

VERWENDUNG VON NEBELFROSTABLAGERUNGEN UM STRÖMUNGSLINIEN ZU BESTIMMEN

VON A. RÖSTAD

(Manuskript empfangen 22. December 1922).

Einleitung. — Im Winter 1920—21 wurden auf dem Halde-Observatorium, im nördlichsten Norwegen gelegen, zwei Niederschlagsmesser in einer Meereshöhe von 885 m. aufgestellt, in der Absicht vergleichende Niederschlagsmessungen mit geschütztem und ungeschütztem Niederschlagsmesser auszuführen. Der geschützte Niederschlagsmesser war mit einem Nipherschen Schutztrichter versehen, dessen oberer Durchmesser 72 cm. und dessen Höhe 29 cm. betrug. Die Niederschlagsmesser waren viereckig (Schneemesser) mit quadratischer Öffnungsfläche (15 cm. Seitenlänge) und 43 cm. Höhe. Der Abstand zwischen den zwei Niederschlagsmessern war 4 m. Die Ergebnisse dieser vergleichenden Messungen werden später veröffentlicht.

An diesen zwei Niederschlagsmessern wurden interessante Nebelfrostablagerungen*) beobachtet, die dazu dienen konnten, Strömungslinien der Luft zu bestimmen. Die Bezeichnungen Strömungsrichtung, Strömungsgeschwindigkeit, Strömungslinien werden hier für Durchschnittswerte über längere Zeitintervalle (einige Stunden) benutzt — die Bezeichnungen Stromrichtung, Stromgeschwindigkeit, Stromlinien dagegen für Momentanwerte. Fig. 1 a und b zeigen interessante Nebelfrostablagerungen am Schirme. Fig. 1 c und d zeigen solche an Stangen.

Der Nebelfrost war in zusammengefrorenen Zapfen und Stäbchen abgesetzt, und diese Ablagerungen waren in so eigentümlicher Weise gebildet, dass man annehmen musste, sie konnten dazu verwendet werden, die Richtung und Geschwindigkeit der Luftströmung zu bestimmen. Die Strömungsrichtung der Luft scheint aus Fig. 1 d deutlich hervorzugehen. In dieser Abhandlung soll zuerst untersucht werden, ob eine solche Übereinstimmung wirklich existiert.

*) Über den Gebrauch der Bezeichnung «Nebelfrost» siehe Hilding Köhler: Studien über die Nebelfrostablagerungen auf dem Pärtetjokko, Naturwissenschaftliche Untersuchungen des Sarekgebiets in Schwedisch Lappland. Stockholm 1919.



Fig. 1 a.

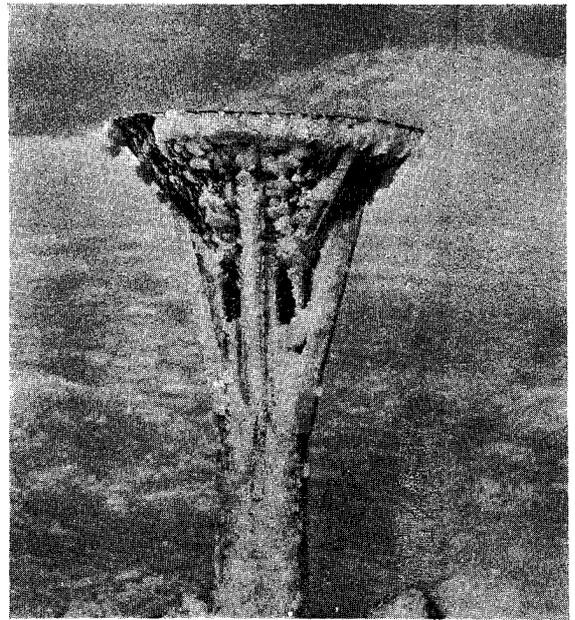


Fig. 1 b.

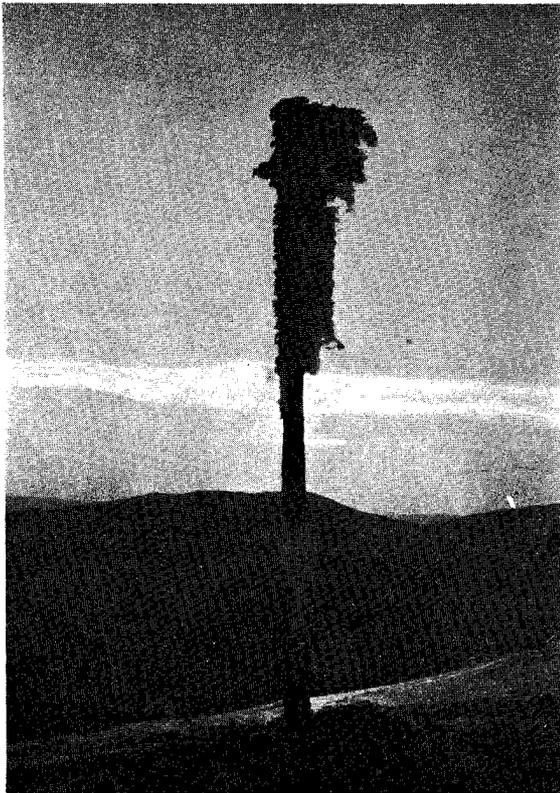


Fig. 1 c.

