

METEOROLOGISCHE STUDIEN
IM
SCHWEDISCHEN HOCHGEBIRGE
VON
J. W. SANDSTRÖM



Inlämnad den 11 oktober 1915.

I. Die Beobachtungen.

Als Fortsetzung meiner Untersuchungen über die meteorologischen Verhältnisse in dem schwedischen Hochgebirge¹ unternahm ich noch eine Reise vom 3 Dezember 1913 bis 20 Januar 1914. Herrn Dr G. Ekman, der die beträchtlichen Kosten dieser Reise sowie der unten besprochenen Versuche bestritten hat, spreche ich hiermit meinen wärmsten Dank aus.

In diesem einleitenden Abschnitte werde ich in kronologischer Reihenfolge die wichtigsten Einzelwahrnehmungen erwähnen, die in den nachfolgenden systematischen Abschnitten zur näheren Besprechung kommen.

Den 3 Dezember 1913 trat ich die Reise mit dem Nachtzuge nach Trondhjem an. Von Trondhjem fuhr ich mit Dampfboot um 2.45 Uhr Nachmittags den 5 Dezember, Siehe Abb. 1. Es wehte Westwind mit Schnee- und Regenböen die ganze Zeit, bis wir um 11 Uhr Vormittags den 6 Dezember Kvarøy erreichten. Beim Verlassen dieses Ortes wurde der Wind ostlich und das Wetter schön. Aber im Süden und Westen stand noch eine entsetzliche Nebelmauer, wo es offenbar noch regnete und schneite. Von dieser Nebelmauer erstreckte sich eine keilförmig auslaufende Wolkendecke über uns, die sich von Westen nach Osten bewegte. In diesem grossen Hohlraume schönen Wetters, dessen Begrenzungsfläche nach Süden und Westen hin sehr rund und sauber erschien, steuerte dann das Fahrzeug weiter vorwärts, siehe Abb. 2. Nach Norden hin war das Wetter schön bis nach dem Horizonte. Nach dem was mir die Offiziere des Schiffes mitteilten liegt diese eigentümliche Situation

¹ Ueber die Ergebnisse der früheren Reisen vergleiche: Ueber die Energieumwandlungen in der Atmosphäre KVAH Bd 47 N:o 9 Stockholm 1912. Eine meteorologische Forschungsreise in dem schwedischen Hochgebirge. KVAH Bd 50 N:o 9 Stockholm 1913.

Bei der Beobachtung dieser grossartigen meteorologischen Erscheinung erinnerte ich mich eines Versuches, den ich Professor O. Pettersson ausführen gesehen habe. In einem langgestreckten schmalen Gefäss mit Glaswänden hatte er Meerwasser eingegossen. Dann legte er ein Stückchen Eis auf das Wasser am einen Ende des Gefässes. Es entstand nun eine lebhafte Bewegung im Gefässe, indem das Wasser, das dem Eise umgab, zu sinken begann, und zwar sanken dabei immer neue und beträchtliche Wassermassen herunter. Am Boden des Gefässes angelangt, formte sich dieses Wasser zu einem mächtigen Unterstrom der das Gefäss entlang zu strömen anfang. Das Vorderende des Unterstromes hatte eben die runde und schöne Form, siehe Abb. 3, die ich hier in der Atmosphäre in weit grösserem Masstabe wiedererkannte. Ein Blick auf die beiden Gebilde, Abb. 2 und 3 zeigt auch ohne weiteres, dass



Abb. 2. Im grossen Hohlrame schönen Wetters steuerte das Fahrzeug weiter vorwärts.

die beiden Erscheinungen analog sind. Am Nordmeere ist offenbar anfangs warme, feuchte Luft derselben Art, die wir bis Kvaröy hatten, bis an die norwegischen Gebirge gelagert. Dann ist aber wegen Ausstrahlung gegen den Himmel die Luft an diesen Hochgebirgen abgekühlt und dadurch specifisch schwerer geworden. Sie sinkt dann natürlich unterhalb der leichteren Luft herab, und zwar längs den steilen Gebirgsseiten abwärts bis sie die Meeresoberfläche erreicht. Hier sammelt sie sich zunächst an und dringt dann wie

ein mächtiger Unterstrom die warme, feuchte Luft weg und nimmt ihren Platz ein, also ganz genau derselbe Vorgang wie beim Eisschmelzungsexperimente. Prof. O. Pettersson beabsichtigte mit seinem Experimente eine Erscheinung im Meere nachzubilden, es scheint mir aber jetzt, dass sein Versuch eine weit universellere Bedeutung besitzt, indem es nicht nur für ozeanische, sondern auch für eine Reihe atmosphärischer Vorgänge grundlegend ist.

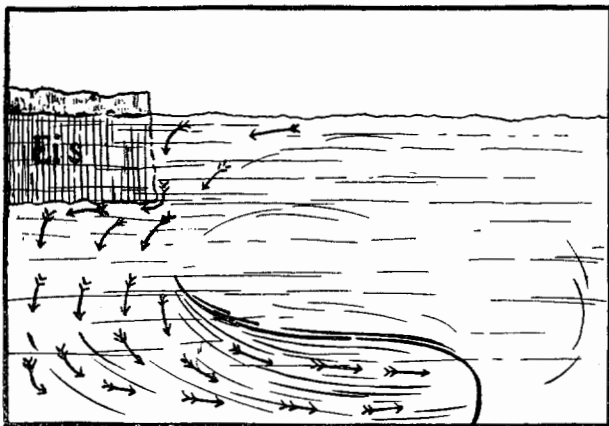


Abb. 3. Prof. O. Petterssons Eisschmelzungsversuch.

Um 5.15 Uhr Nachmittags den 6 Dezember erreichte ich Bodö. Mit dem Lokalboot ging die Reise weiter in den Saltenfjord hinein nach Finneidet, das um 0.30 Uhr nachts erreicht wurde. Von Finneidet setzte ich mit Dampfboot um 1 Uhr Nachmittags den 7 Dezember nach Skönstaa längs dem Süßwassersee Övre Vand fort. Immer war der Wind ostlich, die Temperatur niedrig und das Wetter schön. Der See, auf dem wir entlang fuhren, war an beiden Seiten von steilen Gebirgen begrenzt, die bisweilen durch Täler durchschnitten waren. Von diesen Seitentälern strömte die kalte Luft herab, was man sehr leicht an der Ablenkung des Rauches des Dampfbootsschornsteines konstatieren konnte. Von Skönstaa führt eine 13 km lange Eisenbahn nach Hellarmo, die ich benutzte. Von Hellarmo fuhr ich weiter mit Dampfboot nach Sulitjelma Kupferwerk, das ich um 7 Uhr Nachmittags erreichte. Hier wurde ich vom Direktor A. Quale in sehr liebenswürdiger Weise empfangen.

Am 9 Dezember verliess ich Sulitjelma in stickendem Schneesturm aus Osten. Ich ging 4 km zu Fuss, dann fuhr ich mit elek-

trischem Zug gerade in den Berg hinein, wonach ich 400 m hoch an beinahe vertikalen Grubenleitern durch die Schacht hinaufstieg. So erreichte ich Ny Sulitjelma, wo der Sturm noch schlimmer wütete. Man konnte hier kaum aufrecht stehen, die Schneewehen reichten hoch an den Fenstern hinauf und der Schnee drang hinein in den Gebäuden überall, wo es nur eine kleine Öffnung gab, und bildete Schneewehen drinnen. Vom Sturme wurde die Schneeoberfläche so hart, dass sie den Menschen ohne Schneeschuhe trug.

Den 11. Dezember stürmte es fortwährend. Ich ging gegen den Wind auf dem Berge ostlich von Ny Sulitjelma hinauf. Je höher ich kam, je kleiner wurde die Windstärke. Immerhin reichte sie aus um als Sturm bezeichnet zu werden. Als wir zurückkehrten nahm sie wieder zu. Die Luft wurde also offenbar stark beschleunigt indem sie herabstürzte. Die Erscheinung erinnerte sehr an einem Wasserfalle, wo bekanntlich das Wasser auch stark beschleunigt wird, indem es herabstürzt.

Der Himmel war bewölkt. Ich legte mich an einem Anhang etwa 10 m hinter einem Steine und betrachtete die Bewegung der Wolken am Steine vorbei. Sie bewegten sich von W nach E obgleich mit kleiner Geschwindigkeit. Bei der Zusammenstellung dieser Beobachtungen mit denjenigen, die ich am Meere zwischen Kvarøy und Bodö gemacht hatte, bekam ich also eine Vorstellung über die Luftbewegung vom Meere bis ziemlich weit in das Land hinein und zwar ergab sich dabei, dass sich die untere Luft meerwärts, die obere aber landeinwärts bewegte.

Am Nachmittag nahm die Windstärke zu, am Abend aber wieder ab, so dass der Wind ganz schwach wurde. Dann sah man die ziemlich niedrigen Wolken mit ansehnlicher Geschwindigkeit dem Monde vorbei von W nach E ziehen.

Stiger Berge, der lange Zeit in Ny Sulitjelma gewohnt hatte, erzählte mir, dass die Oststürme drei Wochen dauern können. Im Winter 1894 musste die Seilbahn 11 Tage ununterbrochen stehen bleiben wegen sehr starkes Oststurmes. Dagegen sind die Westwinde in Ny Sulitjelma schwach und wenig anhaltend aber sehr niederschlagreich.

In der Nacht zwischen dem 11. und 12. Dezember schneite es 15 cm in Ny Sulitjelma. Am Morgen war diese Schneedecke nass, weil die Temperatur während der Nacht beträchtlich gestiegen war. Die Schneebahn war also sehr schlecht. Inzwischen verliess ich um

9 Uhr vormittags Ny Sulitjelma um in das Gebirge hineinzufahren. In Ny Sulitjelma und an der steilen Gebirgswand, die ich hinaufging, war der Wind schwach ostlich, auf dem Berge aber schwach westlich. Ich glaube, dass der Ostwind an Ny Sulitjelma diesmal einfach ein lokaler rückkehrender Stauwind war. Die hohe Temperatur und Feuchtigkeit desselben deutete jedenfalls auf atlantischen Ursprung hin. Auf dem Berge war es etwas kälter, aber doch über dem Nullpunkte. Ich strebte im tiefen nassen Schnee mühsam vorwärts. Das Wetter war neblig und die Orientierung schwierig. An der Westseite des Sulitjelmagletschers war die Schneedecke noch lose und die Schneebahn schlecht. Schon am höchsten Punkte des Gletschers wurde sie aber beträchtlich besser. An der Ostseite war in der letzten Nacht nur wenig Schnee gefallen. Die Schneeschuhe gleiteten abwärts in vollem Lauf im hellen Mondeslicht. In der Sorjusgegend betrug die ganze Schneedecke im Durchschnitt nur 15 cm. Kein Schnee war hier in der Nacht gefallen. Um 1 Uhr nachts erreichte ich die kleine Torfhütte am Kappaluobbal und um 11 Uhr Vormittags den 13. Dezember setzte ich die Reise davon wieder fort. Am Ostende des Sees Kappaluobbal waren die Abhänge von Schnee befreit, und ganz nackt. Die volle Hälfte des Geländes hatte kaum 1 cm Schneedecke, und die durchschnittliche Tiefe der ganzen Schneedecke dürfte kaum 5 cm erreichen.

Um 5 Uhr Nachmittags den 13. Dezember erreichte ich Staloluokte. Hier im Walde war die Schneedecke 40 bis 50 cm. tief. Am 14. Dezember ging ich auf dem Eise des Virijaures um die Landzunge Titirnjarka herum, so dass ich in die Bucht Arasluokte, wo es Birkenwald giebt, hineinkam. Am See gab es nackte Flecke und wenig Schnee, so dass man den ganzen Weg sogar hätte Schlittschuh fahren können. Dann kehrte ich auf vorzüglicher Schneebahn in stillem schönem Wetter und herrlichem Mondschein Titirnjarka querüber nach Staloluokte zurück, wo ich die Hütte Parvas um 1.30 Uhr morgens den 15. Dezember erreichte. Am Abend, als es Mondeslicht wurde, ging ich mit dem mitgebrachten Meteorographen nach Allatjåkko. Die Lufttemperatur betrug -16° , der Himmel war klar ohne Wolken. Die Luft war ganz still, als ich aber den Fuss des Allatjåkkos erreichte begegnete mir der lokale Bergwind, der so oft in der Nacht die Bergseiten herunterweht. Auch diesmal war der Wind bergab gerichtet und die Windstärke nahm zu bis an den Depotplatz in der Mitte vom Berge, davon

nahm sie ab bis an den Gipfel, den wir um 1 Uhr nachts erreichten. Am Gipfel des Berges war es ganz still. Als ich nach Aufstellung des Instrumentes zurückkehrte wuchs die Windstärke wieder bis ich den Depotplatz erreichte. Hier war es schon frischer bis harter Wind. Der Wind wuchs nun allmählich zum Sturm. Als es Tageslicht wurde verliess ich das Zelt und fuhr nach dem Auslauf des Virijaurs um den Wasserstand dieses Sees und Vastenjaurs abzulesen. Beim Erreichen des Fusses des Allatjäckos wurde es wieder ganz still, obgleich ich vom aufgewirbeltem Schnee sah, wie es auf der Nord- und Südseite des Berges, und zwar immer bergab wehte, so dass der Wind auf der Nordseite südlich, auf der Südseite dagegen nördlich war. Siehe Abb. 4.

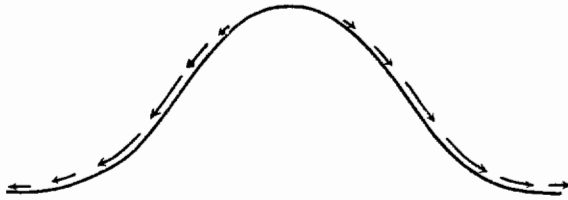


Abb. 4. Ausstrahlungswind.

Die Luft, die in dieser lokalen Luftbewegung teilnahm, war offenbar nur solche, welche durch Wärmeausstrahlung der weissen Schneeoberfläche gegen den Himmel abgekühlt und dadurch spezifisch schwerer worden war, wodurch sie die Neigung bekam, bergabwärts zu strömen. Dass selbst von ziemlich unbedeutenden Bergen bei günstigen Wärmeausstrahlungsverhältnissen beträchtliche Luftmengen in dieser Weise in Bewegung versetzt werden können, zeigt der lokale Sturm, den ich diese Nacht aushalten musste.

