

Höhenmessung mit Hilfe aerologischer Registrierungen, mit einigen Ergebnissen aus Innerpersien.

von

F. Loewe.

Unter denjenigen Grössen, die in die Formeln der barometrischen Höhenmessung einzusetzen sind, pflegen in geographisch wenig erschlossenen Ländern zwei mit besonderer Unsicherheit behaftet zu sein, das horizontale Luftdruckgefälle zwischen dem Ausgangspunkt bekannter Höhe und dem seiner Höhe nach zu bestimmenden Ort und die mittlere Temperatur der Luftsäule zwischen Ausgangs- und Endpunkt der Höhenmessung.

Für die Bestimmung beider Grössen bieten aerologische Messungen ein wertvolles Hilfsmittel.

Die horizontalen Luftdruckgradienten hat man häufig aus den Windgeschwindigkeiten zu bestimmen versucht. Die Bodenwinde sind jedoch vielfach zu stark lokal beeinflusst, um, besonders für den Einzelfall, um den es sich in unerschlossenen Gebieten meist handelt, zuverlässige Anhaltspunkte zu liefern. Wesentlich besser lässt sich der Luftdruckgradient aus Höhenwindmessungen bestimmen. So ergeben Untersuchungen von E. Gold¹⁾, dass der Wind in etwa 1000 m Höhe mit ziemlicher Genauigkeit den Luftdruckgradienten nach Grösse und Richtung zu bestimmen gestattet. Solche Messungen des Höhenwindes lassen sich durch die Methode freifliegender Pilotballon leicht durchführen; bei der später zu besprechenden Verwendung von Registrierflugzeugen dürften auch gelegentliche Abdriftmessungen hinreichend genaue Werte geben.

Die mittlere Temperatur der zwischen Ausgangspunkt und Endpunkt der Luftdruckmessung liegenden Luftsäule lässt sich, wie oft nachgewiesen, als Mittel der Temperaturen an der oberen und unteren Station manchmal nur sehr ungenau bestimmen. Solange man eine mässige Temperaturabnahme mit der Höhe als die selten

durchbrochene Regel ansah, erschienen die so entstehenden Fehler nicht so wesentlich. Die neuere Zeit zeigt in immer wachsendem Umfang die Rolle, die Temperaturumkehrschichten einerseits, überadiabatische Temperaturgradienten andererseits im Aufbau der Atmosphäre spielen, besonders in Teilen der Erde mit extremem Klimacharakter, in denen rohe barometrische Höhenmessungen noch von wissenschaftlichem Wert sind.

Zwei Fälle aus der Praxis des Verfassers, die keineswegs besonders extreme Zustände darstellen, mögen die Unmöglichkeit erläutern, aus Bodenbeobachtungen an zwei Stationen die mittlere Temperatur der Luftsäule zu bestimmen. Bei einer Temperatur einer grönländischen Küstenstation im Winter von $+ 30^{\circ}$, der Temperatur im Innern des Inlandeises von $- 55^{\circ}$ ergäbe sich eine mittlere Temperatur der Luftsäule von $+ 42,5^{\circ}$. Doch beschränken sich diese niedrigen Temperaturen auf die unmittelbare Nachbarschaft des Erdbodens; schon knapp darüber liegt die Temperatur häufig 15 bis 20 Grad höher²⁾, sodass sich eine wahre Mitteltemperatur der Luftsäule von etwa $+ 25^{\circ}$ ergibt. Die Höhe der Station im Innern des Inlandeises ergibt sich dann zu etwa 7 % höher, was für das Innere des etwa 3000 m hohen Inlandeises eine um rund 200 m grössere Höhe ausmacht.