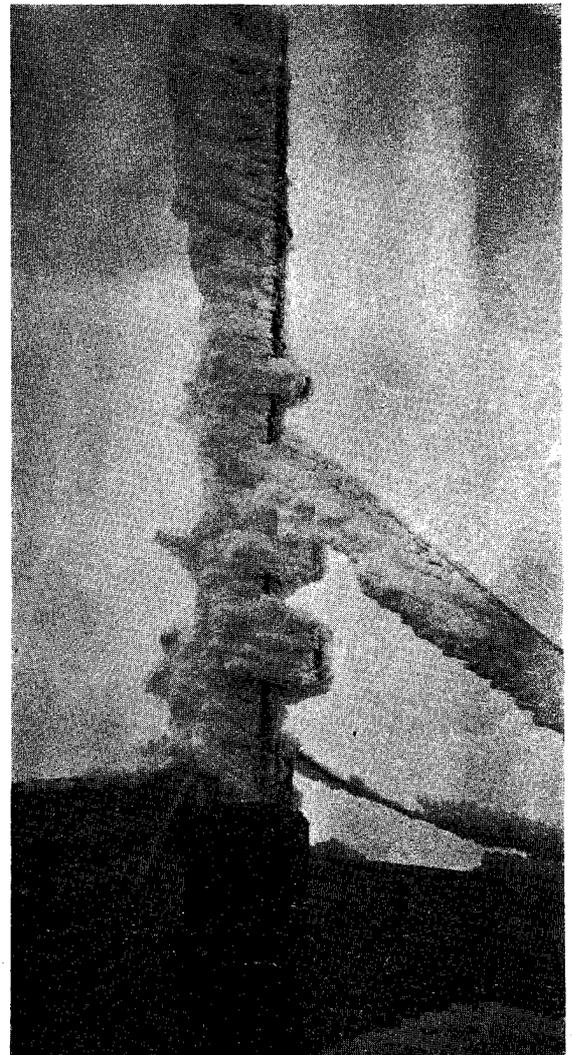


Fig. 1 d.

Die Nebelteilchen werden von der strömenden Luft getragen und darum an denjenigen Stellen abgesetzt, wo die Luft direkt an ein Hindernis stösst. Für die Bildung von Zapfen und Stäbchen ist es eine notwendige Bedingung, dass die flüssigen Nebelteilchen aus unterkühltem Wasser bestehen, so dass sie nach dem Anprall an den Körper sofort erstarren. Kleine, hervorragende Unebenheiten der Körperoberfläche werden dann die meisten Nebelteilchen auffangen und durch das momentane Erstarren des Wassers zu Zapfenbildung Anlass geben. Sobald kleine Zäpfchen gebildet sind, die in die strömende Luft hinausragen, wird das unterkühlte Wasser sich hauptsächlich an diese absetzen.

Wachstum eines Zapfens. — Wenn v die Geschwindigkeit des Windes bezeichnet, Δf ein auf die Stromrichtung senkrechtcs Flächenelement und q die in jeder Volumeneinheit Luft enthaltene Menge kondensiertes Wassers (die Temperatur des Körpers gleich der Lufttemperatur vorausgesetzt*), hat man für die in einem Zeitdifferential dt abgelagerte Eismenge:

$$(1) \quad dm = \varepsilon q \Delta f v dt,$$

wo ε das Verhältnis zwischen der aus einer Volumeneinheit Luft abgelagerten Eismenge und der in demselben Luftvolumen enthaltenen Wassermenge bezeichnet. Diese Grösse muss von der Windgeschwindigkeit und von der Turbulenz abhängig sein. Dagegen ist q von der Windgeschwindigkeit unabhängig und nur als eine Funktion der Zeit zu betrachten.

Die im Zeitintervalle t_1 bis t_2 abgelagerte Eismenge kann durch das Integral ausgedrückt werden:

$$(2) \quad m = \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon q \Delta f v dt.$$

Um die durch diese Gleichung dargestellte Abhängigkeit der Menge abgelagerten Eises von der Windgeschwindigkeit behandeln zu können, müssen zuerst die auftretenden Turbulenzerscheinungen betrachtet werden.

Die Turbulenz ist ein schnelles, unregelmässiges Wechseln der Luftströmung, das am besten als eine «Unruhe des Windes» aufgefasst werden kann. Man kann sich es so vorstellen, dass der momentane Strom v durch eine Summe zweier Vektoren dargestellt wird — des konstanten Mittelwindes \bar{v} und des Momentanwertes Δv einer dem Mittelwinde von der Turbulenz überlagerten Strömung (die Turbulenzströmung):

$$(3) \quad v = \bar{v} + \Delta v.$$

Der Mittelwind wird durch den folgenden Ausdruck definiert:

$$(4) \quad \bar{v} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} v dt}{t_2 - t_1},$$

und die Turbulenzströmung muss folgender Gleichung genügen:

$$(5) \quad \int_{t_1}^{t_2} \Delta v dt = 0.$$

*) Wegen der Gleichheit der Temperatur des Eises und der umgebenden Luft wird die direkte Kondensation wahrscheinlich so unbedeutend, dass sie nicht berücksichtigt werden soll.

Für den Idealfall, dass die Strömung turbulenzfrei wäre, und sowohl Strömungsrichtung wie Gehalt an kondensiertem Wasser als in kleineren Zeitintervallen konstante Grössen betrachtet werden können, kann das Integral (2) für ein solches Zeitintervall, wie folgt, geschrieben werden:

$$(6) \quad m = \alpha l \Delta f = k \Delta f \int_{t_1}^{t_2} v dt = k \Delta f \bar{v} (t_2 - t_1),$$

wo $k = \varepsilon \cdot q$ die aus der Volumeneinheit vorübergeströmter Luft ausgeschiedene Wassermenge bedeutet. Die Grösse l ist die Länge des Eiszapfens und α somit die in der Volumeneinheit der Ablagerung enthaltene Wassermenge (Dichte des Nebelfrostes). Die Gleichung (6) stellt dann die Abhängigkeit der Länge des Zapfens von der Strömungsgeschwindigkeit der Luft dar.

Dass Gleichung (6) für einen beliebigen Eiszapfen, dessen Wachstum von der Turbulenz beeinflusst ist, nicht ohnehin gültig ist, kann aus folgender Überlegung ersehen werden.

Für \bar{v} kann man auch die Gleichung schreiben:

$$(7) \quad \bar{v} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} v_p dt}{t_2 - t_1}$$

wo v_p die Projektion von v auf \bar{v} bedeutet. Diese Darstellungsweise entspricht einem Verfahren den Stromvektor v in zwei Komponenten aufzulösen, die Komponente v_p parallel zur Richtung des Mittelwindes und die Komponente v_n senkrecht zu derselben Richtung (Fig. 2). Nach Gleichung (6) und (7) soll l nur von der Komponente v_p abhängig sein. Doch muss beachtet werden, dass die Turbulenzerscheinungen einen erheblichen Einfluss auf die Verteilung der abgelagerten Eismengen ausüben.

