

BEOBSACHTUNGEN ÜBER DEN TÄGLICHEN TEMPERATURVERLAUF IN DER STRATOSPHERE

von

VEIKKO ROSSI

Meteorologische Zentralanstalt, Helsinki

Zusammenfassung:

Nach einer Beobachtungsserie von 54 Radiosondenaufstiegen am Observatorium Ilmala wird gezeigt, dass die tägliche Temperaturamplitude in der Höhe von 120 bis 50 mb kleiner als 1 °C ist. Wahrscheinlich nimmt die tägliche Amplitude mit der Höhe zu und ist im Mittel 0,5 °C in den unteren Schichten der Stratosphäre.

Die genaue Messung der Lufttemperatur in der Stratosphäre in Laufe des Tages bereitet ziemlich grosse Schwierigkeiten, weil die Strahlung der Sonne auf jedes Thermometer mit einem bestimmten Fehler einwirkt. Im täglichen Temperaturverlauf rufen die Veränderungen der Lufttemperatur wegen der Wetterentwicklung auch bestimmte Wirkungen hervor.

Die Amplitude des täglichen Temperaturverlaufs in der Stratosphäre ist wahrscheinlich am grössten während der Äquinoktien. Aus diesem Grunde wurde die aerologische Beobachtungsserie vom 8. bis 14. April 1951 am Observatorium Ilmala ($\varphi = 60^{\circ} 12' N$, $\lambda = 24^{\circ} 55' E$) ausgeführt. Damals war der Tag im Mittel 14,1 Stunden und die Nacht 9,9 Stunden lang. Die Beobachtungen wurden um 03.00, 04.30, 06.00, 10.50, 11.45, 16.30, 18.00, 19.30 und 23.00 Uhr (OEZ) mit finnischen Radiosonden ausgeführt. Die erreichten Höhen sind in der Tabelle 1 angegeben. Die Aufstiege um 19.30, 23.00 und 03.00 Uhr sind

im Dunkel gemacht worden. Die anderen Beobachtungszeiten sind so ausgewählt worden, dass der Höhenwinkel der Sonne und somit auch der Strahlungsfehler der Temperaturmessung zwischen 100 und 50 mb-Höhe am Vormittag und Nachmittag dieselben waren. Während der Aufstiege um 04.30 und 18.00 Uhr war die Sonne in der Höhe von 100—50 mb beinahe am Horizont. Bei den Beobachtungen um 06.00 und 16.30 Uhr betrug die Sonnenhöhe ca. 10° und während der beiden Mittagsaufstiege ca. 35°.

Der Strahlungsfehler der finnischen Radiosonde ist zwar ziemlich genau bekannt [4, 6, 7], aber die gleiche Sonnenhöhe am Vormittag und am Nachmittag gibt Möglichkeit zur Kontrolle dieses Fehlers. Dazu ist die Zeitdifferenz zwischen Nacht- und Tagaufstiegen am Morgen und am Abend ziemlich klein und dadurch auch die Einwirkung der Wetterentwicklung auf die Temperatur der Stratosphäre ziemlich gering. Diese aerologischen Beobachtungen bieten somit die Möglichkeit, den täglichen Temperaturverlauf in den unteren Schichten der Stratosphäre näher zu betrachten und dazu den Strahlungsfehler der Radiosonde zu beurteilen.

Die experimentellen Untersuchungen der Strahlungsfehler zeigen [4,6], dass der Strahlungsfehler der finnischen Radiosonde vom Höhenwinkel der Sonne, vom Luftdruck und auch von der Steiggeschwindigkeit abhängig ist.

Tabelle 1. Die erreichten Höhen (mb) der Radiosondenaufstiege am Observatorium Ilmala.