Andererseits können die grossen vertikalen Temperaturgradienten, die in Trockengebieten sich in den Tagesstunden ausbilden, bei der Verwendung der mittleren Temperatur von oberer und unterer Station zu recht fehlerhaften Höhenbestimmungen führen. Die mittlere Mittagstemperatur in Bagdad erreicht im Juli etwa 36° ; in Kirmanschah, dem ersten Landepunkt der Flugstrecke nach Teheran, steigt die Temperatur auf 36° . Das Mittel der Temperatur an der oberen und unteren Station beträgt somit 41° . Diese Temperatur in Verbindung mit dem Luftdruckunterschied zwischen Bagdad und Kirmanschah ergäbe für Kirmanschah eine Höhe von 1400 m. Legt man jedoch die wahre Temperaturverteilung zugrunde, wie sie sich aus fortlaufenden aerologischen Messungen auf der Flugstrecke nach Teheran ergibt, so findet man für Kirmanschah eine Höhe von nur 1340 m, also eine über 4 % geringere Höhendifferenz gegen Bagdad. Die Ursache dieser Abweichung ist, dass sich in den bodennäheren Schichten der trockenen Subtropen in den Mittagsstunden eine Temperaturabnahme bis zu 3 Grad für 100 m einstellt³⁾, sodass bis in grosse Höhen die Temperaturabnahme im Mittel 1° für 100 m übersteigt. Die aerologisch gemessene Höhe von Kirmanschah entspricht einer Mitteltemperatur der Luftsäule bis zum Meeresspiegel von nur 30° ⁴⁾.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei der vom Kaspischen Meer ausgehenden Höhenberechnung von Teheran. Druckdifferenz und Mitteltemperatur der oberen und unteren Station ergeben für Teheran eine Höhe von 1200 m, während die aerologische Berechnung für den Flugplatz Teheran 1140 m, das Nivellement in guter Übereinstimmung für die Stadt 1132 m ergibt.

Die angeführten, der Praxis entnommen Fälle zeigen, wie wertvoll in Ländern ohne Nivellement und trigonometrische Höhenmessung Flugzeugerkundungen mit fortlaufender Registrierung der aerologischen Daten sein werden. Über die Höhe überflogener Bergketten und Gipfel lassen sich dabei leicht Angaben mit einer ungefähren Genauigkeit von etwa 50 m machen, während die Höhe solcher Gebirge oft. z. B. im gesamten Innern Persiens, um hunderte von Metern unsicher ist⁵⁾. Schliesslich sei nicht übersehen, dass meist die zeitliche Druckänderung im Meeresspiegel infolge der geringen Zeitdauer der Flüge vernachlässigt werden kann. Wird doch ein solcher Flug von einem der Höhe nach bekannten Ort aus selten mehr als 3 Stunden in Anspruch nehmen. Die kurze Flugdauer ist besonders günstig, weil selbst bei der gleichmässigen Wetterlage der sommerlichen Subtropen der Druck von Tag zu Tag um mehrere Millimeter schwanken kann, wobei der Verlauf solcher Druckänderungen in meteorologisch wenig erschlossenen Gebieten vielfach kaum näher zu analysieren ist⁶⁾.

Für die aerologische Höhenmessung können zweckmässig die in der aerologischen Forschung gebräuchlichen Registrierinstrumente verwandt werden, die während des Fluges vom Ausgangspunkt bis zum Endpunkt der Messung fortlaufend Druck, Temperatur und Feuchtigkeit auf einem Registrierstreifen aufzeichnen. Die Genauigkeit der Temperaturmessung beträgt bei sorgfältiger Bestimmung des Ausgangspunkts etwa 1°, die Genauigkeit der Druckmessung 1 mm. Über die notwendigen Korrekturen (Trägheit der Temperatureaufzeichnung, „Hysteresisschleife“ der Druckeichung u. a.) genüge ein Hinweis auf die einschlägige Literatur⁷⁾. Die Berechnung der Höhen lässt sich nach der Staffelmethode⁸⁾ mit Hilfe der von Bjerknes gegebenen Tabellen⁹⁾ und entsprechender Vordrucke¹⁰⁾ bequem durchführen.

Bei meteorologischen Studienflügen, die ich im Sommer 1928 in Persien ausführen konnte¹¹⁾, war es mir möglich, nach den geschilderten Methoden die Höhenlage einiger grösserer Städte, bezw. der benachbarten Flugplätze neu zu bestimmen. Die Höhenbestimmungen im Iran liegen ja im allgemeinen sehr im argen. An zuverlässigen Angaben aus dem Innern Persiens ist dem Verfasser bei

