

INNSBRUCKER FÖHNSTUDIEN IV

WEITERE BEITRÄGE ZUR DYNAMIK DES FÖHNS

VON

DR. H. v. FICKER

IN INNSBRUCK.

Mit 32 Textfiguren.

V O R G E L E G T I N D E R S I T Z U N G A M 21. O K T O B E R 1909.

Einleitung.

Nur mit Widerstreben konnte ich mich entschließen, die vor fünf Jahren begonnenen Untersuchungen über die Dynamik des Föhns fortzusetzen. Denn gleich allen anderen Meteorologen bin ich der Meinung, daß die bemerkenswerten meteorologischen Eigenschaften der Fallwinde zu den besterklärten Erscheinungen der atmosphärischen Physik gehören. Mein Widerstreben war um so größer, als die Fortführung der Untersuchungen wieder nur auf die Diskussion von Einzelfällen aufgebaut ist, eine Methode, die sich in meteorologischen Kreisen keiner besonderen Sympathie erfreut, weil sie die Untersuchungen langwierig und häufige Wiederholungen unvermeidlich macht. Allerdings lehrt der Übergang vom schematischen Fall zum individuellen Einzelfall, daß wir auch von den besterklärten, meteorologischen Vorgängen eigentlich nur wenig wissen. Es ergibt sich durch die Betrachtung von Einzelfällen manche fruchtbare Fragestellung, zu der man auf Grund von Mittelwertbildungen nicht so leicht gelangen kann.

Im Mittelpunkte der vorliegenden Untersuchung steht die Frage nach der Entstehung des Föhns, eine Frage, die bekanntlich zu Kontroversen zwischen den verstorbenen, hochverdienten Meteorologen Billwiller und Wild geführt hat. Die Untersuchung selbst wurde ohne Rücksicht auf die Ansichten dieser beiden Forscher geführt; ein gesondertes Kapitel wird auf Grund des von uns gewonnenen Tat-sachenmaterials zu den Anschauungen der beiden Meteorologen Stellung nehmen. Wie es die Methode der Einzelfälle mit sich bringt, wird daneben eine Reihe sekundärer Erscheinungen zur Sprache kommen müssen.

Um die Arbeit nicht über Gebühr in die Länge zu ziehen, muß auf die Wiedergabe von Mittelwerten für die einzelnen Stationen zum größten Teile verzichtet werden. Ich glaube, daß die reichlich beigegebenen Diagramme einen vollwertigen und angenehmen Ersatz darstellen. Auf Erscheinungen, wie zum Beispiel die Föhnpausen, die — wie ich glaube — im ersten Teile der Innsbrucker Föhnstudien eine genügende Erklärung gefunden haben, kann nur flüchtig hingewiesen werden, ausgenommen jene Fälle, deren Untersuchung zur Erweiterung unserer Kenntnis beiträgt.

Der Zweck der Untersuchung erforderte nicht nur eine geänderte Aufstellung der Registrierapparate, die im Jahre 1904 in Benützung gestanden waren, sondern machte auch die Berücksichtigung von Stationen notwendig, die nicht in unmittelbarer Nähe von Innsbruck liegen. In überaus entgegenkommen-

der Weise stellte Herr Professor F. Erk, Direktor der königlich bayerischen meteorologischen Zentralstation in München, die Diagramme des Zugspitz-Hochobservatoriums, von Mittenwald und Harlaching bei München zur Verfügung, wofür ich ihm an dieser Stelle bestens danke. Registriermaterial aus Rotholz im Unterinntal stellte die k. k. Zentralanstalt für Meteorologie in Wien zur Verfügung.

Herr Professor Paul Czermak hat die ihm von der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften und vom Deutschen und Österreichischen Alpenverein zur Verfügung gestellte Subvention zum Studium des Föhns längs der Brennerlinie benutzt. Er hat unter anderem auch Thermographen aufgestellt, die vom Oktober 1902 bis April 1903 auf der Brennerlinie in Funktion waren und die vom Verfasser später für die Fortsetzung der Untersuchung in Gebrauch genommen wurden.

Dieses Material war nicht nur eine wertvolle Ergänzung des von mir im Jahre 1905 gesammelten Materiale, sondern bot auch die Gelegenheit, auf die Verhältnisse auf der Südseite der Alpen bei Föhn in Innsbruck einzugehen.

Des weiteren obliegt mir die angenehme Pflicht, allen jenen zu danken, welche die Bedienung der Registrierapparate übernommen hatten. Wertvolle Aufklärungen, die ich an Ort und Stelle einholte, verdanke ich Herrn Instrumentenfabrikanten Tiefenbrunner, dem Leiter der königlich bayrischen meteorologischen Station Mittenwald, deren tadellose Diagramme einen der wichtigsten Arbeitsbehelfe darboten.

Die Lage der Stationen, deren Diagramme benutzt wurden, ist in der nachstehenden Kartenskizze verzeichnet. Nur Harlaching bei München liegt weiter nördlich im Isartal. Fallweise wurden noch Beobachtungen anderer Stationen mitgeteilt, so Sonnblick 3106 m in den Hohen Tauern, Peißenberg 994 m in der bayrischen Hochebene.

Der Stationsaufstellung lag folgender Plan zugrunde:

Da die Beobachtungen des Jahres 1904 nur über den Föhnverlauf in Innsbrucks nächster Nähe Aufschluß gegeben hatten, mußte der Verlauf der Föhnfälle auch im Inntale in größerer Entfernung von Innsbruck untersucht werden, gewissermaßen als Voruntersuchung. Diesem Zwecke dienen die Stationen Rotholz 525 m, Innsbruck 574 m, Zirl 596 m und Telfs 623 m, sämtliche im Inntal gelegen. Rotholz und Innsbruck liegen an der Ausmündung großer zentralalpiner Täler (Zillertal und Silltal).

Die zweite Stationsaufstellung erstreckt sich von Igls 874 m hinab in das Inntal (Innsbruck 574 m), aus diesem hinauf zur flachen Einsattlung bei Seefeld 1180 m und wieder nördlich hinab nach Scharnitz 964 m und Mittenwald 914 m, beide im Isartal, in dem noch weiter nördlich Harlaching 559 m zu suchen ist. Die Verhältnisse in der Höhe werden charakterisiert durch Zugspitze 2964 m (westlich von Mittenwald) und fallweise Patscherkofel 1970 m (oberhalb Igls). Mit Hilfe dieser Aufstellung hoffte ich zu erfahren, wo der Föhn früher beginnt, im nördlichen Alpenvorlande oder in den inneren Alpentälern. Zur Entscheidung dieser Frage ist die Gegend bei Innsbruck deshalb ausnehmend günstig, weil das Föhntal (Silltal) von Süden her in das west-östlich verlaufende Inntal einmündet und nördlich des Inntales nochmals hohes Gebirge trifft, das überschritten werden muß.