In das Arastal angelangt, hörte ich ein Getöse hinter mir, und als ich mich umkehrte, sah ich wie es im oberen Teil des Tals von aufgewirbeltem Schnee staubte. Bald wurde ich vom Sturme eingeholt, er schob mich vorwärts, so dass die Schneeschuhe von selbst gleiteten selbst nachdem ich das horizontale Eis des Virijaurs erreicht hatte. Es wehte nur am Boden des Tales, an den Bergseiten daneben wurde kein Schnee aufgewirbelt. Der Sturm war mithin untief und er sah mit seinen lebhaften Schneestrudeln gerade wie eine gewaltige Wasserstromschnelle aus. Er hörte indessen bald auf, von den Spuren an der Eisoberfläche des Virijaurs schloss ich,

dass er sich kaum 10 km. weit am See erstreckt hatte. Der Ursprung dieses lokalen Sturmes war offenbar die Luft, die in den beckenartigen Vertiefungen südlich von Allatjåkko während der Nacht durch Ausstrahlung von den nebenliegenden Bergen zusammengeströmt hatte. Diese kalte schwere Luft hat sich dort gewissermassen wie das Wasser in einem See angesammelt. Als nun dieser Luftsee übervoll wurde, fing die schwere Luft an über die niedrigste Schwelle auszuströmen. Die Strömung dauerte nun so lange wie die kalte Luft oben vorrätig war. Die Art der nachherigen Strömung im Arastale war eine Folge des grossen spezifischen Gewichtsunterschiedes der unteren bewegten und der auf dieser ruhenden Luft, welcher den Vorgang ähnlich einer herabstürzenden Wassermasse machte.

Bei dieser Erscheinung verdient ein Detail eine nähere Beachtung. Man hätte erwarten können, dass die schwere Luft nur allmählich in das Tal herabsickern sollte, anstatt dessen kam sie plötzlich und mächtig nach dem Tale abwärts. Dies dürfte auf atmosphärische Wellenbewegungen beruhen. In der Trennungsfläche zwischen der unteren schweren und der oberen leichten Luft können leicht grosse langsamwandernde seichenähnliche Wellen entstehen. Wahrscheinlich sind durch irgend eine Störung z. B. einen plötzlichen Zufluss schwerer Luft von den nebenliegenden höheren Sarekgebirgen solche Wellen entstanden, welche die Berührungsfläche ab und zu über die Schwelle gebracht haben und somit die Ausströmung ermöglicht. Jedenfalls muss die Oberfläche dieser Luftseen, wegen des geringeren Dichteunterschiedes, weit beweglicher sein als die Oberfläche gewöhnlicher Wasserseen.

Inzwischen setzte ich auf dem Eise des Virijausees fort. Nachdem der Wind um 12 Uhr mittags aufgehört hatte, wurde es ausserordentlich kalt, so dass die Schuhe auf den Füßen, und der Atem im Barte froren. Die entlegenen Ufern spiegelten sich in der Luft ab, so dass sie sehr phantastische Formen aufwiesen. Wahrscheinlich war es die Trennungsfläche der heruntergedrungenen kalten und der oberen wärmeren Luft, die die Luftspiegelung hervorrief. Diese Fläche schien unweit oberhalb unserer Köpfe zu liegen. Das Eis war sehr durchsichtig und dünn und seine Oberfläche ganz eben und beinahe schneefrei. Der plötzlichen Kälte wegen bekam das Eis eine sonderbare Form, siehe Abb. 5, offenbar weil die Oberfläche desselben sich zusammenzog. In den Rissen des Eises wurde

dabei Wasser aufgedrückt, das unter den Schneeschuhen fror und das Gehen mühsam machte.

Am Nachmittag den 16. Dezember stiegen hohe Wolken im Westen auf, und breiteten sich mit geradliniger Front über den Himmel nach Osten hin. Um 12 Uhr nachts war der ganze Himmel bedeckt. Am Morgen den 17. Dezember wanderten mächtige Wolken mit grosser Geschwindigkeit von W nach E. Um 12.30 Uhr brach ich auf um nach Arasluokte zu wiederkehren. Auf dem See wehte schwacher östlicher Wind, die Temperatur war bis wenig unterhalb Null gestiegen und die Schneebahn gut. Um 5 Uhr Nachmittags erreichte ich Arasluokte. Ich machte Feuer, ass und ging zu Bett. In der Nacht wurde es starker Westwind, so dass ich das Zelt zusammenschlugen und als Schutz gegen den Wind verwenden musste. Als ich um 9 Uhr morgens den 18. Dezember aufwachte, waltete starkes Tauwetter. Das umgebende Gelände war beinahe schneefrei. Die Wolken zogen jetzt von SW nach NE.



Abb. 5. Deformation des Eises des Virijaurs bei plötzlich eintretender Kälte.

Der Vorgang beim Entstehen des Westwindes war also der folgende. In der Höhe entstand Westwind, der sich ostwärts ausbreitete und nach unten ausdehnte, so dass die untere kalte Luft nach Westen wegziehen musste. Schliesslich erreichte der Westwind den Erdboden. Dann war aber das ganze Gebiet westlich des schwedischen Gebirgsrückens mit feuchter warmer Luft atlantischen Ursprungs gefüllt. Abb. 6 zeigt die drei Phasen dieses Vorganges.

Von Arasluokte ging ich um 10 Uhr nach dem Depotplatz am Allatjåtkko, den ich um 1 Uhr nachmittags erreichte. Der Westwind wehte immer, weshalb ich in das Zelt hineinkroch. Auch den 19. Dezember wehte starker Westwind mit Schnee und Nebel, so dass ich den ganzen Tag im Zelte bleiben musste. Ich benutzte die Zeit um das zweite Registrierinstrument in Ordnung zu bringen. Am 20. Dezember wurde das Wetter um 1 Uhr ganz schön. Ich warf das Instrument auf meinen Rücken und sauste bergab um das Instrument im Arastale aufzustellen. Während dieser Arbeit nahm die Windstärke zu, es wurde nebelig und ganz dunkel. Ich trat

deshalb in dem tiefen Schnee hinter einem grossen Stein eine Grube auf, worin ich einkroch, den Rucksack entleerte und über den Kopf und Oberkörper zog. Dies Arrangement erwies sich als sehr vorteilhaft. Es war windstill und schneefrei in meinem Häuschen. Hier konnte ich gut aushalten. Es freute mich sehr dieses einfache Mittel die Schneestürme auszuhalten gefunden zu haben. Es sollte für meine künftigen Sturmstudien unschätzbar werden. Bisweilen guckte ich hinaus. Der Sturm tobte immer. Endlich fing es an zu dämmern. Die Nacht war zu Ende. Noch wütete aber der Sturm. Endlich um 1 Uhr nachmittags hörte er plötzlich auf und ich sah die Landschaft vor mir liegen. Ich war da 20 Stunden in der Grube gewesen. Ich lief nach dem Zeltplatze hin, der Weg war indessen weit länger als er anfangs aussah. Als ich den Zelt-

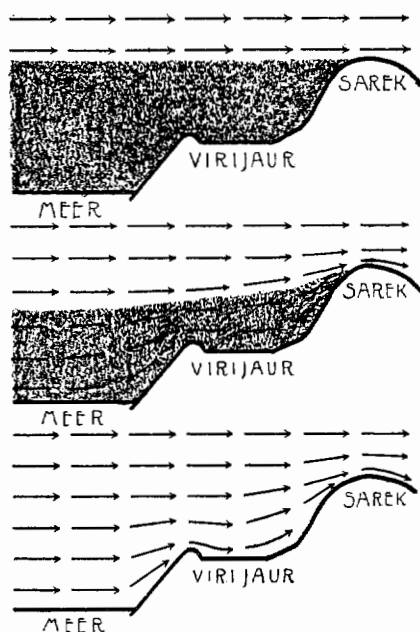


Abb. 6. Die Entstehung des Westwindes bei Virijaur.

platz erreichte, war es schon dunkel geworden und ich konnte das Zelt in der Dunkelheit nicht finden, weil es während des Sturmes schneebedeckt und weiss wie seine Umgebung geworden war. Ich musste also noch eine Nacht im Freien bleiben. Der nächste

Morgen fand ich indessen das Zelt und taute meine linke Ferse, die gefroren war, auf.

Dann ging ich hinaus um Abschied von der lieben Gegend zu nehmen. Das Wetter war ausserordentlich hell und ruhig, die Schneebahn hart und fein. Der Sturm hatte gewaltige Spuren in Form von Schneewehen und Aushöhlungen in der Schneedecke ausgeführt, die mich jetzt nach einem so intimen Studium des Sturmes sehr interessierte. Ich inspizierte die untere Hälfte der Westseite des Allatjäckos, ging querüber das Tal und besuchte die Grube auf Arasvare, die ich während des Sturmes bewohnt hatte.

Am nächsten Tage bestieg ich Allatjäcko um mein Registrierinstrument daselbst nachzusehen. Ich ging das Bachtal hinauf. In den letzten Nächten war es Ausstrahlungswind gewesen, der Spuren in der Schneeoberfläche nachgelassen hatte. Diese Windspuren waren von den beiden Seiten des Tales nach dem Bache hin gerichtet, gerade wie im Sommer das Regenwasser von beiden Seiten des Tales dem Bache zuströmt. Durch geeignete Messinstrumente würde man die hervorströmende Luftmenge dieses Ausstrahlungswindes in Tonnen für die Sekunde messen können, etwa in der Weise wie man die hervorströmende Wassermenge eines Baches oder Flusses misst. Und zwar würde dabei das Niederschlaggebiet des Baches auch für den Luftstrom ausschlaggebend sein, denn die Wasserscheiden des Baches sind auch die Scheiden für den Luftstrom. Durch solche Messungen bekäme man ein Maass für die winderzeugende Wirkung der Wärmeausstrahlung.

Der Meteorograph am Gipfel des Allatjäckos befand sich in einem sehr eigentümlichen Zustand. Von jedem Punkt an der Westseite derselben strahlten halbmeterlange horizontale Eisnadeln gerade westwärts aus. Längs den drei Beinen des Instruments waren diese Nadeln zu Brettern zusammengebacken. Die Eisnadeln waren länger in der Höhe des Instruments als in der Nähe vom Erdboden. Siehe Abb. 7. Natürlich war der Anemograph ausser Funktion gesetzt. Diese Erscheinung scheint mir mit dem bekannten Metallspritzungsverfahren analog zu sein. Bei diesem werden ausserordentlich kleine Metallpartikel gegen feste Gegenstände hin geschleudert, welche dadurch einen Metallüberzug erhalten, der in Struktur und Solidität an geschmiedeten und gewalzten Metallen erinnert. Am Gipfel des Allatjäckos war offenbar sehr kleine Eispartikel mit grosser Geschwindigkeit an das Instrument und zwar

ausschliesslich von Westen geschleudert worden. Diese haben nach demselben Gesetz wie beim Metallspritzen solides Eis gebildet. In Analogie mit jenem Namen kann man diese Erscheinung Eisspritzung nennen. Bei dieser Eisbildung dürften auch unterkühlte Wassertropfen eine Rolle gespielt haben. Die Erscheinung ist von Prof. A. Hamberg¹ sehr eingehend studiert worden.

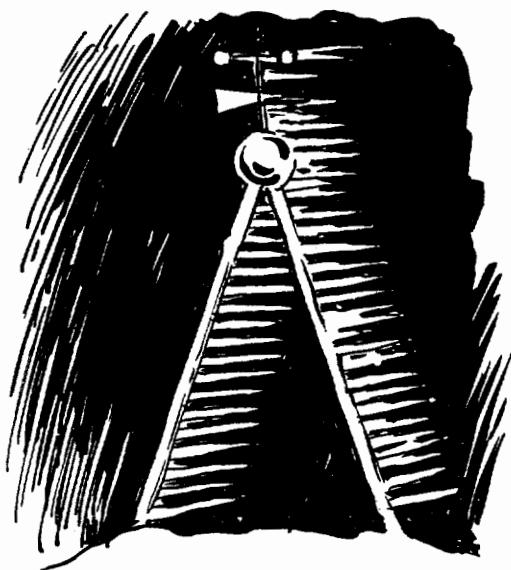


Abb. 7. Eisspritzung an Allatjåkkö.

Den 25 Dezember ging ich die 15 km nach Staloluokte. Am 26 Dezember war das Wetter still. Am Abend fing es an östlicher Wind zu wehen. Von diesem Tage an bis 10 Januar 1914 blieb ich in Parvas Hütte meistens liegend, wegen der erfrorenen Ferse. Den 27 wehte kalter östlicher Sturm. Die Windgeschwindigkeit war so gross, dass es beinahe unmöglich war im Sturm aufrecht zu stehen. Das Wetter war klar; das Quecksilber gefroren. Der Sturm riss den Schnee mit sich und führte ihn in grossen Massen über Virijaur nach Norwegen hin. Schon am Abend war das umgebende Gelände überwiegend schneefrei. Diese gewaltige Schneetransport dürfte für die Wasserführung der schwedischen norrländischen Flüsse und die Energieleistung der Kraftwerke von Bedeutung sein. An der West-

¹ A. HAMBERG. Die Eigenschaften der Schneedecke in den lappländischen Gebirgen. Gletscherkunde. Bd I Abt. III. Stockholm 1907.

seite der schwedischen Hochgebirge ist der Winterniederschlag zwar gross, ein beträchtlicher Teil derselben wird aber später von den starken östlichen Stürmen in trockenem Zustande über die Wasserscheide nach den norwegischen Flüssen hin gebracht.

Den 28 Dezember war es wieder still aber kalt: -26° . Die Schneebahn war nach dem Sturme sehr hart und gut. Am Nachmittag zeigten die Wolkenmützen an den umgebenden Berggipfeln, dass der Wind in dieser Höhe östlich war, am 29 war es wolkig, diesmal bewegten sich aber die Wolken von W nach E. Die Temperatur war auf -9° gestiegen. Am Abend stieg die Temperatur auf Null und nasser Schnee fing schon an in grossen Mengen zu fallen. Am Morgen den 30 schneite es auch, obgleich weniger, es wehte laaber östlicher Wind, die Wolken zogen aber von West. Die Temperatur war in der Nacht bis ein paar Grad unter dem Gefrierpunkte gefallen. Am 31 Dezember schneite es etwas, es wehte schwacher südlicher Wind, und die Temperatur war etwas unterhalb Null. Am 1 Januari 1914 wehte schrecklicher W-Sturm mit viel Schnee, die Temperatur war etwas unter dem Gefrierpunkte. Am 2 Januar war schönes, stilles, mildes Wetter. Die Wolken zogen von SW nach NE hin. Am 3 Januar war immer noch schönes Wetter mit schwacher NE Wind. Niedrige Wolken kamen von E. Am 4 Januar war klares Wetter und starker ESE Wind. Temperatur -16° . Am 5 Januar wehte östlicher Sturm von gewaltiger Stärke, der wieder den losen Schnee nach Norwegen hin fegte, die Wolken waren ganz stillstehend. Temperatur -16° . Am 6 Januari war stilles Wetter mit wenig Wolken. Temperatur -24° . Am 7 Januar war es windstill und feiner Schnee fiel am Morgen, später wurde schwacher Westwind, auch die Wolken zogen von W nach E. Temperatur -18° . Am 8 Januar wehte laaber Ostwind. Die Wolken waren scheinbar stillstehend, wahrscheinlich wegen stationärer Neubildung, Temperatur -11° . Am Abend zogen die Wolken nach S hin. Am 9 Januar war das Wetter schön.

