BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE KLASSE

ABHANDLUNGEN · NEUE FOLGE HEFT 75

ANTON GRAF

Beschreibung eines neuentwickelten Seegravimeters und Ergebnisse der ersten Meßfahrt auf dem Starnberger See an Bord der „Seeshaupt"

Mit 28 Abbildungen im Text und auf Tafeln

Vorgelegt von Herrn Max Kneißl
am 2. Dezember 1955

MÜNCHEN 1956

VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
IN KOMMISSION BEI DER C. H. BECK'SCHEN VERLAGSBUCHHANDLUNG

Druck der C. H. Beck'schen Buchdruckerei Nördlingen

INHALT

Beschreibung des Seegravimeters 5

Ergebnisse der ersten Meßfahrt auf dem Starnberger See an Bord der „Seeshaupt“ 11

Diskussion des Meßresultates 16

Zusammenfassung 16

Tafel I/II . . . . . zwischen S. 8 und 9

Abb. 1–18 . . . . . am Schluß

Das Problem der Messung der Schwerkraft auf dem Meere ist bis heute noch nicht befriedigend gelöst. Für Messungen auf dem Meeresgrunde gibt es bereits „Unterwassergravimeter", die aber bisher nur in Küstennähe bis zu Tiefen von 50 bis 100 m eingesetzt wurden. Vening-Meinesz hat im Jahre 1927 einen genialen Seependelapparat für Messungen in U-Booten konstruiert. Damit sind inzwischen mehrere Tausend Punkte im Indischen und Pazifischen Ozean vermessen worden. Eine Registrierung mit diesem Gerät dauert jedoch mehrere Stunden, und die Auswertung der Meßkurven erfordert einen erheblichen Arbeitsaufwand.

Nachdem sich auf dem Festlande das Gravimeter dem Pendelapparat an Meßgenauigkeit und Meßgeschwindigkeit um ein vielfaches überlegen gezeigt hat, lag es nahe, auch für Hochseemessungen Gravimeter zu entwickeln. Dies hat sich der Verfasser zur Aufgabe gestellt und ein registrierendes Seegravimeter zur Messung der Schwerkraft auf dem Wasser konstruiert. Die Messungen mit diesem Gerät können auf vier verschiedene, noch zu erprobende Arten vorgenommen werden:

a) Das Seegravimeter wird in einen druckdichten Stahlkessel eingebaut und auf den Meeresgrund hinabgelassen.

b) Es wird im gleichen Druckkörper wie bei a) zusätzlich mit einem Auftriebskörper versehen und mißt an einer Stahltrosse hängend die Schwerkraft in etwa 50 m Tiefe, wo die Amplituden der Meereswellen und damit der Störbeschleunigungen erheblich geringer sind (etwa ein Zehntel) als an der Oberfläche (Vorschlag von Bartels und Errulat).

c) Es wird wie ein Landgravimeter in einem U-Boot verwendet, doch wird an Stelle des Anzeigegerätes mit einer Registriervorrichtung gearbeitet.

d) Es registriert die Schwerebeschleunigung an Bord eines großen Hochseeschiffes, wobei die periodischen Schiffsbeschleunigungen durch eine extrem starke Dämpfung der Meßausschläge stark verkleinert und weggemittelt werden.

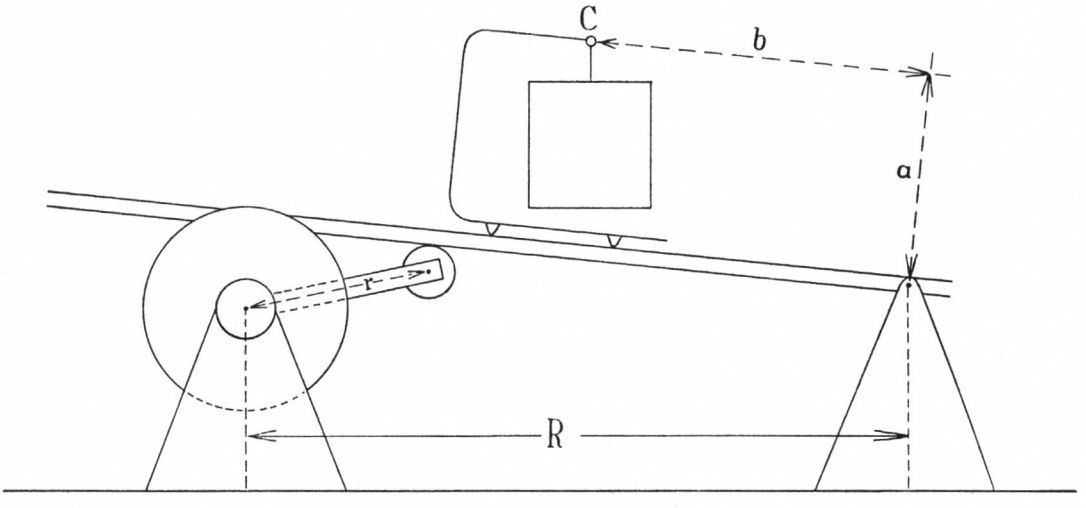
Praktisch wäre das letztere Verfahren nicht nur das bequemste, sondern auch das schnellste und billigste. Die Erzielung einer guten Meßgenauigkeit ist hier allerdings am schwierigsten zu erreichen; denn die durch Wasserwellen und Schiffsvibrationen verursachten vertikalen und horizontalen Beschleunigungen sind für diesen Fall am größten. Sogar bei ruhiger See muß man im Schiffsschwerpunkt mit periodischen Beschleunigungen von 10000 mGal bis 50000 mGal rechnen, während sie im U-Boot und bei Methode b) nur etwa den zehnten Teil und bei Methode a) Null betragen.

BESCHREIBUNG DES SEEGRAVIMETERS[1]

Wie Taf. I, 1 zeigt, hängt das Seegravimeter an einem Kardangelenk in Kugellagern, so daß es sich an Bord eines Schiffes selbst horizontiert. Ein in Öl eintauchender Dämpfungsflügel soll ein Aufschaukeln infolge der Schiffsbewegungen verhindern. Beobachtungen ergaben, daß die Libellen am Gravimeter nur innerhalb ± 1 Minute schwanken, wenn das Schiff Neigungen um $\pm 10^\circ$ bei Perioden von 6 bis 10 Sekunden ausführt. Dies beweist, daß die Richtkraft der Aufhängung zur Überwindung der Reibung genügend groß

[1] Die Entwicklung des Seegravimeters wurde finanziert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und weitgehend gefördert und unterstützt vom Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut.

ist und daß Fehler infolge von Schiffsneigungen nicht zu befürchten sind. Daher brauchte ein anfangs geplanter kreiselgesteuerter Horizontiertisch nicht konstruiert zu werden. Die statische Neigungsempfindlichkeit des hier verwendeten Gravimetertyps beträgt in der günstigsten Lage $\pm$ 90 Sekunden für 0,1 mGal. Daher ist der Fehler genügend klein, wenn sich die Libellen während einer Schiffsfahrt nur innerhalb eines Skalenteils = 60″ bewegen, was praktisch der Fall ist. Freilich ist die Beseitigung der Neigungsempfindlichkeit nicht das Hauptproblem. Schwieriger ist, den Einfluß der Horizontalbeschleunigungen auszuschalten, die auch vorhanden sind, wenn das Gerät im Lot steht. Die Beseitigung dieses Einflusses gelang durch eine Fesselung des Meßsystems dadurch, daß ihm nur ein einziger Freiheitsgrad der Bewegung gelassen wurde, nämlich die Bewegung in der Vertikalebene. Jedes Gravimeter ist bekanntlich eine Federwaage. Das hier verwendete Meßsystem benutzt zwei horizontale Torsionsfedern, die dem Waagebalken mit der Gravimetermasse



Textabb. 1. Skizze der Schlinger- und Stampfvorrichtung.

in der Horizontalen das Gleichgewicht halten. Wird nun die Drehachse reibungsfrei so versteift, daß der Waagebalken nur in der Vertikalebene schwingen kann, so können horizontale Beschleunigungen das Meßsystem nicht beeinflussen.

Zur Prüfung wurde eine Vorrichtung zur Erzeugung von Bewegungen gebaut, die den Schlinger- und Stampfbewegungen eines Schiffes ähnlich sind. Taf. II, 1 zeigt das Gravimeter auf diesem Phantomschiff. Zwei Antriebsaggregate (Taf. II, 2) erteilen der Vorrichtung zwei aufeinander senkrecht stehende Auf- und Abbewegungen mit wahlweise einstellbaren Perioden von 4,1 s, 6,4 s und 13,9 s. Die Skizze in Textabb. 1 läßt erkennen, daß die Vorrichtung zwar keine reine Sinusbewegung erzeugt, weil der Hebel mit dem Radius r keine vertikale, sondern eine Kreisbahn beschreibt, daß aber die Bewegung angenähert sinusförmig verläuft, weil $r = 20$ cm klein ist gegen $R = 180$ cm. Die Meßkurven in Textabb. 2 bestätigen dies. Zu ihrer Gewinnung war nur ein Motor angeschaltet: bei der linken Kurve der schnellere mit 6,4 s und bei der rechten der langsamere mit 13,9 s Periode. Die rechte Kurve läßt deutlich erkennen, daß man sie ausplanimetrieren muß, wenn man den Mittelwert erhalten will, und sich nicht einfach mit dem Mittelwert der Amplituden begnügen darf. Darauf ist auch bei einer wirklichen Schiffsbewegung zu achten. Der Registrierschrieb muß eine genügende Zeitauflösung besitzen. Textabb. 3 zeigt eine Registrierung mit beiden Motoren in Tätigkeit.

Für den vereinfachten Fall, daß r klein ist gegen R, gibt die Ableitung folgende Formeln:

Die beiden Horizontalbeschleunigungen, die aufeinander senkrecht stehen und geometrisch addiert werden müssen, sind:

1. $$h_1 = -\frac{a \cdot r}{R}\,\omega_1^2 \cdot \sin \omega_1 t - \frac{b_1 \cdot r^2}{R^2}\,\omega_1^2 \cdot \cos 2\,\omega_1 t.$$

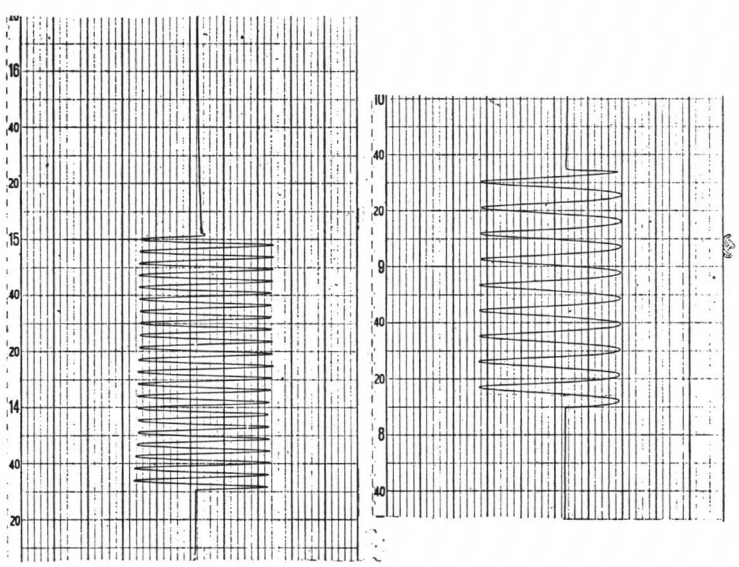
2. $$h_2 = -\frac{a \cdot r}{R}\,\omega_2^2 \cdot \sin \omega_2 t - \frac{b_2 \cdot r^2}{R^2}\,\omega_2^2 \cdot \cos 2\,\omega_2 t.$$

Die beiden Vertikalbeschleunigungen, die gleichgerichtet sind und daher algebraisch addiert werden dürfen, sind:

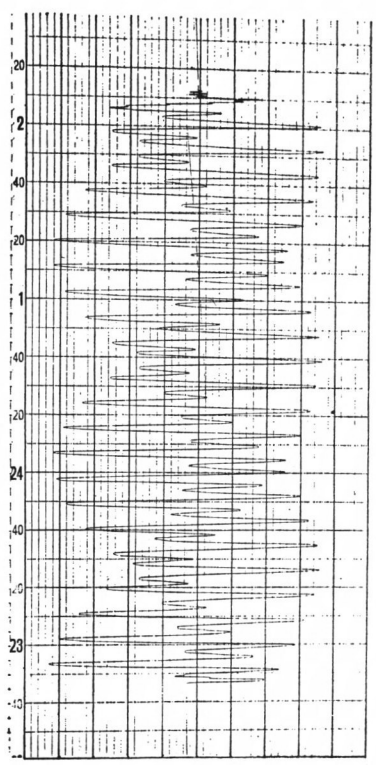
3. $$z_1 = -\frac{b_1 \cdot r}{R}\,\omega_1^2 \cdot \sin \omega_1 t + \frac{a \cdot r^2}{R^2}\,\omega_1^2 \cdot \cos 2\,\omega_1 t.$$

4. $$z_2 = -\frac{b_2 \cdot r}{R}\,\omega_2^2 \cdot \sin \omega_2 t + \frac{a \cdot r^2}{R^2}\,\omega_2^2 \cdot \cos 2\,\omega_2 t.$$

Hierbei sind a und b die Koordinaten des Kardangelenkes in C in bezug auf den Drehpunkt der Schwingvorrichtung, der den Schiffsschwerpunkt symbolisiert. Nach den Formeln 1. bis 4. setzt sich die vertikale und die horizontale Schwereänderung auf einem Schiff aus je vier periodischen Gliedern zusammen, wobei neben der einfachen auch die doppelte



Textabb. 2. Registrierungen auf dem „Phantomschiff", wenn nur jeweils ein Motor angeschaltet ist. Links Periode = 6,4 s und rechts Periode = 13,9 s.



Textabb. 3. Registrierung wie Textabb. 2, jedoch mit beiden Motoren gleichzeitig.

