Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Vermessungswesen und Kulturtechnik = Revue technique suisse des mensurations et améliorations foncières

Band: 36 (1938)

Heft: 5

Artikel: Das Statoskop

Autor: Schönholzer, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-197304

weitgehende praktische Versuche angestellt. P. Lejay hat auf seiner Reise nach Zi-ka-wei in China Messungen auf 12 Stationen ausgeführt. Da die Schwerewerte auf diesen Stationen schon mit Hilfe der bisher fast allgemein verwendeten Methode von Sterneck genau bestimmt gewesen waren, so ergaben sich interessante Vergleichsmöglichkeiten. Die mittlere Abweichung der mit Hilfe des elastischen Pendels gefundenen Schwerewerte von den frühern betrug $\pm$ 1.5 Milligal (Ein Milligal ist 0.001 cm sec^{-2}). Damit hat sich die Methode als bemerkenswert genau erwiesen, wenn man bedenkt, daß der mittlere Fehler eines Schwerewertes bei den Bestimmungen in den Jahren 1911—1918 mit Hilfe der von Sterneck'schen Methode in der Schweiz $\pm$ 0.8 Milligal betragen hat.

Die Messungen mit dem Schweremesser Holweck-Lejay können aber viel rascher und einfacher ausgeführt werden als diejenigen mit dem von Sterneck'schen Verfahren. Es genügt eine viel einfachere Bestimmung des Ganges der Beobachtungsuhr; eine vollständige Beobachtung ist viel rascher durchgeführt.

P. Lejay hat mit diesem Apparat in sehr kurzer Zeit gute Schweremessungen auf 10 Stationen in Indochina und auf 37 Stationen in Nord-Ost-China durchgeführt. Dieses Gerät muß daher als eine sehr wertvolle Bereicherung der geodätischen Instrumententechnik angesprochen werden. Es wird für die Feldbeobachtungen in einem Automobil transportiert, in dem es mit einer elastischen gedämpften Aufhängung befestigt wird, um es vor Stößen zu bewahren (Figur 3). Figur 4 zeigt die Aufstellung des Apparates auf einem Dreifuß.

Die 4 Figuren wurden uns in zuvorkommender Weise von Herrn General Perrier, dem Redaktor des Bulletin géodésique zur Verfügung gestellt; sie sind dem oben zitierten Aufsatz von *F. Holweck*, entnommen.

Um den Artikel nicht ungebührlich auszudehnen, verzichten wir auf Genauigkeitsfragen der dynamischen Methode näher einzutreten. Nur soviel sei bemerkt, daß die dynamische Methode beim astasierten elastischen Pendel höhere Genauigkeiten zu erreichen erlaubt, als die statische Methode. Es lag uns nur daran einen weitern Leserkreis auf die interessanten neuen Instrumente zur Schwerebestimmung hinzuweisen, da dieselben in der Form von Holweck-Lejay bemerkenswerte Perspektiven eröffnen.

Später wollen wir eventuell auf neuere statische Schweremesser kurz eintreten.

Das Statoskop.

Von A. Schönholzer, dipl. Ing.

Seit einigen Jahren steht der Luftphotogrammetrie ein neues Instrument zur Verfügung, das eigens für ihre Zwecke konstruiert wurde. Es ist dies das Statoskop, eine Erfindung des Finnen Dr. Väisälä; es stellt im Prinzip nichts anderes dar als ein sehr empfindliches Aneroid und dient zur Ermittlung von Höhendifferenzen zwischen Luftaufnahmepunkten. Es erleichtert die Bestimmung der äußern Orientierung der einzelnen Aufnahmen in den Flugstreifen.

Sein Aufbau ist von großer Einfachheit. Im Innern der mit Eis-Wassergemisch gefüllten Dewarflasche *A* hängt ein mit Luft gefüllter Glaskolben *B*. Dieser ist durch den Dreiweghahn *C* mit der Außenluft (1) und mit der Meßkapillare *D* verbunden, deren anderes Ende (2) ebenfalls in die Außenluft mündet. Die U-förmig gebogene Meßkapillare enthält die Manometerflüssigkeit, eine Flüssigkeit mit möglichst geringem spezifischem Gewicht, die gut sichtbar sein muß und nicht zu flüchtig sein soll (z. B. gefärbter Alkohol).

