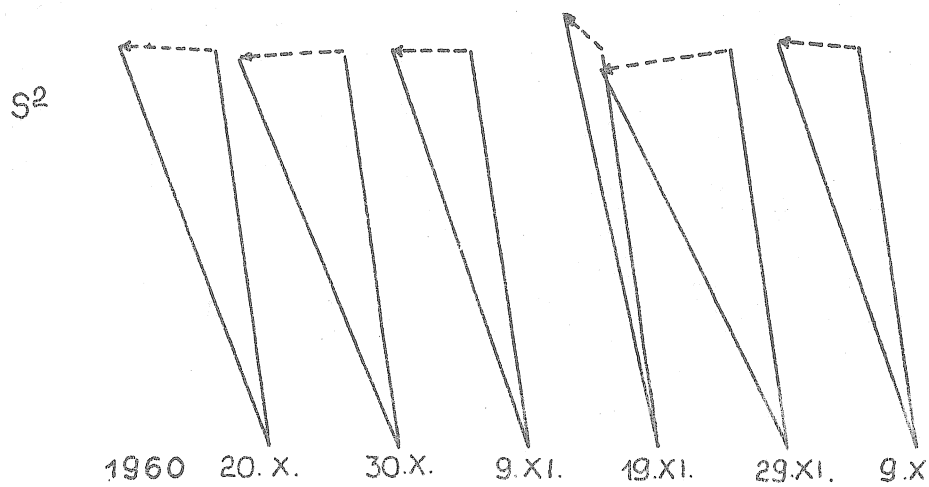
$\alpha_0 = 0.8531$

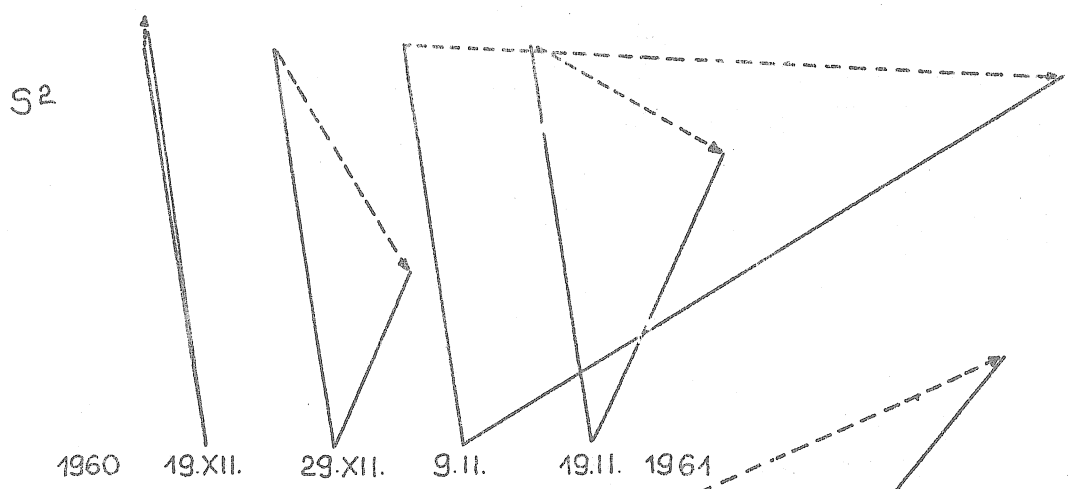
AUTOKORRELATIONS-FUNKTIONEN

26.1.1961 - 5.III.1961

ZAHL DER FREIHEITSGRADE : 755

ABB. 3





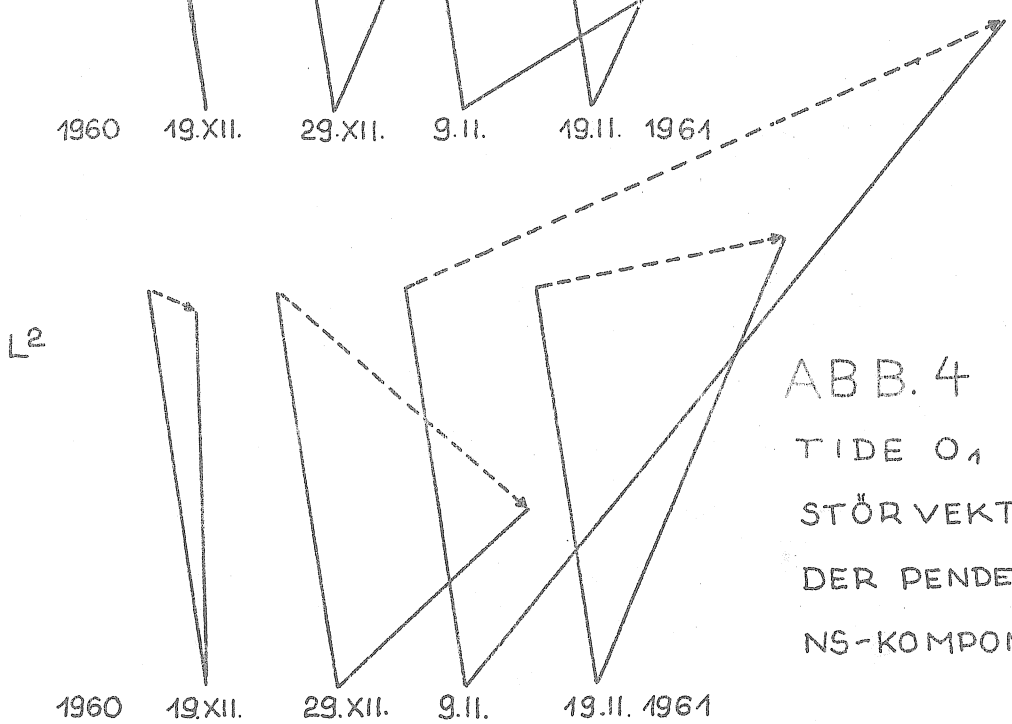


ABB. 4

TIDE O_1

STÖRVEKTOREN

DER PENDEL $S^2 + L^2$

NS-KOMPONENTE

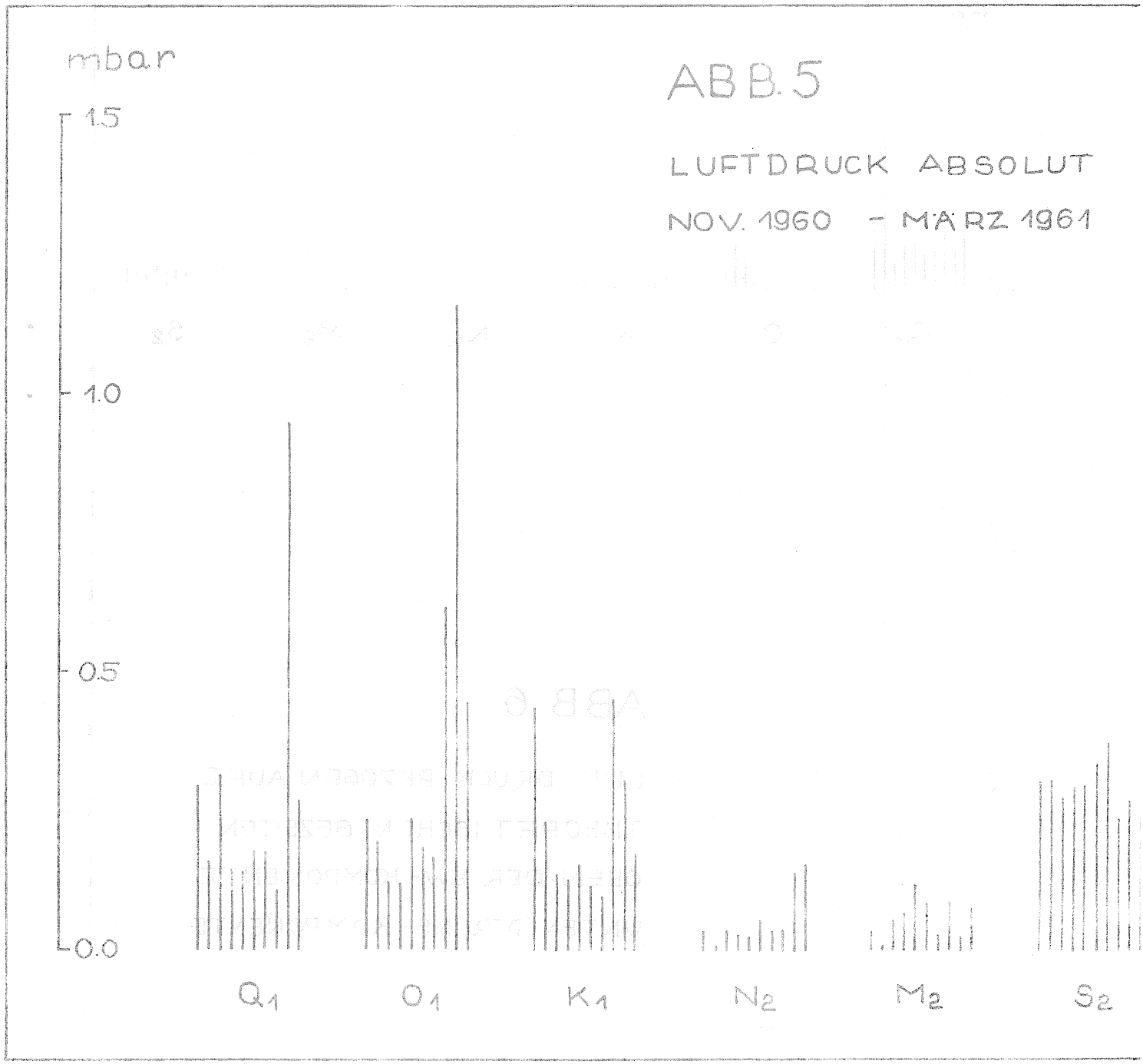


ABB. 5

LUFTDRUCK ABSOLUT

NOV. 1960 - MÄRZ 1961

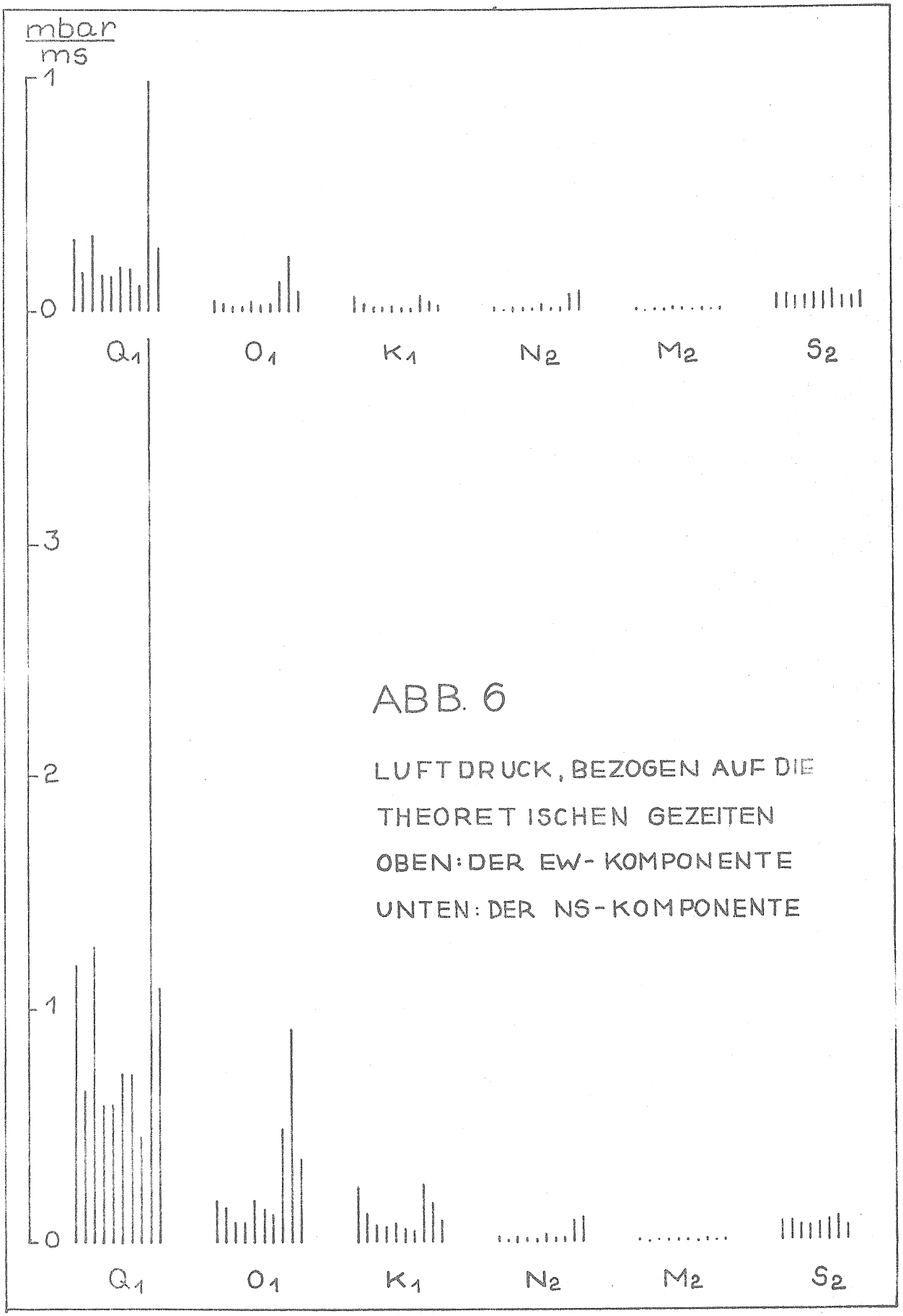


ABB. 6

LUFTDRUCK, BEZOGEN AUF DIE THEORETISCHEN GEZEITEN
OBEN: DER EW-KOMPONENTE
UNTEN: DER NS-KOMPONENTE

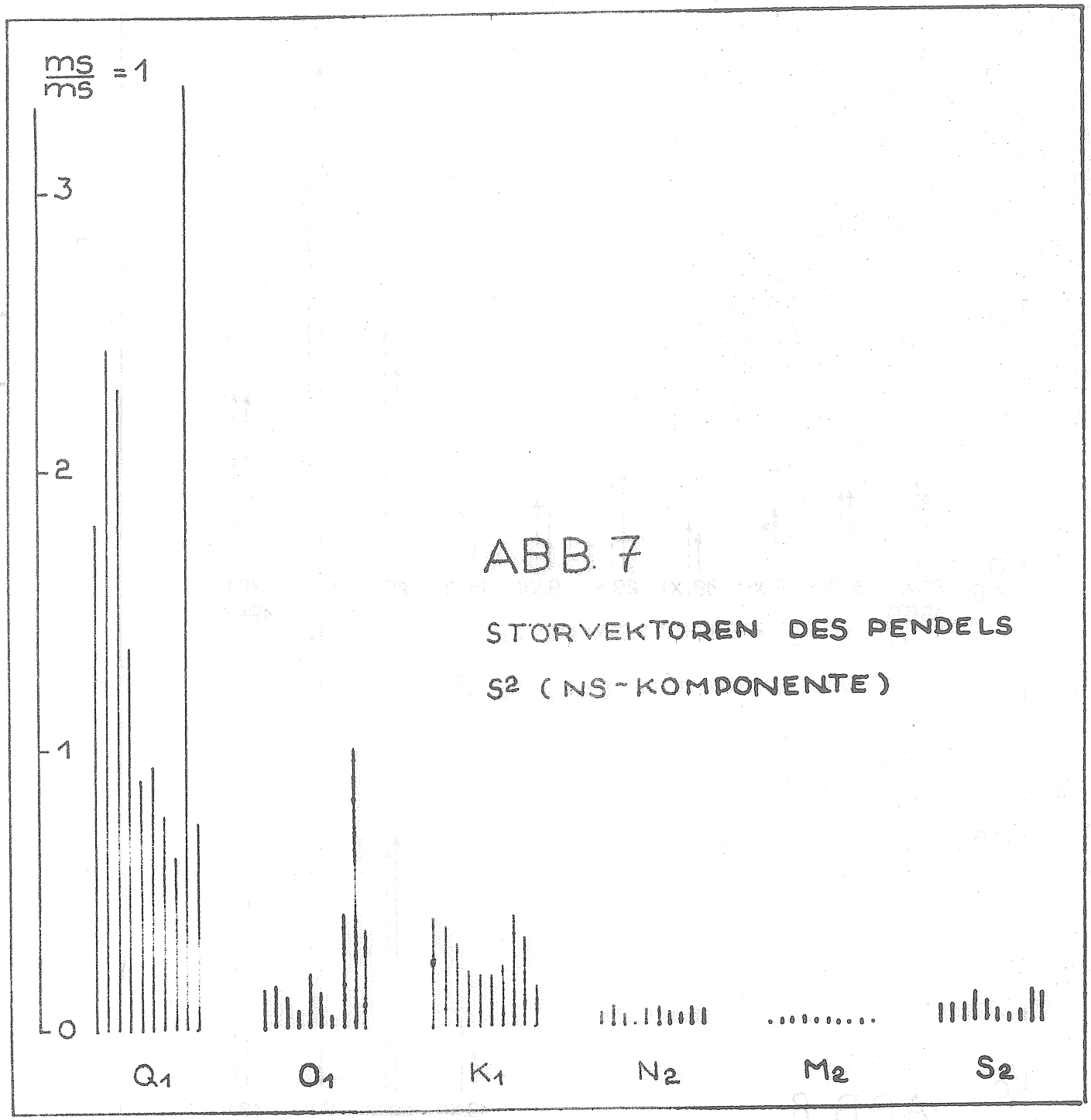


ABB. 7

STÖRVEKTOREN DES PENDELS

S^2 (NS-KOMPONENTE)