Die dritte Stationsgruppe, die von Herrn Professor Czermak eingerichtet worden war, erstreckt sich von Innsbruck 574 m südlich durch das Silltal nach Matrei 993 m, von hier hinauf zum Brennerpaß 1370 m, zur Scheide zwischen Nord- und Südseite der Alpen, jenseits hinab in das Eisacktal nach Sterzing 948 m und nach Brixen 561 m. Da Matrei und Sterzing einerseits, Innsbruck und Brixen anderseits fast gleich hoch liegen, eignet sich diese Aufstellung sehr gut für den Vergleich der Temperaturen bei Föhn in gleicher Höhe auf der Süd- und Nordseite.

Gemäß diesen drei Stationsgruppen gliedert sich auch die Untersuchung in drei Teile.

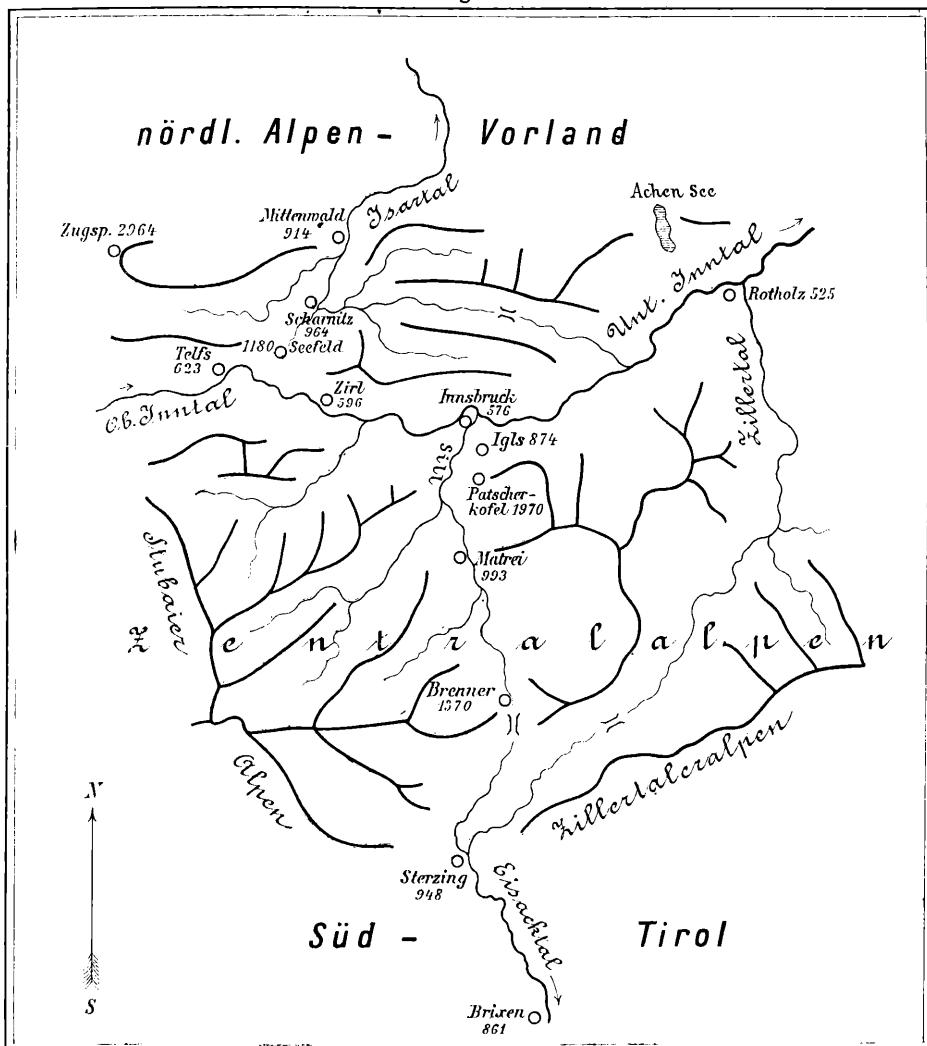
Der erste Abschnitt behandelt die Frage: Wohin fließt die Föhnströmung ab, nachdem sie durch das nord-südlich verlaufende Silltal in das west-östlich streichende Inntal eingebrochen ist? Fließt sie durch das Unterinntal nach Osten oder durch das Oberinntal nach Westen oder fließt sie in der Höhe ab?

Es ergibt sich, daß der in das Inntal einbrechende Föhn abermals aufsteigt und über die nördlichen Kalkalpen nach Norden abfließt. Hieraus ergibt sich die weitere Frage: Warum steigt die

Föhnströmung zwischen Zentralalpen und nördlichen Kalkalpen in das Inntal herab, beziehungsweise, welcher Vorgang veranlaßt das Absteigen des Föhns?

Dieser Frage ist der zweite Teil gewidmet; es ergibt sich folgendes: Jedem Föhn gehen antizyklonale Verhältnisse mit sehr stabiler Temperaturschichtung voraus; in der Höhe fließt potentiell warme Luft über die kalte Luft in der Tiefe. Erst dann, wenn die kalte Luft selbst in nordwärts abfließende Bewegung gerät, sinkt die warme Luft aus der Höhe als Föhn herab. Im weiteren Verlaufe strömt Luft von der Südseite der Alpen nach, wobei die antizyklonalen Verhältnisse erloschen.

Fig. 1.



Das Nordtiroler Föhngebiet: o Beobachtungsstation. (Die Gebirge nördlich des Inntals bilden die nördlichen Kalkalpen.)

Es ergibt sich des weiteren die Frage: Wer ist in der Auffassung der Entstehung des Föhns im Recht, Wild aber Billwiller?

Es läßt sich zeigen, daß auf der Leeseite die warme Föhnströmung in gleicher Höhe gleichzeitig zu finden ist, daß aber naturgemäß in den höher gelegenen Talschlüssen der Föhn früher fühlbar ist. Denn das Abfließen kalter Luft bewirkt das Herabsinken warmer Luft aus der Höhe. Die Ursache für das Herabsteigen der Föhnströmung liegt also ganz im Sinne Billwiller's auf der Leeseite des Gebirges.

Der dritte Abschnitt bringt einerseits eine Bestätigung der gewonnenen Resultate; andererseits läßt sich zeigen, daß die verschiedenen Entwicklungsstadien des Föhns auch auf der Luvsseite in deutlicher Weise markiert sind.