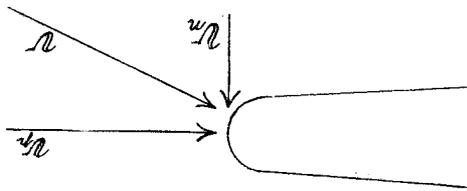


Fig. 2.

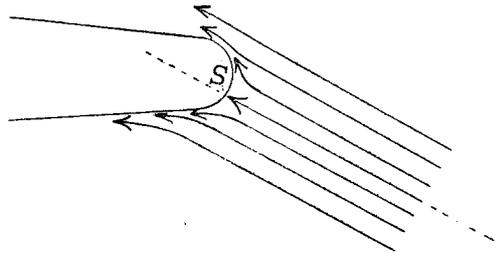


Fig. 3.

Wenn sich ein Luftstrom mit der Geschwindigkeit v gegen den Zapfen bewegt, wird die Luft, sobald sie den Zapfen berührt und sein Gehalt an kondensiertem Wasser abgegeben hat, den Zapfen entlang strömen und andere Luft teilweise verhindern denselben zu berühren (Fig. 3). Das stärkste Ablagern wird dann an denjenigen Stellen (S) stattfinden, wo freie Luft unmittelbar gegen die Eisoberfläche einströmt, und nicht eben an der Spitze des Zapfens, wo zum Teil entwässerte Luft vorüberstreicht. Wegen der Turbulenz werden sich diese Stellen im Zeitintervalle t_1 bis t_2 schwankend über die Endfläche des Eiszapfens verteilen.

Das resultierende stärkste Anwachsen wird gewiss an der Spitze stattfinden, nicht aber im vollen Masse, wie es dem Werte v_p der freien Luft entspricht. Es tritt ein Längendefizit auf, das von der Turbulenz abhängig ist. Die Menge entwässerter Luft,

welche die Spitze bestreicht, muss ja von dem Winkel zwischen den Richtungen v und \bar{v} abhängig sein.

Starke Turbulenzwirkung wird das Ablagern an die Zapfenspitze verzögern, das Ablagern an die Seiten des Zapens jedoch verstärken. So entstehen kurze, dicke Eiszapfen, die ihrerseits ein Kennzeichen für starke Turbulenz sind. Bei schwacher Turbulenz dagegen werden lange, schmale Zapfen gebildet. Wenn solche Ablagerungen auftreten, kann also daraus gefolgert werden, dass die Turbulenzwirkung schwach gewesen ist. In dieser Weise können daher aus der Struktur der Zapfen über die Stärke der Turbulenz Schlüsse gezogen werden, die ihrerseits wieder über die Übereinstimmung zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Zapfenlänge Aufschlüsse geben.

In den meisten Fällen kann diese Abhängigkeit nicht absolut bestimmt werden, da die Grösse q schwer zu bestimmen ist. Nur wenn der Gehalt der Luft an kondensiertem Wasser genau gemessen ist, kann bei konstantem q und \bar{v} wie auch konstanter Turbulenz der Abhängigkeitsfaktor ε bestimmt werden. Für die Bildung genügend langer Zapfen sind mehrere Stunden notwendig, und für so lange Zeitintervalle kann man diese Grössen nicht als konstant betrachten. Eine absolute Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit kann darum nicht gemacht werden, nur eine relative Bestimmung — d. h. ein Vergleichen der Strömungsgeschwindigkeiten an Stellen, wo man mit demselben Wassergehalt und derselben Turbulenzwirkung rechnen kann.

Die Einwirkung der Turbulenz auf die Länge der Eiszapfen kann folgendermassen kurz beschrieben werden: Die Turbulenz der Strömung hat die Tendenz ε der Gleichung (2) zu verkleinern. Um Gleichung (6) auch für turbulente Strömung gültig zu machen, müssen kleinere Werte der Grössen ε und k verwendet werden. Nur an Stellen wo ε denselben Wert erhält, kann ein Vergleichen der Strömungsgeschwindigkeiten ausgeführt werden.

Eine entsprechende Betrachtungsweise genügt auch um die Übereinstimmung zwischen Strömungsrichtung der Luft und Wachrichtung der Ablagerung zu behandeln. Nur die Normalkomponente v_n des Luftstromes kann eine Abweichung der Wachrichtung von der Strömungsrichtung bewirken. Wie früher genannt, findet das stärkste Ablagern an denjenigen Stellen statt, wo die Luft unmittelbar gegen den Zapfen einströmt. Wenn keine Abweichung in der Wachrichtung auftreten soll, müssen sich diese Stellen mit maximaler Ablagerung symmetrisch um die Strömungsrichtung verteilen.

Die Normalkomponenten des Luftstromes müssen folgender Gleichung genügen:

$$(8) \quad \int_{t_1}^{t_2} v_n dt = 0,$$

und sich darum symmetrisch um den Mittelwind verteilen. Jetzt stellt sich die Frage so — ob bei symmetrischer Verteilung der Normalkomponenten v_n sich auch die Nebelfrostablagerungen symmetrisch um die Strömungsrichtung der Luft verteilen. Bei Behandlung dieser Frage müssen zwei verschiedene Fälle unterschieden werden: Ablagerung an Zapfen, die so weit in die freie Luft hinausragen, dass der feste Körper einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Strömungsrichtung der Luft ausübt, und Ablagerung an Zapfen, die ganz in der Nähe anderer Körper ausgewachsen sind.

Betrachten wir zunächst den ersten Fall. Wenn hier vorausgesetzt wird, dass q für alle Richtungen des Turbulenzstromes denselben Wert beibehält, dann gibt es keine einleuchtenden Umstände, warum sich die Ablagerungen nicht symmetrisch um die Strömungsrichtung verteilen sollte.

Anders gestalten sich die Verhältnisse, wenn die Zapfen sich in so unmittelbarer Nähe anderer Körper befinden, dass diese die Strömungsverhältnisse an den Ablagerungs-

stellen wesentlich beeinflussen. Der längs der Körperoberfläche streichende Luftstrom wird dann zum Teil entwässert sein. Das stärkste Ablagern wird darum an derjenigen Stelle des Zapfens stattfinden, wo die Turbulenzwirkung nicht entwässerte Luft gegen die Ablagerung schleudert. Das Ablagern wird somit einseitig zur Strömungsrichtung stattfinden, und die Wachsrichtung schräg zu derselben werden. Allerdings sollte diese Abweichung nur den Winkel zwischen der Oberfläche und der Wachsrichtung des Zapfens beeinflussen (und zwar vergrössern), so dass er der wahren Strömungsrichtung nicht genau entspricht. Die Projektion der Wachsrichtung auf die Oberfläche entspricht aber der Richtung der Strömungskomponente parallel zur Oberfläche.