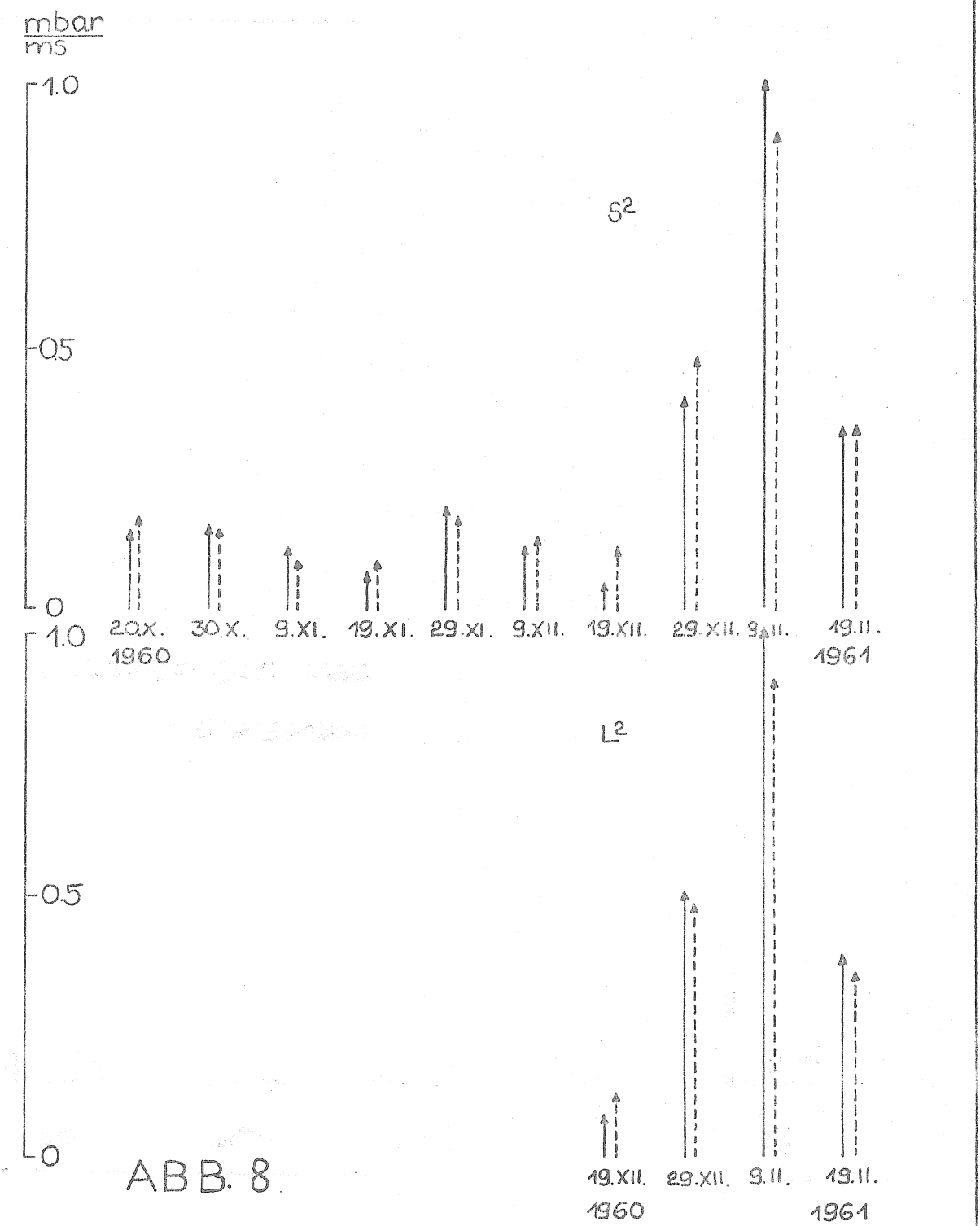


ABB. 8

TIDE O_1 NS-KOMPONENTE

VERGLEICH DER STÖRBETRÄGE DER PENDEL S^2 UND L^2 (AUSGEZOGENE LINIEN) MIT DEN ENTSPRECHENDEN LUFTDRUCKWERTEN (GESTRICHELT)

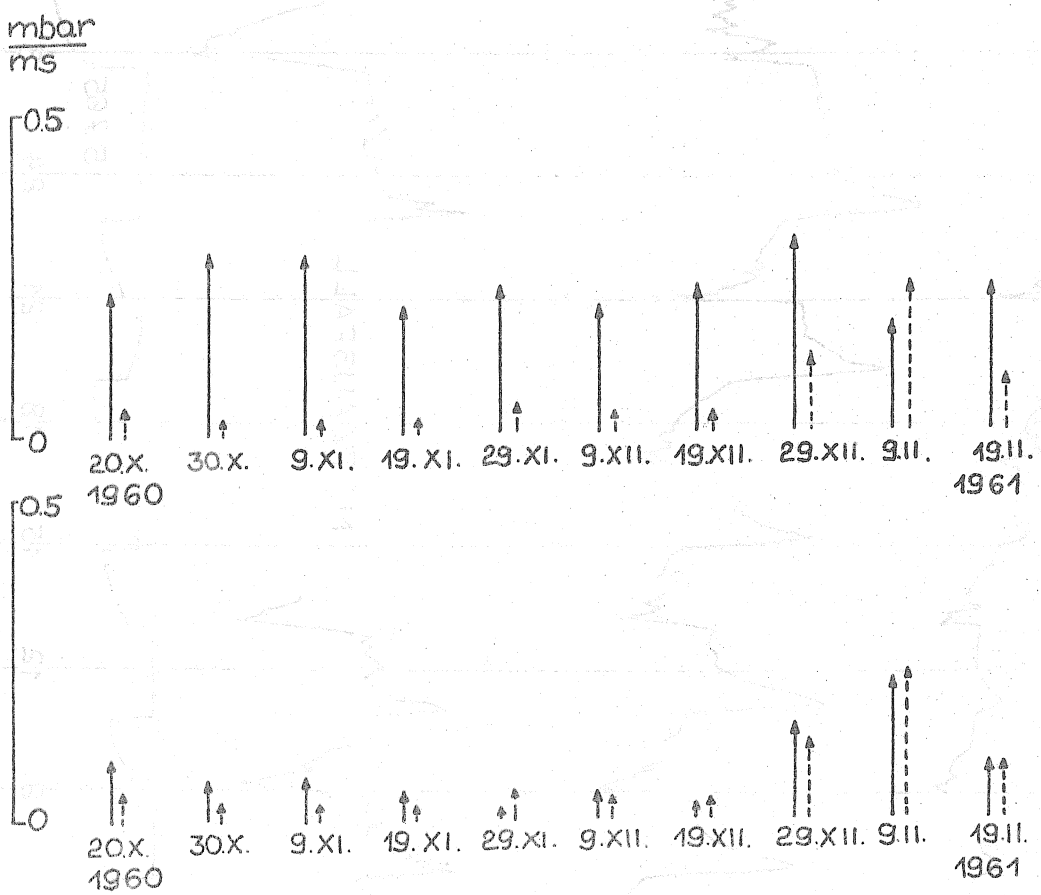


ABB. 9

TIDE O_1

VERGLEICH DER STÖRBETRÄGE DES PENDELS S^1

OBEN: BERECHNET MIT $\gamma = 0.84$; $\varphi = -9°$

MITTE: BERECHNET MIT $\gamma = 0.63$; $\varphi = -2°$

MIT DEN ENTSPRECHENDEN LUFTDRUCKWERTEN (GESTR.)

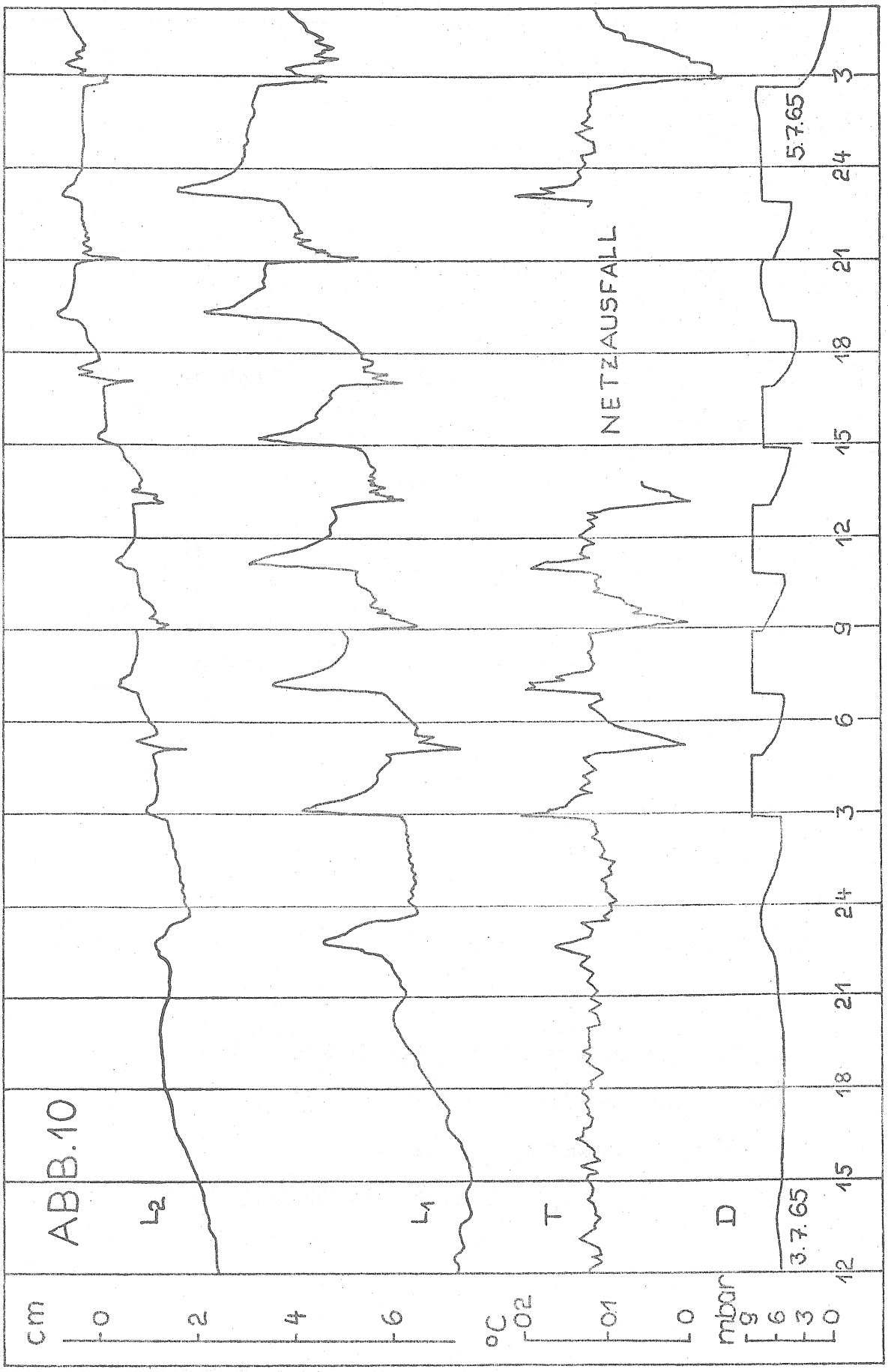


ABB.10
L2
L1
T
D
cm
0
2
4
6
°C
0,2
0,1
0
mbar
9
6
3
0
3.7.65
5.7.65
NETZAUSFALL
12
15
18
21
24
3
6
9
12
15
18
21
24
3

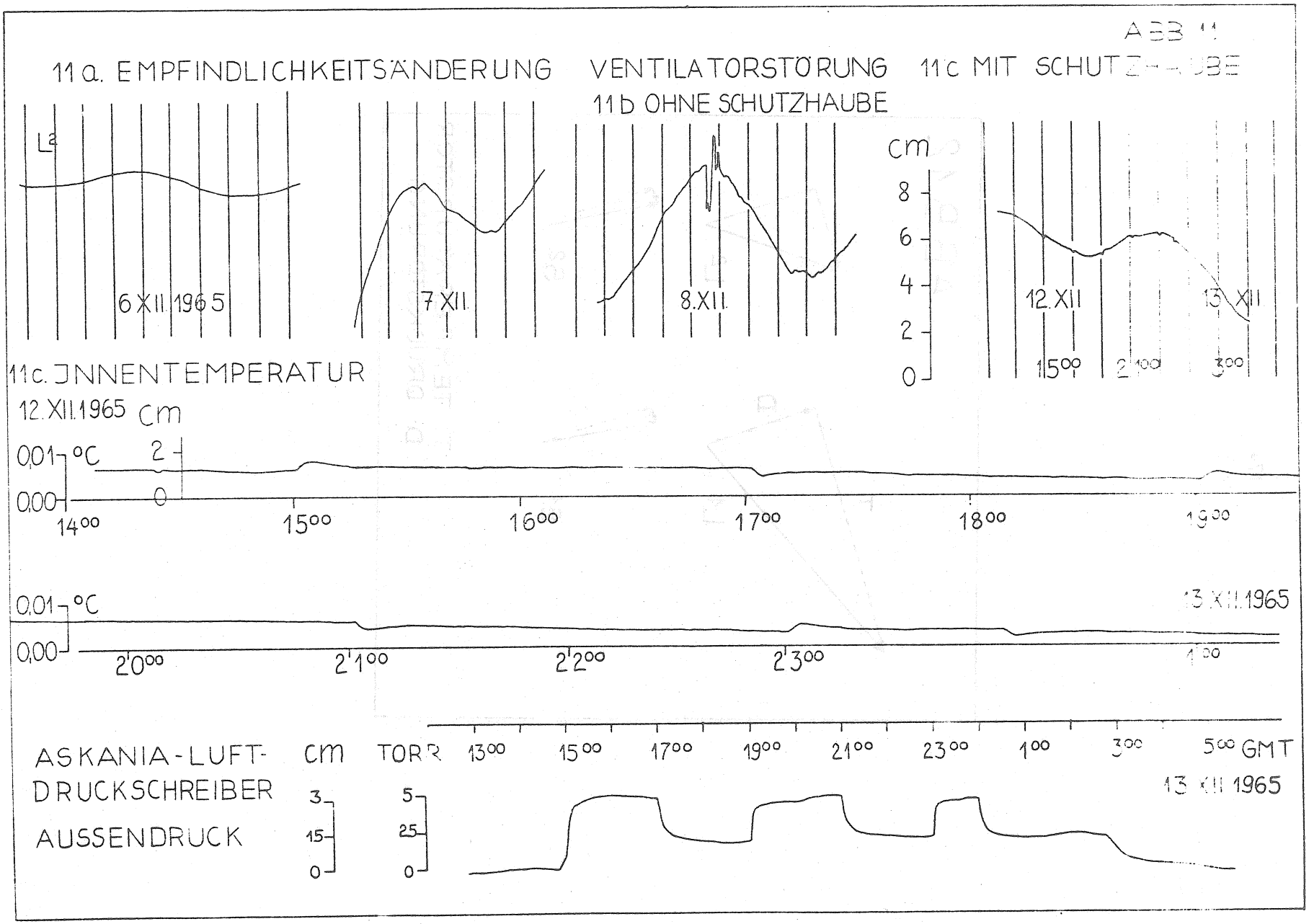


ABB 11
11a. EMPFINDLICHKEITSÄNDERUNG
VENTILATORSTÖRUNG
11c MIT SCHUTZ
11b OHNE SCHUTZHAUBE
6.XII.1965
7.XII.
8.XII.
cm
12.XII
13.XII
15⁰⁰
11c. INNENTEMPERATUR
12.XII.1965
cm
0,01 °C
0,00
14⁰⁰
15⁰⁰
16⁰⁰
17⁰⁰
18⁰⁰
13.XII.1965
2'0⁰⁰
2'1⁰⁰
2'2⁰⁰
2'3⁰⁰
ASKANIA-LUFT-
DRUCKSCHREIBER
AUSSENDRUCK
cm
TORR
13⁰⁰
15⁰⁰
17⁰⁰
19⁰⁰
21⁰⁰
23⁰⁰
1⁰⁰
3⁰⁰
5⁰⁰ GMT
13.XII.1965