Am 10 Januar war das Wetter still und schön. Temperatur -20° . Diesen Tag verliess ich Staloluokte. Um 2 Uhr erreichte ich Kappaluobal. Zwischen Kappa und Sorjus wehten lokale Winde, die den Schnee aufwirbelten und mich ganz durcheisten. Glücklicherweise hörten diese bald auf. Im schönsten Mondschein fuhr ich über den Gletscher. Um $\frac{1}{2}4$ Uhr morgens erreichte ich Ny Sulitjelma. Den 16 verliess ich Sulitjelma um nach Hause zu fahren.

Während meines Aufenthaltes im Gebirge wurde ich mit den Witterungserscheinungen daselbst wohl vertraut. Die starken Oststürme schienen sich regelmässig mit einigen Tagen Zwischenzeit zu wiederholen. Der Oststurm hörte sehr plötzlich auf, dann wehte laber ostlicher Wind eine Zeit, nachher war es windstill mit Sonnenschein und schönes Wetter, so wurde der Himmel mit Wolken bedeckt, die von West nach Ost zogen, während an der Erdoberfläche ein leiser ostlicher Wind entstand. Dieser ging in westlichen Wind mit Tauwetter über. Dann hörte man ein Getöse im Gebirge, wonach der Oststurm mit gewaltiger Stärke plötzlich einbrach. In der Abb. 8 ist ein Versuch gemacht diese Erscheinungen darzustellen und zu erklären. Die Vorgänge an der Ostseite des Gebirgsrückens habe ich bei einer früheren Gelegenheit beobachtet.

II. Die Luftströme.

Wie aus dem Vorhergehenden ersichtlich, dürften wenige Stätten auf der Erde für okulare Wahrnehmung der dynamisch-meteorologischen Erscheinungen so geeignet sein wie die Westseite der nordskandinavischen Hochgebirge während des Winters. Wegen des gewaltig scharfen Temperaturunterschiedes zwischen dem Meere und dem Lande werden eine grosse Anzahl meteorologischer Erscheinungen hier auf engem Raume zusammengedrängt und von den hohen Berggipfeln leicht überblickt.

Meine wichtigsten Hilfsmittel bei der Beobachtung dieser Erscheinungen waren also meine eigenen Augen und Füsse. Von der Form und der Bewegung der Wolken, von den Spuren in der Schneedecke nach Stürmen u. s. w. konnte ich weit wichtigere Schlüsse ziehen, als wenn ich die vollkommensten Beobachtungen mit meteorologischen Instrumenten zur Verfügung gehabt hätte. Die Ursache dazu lag darin, dass man mit den Augen drei Dimensionen des Raumes beherrschen kann, während ein meteorologisches Instrument die Verhältnisse zwar sehr genau aber doch nur in einem einzigen Punkte angiebt. Für meinen Zweck war eine Uebersicht über den Totalverlauf der Erscheinungen wichtiger als die genauesten Beobachtungen in einem oder in mehreren einzelnen Punkten.

LUFTBEWEGUNGEN IM DEM SCHWEDISCHEN HOCHGEBIRGE

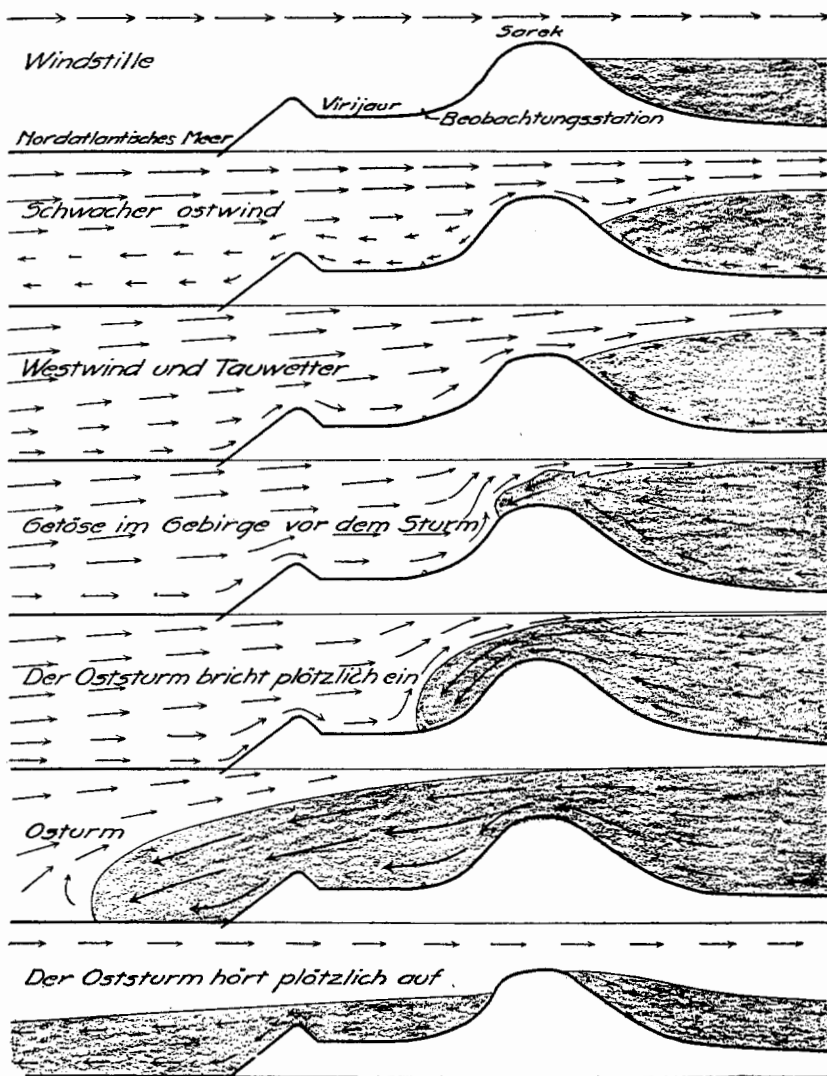


Abb. 8.

Was man bei diesem Verfahren zuerst beobachtet, ist dass die Luftströme durch Trennungsflächen von einander und von der umgebenden Luft ganz abgegrenzt sind. In dieser Hinsicht verhalten sie sich gerade wie die Meeresströme. Ferner hat jeder Luftstrom eine stark ausgeprägte Fähigkeit sich zusammen zu halten und mit Hilfe seiner lebendigen Kraft und potentiellen Energie sich Platz zu verschaffen auf Kosten der benachbarten Luftströme. Dieser Kampf zwischen den Luftströmen äussert sich in der Deformation der Trennungsflächen, die dieselben unterscheiden. Aus dieser Deformation kann man ohne weiteres beurteilen, welcher Luftstrom der stärkste ist. Siehe Abb. 2 und 8.

Innerhalb jedes Luftstroms ist die Luft verhältnismässig homogen. Dadurch wird es möglich, dem Luftstrome ein besonderes Charakteristikum in Bezug auf Temperatur und Feuchtigkeit zu geben, das ihn von der umgebenden Luft unterscheidet. Ein Luftstrom ist kalt und trocken, ein anderer warm und feucht u. s. w. Dagegen sind die Trennungsflächen zwischen den verschiedenen Luftströmen durch sehr scharfe Temperatur- und Feuchtigkeitssprünge gekennzeichnet. Diese Sprünge waren es offenbar, welche die Kondensation verursachten, die mir die Trennungsflächen sichtbar machte. Wenn nämlich die feuchte Luft eines Luftstromes mit der kalten des benachbarten in Berührung kam, musste Feuchtigkeit ausfallen. Sehr schön war die Trennungsfläche, die sich bei stillem Wetter vom Sulitelmaberger ostwärts erstreckte. Der am Berge entstandene Nebel floss an den Bergseiten herunter bis er ein gewisses Niveau erreichte, wo er horizontal in die Luft hinauslief und eine sehr dünne Wolkenschicht bildete. Unterhalb dieses Niveaus war die Luft ganz klar und kein Nebel wurde daselbst am Berge gebildet. Siehe Abb. 9. Die Fläche schien mir eine direkte Fortsetzung der bei Ny Sulitjelma und ausserhalb der Küste bei Quaröy beobachtete Trennungsfläche Abb. 2 zu sein. Mithin dürfte die Luft oberhalb derselben atlantischen Ursprungs, also warm und feucht, unterhalb derselben aber kontinentalen Ursprungs, also kalt und trocken gewesen sein, was mit den Kondensationserscheinungen übereinstimmt.

Als ein Strom von trockener Luft in nebelgefüllte Luft hineindrang, wie es bei Quaröy der Fall war, konnte die Form der Trennungsfläche in sehr grosser Ausdehnung gut beobachtet werden. Das von ihr gebildete Gewölbe hatte eine sehr einfache und schöne Run-

dung, die Trennungsfläche selbst war sehr sauber und ganz frei von Unebenheiten. Sie schien mir die Invasionsfronte des kalten Luftstroms zu sein, indem sie sich senkrecht gegen die Invasionsrichtung ausbildete.

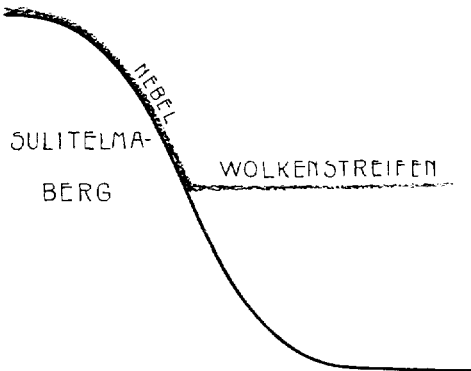


Abb. 9. Trennungsfläche am Sulitelmaberge.

Die physikalische Eigenschaft, welche die Trennungsfläche in der Atmosphäre wie im Meere konstituiert, ist offenbar der Dichtesprung. Von der Abhängigkeit der Dichte von dem Drucke können wir nämlich hier absehen, und die isosteren Flächen so betrachten als ob sie nur von Temperatur und Feuchtigkeit abhängig wären. In der Trennungsfläche sind dann diese modifizierten isosteren Flächen versammelt, ja man kan sagen, dass diese Fläche nichts anderes als eine Ansammlung isosterer Flächen ist. Diese bilden eine elastische und dehnbare Haut um den Luftstrom herum, durch welche kein Luftaustausch stattfinden kann. Der Luftstrom ist durch dieselbe von der Umgebung ganz isoliert.

Um die Druckverhältnisse und Luftbewegung in der Umgebung einer Trennungsfläche zu beurteilen wollen wir den Vertikalschnitt Abb. 10 betrachten. In diesem mag die schräge Linie die Trennungsfläche zweier Luftströme darstellen, von denen der obere spezifisch leichte Luft, der untere spezifisch schwere Luft enthält. p_1, p_2 , etc. seien isobare Flächen. In dem oberen leichten Luftstrom sind ihre vertikalen Abstände grösser als in dem unteren schweren, wodurch eine charakteristische Brechung derselben in der Trennungsfläche entsteht. Diese Brechung hat zur Folge, dass der Luftdruckgradient beider Luftströme gegen die Trennungsfläche gerichtet ist. Daraus

die gewaltigen relativen Geschwindigkeiten an den beiden Seiten der Fläche, wodurch sie von der Luftbewegung tüchtig gehobelt und glatt wird.

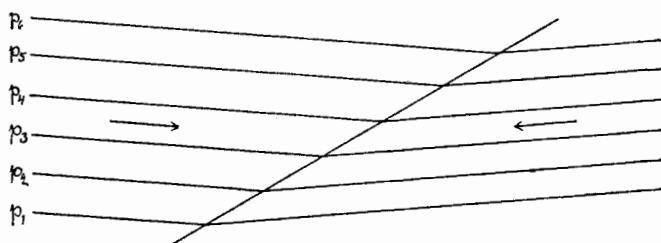


Abb. 10. Die Brechung der isobaren Flächen beim Schneiden einer schrägen Trennungsfläche.

Noch eigentümlicher müssen aber die Druckverhältnisse bei derartigen Trennungsflächen sein, die ich bei Quaröy beobachtete, Abb. 2. Im vertikalen Teil der Trennungsfläche bekommen die isobaren Flächen infolge der verschiedenen vertikalen Abstände einen scharfen Knick, siehe Abb 11, so dass daselbst schon der hydrosta-

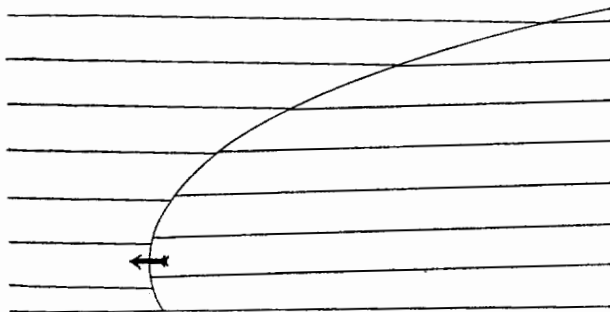


Abb. 11. Der Knick der isobaren Flächen bei dem vertikalen Teil der Trennungsfläche.

tische Druck an den beiden Seiten der Trennungsfläche verschieden ausfällt. (Natürlich handelt es sich hier nicht um eine Fläche im geometrischen Sinne, sondern um eine Schicht endlicher aber kleiner Dicke). Wenn man also mit einem Boote diese Fläche westwärts überquerte und dabei ein Barograph an Bord hätte, würde derselbe eine Gewitternase zeigen. Wahrscheinlich sind die gewöhnlichen Gewitternasen auch nichts anderes als Luftdrucksprünge dieser Art,

welche auftreten, wenn eine vertikal verlaufende Trennungsfläche über einen Ort hinüberzieht. Auch müssen die isobaren Flächen innerhalb des Luftstromes geneigt sein, weshalb die Luft daselbst kräftig gegen die Fronte hin hervorgetrieben wird. Infolge dieser Umstände muss der Angriff des Luftstromes an die stillstehende Luft sehr effektiv werden.

Weil die isosteren Flächen in den Trennungsflächen versammelt sind, muss auch die Bjerknes'schen Solenoide da versammelt sein. Das Innere der Luftströme kann infolge ihrer Homogenität als Solenoidenfrei bezeichnet werden, während dagegen in der undurchdringlichen Haut, die jeden Luftstrom umgibt, die Solenoide massenhaft vorkommen.