Die Grössen q und ε sind von einander völlig unabhängig. Darum kann das Produkt $k = \varepsilon \cdot q$ nicht als angenähert konstant betrachtet werden, ohne dass jede dieser zwei Grössen für sich angenähert konstant sind. Zur Bildung genügend langer Eiszapfen sind meistens einige Stunden notwendig. Für so grosse Zeitintervalle können diese Grössen nicht als angenähert konstant betrachtet werden. Diese Zeitintervalle können aber in mehrere kleinere Intervalle geteilt werden, in welchen Mittelwerte für q und ε verwendet werden können. Dann kann die Länge eines Eiszapfens durch eine Integralsumme ausgedrückt werden.

Bei starker Veränderlichkeit der Strömungsrichtung \bar{v} während des Zeitintervalles t_1 bis t_2 , dürfte wohl auch eine gekrümmte Wachsrichtung vorkommen. Eisablagerungen, wo diese Variation der Wachsrichtung zu beobachten wäre, müssen in der Natur verhältnismässig selten vorkommen, denn bei Umbiegen des Windes werden freistehende Zapfenbildungen meistens abgebrochen. Auch wenn sie nicht abbrechen, geschieht das neue Ablagern an den Seiten der alten Zapfen, so dass die alte Struktur überdeckt wird. Nur bei allmählichem Umdrehen einer schwachen Strömung könnte ein gekrümmtes Ablagern möglich sein.

Die Zapfen an verschiedenen Teilen eines Körpers. — Der Wasserenthalt q kann nur für diejenigen Stellen die gleichen Werte haben, wo die freie Luft den Körper unmittelbar anstösst, ohne ihn früher berührt zu haben. Sobald die Luft mit der Ablagerung in Berührung gewesen ist, hat sie einen Teil ihres Wassergehaltes abgegeben. Bei nochmaliger Berührung kann darum nur eine viel kleinere Wassermenge abgegeben werden, welcher Umstand die Ergiebigkeit des Ablagerns stark beeinflusst. Für Stellen, wo die Luft schon früher mit dem Körper in Berührung gewesen ist, versagt darum die relative oder vergleichende Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten.

Wenn die strömende Luft den Körper berührt, wird eine neue Mikroturbulenz entstehen, die bei nochmaliger Berührung an einer anderen Stelle die Struktur der dort entstehenden Zapfen verzerrt und ihre Länge noch mehr verkleinert. Nach der Struktur der Ablagerungen kann darum geschlossen werden, wo freie Luft den Körper berührt hat, und wo die Luft schon zum Teil entwässert gewesen ist. An der Leseite des Körpers bekommen die Eiszapfen auf diese Weise eine knorrige Struktur, so dass sie in extremen Fällen ganz verzerrt werden.

Die Beobachtungen. — Zuerst muss eine Anordnung erwähnt werden, die benutzt wurde, um die Strömungsverhältnisse in der Luft über den Niederschlagsmessern zu untersuchen. Wie in Fig. 4 a gezeigt, wurden auf dem geschützten Niederschlagsmesser zwei vertikale Kupferdrähte befestigt, der eine an der Luvseite, der andere an der Lee-seite. Am ungeschützten Niederschlagsmesser wurde ein einziger vertikaler Kupferdraht an der Luvseite befestigt (Fig. 4 b).

Die Kupferdrähte wurden Anfang April aufgestellt. Am 12. April gab es schwache Nebelfrostablagerungen, welche jedoch genügend stark waren, um an den Drähten eine hinlänglich schöne Struktur aufzuweisen, zu schwach jedoch, um Zapfenbildung am Schutztrichter zu veranlassen. An den Drähten waren die Ablagerungen etwa 8 mm. in die Länge ausgewachsen und nicht in einzelnen Zapfen ausgebildet, sondern in Eisscheiben zusammengewachsen, deren Dicke den Durchmesser der Drähte entsprach (die schraffierten Gebiete in Fig. 4 a und b).

Wie durch die Schraffierung angedeutet, waren diese Eisscheiben sehr schön und regelmässig gestreift. Kleine Streifen verliefen in der Windrichtung und liessen die Struktur der Ablagerungen sehr deutlich zu Tage treten. So schön waren diese Streifen

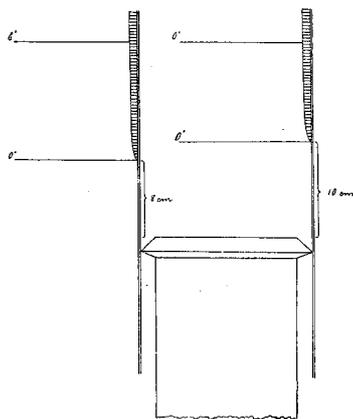


Fig. 4 a.

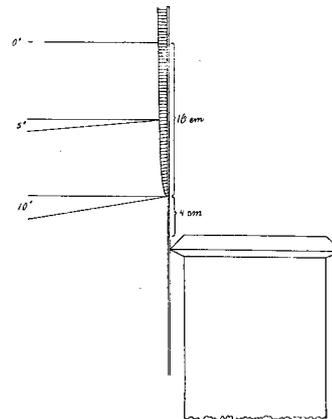


Fig. 4 b.

ausgebildet, dass die Turbulenzwirkung ganz unbedeutend gewesen sein musste. Es war etwa dieselbe Erscheinung wie die in Fig. 1 d. Die in Fig. 4 a und b eingezeichneten Winkel (0° und $0^\circ-10^\circ$) geben die Abweichungen der Streifenrichtung von der horizontalen Richtung an. Aus der unbedeutenden Turbulenzwirkung wurde gefolgert, dass die Streifenrichtung ganz genau der Strömungsrichtung der Luft entsprach.