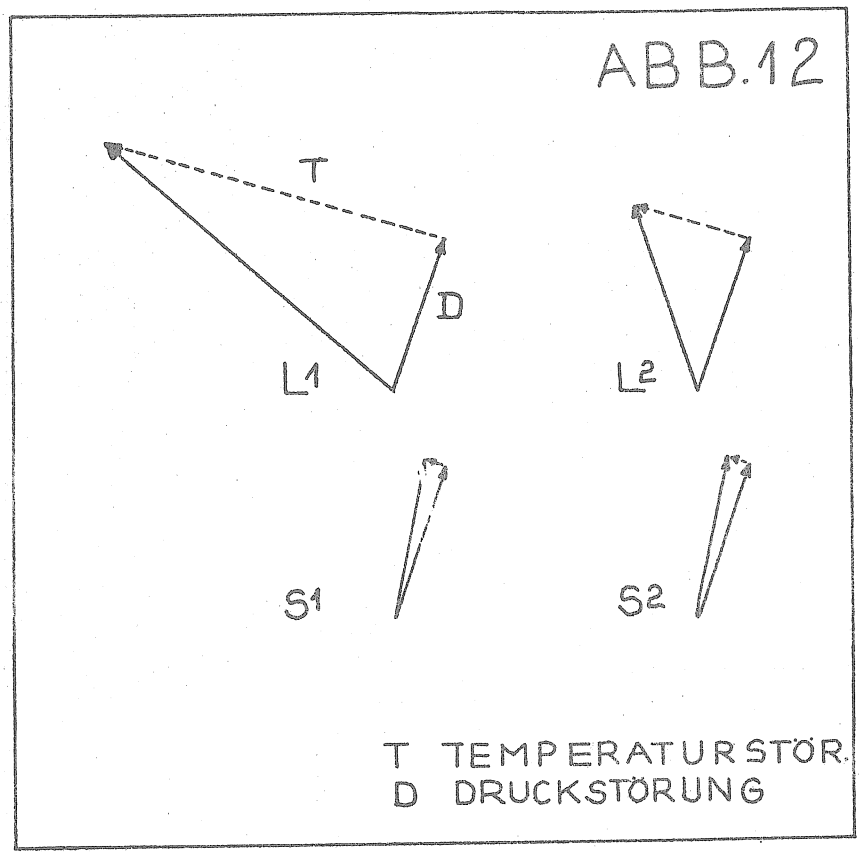
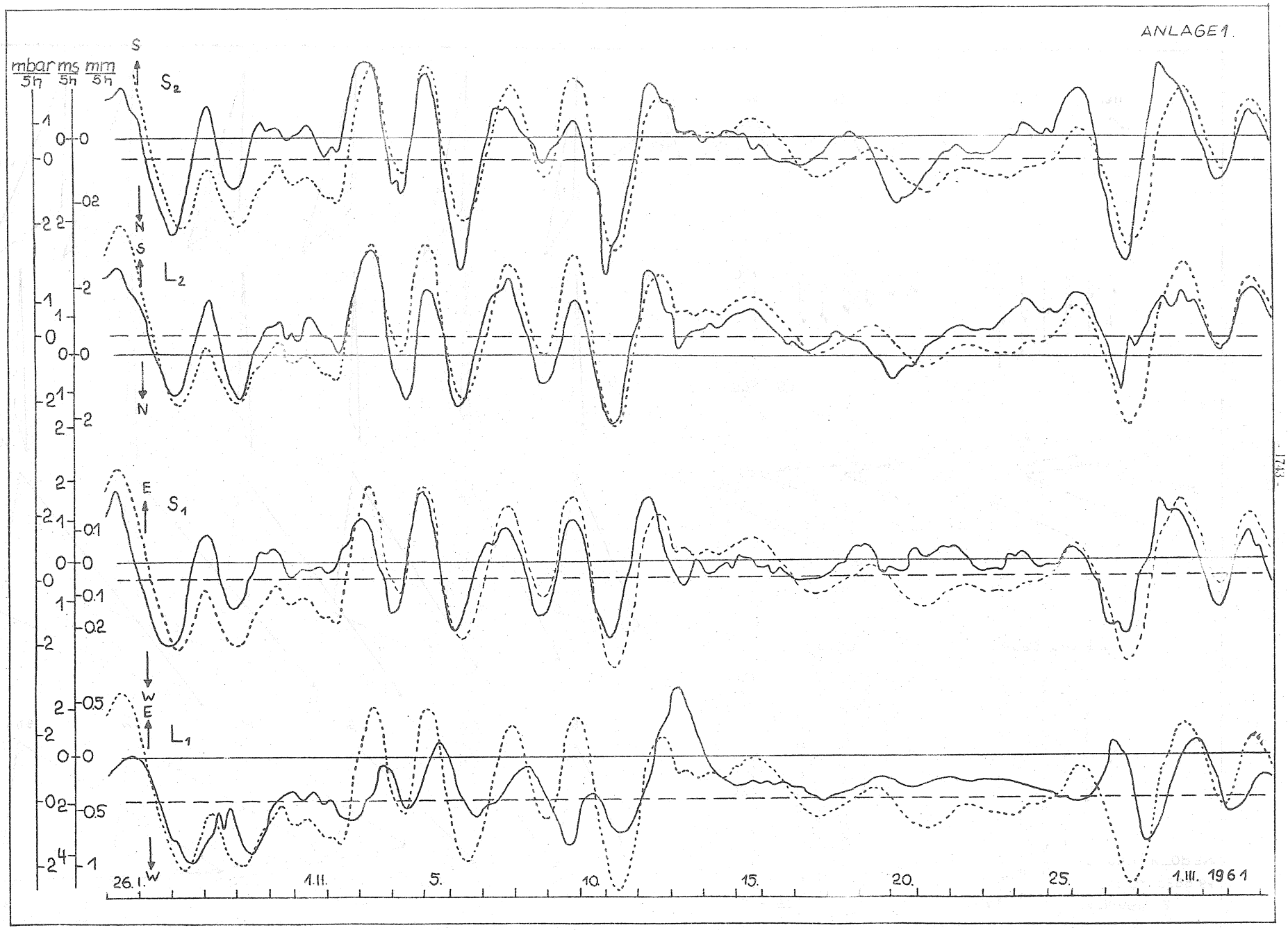
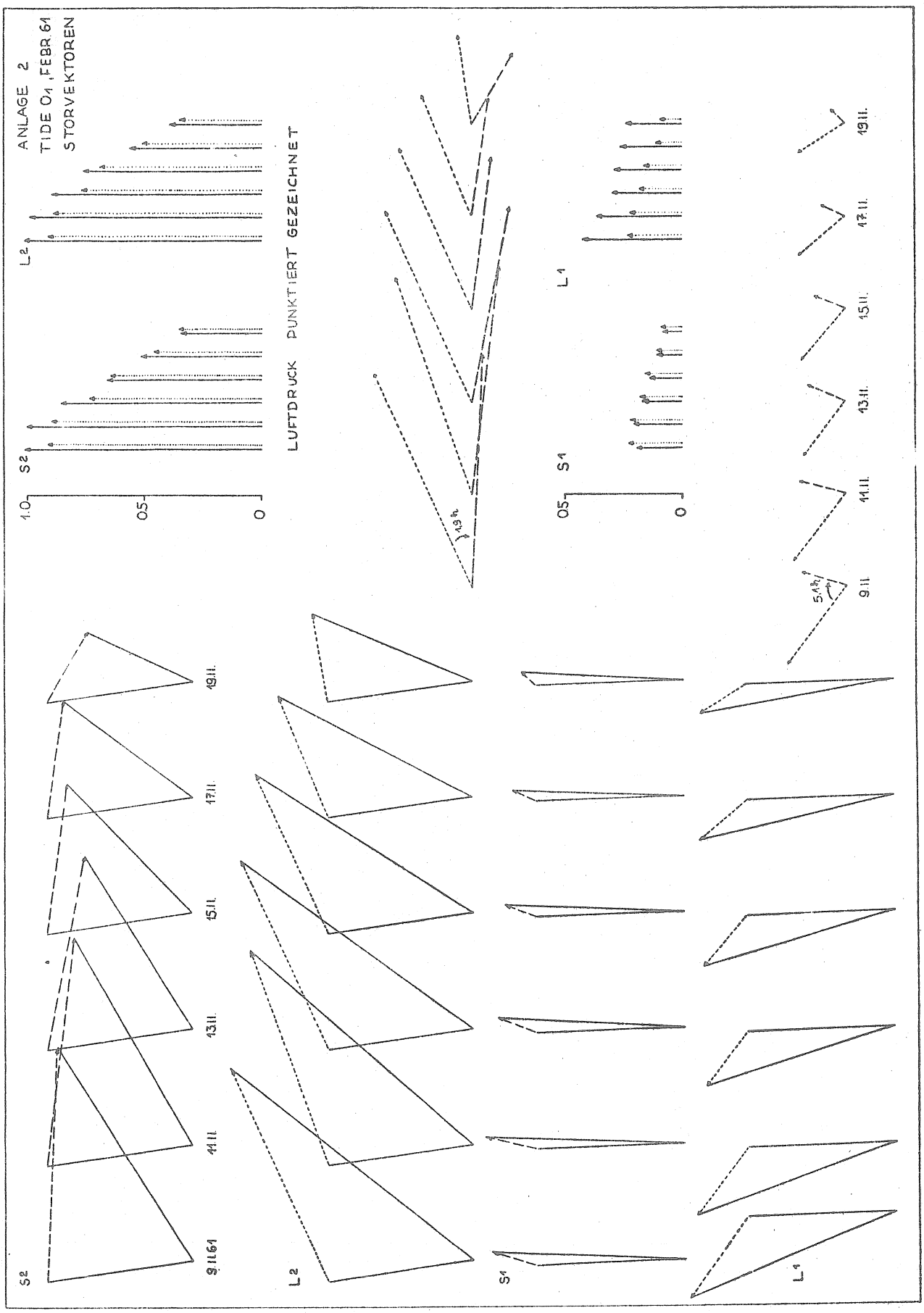
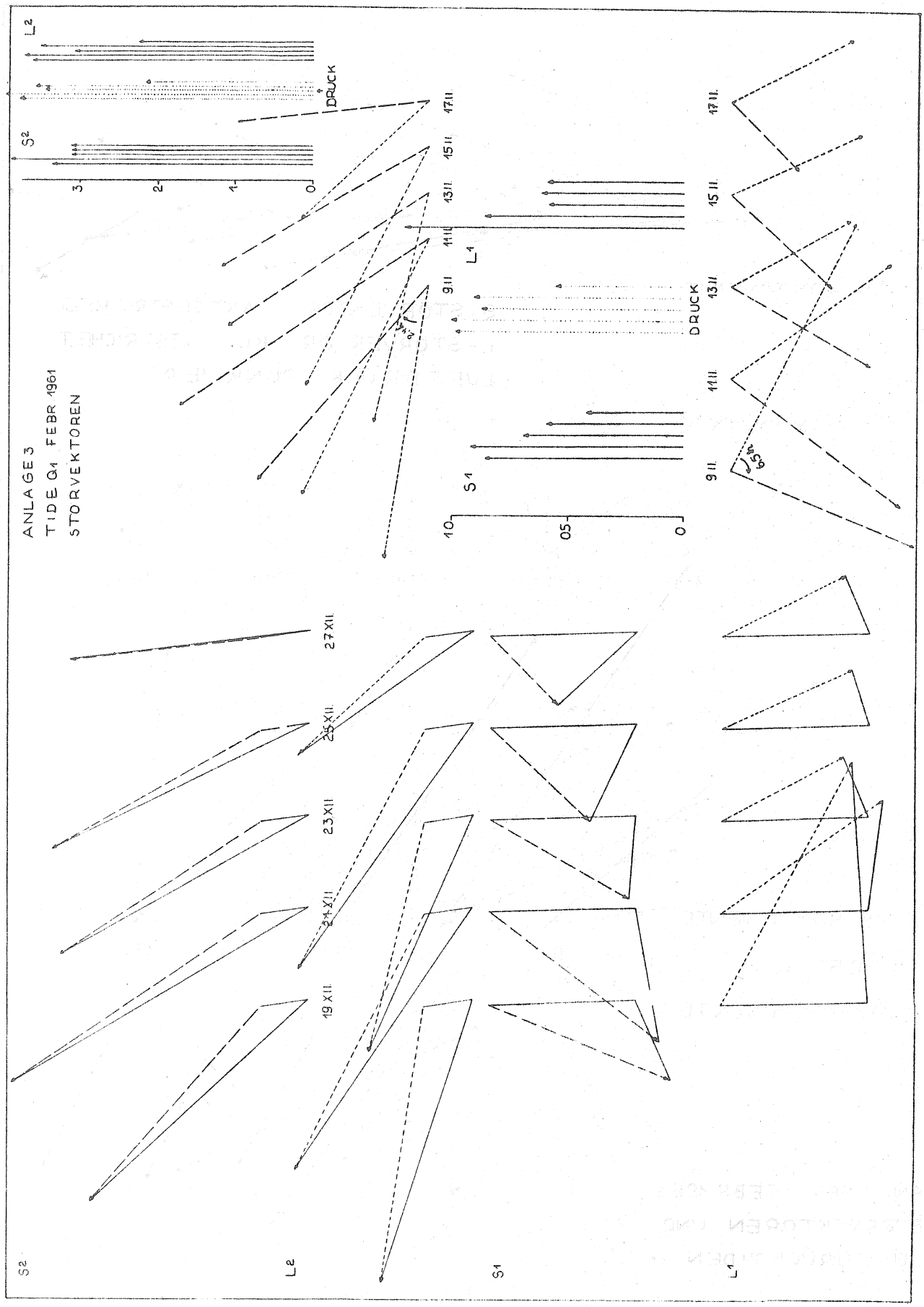
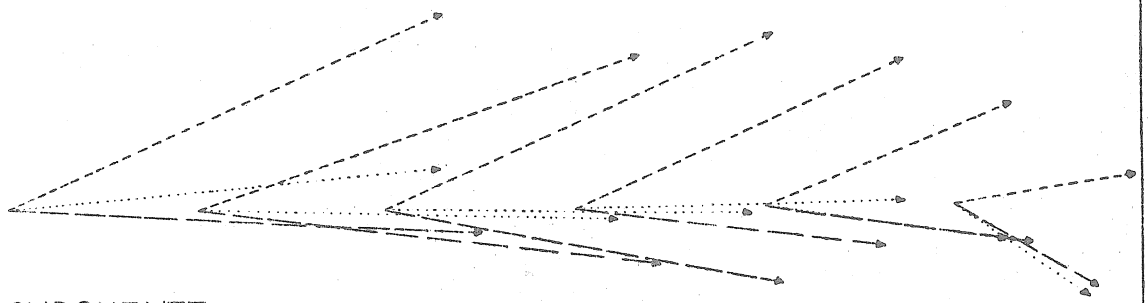


ABB.12
T
D
L1
L2
S1
S2
T TEMPERATURSTÖR.
D DRUCKSTÖRUNG


ANLAGE 1
mbar/5h
ms/5h
mm/5h
S
N
S₂
S
N
L₂
E
W
S₁
W
E
L₁
26.I.
1.II.
5.
10.
15.
20.
25.
1.III. 1961


ANLAGE 2
TIDE 01, FEBR 61
STORVEKTOREN
LUFTDRUCK PUNKTIERT GEZEICHNET
S2
L2
S1
L1
1.0
0.5
0
9.11.61
11.11.
13.11.
15.11.
17.11.
19.11.
5 Mb
1 Mb


ANLAGE 3
TIDE Q1 FEBR 1961
STORVEKTOREN
S2
L2
DRUCK
3
2
1
0
17 II.
15 II.
13 II.
11 II.
9 II.
L1
S1
10
05
0
DRUCK
65°
27 XII.
25 XII.
23 XII.
21 XII.
19 XII.

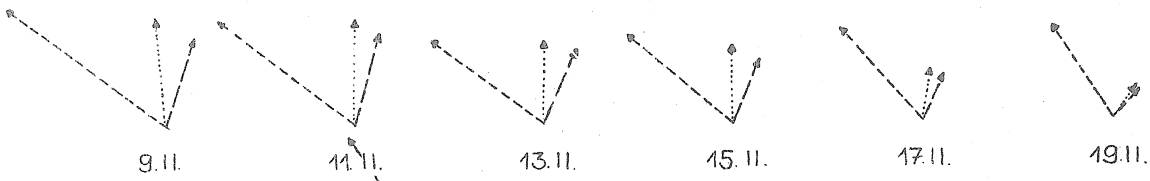


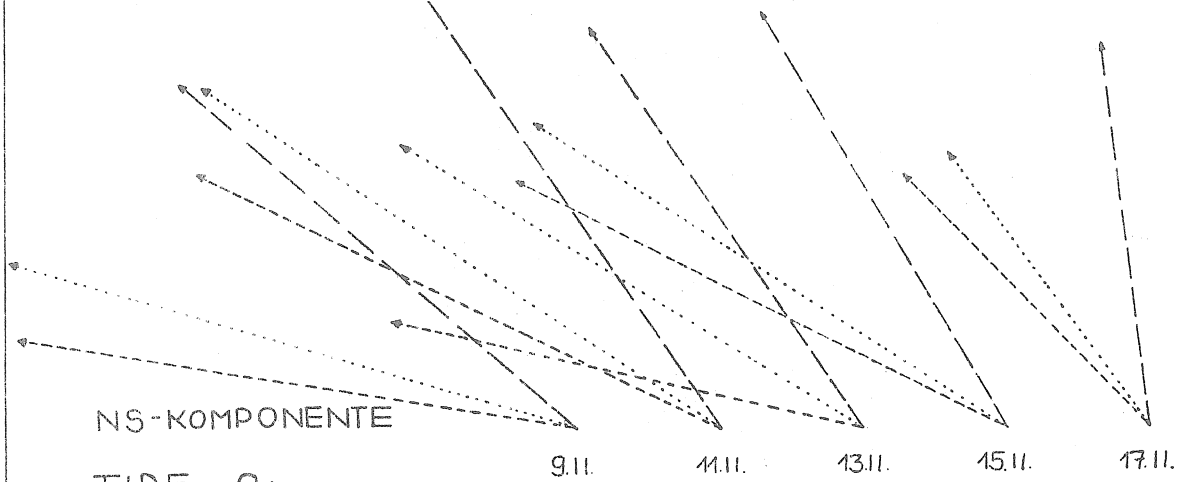
NS-KOMPONENTE

TIDE O_1

EW-KOMPONENTE

S-STÖRVEKTOR LANGGESTRICHELT
L-STÖRVEKTOR KURZGESTRICHELT
LUFTDRUCK PUNKTIERT

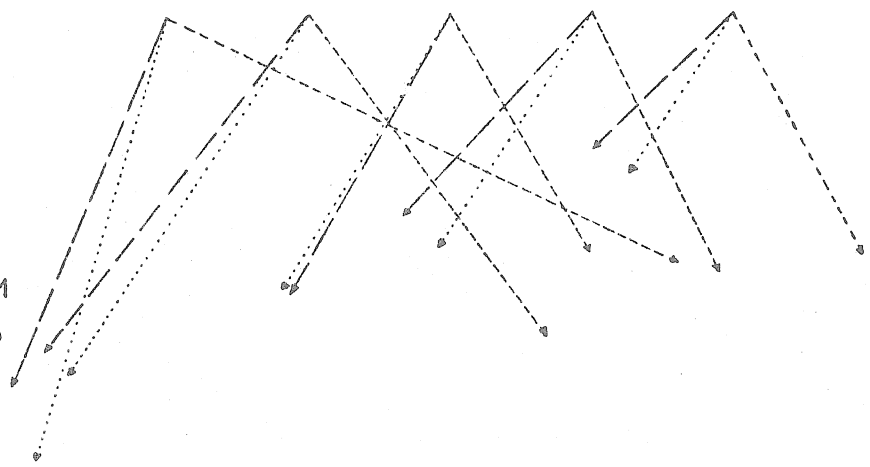




NS-KOMPONENTE

TIDE Q_1

EW-KOMPONENTE



ANLAGE 4 ; FEBR. 1961
STÖRVEKTOREN UND
LUFTDRUCKTIDEN

ZUR FRAGE DER BETRIEBSSICHERHEIT NETZSPANNUNGSBETRIEBENER REGISTRIERANLAGEN

von *Manfred BONATZ*

Institut für theoretische Geodäsie der Universität Bonn.