Die Solenoide sind die Röhre, die beim Schneiden der isosteren und isobaren Flächen entstehen, Abb. 12. Weil die isobaren Flächen in

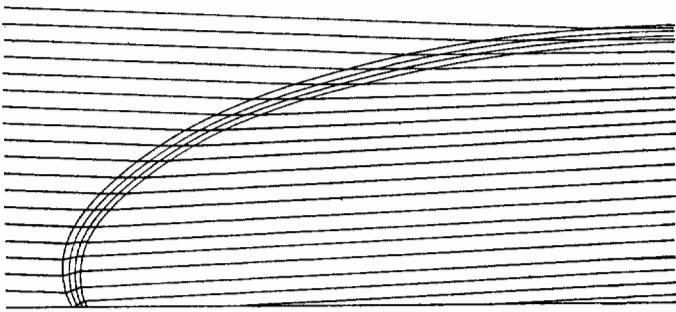


Abb. 12. Schematische Darstellung der Isobaren, Isosteren und Solenoide bei einer Trennungsfläche.

der Atmosphäre nahezu horizontal verlaufen, bekommt man die Form und Lage der Solenoide, indem man die Trennungsfläche durch Horizontalebene schneidet. Bei der Beobachtung der Trennungsflächen kann man sich also eine klare Vorstellung über den tatsächlichen Verlauf der Solenoide bilden. Dieser Umstand ist für die dynamische Erklärung der Erscheinungen unschätzbar.

Durch die Ansammlung der Solenoide in Flächen wird ihre Wirkungsweise in hohem Grade vereinfacht. Die Trennungsflächen sind einfach atmosphärische Gleitflächen deren Gleitwirbel durch ihre Solenoide erhalten werden. Die Analogie der Luftströme mit den dynamisch analogen Wasser- oder Lavaströmen dringt dadurch sehr stark in den Vordergrund. Wie diese bewegen sich auch die kalten

Luftströme infolge ihres grösseren specifischen Gewichtes abwärts in die leichtere umgebende Luft. Umgekehrt kann man sich mit der Bjerknes'schen Betrachtungsweise vorstellen, dass die Hervorbewegung der Wasser- und Lavaströme durch Solenoide in der Trennungsfläche zwischen denselben und der umgebenden Luft hervorgerufen wird.

Das Eigentümlichste bei den Luftbewegungen ist nun, dass die leichtbeweglichen Luftströme weit ähnlicher den schwerflüssigen Lavaströmen als den Wasserströmen sich verhalten. Die hohe runde Fronte des kalten Luftstromes bei Quarøy, der von den norwegischen Gebirgen herabfloss um über dem Meere sich auszubreiten, war der Fronte eines Lavaströmes weit mehr ähnlich als der eines Wasserstromes. Nur wenn man specifisch schweres Wasser unterhalb leichteren Wassers hervordringen lässt, wird man eine derartige Fronte auch beim Wasserströmen beobachten können. Aus diesen Umständen darf man den Schluss ziehen, dass je grösser der Widerstand gegen den Strom ist, und je kleiner die Kraft, die denselben hervortreibt, je stumpfer wird seine Fronte. Umgekehrt wird man aus der Stumpfheit der Fronte über das Verhältniss zwischen der Kraft, welche den Luftstrom hervortreibt und dem Widerstand gegen denselben schliessen können. Je stumpfer die Fronte, desto kleiner die hervortreibende Kraft, und desto geringfügiger die Anzahl der Solenoide.

Wenn ein kalter Luftstrom auf seinem Wege ein Becken des Geländes erreicht, entsteht ein Luftsee, gerade in derselben Weise wie ein Fluss, der einem Becken auf seinem Wege begegnet, einen Wassersee bildet. Bei Virijaur hatte ich gute Gelegenheit derartige kalte Luftseen zu studieren. Die Oberflächen derselben gerieten leicht in gewaltige *sechen*ähnliche Wellenbewegungen. Als der Luftsee wirklich still war, was auch manchmal vorkam, hatte ich gute Gelegenheit, die Ausströmung der Luft bei der Seemündung zu beobachten. Es ergab sich, dass die Luftbeschleunigung und die Luftgeschwindigkeit daselbst unerwartet geringfügig waren, offenbar eine Folge des geringen Dichteunterschiedes bei der Oberfläche. Das Ausleeren der Luftseen fand infolgedessen hauptsächlich durch die obengenannten Sechen statt.

Mächtigere Luftströme kümmerten sich wenig um die Bodentiefen des Geländes. Sie spülten über das ganze Gebiet, wobei die Becken nur als unbedeutende Unebenheiten des Bodens derselben erschienen.

Je mehr ich die Luftströme in dieser Weise beobachtete, je deutlicher wurde mir ihr Zweck. Dieser schien mir ganz einfach der zu sein, die verschiedenen Luftarten von den Stätten, wo sie produziert werden, nach anderen Orten, wo ihre Konsumtion stattfindet, zu versetzen. Das Hilfsmittel für diesen Transport bilden die schrägen Solenoidenflächen und das Endziel ist, die Luftversetzung so weit zu bringen, dass die Trennungsflächen dabei horizontal werden und die Luft stabil gelagert wird. Dann verschwinden die Solenoide und die Luftbewegung hört auf. Dieser nachgestrebte Zustand wird aber

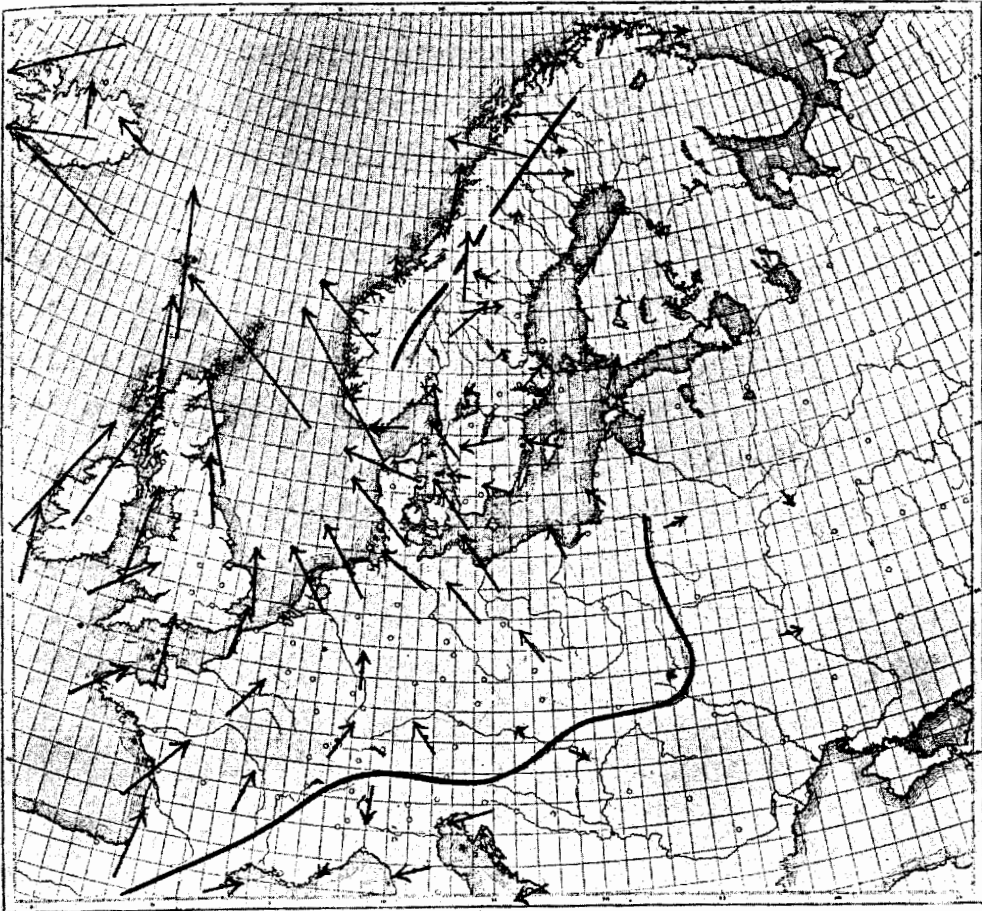


Abb. 13. Die mittlere Luftversetzung während Januar 1913. Die Pfeile zeigen die mittlere Luftversetzung in 24 Stunden im Masstabe der Karte an.

niemals erreicht, weil die Produktion und die Konsumtion der verschiedenen Luftarten immer stattfinden. Deshalb können die Winde auch niemals aufhören.

Um zu sehen, ob diese Regel auch bei grossen Luftbewegungen gültig bleibt, habe ich Karten der mittleren Luftversetzungen während einiger Monate gebildet. Diese Karten erhält man indem man die Vektorsummen der Luftversetzungen an den einzelnen Tagen bildet (was mit der Anwendung der Lambert'schen Formel gleichwertig ist.) Sie sind also wesentlich verschieden von den für die gewöhnlichen klimatischen Zwecke gezeichneten Karten, wo man die Häufigkeit der verschiedenen Windrichtungen darstellt.

Abb. 13 gibt ein Beispiel einer solchen Karte. Sie zeigt, wie die durch Abkühlung gebildete kalte Luft, von der Gegend ihrer Bildung, nach der Gegend, wo sie in warme Luft verwandelt wird, strömt. Die Luft kommt von einer Linie, deren Lage durch die Hochgebirge Pyreneen, Alpen und Karpaten bestimmt ist und von da aus die Wasserscheide zwischen der Ostsee und dem Schwarzen Meere zu folgen scheint, und weiter von einer Linie längs dem skandinavischen Gebirgsrücken. Der grösste Teil dieser Luft strömt nach dem warmen nordatlantischen Meere, aber ausserdem auch nach dem Mittelmeer und dem Schwarzen Meere.

Die Karte Abb. 13 ist nur nach den Morgenbeobachtungen konstruiert. Wenn auch eine Tagesperiode zu erwarten ist, so wird diese doch nicht so gross sein, dass eine nach Tagesmitteln konstruierte Karte wesentlich verschieden würde. Fälle, wo derartige Januar-karten ganz anders aussehen habe ich auch beobachtet, besonders Karten, wo die Luftbewegung mehr nach Osten gerichtet ist, wahrscheinlich eine Folge der Erddrehung. Ueber diese Frage werde ich später mehr Material vorlegen. So viel lässt sich aber schon jetzt behaupten, dass der hier reproduzierte Kartentypus häufig vorkommt. Die Luftbewegungen von derselben Art, die ich im Gebirge im Kleinen beobachtete dürfte demnach auch im grösseren Massstabe auftreten.

III. Die atmosphärischen Wärmemaschinen.

Unter den zahlreichen Erscheinungen, die ich im Gebirge beobachtete, war der Ausstrahlungswind die unbedingt wichtigste. Er

trat oft rein und ungemischt auf, denn wolkenlose windstille Nächte waren dort oben im Gebirge keine Seltenheit. Ich hatte also gute Gelegenheit die verschiedenen Phasen desselben zu studieren. Er fängt natürlich an den Berggipfeln an, daselbst ist es also windstill, aber schon 100 m unterhalb des Gipfels ist die Luftbewegung gut bemerkbar. Hier hält sich der Luftstrom ganz eng an der Schneeoberfläche, die Abkühlung der Luft scheint also durch direkte Berührung mit dem Schnee stattzufinden.

Die abgekühlte Luft strömt bergabwärts, wobei sie gerade den Bahnen des Regenwassers folgt. Sie sammelt sich also in den Bachtälern, wo der herabfliessende Luftstrom durch ständigen Zufluss von den beiden Seiten des Tales immer mächtiger wird. Dabei erreicht er oft eine so beträchtliche Geschwindigkeit, dass er den Schnee aufreisst, wodurch seine Bewegung von der Ferne aus wahrnehmbar wird. Dies ist besonders in den Morgenstunden nach stillen wolkenfreien kalten Nächten der Fall. Dabei sehen die unteren Teile der Bergseiten zottig aus, wodurch man einen deutlichen Begriff von den gewaltigen Luftmengen bekommt, die in dieser Weise herabgesandt werden.

Natürlich strahlt die ganze Oberfläche des Berges Wärme aus und wirkt abkühlend auf die Luft, die dieselbe berührt. Dem Luftstrom wird also während er sich abwärts bewegt immer Wärme entnommen. Seine Temperatur wächst deshalb langsamer als das adiabatische Gesetz verlangt. Nun kann der Fall vorliegen, dass die umgebende Atmosphäre sehr stabil gelagert ist, und zwar so sehr, dass die Temperatur der herabfliessenden Luft nur wenig unterhalb der der umgebenden Luft liegt. Dann wird selbst bei starker Ausstrahlung sehr wenig Luft herabströmen. Umgekehrt, wenn die umgebende Luft labil, d. h. adiabatisch gelagert ist, wird eine geringe Ausstrahlung genügen um grosse Luftmassen herabzusenden. Die Menge Luft die herabgesandt wird, ist also sehr vom Zustand der umgebenden Atmosphäre abhängig.

In den Fällen, wo grosse Luftmengen herabgesandt werden, wird natürlich die Unterseite des Luftstromes, die die Schneeoberfläche berührt, direkt abgekühlt. Die lebhaften Wirbeln im Luftstrom werden aber dafür sorgen, dass die Wärmeentnahme innerhalb desselben gleichmässig verteilt wird. An der äusseren Begrenzung des Luftstromes wird dieser aber Luft von der wärmeren Umgebung an sich reissen, die in denselben eingemischt wird. Der Massenzu-

wachs des Luftstromes dürfte hauptsächlich in dieser Weise stattfinden. Die Temperatur des Luftstromes wird aber dadurch erhöht, so dass also infolgedessen die Luft im Luftstrome von der umgebenden Luft wenig verschieden wird.

Durch diese Vorgänge muss eine Aspiration der umgebenden Luft gegen den Berg entstehen und weil die Atmosphäre immer etwas stabil gelagert ist, muss diese Aspiration hauptsächlich in der horizontalen Richtung stattfinden. Die Fläche, die dieses Aspirationsgebiet nach oben begrenzt, ist deshalb die horizontale Fläche, welche den Berggipfel tangiert, Abb. 14. Oberhalb dieser Fläche wird

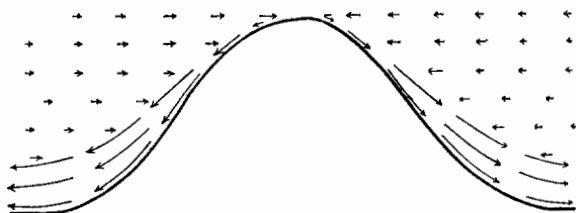


Abb. 14. Aspiration der Luft gegen einen Berg, der Wärme ausstrahlt.

keine Luft dem Gipfel zuströmen. Infolge der lebhaften Ventilation mit ständiger Zufuhr neuer Luft von Aussen wird die Temperatur am Berge trotz der starken Ausstrahlung nur wenig herabgesetzt. Es werden zwar grosse Luftmassen abgekühlt, die Temperaturerniedrigung ist aber unbedeutend. Nur wenn die umgebende Atmosphäre sehr stabil gelagert ist, so dass also die abgekühlte Luft nicht weiter bewegt werden kann, wird die Wärmeausstrahlung eine bemerkenswerte Temperaturerniedrigung hervorrufen können.