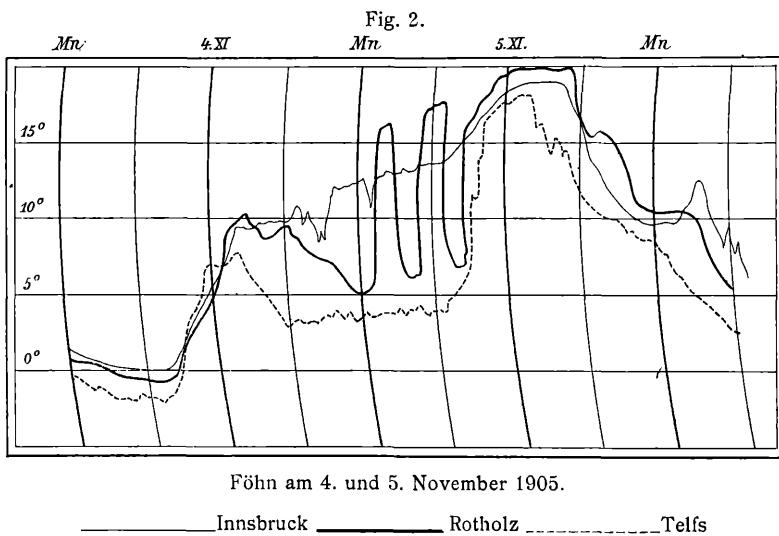
Der erste Abschnitt wird kurz, die beiden anderen länger; zahlreiche Wiederholungen sind unvermeidlich.

I. Der Föhnverlauf im Inntal.

Telfs im Oberinntal liegt zirka 23 km westlich von Innsbruck, Rotholz im Unterinntale zirka 26 km nordöstlich von Innsbruck. Zwischen Innsbruck und Telfs liegt Zirl, dessen Registrierungen weniger verlässlich sind. Die Höhenunterschiede sind gering; zwischen Rotholz und Telfs beträgt er 100 m. Rotholz und Innsbruck liegen an der Einmündung von Seitentälern in das Inntal, im übrigen ist jedoch die Lage der Stationen derart, daß größere lokale Unterschiede nicht zu erwarten sind. Innsbruck ist bekannt als Föhnstation. Föhnstudien I haben ergeben, daß die Föhnwirkung gegen das Oberinntal zu rasch abnimmt. Über den Föhnverlauf im Unterinntal ist nichts bekannt. Es ist zu untersuchen, wie sich der Föhnverlauf im Ober- und Unterinntal in größerer Entfernung von Innsbruck gestaltet. Da in Innsbruck selbst der Föhnverlauf oft gestört ist, wird als Hilfsstation die ungestörte Gehängestation Igls 874 m, 300 m höher als Innsbruck, verwendet.

1. Föhn am 4. und 5. November 1905.

Dieser Föhn war von ungewöhnlicher Stärke (siehe Meteorologische Zeitschrift 1906, Heft 5) und verlief in Innsbruck ohne nennenswerte Störung. Sehr niedrige Temperaturen gehen voraus, mit Temperaturumkehr. Rotholz und Innsbruck sind in den Morgenstunden des 4. November um 1 bis 2° kälter als das höhere Igls, Telfs um 2 bis 3·5° Innsbruck notiert um 7 a. W₂; die kalte Luft in der Talsohle fließt also talabwärts ab. Igls ist in der Nacht vom 3. bis 4. November ziemlich trocken, Innsbruck feucht. Der Luftdruck steht über dem normalen. Dem Föhn gehen antizyklonale Verhältnisse voraus.



Föhn am 4. und 5. November 1905.

Innsbruck Rotholz Telfs

Föhn zirka um 10a. aus, in Innsbruck um 2p., worauf die Temperatur langsam, aber kontinuierlich bei starkem Föhn bis 4p des 5. November steigt.

Föhnverlauf in Rotholz: In Rotholz finden wir am 4. November eine Temperaturkurve, die wenig von der normalen abweicht. Während in Innsbruck und Igls bereits starker Föhn weht, tritt in Rotholz Abkühlung ein. Um Mitternacht vom 4. bis 5. November ist Rotholz um 8·5° kälter als Innsbruck, um 6·7° kälter als das um 350 m höher liegende Igls. Bald nach Mitternacht bricht in Rotholz Föhn durch, die Temperatur steigt in kürzester Zeit um 11°; es bleibt eine Stunde warm, worauf Abkühlung um 10° folgt; diese dauert zwei Stunden, worauf die Temperatur wieder um 11° steigt und sich zwei Stunden auf dieser Höhe hält, worauf wieder Abkühlung um 10° folgt. Erst nach 8a. am 5. November bricht der Föhn endgültig durch.

Temperaturdifferenz Rotholz—Innsbruck am 5. November.

Mittern.		4 a.	6 a.	8 a.	10 a.	12 Mittag	p.	4 p.	6 p.	8 p.
-8·5	1·7	-7·8	2·4	-8·1	0·9	0·6	0·6	0·7	0·6	3·8

Diese seltsam großen, regelmäßigen Temperaturschwankungen (siehe Diagramm) in Rotholz können wohl nicht anders als durch periodisches Vorstoßen und Zurückziehen einer kalten Bodenschicht im Tale erklärt werden. In jenen Stunden, in welchen in Rotholz Föhn weht, ist Rotholz wärmer als Innsbruck. Die Föhnströmung, die wir in Rotholz finden, kommt also sicher nicht von Innsbruck durch das Inntal abwärts nach Rotholz, weil der Höhenunterschied zwischen Innsbruck und Rotholz (50 m) nicht bedeutend genug ist, um eine Erwärmung von 1 bis 2° zu erzeugen. Der Föhn in Rotholz kommt vielmehr aus dem Zillertal. Luft, die von der Südseite der Alpen durch das Zillertal auf die Nordseite übertritt, muß stärker erwärmt werden als Luft, die auf der Brenner-Föhnlinie nach Innsbruck kommt, weil im Hintergrunde des Zillertales keine ähnlich niedrigen Pässe wie der Brennerpaß auf die Südseite hinüberführen. Die dynamische Erwärmung ist aber, wie bekannt, auch abhängig von der Höhe des Gebirgskammes.

Der Föhn erlischt in Rotholz etwas später als in Innsbruck. Da er viel später beginnt, kann man kurz sagen, daß die Föhndauer in Rotholz kürzer ist als in Innsbruck, die Föhntemperatur höher.