Bei der Registrierung der Erdgezeiten kommt es prinzipiell darauf an, möglichst lange Zeiträume ohne Unterbrechung zu erfassen. Wenngleich es bei Anwendung der Methode von VENEDIKOV [1] zur harmonischen Analyse der Erdgezeiten nicht mehr notwendig ist, lückenlose Ergebnisse über mehrere Wochen vorliegen zu haben - die "Registriereinheit" beträgt hier nur mehr 48 Stunden -, so muss dennoch vom Standpunkt der Messtechnik aus unbedingt an der Forderung festgehalten werden, Unterbrechungen der Registrierung, die durch technische Unzulänglichkeiten verursacht sind, mit geeigneten Massnahmen weitgehend zu verhindern. Denn der Ausfall der gesamten Registrieranlage oder auch nur einiger ihrer Teile erzeugt möglicherweise Folgewirkungen, die sich in Störungen der Homogenität der Registrierergebnisse äussern, und die mit Sicherheit zu erfassen und zu eliminieren bei dem heutigen Stand der Messtechnik nach wie vor sehr schwierig ist. So ist es zum Beispiel nicht auszuschliessen, dass die Empfindlichkeit der Photozellen des Askania-Registriergravimeters sich nach einer Unterbrechung der Lichtzufuhr ändert ; es ist weiterhin nicht auszuschliessen, dass nach einer Unterbrechung des Stromes für die Beleuchtung der Photozellen in der Photozellenlampe gewisse Änderungen der Leuchtlichteverteilung und der Leuchtintensität auftreten, die ebenfalls eine Veränderung der Registrierempfindlichkeit zur Folge haben (verschiedene, im Institut für theoretische Geodäsie, Bonn, durchgeführte Versuche deuten sogar ziemlich zwingend auf das Vorhandensein derartiger Effekte hin). Eben derartige Empfindlichkeitsänderungen beeinflussen aber die Mess- und Auswerteergebnisse in erheblichem Masse, und die hier aufgeführten Beispiele zeigen nur einige von vielen Möglichkeiten des durch Betriebsstörungen verursachten Auftretens systematischer Änderungen im Registrierergebnis.

Nun soll nicht verkannt werden, dass es auch eine Reihe von Registrieranlagen gibt, die besonders betriebssicher sind und speziell besonders unempfindlich gegenüber kurzzeitigem Ausfall der Netzspannung - z. B. Horizontalpendelanlagen mit optischer Registrierung -, aber auch hier sind der zulässigen Dauer der Störungen wegen der Unsicherheit im Interpolationsintervall durchaus Grenzen gesetzt ; der besondere Vorteil derartiger Registrieranlagen besteht jedoch darin, dass eine Rückwirkung elektrischer Störungen auf den Messwertgeber (das Pendel) im allgemeinen nicht vorhanden ist, was bei den meisten der übrigen, besonders der gravimetrischen Registrieranlagen häufig in ausgesprochenem Masse der Fall ist.

Aus dem Dargelegten folgt, dass die Steigerung der Betriebssicherheit der Registrieranlagen, trotz der Fortschritte in den Auswertemethoden, nach wie vor eine wesentliche Aufgabe der Erdgezeitenmesstechnik darstellt. - Man kann die auftretenden Betriebsstörungen in zwei Gruppen einteilen : einmal Störungen, die auf Fehlern in der Anlage selber beruhen, und solche, die aus Störungen in der (fremdseitigen) Energiezufuhr der Anlage resultieren. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Fehlern in der Registrieranlage lässt sich zwar durch ein gut durch-

dachtes Wartungsprogramm verringern, prinzipiell ausschalten jedoch nicht. Wesentlich bessere Möglichkeiten bieten sich dagegen bei der Sicherung der Energiezufuhr der Registrieranlage. Wegen der Notwendigkeit, die Registrierungen über lange Zeiträume auszudehnen, arbeiten die meisten Stationen im Netzbetrieb, d.h. sie erhalten ihre benötigte elektrische Energie aus einem öffentlichen Netz. Wenngleich Störungen in dieser Energiequelle im allgemeinen wohl durchaus nicht die Regel sind, so treten sie in gewissen Zeitabstönden und mit wechselnder Häufigkeit und Dauer doch immer wieder auf (in der Station Bonn etwa zwei bis dreimal pro Jahr, von einigen Minuten bis zu mehreren Stunden Dauer) und verursachen Störungen in der Gezeitenregistrierung. Dem Einfluss derartiger Störungen auf das Registrierergebnis muss nun aber durch geeignete instrumentelle Massnahmen genau so begegnet werden, wie beispielsweise den Einflüssen von Spannungs-oder Temperaturschwankungen, d.h. ein sich im Bedarfsfalle selbsttätig einschaltendes Notstromaggregat muss die Energiezufuhr über eine gewisse Zeit sichern. An ein derartiges Notstromaggregat sind folgende Anforderungen zu stellen : Es muss selber betriebssicher sein, es muss eine Energiereserve für mehrere Stunden besitzen, es muss möglichst wartungsfrei sein, es darf im Betrieb keinen merkbaren Fehlereinfluss auf das Registrierergebnis ausüben und - es darf schliesslich auch nicht zu teuer sein. Ein solches Aggregat, das diese Forderungen weitgehend erfüllt, ist im Institut für theoretische Geodäsie seit etwa einem Jahr in Betrieb ; es sei als Beispiel im folgenden kurz beschrieben.

Als Energiequelle dienen zwei in Reihe geschaltete 12-Volt-Bleiakkumulatoren mit einer Kapazität von 135 Ah. Die vorhandene 24 V Gleichspannung wird durch einen Wechselrichter in 220 V,50 Hz Wechselspannung umgewandelt. Dieser Wechselrichter schaltet sich über ein Schaltschütz bei Ausfall der Netzspannung selbsttätig ein und sofort wieder aus, wenn die Netzspannung wieder zur Verfügung steht. Der Ladungszustand der Batterien wird etwa wöchentlich auf Grund der Säuredichte ermittelt, Ladungsverluste werden durch kurzzeitiges Einschalten eines Ladegerätes ersetzt. Es ist geplant, diese Ladungsregulierung mit Hilfe eines Zusatzgerätes zu automatisieren, um mit Sicherheit zu gewährleisten, dass die Batterien immer betriebsbereit sind. Zur Umwandlung der Gleichspannung wurde ein transistorisierter Sinus-Wechselrichter der Firma SADOWSKI, Esslingen am Neckar, eingesetzt, der im vorliegenden Falle wegen verschiedener geplanter Experimente eine Maximalleistung von 500 VA besitzt ; normalerweise dürften Geräte mit einer Leistung von 200 bis 300 VA zur Notversorgung einer Registrieranlage voll ausreichen. Weitere technische Daten dieses Wechselrichters (Typ U115) sind : Eingangsspannung 22 bis 28 V =, Ausgangsspannung 220 V $\pm$ 2 % , Ausgangsfrequenz (quarzgesteuert) 50 Hz $\pm$ 0,1 % , Klirrfaktor 5 % bei Voll-Last, Wirkungsgrad etwa 65 % . Für die automatische Umschaltung von Netz- auf Batteriebetrieb (und zurück) wurde ein Drehstromschütz der Firma KLOECKNER-MOELLER, Bonn, Typenbezeichnung DIL 00-44-i, verwendet.

Die beschriebene Notstromanlage wurde eingehend auf ihre Funktionstüchtigkeit geprüft.. Dabei konnten bisher keine Störungen festgestellt werden ; bei künstlich erzeugtem Netzausfall sprang das Aggregat immer sofort an. Die maximale Dauer der Notstromversorgung beträgt selbst bei maximaler Belastung immer noch 3 bis 4 Stunden, was für normalerweise zu erwartende Netzspannungsausfälle völlig ausreicht. An Wartungsarbeiten sind lediglich die etwa wöchentliche Überprüfung des Ladungszustandes der Batterien und ein eventuelles kurzzeitiges Nachladen erforderlich. Ein Fehlereinfluss auf das Registrierergebnis gösser als etwa $\pm$ 1 μGal konnte bisher bei keinem der durchgeführten Experimente festgestellt werden ; wichtig ist in diesem Zusammenhang der geringe Oberwellengehalt der sinusförmigen Ausgangsspannung, der den Wert von 5 % nicht übersteigt und damit z. B. erheblich unter dem in [2] für den Linienschreiber der neuen Askania-Registrieranlage angegebenen Grenzwert von 10 % liegt. Der Preis des Aggregats beträgt weniger als 5 % der Gesamtkosten der Askania-Registrieranlage und steht damit zu diesen Kosten in einem vertretbaren und durchaus angemessenem Verhältnis. Zur Notstromversorgung

einer mit optischer Registrierung arbeitenden Horizontalpendelanlage (z.B. VERBAANDERT-MELCHIOR) liesse sich das Aggregat noch wesentlich vereinfachen und verbilligen.

Zusammenfassend sei nochmals herausgestellt, dass es zur kontinuierlichen Erdgezeitenregistrierung über lange Zeiträume dringend zu empfehlen ist, möglichen Ausfällen in der Netzversorgung durch ein Notstromaggregat Rechnung zu tragen. Dies wird um so notwendiger, je höher die Genauigkeitsanforderungen sind, die von Seiten der Theorie an die Erdgezeitenmesstechnik gestellt werden.

LITERATUR.

[1] VENEDIKOV, A.P.
Une méthode pour l'analyse des marées terrestres à partir d'enregistrements de longueur arbitraire
Marées Terrestres, Bulletin d'Informations Nr. 43 (1966) S. 1687.

[2] HARTMANN und BRAUN
Elektrische Kompensationsschreiber Linecomp und Polycomp, Gebrauchsanleitung,
TR 13-3, Frankfurt.

DER EINFLUSS DER RAUMTEMPERATUR AUF DIE SPANNUNGSKONSTANTHALTER ZU DER ASKANIA-ERDGEZEITENREGISTRIERANLAGE

von *Manfred BONATZ*

Institut für theoretische Geodäsie der Universität Bonn

In [1] wurde nachgewiesen, dass es bei einem zulässigen Fehlergrenzwert von ± 1 μGal im Registrierergebnis notwendig ist, den Strom für die Beleuchtung der Photozellen des Askania-Registriergravimeters auf einige Hunderstelmilliampère zu stabilisieren. Unter Berücksichtigung dieser Bedingung wurden in [2] die Bereiche der zulässigen Netzspannungsschwankungen für die im Institut für theoretische Geodäsie, Bonn, zur Stromstabilisierung eingesetzten Spannungskonstanthalter angegeben. Im vorliegenden Beitrag sollen nun die zulässigen Schwankungen der Raumtemperatur festgelegt werden.

Es wurden folgende Geräte untersucht (vgl, [2])

SPANNUNGSKONSTANTHALTER 1 :
Typ Tr 1, 11, Nr 30033 (geliefert 1960), Leistung 1, 11 VA, Eingangsspannung 187-253 V, 49-50,5 Hz, Ausgangsspannung 6 V = ± 0,1 % bei 0,185 A. Das Gerät wird benutzt zur Stabilisierung des Stromes für die Beleuchtung der Photozellen des Gravimeters GS 11 Nr. 116.

SPANNUNGSKONSTANTHALTER 2 :
Typ Tr 1, 11, Nr 39932 (geliefert 1962), Leistung 1,8 VA, Eingangsspannung 187-253 V, 49-50,5 Hz, Ausgangsspannung 6 V = ± 0,1 % bei 0,3 A. Der Konstanthalter ist eingesetzt zur Stabilisierung des Stromes für die Beleuchtung der Photozellen des Gleichspannungsmessverstärkers der neuen Askania-Registriereinrichtung.

Beide Geräte wurden hergestellt von der Firma Gustav KLEIN, Schongau/Lech.

Die Schwankungen der Ausgangsspannung bzw. des Ausgangsstromes der Konstanthalter als Funktion der Raumtemperatur wurden bei verschiedenen Belastungen mit einer praktisch konstanten Hilfsspannung über eine Brückenschaltung bestimmt (vgl. [2]). Die Aussentemperatur dieser Messungsanordnung einschliesslich der Belastungswiderstände betrug während der gesamten Versuchsreihe 20 ± 0,3°C. Die auf die Konstanthalter wirkende Raumtemperatur wurde in der Klimakammer des Instituts zwischen + 4 und + 30°C variiert. Die Netzspannung betrug 220 ± 2V Zur Ausschaltung möglicher systematischer Fehler wurde in jeder Messreihe mehrfach mit steigenden und fallenden Raumtemperaturen gemessen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Abb. 1 und 2 graphisch dargestellt. Es ergeben sich in Abhängigkeit von der Belastung folgende Temperatureinflüsse:

SPANNUNGSKONSTANTHALTER 1 :

Belastung	mittlere Stromänderung pro 1°C Temperaturänderung
153 mA	0,09 mA/°C
130 mA	0,07 mA/°C
108 mA	0,06 mA/°C

SPANNUNGSKONSTANTHALTER 2 :

Belastung	mittlere Stromänderung pro 1°C Temperaturänderung
168 mA	0,08 mA/°C
144 mA	0,06 mA/°C
121 mA	0,05 mA/°C

Nimmt man als Grenzwert für die zulässigen Schwankungen des Ausgangsstromes der Konstanthalter wieder einen Betrag von ± 0,05 mA an [1, 2] - entsprechend einem Fehlergrenzwert im Registrierergebnis von etwa ± 1 bis 2 μGal - so folgt aus den dargelegten Ergebnissen, dass im oberen Belastungsbereich der Konstanthalter die Raumtemperatur auf einige Zehntelgrad Celsius konstant gehalten werden muss, und dass die maximal zulässigen Schwankungen der Raumtemperatur etwa bei einem halben Grad Celsius liegen.

Man erkennt weiter, dass beide Konstanthalter etwa gleich temperaturempfindlich sind und bei beiden Geräten der Temperatureinfluss mit steigender Belastung zunimmt. Um eine Registrierung bei geringster Temperaturempfindlichkeit zu erreichen muss man, ähnlich wie bei der in [2] untersuchten Netzspannungsempfindlichkeit, auch hier - mit gewissen Vorbehalten - daraus die Folgerung ziehen, die Spannungskonstanthalter mit den entsprechenden Widerständen auf maximale Spannung einzustellen und den Lampenstrom für die Photozellenbeleuchtung des Gravimeters oder des Messverstärkers mit einem in Reihe geschalteten Vorwiderstand auf das notwendige Mass zu verringern ; wobei allerdings zusätzlich darauf zu achten ist, dass der Vorwiderstand selber genügend temperaturunempfindlich ist. In Registrierstationen, in denen die Schwankungen der Raumtemperatur grösser sind als die hier als zulässig angegebenen Grenzwerte, sollte man jedoch zweckmässig zur Stabilisierung der Photozellenbeleuchtung der Askania-Gravimeter andere Konstanthalter, mit besserer Temperaturkompensation verwenden.

LITERATUR

[1] BONATZ, M. :
Der Einfluss von Schwankungen des Stromes für die Beleuchtung der Photozellen auf die Messwertanzeige des Askania-Gravimeters GS 11 Nr. 116.
Marées Terrestres, Bulletin d'Informations (1965) Heft 42, S. 1587.

[2] BONATZ, M. :
Der Einfluss der Netzspannung auf die Spannungskonstanthalter zu der Askania-Erdgezeitenregistrieranlage.
Marées Terrestres, Bulletin d'Informations (1966) Heft 43, S. 1642.

Abb. 1

Der Einfluss der Raumtemperatur auf den Ausgangsstrom des Spannungskonstanthalters 1 bei verschiedenen Belastungen