Die kalte Luft, die von den westlichsten Bergen des skandinavischen Gebirgsrückens in dieser Weise herabgesandt wird, kommt ja direkt in die norwegischen Täler, denen sie folgt, bis sie das Meer erreicht. Die Luft dagegen, die von den höheren östlicheren Gebirgen westwärts herabströmt, wird in der Regel zuerst Luftseen bilden, bevor sie die Schwellen der westlicheren Gebirge überschreitet, wonach sie längs den norwegischen Tälern nach dem Meere zu fliesst.

Was im skandinavischen Gebirge im Kleinen vorgeht, dürfte in grossem Massstabe auf dem europäischen Kontinente zu erwarten sein. Dass dies bisweilen auch der Fall sein kann, zeigt die Karte Abb. 13. Diese erlaubt uns noch eine grobe Schätzung der Luftmenge auszu-

führen, die von dem Kontinente nach den Meeren während des Winters strömen.

Es waren keine kleinen Luftmengen, die sich während Januar 1913 vom europäischen Kontinente nach dem nordatlantischen Meere versetzten. Wenn wir an der Karte, Abb. 13 eine Linie von Irland über Schottland und weiter an der norwegischen Küste entlang nordostwärts ziehen, und als erste Annäherung annehmen, dass der Luftstrom der diese Linie überquert 1 km. hoch reicht und innerhalb dieser Höhe die an der Erdoberfläche beobachtete Luftgeschwindigkeit im Durchschnitt besitzt, so erhalten wir eine hervorströmende Luftmasse von 5 Kubikkilometern d. h. 5,000,000 Tonnen in der Sekunde. Dies ist also die Grössenordnung des durchschnittlichen Betrages während des ganzen Monats Januar 1913 gewesen. An einigen Tagen und Tageszeiten war sie natürlich viel grösser, an anderen viel kleiner gewesen.

Wahrscheinlich strömt Ausstrahlungswind auch von anderen Gebirgen, wie Spitzbergen und Grönland dem nordatlantischen Golfstromgebiete zu. Auch in anderen Gebirgsgegenden dürfte in der kalten Jahreszeit solcher Wind auftreten. Der indische Wintermonsun und die Bora am Nordende des Adriatischen Meeres sind wahrscheinlich Ausstrahlungswinde. Die gewaltigsten Ausstrahlungswinde dürften aber an dem Rande des Südpolarcontinentes vorhanden sein. Die schwedische Südpolarexpedition, die 1902 und 1903 am Grahamsland überwinterte, musste daselbst wochenlang Stürme von 20 bis 35 meter in der Sekunde ertragen. Diese wehten immer von SW, also vom Inneren des Continentes her.¹

Es ist klar, dass der Ausstrahlungswind nur in hochgelegenen Gegenden und niemals an niedrig gelegenen Ebenen entstehen kann. Wohl wird die Luft im Tieflande abgekühlt, die so erschwerte Luft kann aber nirgendwo herabströmen. Sie bleibt liegen und wird dabei immer mehr abgekühlt. Die Winterkälte Sibiriens ist zwar durch Austrahlung entstanden, die so abgekühlte Luft bleibt aber liegen und ruft keinen Wind hervor.

Auch in Gebirgsgegenden wird wie früher erwähnt die Wärmeausstrahlung nicht unter allen Verhältnissen Wind erzeugen. Wenn die umgebende Atmosphäre sehr stabil gelagert ist, d. h. wenn die Temperaturabnahme mit der Höhe gering ist, wird die adiabatische

¹ O. NORDENSKJÖLD. Die swedische Südpolarexpedition 1902—1903.

Erwärmung des abwärtsfliessenden Luftstromes genügen um seine Temperatur über die der umgebenden Luft zu erhöhen. Er verliert mithin die Möglichkeit zu sinken, und seine Bewegung hört auf.

Wir wollen die Bedingungen für diese Stabilität der Atmosphäre untersuchen. Wenn kalte Luft sich in den Niederungen ansammelt, so wird der atmosphärische Zustand stabil, durch Erwärmung dieser kalten Luft von unten wird er wieder instabil. Wenn keine Wärmequellen im Meeresniveau und im Tieflande sich befänden, so würde die durch Ausstrahlung abgekühlte Luft sich in den Niederungen ansammeln und da bleiben. Die am meisten abgekühlte Luft würde sich nach unten hin verlegen und darüber die weniger abgekühlte. In dieser Weise müsste sich allmählich ein stilles, kaltes, sehr stabiles Luftmeer mit geringfügiger Temperaturabnahme mit der Höhe ausbilden, das allmählich bis zu den höchsten Gebirgsgipfeln hinaufreichen würde. In diesem Luftmeere könnten nur sehr schwache Austrahlungswinde entstehen. Durch diesen Umstand finden die geringfügigen unregelmässigen Luftversetzungen an der Ostseite des skandinavischen Gebirgsrückens an der Karte Abb. 13 ihre natürliche Erklärung.

Dieser Vorgang wird sehr deutlich durch den analogen bei dem Eisschmelzungsexperimente von Prof. O. Pettersson, Abb. 3, illustriert. Anfangs ist die Wasserbewegung sehr lebhaft, indem immer neue vom Eise abgekühlte Wassermengen heruntersinken. Diese bilden eine Bodenwasserschicht, die an Dicke immer wächst und schliesslich bis zum Eise hinaufreicht, wobei die Wasserbewegung allmählich abnimmt. Dann sinken nur sehr geringe stark abgekühlte Wassermengen herunter, und schliesslich hört die Bewegung ganz auf, trotzdem Eis zur Genüge vorhanden ist.

Wenn nun eine Wärmequelle z. B. eine elektrische Wärmecelle auf den Boden des Gefässes gelegt wird, so fängt das Wasser wieder an sich zu bewegen und zwar entsteht jetzt eine geschlossene Zirkulation, indem das Wasser über der Wärmequelle zur Oberfläche hinaufströmt, an der Oberfläche nach dem Eise sich bewegt, hier herabsinkt und dann längs dem Boden nach der Wärmequelle sich versetzt. Diese Zirkulation setzt so lange fort wie Wärme zugeführt wird und Eis vorhanden ist.

Aus diesem Versuche geht die Bedeutung der Wärmequellen im Meeresniveau in Verbindung mit den Kältequellen der Gebirge hervor. Sie erzeugen zusammen eine permanente Luftzirkulation indem die

Luft über den warmen Meeren erwärmt wird und in die Höhe steigt, sich daselbst nach den Gebirgen begiebt, wo sie abgekühlt und heruntergetrieben wird und dann als Ausstrahlungswind an dem Erdboden nach den warmen Meeren hin zurückkehrt.

In der Tat rufen diese Temperaturverhältnisse eine Druckverteilung hervor, welche eben eine derartige geschlossene Luftzirkulation erzeugen und erhalten muss. Wir können uns hier der bekannten Hann'schen Ueberlegung bedienen. Die Luft, die über den warmen Meeren hinaufsteigt, ist erwärmt und deshalb spezifisch leichter als die kalte schwere Ausstrahlungsluft, die bergabwärts fließt. Nun sind aber die vertikalen Abstände der isobaren Flächen in der Atmosphäre immer den absoluten Temperaturen proportional und also über dem Golfstrome weit grösser als im Gebirge. Daraus folgt ohne weiteres, dass an der Erdoberfläche der Druckgradient von den Gebirgen nach dem Golfstrome, in der Höhe aber entgegengesetzt gerichtet ist. Diese Druckgradienten treiben die untere Luft nach den Meeren und die höhere Luft nach den Gebirgen hin. Wenn wir die Karte Abb. 13 betrachten, müssen wir uns die daselbst dargestellte Luftbewegung an der Erdoberfläche durch eine andere Luftbewegung in der Höhe ergänzt denken, welche die Luft von dem Golfstrome nach den Gebirgen zurückführt, so dass ein geschlossener Kreislauf entsteht.

Bei diesem Kreislauf durchläuft die Luft einen Carnotschen Kreisprozess. Wenn wir nämlich die Zustandsänderungen, welche die Luft dabei erleidet in einem p v Diagramme einzeichnen, bekommen

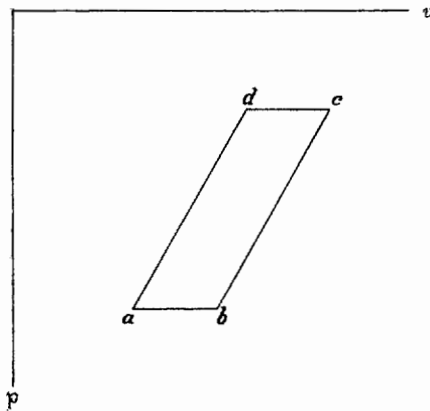


Abb. 15. Zustandsänderung der Luft bei dem Kreislauf derselben.

wir eine geschlossene Kurve, Abb. 15. In dieser Figur stellt das Kurvenstück a b die Erwärmung über dem Golfstrome dar, b c ist die adiabatische Veränderung der Luft bei ihrem Steigen in die Höhe, c d stellt die Abkühlung desselben im Gebirge und d a die adiabatische Veränderung des sinkenden Ausstrahlungswindes dar. Bei diesem Kreisproceß wird infolge der mechanischen Wärmetheorie eine gewisse Menge Wärme in Bewegungsenergie d. h. in Wind verwandelt. Diese in Wind verwandelte Wärme beträgt für einen vollen Umlauf der Luft $M \times A$, wo M die Masse in Grammen der cirkulierenden Luft und A den Flächeninhalt der geschlossenen Kurve der Abb. 15 bedeuten. Wenn T die Zeit in Sekunden, die für einen vollen Kreislauf erforderlich ist, so wird

$$E = \frac{M A}{T} \quad 1)$$

die in der Sekunde geleistete Bewegungsenergie. Der Quotient M/T ist aber nichts anderes als die Luftmasse, die in jeder Sekunde einen beliebigen Querschnitt des cirkulierenden Luftstromes durchströmt. Wenn wir diese mit m bezeichnen, so wird also

$$E = m A \quad 2)$$

Durch diese Formel wird E in C. G. S. Einheiten ausgedrückt, von denen $736 \cdot 10^7$ eine Pferdekraft bilden. Wenn P die Energieleistung in Pferdekraften bedeutet, so wird mithin

$$P = \frac{m A}{736 \cdot 10^7} \quad 3)$$

Bei atmosphärischen Vorgängen ist es vorteilhaft die hervorströmende Luftmenge in Tonnen für die Sekunde anstatt in Grammen für die Sekunde auszudrücken. Dann wird

$$P = \frac{N A}{7360} \quad 4)$$

wo also N Tonnen für die Sekunde bedeutet. Die Grösse A ist bei stationärer Luftbewegung nichts anders als die Anzahl der Bjerknes'schen Solenoide innerhalb des cirkulierenden Luftstromes. Der Flächeninhalt der geschlossenen Kurve der Abb. 15 ist nämlich durch das Integral

$$A = \int v dp. \quad 5)$$

gegeben und dies ist eben die Definitionsgleichung der Solenoidenanzahl.

Für die in der Karte Abb. 13 dargestellte Luftbewegung haben wir schon $N = 5 \cdot 10^6$ bekommen. Wenn wir annehmen, dass die

Luft am Golfstrome um 9° erwärmt wird bevor sie zu steigen anfängt, und dass sie in 3,000 m Höhe dem Gebirge zuströmt, erhalten wir $A=10^7$. Werden diese Werte in 4) eingesetzt, ergiebt sich

$$P=7.10^9 \text{ Pferdekkräfte}$$

Dies dürfte etwa die Grössenordnung für die Energieleistung der atmosphärischen Wärmemaschine sein, die sich im Winter zwischen dem Golfstrome und den europäischen Gebirgen etabliert.

Es sind demnach gewaltige Energiemengen, die bei solchen Luftzirkulationen zwischen den warmen Meeren und den kalten Gebirgen von Wärme in Windenergie verwandelt werden. Um diesen Kreislauf eingehender studieren zu können habe ich ihn experimentell nach dem Muster des Eisschmelzungsversuches von Prof. O. Pettersson dargestellt. Der Versuch wurde in einem Gefässe von 50 cm Länge, 50 cm Höhe und 5 cm Breite ausgeführt. Die zwei Seitenwände des Gefässes waren aus Glas, der Boden und die beiden Endwände aus Holz. Das Gefäss wurde mit Wasser gefüllt und darin eine Wärme- und eine Kältequelle hineingeführt, die nach denselben Principien gebaut waren wie die modernen Wärmeanlagen in unseren Wohnungen, also aus metallenen Cellensystemen bestehend, die von warmem bzw. kaltem Wasser durchströmt wurden. Die Zu- und Ableitungsröhre waren sorgfältig isoliert. Das Durchströmen des wärmenden bzw. kühlenden Wassers wurde von zwei Paar grossen hölzernen Tonnen von beträchtlicher Kapazität, die in verschiedener Höhe aufgestellt waren, besorgt. Nur kleine aber konstante Temperaturunterschiede wurden benutzt.