Föhnverlauf in Telfs: Im Oberinntal finden wir am 4. November eine regelmäßige Temperaturtagesamplitude. Erst von 6 p. des 4. bis 6 a. des 5. November bleibt die Temperatur konstant, mit geringen Schwankungen. Während in Innsbruck, 22 km östlich, bereits stürmischer Föhn weht, ist in Telfs nichts zu merken. Die Temperaturen sind um 8 bis 11° niedriger als in dem nahen, gleich hoch gelegenen Innsbruck. Am 5. November steigt dann von 6 a. bis 12 Mittag die Temperatur um fast 15°, womit fast die Föhntemperatur von Innsbruck erreicht wird. Jetzt erst ist auch in Telfs Föhn durchgebrochen; er weht aber nur zwei Stunden und wird nach 2 p. durch rasche Abkühlung beendet. Ob die warme Luft in Telfs aus West oder Ost zuströmt, kann nicht angegeben werden. Zur Zeit der größten Temperaturdifferenz zwischen Innsbruck und Telfs kann es sich in Telfs nur um eine seichte Bodenschicht kalter Luft handeln, da ein hochreichendes, neben der Föhnströmung liegendes, um 8 bis 10° kälteres Luftgebiet in Innsbruck jedenfalls Störungen — Föhnpausen — verursachen müßte.

Übersicht: Die Dauer des Föhns beträgt in Telfs drei Stunden, in Rotholz zirka 12 Stunden, in Innsbruck 28 Stunden. Der Föhn dauert also in Innsbruck am längsten, am wenigsten lang im Oberinntal. Dies übt seine Rückwirkung natürlich auch auf die Mitteltemperaturen der beiden Tage:

Mittel-temperatur	Tag	Telfs	Innsbruck	Rotholz	Igls
12ständ. Mittel	4. Nov.	3·0°	6·8°	4·8°	7·3°
	5.	10·4	15·6	15·4	13·1

Am 4. November ist die Föhnwirkung am intensivsten in Igls, das wie Innsbruck dem Föhngebiete des Silltales angehört, aber 300 m höher als Innsbruck liegt. In Telfs liegt auch am Hauptföhntage das Tagesmittel der Temperatur um mehr als 5° unter jenem von Innsbruck. In Rotholz ist der Föhn von kürzerer Dauer als in Innsbruck, aber da die Temperaturerhöhung durch den Föhn intensiver ist, so liegt am 5. November das Tagesmittel gleich hoch wie in Innsbruck. Am ersten Föhntage weht in Rotholz gleich wie in Telfs überhaupt kein Föhn.

Aus diesen Daten muß man zwei Schlüsse ziehen: Das Föhngebiet an der Ausmündung des Silltales (Innsbruck) ist während relativ langer Zeit bei Föhn von Kaltluftgebieten sowohl im Osten wie im Westen eingeschlossen. Der Föhn weht in Innsbruck in ein tieferes Niveau herab als östlich und westlich.

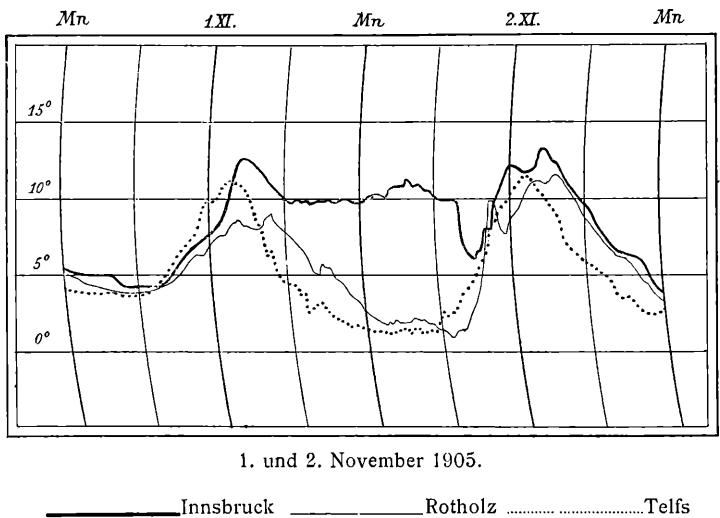
Die Föhnwirkung ist nur dort von längerer Dauer, wo ein von den Zentralalpen herabziehendes Tal für den Föhn gewissermaßen eine Straße bildet. Dieser Schluß ist alt, aber der Hinweis darauf erscheint mir mit Rücksicht auf spätere Erörterungen von Wichtigkeit.

Der Fall wurde deshalb vorangestellt, weil die dynamische Erwärmung der Luft sehr groß, die Intensität der Luftbewegung sehr bedeutend war, so daß auch westlich und östlich von Innsbruck Föhnwirkung eingetreten ist. Es kann deshalb erwartet werden, daß Föhnwinde geringerer Intensität in Telfs und vielleicht auch in Rotholz häufig überhaupt nicht zum Durchbruche kommen. Der folgende Fall gehört in diese Kategorie.

2. Föhn am 1. und 2. November 1905.

Dieser Föhn geht dem vorstehend geschilderten voraus und erscheint gewissermaßen als Vorläufer.

Fig. 3.



1. und 2. November 1905.

Innsbruck _____ Rotholz Telfs

Der Föhn beginnt in Igls am 1. November um Mittag, in Innsbruck etwas später. Die Erwärmung hält auch in der Nacht an; am Morgen des 2. November in Innsbruck eine Föhnpause.

In Telfs finden wir fast ganz ungestörte Temperaturamplituden. Die Temperatur sinkt in der Nacht vom 1. bis 2. November sogar tiefer als in der vorhergehenden Nacht. Da der Föhn Aufheiterung bringt, so ist in den föhnlosen Orten die Abkühlung durch Ausstrahlung stark. Am 2. November mittags ist Telfs leicht föhnig. Erwähnenswert ist, daß zur Zeit der Föhnpause in Innsbruck in

Telfs die Temperatur bereits steigt. In Innsbruck weht dabei W_1 , also Wind aus der Gegend von Telfs her. Diese Erscheinung müssen wir für später vormerken. Zur Zeit stärksten Föhns in Innsbruck ist Telfs bis um 10° kälter als Innsbruck.