Startzeit Datum	3.00	4.30	6.00	10.50	11.45	16.30	18.00	19.30	23.00
8. IV. 51		53				18	38	27	119
9. —»—	28	29	23	16	13	6	40	40	34
10. —»—	54	29	10	6	75	22	42	22	55
11. —»—	46	20	13	14	22	8	50	72	49
12. —»—	35	85	8	7	11	20	26	35	69
13. —»—	20	33	24	6	31	34	44	26	81
14. —»—	34	20	22			116			

Tabelle 2. Die Mittelwerte des Strahlungsfehlers ($\overline{\Delta T^{\circ}\text{C}}$)

mb		200	180	160	140	120	100	84	71	60	50	42	35	30	25	21	18	15
B. Z.																		
	4-30	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.3	1.6	2.0	2.6	3.1	3.7	4.4	5.3	6.3		
	6.00	1.0	1.1	1.2	1.4	1.7	2.0	2.4	2.9	3.4	4.1	4.8	5.8	6.8	8.0	9.6	10.8	12.8
	10.50	2.2	2.4	2.7	3.0	3.5	4.1	4.7	5.6	6.5	7.6	8.8	10.3	11.9	13.8	16.3	18.7	21.6
	11.45	1.8	2.0	2.3	2.6	3.0	3.5	4.1	4.8	5.7	6.7	7.8	9.0	10.6	12.4	14.4	16.4	19.2
	16.30	1.4	1.5	1.7	1.8	2.1	2.4	2.8	3.2	3.7	4.3	5.0	5.7	6.5	7.4	8.5	9.7	11.1
	18.00	0.8	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.9	2.2	2.5	2.9	3.4	4.0				

Weil jeder Aufstieg eine eigene Steiggeschwindigkeit und dadurch bedingte Strahlungsfehler hat, sind die Temperaturbeobachtungen inhomogen. Für den Vergleich der Beobachtungen ist es zuerst notwendig, den Strahlungsfehler jedes Aufstiegs zu beheben. Die Tabelle 2 enthält die Mittelwerte der Strahlungsfehler für alle Beobachtungen der verschiedenen Beobachtungszeiten. Am Vormittag nimmt der Höhenwinkel der Sonne während der Beobachtungen zu und am Nachmittag nimmt er ab. Dadurch wächst der Fehler mit der Höhe am Vormittag mehr als am Nachmittag. Die Mittelwerte in der Tabelle 2 zeigen, dass der Strahlungsfehler der Temperaturbeobachtungen für die Sonnenhöhe 0° in der Höhe von 100 mb $1,0^\circ\text{C}$ und in der Höhe von 50 mb $2,5^\circ$ ist. Mit dem Höhenwinkel der Sonne nimmt der Fehler zu und erreicht natürlich am Mittag die grössten Werte. In der Höhe von 15 mb beträgt der Fehler am Mittag ca. 20°C .

Nach dem Abziehen des Strahlungsfehlers jeder Beobachtung wurden für verschiedene Beobachtungszeiten die Mittelwerte der Temperatur (\bar{T}) bei verschiedenem Druck berechnet. Diese Mittelwerte sind in der Tabelle 3 angegeben, welche auch den mittleren Fehler (ϵ) der Mittelwerte enthält. Der mittlere Fehler ist am grössten in der Höhe von 200 mb und wird mit der Höhe kleiner. Von 120 mb an bleibt der mittlere Fehler beinahe konstant. Es ist wahrscheinlich, dass die Entwicklung des Wetters grössere Temperaturveränderungen in der Tropopause als in den höheren Schichten bedingt. Zwar sind die Werte am Vormittag etwas grösser als am Nachmittag und in der Nacht, aber das kann wenigstens zum Teil von zufälligen Faktoren abhängig sein. Von 120 mb bis zu 35 mb beträgt der mittlere Fehler etwas mehr als $0,5^\circ\text{C}$. Deshalb können wir mit den Mittelwerten von Tabelle 3 nur solche periodischen Temperaturveränderungen konstatieren, welche in der Grössenordnung von $1,0^\circ\text{C}$ sind. Die Mittelwerte zeigen jedoch beinahe gleichmässige Temperatur in allen Höhen oberhalb des Niveaus 120 mb, besonders die Beobachtungen vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang sind überraschend gleichmässig. Die Statistik zeigt somit, dass der tägliche Temperaturverlauf in den unteren Schichten der Stratosphäre sehr klein ist.