Wie bei allen Wärmeversuchen sind auch hier viele Vorsichtsmassregel erforderlich gewesen und der Versuch war sehr zeitraubend. Das Zimmer, in dem er stattfand, hatte Doppelfenster und sehr dicke Wände und wurde mit einem Ofen geheizt, der Tag und Nacht hindurch brannte, wodurch also die Zimmertemperatur sehr konstant blieb. Das Experimentgefäss war natürlich durch Schirme gegen strahlende Wärme geschützt. Anfangs wurde die Kältequelle höher gestellt als die Wärmequelle um die Verhältnisse den atmosphärischen so ähnlich wie möglich zu machen. Bevor das Experiment anfang, liess ich das Wasser im Gefässe ein Paar Tage stehen um die Zimmertemperatur genau anzunehmen und vollkommen still zu werden. Dann wurde warmes bzw. kaltes Wasser durch die metallenen Cellensysteme durchgelassen, so dass also die Wärme- und die Kältequelle in Tätigkeit kamen. Das Wasser fing sogleich an von

der Wärmequelle nach der Oberfläche hinaufzusteigen und von der Kältequelle nach dem Boden herabzusinken, Abb. 16. Das steigende

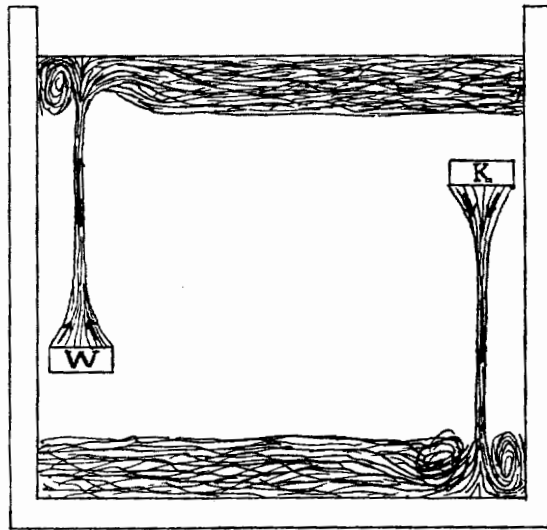


Abb. 16. Der Anfang des Versuches.

und das sinkende Wasser breitete sich an der Oberfläche bzw. am Boden in horizontalen Schichten aus, die an Dicke immer zunahmen, weil Wasser immer zugeführt wurde. Schliesslich wurde die Oberflächenschicht so dick, dass sie bis an die Kältequelle herunterreichte. Tiefer konnte sie nicht kommen, weil dann die Kältequelle anfang Wasser von derselben zu nehmen und herunterzusenden. Entsprechend verhielt sich die Bodenschicht. So bald sie an die Wärmequelle hinaufreichte, fing diese an, Wasser von derselben zu nehmen und hinaufzusenden. Jetzt fing das Wasser zwischen der Wärme- und der Kältequelle an zu cirkulieren und zwar zwischen den Horizontalflächen, welche die Oberseite der Kältequelle bzw. die Unterseite der Wärmequelle berührten. Es bildeten sich also drei Schichten aus, die stillstehende Oberflächenschicht, die cirkulierende Zwischenschicht und die stillstehende Bodenschicht. Noch konnten kleine von der Wärmequelle stammende Wassermengen in die Oberflächenschicht hinaufdringen, wobei die Kältequelle die entsprechende Wassermenge sogleich von derselben fortnahm. Das entsprechende fand natürlich auch mit der Bodenschicht statt. Bald wurden aber die Trennungsflächen zwischen den drei Schichten so ausgeprägt, dass kein Was-

sertransport mehr durch dieselben stattfand. Alle diese Vorgänge konnten leicht beobachtet werden, indem das Licht einer Bogenlampe durch das Gefäss hindurch auf ein weisses Tuch geworfen wurde. Die Wasserbewegungen traten dabei wegen verschiedener Lichtbrechung des Wassers verschiedener Temperatur sehr deutlich hervor.

Nun wurde Kaliumpermanganatlösung in der cirkulierenden Zwischenschicht hineingebracht. Sie wurde von der Wasserbewegung schnell herumgeführt, so dass ein geschlossener Streifen von gefärbtem Wasser entstand, siehe Abb. 17. Dann verbreitete sich die

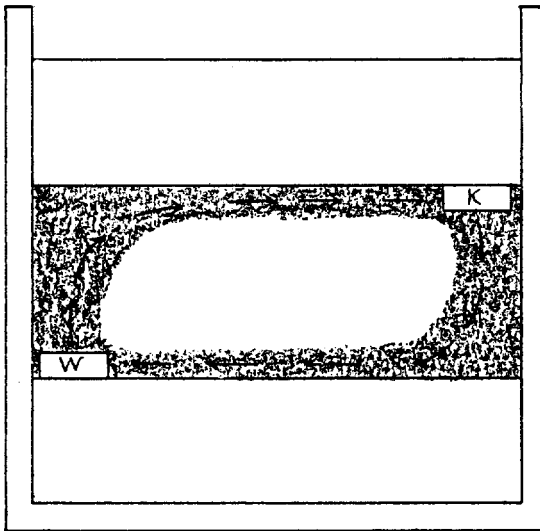


Abb. 17. Die Kaliumpermanganatlösung wurde von der Wasserbewegung schnell herumgeführt.

Farbe immer mehr auf Kosten des noch ungefärbten Gebietes innerhalb des geschlossenen Ringes, so dass schliesslich nur noch ein dünner Streifen übrig war, der sich in der Richtung von der Wärmequelle bis zur Kältequelle erstreckte, siehe Abb. 18. Dieser schräge Streifen wurde immer dünner und ging allmählich in eine Fläche über, die schliesslich verschwand, indem auch sie ganz durchgefärbt wurde. Die Schichtung des Wassers trat jetzt sehr scharf hervor, indem keine Farbe von der gefärbten Zwischenschicht in die Oberflächenschicht noch in die Bodenschicht hinüberwanderte. Diese blieben nämlich ganz ungefärbt. Die drei Schichten im Gefässe waren mithin von einander vollkommen isoliert.

Jetzt untersuchte ich die Temperaturverteilung im Gefässe indem ich ein kleines Thermometer an einem feinen Faden aufhängte und in verschiedenen Tiefen hineinsenkte und in situ durch die Glaswand des Gefässes ablesen konnte. Es ergab sich hierbei, dass die Bodenschicht die Temperatur der Kältequelle, und die Oberflächenschicht die Temperatur der Wärmequelle hatten. In der Zwischenschicht gab es zwei Temperaturen, das Wasser unterhalb des schrägen Streifens war nämlich kälter als das Wasser oberhalb desselben. Sowohl die beiden Grenzflächen als auch der schräge Streifen waren durch scharfe Temperatursprünge ausgezeichnet. In Temperaturhinsicht gab es also vier verschiedene Wasserschichten im Gefässe, die so aufeinander lagen, dass immer wärmeres Wasser auf kälterem lagerte.

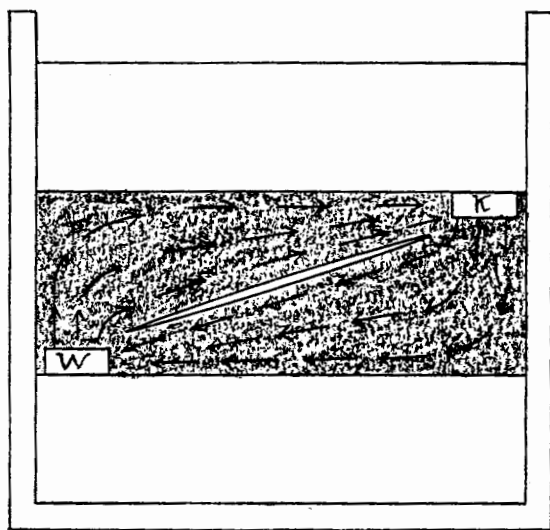


Abb. 18. Der schräge Streifen, der die Solenoide enthält.

Da die Dichte des Wassers nur von der Temperatur desselben abhängt, so muss es auch in Dichtehinsicht vier Wasserschichten im Gefässe geben, die so aufeinander gelagert sind, dass immer leichteres Wasser auf schwererem ruht. Wo die Temperatursprünge sind, da gibt es auch Dichtesprünge, d. h. da sind die isosteren Flächen versammelt. Drei solche Dichtesprünge giebt es im Gefäss, nämlich sowohl in den zwei Grenzflächen als in dem schrägen Streifen. In den zwei Grenzflächen verlaufen die isosteren Flächen horizontal,

d. h. parallel zu den ebenfalls horizontal verlaufenden isobaren Flächen. Die beiden Flächensysteme schneiden sich mithin nicht und bilden also keine Solenoide. Die geneigten isosteren Flächen in dem schrägen Streifen dagegen müssen die isobaren Flächen schneiden, wobei ein System von Solenoiden entsteht, das somit in dem schrägen Streifen enthalten ist. In diesem Streifen befindet sich also die Treibfeder der ganzen Wasserbewegung im Gefässe.

Wie oben beschrieben kann man den schrägen Streifen der Abb. 18 durch Färbung des zirkulierenden Wassers direkt wahrnehmbar machen. Indem die Färbung des Wassers fortschreitet wird er immer dünner und geht allmählich in eine Fläche über, die durch scharfen Temperatursprung gekennzeichnet ist. Sie ist die Gleitfläche zwischen den beiden Wasserströmen, dem unteren kalten und dem oberen warmen und sie enthält die Solenoide, während das umgebende Wasser Solenoidenfrei ist. Diese Fläche entspricht mithin ganz den atmosphärischen Trennungsflächen, die ich im Gebirge beobachtet hatte.

Der in Abb. 18 dargestellte Vorgang ist nichts anderes als eine Wärmemaschine, die Wärme in Bewegungsenergie verwandelt. Wenn wir dieselbe mit einer Dampfmaschine vergleichen wollen, so entspricht die Wärmequelle W dem Dampfkessel, die Kältequelle K dem Kondensor und die Solenoidenfläche der Dampfmaschine.

Aus diesem Versuch geht die Bedeutung der atmosphärischen Trennungsflächen zur Genüge hervor. Bei den gewaltigen atmosphärischen Wärmemaschinen entsprechen die warmen Meeresoberflächen, wo die Luft unter hohem Druck erwärmt wird dem Dampfkessel, die kalten Gebirge, wo die Luft unter geringem Druck abgekühlt wird, dem Kondensor, und die schrägen Trennungsflächen, welche die Bewegungsenergie erzeugen, der Dampfmaschine.

Natürlich muss man auf dem gewaltigen Unterschiede der äusseren Bedingungen bei dem idealen Experimente und bei den tatsächlichen atmosphärischen Erscheinungen aufmerksam sein. Verhältnissmässig klein bleibt noch der Unterschied wenn es sich um die lokalen Verhältnissen in dem Gebirge handelt, und daselbst kann man deshalb leicht genug die Uebereinstimmung in grossen Zügen nachweisen. Obgleich ich auf meiner Reise keine Drachen oder sonstige Mittel zur Verfügung hatte um die Verhältnisse in der Höhe direkt zu untersuchen gab es jedoch Anzeichen genug um diese Uebereinstimmung zu bestätigen. Während meines Herumstreifens

im Gebirge hatte ich gute Gelegenheit die Wolken zu beobachten und deren Bewegungen mit der Luftbewegung an der Erdoberfläche zu vergleichen. Auch während des Stillbleibens in Parvas Hütte konnte ich manchmal die Wolkenbewegungen durch das Rauchloch der Hütte oder am Monde vorbei beobachten, Gelegenheiten die ich immer benutzte. Es zeigte sich dabei, dass die Wolkenbewegung im Verhältniss zu der Luftbewegung an der Erdoberfläche beinahe immer ostwärts gerichtet war, und zwar unabhängig von der absoluten Bewegung, also selbst wenn die Wolken still standen oder sogar westwärts sich bewegten.

Diese relative Luftbewegung, die ja mit der in Abb. 18 vorausgesetzten in Einklang steht, kam auch in den Wolkenformen zum Vorschein, indem diese von Norden oder Süden gesehen sehr oft rhombisch aussahen, und zwar immer in der Weise, dass ihre Oberseite im Verhältniss zu der Unterseite nach Osten hin ausgezogen war.

Die untere Luft wehte demnach überwiegend nach W, die obere dagegen überwiegend nach E. Dass die untere Luft kalt und trocken war, ergab sich immer in sehr fühlbarer Weise. Die Eisspritzung auf Allatjåkko und der Bergnebel auf Sulitjelma Abb. 7 und 9 bewiesen andererseits zur Genüge dass die obere ostwärtsziehende Luft warm und feucht war. Auch die scharfen Trennungsflächen zwischen den beiden Luftströmen konnte ich bisweilen direkt beobachten, siehe Abb. 2 und 9. Es darf deshalb als bestätigt angesehen werden, dass es, gerade wie die obige thermische Theorie fordert, im Gebirge in der Regel zwei Luftströme gab, ein unterer westwärtsziehender aus kälterer trockener Luft und ein oberer ostwärtsziehender aus warmer feuchter Luft, die von einer Trennungsfläche in etwa 1200 Meter Höhe getrennt waren.

Bei Altenfjord im nördlichen Norwegen ist auf einem 900 m hohen Berggipfel ein meteorologisches Observatorium Haldde eingerichtet, und neben demselben am Meeresniveau befindet sich eine meteorologische Station Bosekop, die gleichzeitige Beobachtungen mit Haldde ausführt. Der Vorsteher dieses Stationspaares Dr. O. Krogness hat mir freundlichst einige Daten von den zwei Beobachtungsstationen mitgeteilt, die das Vorhandensein einer Trennungsfläche deutlich genug beweisen. Am Meeresniveau weht im Winter vorherrschend sydöstlicher Wind vom Land nach dem Meer hinaus, in 900 m Höhe dagegen nordwestlicher Wind vom Meer gegen das Land

hin. Gleichzeitig ist die Temperatur beträchtlich höher am Berge als am Meeresniveau, was sehr bemerkenswert ist, weil ja sonst die Temperatur mit der Höhe abzunehmen pflegt. Die Sache lässt sich nur dadurch erklären, dass eine Solenoidfläche hier unterhalb 900 m Meereshöhe verläuft.

So klar liegen die Verhältnisse natürlich nicht bei den grossen Bewegungen zwischen dem europäischen Kontinente und dem umgebenden warmen Meere. Hier darf man natürlich nicht auf eine einzige zusammenhängende immer bestehende und ruhig bleibende Trennungsfläche rechnen. Im Gegenteil wird sie von den unregelmässigen atmosphärischen Erscheinungen oft gerissen, in Wellenbewegung gebracht u. s. w. Aber Anzeichen des Vorhandenseins eines einzigen oder mehrerer gleichzeitig auftretenden Flächen dieser Art, vielleicht von verschiedenen Gebirgen herrührend, begegnet man häufig. Bei den Drachenfahrten in Vassijaure und auf Jylland haben sich wahrscheinlich solche Trennungsflächen kenntlich gemacht. Die Drachen konnten nämlich in der Regel eine gewisse Höhe nicht leicht überschreiten, weil es daselbst windstill war. Es war gerade wie eine Decke in der Atmosphäre vorhanden, welche die Drachen nicht durchdringen konnten. Diese Decke scheint auf die Existenz einer solchen Trennungsfläche zu deuten. Denn weil die Luft an den beiden Seiten dieser Fläche in entgegengesetzter Richtung wehte, muss sie in der Fläche selbst stillstehend gewesen sein.