Frequenz auftritt. Die Größe der mit der Vorrichtung nach Textabb. 1 meßbaren Schwereänderung hängt von den Koordinaten a und b ab. Wählt man $a = 0{,}69$ m und $b = 2$ m, so ergibt sich bei der schnellsten Übersetzung (Periode 4,1 s):

$$h_1 = h_2 = 23800 \text{ mGal} \quad \text{und} \quad z_1 = z_2 = 50000 \text{ mGal} \quad \text{bzw.}$$

$$h = \sqrt{h_1^2 + h_2^2} = 33700 \text{ mGal} \quad \text{und} \quad z = z_1 + z_2 = 100000 \text{ mGal} = 1 \text{ m/s}^2.$$

Mit größeren Werten für die Beschleunigung braucht man nicht zu rechnen. Sie kommen zwar bei Sturmfahrten vor (am Bug und Heck bis 5 m/s²), aber niemand wird unter solchen Voraussetzungen messen. Man wird stets bestrebt sein, das Gravimeter im Schiffsschwerpunkt aufzustellen und windstille Tage abzuwarten.

Aus den Formeln 3. und 4. folgt, daß das Glied mit $\sin \omega t$ im Falle $b = 0$ wegfällt. Man sollte demnach, falls der Schiffsschwerpunkt für die Aufstellung nicht zugänglich ist, über oder unter dem Schwerpunkt messen und nicht seitlich von ihm. Denn das Glied mit $\cos 2\omega t$ ist immer kleiner als das mit $\sin \omega t$ wegen der größeren Wirksamkeit der Gravimeterdämpfung, die wie jede Instrumentendämpfung geschwindigkeitsproportional ist.

Diese Dämpfung muß bei einem Seegravimeter extrem stark gemacht werden. Sie hat die Aufgabe, die von den Schiffsbewegungen herrührenden periodischen Vertikalbeschleunigungen soweit wie möglich zu unterdrücken bzw. zu eliminieren. Während man bei den meisten Meßinstrumenten den aperiodischen Grenzfall wählt, ist hier stark kriechende Einstellung erforderlich. Es ist mir gelungen, die Amplitude bei einer Periode von 4,1 s auf weniger als 1% zu reduzieren (bei einer Periode von 6,4 s auf 2% und bei einer Periode von 13,9 s auf 5%).[1] Eine periodische Vertikalbeschleunigung von 20000 mGal wird daher vom Schreiber je nach Periode nur mit 1000 mGal, 400 mGal oder 150 mGal aufgezeichnet. Dabei ist natürlich wesentlich, was und wo gedämpft wird. Es nützt wenig, wenn, wie manche vorgeschlagen haben, das Anzeigeverfahren so ausgearbeitet wird, daß nur Mittelwerte in Erscheinung treten. Es kommt vielmehr darauf an, daß der Waagebalken des Gravimeters nur mäßige Amplituden macht, weil jedes Meßinstrument nur innerhalb gewisser Grenzen linear arbeitet und strenge Linearität die Voraussetzung für die Anzeigemittelung ist.

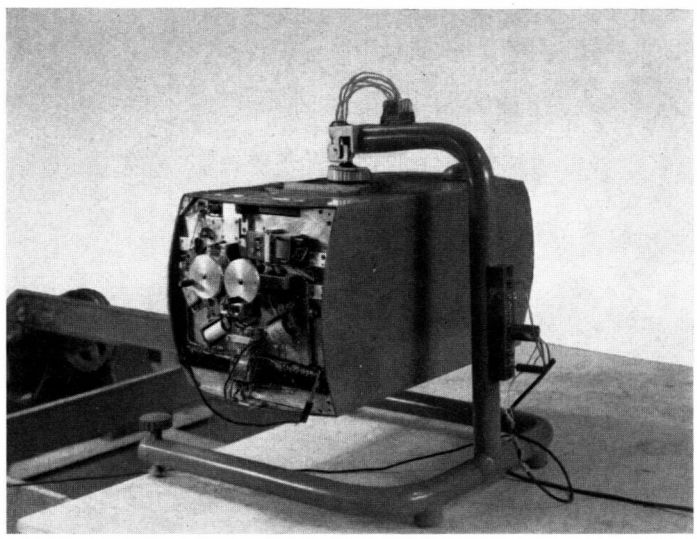
Von den drei möglichen Arten der geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung, der Luft-, der Flüssigkeits- und der magnetischen Dämpfung, habe ich die letztere gewählt. Zwar ist die hydraulische am wirksamsten, und ich habe mich lange mit ihr beschäftigt. Sie eignet sich jedoch hier nicht wegen der unvermeidlichen Konvektionsströme, deren Kräfte erheblich größer sind als die mit Gravimetern zu messenden von der Größenordnung 10^{-6} Gramm.

Extrem starkes Dämpfen bedeutet langsames Einspielen auf den Meßwert. Daher beträgt die Einstellzeit beim Seegravimeter 3 bis 5 Minuten, wie aus der Eichkurve in Textabb. 4 (Mitte) hervorgeht. (1 Karree = 15 Sekunden.) Natürlich kann man den Schreiber noch zusätzlich dämpfen, was hier aber nicht geschehen ist.[2]

---

[1] Durch zusätzliche Dämpfung des Anzeigegerätes konnte später sogar eine Dämpfung von insgesamt 1 : 1000 bei 6,4 s Periode erzielt werden, so daß periodische Amplituden von 20000 mgl nur mit 20 mgl registriert werden (mgl = mGal = 10^{-3} cm/s²).

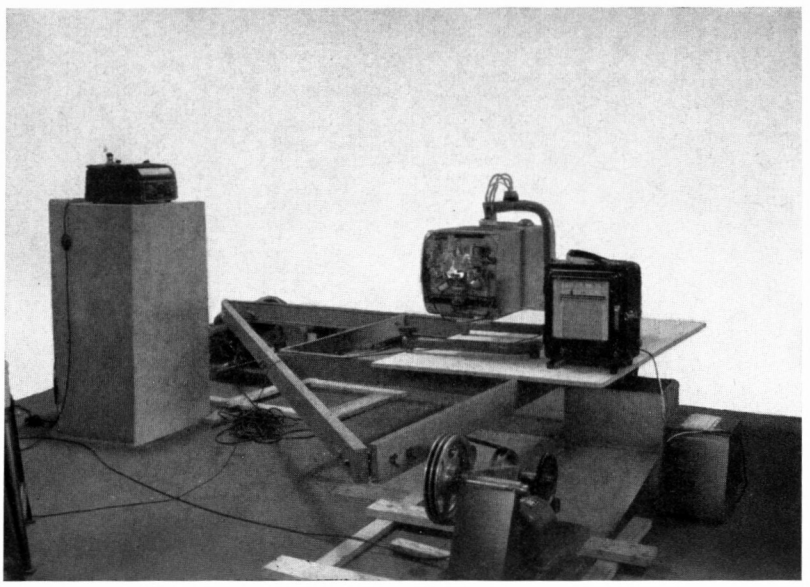
[2] Die linke Kurve von Textabb. 4 ist unter den gleichen Bedingungen aufgezeichnet worden wie Textabb. 3. Die rechte Registrierung von Textabb. 4 zeigt sehr deutlich den Browne-Effekt. Hier befand sich der Punkt C in Textabb. 1 direkt über dem Drehpunkt der Schlingervorrichtung (a = 65 cm, b = 0). Für diesen Punkt ergeben die Formeln 1 bis 4 eine Vertikalbeschleunigung von 1864 mgl (angezeigt werden nur c. 15 mgl) sowie $h_1 = 1460$ mgl u. $h_2 = 6930$ mgl. Gemäß Formel 6. wird hier der Browneeffekt 12,8 mgl in Übereinstimmung mit der Registrierung (2 pars ~ 1 mgl).



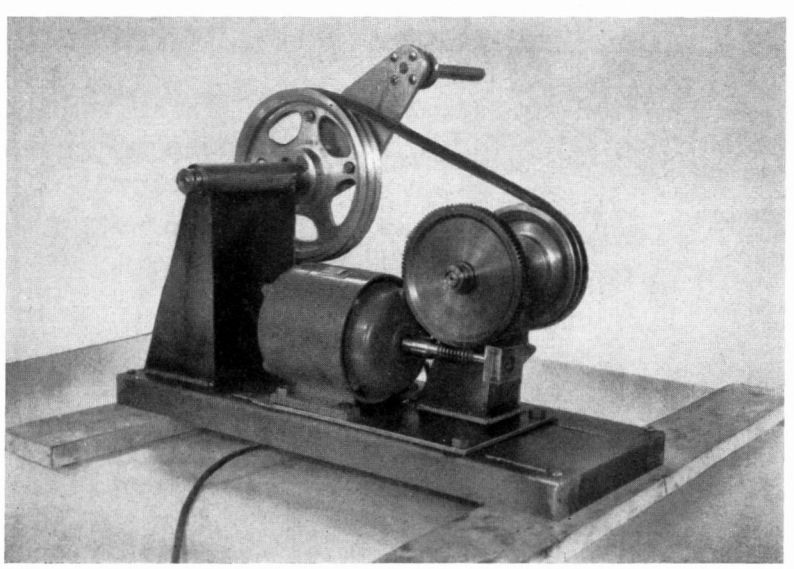
1. Das Äußere des Seegravimeters mit Stativ.

2. Blick auf den Schaltkasten. Das größere Instrument in der Mitte zeigt die Innentemperatur des Gravimeters auf 0,01° C an. Die Kontrollgeräte links und rechts dienen der Überwachung der Spannungen und Stromstärken von Photozellenlampe und Thermostat. Große Scheibe links = Ausgleichpotentiometer für das Fernthermometer. Mitte rechts sind die beiden Fernzähler für die Meßspindel zu erkennen. Zwei Kontrollämpchen in Bildmitte mit grünem und rotem Licht zeigen an, ob das Meßsystem arretiert oder frei ist. Durch Drücken auf den Knopf in der Mitte der beiden Lämpchen wird die Arretierung betätigt, durch Drücken auf den Knopf rechts unten wird die Meßspindel in Umdrehung versetzt, und zwar im Uhrzeigersinn, wenn der Wendeschalter links, und im Gegenuhrzeigersinn, wenn der Wendeschalter rechts steht.

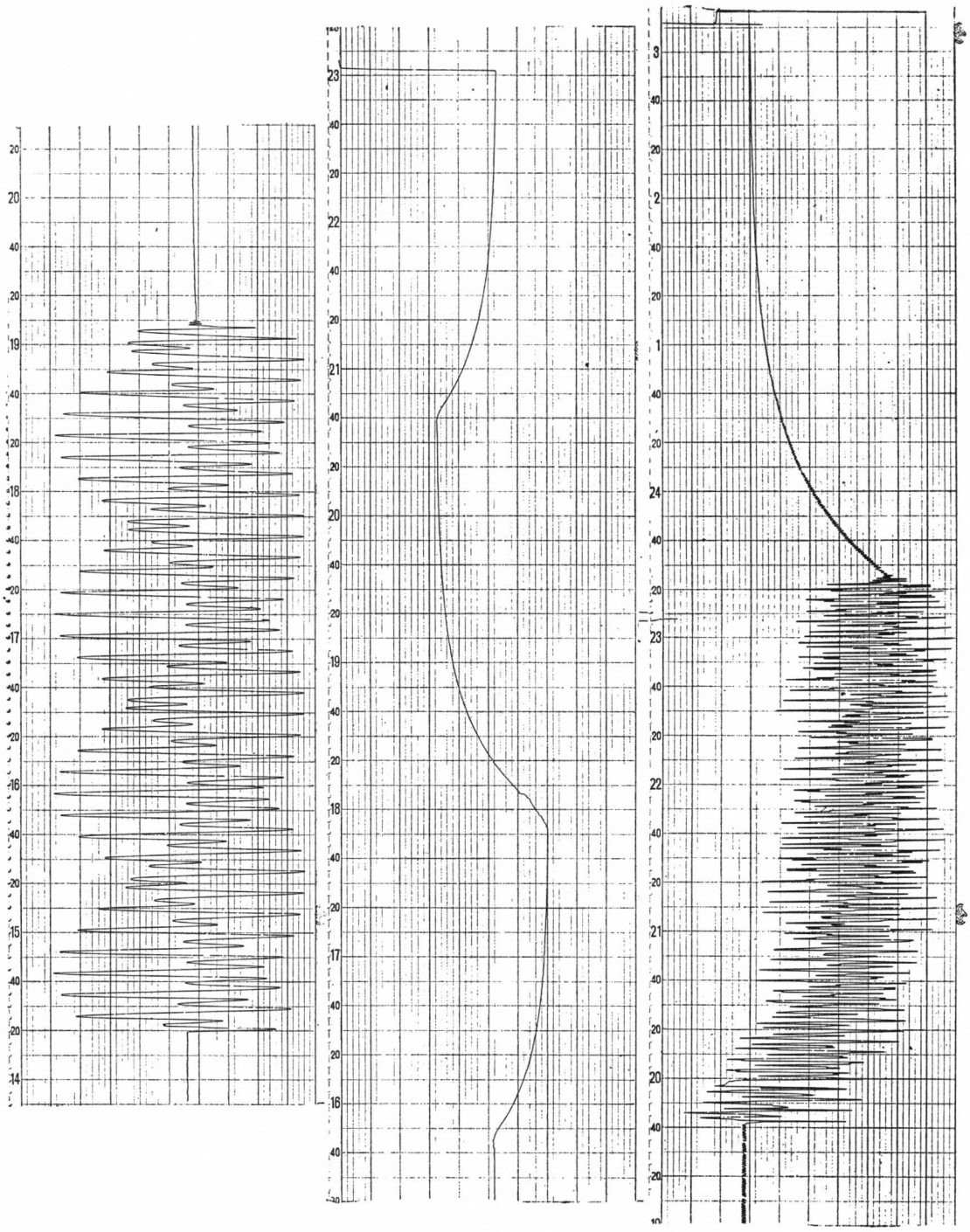
TAFEL II



1. Das Seegravimeter auf der Schlinger- und Stampfvorrichtung mit Registriergerät.



2. Eine der beiden Antriebsvorrichtungen.



Textabb. 4

Linke Registrierkurve wie Textabb. 3. Mittlere Registrierkurve stellt eine Eichung dar und zeigt die starke Dämpfung. Einlaufzeit etwa 3–5 Minuten (Strichabstand vertikal = 15 Sekunden). Rechte Registrierkurve wurde mit größerer Empfindlichkeit aufgenommen und zeigt den Browne-Effekt. (Auswandern der Meßkurve nach rechts im Sinne einer Schwerezunahme um etwa 12 mgl = 24 pars.)