In Rotholz ist der Temperaturablauf ähnlich wie in Telfs. Der Temperaturgang läßt den Föhn kaum erkennen, die nächtliche Abkühlung ist bedeutend. Die Temperaturdifferenz Innsbruck—Rotholz steigt während des Föhns in Innsbruck bis auf 9°

Mittel-temperatur	Tag	Telfs	Innsbruck	Rotholz	Igls
12stünd. Mittel	1. Nov.	5·0 5·3	8·3 9·1	5·6 5·8	7·5 7·0

Innsbruck ist also an beiden Tagen im Tagesmittel um zirka 3° wärmer als die Nachbargebiete in 25 km Entfernung. Der Föhn ist in Telfs und Rotholz kaum angedeutet. Es ergibt sich, daß ein schmaler, warmer Luftstrom durch das Silltal in das Inntal hinabfließt und hier zwischen zwei kalten Luftgebieten wie in einem Troge strömt. Die beiden kalten Luftgebiete, die in der Nacht vom 1. bis 2. November um 9 bis 10° kälter sind als die Föhnströmung im gleichen Niveau, müssen wir uns keilförmig gegen das warme Gebiet vorgeschoben denken, so daß die Föhnströmung mit der Höhe rasch breiter wird.

Es folgt ein wichtigerer Fall, der bereits zu Fragen führt, die im zweiten Abschnitte behandelt werden müssen. Der gleiche Fall wird uns dort nochmals begegnen.

3. Föhn am 18. und 19. November 1905.

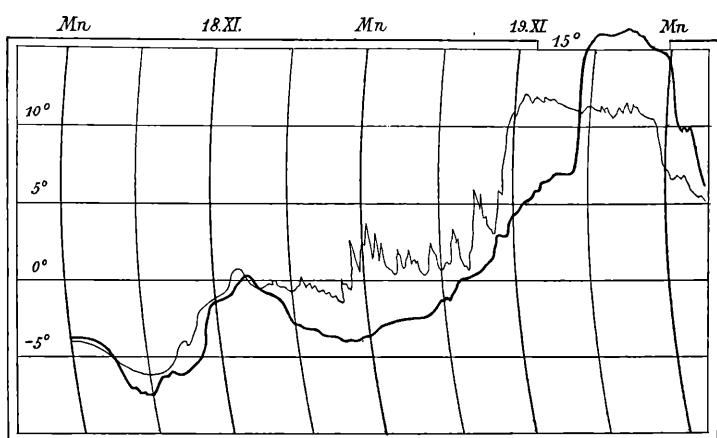
Dem Föhn geht große Kälte bei hohem Luftdruck voraus.

Am 18. November um 2 p. beginnt in Igls Föhn, mit rascher kleiner Temperaturstufe, der dann langsame kontinuierliche Erwärmung bei anhaltendem Föhn folgt. Da in Innsbruck der Föhn erst am 19. November um 10a. durchbricht, ist Igls in der Zeit von 2p. (18. November) bis 10a. (19. November) viel wärmer als Innsbruck, zeitweise um 7 bis 8° Innsbruck verzeichnet zwar in der Nacht lebhafte Temperaturschwankungen (siehe Diagramm), es notiert um 9 p. (18. November) bereits SW₃, um 7a. (19. November) SW₄, aber da gleichzeitig die Temperatur viel niedriger liegt als in dem höheren Igls, kann von Föhn nicht gesprochen werden. Es strömt zwar Luft über Innsbruck hinweg, aber wir finden noch keinen Föhn. Denn erst dann dürfen wir von Föhn auch in Innsbruck reden, wenn die potentielle Temperatur in Innsbruck gleich jener in Igls ist. An dieses Kriterium müssen wir uns streng halten. Auch die Temperaturschwankungen erhöhen in Innsbruck die Temperatur nicht auf die Temperatur von Igls, geschweige denn auf den vollen Föhnbetrag. In Innsbruck beginnt Föhn erst um 10a. des 19. November. Das vorhergehende, durch Temperaturschwankungen ausgezeichnete Stadium können wir nur als ein Vorstadium des Föhns bezeichnen.

Föhnverlauf in Rotholz: In Rotholz finden wir am 18. November eine normale Tagesamplitude der Temperatur, mit Abkühlung in den Nachmittag- und Abendstunden. Von 10p. an beginnt die Temperatur zwar langsam zu steigen, doch bleibt Rotholz kälter als Innsbruck, obwohl in letzterem der Föhn auch noch nicht zum Ausbruch gekommen ist. Rotholz ist zeitweise um 9 bis 10° kälter als das um 350 m höhere, bereits föhnbestrichene Igls. Nachdem in Innsbruck (um 10a. des 19. November) der Föhn ausgebrochen ist, bleibt Rotholz bei andauernder, langsamer Erwärmung bis um 4 p. um 5 bis 7° kälter als Innsbruck. Um 4 p. bricht auch in Rotholz Föhn aus und bringt nach Rotholz eine um 4° höhere Temperatur, als wir sie in Innsbruck finden. Da der Föhn in Rotholz von den höheren Gebirgskämmen des Zillertales herabkommt, ist die höhere Temperatur in Rotholz aus der Theorie leicht zu erklären.¹ Dem Durchbruch des Föhns geht in Rotholz gleich wie in Innsbruck langsame Erwärmung voraus, wobei aber Rotholz kälter als Innsbruck und Igls ist.

Der Föhn beginnt in Rotholz um 6^h später als in Innsbruck und endet in Rotholz um zirka 2^h später. Die Dauer des Föhns ist also kürzer wie in Innsbruck, die Temperatursteigerung jedoch intensiver.

Fig. 4.



Föhn am 18. und 19. November 1905.

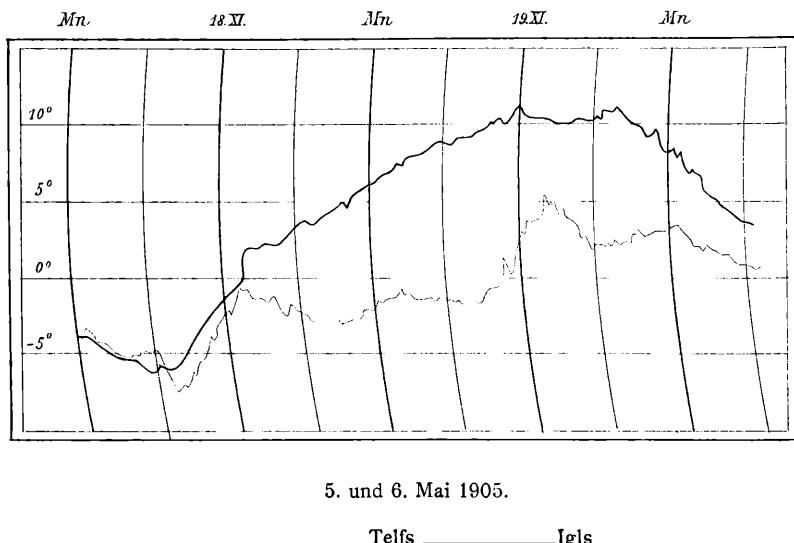
Innsbruck Rotholz

¹ Der Fall beweist aber auch, wie vorsichtig man vorgehen muß, wenn man den Temperaturgradienten zwischen Tal und Gipfel ableiten will. Um 6 p. des 19. November ist die Temperatur in Innsbruck 12°, in Rotholz 16°, auf dem Patscherkofel (1970 m) ober Innsbruck -0·3°. Zwischen Innsbruck und Patscherkofel ergibt sich ein Gradient von 0·88°/100 m, zwischen Rotholz und Patscherkofel ein solcher von 1·12°/100 m. In Rotholz ist eben der Föhn ein anderer Luftstrom als jener, der Patscherkofel und Innsbruck bestreicht. Die Berechnung eines Gradienten hat aber nur dann — in Einzelfällen — einen Sinn, wenn der gleiche Luftstrom beide Stationen bestreicht.