Unglücklicherweise waren die untersten Teile der Ablagerungen verschwunden, am ungeschützten Niederschlagsmesser bis auf 4 cm. über der Öffnungsfläche, am geschützten bis auf 8 und 10 cm. Es könnte ja sein, dass an diesen Gebieten kein Eisablageren stattgefunden hat. Wahrscheinlicher aber ist es, dass die untersten Teile der Ablagerungen abgeschmolzen waren, denn die Sonne war zu dieser Zeit schon über den Horizont gestiegen, und der Sonnenschein hatte etwa eine halbe Stunde gedauert. Wenn auch die Lufttemperatur mehrere Grade unter dem Gefrierpunkte war, seien doch die von der Schneeoberfläche reflektierten Wärmestrahlen intensiv genug gewesen, um kleine Eisbildungen abzuschmelzen.

Aus diesen Beobachtungen wird es klar, dass am ungeschützten Niederschlagsmesser die Strömungsrichtung der Luft stark nach oben abgelenkt wird, am ungeschützten aber fast unberührt verbleibt.

Die Nebelfrostablagerungen wurden zum ersten Male am 21. Februar sorgfältig untersucht. Später im Winter wurden sorgfältige Untersuchungen am 23. Februar, 20. März und 12. April ausgeführt.

Am 21. und 23. Febr. waren die Ablagerungen nicht ausreichend schön ausgebildet, um eine genaue Untersuchung zuzulassen, am 21. doch genug, um das in den Fig. 8 dargestellte Strömungssystem anzuzeigen.

Die am 20. März gebildeten Ablagerungen waren schön und regelmässig ausgewachsen und gaben ziemlich gute Bestimmungen der Wachsrichtungen. Fig. 5 bis 7 stellen die Ergebnisse dieser Untersuchungen dar. Das an diesem Tage beobachtete Strömungssystem ist von demjenigen am 21. Febr. ganz verschieden.

Die Ablagerungen vom 20. März sollen zuerst behandelt werden, denn sie gaben die zuverlässigsten Resultate.

In Fig. 5 a bedeuten die Pfeile Strömungsrichtungen senkrecht zur Sehlinie. An den Stellen P_1 und P_2 gab es sehr schöne Ablagerungen von etwa 5 cm. Länge, deren

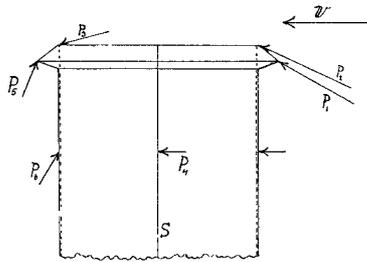


Fig. 5 a.

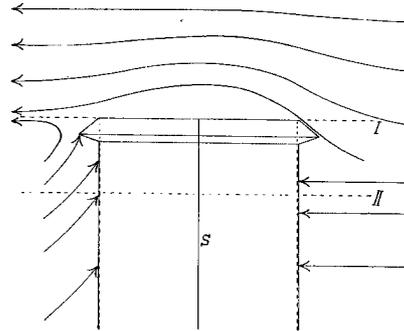


Fig. 5 b.

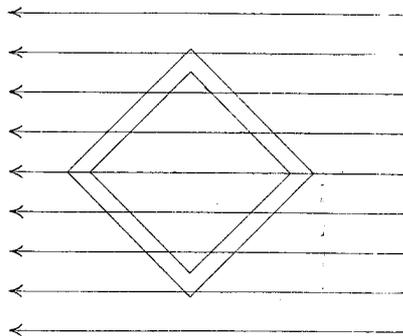


Fig. 5 c. Horizontalschnitt I.

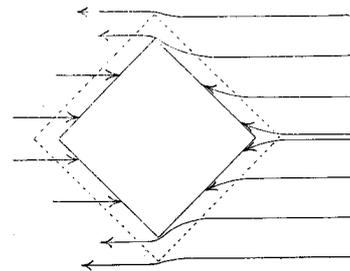


Fig. 5 d. Horizontalschnitt II.

gleichmässige Struktur eine fast unbedeutende Turbulenzwirkung andeutete. Auch weiter an der Luvseite waren an der oberen Kante des Niederschlagsmessers Zapfen mit derselben gleichmässigen Struktur ausgewachsen. In horizontaler Richtung waren sie alle parallel und liessen vermuten, dass in der Horizontalebene der oberen Kante keine Divergenz der Strömung stattfand. An der Stelle des Pfeiles P_3 waren kleine Eiszapfen im Inneren des Niederschlagsmessers gebildet. Sie waren aber nur von 4 bis 5 mm. Länge und die knorrige Struktur war ein gutes Anzeichen starker Turbulenz. Auch hier waren die Horizontalprojektionen der Eiszapfen einander parallel und zugleich den Horizontalprojektionen von denen an der Vorderseite parallel. Dies liess vermuten, dass über dem ungeschützten Niederschlagsmesser keine horizontale Divergenz der Luftströmung stattfand, und dass die abwärts gehende Strömung ganz unbedeutend war. Weiter nach unten war an den ebenen Luvseiten eine dicke Eiskruste gebildet, aus der nur einzelne Eiszapfen herausragten. An den Seitenkanten (S in Fig. 5 a) aber waren schön ausgebildete Ablagerungen, die eine deutliche horizontale Divergenz der Luftströmung anzeigten (P_4). An der Leeseite hatte ein starkes Ablagern stattgefunden, dass eine bedeutende, aufsteigende Strömung anzeigte (P_5 und P_6).

Mit diesen Beobachtungen übereinstimmend und in Anschluss an die in Fig. 4 b abgebildeten Ablagerungen sind in Fig. 5 c und d die Horizontalprojektionen der Strömungsrichtungen in zwei verschiedenen Horizontalschnitten (*I* und *II* der Fig. 5 b) wiedergegeben. In den offenen Gebieten des Schnittes *II* sind die Strömungsverhältnisse unbekannt. Fig. 5 b zeigt die Vertikalprojektion der Strömungslinien.

Fig. 6 stellt die Wachrichtung in einigen ausgewählten Punkten am geschützten Niederschlagsmesser und am Schutztrichter dar. Die meisten Pfeile stehen senkrecht auf die Sehlinie, und geben die Abweichungen von der horizontalen Richtung an.