Der Meßvorgang geht folgendermaßen vor sich. Während das Flugzeug in die Aufnahmehöhe aufsteigt, wird der Dreiweghahn in der gezeichneten Stellung belassen. Durch die Oeffnungen 1 und 2 wirkt der äußere Luftdruck von beiden Seiten gleich auf die Manometerflüssigkeit und auf das Innere des Kolbens. Ist man auf der gewünschten Arbeitshöhe angelangt, so soll möglichst horizontal geflogen werden. Um dies zu kontrollieren und die unvermeidlichen Abweichungen zu messen, wird das Statoskop in Tätigkeit gesetzt, das heißt, der Hahn wird (in der Figur 1) um 100 g gegen links gedreht und damit die Oeffnung 1 geschlossen. So wirkt der Luftdruck nur noch durch die Kapillare und die Manometerflüssigkeit auf das Innere des Kolbens. Jeder Höhenänderung des Flugzeuges entspricht eine Aenderung des äußern Luftdruckes, wodurch das Gleichgewicht der beiden Flüssigkeitssäulen gestört wird. Sinkt zum Beispiel das Flugzeug, so wird der steigende Außendruck die Flüssigkeit auf der Innenseite so weit hinaufdrücken, bis deren Uebergewicht und der durch die Volumenverringerung gesteigerte Innendruck sich wieder Gleichgewicht halten. Aus der Höhendifferenz der beiden Flüssigkeitssäulen, die an der angebrachten Teilung abgelesen wird, kann die Niveaudifferenz der beiden Punkte berechnet werden. In praxi ist das Verfahren so, daß das Statoskop mit einer geeigneten Kleinfilmkammer kombiniert wird, so daß automatisch im Augenblick des Exponierens einer photogrammetrischen Aufnahme die Statoskopangaben, ein Zählwerk und eine Uhr,

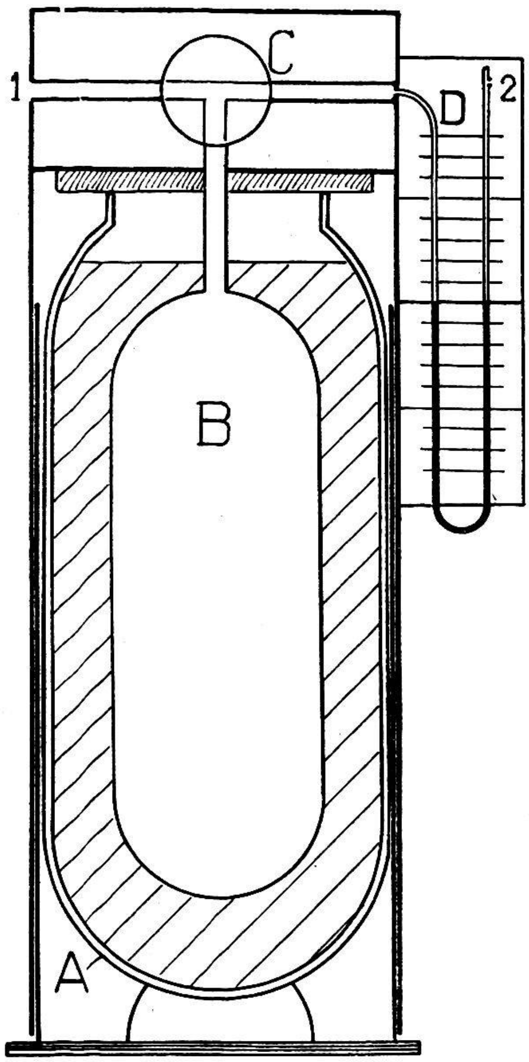

Fig. 1. Statoskop (schematisch).

photographiert werden. Aus dem Filmnegativ können alle Werte erhoben werden. Diese ganze Apparatur wird *Registrierstatoskop* genannt. Ein zweites Statoskop steht dem Piloten zur Verfügung, damit er seinen horizontalen Flug kontrollieren und verbessern kann.