Die durch die Wetterentwicklung bedingten Temperaturveränderungen haben eine störende Einwirkung auf die oberen Mittelwerte. Um diese zu vermeiden, wurden mittels des Beobachtungsmaterials die Temperaturdifferenzen der naheliegenden Aufstiege berechnet. Tabelle 4 enthält die Mittelwerte dieser Differenzen und auch die Werte des mittleren Fehlers (ϵ) der Mittelwerte. In der Nacht ist die Temperaturveränderung

Tabelle 3. Die Mittelwerte der Temperatur ($\bar{T}^{\circ}\text{C}$) für verschiedene Beobachtungszeiten und der mittlere Fehler der Mittelwerte ($\varepsilon^{\circ}\text{C}$).

B.Z.	mb	200	180	160	140	120	100	84	71	60	50	42	35	30	25
		\bar{T}	ε												
3.00		-55.3 2.0	-53.9 1.2	-52.8 0.8	-52.6 0.7	-53.5 0.8	-54.2 0.6	-55.6 0.7	-56.2 0.5	-65.2 0.5	-56.5 0.6	-56.9 0.4	-56.2 0.2	-56.7 0.5	-56.8 —
4.30		-57.4 2.3	-55.1 1.7	-53.9 1.2	-54.0 1.1	-54.5 0.8	-54.9 0.6	-56.0 0.7	-56.6 0.5	-56.5 0.4	-56.2 0.5	-55.9 0.5	-55.2 0.5	-55.0 0.2	-53.8 0.3
6.00		-54.8 1.4	-53.1 1.2	-52.4 1.1	-52.4 0.7	-52.8 0.7	-53.3 0.7	-53.8 0.9	-54.7 0.5	-53.8 0.6	-54.1 0.7	-54.4 0.7	-53.2 0.9	-52.9 1.0	-52.1 1.0
10.50		-54.1 2.0	-51.8 1.1	-52.0 1.0	-53.6 0.9	-52.3 0.7	-53.9 0.5	-54.1 1.3	-53.6 0.8	-54.9 1.1	-54.8 1.3	-53.9 1.3	-54.3 0.9	-55.2 1.0	-55.3 0.9
11.45		-54.4 2.0	-52.4 1.4	-51.7 1.1	-52.2 0.7	-53.0 0.3	-53.4 0.6	-53.5 0.4	-54.8 0.3	-55.5 0.6	-55.3 0.3	-55.9 0.6	-56.2 0.3	-55.0 0.2	-55.5 0.2
16.30		-55.5 1.9	-53.5 1.3	-52.9 1.0	-52.7 0.7	-53.6 0.6	-53.8 0.5	-54.2 0.7	-55.4 0.6	-55.0 0.7	-54.6 0.7	-53.9 0.7	-54.0 0.5	-53.2 0.6	-52.4 0.7
18.00		-56.2 2.0	-53.6 1.4	-52.4 0.9	-53.1 0.9	-53.5 0.7	-54.3 0.4	-54.6 0.7	-55.7 0.4	-55.5 0.5	-55.1 0.5	-54.9 0.3	-54.0 0.2	—	—
19.30		-54.7 1.8	-54.4 1.6	-53.0 1.0	-53.1 0.7	-53.8 0.7	-54.4 0.8	-55.4 0.8	-55.9 0.6	-56.6 0.6	-56.5 0.6	-56.2 0.6	-56.4 0.7	-55.6 0.9	—
23.00		-56.4 2.3	-54.1 1.3	-52.4 0.7	-53.4 0.6	-53.9 0.5	-53.8 0.4	-54.4 0.4	-55.4 0.7	-56.2 0.3	-56.0 0.2	-55.9 —	-56.2 —	—	—