Vor allem sind aber hier die Temperaturinversionen zu erwähnen, die nach den modernen aerologischen Beobachtungen so häufig in der freien Atmosphäre auftreten. Dass die an einigen Stationen beobachteten Inversionen oft ausgedehnten Schichten angehören, hat H. U. Sverdrup nachgewiesen.¹ Natürlich können die Inversionen in anderer Weise als oben beschrieben entstehen. Aber auf dieser Erklärung ihrer Entstehung muss man auch aufmerksam sein. Sehr beachtenswert ist hierbei die Tatsache, dass sie in Europa fast ausnahmslos unterhalb des Niveaus des Alpenrückens vorkommen, wie es mit den in dieser Weise gebildeten Inversionen der Fall sein muss. Als Beispiel sei auf die Abb. 19 hingewiesen, welche die Temperaturkurven der Lindenberger Registrierballonaufstiege für das Jahr 1913 enthält. Es ergibt sich, dass derartige Knicke oft

¹ H. U. SVERDRUP. Ausgedehnte Inversionsschichten in der freien Atmosphäre. Veröffentlichungen des geophysischen Instituts der Universität Leipzig. Leipzig 1914.

und stark ausgeprägt unterhalb 3,000 m. Höhe, also unterhalb der Gipfel der Alpen, wie es das Experiment Abb. 18 eben verlangt, auftreten. Oberhalb dieser Höhe sind beinahe keine Inversionen in der Troposphäre vorhanden.

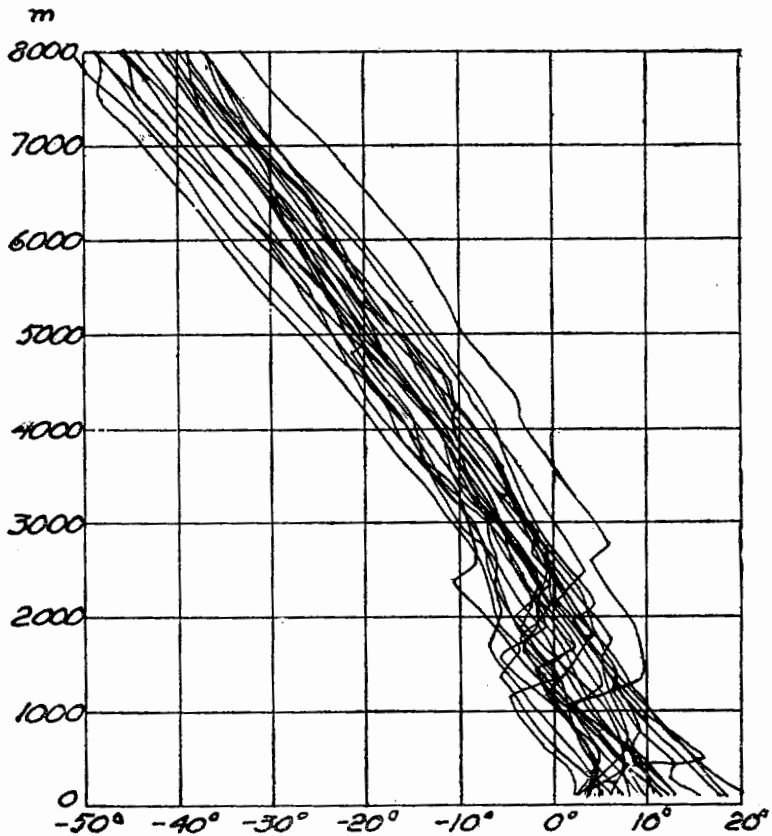


Abb. 19. Temperaturkurven der Registirballonaufstige bei Lindenberg für das Jahr 1913.

Wir kehren aber zum Experimente zurück. Die Versuchsbedingungen wurden nunmehr dadurch verändert, dass die Kältequelle etwas nach unten versetzt wurde, Abb. 20 b. Die Mächtigkeit der Oberflächenschicht wuchs dabei, indem sie aufsteigendes warmes Wasser von der Wärmequelle aufnahm. Der Zuwachs ging so weit, bis die Schicht an die Oberseite der Kältequelle wieder herunterreichte. Dann stellte sich der frühere Bewegungszustand wieder ein,

nur war die zirkulierende Zwischenschicht dabei natürlich weniger mächtig geworden. Auch hatte ihre Cirkulation abgenommen, eine natürliche Folge der verminderten Anzahl der Solenoide, indem die schräge Fläche jetzt eine kleinere Anzahl der isobaren Flächen als früher schnitt.

Nun wurde die Kältequelle in dieselbe Höhe wie die Wärmequelle versetzt. Die Oberflächenschicht wuchs dabei noch mehr auf Kosten der zirkulierenden Zwischenschicht. Abb. 20 c. Zwischen der Wärme- und der Kältequelle war eine sehr geringfügige Wassercirkulation vorhanden.

Noch wurde die Kältequelle etwas herunterversetzt, und zwar so viel, dass sich die Oberkante der Kältequelle in gleicher Höhe mit der Unterkante der Wärmequelle befand. Abb. 20 d. Die Zwischenschicht ging jetzt in eine Fläche über und die Bewegung des Wassers hörte vollständig auf. Das Wasser unterhalb dieses Niveaus hatte die Temperatur der Kältequelle, das Wasser oberhalb desselben die Temperatur der Wärmequelle.

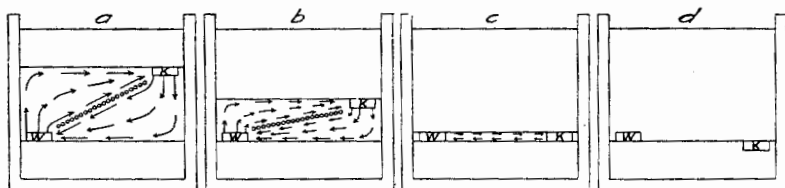
Als die Kältequelle noch mehr herunterversetzt wurde, blieb das Wasser still. Unterhalb der Kältequelle hatte es die Temperatur derselben, oberhalb der Wärmequelle ihre Temperatur. Zwischen der Wärmequelle und der Kältequelle gab es eine Übergangsschicht worin das Wasser sehr stabil gelagert war.

Es sei hier nochmals hervorgehoben, dass diese Bewegungsvorgänge nur solche sind, welche auftreten, wenn der Zustand stationär geworden ist. Im Anfang jedes Versuches sind die Bewegungen weit verwickelter. Siehe Abb. 16. Dabei gerät das Wasser in Bewegung selbst wenn die Kältequelle unterhalb der Wärmequelle sich befindet aber bald genug hört diese Bewegung vollständig auf. Erwärmung und Abkühlung werden mithin immer Luftströme in der Atmosphäre herbeirufen, diese verschwinden aber allmählich, wenn die Abkühlung tiefer als die Erwärmung stattfindet. Findet dagegen die Abkühlung höher als die Erwärmung statt, so geht die Bewegung allmählich in eine stationäre geschlossene Cirkulation über, die so lange dauert als Wärme zugeführt bzw. entnommen wird.

Aus den Versuchen geht mithin hervor, dass die grossen atmosphärischen Wärmemaschinen, um so mehr Wind erzeugen je höher die Kältequellen im Verhältnis zu den Wärmequellen gelegen sind. Deshalb erzeugen die hochgelegenen Eisflächen Grönlands und des Südpolarkontinentes in Verbindung mit den naheliegenden warmen

DIE ATMOSPHERISCHEN WÄRMEMASCHINEN

Cirkulationsversuche



Schematische Darstellung einer einfachen atmosphärischen Wärmemaschine.

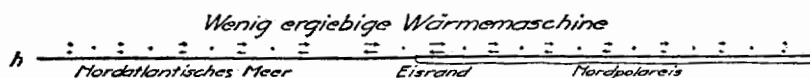
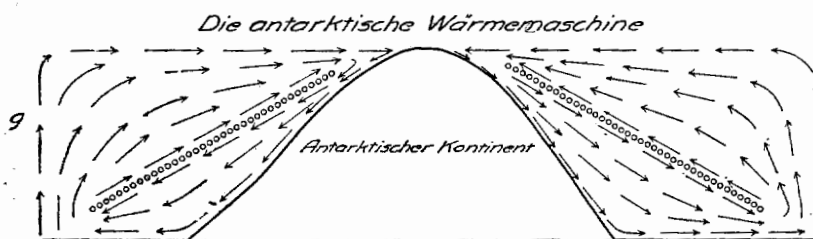
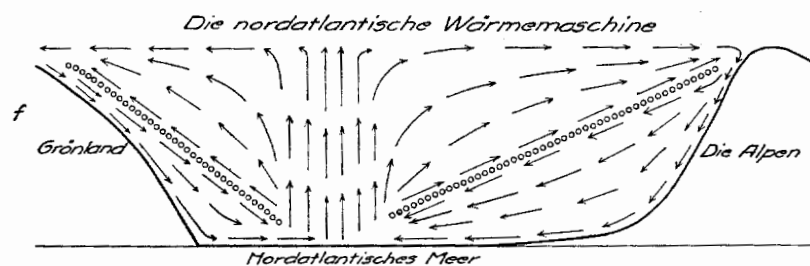
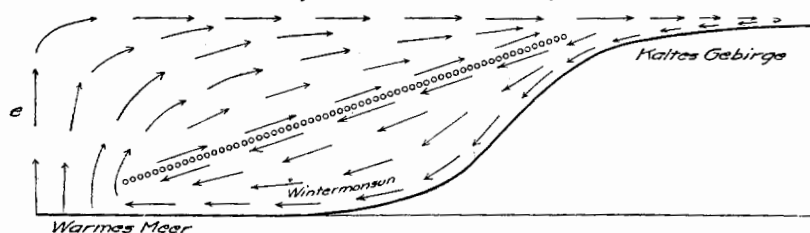


Abb. 20.

Meeren sehr viel Luftbewegung, während z. B. die niedrige Kältequelle Sibiriens geringfügigere Winde hervorzubringen vermag, obgleich sie kalt genug ist. Auch ist die Temperatur des Nordpolargebietes im Winter sehr niedrig im Vergleich zu der der südlicheren Meere und doch wird von diesem grossen Temperaturunterschied wenig Wind hervorgerufen, siehe Abb. 20 h, weil in diesem Falle die Wärme- und die Kältequelle in derselben Höhe sich befinden.

Die Ursache dieses Verhaltens wird sogleich klar, wenn wir das Carnot'sche Diagram Abb. 15 betrachten. Eine atmosphärische Abkühlung muss offenbar unter niedrigerem Druck als die Erwärmung stattfinden, wenn überhaupt Bewegungsenergie erzeugt werden soll. Je grösser der Druckunterschied, desto grösser wird der Flächeninhalt der geschlossenen Kurve und damit die erzeugte Bewegungsenergie. Wenn dagegen die Erwärmung und die Abkühlung unter demselben Drucke stattfinden, geht die geschlossene Kurve in eine Doppellinie über, die keine Fläche einschliesst. Es wird also hierbei keine Bewegungsenergie erzeugt.

Die atmosphärischen Wärmemaschinen verhalten sich in dieser Hinsicht gewissermassen wie die Dampfmaschinen. Auch bei diesen muss die Erwärmung unter grösserem Drucke als die Abkühlung geschehen. Je grösser der Druckunterschied zwischen Dampfkessel und Kondensor, je mehr leistet die Maschine. Je höher die kalten Gebirge über den warmen Meeren, desto windiger die Atmosphäre.

Ueberall wo hochgelegene kalte Gebiete neben warmen Meeren gelegen sind, wird also das Wetter stürmisch sein. Und zwar wird die an den warmen Meeresoberflächen erwärmte Luft in die Höhe steigen, daselbst nach den Gebirgen wandern, hier abgekühlt werden und dem Erdboden folgend nach dem Meere zurücksinken. Der nordatlantische Golfstrom befindet sich z. B. in der Mitte eines grossen Kreises von Gebirgen, Pyrenen, Alpen, Kaukasus, Ural, Spitzbergen und Grönland. Dieses ganze ringförmige Gebirgssystem kann mit einem Kochtopf verglichen werden, den man auf das Feuer setzt. Dieser wird in der Mitte des Bodens aufgewärmt, die Seitenwänden wirken aber abkühlend. Infolge dieser Temperaturverteilung fängt das Wasser im Topfe an zu cirkulieren und zwar in der Weise, dass es in der Mitte nach der Oberfläche hin aufsteigt, und dann in der Oberfläche von der Mitte nach den Seiten hin radiell ausströmt. An den Seiten wird es abgekühlt, sinkt herunter und strömt, dem Boden folgend, der Mitte zu, wo es wieder erwärmt wird und den

Kreislauf wiederholt. Was hier im Kleinen geschieht, wiederholt sich in grossem Maasstabe innerhalb des obengenannten Gebirgsringes mit dem warmen Golfstrom in der Mitte. Siehe Abb. 20 f.

Eine andere Anordnung kommt im Südpolargebiete vor. Abb. 20 g. Hier befindet sich die hochgelegene Kältequelle, das eisbedeckte Südpolarplateau, in der Mitte und die niedriger gelegene Wärmequelle, nämlich das warme Meer, rings herum. Auch hier wird infolge Abb. 20 a die über dem Meere erwärmte Luft in die Höhe steigen und in der Höhe nach dem Kontinente hin einströmen, wo sie das grosse Binnenland mit ihrer Feuchtigkeit speist und dabei abgekühlt wird, um dann als kalte trockene Luft längs dem Eisboden nach dem Meere zurückzukehren. Aus der Gegend, wo sich dieser Vorgang abspielt, besitzt man natürlich noch weniger Beobachtungen als von der vom Golfstrom hervorgerufenen europäischen Luftcirculation, aber die ausserordentlich beharrlichen kalten Stürme, welche die schwedische Südpolarexpedition in den antarktischen Wintern 1902—03 auf Grahams Land auszustehen hatte, zeigen wenigstens, dass in niedrigeren Gegenden kalte trockene Luft in unerhörten Mengen vom Inneren des Kontinentes nach dem Meere hin ausströmt. Diese davonströmende Luft muss doch durch Einströmung in grösseren Höhen ersetzt werden.

Ueberall wo hohe Küstengebirgsketten vorhanden sind, und diese topographische Eigenheit ist ja keineswegs selten, muss in der kalten Jahreszeit eine Tendenz zur Luftcirculation nach dem Vorbilde der Abb. 20 a sich geltend machen siehe Abb. 20 e. Die indische Wintermonsune ist eine derartige Luftcirculation zwischen den Himalayagebirgen und dem indischen Meere.