An der Luvseite des Schirmes waren ausserordentlich lange Ablagerungen gebildet, die eine stark divergente Luftströmung andeuteten. Ihre schöne und regelmässige Aus-

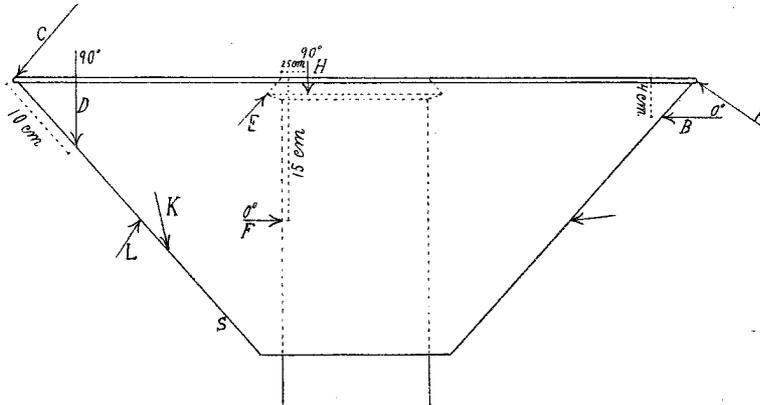


Fig. 6.

bildung zeigte, dass nur schwache Turbulenz das Ablagern beeinflusst hatte. Der Pfeil *B* gibt die Stelle an, wo die Strömung horizontal verlief. Oberhalb dieser Stelle waren die Strömungslinien nach oben gerichtet. Unterhalb aber hatten sie eine Richtungskomponente nach unten. Diese Grenzschicht mit horizontal verlaufender Strömung war etwa 4 cm. von der Oberkante entfernt. Das ist ein gutes Anzeichen, dass die vom Schirme nach oben abgebeugte Strömung verhältnismässig gering war. Die Hauptmenge der Luft wurde nach unten und seitwärts abgebeugt.

An der Leeseite war im Inneren des Schirmes eine mächtige Ablagerung, deren knorrige Struktur vermuten liess, dass hier die Turbulenz viel erheblicher gewesen war als an der Luvseite des Schirmes. Der Pfeil *D* gibt die Stelle an, wo die Strömung vertikal nach unten verlief. Weiter nach oben am Schirme (eine Zone von etwa 10 cm. Breite) war die Strömung etwas nach aussen gerichtet (*C*), weiter nach unten aber ein wenig nach innen (*K*). Dort muss daher eine niedersteigende, divergente Strömung geherrscht haben.

Der Pfeil *H* (2,5 cm. rechts von der Seitenkante) gibt die Wachrichtung einiger kleiner Zapfen an, deren Länge nur 2—3 mm. betrug. Sie zeigten eine sehr schwache Strömung an, die nach unten verlief und ganz schwach divergent war. Weiter nach rechts waren am Niederschlagsmesser keine Ablagerungen gebildet, und die knorrige Struktur derer bei *H* ausgewachsenen, zeigte, dass diese Zapfenbildung wesentlich von der Turbulenz beeinflusst war.

Aussen am Schirme war an der Leeseite eine bedeutende Ablagerung, aus der gefolgert werden musste, dass hier starke Wirbelbildung stattgefunden hatte (Durch *L* angedeutet). An der Unterseite des Schirmes waren weiter nach rechts und links der Linie *S* zahlreiche, kleine Eiszapfen gebildet, deren Wachrichtung eine dicht am Schirme verlaufende, nach oben gerichtete Strömung anzeigte. Sie muss eine sehr dünne Luftschicht gebildet haben, denn die an den eisernen Stützen ausgewachsenen Zapfen (Fig. 1 a) waren

bis zu 2 cm. Entfernung vom Schirme noch horizontal. Und der schönen, gleichmäßigen Struktur der Zapfen zufolge muss die Turbulenz selbst in dieser Entfernung ganz unbedeutend gewesen sein. Die knorrige Struktur der unmittelbar am Schirme gebildeten Ablagerungen zeigte aber, dass die mit dem Schirme in unmittelbare Berührung gekommene Luft in stark turbulente Strömung versetzt war.

In den Fig. 7 a bis d ist das Strömungssystem am geschützten Niederschlagsmesser dargestellt, wie es sich bei östlicher Windrichtung den Beobachtungen zufolge gestaltet

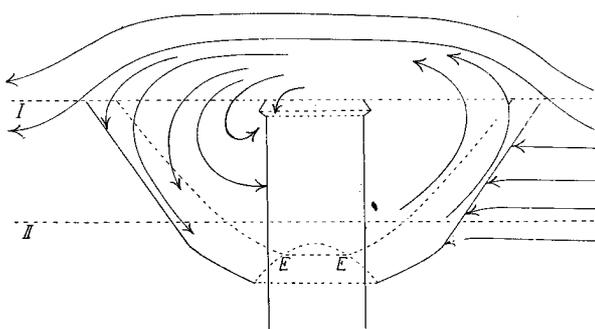


Fig. 7 a.

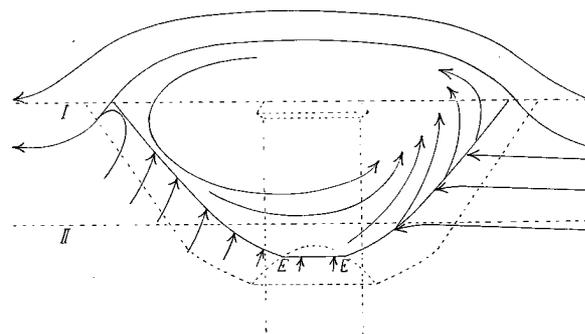


Fig. 7 b.

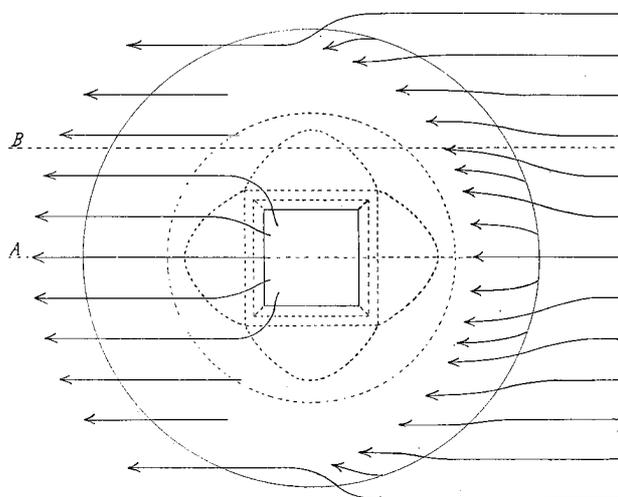


Fig. 7 c.