Soll mit dem Seegravimeter die Schwerkraft nicht nur an Deck eines Schiffes, sondern auch unter Wasser gemessen werden (vgl. die eingangs erwähnten vier Methoden), so sind Fernsteuermechanismen nötig zum Arretieren und Entarretieren des Meßsystems und zur Verstellung der Meßspindel, die eine kleine, sehr schwache Zusatzfeder betätigt. Mit deren Hilfe läßt sich der Meßausschlag stets wieder auf Null bringen, d. h. die Meßmethode wird zur Nullmethode, wodurch die Unabhängigkeit von den elektrischen Daten wie Spannungsabfall, Verstärkungsgradänderungen, Frequenzschwankungen usw. erreicht wird. Die Fernsteuerung wird von zwei kleinen 6-Volt-Motoren besorgt. Die Meßspindel muß nicht nur gedreht, sondern auch fernabgelesen werden. Hierzu dienen zwei Scheiben, von denen die eine aus Metall gefertigt ist und radial zehn Isolierstreifen enthält, während die andere aus Isolierstoff besteht und radial zehn leitende Streifen besitzt. Die Schleifkontakte beider Scheiben arbeiten so zusammen, daß die Meßspindel sich stets in Schritten von 1/10 Umdrehung vor- oder rückwärts bewegt und dabei zwei elektrische Fernzähler betätigt. Der eine zählt die Umdrehungszehntel im Uhrzeigersinn, der andere im Gegensinne. Der Meßspindelstand folgt durch Subtraktion (Beispiel: Positives Zählwerk = 584,5, negatives Zählwerk = 497,7. Meßspindelstand demnach 86,8 Umdrehungen). Eine feinere Unterteilung der Umdrehung ist nicht nötig, da bei einem Umdrehungswert von 20 mGal/Umdr. eine Zähleinheit nur 2 mGal beträgt. (Die Spindel mit 200 Gängen hat einen Meßbereich von 4000 mGal). Der Schreiber wird im allgemeinen auf einen Bereich von 200 bis 300 mGal eingestellt. Nur bei ganz ruhiger See oder nach stärkerer Dämpfung kann man mit der Empfindlichkeit auf 20 bis 30 mGal gehen.

Die Vergrößerung der Meßausschläge für die Registrierung erfolgt über einen photoelektrischen Abgriff in Verbindung mit einem Gleichspannungsverstärker, an den ein Tintenschreiber oder ein Kompensograf angeschlossen werden kann.

Taf. I, 2 zeigt den Schaltkasten mit den notwendigen Prüfinstrumenten, Fernzählern, Kontrollampen und dem Fernthermometer, einem Pt-Widerstandsthermometer. An diesem Schaltkasteninstrument kann man noch 0,01° C ablesen, doch kann auch das Gravimeter-Registriergerät benutzt werden, wo die Auflösung 10 bis 100fach größer ist (10^{-3} bis 10^{-4}° C). Die Gravimeterfeder ist temperaturkompensiert auf einen Betrag unter 0,5 mGal/° C. Da der thermoelastische Koeffizient von Metallegierungen streng keine Konstante ist, sondern selbst wieder von der Temperatur abhängt, läßt sich die Temperaturkompensation nur für eine bestimmte Temperatur völlig auf Null bringen.

Für ein Seegravimeter ist noch von größerer Bedeutung als für ein Landgravimeter, daß der zeitliche Gang möglichst klein und linear ist, denn die Rückkehr auf einen Kontrollpunkt ist auf See viel schwieriger und oft erst nach vielen Tagen möglich. Daher wurde auf die Ausbildung des Doppelthermostaten und die Wärmeisolierung des Gerätes besondere Sorgfalt verwendet. Um größere Schwankungen der Außentemperatur schon abzufangen, ehe sie ins Geräteinnere gelangen können, wurde eine weitere heizbare Isolierhülle angefertigt, die über den äußeren Metallmantel gezogen werden kann.

Bei einem Seegravimeter sind zwei Effekte von Bedeutung, die bei Landmessungen nicht vorkommen und die Korrekturen an den Meßwerten erforderlich machen. Sie sind unter den Namen Eötvöseffekt und Browneeffekt bekannt. Der erstere betrifft die Verringerung der zu messenden Erdbeschleunigung durch die Fliehkraft. Fährt ein Schiff von West nach Ost, also mit der Erddrehung, so wird die Fliehkraft vergrößert, die Erdbeschleunigung also verkleinert, und die Korrektion muß zum gemessenen Wert addiert werden. Das Umgekehrte ist bei einer Ost-West-Fahrt der Fall. Die Formel lautet:

$$5. \qquad g = 4{,}04 \cdot v_{\mathrm{km/Std.}} \cdot \cos\beta \cdot \sin\alpha .$$

Hierin bedeuten v die Schiffsgeschwindigkeit in km/Std., β die geographische Breite und α den Schiffskurs von Norden über Osten. Da die Schiffsgeschwindigkeit auf mindestens 1% genau bekannt sein muß (schon auf dem Starnberger See beträgt der Eötvöseffekt 66,2 mGal mit $v = 24$ km/Std. und $\beta = 47°$), wird man in der Praxis nach Möglichkeit Nord-Süd-Kurs vorziehen.

Der Browneeffekt rührt davon her, daß auf einem Schiff nicht genau das gleiche g gemessen wird wie auf festem Untergrund. Das Gravimeter stellt sich immer ins Lot, aber der Schwerewert ist im Lot wegen des Vorhandenseins einer meist beträchtlichen Horizontalbeschleunigung immer größer, als er wäre, wenn sich das Schiff nicht bewegte. Die Horizontalbeschleunigung ist zwar periodisch, aber der Mittelwert ergibt eine Korrektion; sie muß stets abgezogen werden vom gemessenen Schwerewert. Zu einem beliebigen Zeitpunkt ist

$$g = \sqrt{(g_z + z_1 \sin \omega_1 t + z_2 \sin \omega_2 t)^2 + h_1^2 \cos^2 \omega_1 t + h_2^2 \cos^2 \omega_2 t}.$$

Da z_1 und z_2 mit g_z, der Schwerkraft bei ruhendem Schiff, gleichgerichtet sind, ist der Mittelwert über eine Periode gleich g_z. Da ferner der Mittelwert von $h_1^2 \cos^2 \omega_1 t$ bzw. der von $h_2^2 \cos^2 \omega_2 t$ gleich $h_1^2/2$ bzw. $h_2^2/2$ ist, ergibt sich unter Berücksichtigung der Tatsache, daß g_z wesentlich größer als alle anderen Größen ist, aus der binomischen Entwicklung der Quadratwurzel:

$$6. \qquad \Delta g = g - g_z = (h_1^2 + h_2^2)/4g.$$

Bei einer Horizontalbeschleunigung in Richtung der Schiffsachse und senkrecht dazu von $h_1 = h_2 = 3000$ mGal würde demnach die Brownekorrektion den Betrag von 4,6 mGal ausmachen. Demnach ist, um diese Korrektion berechnen zu können, ein Horizontalbeschleunigungsmesser notwendig.

ERGEBNISSE DER ERSTEN MESSFAHRT AUF DEM STARNBERGER SEE AN BORD DER „SEESHAUPT"

Am 19. 11. 1955 wurde nun mit dem neu entwickelten Seegravimeter[1] die erste Meßfahrt auf dem Starnberger See an Bord des 400-Tonnen-Motorschiffes „Seeshaupt" unternommen. Da ich durch das Entgegenkommen des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Verkehr, für das ich auch an dieser Stelle bestens danken möchte, über das ganze Schiff alleine verfügen konnte, habe ich die Apparatur in der Nähe des Schiffsschwerpunktes aufgestellt. Die See war ruhig und nur leichter Wind vorhanden. Als Registriergerät diente ein Philips-Kompensograf, von der Philipsvertretung in München (Electro-Spezial) leihweise kostenlos zur Verfügung gestellt, der sich gut bewährte. Auch hiefür sei hier herzlich gedankt.

Der Zweck der Meßfahrt war, zu erfahren, mit welcher Größenordnung an Genauigkeit auf einem Binnensee zu rechnen ist. Während der ganzen siebenstündigen Fahrt wurde fortlaufend registriert. An den Stationen Starnberg, Possenhofen, Tutzing, Bernried und

[1] Siehe auch Z. f. Geophysik 1955: Das Problem der Schweremessung auf See mit Gravimetern v. A. Graf. S. 208–218.

Seeshaupt stoppte das Schiff die Fahrt etwa 10 m vom Dampfersteg entfernt, ohne anzulegen bzw. festzumachen. Wegen der eigenen Wellen blieb das Schiff jedoch nie ganz ruhig, sondern drehte ab und bei oder fuhr langsam einige Meter vor oder zurück (während der Messung). Die Strecke Starnberg–Seeshaupt wurde zweimal hin und zurück durchfahren. Die Schwerewerte an den Dampferstegen waren vorher mit dem Askania-Gravimeter Gs 9 Nr. 79 eingemessen worden.[1]

Bei einer früheren Gelegenheit hatte sich bereits gezeigt, daß Messungen bei ruhendem Schiff in Küstennähe erheblich schwieriger sind als solche bei fahrendem Schiff, insbesondere, wenn das Schiff breitseits zum Ufer steht. Die von der Küste reflektierten Wellen erzeugen weit heftigere Schiffsbewegungen als jene, die während der Fahrt in Seemitte wirksam sind. Aus dem Vergleich der Schwerewerte des Seegravimeters in Küstennähe bei ruhendem Schiff mit den entsprechenden Werten auf dem Festlande wird sich also eine geringere Genauigkeit ergeben als für Meßwerte bei fahrendem Schiff in Küstenferne, die ohnehin auf einem Binnensee nicht so leicht ermittelt werden kann. Schon die genaue Ortung des Schiffes erfordert einen beträchtlichen Aufwand. Hinzu kommt das rasch sich ändernde Tiefenprofil des Sees (bis zu 100 m auf einen Kilometer) und die Tatsache, daß das Seegravimeter wegen der erforderlichen extrem starken Dämpfung eine Einstellzeit von 3 bis 5 Minuten besitzt und das Schiff während dieser Zeit bei einer Geschwindigkeit von 24 km/Std. bereits einen Weg von 1,2 bis 2 km zurücklegt. Ferner muß bei fahrendem Schiff die sog. Eötvöskorrektion, die von der Schiffsgeschwindigkeit und dem Kurs abhängt, angebracht werden. Da die Bestimmung dieser Größe mit der Genauigkeit und Arbeitsweise des Seegravimeters nichts zu tun hat, schien es mir auch im Hinblick auf die anderen erwähnten Gesichtspunkte am besten, die Prüfung des Geräts damit zu beginnen, daß zunächst die Meßwerte bei ruhendem, nicht verankertem Schiff mit den entsprechenden auf dem Festlande verglichen würden. Infolge der erschwerten Meßbedingungen sind die sich hierbei ergebenden Fehler sicherlich größer als jene bei fahrendem Schiff. Ein Blick auf die folgenden Registrierkurven bestätigt dies. Während beispielsweise die periodischen Gravimeterausschläge bei ruhendem Schiff manchmal 15 bis 30 mGal überschreiten, betragen sie bei fahrendem nur 2 bis 3 mGal. (In Wirklichkeit wegen der starken Dämpfung etwa das 150fache.)

Verfolgen wir nun die Meßfahrt an Hand der Meßkurven. Die statische Eichung hatte ergeben, daß 10 Skalenteile auf dem Registrierpapier den Wert 7,4 mGal repräsentieren, die volle Papierbreite somit 74 mGal (das sind rund 10000 mGal in Wirklichkeit).

Abb. 1 zeigt die Registrierung bei Abfahrt vom Hafen gegen 8^h 47. Die Amplitude im Hafen betrug nur etwa 1 bis 3 mGal. Die großen Ausschläge nach der Abfahrt sind durch den Eötvöseffekt bedingt. Bei der gewählten Polung des Registrierapparates muß bei einer Kurskomponente West der Schreiber nach rechts und bei einer Kurskomponente Ost der Schreiber nach links ausschlagen.

Gegen 9^h stoppte das Schiff in Starnberg (Abb. 2) etwa 8 m vom Landesteg entfernt für etwa 5 Minuten. Auf dem Registrierstreifen liest man den Mittelwert M = 44 pars ab (geschätzt für das letzte Kurvenstück vor der Abfahrt, wegen der langen Einstellzeit des Gerätes). Spindelstellung 104,295 (1 Umdrehung = 50 pars = 37 mGal). Trotz Küstennähe war hier das Schiff ruhig, da es mit der Längsseite quer zum Ufer lag (Amplitude 1 bis 3 mGal). Die nächste Station Possenhofen (Abb. 3) wurde $9^h 18$ erreicht. Das Schiff hielt parallel zum Ufer und kam dabei ins Schaukeln. (Der Pfeil in Abb. 3 zeigt die Schiffsrichtung an.) Mittelwert M = 35. Da kurz hierauf die Spindel auf 103,795

[1] Von H. Watermann.

geändert und dieser Wert bis zum Schluß beibehalten wurde, muß zum Wert M = 35 wie zum Wert M = 44 für Starnberg 25 addiert werden, so daß M für Starnberg = 69 und für Possenhofen = 60 wird. Das starke Auswandern des Schreibers von 9^h14 bis 9^h18 ist durch das Landemanöver (großer Bogen) bedingt. Von 9^h06 bis 9^h14 fuhr das Schiff nahezu geraden Kurs mit 24 km/Std. Der Unterschied des Mittelwertes dieser Strecke gegenüber Possenhofen ist durch den Eötvöseffekt bedingt, wie sich später noch deutlicher zeigen wird. Nun folgt Tutzing (Abb. 4) mit M = 47,1 und Bernried (Abb. 5) mit M = 33,5 (10^h05 bis 10^h10). Bald nach der Abfahrt von dort dreht das Schiff auf reinen Südkurs (180°) und hält ihn 3,4 km lang bei, soweit es dem Steuermann gelingt. Nach der Kurve (Abb. 14) von 10^h16 bis 10^h23 läßt sich der Mittelwert für eine Zeitminute an einer beliebigen Stelle auf besser als 0,5 pars = 0,3 mGal abschätzen. Das fast gleichmäßige Wandern der Meßkurve von M = 28,5 bis M = 23,0 entspricht einer Schwereabnahme von etwa 4 mGal infolge des Nord-Süd-Effektes (Erdabplattung) und der Änderung der Untergrundbeschaffenheit und des Bodenreliefs. Als das Schiff in einem großen Bogen nach Seeshaupt eindrehte und breitseitig zum Ufer anhielt, wühlte es das Wasser so stark auf, daß für den starken Wellengang die Papierbreite nicht ausreichte. Um die Empfindlichkeit nicht verringern zu müssen, ließ ich das Schiff eine 90°-Drehung machen, so daß es senkrecht zum Ufer und damit zu den Wellen zu liegen kam (Abb. 6). Die Ablesung um 10^h35 ergab M = 23,0, das ist derselbe Wert, der noch bei voller Fahrt um 10^h23 wenige Hundert Meter vom Landesteg entfernt sich ergeben hatte. Die Übereinstimmung der Werte zeigt, daß die starken Ausschläge weder dem Gravimeter noch dem Schreiber geschadet hatten.