Die Berechnung des Höhenunterschiedes zweier Punkte aus den Statoskopangaben ist sehr einfach. Wir führen die Ablesung zuerst auf die Differenz zweier Barometerstände zurück, um dann mit Hilfe der bekannten Formeln für barometrische Höhenmessung die Differenz in Meter zu rechnen.

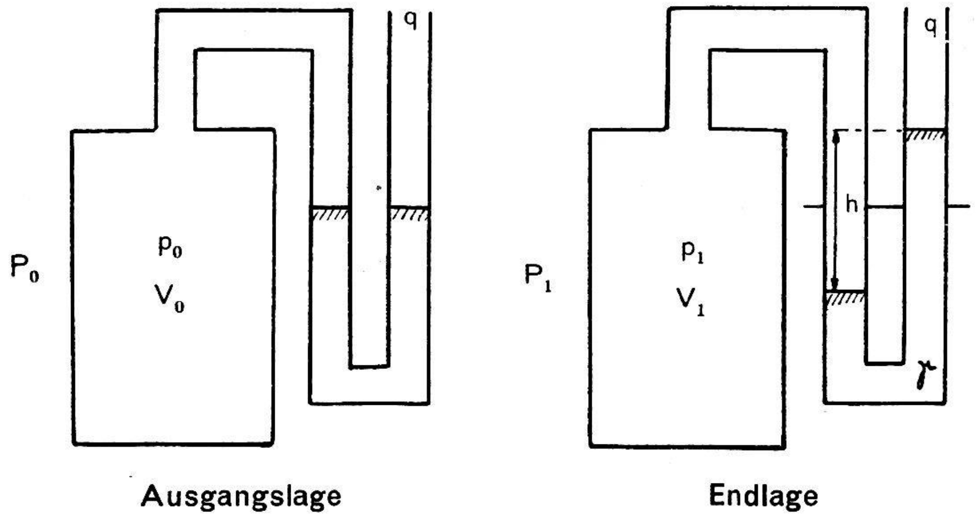

Fig. 2.

1. Berechnung der Barometerdifferenz.

V_0, V_1:	Volumen in der Ausgangs-, resp. Endlage	in cm^3
P_0, P_1:	Außendruck ,, ,, ,,	gr cm^{-2}
p_0, p_1:	Innendruck ,, ,, ,,	gr cm^{-2}
h:	Statoskopangabe in cm	
q:	Querschnitt der Meßkapillare in cm^2	
γ:	spez. Gewicht der Manometerflüssigkeit in gr cm^{-3}	

In der Ausgangslage bestehen die folgenden Beziehungen:

$$p_0 = P_0;\ p_0 V_0 = P_0 V_0 = R\ T_a = \text{konstant} \tag{1}$$

R ist die Gaskonstante; T_a die absolute Temperatur. Das Eis-Wassergemisch (schmelzendes Eis) hat die konstante Temperatur 0°, die in der Dewarflasche lange erhalten bleibt.

In der Endlage bestehen die Beziehungen:

$$V_1 = V_0 + \frac{h}{2} q \tag{2}$$

$$p_1 = P_1 + h\gamma \tag{3}$$

$$\underline{p_1\ V_1} = R\ T_a = \underline{P_0\ V_0} \tag{4}$$

Die Gleichungen (2) und (3) werden in (4) eingesetzt:

$$P_0 \; V_0 = (P_1 + h\gamma)\left(V_0 + \frac{h}{2} q\right)$$

durch ausrechnen erhalten wir:

$$P_1 = \frac{P_0}{(1 + A \cdot h)} - h \cdot \gamma \text{ gr cm}^{-2} \tag{5}$$

wobei $A = \frac{q}{2V_0}$ cm^{-1} die sogenannte Statoskopkonstante bedeutet. Damit ist die Statoskopangabe auf den Druckunterschied zurückgeführt. Für $P_1 > P_0$ ergibt sich ohne weiteres eine analoge Formel, wobei die Vorzeichen von $A \cdot h$ und $h \cdot \gamma$ umzukehren sind. In den barometrischen Höhenformeln ist der Druck stets in Millimeter Quecksilbersäule angegeben, was wir hier auch einführen wollen. Es gilt

$$P = \frac{B}{10} \gamma_{Hg}$$

γ_{Hg} spez. Gewicht des Hg
B Barometerstand in mm

Indem wir dies in (5) einsetzen und die ganze Gleichung mit $\frac{10}{\gamma_{Hg}}$ multiplizieren, erhalten wir

$$B_1 = \frac{B_0}{(1 + A \cdot h)} - 10 \cdot h \cdot \frac{\gamma}{\gamma_{Hg}} \text{ in mm } Hg$$