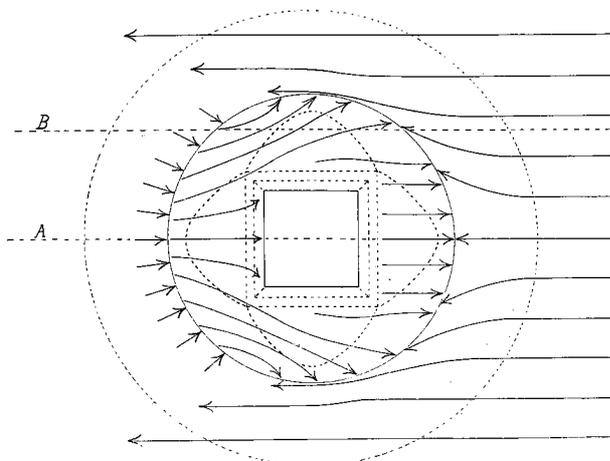


Fig. 7 d.

hat. Fig. 7 a und b stellen die Komponenten der Strömungslinien in zwei verschiedenen Vertikalschnitten dar (A und B der Fig. 7 c und d). Die beiden Vertikalschnitte sind der Windrichtung parallel gelegt, und zwar A durch die Zentralachse des Schutztrichters. Wegen vorausgesetzter Symmetrie ist nur an der einen Seite dieser Diameterebene die Strömung in einer zweiten Vertikalebene dargestellt, und nicht zugleich auch an der anderen Seite. Die Schnittkurven der Vertikalebene B mit dem Schutztrichter sind in E E gebrochen, weil die Kegelfläche des Schirms eingebogen werden musste um die viereckige, untere Öffnungsfläche zu geben.

Die Abbildungen zeigen sowohl die Wirbelbildung im Inneren des Schirmes wie auch den Saugwirbel an der Leeseite. Der Wirbel im Inneren muss teils als Saugwirbel, teils als Stauwirbel betrachtet werden. Für die Niederschlagsmessung sei doch die Saugwirkung vorn am Schirme ausschlaggebend, denn dadurch wird der Regen oder Schnee in die Höhe getrieben. Auch wird der Niederschlagsmesser so wenig von der nach

unten gehenden Strömung berührt, dass die Saugwirkung vorn am Schirme nicht dadurch aufgehoben werden kann. Es ist ja einleuchtend, dass, wenn der Wind abfallenden Boden nach oben bestreicht, — wie es in diesem Falle wirklich war — der Schutztrichter den Niederschlagsmesser in einen «Regenschatten» versetzt. Obwohl die Luft über dem Niederschlagsmesser fast horizontal verläuft, ist sie doch vom Saugwirbel so weit nach oben gewirbelt, dass der Niederschlag einen längeren Weg zu fallen hat, als bei Nichtbenutzung des Schutztrichters. Am ungeschützten Niederschlagsmesser hat die Aufwirbelung jedoch eine viel verhängnisvollere Wirkung, denn sie verläuft hier in der unmittelbaren Nähe der Auffangfläche.

Auch die Fig. 7 c und d (die Horizontalschnitte *I* und *II* der Fig. 7 a und b) zeigen diese Wirbelbildung im Inneren des Schirmes mit räumlicher Divergenz der Strömungslinien gegen den Niederschlagsmesser.

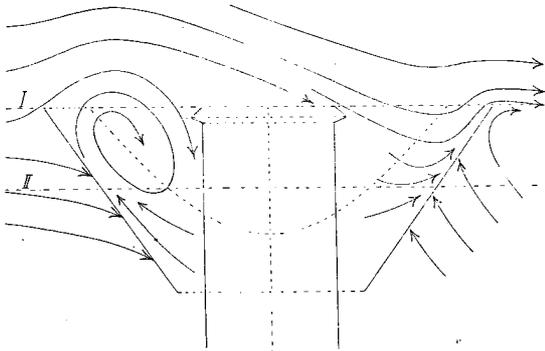


Fig. 8 a.

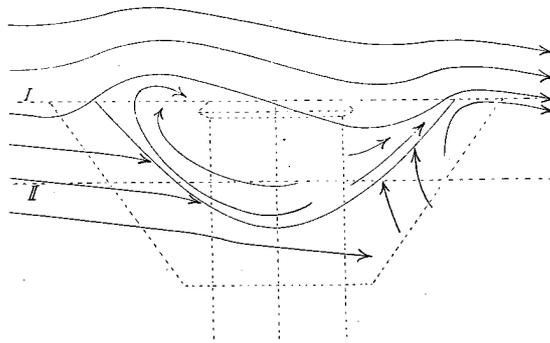


Fig. 8 b.

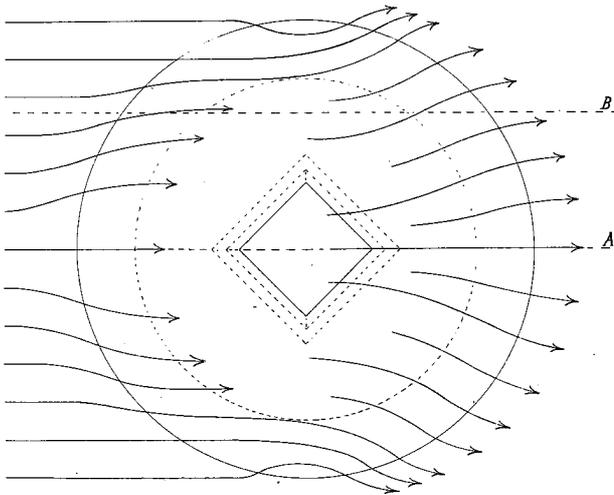


Fig. 8 c.