Für die Rückfahrt drehte das Schiff in großem Bogen wieder auf Nordkurs und hielt in Bernried diesmal mit dem Bug nach Norden (Abb. 7). Auch hier ist der Nord-Süd-Effekt mit 4 mGal wieder gut zu erkennen, wenn er auch dieses Mal nicht so exakt abzulesen ist wegen der kürzeren Strecke. Der Mittelwert in Bernried wurde um 10^h57 zu M = 20,2 gefunden, also um 13,3 pars (etwa 10 mGal) kleiner als 45 Minuten zuvor. Dies überraschte, da der Temperaturgang während der achtstündigen Beobachtungszeit nur im ganzen 3 mGal betrug und ein Sprung in der Messung nirgends zu erkennen war. Im weiteren Verlauf der Messung stellte sich nun heraus, daß der gleiche Effekt von etwa der gleichen Größenordnung bei jeder Profilumkehr auftrat.

Eine spätere Untersuchung im Labor erbrachte eine sehr einfache Erklärung für diesen „Umkehreffekt". Das Gravimeter ist mit Bimetall temperaturkompensiert. Das verwendete Bimetall erwies sich als magnetisch, und zwar in einem Ausmaße, wie ich es nicht vermutet hatte. Die Messung im Labor in verschiedenen Azimuten ergab eine klare Sinuskurve mit einer Amplitude von 10,0 mGal (Maximum Nord, Minimum Süd). Demnach beträgt die magnetische Korrektur, die an den Ablesungen anzubringen ist, $K = 6{,}75 \cdot \sin\alpha$ (pars). (5 mGal = 6,75 pars).

Der weitere Verlauf der Messung und die erhaltenen Mittelwerte sind den folgenden Abbildungen zu entnehmen (Abb. 8 bis 18).

Für 11^h54, 12^h40 und 12^h45 wurde der Eötvöseffekt berechnet und in die Abb. 10 u. 12 eingetragen. Die Schiffskurse betrugen 33°, 206° und 236°. Die oben Seite 10 angegebene Formel ergibt bei der Schiffsgeschwindigkeit von 24 km/Std. die Werte 36 mGal, 29 mGal und 54 mGal, was mit der Registrierung gut übereinstimmt.

Tabelle 1 enthält die abgelesenen Mittelwerte mit den Zeitangaben, Azimuten und der magnetischen Korrektur. Da der starke magnetische Effekt zur Zeit der Messung noch nicht bekannt war, wurden die Azimute nur bei der ersten Fahrt abgelesen in der Annahme, daß sie bei der zweiten mit genügender Genauigkeit gleich wären. Leider war dies nicht

der Fall. Ein inzwischen aufgekommener Wind veranlaßte den Kapitän zu Kurskorrekturen (Ab- und Beidrehen des Schiffes während der Messung), welche die Einstellung des Gravimeters beeinflußten. In Tabelle 1 sind für die zweite Fahrt die gleichen magnetischen Korrekturen eingetragen wie für die erste Fahrt, doch zeigt die Textabb. 5 mit den Endwerten von Tabelle 1 in Diagrammform, daß dies nicht streng berechtigt war. Die größeren

Tabelle 1. Die Ablesemittelwerte

Meßpunkt	Zeit	Azimut	pars	Magnet. Korrektur in pars	Korrigierter Ablesewert
Starnberg	9^h02	192°	69,0	—6,60	62,4
	12^h07	12°	54,0	+6,60	60,6
	16^h07	12°	52,0	+6,60	58,6
Possenhofen	9^h23	206°	60,0	—6,0	54,0
	11^h45	26°	46,0	+6,0	52,0
	12^h31		57,0	—6,0	51,0
	14^h42		47,0	+6,0	53,0
Tutzing	9^h48	215°	47,3	—5,5	41,8
	11^h20	35°	34,0	+5,5	39,5
	12^h54		41,5	—5,5	36,0
	14^h18		33,0	+5,5	38,5
Bernried	10^h10	150°	33,5	—5,9	27,6
	10^h58	330°	20,2	+5,9	26,1
	13^h16		35,0	—6,3	28,7
	13^h57		19,0	+6,3	25,3
Seeshaupt	10^h36	190°	23,0	—6,65	16,35
	13^h57		24,2	—6,65	17,55

Tabelle 2. Auswertung der Meßergebnisse

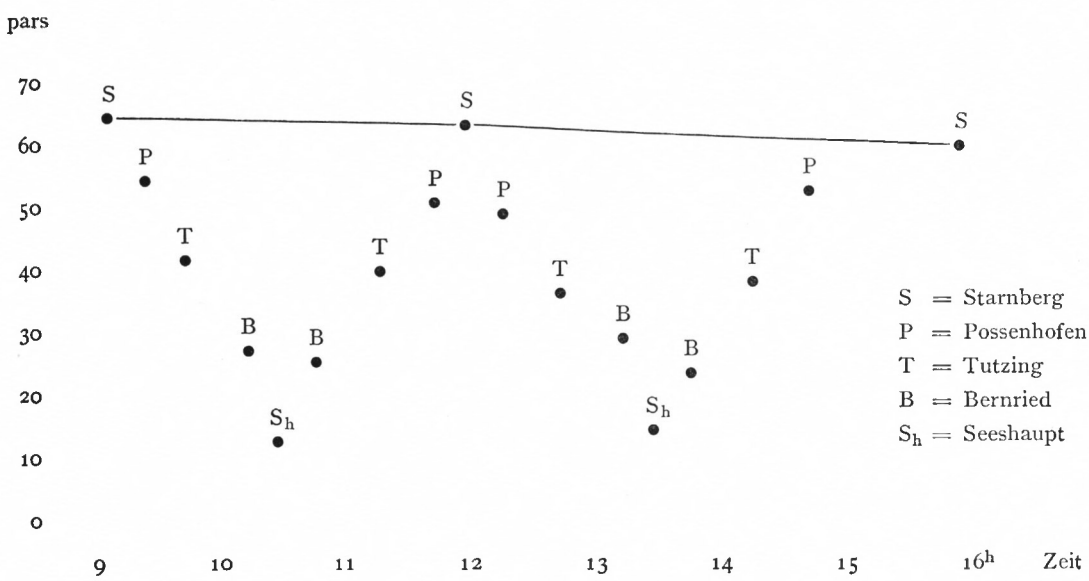
Meßpunkt	1. Fahrt			2. Fahrt		
	Hinfahrt pars	Rückfahrt pars	Mittel mgl	Hinfahrt pars	Rückfahrt pars	Mittel mgl
Starnberg	0	0	0	0	0	0
Possenhofen	— 8,2	— 8,7	— 6,27	— 9,5	— 6,5	— 5,92
Tutzing	—20,2	—21,5	—15,45	—24,3	—21,0	—16,80
Bernried	—34,3	—34,2	—25,35	—31,5	—34,5	—24,40
Seeshaupt	—45,2		—33,50	—42,5		—31,50

Streuungen der Meßwerte der zweiten Fahrt sind also nicht durch Wind oder Seegang bedingt, sondern ausschließlich durch die Unsicherheit der magnetischen Korrektur infolge der nicht genau bekannten Schiffsrichtung.

In Tabelle 2 sind die Differenzen der korrigierten Meßwerte gegen die Gangkurve mit Starnberg als Bezugspunkt eingetragen. Die Mittelwerte für Hin- und Rückfahrt wurden in mGal umgerechnet mit dem Eichwert 1 pars = 0,74 mGal. Tabelle 3 bringt das Gesamtergebnis, nämlich die Abweichungen der Meßwerte von jenen auf dem Landesteg, die als fehlerfrei (innerhalb 0,05 mGal) vorausgesetzt wurden. Seeshaupt wurde nur in einer Richtung angefahren, so daß der dort erhaltene Wert nur das halbe Gewicht hat gegenüber den anderen.

Tabelle 3. Meßergebnisse

Meßpunkt	Wahrer Wert auf Landesteg mgl	1. Fahrt mgl	2. Fahrt mgl	Abweichung 1. Fahrt mgl	Abweichung 2. Fahrt mgl
Starnberg	0	0	0	0	0
Possenhofen ..	— 6,18	— 6,27	— 5,92	—0,09	+0,26
Tutzing	—15,50	—15,45	—16,80	+0,05	—1,30
Bernried	—24,88	—25,35	—24,40	—0,47	+0,48
Seeshaupt	—33,46	—33,50	—31,50	—0,04	+1,96 (halbes Gewicht)
			Mittel:	c. 0,3 mgl	c. 1,0 mgl



Textabb. 5. Die vom magnetischen Effekt befreiten Mittelwerte der Schwereregistrierung an den Meßpunkten Starnberg, Possenhofen, Tutzing, Bernried und Seeshaupt.

DISKUSSION DES MESSRESULTATES

Die Tatsache, daß schon bei der ersten Meßfahrt mit dem neuen Seegravimeter auf dem Starnberger See eine Genauigkeit von besser als 0,5 mGal erzielt wurde, scheint mir sehr ermutigend. Die Fehler bei der Wiederholungsfahrt sind zwar größer, die Ursache hierfür wurde aber eindeutig geklärt und kann leicht beseitigt werden durch Beobachtung des Schiffskompasses auch bei ruhendem Schiff während der Messung. In Zukunft wird natürlich der magnetische Effekt überhaupt beseitigt werden durch Ersatz des eisenhaltigen Bimetalls durch ein unmagnetisches (etwa Wolfram-Messing statt Eisen-Invar). Auch eine Kompensation durch einen kleinen Gegenmagneten wäre möglich.

Das bisherige Meßergebnis zeigt ferner, daß die Schiffsvibrationen und die Schiffsneigungen auf Gravimeter und Schreibgerät ohne merklichen Einfluß sind. Die Brownekorrektion konnte bei dieser Meßfahrt nicht berücksichtigt werden, da mir ein Horizontal-Beschleunigungsmesser nicht zur Verfügung stand. Ein solcher ist gegenwärtig im Bau und wird künftig mit eingesetzt werden. Bei der hier besprochenen Meßfahrt war diese Korrektion wahrscheinlich ohnedies zu vernachlässigen, da das Gravimeter in der Nähe kes Schiffsschwerpunktes aufgestellt werden konnte, wo die Horizontalbeschleunigungen dlein sind.

ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde ein neuentwickeltes Seegravimeter beschrieben und über die Ergebnisse der ersten Meßfahrt auf dem Starnberger See an Bord des 400-Tonnen-Motorschiffes „Seeshaupt" berichtet. Das Schiff fuhr die Strecke Starnberg–Seeshaupt zweimal hin und zurück. Die Schwerewerte an 5 Punkten auf dem Lande waren bekannt. Durch Vergleich ergab sich eine vorläufige Meßgenauigkeit des Gerätes von besser als 0,5 mGal.