Nun wollen wir noch h anstelle von cm in Skalenteilen zu 2 mm einführen; die Koeffizienten von h sind daher durch 5 zu dividieren und unsere Gleichung heißt zum Schluß:

$$B_1 = \frac{B_0}{\left(1 + \frac{A}{5} h\right)} - 2 \cdot h \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma_{Hg}}\right) \tag{6}$$

wobei B in mm Hg und h in Skalenteilen zu nehmen sind.

Man erkennt ohne weiteres, daß der erste Teil der obigen Gleichung den Einfluß der Volumen- und damit der Druckänderung im Innern des Statoskopes darstellt. Es liegt nahe, zu wünschen, daß der Klammerausdruck im Nenner des ersten Gliedes von (6) gleich 1 werde, was dann eintreten würde, wenn A gleich Null wäre. Dies würde der Fall sein, wenn die Kapillare unendlich dünn oder V_0 unendlich groß gemacht werden könnte. Aus praktischen Gründen (Sichtbarkeit im Film) muß aber die Kapillare ziemlich dick sein, ebenso kann V_0 nicht beliebig groß gemacht werden. In unserm Fall ist $V_0 = 33.6$ cm^3, $q = 0.0067$ cm^2. Damit wird A $0.997 \cdot 10^{-4}$ cm^{-1} oder rund $1 \cdot 10^{-4}$ cm^{-1}. In V_0 sind die Volumina im Hahn und in der Zuleitung inbegriffen. Ihre Temperatur ist dabei auch als konstant angenommen, was in erster Annäherung zweifellos richtig ist. Versuche haben jedoch gezeigt, daß hierin eine große Fehlerquelle steckt. Starkes Erwärmen des Oberteils des Statoskopgehäuses mit der Hand kann Ausschläge bis zu 1 Skalenteil hervorrufen.

Es ist daher angebracht, das Instrument nicht allzuoft und vor allem nicht oben anzufassen. Der Einfluß des Aufrundens von A auf $1 \cdot 10^{-4}$ cm^{-1} kann ohne weiteres vernachlässigt werden, da er weniger als 1 ‰ Fehler auf die errechnete Höhendifferenz ergibt. Berechnen wir nun mit der Formel (6) und den obigen Daten den Betrag des Einflusses der Volumenänderung für $h = 10$ Skalenteile bei den Barometerständen von 750 mm und 464 mm (rund 4000 m über Meer), so erhalten wir 0.15 bezw. 0.093 mm Hg. Die barometrischen Höhenstufen betragen in diesen beiden Fällen rund 10.7 m resp. 17.3 m, der Einfluß der Volumenänderung macht also beidemale 1.6 m aus. Einen solchen Betrag dürfen wir aber nicht vernachlässigen. Nehmen wir bei $h = 10.0$ Skalenteilen einen Fehler von 0.01 mm Hg als zulässig an (maximal 20 cm Höhenfehler), so müßte $A = 7 \cdot 10^{-6}$ cm^{-1} werden, das heißt, daß bei gleicher Kapillare ein V_0 von 957 cm³ oder rund ein Liter erforderlich wäre.