Föhnverlauf in Telfs: In Telfs kommt dieser starke Föhn nicht zum Durchbruch. Vor dem Föhn ist Telfs wärmer oder gleich warm wie Innsbruck und Igls. Nach Ausbruch des Föhns in Igls wird Telfs um 10° kälter als Igls, das um 250 m höher liegt. Auch nach Ausbruch des Föhns in Innsbruck kommt in Telfs der Föhn nicht zum Durchbruch, Telfs bleibt zur Zeit des heftigsten Föhns um 5° kälter als Igls, um 7 bis 8° kälter als Innsbruck. Obwohl also der Föhn in Telfs nicht zum Ausbruch kommt, so bleibt

er doch nicht ganz ohne Wirkung auf den Temperaturgang in Telfs. Es treten nicht nur zahlreiche, kleine Temperaturschwankungen auf, sondern es tritt vom 18. bis 19. November auch langsame Erwärmung ein, die freilich in ihrem Betrage nicht mit der Föhnerwärmung in Innsbruck oder Igls verglichen werden kann. Die Erwärmung in Telfs kann nur indirekt durch den Föhn bewirkt sein. In den Morgenstunden des 19. November liegt in Telfs zum Beispiel die Temperatur gleich hoch wie auf dem um 1350 m höheren Patscherkofel und auch zur Zeit der stärksten Erwärmung in Telfs beträgt der Tem-

Fig. 5.



5. und 6. Mai 1905.

Telfs Igls

peraturunterschied gegenüber dem Patscherkofel nur 5° . Die Erwärmung in Telfs ist also nicht durch die Föhnströmung erzeugt.

Übersicht: Die Mitteltemperaturen der Föhntage für die einzelnen Orte geben einen raschen Überblick über die Stärke des Föhns in den verschiedenen Gebieten:

Mittel-temperatur	Tag	Igls 874 m	Innsbruck 575 m	Rotholz 525 m	Telfs 623 m
12 stünd. Mittel	18. Nov. 19.	— 0.7 9.3	— 1.8 7.3	— 3.5 6.1	— 2.5

Der Föhn dauert am längsten in Igls, so daß Igls am 19. November wärmer ist als Innsbruck, obwohl in Innsbruck die Temperatur nach Durchbruch des Föhns höher steigt als in Igls. Das gleiche gilt für Innsbruck und Rotholz. In Telfs kommt der Föhn überhaupt nicht zum Durchbruch, das Tagesmittel der Temperatur liegt am Hauptföhntage um volle 7° tiefer als in Igls. Günstig für den Durchbruch des Föhnes in das Inntal sind also nur die Gebiete an den Ausmündungen der zentralalpinen Seitentäler (Innsbruck und Rotholz), obwohl auch hier der Beginn des Föhns stark verzögert ist. Sowohl in Innsbruck wie in Rotholz geht dem Durchbruch des Föhns langsame Erwärmung voraus, wobei beide Orte niedriger temperiert bleiben als das höher liegende föhnbestrichene Igls. Diese langsame, nicht mit der Föhnströmung in direktem Zusammenhang stehende Erwärmung finden wir auch in Telfs, also im föhnlosen Gebiete.

Wir vergleichen die Temperaturen in gewissen Zeitmomenten:

	Igls	Telfs	Innsbruck	Rotholz
19. November 8 a.	9°0'	— 1°1'	1°3'	0°2'
19. 2 p.	10°2	5°0	12°4	5°6
19. 6 p.	10°3	3°7	12°0	16°0

Um 8a. ist noch das ganze Talbecken mit kalter Luft erfüllt; Föhn weht nur in Igls, 300m über der Sohle des Inntales.

Um 2p. ist der Föhn bereits von Igls nach Innsbruck durchgebrochen; östlich und westlich von Innsbruck liegen Gebiete kalter Luft. Der Föhn in Innsbruck stellt einen warmen, schmalen Luftstrom zwischen kalten Gebieten dar.

Um 6p. erreicht der Föhn aus dem Zillertal die Talsohle des Inntales bei Rotholz. Ob das Föhngebiet von Innsbruck und jenes von Rotholz in Zusammenhang treten, kann nicht angegeben werden. Wahrscheinlich ist es nicht.

Jedenfalls ist um 2p. das Föhngebiet bei Innsbruck von sehr geringer Ausdehnung in der Talsohle selbst. Der Föhn sinkt also ganz lokal in die Tiefe und verdrängt ganz lokal kalte Luft. Beiderseits bestehen kalte Gebiete ungestört weiter.

Wie haben wir uns dieses lokale Herabsinken der Föhnströmung an den Ausmündungen der Föhnäler vorzustellen? Um Mißverständnissen vorzubeugen, muß bemerkt werden, daß die Frage sich nur auf das Herabsinken der Luft von Igls nach Innsbruck bezieht, nicht aber auf die Entstehung der absteigenden Luftbewegung bei Föhn überhaupt.

Zunächst kann man daran denken, daß die kalte Luft bei Innsbruck abfließt und daß die Föhnströmung nachströmt. Dieser Vorgang, der von größter Bedeutung werden kann, trifft hier nicht zu, weil die Erwärmung bei Innsbruck insel förmig inmitten eines kalten Gebietes erfolgt.