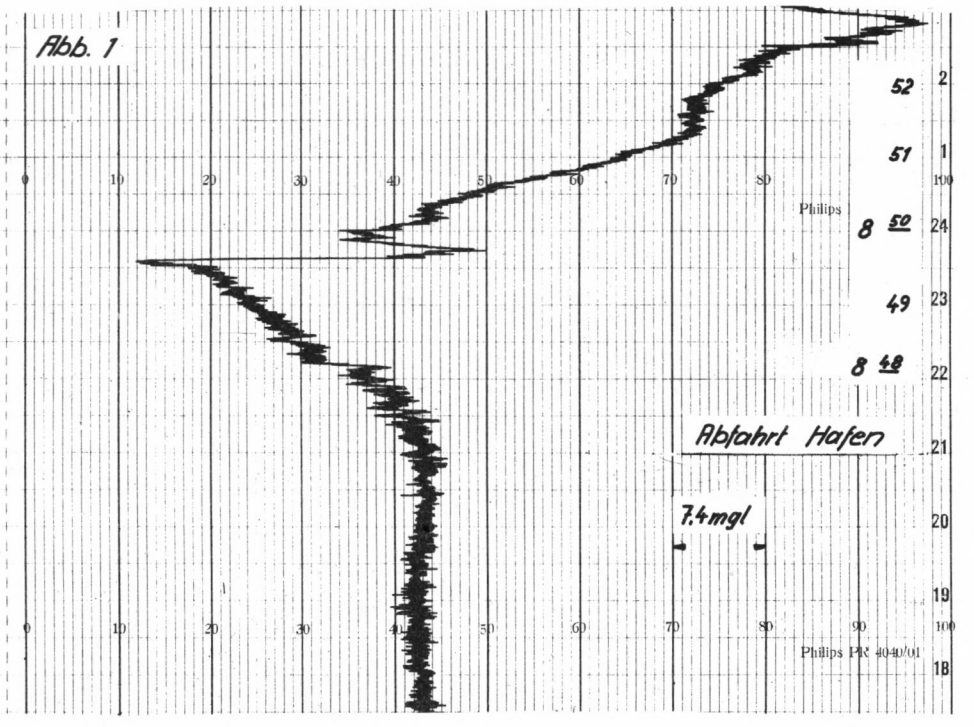


Abb. 1
Philips
Abfahrt Hafen
7,4 mgl
Philips PW 4040/01

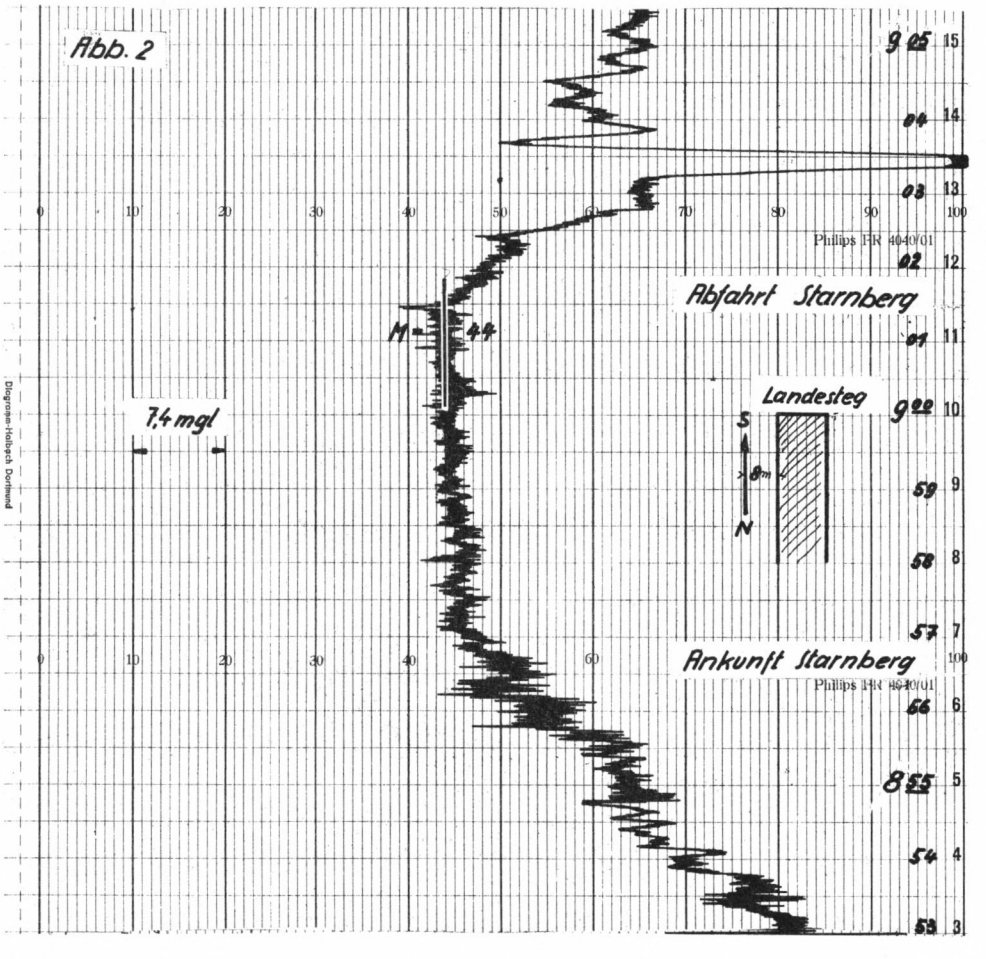


Abb. 2
Philips PW 4040/01
Abfahrt Starnberg
7,4 mgl
Landesteg
S
N
8m
Ankunft Starnberg
Philips PW 4040/01
Diagramm-Hollrath Dortmund

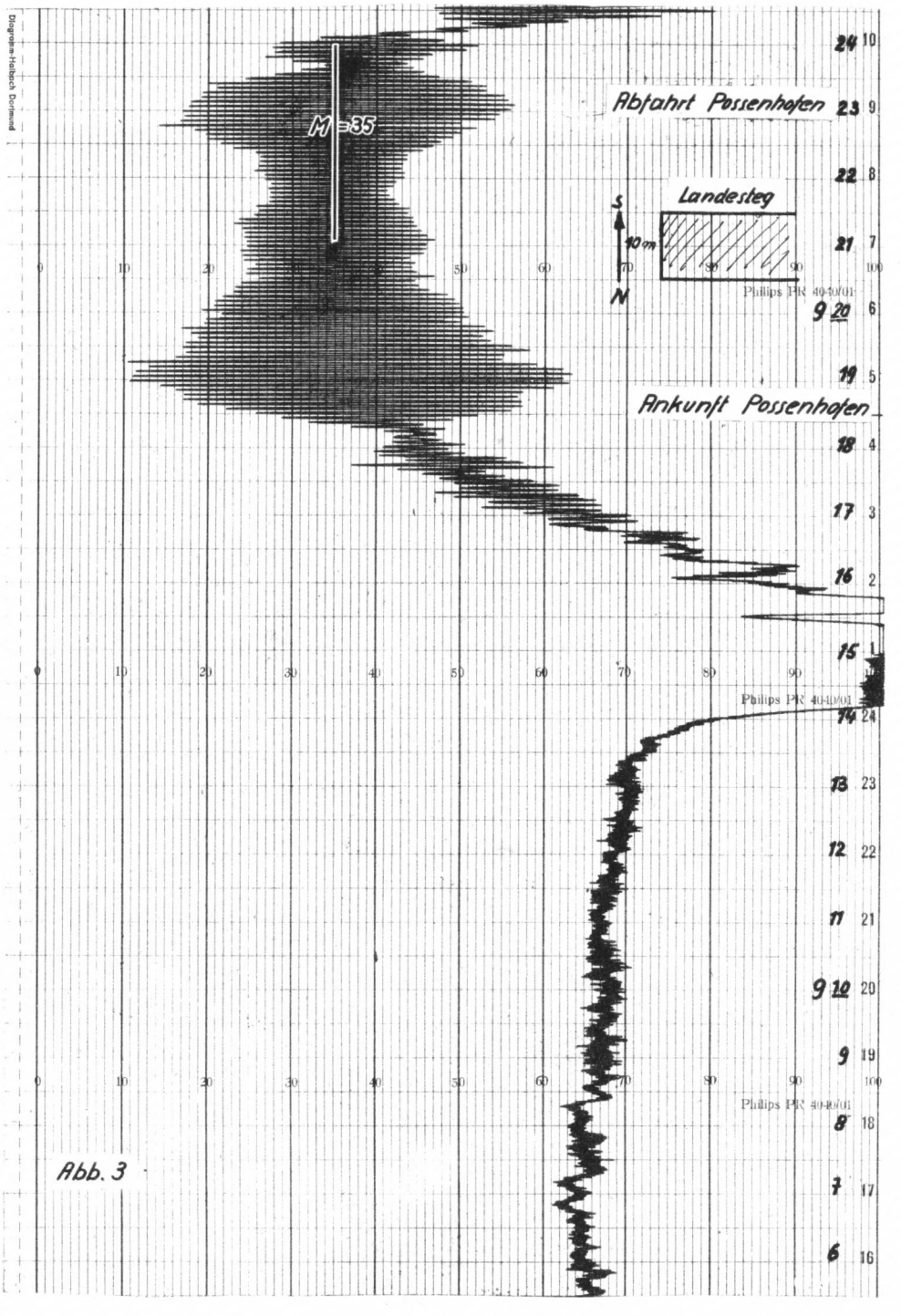

Diagraphe-Hellwich Dortmund
M=85
Abfahrt Possenhofen
Landesteg
S
10m
N
Philips PR 40-30/01
Ankunft Possenhofen
24 10
23 9
22 8
21 7
9 20 6
19 5
18 4
17 3
16 2
15 1
14 24
13 23
12 22
11 21
9 10 20
9 19
8 18
7 17
6 16

Abb. 3

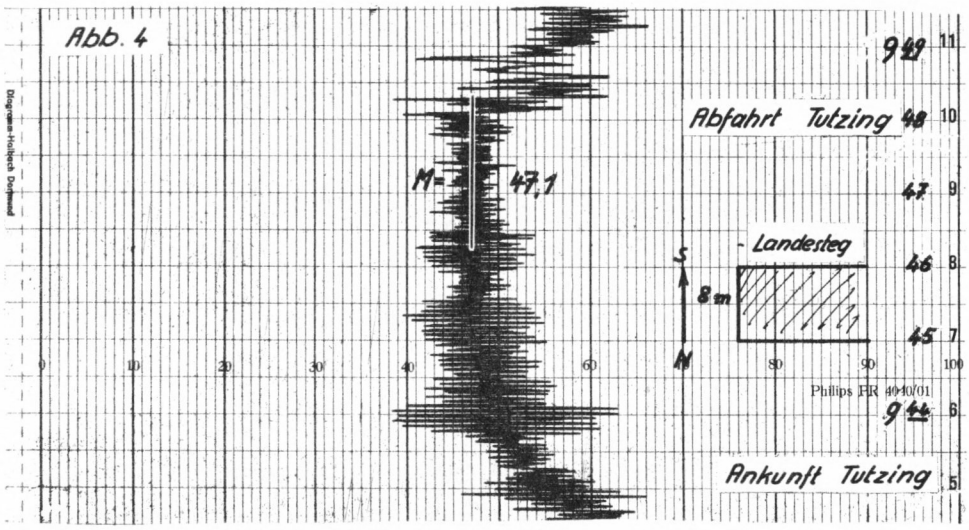


Abb. 4
Abfahrt Tutzing
Landesteg
8 m
S
N
M = 47,1
Philips PR 4040/01
Ankunft Tutzing

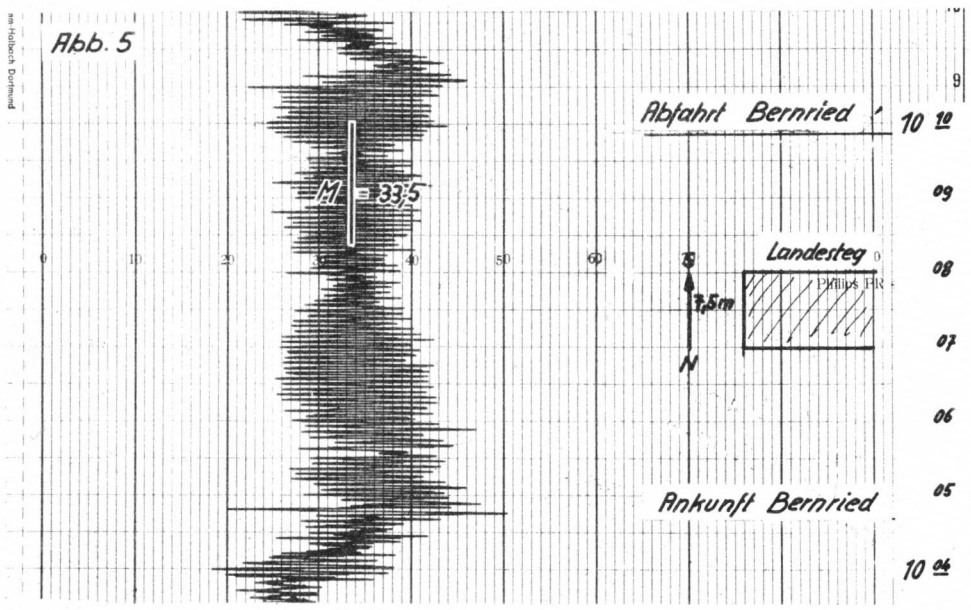


Abb. 5
Abfahrt Bernried
Landesteg
7,5 m
S
N
M = 33,5
Ankunft Bernried

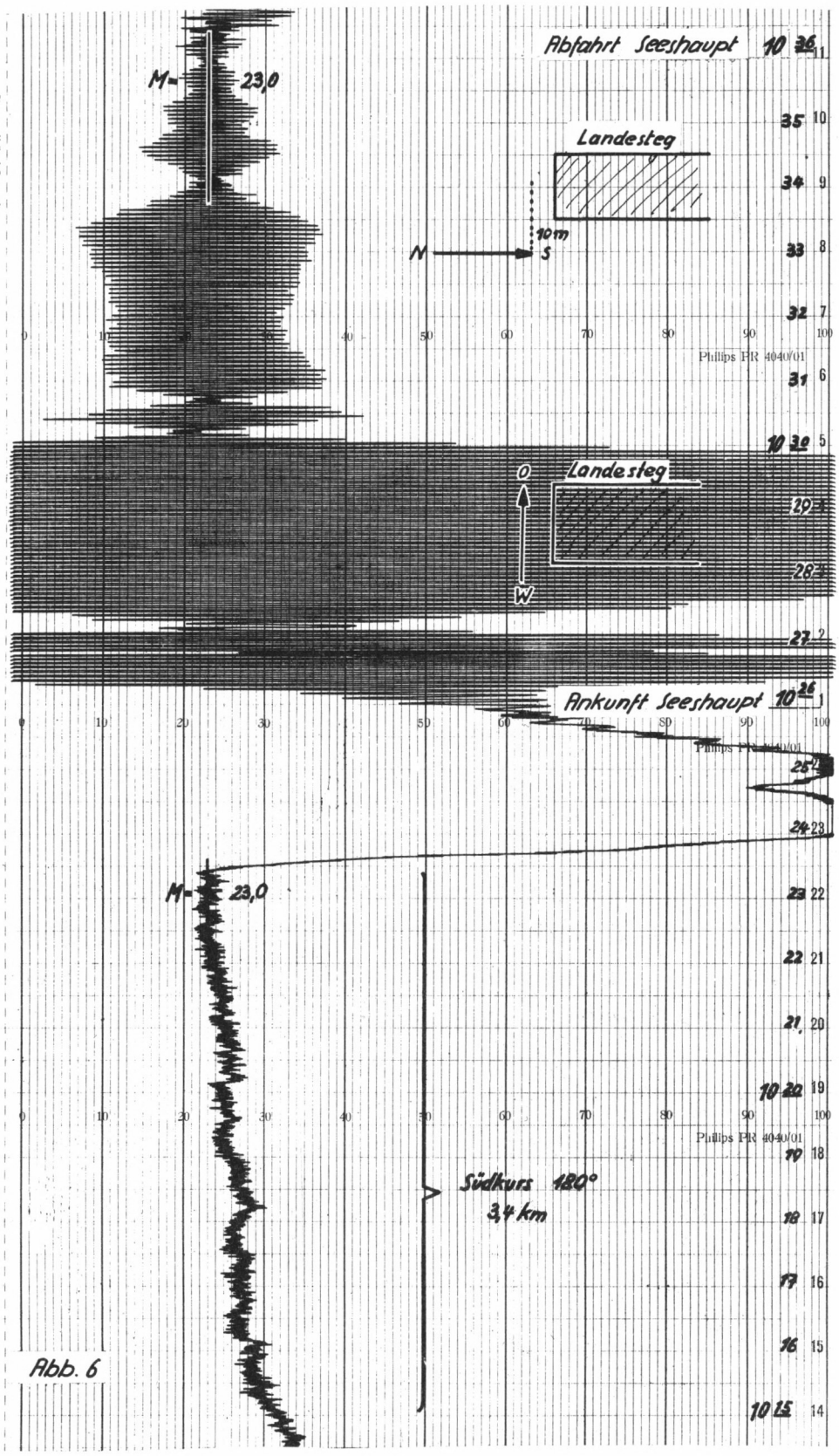

Abfahrt Seeshaupt 10 26
M- 23,0
Landesteg
10m
N
S
Phillips PR 4040/01
0
Landesteg
W
Ankunft Seeshaupt 10 26
Phillips PR 4040/01
M- 23,0
Südkurs 180°
3,4 km
Phillips PR 4040/01
Diagramm-Helbach Dortmund