Uns interessieren aber am meisten die europäischen Verhältnisse. Aus den obigen Darlegungen ist ersichtlich, dass die Bewegungsenergie unserer Winterstürme sowohl von der Temperaturdifferenz als von der Höhendifferenz des Landes und des Meeres abhängen. Der atmosphärische Mechanismus, bei dem die Bewegungsenergie erzeugt wird, ist uns auch klar, und durch die Abb 18 dargestellt. Das Studium dieses Mechanismus scheint nicht nur für die interessanten dynamischen Eigenschaften desselben sondern auch für die Wetterprognosen von Bedeutung zu sein. Denn die Witterung steht offenbar in enger Beziehung zu demselben. Wenn die Sprungflächen gut entwickelt sind, muss es stürmisches, niederschlagreiches Wetter werden, sind sie dagegen unentwickelt,

wird das Wetter stiller und trockener. Auch die Lufttemperatur muss von diesem Luftaustausch zwischen den warmen Meeren und den kalten Gebirgen sehr beeinflusst werden. Für dieses Studium genügen die meteorologischen Stationen, die für den gegenwärtigen Wetterdienst eingerichtet sind, leider nicht, und zwar weil sie die Verhältnisse nur am Erdboden angeben, während die Vorgänge, welche die atmosphärische Bewegungsenergie erschaffen, drei Dimensionen bedürfen. Glücklicherweise brauchen die neuen Beobachtungsanordnungen nicht besonders umständlich zu sein. Für dieselben kann das Stationspaar Haldde-Bossekop als Muster dienen. Derartige Stationspaare könnten leicht an den Färöern, in Schottland und im südlichen Norwegen sowie anderswo an der bergigen norwegischen Küste und in Nordschweden eingerichtet werden. Dann kommen aeronautische Beobachtungen in Südengland, Frankreich, Deutschland sowie in Schweden, Finland und Russland und schliesslich Gebirgsbeobachtungen in den Alpen in Betracht. Von diesem Stationsnetze ist ja das meiste schon vorhanden, es sind nur einige einfache Ergänzungen noch nötig. Die Aufgabe dieser Stationen wäre zunächst das Auftreten und Verschwinden der Sprungflächen zu studieren, ihre Eigenschaften festzulegen, das Material für ihre kartographische Darstellung zu liefern u. s. w. Das jetzt betriebene Studium der Abhängigkeit des Windes von der Luftdruckverteilung im Meeresniveau würde man dann imstande sein in wertvoller Weise zu ergänzen.

IV. Die geologischen Klimate.

Bei näherem Nachsinnen findet man, dass die Rolle, welche der Wind für die Erde und das Leben auf derselben spielt, von fundamentaler Bedeutung ist. Ohne Wind könnten keine Wolken über Land geführt werden, kein Niederschlag würde auf den Erdboden fallen, keine Flüsse würden vorhanden sein. Die Gebirge würden wohl infolge der starken Sonnenstrahlung verwittern, aber weder Flüsse noch Wind transportierten das Verwitterungsmaterial fort. Die Erdoberfläche bekäme also ohne Wind ein ganz anderes Aussehen als sie jetzt hat. Auch für das organische Leben wäre die Abwesenheit des Windes verhängnissvoll. Pflanzen und Tiere würden

wohl im Meere leben können, auf der absolut trockenen Erdoberfläche wäre dies aber unmöglich. Ohne Wind wäre der Mensch auf der Erde undenkbar.

Ein solcher Zustand würde obwalten, wenn die Erhebungen und Vertiefungen der Erdoberfläche nicht vorhanden wären. Dann befänden sich die Wärmequellen und die Kältequellen der Atmosphäre in derselben Höhe und könnten also nur wenig Bewegungsenergie erzeugen.

So eben ist zwar die Erdoberfläche niemals gewesen, aber in gewissen langen Ruheperioden ihres Daseins sind doch die Gebirge so weit forterodiert worden, dass nur kleinere Reste derselben übrig waren. Das mesozoische Zeitalter war eine derartige Ruhezeit. Besonders in den späteren Abschnitten derselben, die Jura und die Kreidezeit, müssen die Erhebungen der Erdoberfläche grösstenteils abgenützt gewesen sein. Ja selbst in der Triaszeit mag das Klima trocken gewesen sein, denn die Gebirge sind sehr vergängliche Gebilde des Anlitzes der Erde. In diesem langen Zeitraum war also das Klima windstill und wüstenartig.

Andere geologische Zeiten wie die Permzeit und die Quartärzeit waren durch grosse Unebenheiten der Erdoberfläche gekennzeichnet. Damals wurden die atmosphärischen Wärmemaschinen in starke Tätigkeit versetzt und also das Wetter windig und feucht.

Auch die Lufttemperatur muss von der Unebenheit der Erdoberfläche abhängig gewesen sein. Die kältesten Perioden fallen nämlich nach Ramsay¹ mit den Zeiten zusammen, in denen die Berge und Landmassen ihre grössten Höhen erreichten, während die wärmsten Perioden den Zeiten von grösster Denivellierung des Reliefs entsprechen.

Die Ursache dieser Abhängigkeit der Lufttemperatur von dem Erdrelief ist offenbar in dem Umstand zu suchen, dass die Gebirge als Kältequellen der Atmosphäre auftreten. Wenn diese Kältequellen fehlen, muss das Klima wärmer sein als wenn sie vorhanden sind. Dies wird auch von Ramsay hervorgehoben. Er vergleicht die Wirkungen der Atmosphäre mit denen des Glases eines Treibhauses, indem sie die die Erde erreichenden leuchtenden Strahlen verhältnissmässig wenig geschwächt durchgehen lässt, aber für die

¹ W. RAMSAY. Orogenesis und Klima. Öfversigt af Finska Vetenskaps-Societens Förhandlingar LII. Afd. A N:o 11. Helsingfors 1910.

von der Erde ausgesandten dunklen Strahlen wenig diatherman ist. Im Anschluss zu diesem Bilde können dann die aufragenden Partien der Erdoberfläche mit Löchern im Glase des Treibhauses verglichen werden. Diese lassen nicht nur von den gerade unter ihnen befindlichen Stellen Wärme abgehen, sondern tragen zur Abkühlung des ganzen Hauses bei. Auf dieselbe Weise werden die grösseren Wärmeverluste der höherliegenden Gegenden auf der ganzen Erde fühlbar. Je grösser die Höhe und die Anzahl solcher Ausstrahlungsstellen sind, und je schroffer die Unterschiede zwischen hoch und niedrig, um so kälter wird der äussere thermische Zustand der Erde.

Mehrere der geologischen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Vorgänge, welche die Erde umgestalten, sich periodisch abgelöst haben. Nach W. Ramsay¹ sind seit dem Beginn der Kambrischen Zeit drei solche geologische Zyklen vollendet und ein vierter begonnen. Die Grenzen zwischen ihnen liegen bei den Diskordanzen, welche auf die kaledonischen, herzynischen und alpinischen Gebirgsfaltungen und Erdkrustenbewegungen folgen. Diese grossen Zyklen sind:

Zyklus	Erster (ruhiger) Teil	Zweiter (unruhiger) Teil	Hauptgebirgsbildung
I	Eokambrium-Kambrium-Ordovizium	Gothlandium	Kaledonisch
II	Devon-Unterkarbon	Oberkarbon	Herzynisch
III	Perm-Trias-Jura	Kreide-Tertiär	Alpinisch
IV	Quartär		

Folgende Zeiten sind nach W. Ramsay kalt gewesen.

- 1) Die eokambrische Zeit.
- 2) Irgend eine devonische Epoche, wahrscheinlich eodevonisch.
- 3) Epochen an der Wende zwischen der Karbon- und der Permperiode, nämlich die Uralperiode oder eine eopermische Periode oder beide.

4) Die Quartärzeit und die Gegenwart, mit Beginn von miothermen Verhältnissen schon in der Pliozänepoche.

Alle übrigen Perioden waren warm.

Die Eiszeiten sind mithin immer bei Anfang der Zyklen aufgetreten, also gleich nach den grossen Gebirgsfaltungen. Die Dauer der

¹ l. c. P. 3.

Eiszeiten sind im Vergleich mit den zwischenliegenden warmen Zeiten verhältnissmässig kurz gewesen.

Die geologischen Klimate stehen mithin, insofern man sie von den Ueberbleibseln der vergangenen Zeiten kennt, in direktem Zusammenhang mit dem Relief der Erdoberfläche. Der Anfang der Zyklen, wo die Gebirgsfaltungen eben beendet waren und also die Gebirge ihre höchsten Höhen erreichten, waren durch Eiszeiten gekennzeichnet. Wenn dann die Gebirge durch Erosion abgenützt wurden, herrschte warmes Wüstenklima.

Während der langen warmen ruhigen Phase der geologischen Zyklen dürfte das Meerwasser eine verhältnissmässig hohe Temperatur erreichen. So bald das Polareis fortgeschmolzen war, sorgten die bis hohen Breiten reichenden warmen Meeresströme für ein beträchtliches Ausgleichen der Temperatur der Meere und der Küstenländer, so dass ihr Klima mit der Breite sich wenig änderte. Weil die Erhebungen der Erdoberfläche nicht ganz fehlten, wehte es noch etwas in den Küstengebieten, so dass hier ein maritimes Klima mit üppiger aber wahrscheinlich niedriggewachsener Flora entstand. Die ruhigen Verhältnisse mit dem reichen Vorrat an Futter begünstigten die Entwicklung von grossen Tierformen, und das stille, schöne Wetter sowie die langgestreckten Futterplätze die Entwicklung der Flugfertigkeit der Tiere.

Im Inneren der Kontinente dürfte dagegen in dieser Zeit Wüstenklima herrschen und zwar weil die geringfügige Luftbewegung nur unbedeutende Wassermengen von den umgebenden Meeren nach diesen Gebieten hinübertragen konnte. Eine grosse meteorologische Verschiedenheit zwischen diesem Klima und dem in den gegenwärtigen Wüsten vorhandenen gab es aber, denn die gegenwärtigen Wüsten sind durch herabsinkende Luftströme, jene aber waren durch Windstille verursacht. Die beträchtliche adiabatische Erwärmung der Luft, die unsere Wüsten so heiss und trocken machen, waren also bei jenen nicht vorhanden. Sie dürften also nicht so warm wie die gegenwärtigen Wüsten gewesen sein. Wenn wir uns Sibirien noch niederschlagsarmer und windstiller als jetzt vorstellen, würden wir wahrscheinlich ein Klima bekommen, das dem mesozoischen Binnenlandsklima in den hohen Breiten gewissermassen entspräche.

Zu Anfang der grossen Gebirgsbildungen fing es an zwischen den jetzt sehr warmen Meeren und den neugebildeten Bergen zu wehen. Diese Winde waren sehr warm und feucht und riefen deshalb reichli-

chen Niederschlag und üppiges Wachstum hervor am Lande, das sie hinüberwehten. Die Wüsten verschwanden und das Klima bekam einen warmen und gleichförmigen Charakter über der ganzen Erde. Für die Pflanzen war eine paradiesische Zeit aufgegangen und auch für solche Tiere, die sich den neuen Verhältnissen anpassen konnten. Aber manche Tierformen, die an den älteren ruhigen Verhältnissen gewöhnt waren, konnten die neuen unruhigen nicht aushalten.

Inzwischen setzte die Gebirgsbildung fort und die abkühlende Wirkung derselben fing an sich geltend zu machen. Es wurde immer windiger und kälter. Das Oberflächenwasser der Meere wurde durch diese Winde seiner Wärme beraubt, so dass der Meerboden sehr schnell von einer kalten Bodenwasserschicht bedeckt wurde. Diese wurde immer dicker und die oberliegende warme Meerwasserschicht immer dünner. Schliesslich war das ganze Meer durchgeköhlt. Mehrere der marinen Tierformen starben dabei aus, so dass also die Fauna artenärmer als früher wurde.

Hier muss die grosse Rolle, welche die Kohlensäure bei diesen Klimaänderungen gespielt hat, hervorgehoben werden. Die Meere enthalten ja unvergleichlich mehr von diesem Gase als die Atmosphäre. Auch ist die Berührungsfläche zwischen der Atmosphäre und dem Meere gross genug um Gleichgewicht des Kohlensäuregehaltes sehr bald zu Stande zu bringen. Wenn das Meerwasser erwärmt wird verliert es den grössten Teil seines Absorptionsvermögens und liefert deshalb gewaltige Mengen Kohlensäure in die Atmosphäre ab. Diese muss mithin in den warmen Zeiten sehr reich an Kohlensäure gewesen sein. Die Kohlensäure wirkt aber nach Arrhenius¹ in der Atmosphäre wie das Glas eines Treibhauses, indem sie die dunklen Wärmestrahlen zurückhält, so dass die hellen Sonnenstrahlen wohl die Erdoberfläche erreichen können, die dunkle Wärme aber nicht davon ausstrahlen kann. Dieser Umstand muss zu hoher Lufttemperatur und Gleichmässigkeit des Klimas sowie Unabhängigkeit desselben von der geographischen Breite in hohem Grade beigetragen haben. Sobald das Meer dagegen abgekühlt wird, absorbiert es den grössten Teil der Kohlensäure der Atmosphäre, diese wird also sehr kohlensäurearm und die dunkle Wärme strahlt unbehindert aus der Erde in den Welt-raum hinaus. Die Lufttemperatur wird niedrig und die Temperatur-

¹ ARRHENIUS, S. On the influence of the carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, Phil. Mag. 5. Ser. V. 41.

gegensätze zwischen Tag und Nacht, Sommer und Winter, Äquator und Pol werden sehr stark ausgeprägt.

Als die Gebirge am höchsten wurden, waren auch die Stürme am heftigsten. Der Wind trug dabei gewaltige Wassermengen als Dampf vom Meere über das Land hin. Der Niederschlag war also immer sehr beträchtlich, obgleich die kältere Luft weniger Feuchtigkeit pro kbm als die frühere warme enthielt. Das Klima war jetzt sehr günstig für die Bildung von Gletschern und Binneneis. Für die Pflanzen und Tiere wurde dies eine ernste Prüfungszeit. Mehrere derselben gingen unter, aber diejenigen, die sich hindurchkämpften, wurden veredelt. In der permischen Eiszeit entstanden die ersten warmblütigen Tiere und in der quartären die Menschen.

Als danach die Degradation der Gebirge anfang sich geltend zu machen, stieg die Temperatur wieder, aber das Klima war jedoch sehr verschieden von dem, das bei den gleichen Reliefverhältnissen bei dem Entstehen der Gebirge herrschte. Dabei war nämlich das Meerwasser noch warm, die Atmosphäre noch kohlenstoffreich, das Klima gleichmässig mit hoher Temperatur. Bei der Erniedrigung der Gebirge war dagegen das Meer kalt, die Atmosphäre kohlenstoffarm, das Klima sehr wechselnd und gar nicht besonders warm. Alle diese Umstände waren für die Pflanzen wenig günstig. Deshalb konnte bei dem Verschwinden der Gebirge keine so üppige Vegetation wie bei ihrem Entstehen zustande kommen.