Die Erklärung für ein solch lokales Herabsinken einer warmen Luftströmung, verbunden mit lokalem Verschwinden kalter Luft, hat Margules¹ gegeben:

»Ein warmer Luftstrom (in unserem Falle der Föhn) fließt wenige Hektometer über dem Boden, eine Unstetigkeitsfläche oder ein Band raschen Überganges trennt ihn von der darunter liegenden kalten Masse. Die obere Strömung, an der Grenze absolut wärmer, in der ganzen Masse potentiell wärmer, hat eine größere vertikale Erstreckung als die kalte Schichte und eine größere Geschwindigkeit. Sie saugt die kalte Luft allmählich auf, kommt dem Boden näher, erreicht ihn. Zu dieser Zeit verzeichnet der Anemograph Beginn stärkeren Windes nach Kalme oder mit Richtungswechsel, der Thermonograph den steilen Temperaturanstieg. Die Stufe zeigt demnach nicht die Erwärmung einer Luftmasse an, sondern die Wegschaffung des letzten Restes der kalten Schicht an jenem Ort.«

Die Anwendung dieser Betrachtung auf unseren Fall ist naheliegend. Da die zentralalpinen Täler die Bahnen sind, welchen der Föhn folgt, so liegen naturgemäß an den Ausmündungen der Föhnäler die Verhältnisse für einen derartigen Aufsaugungsprozeß kalter Luft durch einen warmen Luftstrom sehr günstig, im Inntale also in Innsbruck und Rotholz, nicht aber in Telfs, wo kein Föhntal ausmündet. Wir finden keine Schwierigkeit, das Herabsinken der Föhnströmung von Igls nach Innsbruck zu erklären, bei Weiterbestand kalter Luftgebiete im Osten und Westen. Keine Aufklärung bringt uns aber diese Betrachtungsweise für die langsame, dem Durchbruch des Föhns vorausgehende Erwärmung, die wir überdies an Orten treffen, die föhnlos bleiben, wie Telfs.

¹ Max Margules, Über Temperaturschichtung in stationär bewegter und in ruhender Luft. Hann.-Band der Met. Zeitschr. 1906, p. 243 ff. Obiges Zitat p. 249.

Der Verlauf der Föhnfälle im Frühling und Sommer ist minder übersichtlich als im Winter und Herbst, weil in der wärmeren Jahreszeit die Temperaturerhöhung durch den Föhn im allgemeinen geringer ist und weil in den Mittagsstunden die Temperatur in den fohnlosen Orten ebenso hoch, mitunter höher steigt als in den Föhnorten, ausschließlich als Folge der Insolution. Die Temperaturunterschiede zwischen fohnlosem Gebiet und den Föhnorten sind dann nur in der Nacht bedeutender. In der Mehrzahl der Fälle finden wir bei Föhn in Innsbruck auch Föhnwirkung in Rotholz, während das Oberinntal fohnlos bleibt. Es wird genügen, die Mitteltemperaturen einiger Föhntage mitzuteilen:

Mitteltemperatur	Tag	Igls	Innsbruck	Rotholz	Zirl ¹	Telfs
12 stündiges Mittel	11. März 1905	6° 2°	6° 6°	5° 8°	4° 1°	
	12. 1905	6° 7	8° 8	9° 0	4° 7	
	10. April 1905		8° 9			5° 2
	11. 1905		12° 3			9° 2
	28. Sept. 1905	13° 1	15° 0	14° 5		13° 4
	29. 1905	14° 5	14° 2	14° 0		11° 9

In Telfs liegen die Tagesmittel immer am niedrigsten; zwischen Innsbruck und Rotholz schwanken die Differenzen. In Innsbruck weht der Föhn länger, in Rotholz steigt die Temperatur höher, was die kürzere Dauer des Föhns kompensieren kann. Rotholz ist dann im Tagesmittel gleich temperiert wie Innsbruck. Die potentielle Temperatur ist immer in Igls am höchsten, da ja Igls um 300 m höher als Innsbruck liegt.

Für gewisse Zeitabschnitte finden wir immer, daß in Innsbruck bereits Föhn weht, während in Telfs (Zirl) und Rotholz kalte Luft liegt. Wir haben es dann immer mit einem lokal engbegrenzten Herabsinken warmer Luft zur Talsohle zu tun.

In Föhnstudien I wurde nachgewiesen, daß die Föhnpausen in Innsbruck durch Einschub kalter Luft aus kalten Nachbargebieten entstehen. Es wurde gefunden, daß das Nährgebiet dieser dem Föhngebiet zuströmenden, kalten Luft das Oberinntal ist. Nun finden wir, daß bei Föhn in Innsbruck auch östlich von Innsbruck im Unterinntal kalte Luft liegt. In seltenen Fällen kann die Innsbrucker Föhnpause auch durch Zufluß kalter Luft von Osten her entstehen, wie folgender Fall beweist.

4. Föhn am 5. und 6. Mai 1905.

Der Föhn weht in Innsbruck nicht immer aus Süd, sondern oft auch aus Südwest und weniger oft aus Südost. Bei Südwestföhn wird sich der Innsbrucker Föhnbezirk mehr östlich in das Unterinntal ausbreiten, bei Südostföhn mehr westlich in das Oberinntal hinauf. Ein gutes Beispiel für den zweiten Fall bietet der Föhn vom 5. und 6. Mai 1905; an diesen beiden Tagen wurde in Innsbruck fast durchwegs Südost bis zur Stärke 5 notiert.

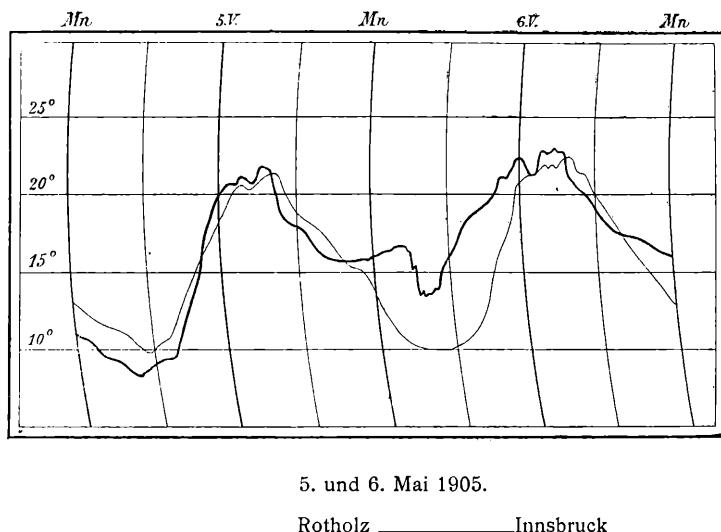
In diesem Falle erstreckt sich die Föhnwirkung ausgesprochen bis Zirl im Oberinntal (siehe Diagramm), 11 km westlich von Innsbruck, in Spuren sogar bis Telfs, während in Rotholz, östlich von Innsbruck, höchstens die hohen Mittagstemperaturen auf Föhn hinweisen. Doch sind hohe Mittagstemperaturen an heiteren Tagen des Mai kein zuverlässiges Föhnkriterium. In der Nacht vom 5. bis 6. Mai ist Rotholz zeitweise um 5 bis 6° kälter als Innsbruck, Telfs um 4 bis 5°. Das näher bei Innsbruck gelegene Zirl hingegen ist gleich warm, zeitweise sogar wärmer als Innsbruck. Der ausgesprochene Föhnbezirk reicht also in diesem Falle von Innsbruck bis Zirl, während in Telfs und in Rotholz starke nächtliche Abkühlung eintritt.