Abb. 6

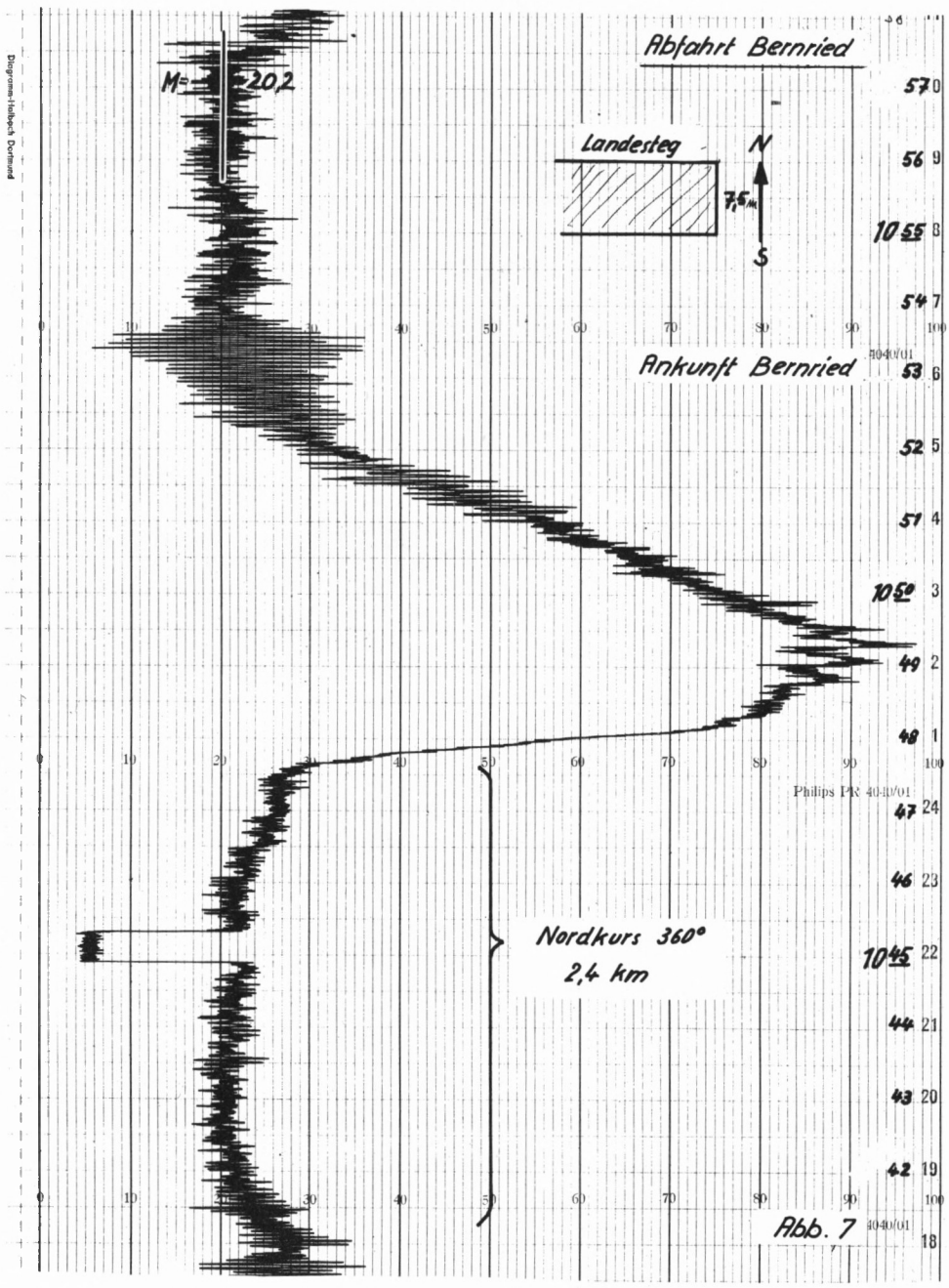

Abfahrt Bernried
M= 20,2
Landesteg
N
S
7,5 m
Ankunft Bernried
Nordkurs 360°
2,4 km
Philips PM 4040/01
Diagramm-Halbach Dortmund

Abb. 7

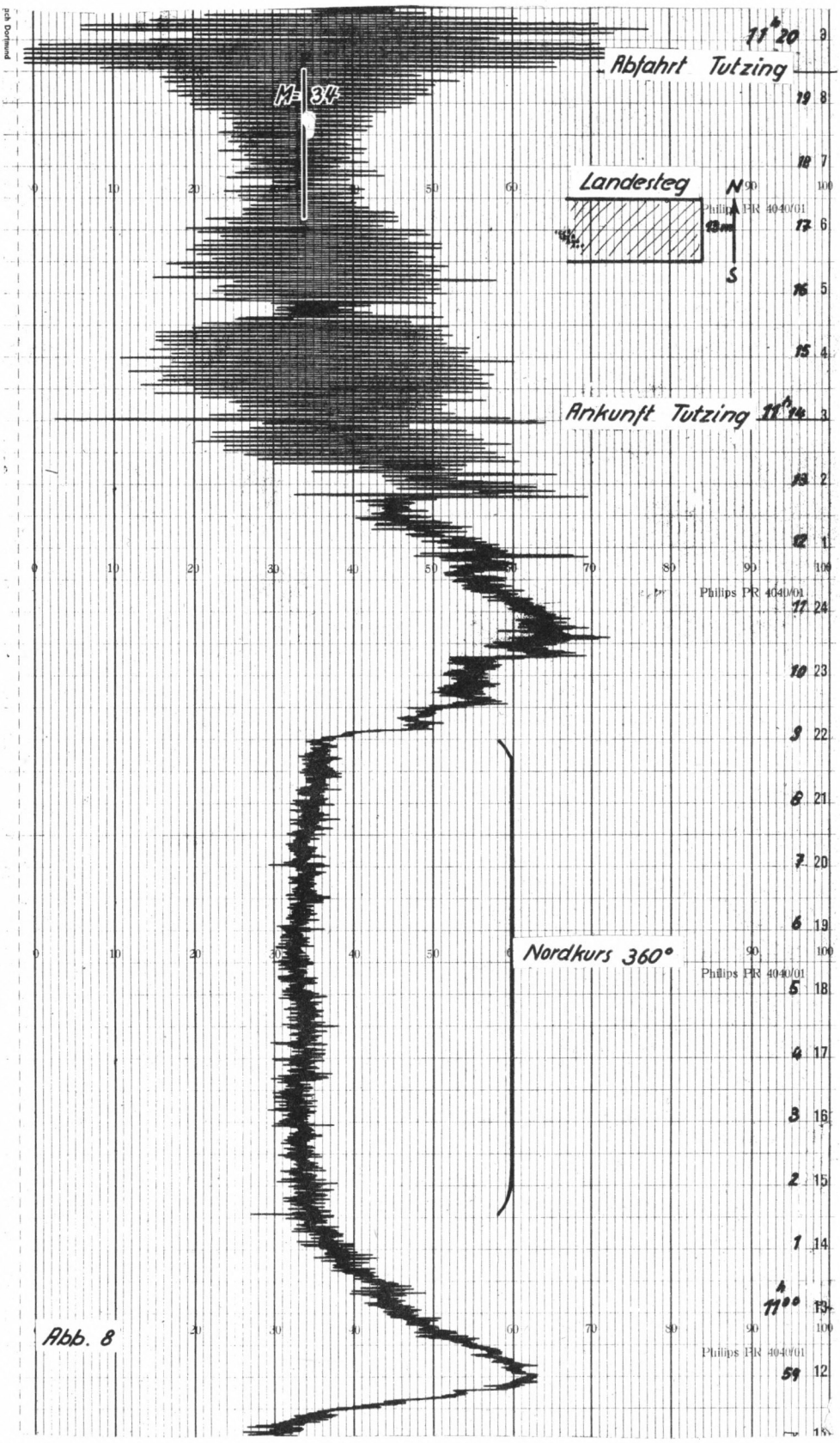

Abfahrt Tutzing
M 34
Landesteg
N
S
15m
Philips PR 4040/01
Ankunft Tutzing
Nordkurs 360°

Abb. 8

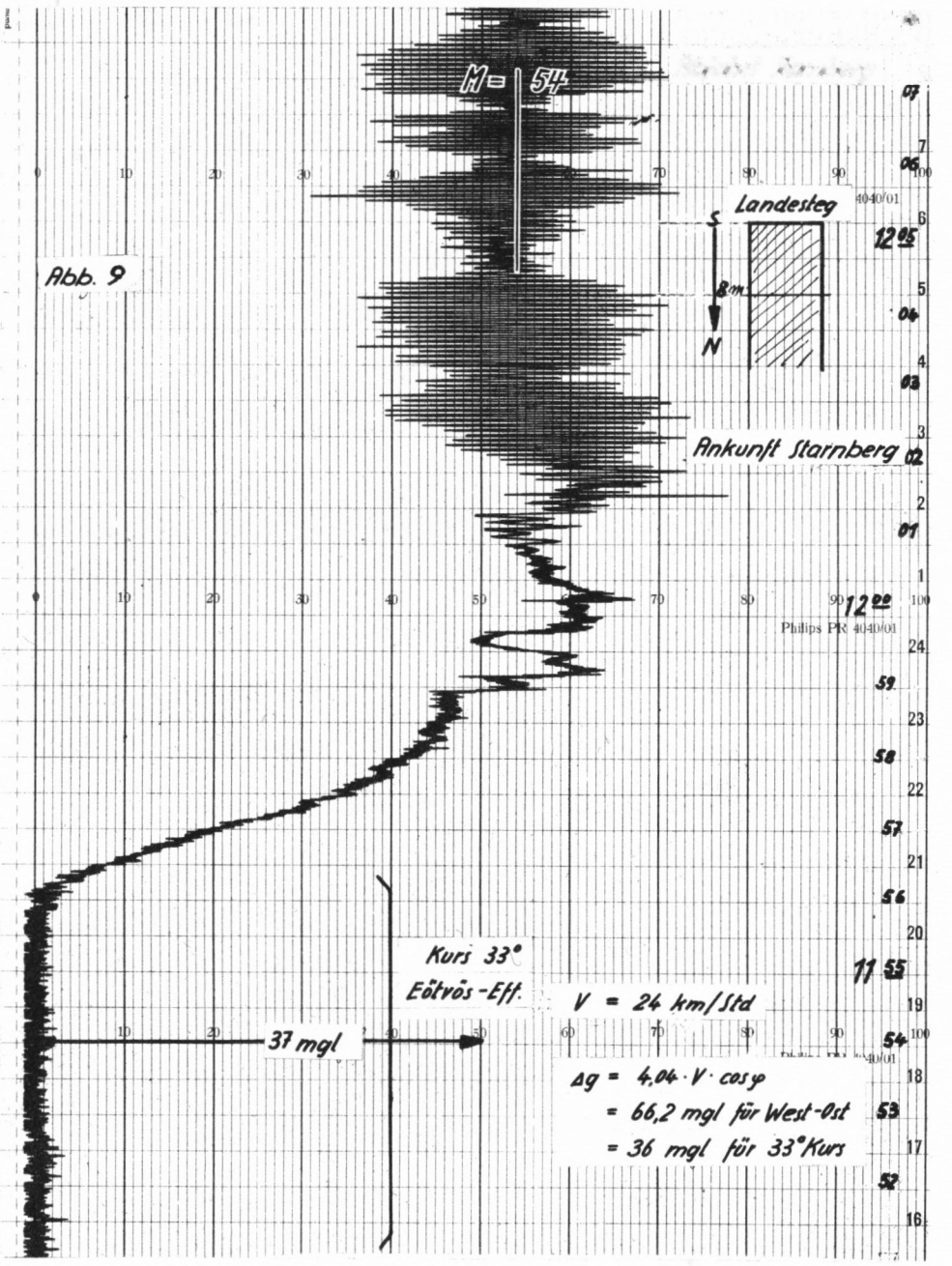

M = 5.4
Landesteg
Ankunft Starnberg
Kurs 33°
Eötvös-Eff.
V = 24 km/Std
37 mgl
Δg = 4,04 · V · cos φ
= 66,2 mgl für West-Ost
= 36 mgl für 33° Kurs
Philips PW 4040/01

Abb. 9

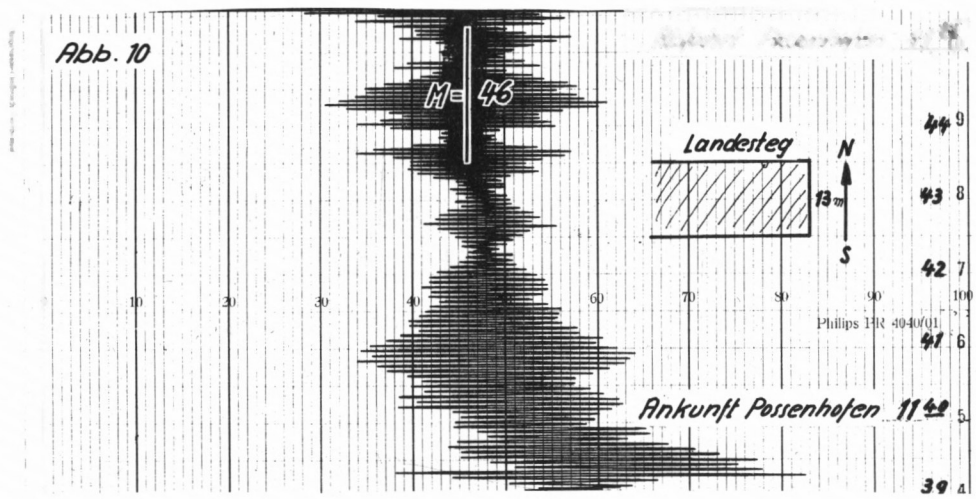


Abb. 10
M = 46
Landesteg
N
S
13 m
Ankunft Possenhofen 11 40
Philips PR 4040/01

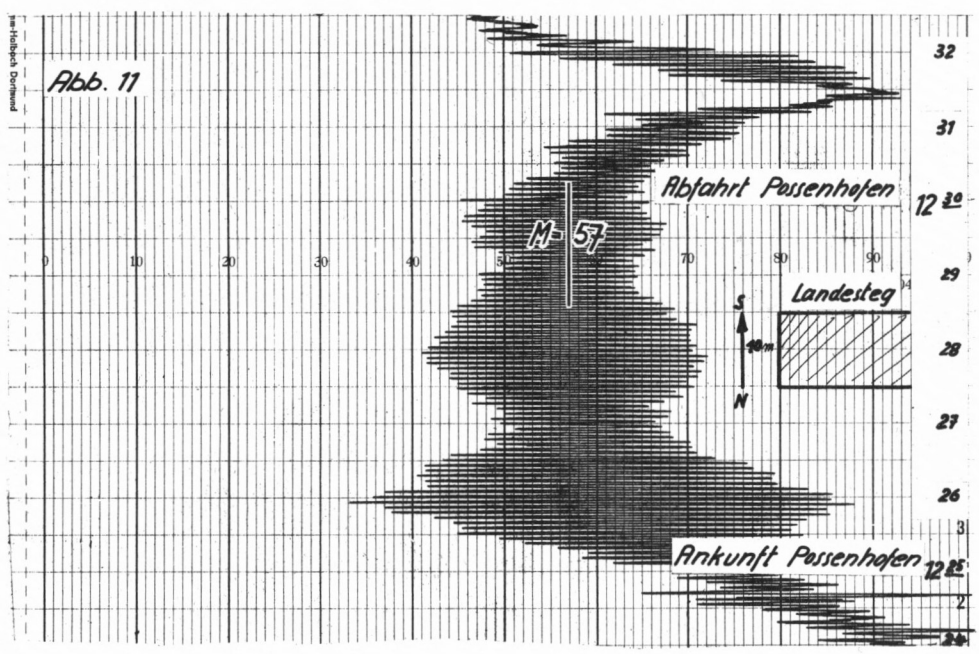


Abb. 11
M = 57
Abfahrt Possenhofen 12 30
Landesteg
S
N
10 m
Ankunft Possenhofen 12 25