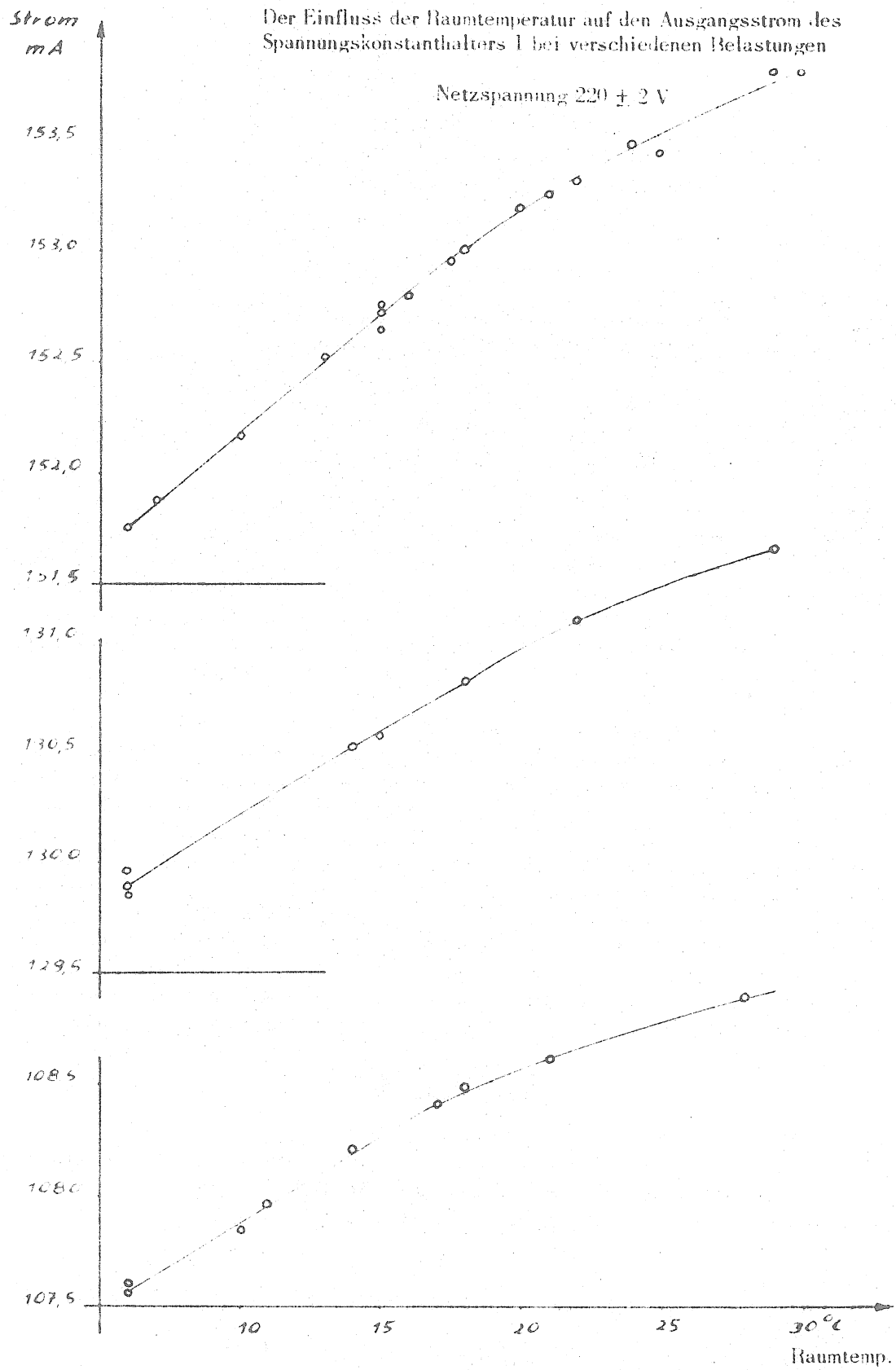
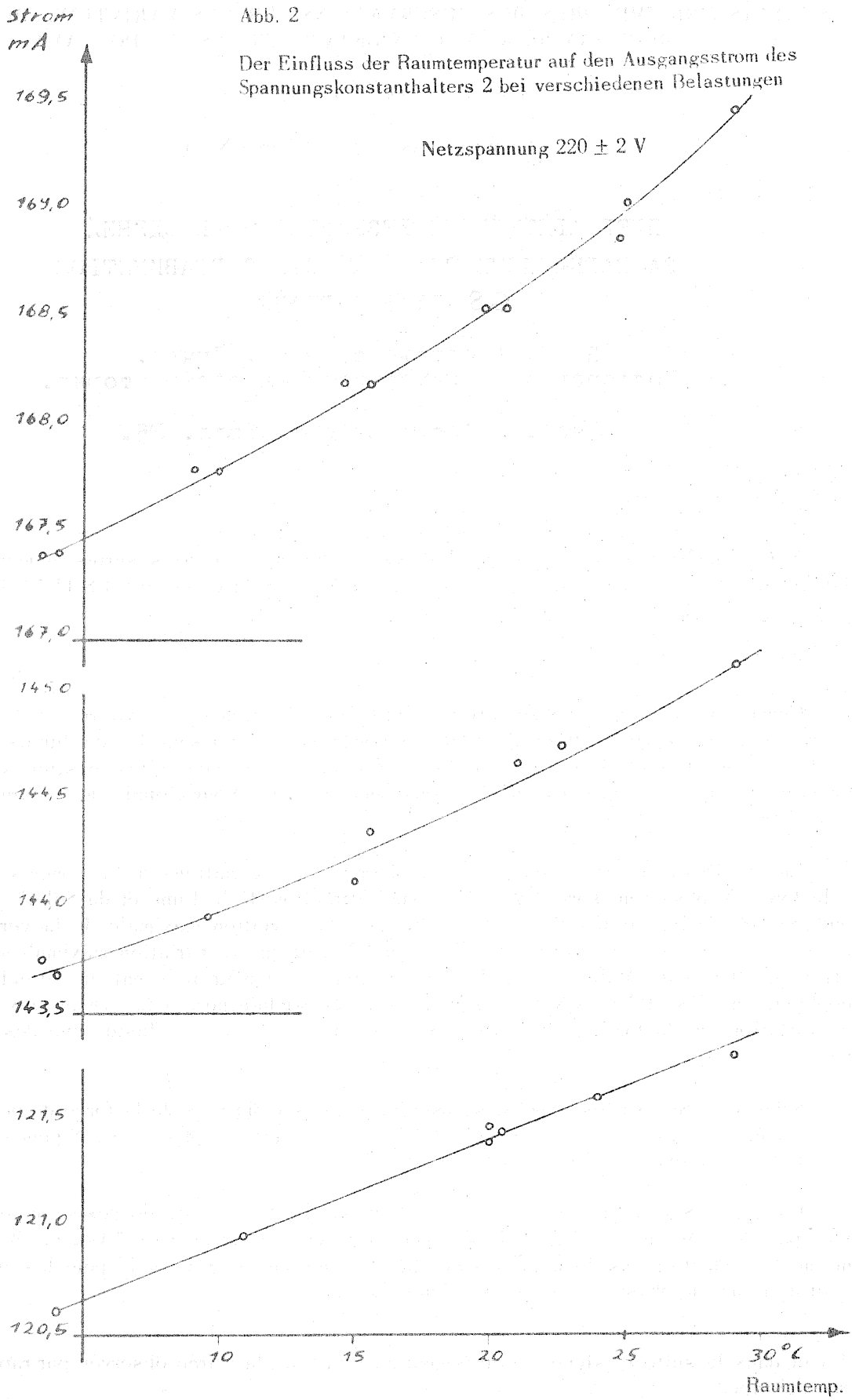


Abb. 2

Der Einfluss der Raumtemperatur auf den Ausgangsstrom des Spannungskonstanthalters 2 bei verschiedenen Belastungen

Netzspannung 220 ± 2 V



Traduction.

RESULTATS PRELIMINAIRES DES OBSERVATIONS SUR LES VARIATIONS DE LA FORCE DE PESANTEUR AVEC UN GRAVIMETRE GS-11 à POLTAVA.

Z. N. Aksentieva, I. A. Ditchko

Géoph. et Astr. Bull. Inform. N° 5.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ВАРИАЦИЯМИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ С ГРАВИМЕТРОМ GS-II В ПОЛТАВЕ

З. Н. Аксентьева, И. А. Дычко.
Полтавская гравиметрическая обсерватория.

Геоф. и Астр. Информ. Бюлл. №5.

Nous donnons les résultats de l'analyse harmonique de trois séries mensuelles d'enregistrement des variations de la force de pesanteur à l'aide du gravimètre GS-11 N° 159 à Poltava

Comme on le sait les observations clinométriques et les observations des variations de la force de pesanteur permettent d'obtenir les nombres γ et δ qui sont des combinaisons linéaires simples des nombres de Love. Ces derniers caractérisent les propriétés élastiques de la Terre. On comprend donc l'importance des observations précitées pour l'étude de la structure interne de la Terre.

Les inclinaisons de la surface de la Terre et les variations de la composante verticale de la force de pesanteur sont provoquées par l'attraction de la Lune et du Soleil, leurs valeurs sont excessivement faibles. Il suffit de dire que la déviation maximale de la verticale (inclinaison maximum) est à nos latitudes d'environ 0"02 et que la variation maximale de g est plus petite que 0,3 mgal. Malgré cela, des observations clinométriques ont été effectuées par les géophysiciens dès la fin du XIXe siècle à l'aide du pendule horizontal. Quant aux observations des variations de la force de pesanteur elles n'ont eu une large diffusion que ces 10 dernières années.

Schweydar réalisa les premières observations des variations de la force de pesanteur avec un gravimètre bifilaire. Il a obtenu pour $\delta = 1{,}20$ et un retard de phase de 2°8 pour l'onde lunaire semi-diurne principale M_2* [1].

En Union Soviétique, les premières observations de la force de pesanteur ont été effectuées par nos soins à Poltava, en 1955, avec un gravimètre de la firme "Askania Werke" de type ancien. La réduction des données a donné la moyenne pondérée $\delta = 1{,}17$ pour les ondes M_2, O_1, N_2 et un retard de phase de + 8°9 pour l'onde M_2 [2].

---

* Ici et dans la suite le signe + correspond au retard de la marée observée par rapport à la marée théorique.

A la fin de 1960, l'observatoire gravimétrique de Poltava a acquis un gravimètre Askania du type nouveau GS-11 N° 159. Malheureusement, nous avons reçu le galvanomètre de haute précision joint au gravimètre pour l'enregistrement des variations de la force de pesanteur avec un fil cassé. La réparation du galvanomètre et également l'étalonnage du gravimètre sur un polygone ont demandé beaucoup de temps et l'enregistrement régulier n'a commencé que le 5 septembre 1961.

L'enregistrement est effectué dans une cave spécialement construite dans ce but sous le nouveau bâtiment de l'Observatoire Gravimétrique de Poltava. La profondeur de la cave est de 5 m, le pilier sur lequel sont installés les appareils est construit en briques sur un mortier argilo-sablonneux et sort de la surface du sol de la cave sur une hauteur d'environ 1,5 m. La salle a des murs doubles et un double plafond. Les mesures de l'intérieur de la salle sont 6,3 x 5,3 x 3,4 m^3. L'assèchement de la cave a été réalisé par un appareil spécial. Pour maintenir une température constante dans la salle on a branché constamment deux réchauds électriques d'une puissance commune de 1 kw. L'humidité sur le pilier portant les appareils a été maintenue aux environs de 60 % à l'aide du sécheur. Au début la température se maintenait à environ 18° C, en hiver à environ 17° C. Les variations journalières de la température ne dépassaient pas 0°,2 C et cela s'explique en grande partie par la variation de l'incandescence des appareils de chauffage en fonction de la variation de tension du réseau électrique urbain. L'enregistrement a été effectué à l'aide d'un enregistreur mécanique sur une bande de papier paraffiné d'une longueur de 5 m. La vitesse du mouvement de la bande sur le tambour était de 5,7 - 6,0 mm/heure en fonction de la quantité de papier enroulé sur le tambour. Pour éliminer les microséismes qui sont particulièrement intenses en automne et en hiver on s'est servi d'un filtre spécial. Le thermostat du gravimètre a été réglé à 40° C et a fonctionné en régime II.

Table 1

Calibration de l'enregistrement

Date	Valeur de l'écart	Ecart de la division de l'échelle	Ecart	Sensibilité μgal/mm
7.IX	88,6	6,33	0,4530	5,11
15.IX	96,1	7,88	0,5595	5,82
21.IX	104,6	7,30	0,5183	4,96
1.X	110,2	8,18	0,5808	5,27
11.X	29,0	2,00	0,1420	4,90
13.X	34,7	2,18	0,1548	4,46
15.X	106,6	7,92	0,5623	5,27
22.X	74,2	4,90	0,3479	4,69
27.X	83,1	6,00	0,4260	5,13
28.X	29,5	2,18	0,1548	5,25
29.X	46,3	3,96	0,2812	6,07
1.XI	82,9	5,56	0,3948	4,76
6.XI	92,7	5,42	0,3848	4,15
13.XI	92,4	6,60	0,4686	5,07

L'enregistreur a été branché sur le réseau électrique urbain par un stabilisateur de tension CH-250. Malheureusement le courant était débranché assez souvent. On a interpolé en tout 103 ordonnées des données réduites. La plus grande interruption a duré 18 heures, la plupart des interruptions étaient d'environ 5 heures. L'interpolation des ordonnées manquantes a été effectuée d'après une courbe [3] calculée théoriquement, la dérive dans la partie interpolée était prise comme linéaire.

Les accumulateurs et les redresseurs avec ampéremètres de contrôle se trouvaient dans le local contigu à la salle gravimétrique. Les marques horaires de l'enregistrement étaient fournies à l'aide d'une horloge à contact fournie avec le gravimètre. La marche des horloges était vérifiée chaque jour avec les signaux horaires transmis par radio et leur correction se maintenait dans les limites de $\pm$ 30 sec.

La détermination de la sensibilité de l'enregistrement s'est effectuée par le déplacement de la masse du gravimètre sur un nombre déterminé de divisions de l'échelle. Puisque le spot lumineux du galvanomètre atteint sa nouvelle position relativement vite après le déplacement, (la période d'oscillation du galvanomètre est de 6 sec.)Cette mesure de la valeur du déplacement de l'enregistrement sur la bande n'a pas provoqué de difficultés et s'est effectuée simultanément avec la mesure des ordonnées. La valeur de la division de l'échelle du gravimètre a été déterminée avec une précision suffisante aussi bien sur le polygone que par le procédé de la bille. Pour déterminer la sensibilité de l'enregistrement nous nous sommes servis de la dernière valeur de la division de l'échelle obtenue par roulement de la bille.Les autres valeurs coïncident avec elle dans les limites des erreurs. Il convient de souligner la bonne convergence des résultats obtenus lors de l'étalonnage de l'échelle du gravimètre N° 159. La dernière valeur que nous avons obtenue de la grande division de l'échelle est égale à 7,100 $\pm$ 0,002 mgal. Les résultats de la détermination de la sensibilité de l'enregistrement sont donnés à la table 1.

Les données réduites englobent la période allant du 6.IX au 22.XI 1961. Il est évident que pour une telle durée, le nombre des écarts que nous avons pris pour l'étalonnage de l'enregistrement est insuffisant. En outre, beaucoup d'écarts ont une petite valeur, ce qui a altéré la qualité de la détermination du coefficient d'étalonnage. La valeur moyenne de ce dernier dont nous nous sommes servis lors de la réduction des données était égale à 5,07 $\pm$ 0,13.

L'analyse harmonique des ordonnées horaires a été effectuée d'après la méthode de P.S. Matvéev [5]. La répartition des données en séries est la suivante : I-6.IX-5.X 1961; II-1.X-29 X; III-25.X-22.XI. Ainsi les données réduites ont été réparties avec un recouvrement de 5 jours entre les séries. Les résultats de la réduction sont donnés dans la table 2. Les valeurs moyennes δ et κ ainsi que les valeurs obtenues par d'autres auteurs (4,6,7) sont données dans la table 3.

En effet, on ne peut tirer des conclusions définitives d'après les résultats des trois séries mensuelles d'enregistrement. Cependant cette réduction préliminaire témoigne de la qualité des observations et par conséquent permet d'éliminer les erreurs des dernières si cela est possible.

Table 2

Résultats de l'analyse harmonique de l'enregistrement.

Série	Q_1		O_1		K_1		M_1		N_2		M_2		S_2		μ_2	
	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase
	H_T=5,87		H_T=30,66		H_T=43,14		H_T=2,41		H_T=6,06		H_T=31,65		H_T=14,74		H_T=0,97	
I	5.36	309,5	27,10	155,0	47,87	121,8	4,70	255,3	6.94	67,6	37,46	276,9	14,77	22,6	2,03	219,7
II	4,69	180,5	29,25	67,0	46,51	102,2	2,16	176,1	6,16	300,5	37,88	166,9	14,12	17,8	2,51	335,9
III	5,47	56,5	32,23	315,3	45,36	75,3	2,92	122,1	7,11	101.5	38,25	32,4	16,28	14,0	1,20	40,2
	δ	κ	δ	κ	δ	κ	δ	κ	δ	κ	δ	κ	δ	κ	δ	κ
I	1,091	+ 5,3	1,045	+0,5	1,222	+0,1	1,749	+ 7,2	1,101	— 1,5	1,148	—2,5	1,004	+2,3	2,639	+40,3
II	0,946	— 4,8	1,120	—1,6	1,185	+ 5,2	0,881	—15,3	1,025	+15,7	1,159	—2,0	0,985	—2,4	2,555	+17,4
III	1,107	+29,0	1,245	—1,9	1,171	+1,8	1,396	— 3,2	1,155	— 1,6	1,189	—1,7	1,133	—6,2	1,222	— 8,5

Table 3

Comparaison des résultats obtenus en différents points.

Onde	Krasnaya Pakhra		Uccle		Strasbourg		Poltava	
	δ	κ	δ	κ	δ	κ	δ	κ
Q_1			1,117±0,033	—2,4±1,7			1,048±0,051	+9,8±9,7
O_1	1,160±0,014	+0,7±1,5	1,210±0,009	—0,8±0,5	1,181±0,027	+0,1±1,1	1,155±0,058	—1,0±0,8
K_1	1,156±0,023	+2,0±0,6	1,184±0,008	—2,2±0,3	1,277±0,057	+5,6±0,9	1,193±0,012	+2,5±2,4
M_1			1,216±0,077	—0,4±3,7				
J_1			1,195±0,112	—4,3±4,2				
N_2	1,143±0,036	+6,1±1,8	1,259±0,035	+2,0±1,4			1,093±0,038	+4,2±5,8
M_2	1,191±0,026	+4,6±0,9	1,198±0,008	—0,3±0,2	1,213±0,007	+0,8±0,3	1,165±0,009	—2,0±0,3
S_2	1,182±0,029	+2,8±1,1	1,237±0,012	—1,7±0,4	1,153±0,024	+5,7±0,8	1,011±0,046	—2,1±2,5
μ_2							1,939±0,388	+16,4±14,1
L_2			1,285±0,123	—2,6±5,2				
$2N_2$			2,080±0,341	+12,2±6,9				

Il faut noter que dans nos résultats on observe une grande dispersion des valeurs δ et κ. L'onde S_2 présente une dispersion particulièrement importante et ses résultats diffèrent fortement des résultats de l'autre onde semi-diurne M_2. Pour expliquer les causes de ce phénomène il faut disposer de plus de données expérimentales.

Il est intéressant de noter que les valeurs du retard de phase que nous avons obtenues diffèrent peu de 0. Des valeurs proches de celles-ci sont obtenues également à Uccle, Strasbourg (pour l'onde M_2) et en d'autres points [8].

BIBLIOGRAPHIE

1. W. SCHWEYDAR
   Beobachtung der Änderung der Intensität der Schwerkraft durch den Mond.
   Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, XIV, 1914.

2. Z.N. AKSENTIEVA
   Données sur les variations de marées de la force de pesanteur à Poltava.
   Ukraine, N° 1, 1959.

3. Graphiques des corrections aux variations de marées de la force de pesanteur en 1960 et 1961.
   M. 1959.

4. N.N. PARIISKII, You S. DOBROCHOTOV, B.P. PERTSEV, M.V. KRAMER, B.D. BELIKOV, S.N. BARCENKOV.
   Les observations des variations de marées de la force de pesanteur à Krasnaya Pakhra.
   "Recherches gravimétriques" XIII division du programme AGI (gravimétrie) N° 1, M., 1960.

5. P.S. MATVEEV
   Analyse harmonique d'une série d'un mois d'observations de marées.
   Trav. de l'Obs. Grav. de Poltava. T. IX. Ac. des Sc. d'Ukraine K. 1961.

6. P. MELCHIOR
   Résultats de seize mois d'enregistrements de la marée à l'Observatoire Royal de Belgique (Uccle) à l'aide du Gravimètre Askania N 145 (1958-1959)
   Annales de l'Obs. r. Belg., Troisième sér. tome VIII, fasc. 4, S. Géoph. N 53, Liège, 1960.

7. L. STEINMETZ
   Sur les enregistrements obtenus avec un gravimètre North-American soumis à l'étalonnage continu par attraction électrostatique.
   Quatrième Symposium International sur les Marées terrestres, Bruxelles, 5-10 juin 1961.

8. Bolletino di geofisika, Anno II, N 5, Marzo 1960.
   Proceedings of the Third International Symposium on Earth Tides, Trieste, 1959.