allerdings flüchtigem Umblick in der Literatur nur die Angabe von Stahl¹²⁾ bekannt geworden, wonach die durch ein Nivellement von Pechlewi nach Teheran gewonnene Höhe der persischen Hauptstadt 1132 m beträgt. Alle übrigen Höhenangaben im Zentralgebiet Persiens scheinen auf gelegentlichen Luftdruckmessungen von Forschungsreisenden zu beruhen. Für die Höhe der meteorologischen Stationen, die der „Indian Weather Service“ in Teheran, Isfahan, Mesched und Seistan unterhält, sind in den Veröffentlichungen zwar Werte angegeben, die aber von den auf den vorhandenen Karten auftretenden und ebenso von den vom Verfasser 1928 gemessenen beträchtlich abweichen. Es ist nicht klar, ob sich die Höhenangaben des „Indian Weather Service“ auf dieselben Punkte wie die Werte der Karten beziehen; aber bei der flachen näheren Umgebung von Teheran und Isfahan sind Höhenunterschiede von 100 m bzw. über 150 m wenig wahrscheinlich.

Auch die neueren Kartenangaben selbst weichen, wie die folgende Tabelle I zeigt, stark von einander ab.

Tabelle I.

	Englisch ¹³⁾	Französisch ¹⁴⁾	Deutsch ¹⁵⁾	M. Off. of India	M. Mess, 1928
Teheran	1150	1132	(1120 ¹⁶⁾)	1220	1140
Schiras	1550				1420
Isfahan	1625	1580		1770	1540
Hamadan	1940	1920	(1860 ¹⁷⁾)	(1611 ¹⁸⁾)	1790
Kirmanschah	1480	1480	1450		1345
Kasr-i-Schirin	475		480 ¹⁹⁾	515 ²⁰⁾	420
Sultanabad	1880	1880			1740 ²¹⁾

Die aerologisch gewonnenen Werte weichen also von den bisher bekannten Höhenwerten z. T. beträchtlich ab. Über die Berechnungsmethode gibt Tabelle II Auskunft.

Eine gute Stütze für die Zuverlässigkeit der auf aerologischem Wege gewonnenen Höhenwerte ist es, dass die vom Kaspischen Meer wie vom Persischen Golf ausgehenden Berechnungen in vollständiger Übereinstimmung die durch das Nivellement gestützte Höhe von 1140 m für den Flugplatz von Teheran ergeben. Schon aus diesem Grunde kann man die Werte der Zwischenpunkte als einigermaßen zuverlässig betrachten, trotz der starken Abweichung von den bisher bekannten Angaben.

Diese Unterschiede können ihren Ursprung einmal in der Verschiedenheit des gemessenen Punktes haben, da sich die aerologisch

Tabelle II.

Termin Ort	Ausgangshöhe, m.	Druck mm	Druckdiff. mm	Höhendiff. m	Berechn. Höhe, m
29/VI. Pechlewi	—20	766	100	1160	1140
Teheran		666			
6/VII. Teheran	1140	666	30	375	
Isfahan		636			1515
6/VII. Isfahan	1515	636	4	90	
Schiras		640			1425
7/VII. Buschir	0	750	110	1415	
Schiras		640			1415
7/VII. Schiras	1415	640	8	135	
Isfahan		632			1550
7/VII. Teheran	1140	665	33	410	
Isfahan		632			1550
14/VII. Teheran	1140	663	47	645	
Hamadan		616			1785
13/VII. Hamadan	1785	616	32	440	
Kirmanschah		648			1345
14/VII. Kirmanschah	1345	650	34	450	
Hamadan		616			1795
13/VII. Kirmanschah	1345	648	70	925	
Kasr-i-Schirin		718			420

gemessenen Höhen sämtlich auf die betreffenden Flugplätze beziehen. Doch ist in Teheran, Isfahan, Kirmanschah und Sultanabad der Höhenunterschied zwischen den Flugplätzen und dem Stadtkern, auf den sich vermutlich die früheren Messungen beziehen, unbedeutend. In Hamadan liegt der Flugplatz schätzungsweise nicht mehr als 40 m niedriger als das Stadttinnere, in Schiras um einen unbekanntem Betrag, doch weniger als 100 m. In Kasr-i-Schirin ist die Lage des Flugplatzes zur Siedlung nicht bekannt, die aerologisch gemessene Höhe liegt zwischen den Kartenangaben für den Ort und den benachbarten Flusslauf.