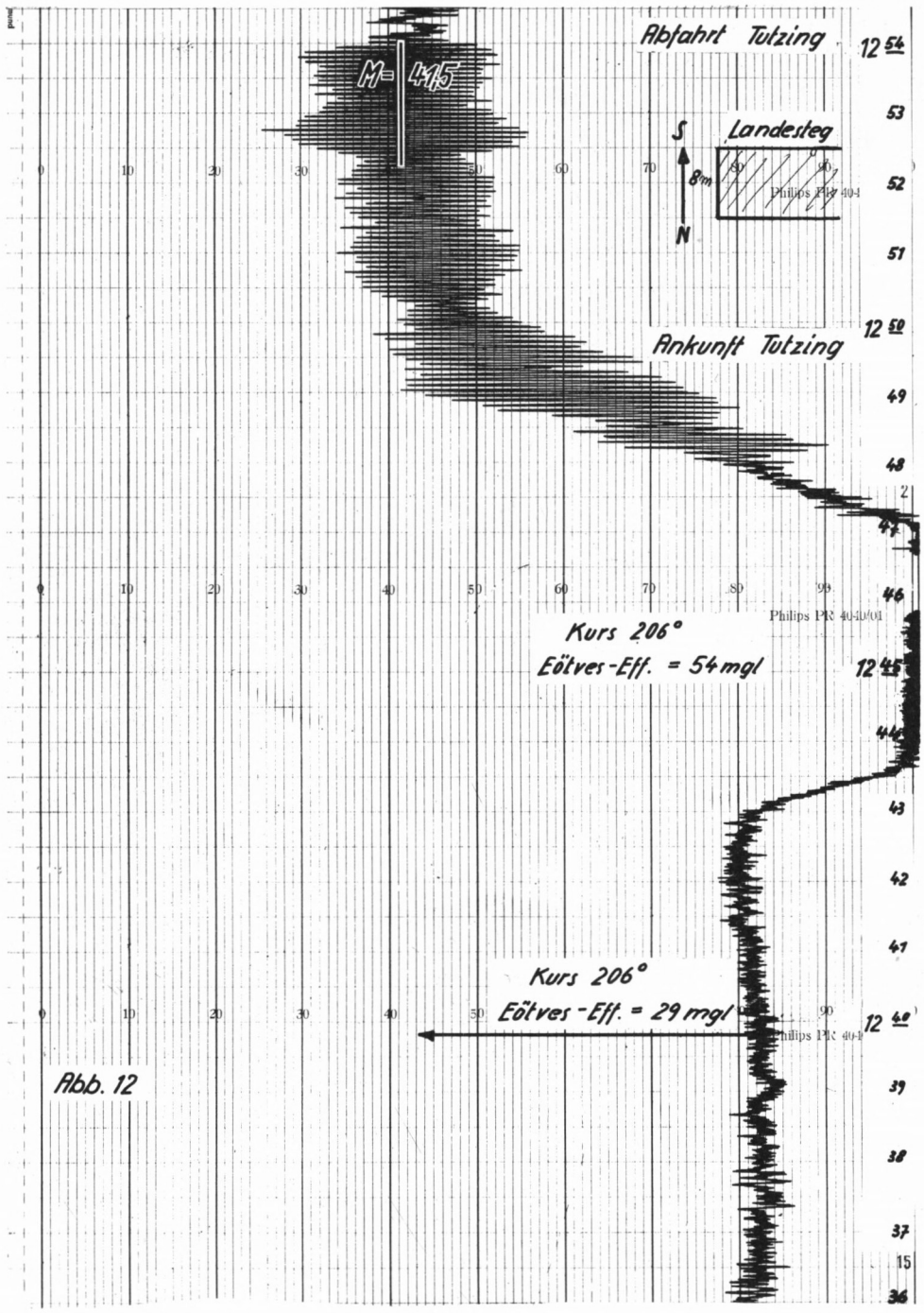

Abfahrt Tutzing
M = 415
S
Landesteg
8m
N
Philips PM 404
Ankunft Tutzing
Kurs 206°
Eötves-Eff. = 54 mg/l
Philips PM 4040/01
Kurs 206°
Eötves-Eff. = 29 mg/l
Philips PM 404

Abb. 12

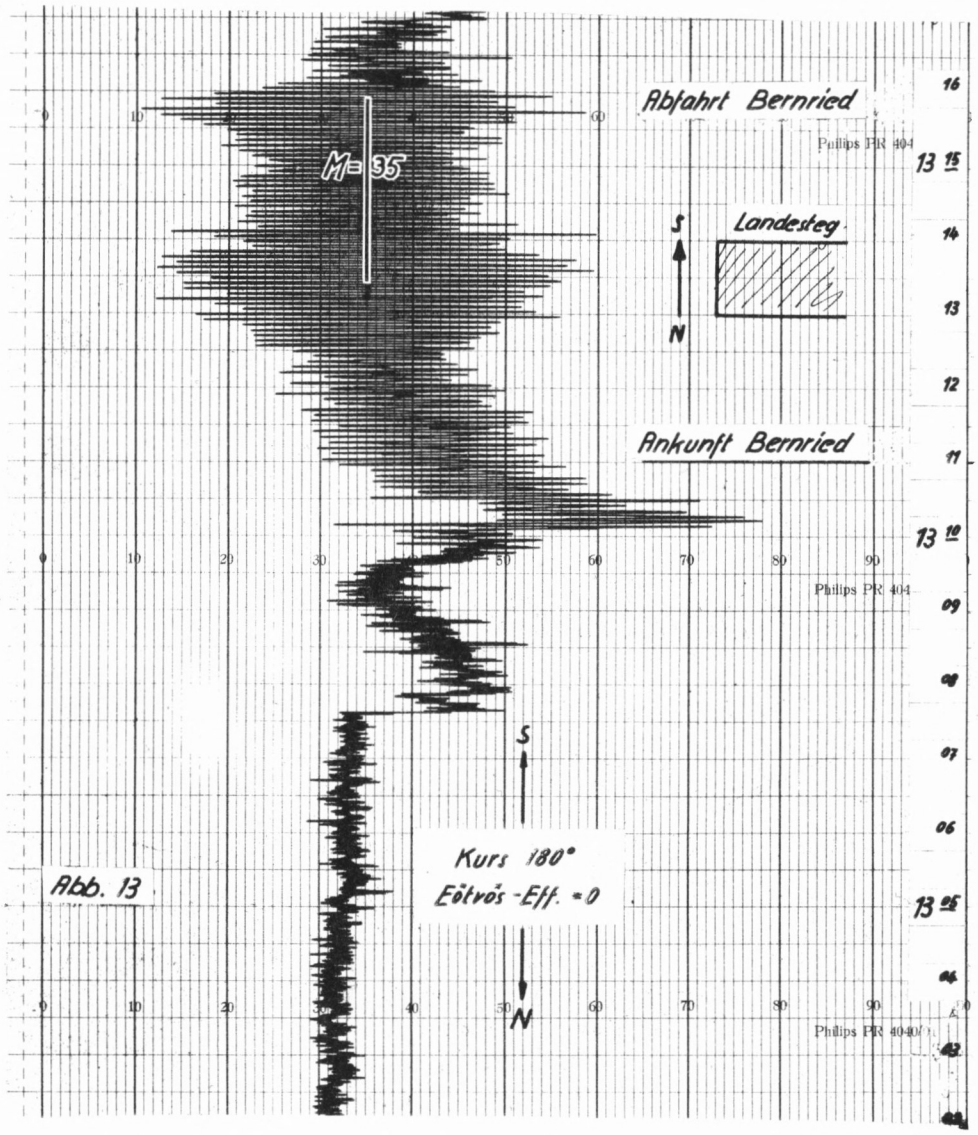

Abfahrt Bernried
Philips PR 404
M = 35
S
N
Landesteg
Ankunft Bernried
Philips PR 404
S
Kurs 180°
Eötvös-Eff. = 0
N
Philips PR 404

Abb. 13

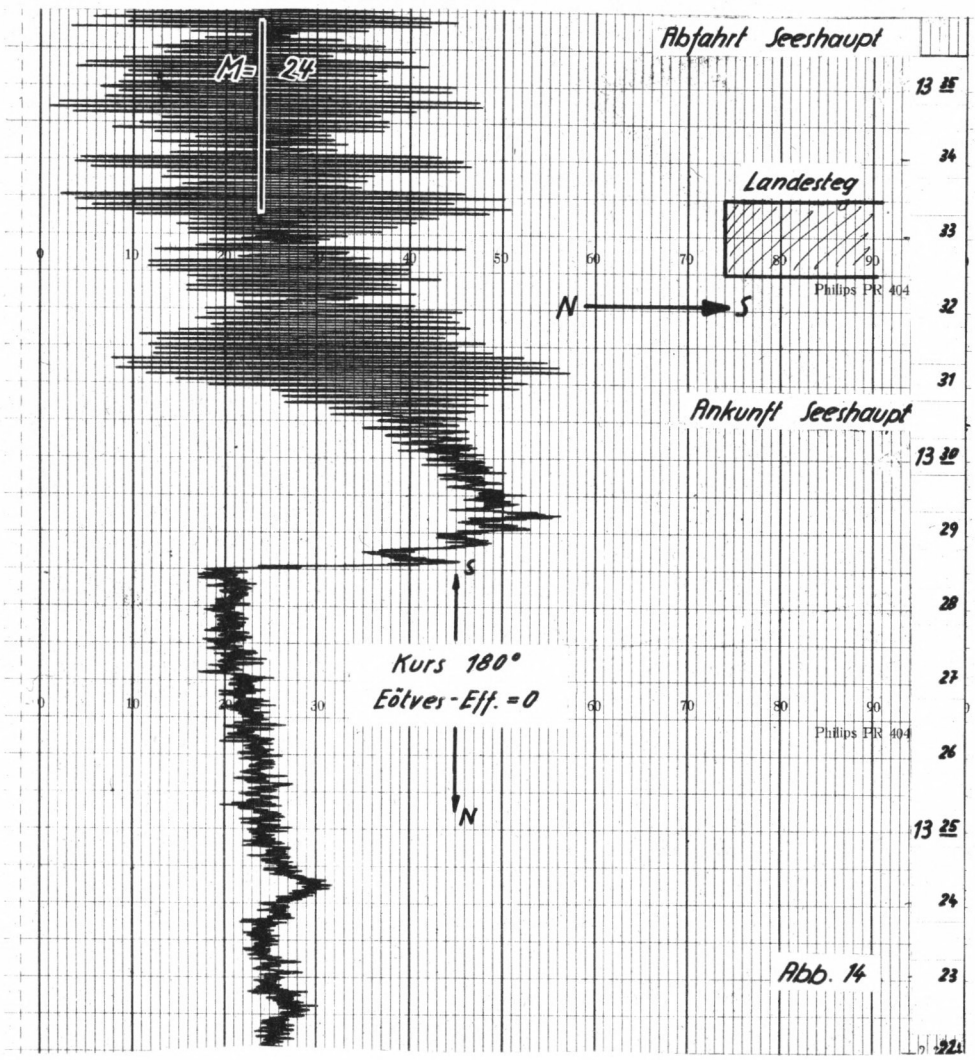

Abfahrt Seeshaupt
13 25
34
Landesteg
33
Philips PR 404
N
S
32
31
Ankunft Seeshaupt
13 30
29
28
27
Kurs 180°
Eötves-Eff. = 0
Philips PR 404
26
13 25
24
23
22
M= 24