ELASTISCHE NACHWIRKUNGEN AN EINEM ASKANIA-GRAVIMETER GS 11

von

Dietrich SIMON

1. VORBEMERKUNG

Bei der Analyse von Nullpunktsgängen des Gravimeters GS 11 N° 188 auf Luftdruckeffekte hin wurden an den Eichtagen starke Störungen bemerkt [1]. Sie äusserten sich in den Gangdifferenzenkurven meistens als einseitige Ausschläge in Richtung der ersten Eichverstellung der Registrierfeder, was einen Sprung des Percev'schen Ganges in der gleichen Richtung entspricht. Offenbar waren die mittels des Lecolazet'schen Verfahrens * gefundenen Sprunghöhen zu klein bestimmt worden, woraus zu schliessen war, dass nach einer Verdrehung der Registrierfeder der Nachlaufschreiber einige Stunden braucht, bis er seine endgültige Lage erreicht hat.

Als Ursache dieser Erscheinung wurden elastische Nachwirkungen an der Feder angenommen. Fehlerhaft berechnete Sprunghöhen an Eichtagen wirken sich zweifach verfälschend auf die Ergebnisse der harmonischen Analyse von Gravimeterregistrierungen aus. Sie verändern an den Eichtagen den harmonischen Anteil der Aufzeichnungen, dessen Amplitude sie je nach der augenblicklichen Phasenlage vergrössern oder verkleinern können. Ausserdem verfälschen sie die Empfindlichkeitswerte.

Die folgende Arbeit beschäftigt sich daher etwas eingehender mit den durch Eingriffe verursachten langzeitigen Gangstörungen, die die Genauigkeit gravimetrischer Gezeitenregistrierungen beeinträchtigen können. Die Untersuchungen wurden an Hand einer dreimonatigen Registrierung der Schwerevariationen mit dem Gravimeter GS 11 N° 188 im Messstollen des Institutes für theoretische Physik und Geophysik der Bergakademie Freiberg/Sa. in Berggiesshübel/Erzgebirge durchgeführt.

2. NACHWEIS ELASTISCHER NACHWIRKUNGEN AN DER GRAVIMETERFEDER.

2.1 VERGLEICH DER SPRUNGHOHEN

Tabelle 1 bringt einen Vergleich der nach dem Percev'schen Mittelungsverfahren [2] bestimmten Sprunghöhen bei Messfederverstellungen an Eichtagen mit den nach der Methode von Lecolazet [3] berechneten.

---

* Versehentlich wurde in der ersten Mitteilung [1] angegeben, die Registrierkurven wären nach dem Percev'schen Verfahren korrigiert worden. Dieses Verfahren war zwar zur Empfindlichkeitsbestimmung benutzt worden, doch hatte man wegen der oft unterschiedlichen Sprunghöhen beider Eichverstellungen das Lecolazet'sche Verfahren zur Korrektur verwendet.

Tabelle 1

wirkliche Eichungen				gedachte Eichungen			
Eichzeit ab	mittlere Sprunghöhensumme (Percev) $l_1 + l_2$ [mm]	doppelte Sprunghöhen (Lecolazet) $2l_1$ [mm]	$2l_2$ [mm]	Eichzeit ab	mittlere Sprunghöhensumme (Percev) $l_1 + l_2$ [mm]	doppelte Sprunghöhen (Lecolazet) $2l_1$ [mm]	$2l_2$ [mm]
19.3.; 12^{00}	127,7	118,0	116,8	21.3.; 0^{00}	199,0	199,5	198,0
25.3.; 10^{00}	204,6	214,8	205,4	30.3.; 0^{00}	199,5	199,5	197,0
1.4.; 8^{00}	248,9	240,1	246,0	4.4.; 0^{00}	198,0	200,8	198,3
8.4.; 12^{00}	222,2			11.4.; 0^{00}	199,2	201,6	200,9
21.4.; 8^{00}	210,6	207,0	217,0	19.4.; 0^{00}	199,8	202,1	200,5
28.4.; 8^{00}	218,2	217,0	209,5	1.5.; 0^{00}	199,3	202,3	200,9
5.5.; 8^{00}	217,4	214,1	217,4	9.5.; 0^{00}	198,7	199,4	199,2
13.5.; 9^{00}	210,1	184,9	208,8	17.5.; 0^{00}	200,4	199,2	199,0
20.5.; 10^{00}	198,1	184,3	197,9	23.5.; 0^{00}	200,5	200,0	198,0
25.5.; 11^{00}	212,9	198,8	201,0	30.5.; 0^{00}	198,7	196,2	200,7
3.6.; 9^{00}	197,7	196,2	189,5	6.6.; 0^{00}	198,0	199,3	199,5

Das Percev'sche Verfahren liefert die durchschnittliche Sprunghöhe als Mittelwert von 24 einzelnen Sprungbestimmungen, bei denen durch eine geeignete Kombination von 4 gemessenen Ordinaten die Hauptgezeitenwellen jeweils ausgeschlossen werden. Man erhält die Summe der beiden Sprünge l_1 und l_2 nach der Formel

$$l_1 + l_2 = (Y_1 + Y_4) - (Y_2 + Y_3),$$

wobei der zweite, dritte und vierte Messwert entsprechend 24, 25 und 49 Stunden nach dem ersten liegt.

Die Lecolazet'sche Methode benutzt dagegen zur Sprungberechnung jeweils nur 4 Messwerte zu beiden Seiten des Sprunges, von denen in der Reihenfolge der Gewichte + 35, ± 21, ± 7, ± 1 diejenigen Messwerte jeweils das grössere Gewicht erhalten, die dem Sprunge am nächsten sind. Ein Vorteil des Verfahrens ist die getrennte Berechnung der Sprunghöhen von beiden Verstellungen. Das ist zwar für die Empfindlichkeitsbestimmung unnötig, wird aber zur Korrektur der Registrierkurve vor der harmonischen Analyse erforderlich.

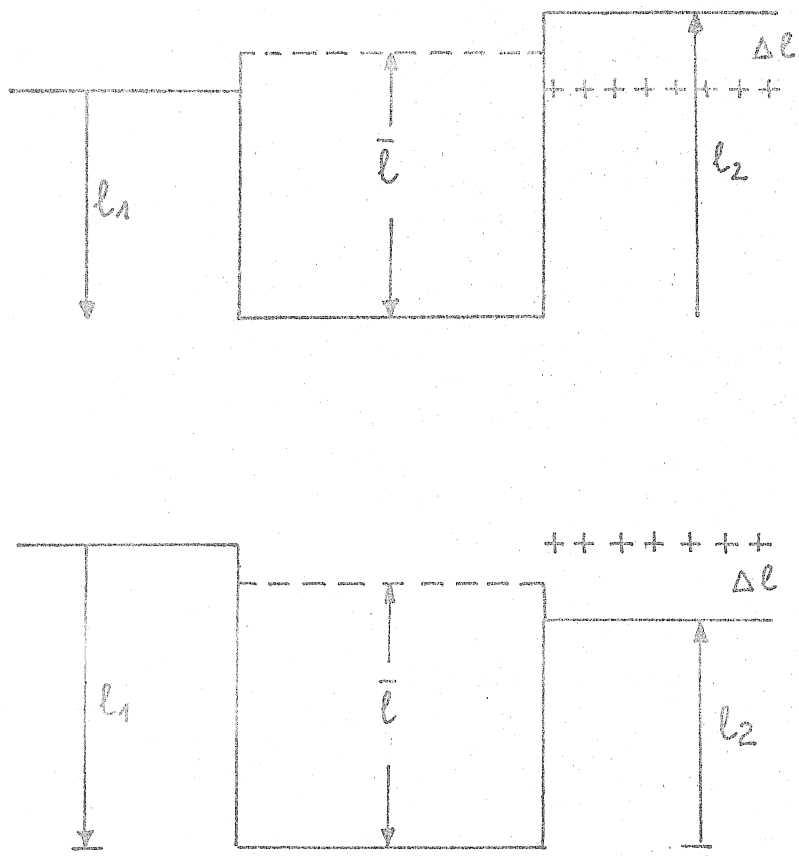
Denn wie die folgenden Abbildungen zeigen werden, sind die bei der Eichung verursachten Sprünge nicht immer gleich gross. Sei beispielsweise die erste Sprunghöhe l , die zweite $l + \Delta l$ aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Einstellung. Der Percev'sche Mittelwert beträgt dann, wenn man von elastischen Nachwirkungen absieht und die Gangfeder korrigiert, etwa $l + \frac{\Delta l}{2}$. Verbessert man nun die Registrierkurve mit Hilfe des Mittelwertes, so sind, wie Abb. 1 oben veranschaulicht, die 25 Werte während der Eichung um $\frac{\Delta l}{2}$ zu gross, während die folgenden unkorrigiert bleiben, obwohl sie sogar um Δl zu gross sind. Ist dagegen die erste Eichverstellung grösser als die zweite, so sind die ersten Werte entsprechend um $\frac{\Delta l}{2}$, die zweiten um Δl zu klein (Abb. 1 unten)

Unabhängig davon, ob elastische Nachwirkungen existieren oder nicht wird man bei Verwendung des Percev'schen Mittelwertes zur Sprungkorrektur Sprünge in das Registriermaterial hineinbringen, die bei einer getrennten Sprungberechnung möglicherweise vermieden werden könnten. Ob hierzu freilich die Lecolazet'sche Methode wirklich geeignet ist, wird sich im folgenden erweisen. Tabelle 1 lässt erkennen, dass die doppelten Lecolazet'schen Sprungwerte in der Mehrzahl der Fälle kleiner als die Percev'schen Mittelwerte sind.

Die Abweichungen betragen durchschnittlich etwa 5 mm bis maximal 25 mm. Besonders die Werte aus der ersten Verstellung sind meistens zu klein. Da in die Lecolazet'sche Rechnung nur wenige Werte (aus der Umgebung der Sprünge) eingehen, der Percev'sche Wert aber über die ganze Eichperiode gemittelt ist, hat man hiermit ein Argument für elastische Nachwirkungen an der Gravimeterfeder.

Um zu prüfen, ob diese Abweichungen an den Eichtagen signifikant sind oder nur durch die üblichen Gangunregelmässigkeiten hervorgerufen werden, das heisst um gewissermassen den "Nulleffekt" zu studieren, wurden für gedachte Eichverstellungen gleicher Grössenordnung (100 mm) vor und nach jeder Eichung nach beiden Methoden die Sprunghöhen berechnet. Tabelle 1 zeigt auf der rechten Seite, dass die neu berechneten Sprunghöhensummen untereinander und vom wahren doppelten Sprungwert um durchschnittlich 1,5 mm abweichen.

ABB. 1



——— REGISTRIERKURVE

– – – – FALSCH KORRIGIERT WÄHREND } DER

– – – – RICHTIGER VERLAUF NACH } EICHUNG

2.2 BEURTEILUNG DER BRAUCHBARKEIT DER GEFUNDENEN SPRUNGWERTE AN HAND DER GANGDIFFERENZENKURVEN

Da die durch elastische Nachwirkungen verfälschten Messwerte ebenfalls in den Percev'schen Mittelwert eingehen, ist zu erwarten, dass auch dieser zu klein berechnet wurde. Das lässt sich gut an Hand der Gangdifferenzenkurven zeigen, die nach den Sprungkorrekturen aus dem Percev'schen Gang berechnet wurden.

Die Anlagen 1 und 2 stellen die 5-stündigen Differenzen des Nullpunktsganges für die Fälle dar, dass die Registrierkurven einmal mit den Lecolazet'schen und einmal mit den Percev'schen Sprungwerten aus Tabelle 1 korrigiert wurden. Der Percev'sche Sprungwert bringt an manchen, jedoch nicht an allen Eichtagen eine merkliche Verringerung der Gangstörungen. Der Richtungssinn der Abweichungen bleibt aber erhalten, woraus man nach den einleitenden Bemerkungen wiederum auf zu klein berechnete Sprunghöhen schliessen wird. Wegen der Konstanz der Störungsrichtung scheint dieser Fehler die anderen durch die ungleiche Länge der Sprünge hervorgerufenen zu überwiegen, bei welchen eine statistische Schwankung der Störungsrichtungen zu erwarten ist. Übrigens lässt sich beobachten, dass am 25.3., an welchem der Lecolazet'sche Sprungwert den Percev'schen überwiegt, auch die Störungsrichtung im Gegensatz zu sonst nach oben gerichtet ist.

Die Korrektur der Registrierkurven mit Hilfe der Percev'schen Sprungwerte hat offenbar keine ausreichende Verbesserung gebracht. Die elastischen Nachwirkungen sind demnach so gross, dass sie den Mittelwert entscheidend verfälschen. Voraussetzung für eine Verbesserung der Eichmethode ist es nun, zu wissen, wie lange diese Störungen anhalten, um durch Mittelung der unverfälschten Sprunghöhen noch einen brauchbaren Endwert zu erhalten.

2.3 UNTERSUCHUNG DES STÖRUNGSVERLAUFES AN DEN EICHTAGEN AN HAND DER PERCEV'SCHEN SPRUNGHÖHENKURVEN

Einen Hinweis auf die Dauer der elastischen Nachwirkungen bei Gravimeterfedern können die zeitlichen Schwankungen jener 24 Percev'schen Sprunghöhensummen geben, die bei einer Eichung durch die oben beschriebenen Ordinatenkombinationen erhalten werden.

Zur Abschätzung des "Nulleffektes", d.h. der Unregelmässigkeiten, die durch die nicht mit der Eichung zusammenhängenden Gangänderungen verursacht werden, dienen wiederum die Percev'schen Sprunghöhenkurven von gedachten Eichverstellungen. Hierzu wurden die zu den Mittelwerten aus Tabelle 1 gehörenden Kurven benutzt.

Abbildung 2 bringt die Kurven der Sprunghöhensummen von 11 echten und 11 gedachten Eichungen, die sich einander zeitlich abwechseln.

Man erkennt sofort, dass durch die Eichung eine Verstärkung des Nullpunktganges auf etwa das 5-fache der sonstigen Schwankungsbreite bewirkt wird. Mit einer Ausnahme (25.3.) liegen die Mittelwerte der ersten 12 Stunden erheblich tiefer als die Mittelwerte der letzten 12 Stunden. Da in den Anfangswerten die Ordinaten unmittelbar nach den Verstellungen enthalten sind (so gehen z. B. in den ersten Wert die Ordinaten der 24. und 49. Stunde, d.h. der ersten Werte nach den beiden Sprüngen ein), hat man hiermit wiederum einen Beweis für die Existenz elastischer Nachwirkungen

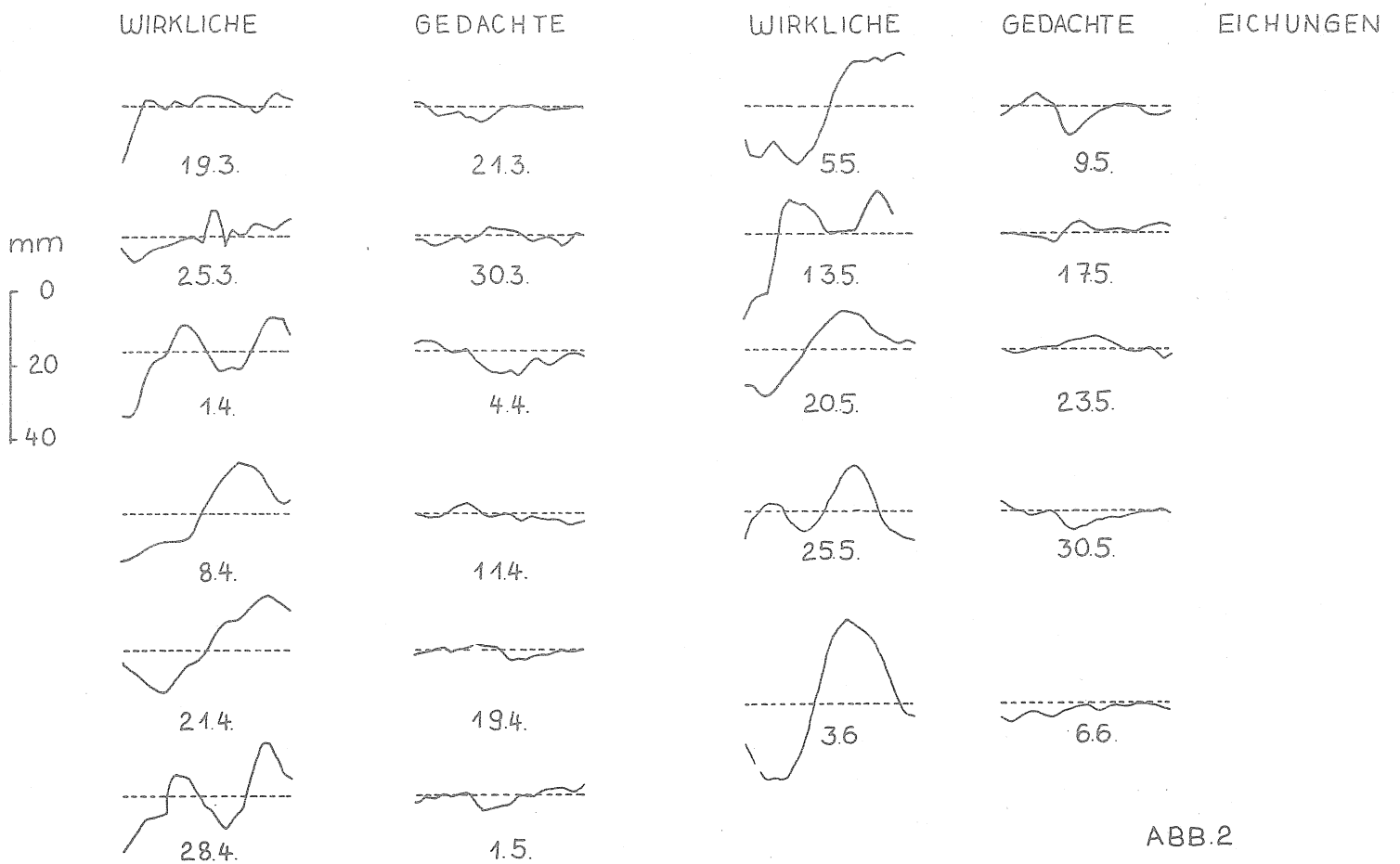

WIRKLICHE
GEDACHTE
WIRKLICHE
GEDACHTE
EICHUNGEN
mm
0
20
40
19.3.
21.3.
5.5.
9.5.
25.3.
30.3.
13.5.
17.5.
1.4.
4.4.
20.5.
23.5.
8.4.
11.4.
25.5.
30.5.
21.4.
19.4.
3.6
6.6.
28.4.
1.5.