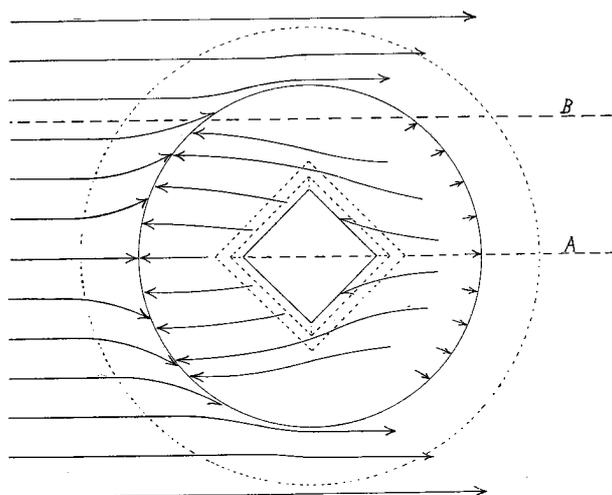


Fig. 8 d.

In den Fig. 8 ist das am 21. Febr. untersuchte Strömungssystem durch zwei Vertikalschnitte (Fig. 8 a und b) und zwei Horizontalschnitte (Fig. 8 c und d) dargestellt. Obwohl die Ablagerungen nicht so schön und reichlich ausgebildet waren wie am 20. März, konnte doch ziemlich gut eine Annäherung an das wahre Strömungssystem konstruiert werden. In derselben Weise wie am 20. März wurde auch jetzt die Strömung hauptsächlich nach den Wachsrichtungen und weniger nach den Zapfenlängen bestimmt.

Die Vertikalschnitte (Fig. 8 a und b) geben die besten Auskünfte über die Gestalt des Strömungssystems. Die Wirkung der schwach niedersteigenden Strömung ist deutlich zu erkennen — zunächst der Saugwirbel an der inneren Leeseite, dann die Stauwirkung mit starker Divergenz gegen die innere Luvseite des Schirmes und die Rückströmung an der Aussenseite. Die Horizontalschnitte (Fig. 8 c und d) zeigen die Divergenz in der oberen Öffnungsfläche des Schirmes und gegen den Niederschlagsmesser.

Karakteristisch für dieses Strömungssystem ist der Abfall der Strömungslinien gegen die Öffnungsfläche des Niederschlagsmessers. Dieser Abfall wurde aus der Zapfenrichtung an der Oberkante des Niederschlagsmessers und an der inneren Luvseite des Schirmes gefolgert.

Ergebnisse der Beobachtungen. — Diese Beobachtungen über Nebelfrostablagerungen zeigen die starke räumliche Divergenz der Luftströmung an der Luvseite der ungeschützten Niederschlagsmesser, sowie die grosse vertikale Komponente der über die Oberkante aufsteigenden Luftströmung. Dadurch wird der grosse Fehler veranschaulicht, der bei bedeutender Windgeschwindigkeit die gemessenen Niederschlagsmengen beeinflusst.

Sie zeigen auch, dass durch den Schutztrichter diese vertikale Komponente der Strömung weiter vom Niederschlagsmesser entfernt und dadurch der Einfluss verkleinert wird. Inwieweit der Schutztrichter die durch diese Vertikalströmung bedingten Fehler der Messungen auch wirklich aufhebt, kann aber nicht in genügender Weise beleuchtet werden. Hier spielt ja die im Inneren des Schirmes auftretende Wirbelbildung eine wesentliche Rolle.

Durch Vergleichen der zwei dargestellten Strömungssysteme wird der grosse Unterschied zwischen ihnen sofort auffällig. Dieser Unterschied ist einem schwachen Abfall (etwa 5 Grade) des Bodens gegen E zuzuschreiben. Bei östlicher Strömung wurde deshalb die Luft gezwungen gegen den Abfall anzusteigen und am Niederschlagsmesser schräg nach oben vorbeizuströmen. Bei einer Windrichtung von SW konnte die Luft aber die Niederschlagsmesser schräg nach unten umwehen. Darum die starke Verschiedenheit zwischen den beobachteten Strömungssystemen.

Bei einer Gestaltung des Strömungssystems, wie am 21. Febr. (Fig. 8), strömt die Luft schräg von oben gegen den Niederschlagsmesser und wird gegen den Schutztrichter aufgestaut. Dadurch wird sicherlich zu viel Schnee in den Niederschlagsmesser geschleudert. Die Wirkung sollte dieselbe sein, wie bei einem schräg gegen die Luftströmung gestellten Niederschlagsmesser.

Wenn sich das Strömungssystem wie am 20. März gestaltet, tritt an der Luvseite aussen am Schirme eine Stauwirkung auf, durch welche der Schnee über den Niederschlagsmesser hinaufgewirbelt wird. An der Leeseite wird die Luft durch die Wirbelbildung gegen den Schirm hinuntergetrieben. Durch die erste Wirkung des Schutztrichters wird die gemessene Niederschlagsmenge verkleinert, durch die zweite aber vergrössert. Ob die Vergrösserung stark genug ist um die Verkleinerung aufzuheben, kann nicht endgültig entschieden werden. Wahrscheinlich ist es aber, dass die Messungen zu kleine Niederschlagsmengen ergeben werden.

Wenn die obere Öffnungsfläche des Schirmes dem Boden parallel ist, tritt vielleicht der Grenzfall ein, dass die gemessene Niederschlagsmenge von der Windgeschwindigkeit unabhängig wird. Auch darüber geben die Beobachtungen keine sicheren Auskünfte denn erstens sind über die Veränderungen der Strömungssysteme bei veränderter Vertikal-komponente des Windes keine weiteren Beobachtungen gemacht. Auch war es unmöglich mitten im Winter Parallelität mit dem Boden herbeizuführen.

Es ist unmittelbar einleuchtend, dass der Niphersche Schutztrichter nicht bei jeder Gestaltung des Terraines zuverlässige Niederschlagsmessungen zulässt, obwohl die beim ungeschützten Niederschlagsmesser auftretende Vertikalströmung aufgehoben wird. Die noch gebliebenen Fehler sind gewiss beim Regen verhältnismässig klein, bei Schneegestöber mögen sie aber erhebliche Abweichungen verursachen. Der geschützte Niederschlagsmesser muss jedenfalls auf möglichst horizontalem Boden aufgestellt werden, und an Stellen, wo dies unmöglich ist, sei vielleicht Parallelität des Schutztrichters mit dem Boden vorteilhaft.