Weiter könnten die aerologischen Höhenangaben durch die Vernachlässigung der horizontalen Druckgradienten gefälscht sein. Für die ostwestlich gerichtete Messreihe Teheran-Kasr-i-Schirin kann jedoch dieser Horizontalgradient vernachlässigt werden. Berechnet man nämlich für den 420 m hoch gelegenen Flugplatz von Kasr-i-Schirin bei einem Druck von 718 mm und einer Temperatur von $+ 37^{\circ}$ den Druck im Meeresspiegel, so ergibt sich 752 mm. Führt man die gleiche Berechnung für Teheran durch, wo in 1140 m Höhe bei einer Temperatur von 29° am folgenden Tage, dem 14/III. 1918, der Druck 663 mm betrug, so erhält man hier einen Druck von 753—754 mm im Meeresspiegel, also²²⁾ keinen wesentlichen Hori-

zontalgradienten. Ungünstiger liegen die Verhältnisse für die Höhenberechnung auf der nordsüdlichen Linie Pechlewi-Teheran-Schiras-Buschir, da leider die Drucke im Meeresspiegel nur für Buschir, nicht aber für Pechlewi vorlagen. Da man in die Jahreszeit der Flüge (Juli) im allgemeinen mit einem nordsüdlich gerichteten Luftdruckgefälle rechnen kann, könnten dadurch die Höhenwerte für Teheran, Isfahan und Schiras unter Umständen nicht unbedeutend verändert werden. Angesichts der angeführten ausserordentlich grossen Differenzen der Höhenangaben auf den bisherigen Karten dürften trotzdem die vorliegenden Höhenwerte von Bedeutung sein.

Zur Schluss sei nochmals darauf hingewiesen, ein wie grosser Fortschritt in der Kenntnis der Höhenverhältnisse der Erde heute ohne wesentliche Mühe mit Hilfe aerologischer Messungen in solchen Gebieten gewonnen werden kann, in denen es an Nivellements oder trigonometrischen Messungen noch fehlt.

RESUMÉ

F. LOEWE: HØJDEMAALING VED HJÆLP AF AEROLOGISK REGISTRERING.

Højdekortene over Jordoverfladen er for største Delen tegnede ud fra barometriske Højdemaalinger, og det er derfor af overordentlig Vigtighed at faa klarlagt, hvor stor Nøjagtighed man kan tillægge disse.

Ved Beregningen bruger man dels Forskellen i Barometerstand og dels Forskellen i Temperatur mellem et Sted med bekendt Højde og det Sted, hvis Højde man vil maale. I Reglen er man gaaet ud fra, at den mellem Observationspunkterne liggende Luftsøjle havde en Gennemsnitstemperatur, der laa midt imellem den for de to Stationer maalte Temperatur. Denne Beregningsmaade er dog behæftet med væsentlige Fejl, og to Tilfælde fra Forfatterens Praxis beviser dette.

Ved en grønlandsk Kyststation var Temperaturen $\div 30^{\circ}$, paa Indlandsisen $\div 55^{\circ}$, hvilket gav $\div 42,5^{\circ}$ som Gennemsnitstemperatur for den mellemliggende Luftsøjle. Disse lave Temperaturer er imidlertid begrænsede til Overfladens umiddelbare Nærhed, og indgaaende Maalinger har vist, at den sande Gennemsnitstemperatur for den nævnte Luftsøjle er ca. $\div 25$, altsaa $17,5^{\circ}$ højere end beregnet. Hvis Indlandsisens Højde beregnes ud fra denne nye Viden, maa den forhøjes med ca. 7 % eller rundt regnet 200 m.

I de varme og tørre Omraader paa Jorden forekommer i Dag-Timerne en ret betydelig Temperaturforskjel med Højden, som medfører lignende Fejl. Gennemsnitlig Middagstemperatur for Bagdad i Juli Maaned er saaledes 46° , i Kirmanschah, det første Mellemlandingssted paa Flyvestræk-

ningen til Teheran, er den 36° , Gennemsnittet for den mellemliggende Luftsøjle skulde saaledes være 41° . Paa dette Grundlag er Højden af Kirmanschah beregnet til 1400 m. Lægger man imidlertid den sande Temperaturfordeling til Grund, saaledes som man konstaterer den ved stadig Maaling langs Flyvestrækningen, finder man for Kirmanschah en Højde paa kun 1340 m. Aarsagen hertil er, at de jordnære Luftlag i Subtroperne i Middagstiden har et Temperaturfald i Højden paa op til 3° pr. 100 m. De aerologiske Maalinger af Gennemsnitstemperatur mellem de to nævnte Steder viser saaledes en Temperatur paa 28° i Stedet for den beregnede 41° .