Wir werden nun aber zeigen, daß die Rechenarbeit stark vereinfacht werden kann. Die genaue Berechnung braucht man pro Flugstreifen nur für einen Ausschlag zu machen, z. B. für einen fingierten Wert von $h =$ 10.0 Skalenteilen. Die andern Werte werden dazwischen interpoliert, da eine überschlägige Rechnung zeigt, daß die Funktion $\dfrac{B_0}{\left(1 + \dfrac{A}{5} h\right)}$ im Bereiche $0 < h < 20$ als linear verlaufend angenommen werden kann. Ebenso kann in diesen kleinen Bereichen die barometrische Höhenstufe als konstant betrachtet werden. Auf Grund dieser Ueberlegungen setzen wir in die Gleichung (6) ein für allemal $h = 10$ ein und erhalten

$$B_1 = \frac{B_0}{(1 + 2A)} - 20 \left(\frac{\gamma}{\gamma_{Hg}}\right) \tag{7}$$

oder zahlenmäßig für unser Statoskop

$$\underline{B_1 = \frac{B_0}{1.0002} - 1.1842 \quad \text{in mm } Hg}$$

$$\gamma = 0.805$$
$$\gamma_{Hg} = 13.596$$

Mit der Formel (7) ist der erste Teil der Berechnung, Ueberführung der Angabe in Barometerstände, abgeschlossen.

2. *Berechnung der Statoskophöhenstufe.*

Unter der *Statoskophöhenstufe* verstehen wir den Höhenunterschied in Meter für einen Ausschlag von $h = 10$ Skalenteilen, im Gegensatz zur barometrischen Höhenstufe für 1 mm Hg. Hier können nun 2 Wege eingeschlagen werden: Genähert mit Hilfe der barometrischen Höhenstufe oder genau mit der allgemeinen Formel für barometrische Höhenmessung.

Für die barometrische Höhenstufe gibt Jordan die folgende Formel:

$$(8) \qquad \Delta H = \frac{8019}{B_0}(1 + a\,t)\,(B_0 - B_1) \text{ in Meter, wobei}$$

$(B_0 - B_1) = 1$ mm.

Wie man sieht, ist ΔH proportional der Barometerdifferenz, wir dürfen daher statt 1 mm die Differenz für $h = 10$ einführen und erhalten so die Statoskophöhenstufe. Setzen wir B_1 nach unserer früher erhaltenen Formel (7) in (8) ein, so erhalten wir:

$$(9) \qquad \Delta H = \frac{8019}{B_0}(1 + a\,t)\left\{B_0\left[1 - \frac{1}{(1 + 2A)}\right] + 20\,\frac{\gamma}{\gamma_{Hg}}\right\}$$

oder zahlenmäßig für das untersuchte Statoskop:

$$\underline{\Delta H = (1 + a\,t)\left(1.60 + \frac{9496}{B_0}\right) \text{ in Meter.}}$$

Dabei bedeutet t die Lufttemperatur in Zentigraden, B_0 den Barometerstand in der Flughöhe und $\alpha = 0.0037$ ist der Wärmeausdehnungskoeffizient der Luft für 1° Celsius. Damit ist eine einfache Gebrauchsformel für die Statoskophöhenstufe entwickelt. Man erkennt hier wieder, wie sich schon früher (Seite 113) bei Versuchsrechnungen gezeigt hat, daß der Einfluß der Volumenänderung konstant ist und 1.60 Meter beträgt.

Für die barometrische Höhenstufe gibt es auch Tabellen, doch ist es fraglich ob sie bis in genügende Höhe reichen; die Rechenschieberberechnungen nach Formel (9) werden eher schneller zum Ziele führen.

Die genaue Formel zur barometrischen Höhenmessung lautet, wieder nach Jordan:

$$(10) \quad \Delta H = K \log\left(\frac{B_0}{B_1}\right)(1 + a\,t)\left(1 + 0.377\,\frac{e}{B}\right)\left(1 + \frac{2H}{r}\right)(1 + \beta\cos 2\varphi)$$

$$K = 18400$$

Im Gegensatz zu Formel (8) geht das ΔH nicht proportional zu $(B_0 - B_1)$, sondern zu $(\log B_0 - \log B_1)$, außerdem wird hier der Einfluß des Dunstdruckes, $\left(1 + 0.377\,\frac{e}{B}\right)$, der Höhe über Meer, $\left(1 + \frac{2H}{r}\right)$ und der geographischen Breite, $(1 + \beta\cos 2\varphi)$, mitberücksichtigt. Bevor wir die beiden Formeln (9) und (10) in bezug auf Genauigkeit und Zweckmäßigkeit miteinander vergleichen, empfiehlt es sich, die Genauigkeit der Statoskopangaben selbst zu untersuchen.