sehr gering und auch der mittlere Fehler ist dabei ziemlich klein. So können wir behaupten, dass die Temperatur in der Höhe von 100 und 50 mb während der Nacht beinahe konstant bleibt. Am morgen nach Sonnenaufgang zeigen die Mittelwerte eine leichte Temperaturerhöhung und bei Sonnenuntergang eine beinahe gleich grosse Temperatursenkung. Das kann dadurch entstehen, dass der Strahlungsfehler etwas grösser sein kann, als das Diagramm von RAUNIO-VÄISÄLÄ [4] zeigt. Wenn wir dieses berücksichtigen, können wir sagen dass die Temperaturdifferenzen sehr klein sind und dass während des Tages beinahe die gleiche Temperatur herrscht. Der mittlere Fehler ist etwas kleiner als $0,5^{\circ}\text{C}$ und wir können nur solche periodischen Temperaturveränderungen konstatieren, welche grösser sind. Die tägliche Temperaturamplitude ist somit kleiner als 1°C und wahrscheinlich etwa $0,5^{\circ}\text{C}$.

Nach anderen Beobachtungen und Untersuchungen können wir Schätzungen über den täglichen Temperaturverlauf in denselben Stratosphärenschichten machen. Nach den Mittelwerten von Radiosondenaufstiegen in den Jahren 1938—1948 am Observatorium Ilmala steigt die Temperatur vom 7. bis 22. April in der Höhe von 100 mb im Mittel $0,18^{\circ}\text{C}$ in einem Tag. Die Temperaturerhöhung nimmt mit der Höhe zu und ist in der Höhe von 50 mb $0,33^{\circ}\text{C}$ und bleibt dann bis 25 mb beinahe konstant. Wenn wir annehmen, dass die tägliche Temperaturerhöhung nur durch die Strahlung bedingt ist, muss die Temperaturerhöhung am Tag so viel grösser als die Abkühlung in der Nacht sein. Nach GRAIG [1] beträgt die von Strahlungsgleichgewicht abhängige Temperaturveränderung während 3 Stunden unterhalb einer Höhe von 30 km $0,1^{\circ}\text{C}$. Das bedeutet, dass während unseres Beobachtungstermins die tägliche Temperaturerhöhung $0,47^{\circ}\text{C}$ und die nächtliche Abkühlung $0,33^{\circ}\text{C}$ wäre. Die Differenz dieser Veränderungen ist $0,15^{\circ}\text{C}$, was beinahe dasselbe ist wie der oben gefundene Wert in der Höhe von 100 mb. Nach der oben genannten täglichen Temperaturerhöhung am Observatorium Ilmala ist die Temperaturamplitude $0,8^{\circ}\text{C}$ in der Höhe von 50 bis 25 mb und im Mittel von 120 bis 50 mb $0,56^{\circ}\text{C}$. Nach 127 Aufstiegpaa ren in Ostdeutschland erhielt GROBER [2] den Wert $0,5^{\circ}\text{C}$ zwischen 96 und 41 mb. Weil unsere Resultat mit dem von GROBER so gut übereinstimmt, zeigt das, dass die tägliche Temperaturamplitude in den unteren Schichten der Stratosphäre etwa $0,5^{\circ}\text{C}$ oder wahrscheinlich etwas grösser ist (vergleiche [3] und [5]).