Paa samme Maade ligger Forholdet ved Højdemaalinger udførte fra det kaspiske Hav til Teheran, der sædvanlig angives at ligge 1200 m. o. H., medens de aerologiske Beregninger har givet 1140 m, hvilket stemmer godt med et i den nyeste Tid gennemført Nivellement, som har givet Resultatet 1132 m.

Usikkerheden i de hidtil anvendte Beregningsmaader ved barometrisk Højdemaaing beløber sig for Persiens Vedkommende til adskillige Hundrede Meter, men ved Anvendelsen af sammenhængende Observationer under Flyvning vil denne kunne nedbringes til ca. 50 m.

Tabel 1 viser de nyeste Højdeangivelser for en Række Lokalteter i Persien sammenholdt med de af Forfatteren udførte Maalinger efter den nye Fremgangsmaade.

Methodens Paalidelighed støttes ved Resultatet af Nivellementet til Teheran og af det Forhold, at Maalinger ved det Kaspiske Hav og den Persiske Havbugt som Udgangspunkt har givet overensstemmende Resultater.

NOTES

- 1) Barometric gradient and wind force, Met. Off. Nr. 190. London 1908.
- 2) S. z. B. Alfred Wegeners letzte Grönlandfahrt, 1932, S. 276.
- 3) S. F. Loewe: Beitr. z. Phys. d. fr. Atmosphäre, XVII, 1931, S. 163; Barkat Ali, Gerlands Beiträge, Bd. 39, S. 121, 1933.
- 4) Der Luftdruck in Bagdad ist aus der deutschen Wetterkarte interpoliert, die vorstehenden Zahlen sind daher mit einer gewissen Unsicherheit behaftet; am Grundsätzlichen wird dadurch nichts geändert.
- 5) So dürfte der auf neuen Karten mit 4200 m verzeichnete Kuh-Alidjuk südlich Isfahan nur etwa 3600 m Höhe erreichen.
- 6) S. z. B. für das Polargebiet die einschlägigen Erörterungen von A.
- 7) S. z. B. für das Polargebiet die einschlägigen Erörterungen von A. Wegener über seine Schlittenreise auf dem grönländischen Inlandeis (Medd. om Grönland LXXV, S. 91).
- 8) z. B. Bd. 1 der Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre, Strassburg 1905.
- 9) S. Hann-Süring, Lehrbuch der Meteorologie IV. Aufl. S. 841.
- 10) V. Bjerknes: Hydrodynamische Meteorologie und Ozeanographie, Braunschweig 1912.
- 11) z. B. Adiabatenpapier Nr. 394 1/2 von Schleicher und Schüll, Düren.

- ¹¹⁾ Ergebnisse von Studienflügen nach und in Persien, 1928, Beitr. z. Phys. d. freien Atmosphäre, Bd. XIII, 1931.
 - ¹²⁾ Karte aus der Umgebung von Teheran, Tafel 6, Peterm. Mittl. 1900.
 - ¹³⁾ Map of Persia 1:1013800. Survey of India, Nachdr. d. Preuss. Landesaufn. 1918.
 - ¹⁴⁾ Asie 1:1000,000 (Service géographique de l' Armée).
 - ¹⁵⁾ Karte von Mesopotamien. 1:400,000 (vorl. Ausgabe). Kart. Abt. d. Stellv. Gen. St. d. Armee. 1918.
 - ¹⁶⁾ Petermanns Mitt. 1900.
 - ¹⁷⁾ Petermanns Mitt. 1907.
 - ¹⁸⁾ Petermanns Mitt. 1907, Karte.
 - ¹⁹⁾ Flussbett des Elwend 6 km südlich 378 m.
 - ²⁰⁾ De Morgan, Mission scientifique en Perse IV, 1, S. 147.
 - ²¹⁾ Aneroidmessung mit Flugzeug von Hamadan aus.
 - ²²⁾ Die Druckänderung in Teheran betrug vom 13. zum 14. III nur 0,5 mm.
-