Abb. 14

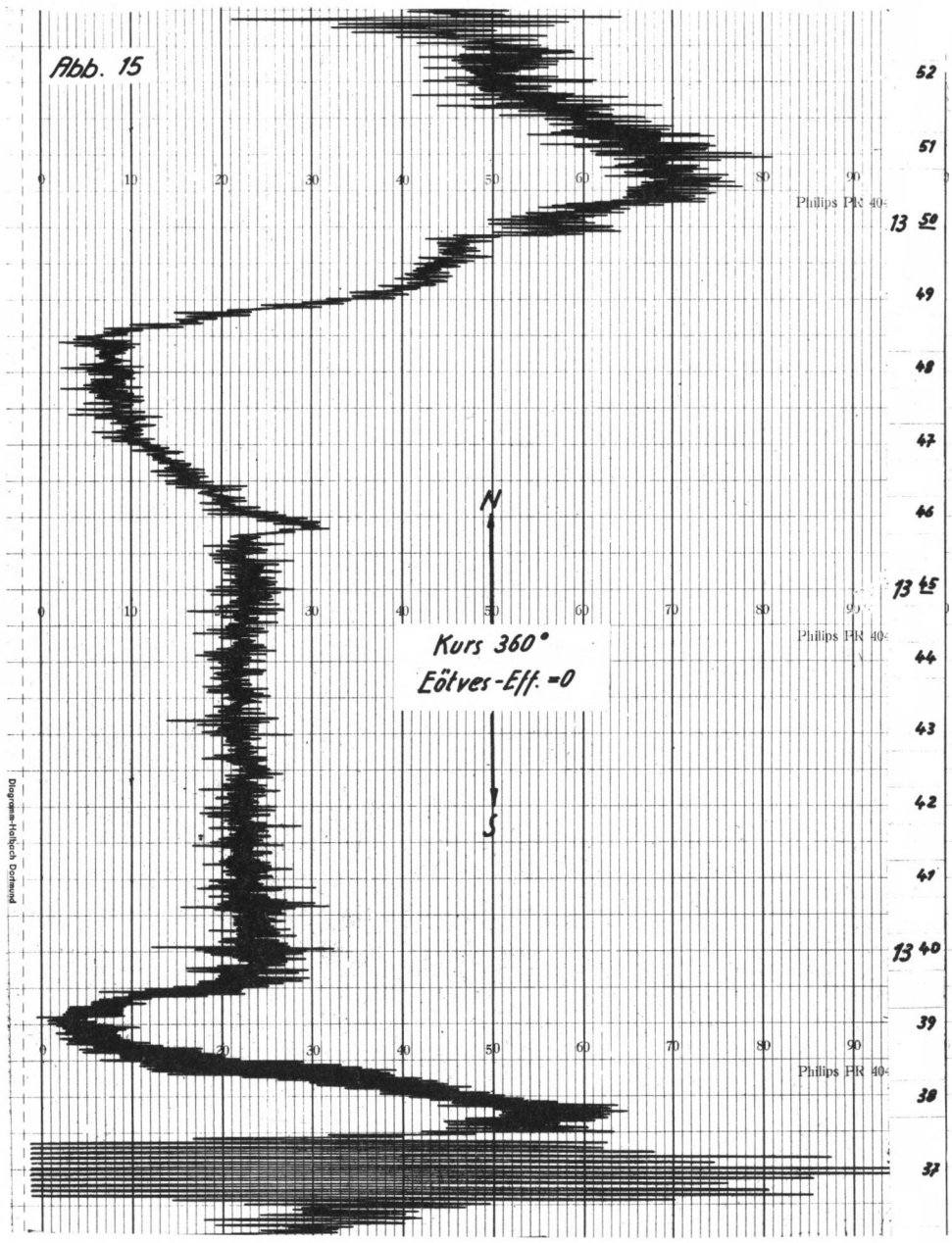


Abb. 15
Philips PR 40
Philips PR 40
Philips PR 40
N
S
Kurs 360°
Eötves-Eff. =0
Diagramm-Hoibach Dortmund
52
51
13 50
49
48
47
46
13 45
44
43
42
41
13 40
39
38
37

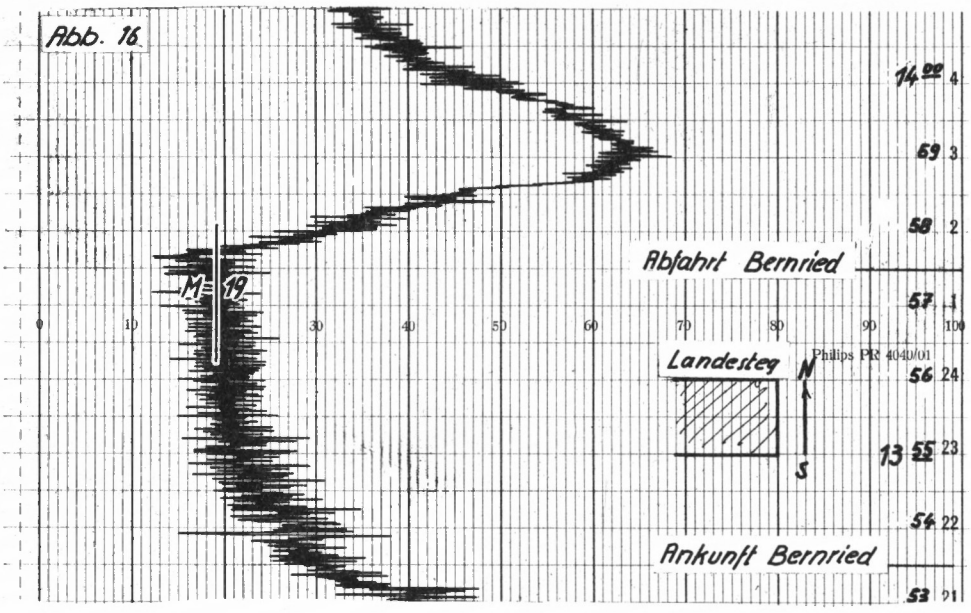


Abb. 16
M=19
0
10
30
40
50
60
70
80
90
100
14 22 4
69 3
58 2
Abfahrt Bernried
57 1
Landesteg
Philips PM 4040/01
N
56 24
13 55 23
22
S
54 22
Ankunft Bernried
53 21

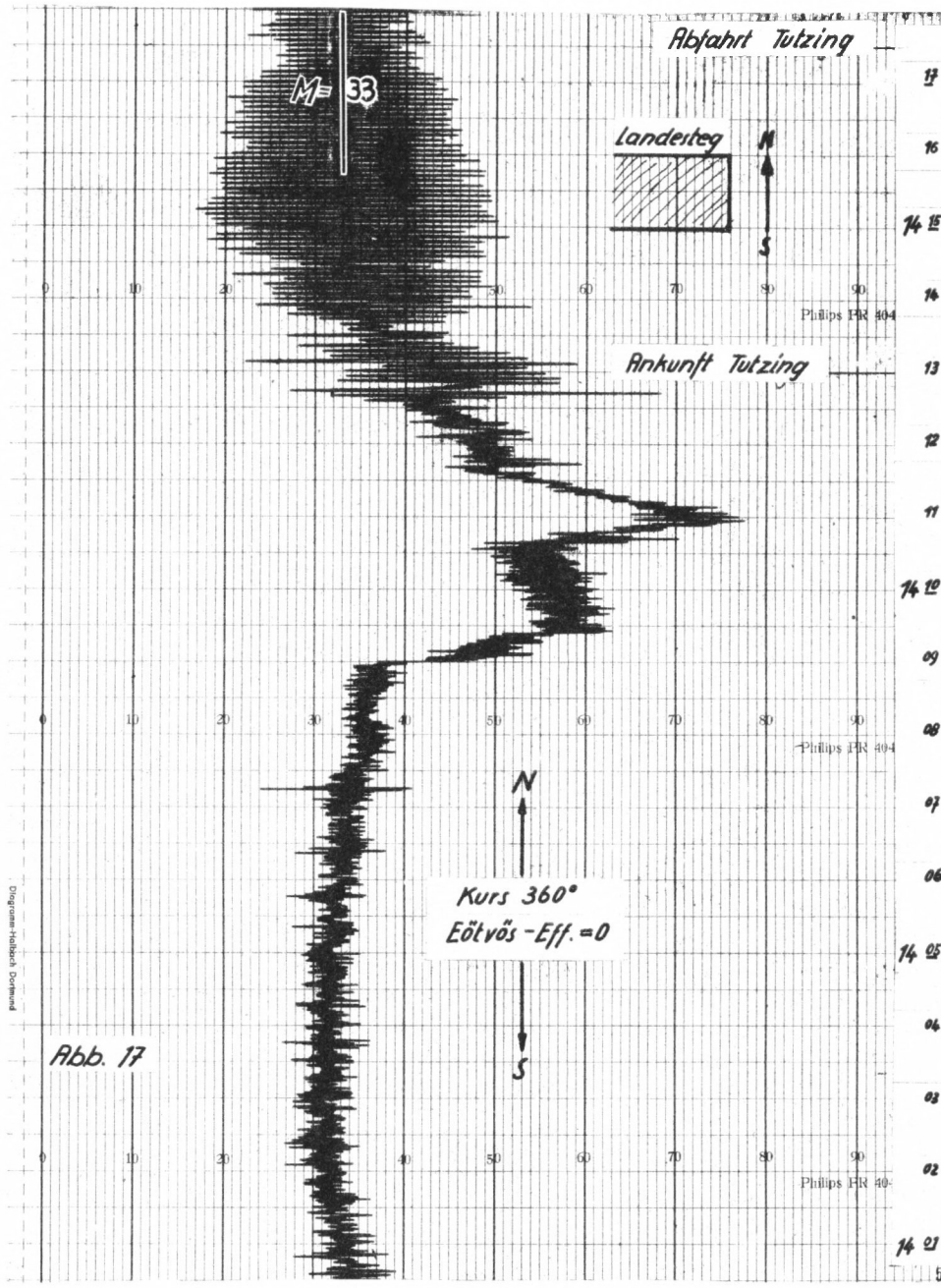

Abfahrt Tutzing
M= 33
Landesteg
N
S
Philips PR 404
Ankunft Tutzing
Philips PR 404
N
Kurs 360°
Eötvös-Eff. = 0
S
Philips PR 404
17
16
15
14
13
12
11
10
09
08
07
06
05
04
03
02
21
Diagramm-Halbach Dortmund

Abb. 17

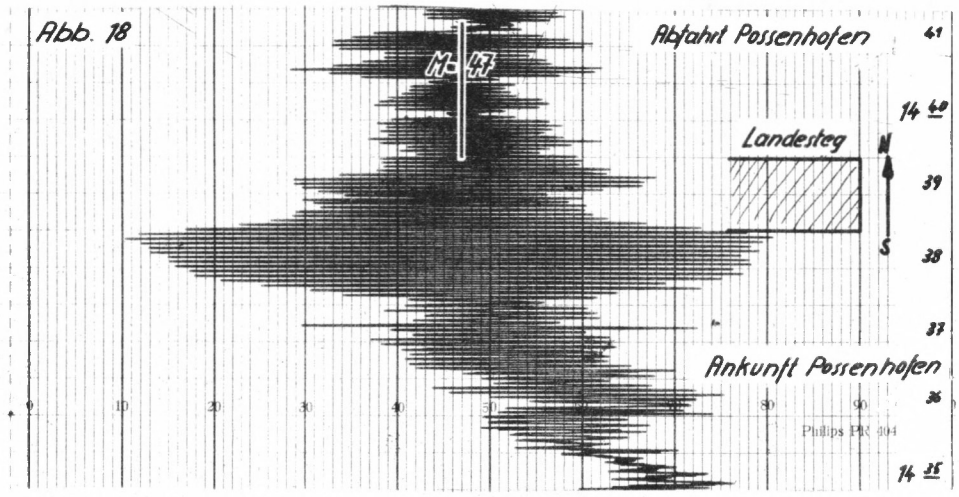


Abb. 18
Abfahrt Possenhofen
M=47
Landesteg
N
S
Ankunft Possenhofen
Philips PR 404

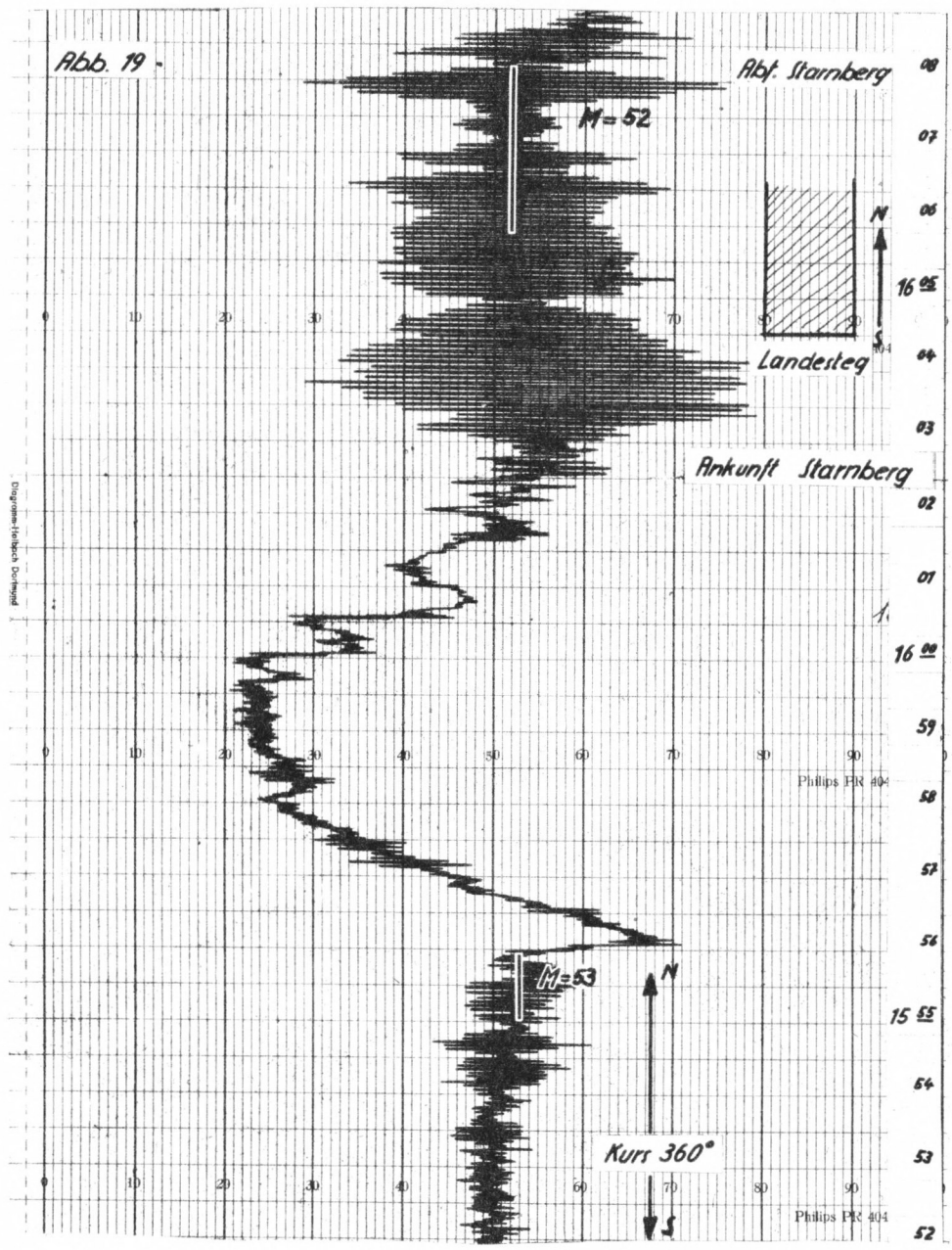


Abb. 19
Abf. Starnberg
M=52
N
S
Landesteg
Ankunft Starnberg
Philips PR 404
M=53
N
Kurs 360°
S
Philips PR 404