VÄISÄLÄ [6] definiert den Strahlungsfehler der finnischen Radiosonde als Temperaturdifferenz zwischen Tag- und Nachtaufstiegen. Die vorliegende

Tabelle 4. Die Mittelwerte der Temperaturdifferenzen der nachliegenden Aufstiegen (°C) und der mittlere Fehler der Mittelwerte (ε°C).

mb		200	180	160	140	120	100	84	71	60	50	42	35	30
B.Z.														
	3.00—4.30	1.3 ε	—0.2 0.4	0.0 0.2	0.5 0.2	0.4 0.0	0.4 0.1	0.0 0.3	0.1 0.0	—0.1 0.2	—0.8 0.2	—0.3 0.1	—0.6 0.3	—0.8 —
	4.30—6.00	—1.2 0.6	—0.6 0.3	—0.5 0.2	—0.7 0.3	—1.1 0.3	—1.2 0.4	—1.8 0.9	—1.4 0.5	—2.4 0.8	—2.0 0.8	—0.9 0.3	—1.4 0.7	—1.8 0.8
	6.00—10.50	—0.1 0.5	—1.3 0.5	—0.3 0.7	1.4 0.6	—0.2 0.5	0.9 0.6	0.6 1.2	—0.7 0.5	1.6 1.0	1.1 1.2	—0.1 1.2	1.5 1.1	0.5 1.6
	10.50—11.45	0.3 0.3	0.7 0.3	—0.4 0.4	—1.4 0.8	0.3 0.5	—0.5 0.8	—0.2 1.1	1.5 0.8	0.9 0.9	0.9 1.5	2.3 1.4	1.9 1.6	0.9 —
	11.45—16.30	—0.3 0.8	0.2 0.4	0.9 0.5	0.1 0.1	0.7 0.5	0.4 0.4	0.5 0.8	0.9 0.6	0.1 0.9	—0.2 0.9	—1.6 0.8	—1.8 0.2	—3.0 —
	16.30—18.00	0.6 0.5	—0.1 0.2	—0.8 0.4	0.3 0.2	—0.1 0.4	0.5 0.4	0.4 0.8	0.3 0.3	0.5 0.5	0.5 0.5	1.4 0.7	1.0 —	2.8 —
	18.00—19.30	—1.4 1.4	0.8 0.5	0.6 0.3	—0.0 0.3	0.3 0.3	0.0 0.5	0.7 0.3	—0.0 0.3	0.6 0.2	1.5 0.5	0.9 0.7	3.0 —	— —
	19.30—23.00	1.7 1.4	—0.4 0.5	—0.6 0.7	0.1 0.3	0.1 0.5	0.0 0.5	—0.4 0.5	0.6 0.4	0.8 —	—0.4 —	—0.3 —	— —	— —
	23.00—3.00	—1.1 0.4	—0.2 0.5	0.5 0.4	—0.6 0.3	—0.3 0.4	0.2 0.4	0.7 0.7	0.5 0.6	—1.0 0.3	—1.4 —	— —	— —	— —

Untersuchung zeigt, dass die tägliche Temperaturamplitude in den unteren Schichten der Stratosphäre sehr klein ist, was auch bedeutet, dass die nach der Methode von Väisälä korrigierten Beobachtungen die richtige Temperatur ziemlich genau geben.

L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

1. GRAIG, R. A., 1951: Radiative temperature changes in the ozone layer. *Compendium of Meteorology*, Amer. Met. Soc., 292—302, Boston, Ma.
2. GROBER, K. W., 1953: Der Strahlungsfehler der Radiosonde des DDR. *Z. f. Met.*, 7, 313—317.
3. KAY, R. H., 1951: The apparent diurnal temperature variation in the lower stratosphere. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 77, 427—434.
4. RAUNIO, N., 1951: Amendments to the computation of the radiation error of the Finnish (Väisälä) radiosonde. *Geophysica*, 4, 14—20. Helsinki.
5. SCHERHAG, R., 1948: *Neue Methoden der Wetteranalyse und Wetterprognose*. Springer-Verlag, Berlin, 424 S.
6. VÄISÄLÄ, V., 1941: Der Strahlungsfehler der finnischen Radiosonde. *Mitteilungen d. Met. Inst. Univ. Helsinki*, No 47, 63 S.
7. —»— 1948: Solar radiation intensity at the ascending radiosonde. *Geophysica*, 3, 39—55. Helsinki.