ABB.2

Aus der Abbildung lässt sich weiter ablesen, dass die starken Gangänderungen nach Ablauf von 25 Stunden noch garnicht abgeklungen sind. Daraus ergeben sich schwerwiegende Bedenken gegen die bisher übliche Eichmethode. Das Percev'sche Verfahren einschliesslich seiner Verbesserung durch Dobrochotov [4] berücksichtigt die elastischen Nachwirkungen nicht, sondern versucht lediglich die durch die Gezeitenbewegungen und die statistischen, auf meteorologische Variationen usw. zurückgehenden Gangänderungen verursachten Fehler bei der Sprunghöhenbestimmung durch ein geeignetes Mittelungsverfahren zu eliminieren.

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungen besteht keine Veranlassung zu der Annahme, dass der so gefundene Mittelwert die wahre Endstellung der Feder nach dem Abklingen der elastischen Nachwirkungen repräsentiert.

2.4 DARSTELLUNG DER ELASTISCHEN GANGSTÖRUNGEN AN DEN EICHTAGEN DURCH ELIMINATION DER GEZEITENSCHWANKUNGEN

Der sog. Percev'sche Nullpunktsgang lässt infolge der fehlerhaften Sprungkorrektur an den Eichtagen und der Art seiner Berechnung aus einer Kombination von 6 Messwerten, die nach einer bestimmten Vorschrift einer Serie von 38 Stundenwerten entnommen werden [5], über den wahren Kurvenverlauf an den Sprungstellen im Unklaren.

Um die durch die Eichung verursachten Störungen sichtbar zu machen, muss man zuvor die Gezeitenschwankungen auf andere Art und Weise beseitigen. Von G. Seifert [6] wurde der Versuch, durch Subtraktion einer aus den 6 Haupttiden zusammengesetzten Gezeitenkurve den wahren Gang anzunähern, mit dem Ergebnis abgebrochen, dass die Summe der vernachlässigten kleineren Tiden einen zu grossen Fehler verursacht und somit kleinere Gangstörungen von wenigen Stunden Dauer nicht mit Sicherheit eliminiert werden können.

Als Ausgangswerte für die Gezeitensynthese, die auf der Gezeitenrechenmaschine des Institutes für Meereskunde in Warnemünde durchgeführt wurde, dienten die Mittelwerte der Resultate von Klinometeraufzeichnungen eines halben Jahres. Diese Mittelwerte sollten die wahre Gezeitenbewegung im Messintervall möglichst gut annähern, da für diesen Zeitraum noch keine harmonischen Analysen durchgeführt worden waren.

Eingehende Untersuchungen des Luftdruckeinflusses auf Klinometerregistrierungen haben inzwischen gezeigt, dass durch harmonische Luftdruckänderungen zusätzliche Störungen in die Horizontalpendelaufzeichnungen hineinkommen, die z. B. bei den ganztägigen Tiden bis zu 30 % (K_1-Tide), 100 % (O_1-Tide) und 400 % (Q_1-Tide) der wahren Gezeitenschwankung betragen können [7]. Da diese Beträge von Woche zu Woche stark schwanken, sind für eine Gezeitensynthese unbedingt die Ergebnisse der zum gleichen Zentraltag gehörenden harmonischen Analyse erforderlich.

Anlage 3 zeigt die Ergebnisse einer Gezeitensynthese und den zugehörigen Restgang für eine Klinometerregistrierung (Lettaupendel L II, 14.12.1960 - 14.1.1961, Station Tiefenort) zusammen mit der nach dem gleichen Verfahren gewonnenen Luftdruckkurve.

Als Ausgangsdaten für die Gezeitensynthese wurden die bei der Doodsonschen Analyse gefundenen unkorrigierten Amplituden- und Phasenwerte der 6 Haupttiden Q_1, O_1, K_1, N_2, M_2 und S_2 benutzt, in denen noch die Störtiden enthalten sind. Wie man aus der Abbildung erkennt, ist die Übereinstimmung mit dem Luftdruckgang so gut, dass sich noch kleine Störungen von der Dauer weniger Stunden mit Sicherheit wiederfinden lassen. Die so erhaltenen Restschwankungen eignen sich deshalb auch viel besser zum Phasenvergleich mit dem Luftdruck als die Percev'schen Gangkurven [7].

Man kann also, was für die weiteren Untersuchungen des Gravimeterganges wichtig ist, mit den 6 Haupttiden den grössten Teil der harmonischen Schwankungen so gut aus den Gezeitenregistrierungen entfernen, dass die verbleibenden grösseren Reststörungen mit Sicherheit nicht durch eine Überlagerung der vernachlässigten kleineren Tiden nur vorgetäuscht werden. Nun haben die Horizontalpendel den Gravimetern gegenüber den Vorteil besserer Empfindlichkeitskonstanz und sind weitgehend frei von Sprüngen, durch deren fehlerhafte Korrektur die Analysenresultate verfälscht werden können.

Die Annäherung des wahren nichtharmonischen Ganges durch Subtraktion der synthetischen Gezeitenkurve ist daher in den Anlagen 4-5 für das Gravimeter nicht so gut wie beim Horizontalpendel * Trotzdem sind die eichungsbedingten Störungen wegen ihrer Grösse deutlich zu erkennen. Merkwürdigerweise stimmen die Gangstücke während der Eichung, wenn man die entgegengesetzte Ausschlagsrichtung beachtet, selbst in kleineren Einzelheiten ausserordentlich gut mit den Percev'schen Kurven der Sprunghöhensummen überein.

Das ist darauf zurückzuführen, dass neben den Messwerten vor der Eichung, die ja nur den "gewöhnlichen" Gang enthalten, auch die Werte nach der zweiten Eichverstellung verhältnismässig wenig gestört sind.

Die grössten Störungen treten offenbar nach der ersten Messfederverstellung auf, bei welcher stets der sog. "tote Gang" der Spindel durch Drehen über den einzustellenden Wert hinaus und Einstellen von der linken Seite her beseitigt wurde. 25 Stunden später wurde jedesmal der Ausgangswert durch gleichmässiges Bewegen der Spindel in einem Zug ebenfalls von links her eingestellt. Möglicherweise ergibt sich hieraus ein Hinweis auf die Ursache der elastischen Störungen.

Mit der übereinstimmung von Percev'schen Sprunghöhensummenkurven und den durch Elimination der Hauptgezeitenwellen an den Eichtagen erhaltenen Restschwankungen ist die Existenz starker elastischer Nachwirkungserscheinungen einschliesslich ihrer weiter oben abgeleiteten Eigenschaften endgültig bewiesen.

---

* Eine Ursache dafür ist auch, dass im Gezeitensyntheseinterval (31 Tage) die Empfindlichkeit e = konst. = 1 gesetzt wurde, um die Gezeitenwellen im gleichen Massstabe wie die Registrierwerte auszudrücken. Die wahren (veränderlichen) Empfindlichkeitswerte waren ja ohnehin nicht bekannt.

Da bei der Percev'schen Sprunghöhenberechnung augenscheinlich die Gezeitenschwankungen besser eliminiert wurden als beim zuletzt geschilderten Versuch einer ersten Annäherung des Restganges, hat man aus dem Vergleich der Sprunghöhenkurven von wirklichen und gedachten Eichungen auch das wahre Amplitudenverhältnis der eichungsbedingten Gangstörungen zu den normalen Nullpunktsschwankungen etwas genauer. Es beträgt nach den Ergebnissen von Abschnitt 2.3 etwa 5 : 1.

3. EINFLUSS DER SPRUNGHOHENFEHLER AUF DIE ERGEBNISSE DER HARMONISCHEN ANALYSE.

Aus den Anlagen 4-5 lässt sich ableiten, dass der bei Nichtberücksichtigung der elastischen Nachwirkungen begangene Sprunghöhenfehler etwa 5-8 mm beträgt, das sind annähernd 20 % der maximalen Gezeitenamplitude. Dieser Fehler wirkt sich, wie bereits in Abschnitt 1 gesagt wurde, sowohl auf die Empfindlichkeitswerte als auch auf die Ergebnisse der harmonischen Analyse aus.

Die Massstabsfehler betragen bei den benutzten Sprunghöhen von etwa 100 mm demnach 5-8 % . Der Einfluss von Sprunghöhenfehlern direkt auf die Resultate der harmonischen Analyse lässt sich schwer abschätzen, weil sie in den Beträgen und Richtungen wechseln. Doch ist bei einer Gravimeterregistrierung, die aus kurzen Registrierstücken besteht, die an den Enden falsch aneinandergepasst sind und zudem noch starke elastische Gangstörungen aufweisen, bei weitem nicht die Genauigkeit einer ungestörten Klinometerregistrierung zu erwarten. Ungestörte Horizontalpendelregistrierungen mit guter Empfindlichkeitskonstanz sind in gebirgsschlagarmen Bergwerken häufig erzielt worden. Im Gegensatz zu einer weitverbreiteten Ansicht kann man daher mit Klinometerregistrierungen, wenn der Gang und damit die harmonischen Störungen sicher bekannt sind, genauere Resultate erzielen [7] als es zur Zeit mit Hilfe von Gravimetern möglich ist.

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN AUS DEN ERGEBNISSEN FÜR DIE EICHUNG VON GRAVIMETERN MIT ELASTISCHEN NACHWIRKUNGEN.

Da die elastischen Nachwirkungen oft nach 25 Stunden Eichdauer noch nicht abgeklungen sind, darf die zweite Eichverstellung erst nach einigen Tagen erfolgen.

Mit Hilfe der Percev'schen Sprunghöhenkurve für eine gedachte Eichung kann nachgeprüft werden, ob sich der Gang wieder normalisiert hat. Für eine vollständige Percev'sche Ganghöhensummenkurve werden 73 Stundenwerte benötigt.

Aus diesem Grunde wird vorgeschlagen, als zeitlichen Abstand der beiden Eichverstellungen etwa 4 Tage zu wählen, um wenigstens eine ungestörte Ganghöhensummenkurve von etwa 15 Stunden Dauer zu haben. Zur Elimination der Gezeiten ist bei dieser Eichmethode das Percev'sche Mittelungsverfahren nicht mehr anwendbar.

Es wird vorgeschlagen, durch eine Art Näherungsverfahren nach dem folgenden Schema (Abb. 3) die Auswertung der Gravimeterregistrierungen durchzuführen.

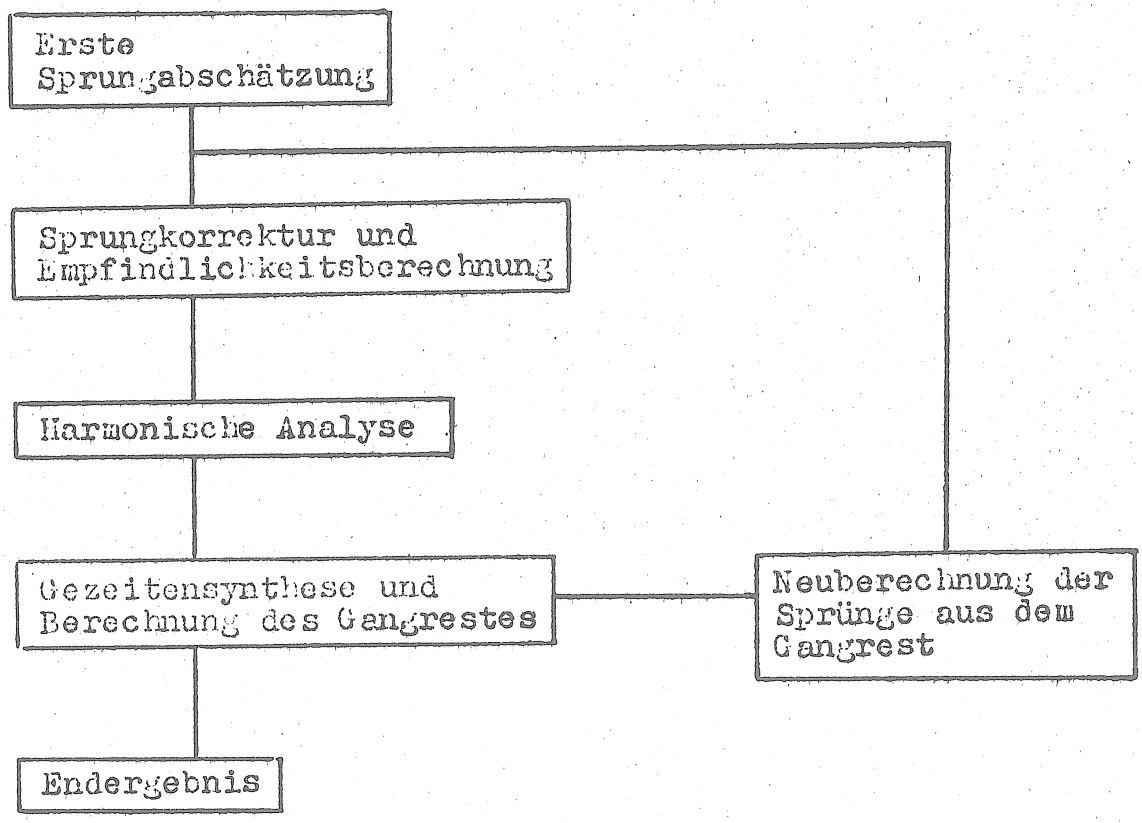


Abb. 3

Schema für ein Näherungsverfahren zur Auswertung von Gravimeterregistrierungen bei Eichverstellungen mit viertägigem Abstand

Dieses Verfahren gestattet eine gleichzeitige Berücksichtigung der "normalen" Gangänderungen sowie die für die Korrektur der Registrierkurve notwendige getrennte Berechnung der beiden Sprunghöhen einer Eichung. Zur Erzielung einwandfreier Gangkurven wäre die Berücksichtigung weiterer kleiner Tiden bei der harmonischen Analyse vorteilhaft. Um die Zahl der notwendigen Eichungen einzuschränken, ist es zweckmässig, zwei oder mehrere Gravimeter parallel registrieren zu lassen, die man abwechselnd eichen kann. Durch Vergleiche mit den Parallelinstrumenten lässt sich dann die ungestörte Registrierkurve des gerade geeichten Gerätes rekonstruieren.

Herrn Prof. Dr. W. Buchheim danke ich für sein förderndes Interesse an dieser Arbeit.

LITERATUR.

1. SIMON, D. und WALZER, U.
Zur Eichung von gravimetrischen Gezeitenregistrierungen.
Marées terr. Bull. Inf. , Bruxelles (1965) N° 42, S. 1604-1608.

2. PERCEV, B.P.
Expérience de détermination des coefficients d'échelle d'enregistrement pour les observations de marées de la force de pesanteur.
Sh. "Recherches gravimétriques" N° 1 "Résultats A.G.V." Vzd-vo. Ac. des Sc. URSS. 1960.

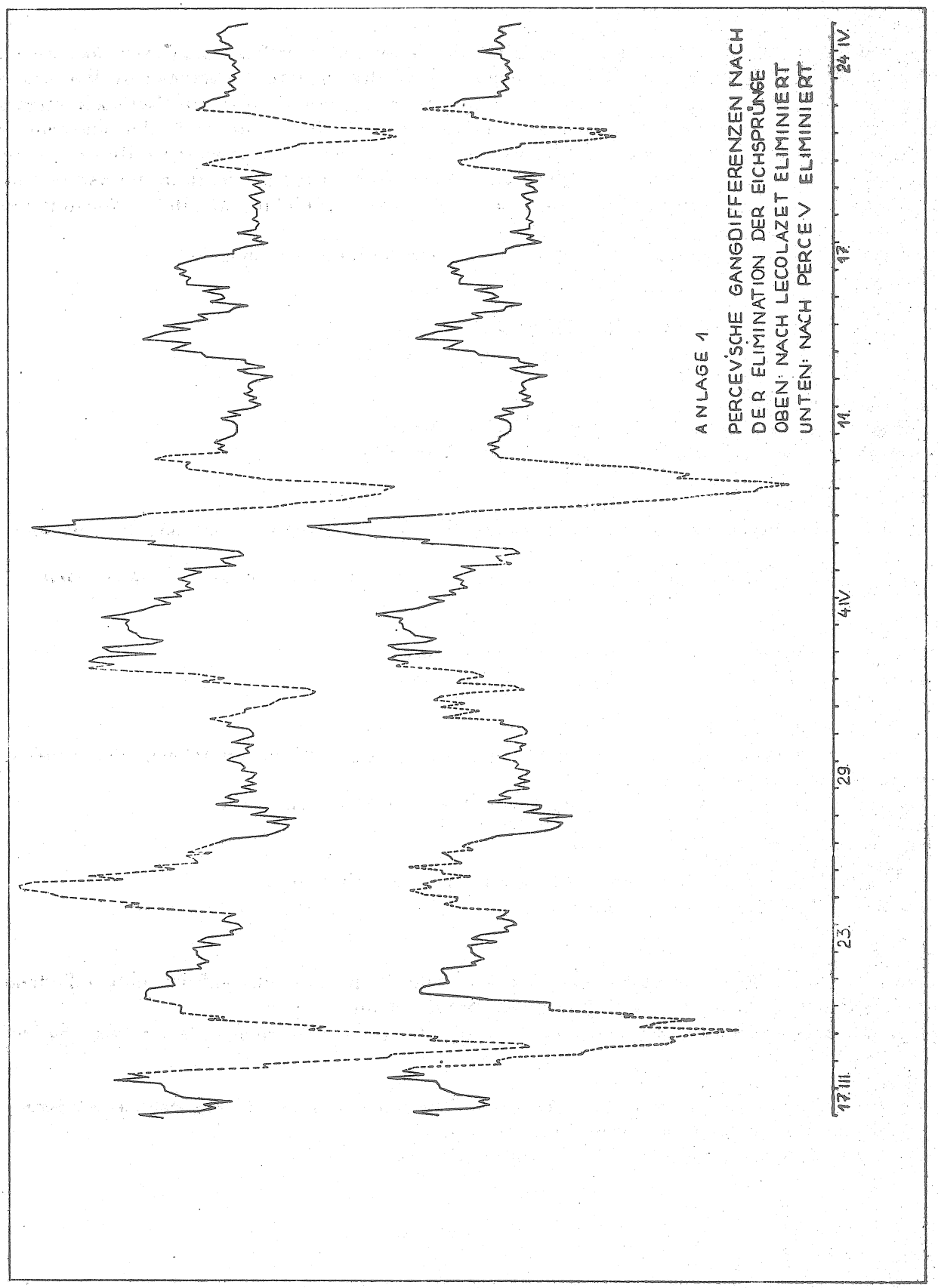
3. LECOLAZET, R.
Sur la reconstitution des observations par interpolation.
Inst. de Phys. du Globe de Strasbourg, Bruxelles (1961)

4. DOBROCHOTOV, You.S.
Erreurs de détermination du coefficient d'étalonnage pendant l'enregistrement des marées, dues à la dérive du gravimètre.
Rech, sur les Marées Terr. Art. N° 3 Publ. Acad. Sc. URSS. Moscou 1963.