In der Höhe von Zürich beträgt die Statoskophöhenstufe rund 15 m, in 4000 m Höhe rund 22 m; $^1/_{10}$ Skalenteil (1 %) entspricht also im zweiten Fall 22 cm Höhe. Um die Genauigkeit der Höhenbestimmung mit Hilfe des Statoskopes ermessen zu können, müssen wir uns Rechenschaft geben über die Genauigkeit der Ablesung des h an der Kapillare. In dieser Beziehung ist das bei den Untersuchungen verwendete Statoskop der

Eidg. Technischen Hochschule nicht besonders glücklich konstruiert, da die Teilung rund 3 mm hinter der Kapillare liegt. Um Parallaxfehler zu vermeiden, mußte für die Versuchsmessungen mit einer speziellen Zielvorrichtung abgelesen werden und es waren die größeren Werte der Zielneigung entsprechend zu reduzieren. Für die Statoskopfilmkammer lassen sich die Reduktionswerte leicht aus dem Objektivabstand berechnen. Trotz dieser Maßnahmen ließ sich aber die Ablesegenauigkeit nicht unter $^1/_{10}$ Skalenteil (0.2 mm) senken und die Statoskophöhen werden daher immer mit einem Fehler von $\pm$ 1% behaftet sein. Um jedoch diese Genauigkeit wirklich zu erreichen, muß das Instrument sehr sorgfältig behandelt werden. Die Messungen sind stets unter annähernd konstanter Außentemperatur durchzuführen, da sich sonst die Ausdehnung der Luft in der Kapillare und in den obern Leitungen (außerhalb der Dewarflasche!) sehr störend bemerkbar macht. In Extremfällen können diese Einflüsse bis zu 1 Skalenteil Fehler bewirken. Alle diese Mängel haften aber unserm speziellen Instrumente an, sie sind aber bis zu einem gewissen Grade verbesserungsfähig. Durch kompendiösern Bau, durch möglichste Verringerung und gute Isolierung der Volumina außerhalb der Dewarflasche, sowie durch Verwendung einer leichteren Manometerflüssigkeit ließen sich unseres Erachtens bessere Resultate erzielen. Ob dies einen großen Sinn hätte, ist allerdings fraglich, da noch andere Fehlerquellen existieren, die wir nicht so leicht erfassen können. Es wäre z. B. sehr schwierig, zu untersuchen, ob der Druck in der Kabine eines Flugzeuges stets dem Luftdruck der betreffenden Höhe entspricht und welchen Einfluß Geschwindigkeitsänderungen und Böen auf den Innendruck haben. In diesem Zusammenhang hat man sich auch zu überlegen, welchen Einfluß eine Unregelmäßigkeit im Durchmesser der Kapillare ausübt. Schon ein Blick auf die Formel (7) zeigt, daß er sehr klein sein muß, da nur A davon betroffen wird. Eine diesbezügliche Untersuchung ergab das interessante Resultat, daß die Durchmesser der beiden Schenkel der Kapillare unseres Registrierstatoskopes gegen unten etwas abnehmen. Tragen wir nämlich die Bewegung des Mittels der beiden Ablesungen links und rechts in der Ordinate eines Koordinatensystems auf, dessen Abscisse durch die Ablesungen am Schenkel links gebildet wird, so erhalten wir als Mittel aus mehreren Versuchen eine Kurve, die sich von 0 aus nach beiden Seiten um rund 0.15 Skalenteile senkt. Bei 0 sind die beiden Ablesungen gleich. Diese Kurve kann man sich nur mit einer Verengerung des Querschnittes gegen unten erklären. Praktische Bedeutung hat dies nicht. Dasselbe gilt auch von der Eigenschaft der Manometerflüssigkeit, bei sehr raschen Schwankungen eine dünne Schicht an den Wandungen zurückzulassen. Es ändert dabei nur die Gesamtlänge der Flüssigkeitssäulen, nicht aber h. Pendeln der Ablesungen wurde nie beobachtet, auch bei offenem Hahn nicht.

(Schluß folgt.