5. PERCEV, B.P.
On the calculation of the drift curve in observations of bodily tides.
Marées terr. Bull. Inf. Bruxelles (1957) N° 5, S. 71-72.

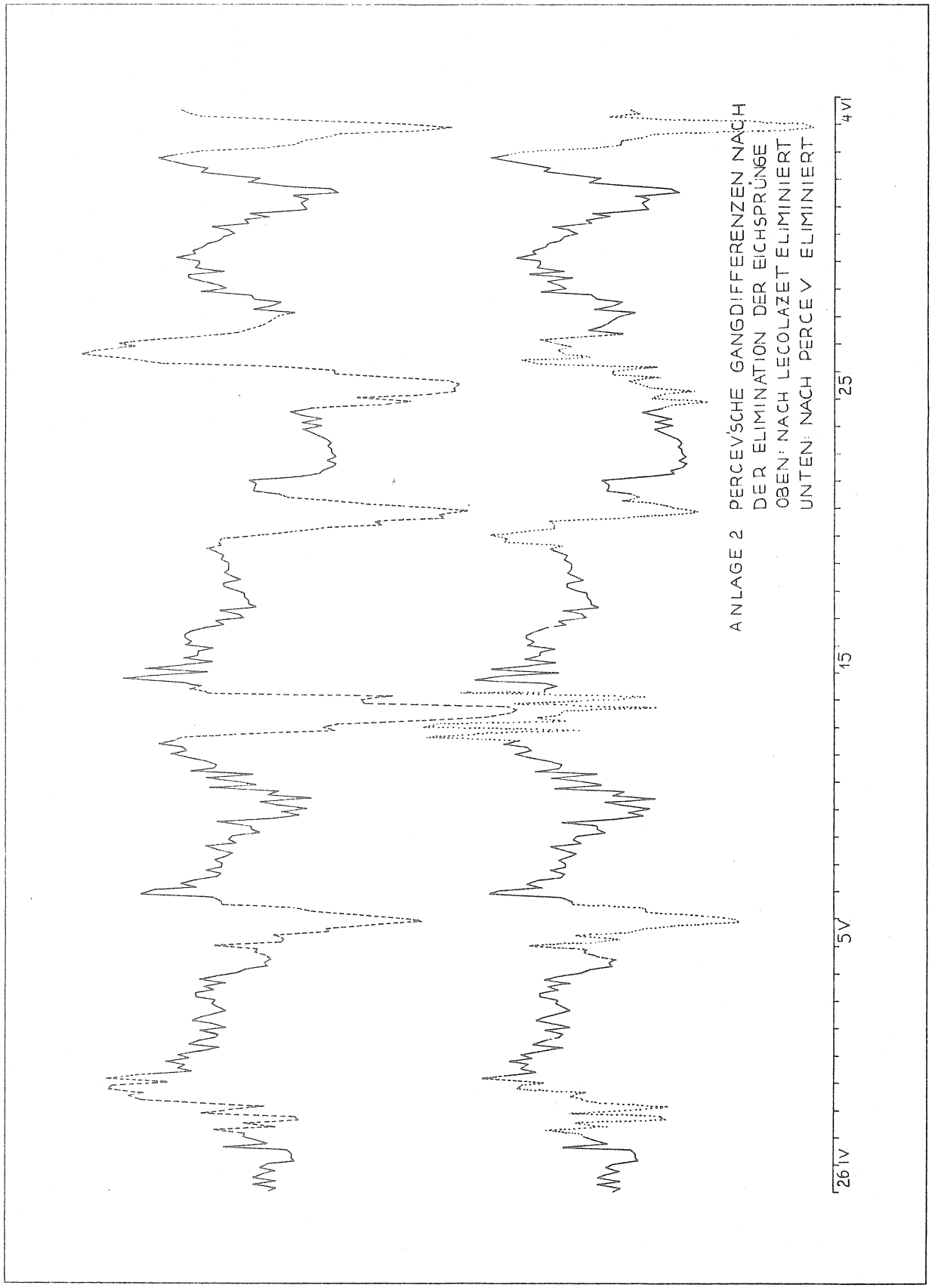
6. SEIFERT, G.
Auswertung der Erdgezeitenregistrierungen mit Lettaudoppelpendeln auf der Station Tiefenort auf kurzzeitige, nicht meteorologisch bedingte Störungen hin.
Unveröff. Diplomarbeit am Inst. f. theor. Physik u. Geoph. der Bergakademie Freiberg/Sa 1963.

7. SIMON, D.
Uber den Einfluss von Luftdruckänderungen und Meeresgezeiten auf die Ergebnisse der harmonischen Analyse von Horizontalpendelaufzeichnungen.
Marées terr. Bull. Inf., Bruxelles N° 44 (1966) im Druck.

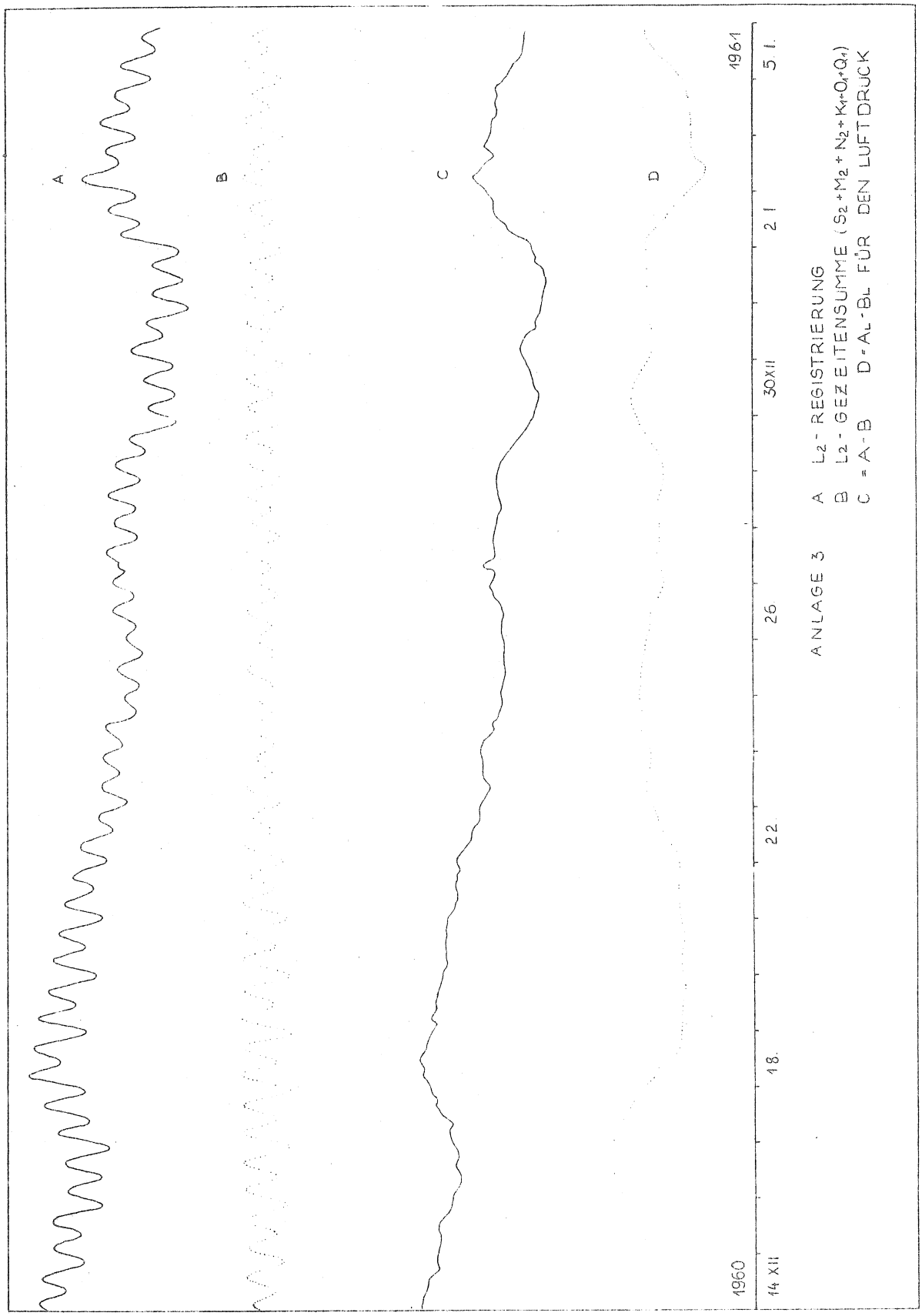


ANLAGE 1

PERCEVSCHE GANGDIFFERENZEN NACH DER ELIMINATION DER EICHSPRÜNGE
OBEN: NACH LECOLAZET ELIMINIERT
UNTEN: NACH PERCEV ELIMINIERT

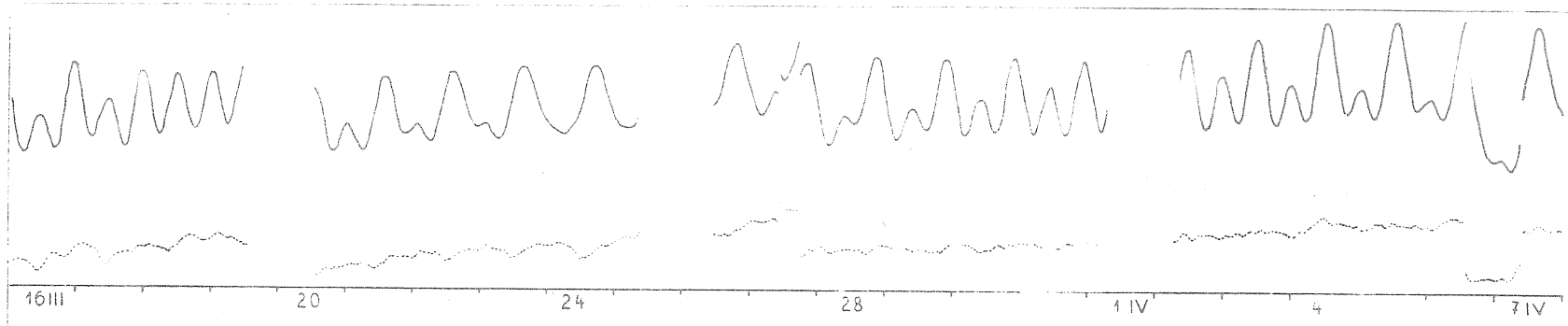


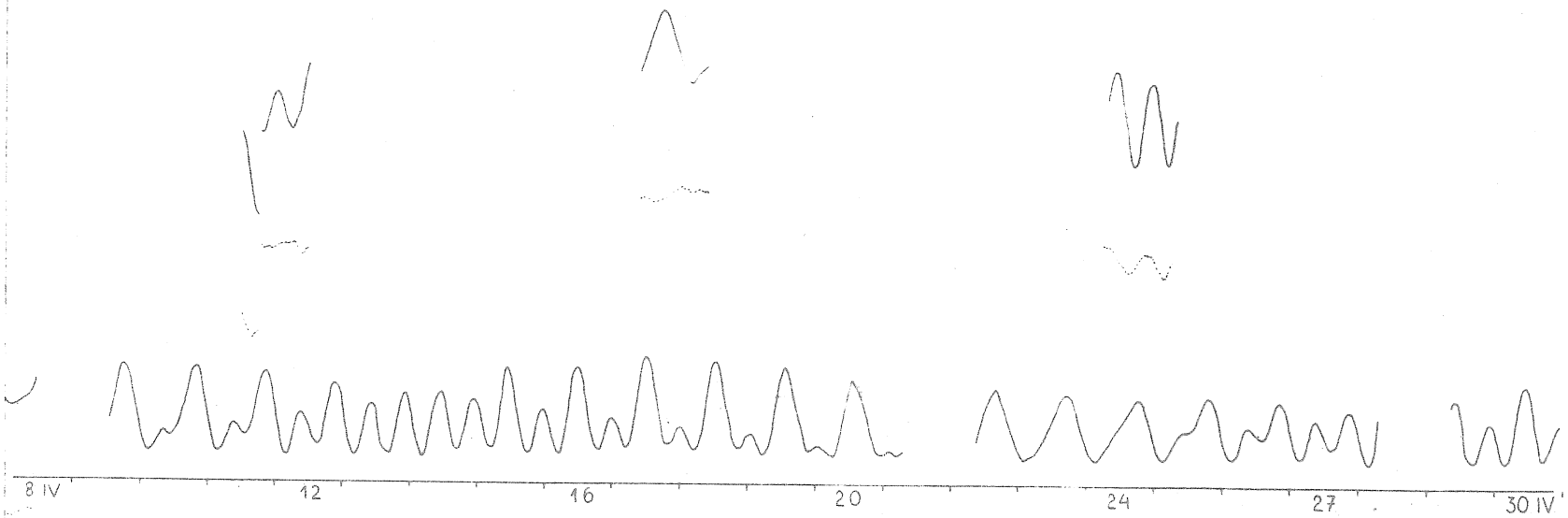
ANLAGE 2 PERCEVSCHE GANGDIFFERENZEN NACH DER ELIMINATION DER EICHSPRÜNGE
OBEN: NACH LECOLAZET ELIMINIERT
UNTEN: NACH PERCE V ELIMINIERT



ANLAGE 3

A L_2 - REGISTRIERUNG
B L_2 - GEZEITENSUMME ($S_2 + M_2 + N_2 + K_1 + O_1 + Q_1$)
C = A - B D = A_L - B_L FÜR DEN LUFTDRUCK



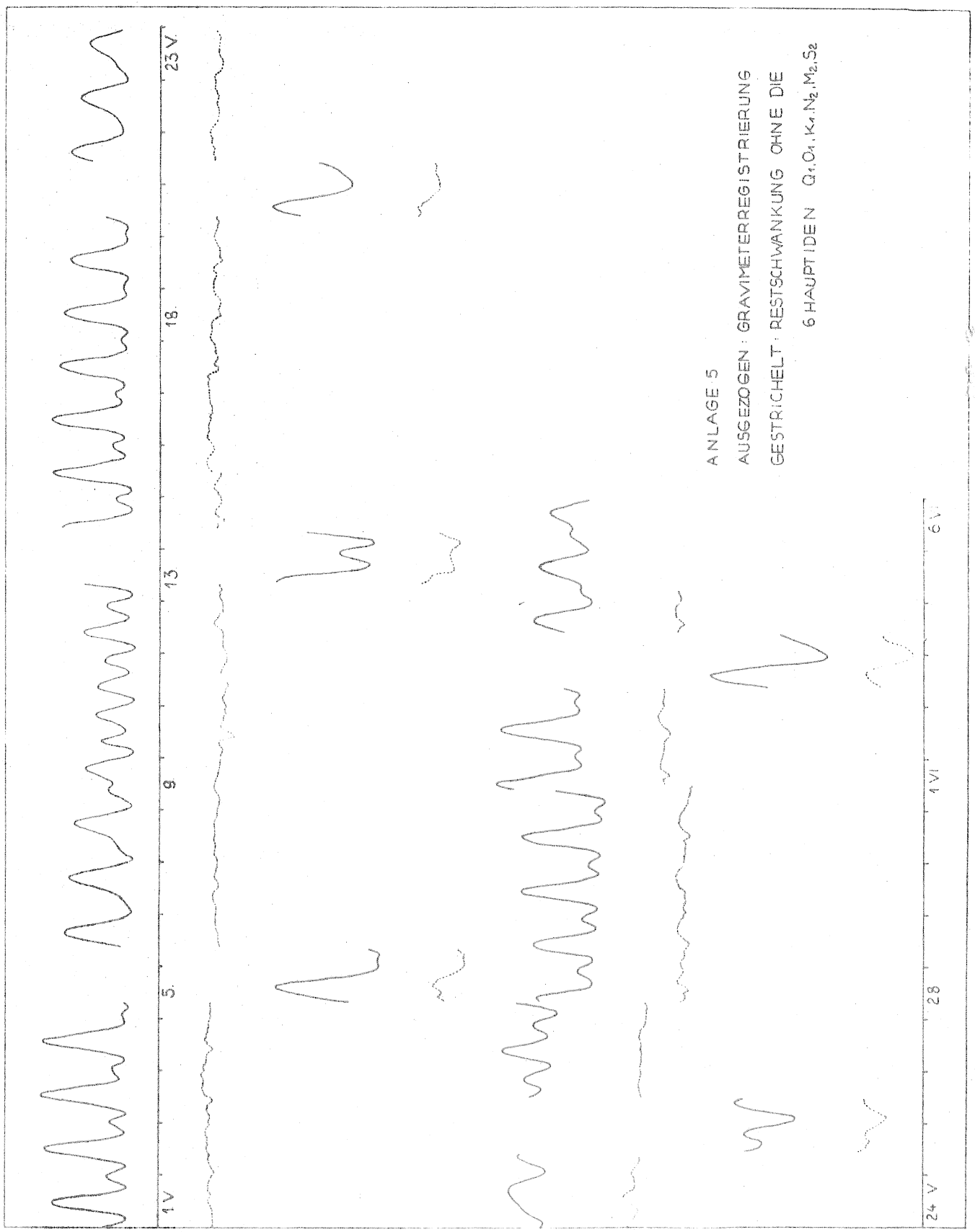


ANLAGE 4

AUSGEZOGEN GRAVIMETERREGISTRIERUNG

GESTRICHELT RESTSCHWANKUNG OHNE DIE

6 HAUPTIDEN $Q_1, O_1, K_1, N_2, M_2, S_2$



ANLAGE 5

AUSGEZOGEN : GRAVIMETERREGISTRIERUNG

GESTRICHELT : RESTSCHWANKUNG OHNE DIE 6 HAUPTIDEN $Q_1, O_1, K_1, N_2, M_2, S_2$