¹ Zirl liegt 11 km westlich von Innsbruck, zwischen Innsbruck und Telfs. Am 12. März differieren die Tagesmittel von Zirl und Innsbruck um 4°, eine in Anbetracht der geringen Entfernung bedeutende Differenz.

Sowohl in Innsbruck wie in Zirl treten nun am Morgen des 6. Mai sehr markante, wenn auch nur kurzdauernde Föhnpausen ein. Die Föhnpause in Innsbruck beginnt früher als in Zirl, die kalte Luft kann also nicht aus dem Oberinntal, von Telfs über Zirl nach Innsbruck gekommen sein. Andererseits sinkt in Zirl während der Föhnpause die Temperatur tiefer als in Innsbruck, so daß auch nicht angenommen werden kann, daß die Störung in Zirl durch kalte Luft von Innsbruck her, aus dem Unterinntale, verursacht wurde, wogegen auch die längere Dauer der Föhnpause in Zirl spricht.¹

Die Föhnpausen in Innsbruck und Zirl stehen also in keinem Zusammenhange. Man ist zu dem Schlusse gezwungen, daß die Föhnpause in Innsbruck durch kalte Luft aus dem Unterinntale, von Rotholz her, verursacht wurde, jene in Zirl durch kalte Luft aus dem Oberinntal, von Telfs her. Ob zwischen Zirl und Innsbruck ein Ort sich findet, den die von West und Ost sich verschiebende kalte Luft nicht erreicht hat, oder ob die beiden Kaltluftgebiete miteinander in Verbindung getreten sind und die Talsohle ganz bedeckt haben, kann nicht angegeben werden. Im Winter, wo der Föhn in Igls oft lange Zeit weht, ohne nach Innsbruck hinabzusteigen, ist anzunehmen, daß die beiden kalten Gebiete in Zusammenhang stehen und daß die an der Ausmündung des

Fig. 6.



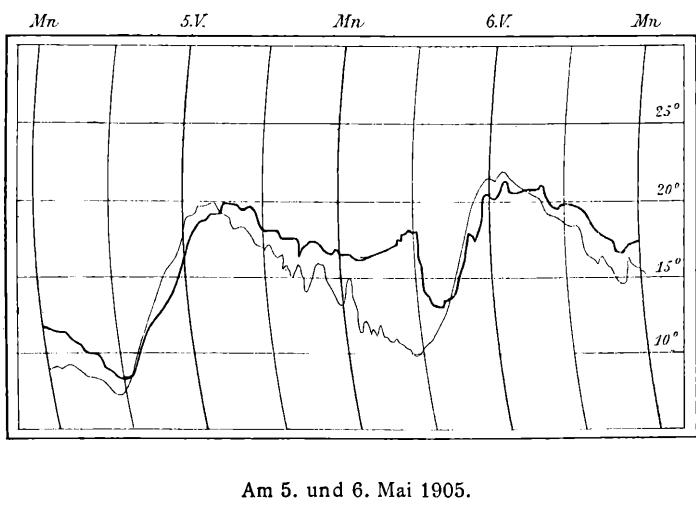
5. und 6. Mai 1905.

Rotholz _____ Innsbruck

Föhntales über Innsbruck durch den Föhn »aufgesaugte« und wegtransportierte kalte Luft immer von neuem durch beiderseitigen Zufluß kalter Luft ersetzt wird. Als unerschöpflich können aber die gewissermaßen als Reservoirs dienenden Kaltluftgebiete im Osten und Westen nicht angesehen werden, wie wir später sehen werden. Für hier genügt der Nachweis, daß Föhnpausen in Innsbruck unter Umständen auch durch Zufluß kalter Luft aus dem Unterinntal her verursacht werden können, ein Fall, der in Föhnstudien I nicht in Betracht gezogen wurde.

Die nachstehend mitgeteilten Mitteltemperaturen zeigen, daß am 5. Mai die Föhnwirkung noch sehr schwach war; am 6. Mai hingegen sind die Temperaturgegensätze zwischen föhnlosem Gebiet und Föhngebiet sehr beträchtlich, wenn man bedenkt, daß die Differenz der Tagesmittel nur auf die Temperaturgegensätze in den Nachtstunden zurückgeführt werden kann. Auch sieht man, wie bei diesem Südostföhn-

Fig. 7.



Am 5. und 6. Mai 1905.

Telfs _____ Zirl

gebiet sehr beträchtlich, wenn man bedenkt, daß die Differenz der Tagesmittel nur auf die Temperaturgegensätze in den Nachtstunden zurückgeführt werden kann. Auch sieht man, wie bei diesem Südostföhn-

¹ Betreffs der Föhnpausen und der für dieselben in Betracht kommenden Kriterien muß auf »Innsbrucker Föhnstudien I« verwiesen werden.

nicht nur Zirl ganz in den Föhnbezirk fällt, sondern daß auch Telfs am 6. Mai wärmer als Rotholz ist, umgekehrt wie bei Süd- und Südwestföhn.

Mittel-temperatur	Tag	Rotholz	Innsbruck	Zirl	Telfs
12 stünd. Mittel	5. Mai	15° 4	15° 2	15° 0	14° 4
	6. Mai	16° 0	18° 9	18° 0	16° 3

Es ist überflüssig, noch weitere Föhnfälle anzugliedern. Es wäre zwar ohne Zweifel von Wert, den Temperaturunterschied zwischen Rotholz, Innsbruck und Telfs in Mittelwerten vieler Fälle darzustellen, aber hiezu ist das zu Gebote stehende Material nicht ausreichend.

Überblicken wir den Verlauf der Föhnwinde im Inntal, soweit dasselbe in Tirol gelegen ist, so kommen wir zu folgenden Schlüssen:

1. Die Föhnwirkung ist im Inntale nur dort von längerer Dauer und bedeutenderem Temperatureffekte, wo ein von den Zentralalpen herabkommendes Seitental in das Inntal einmündet. (Also in Innsbruck und Rotholz; in Telfs kommt Föhn fast nicht vor). Im Föhntal selbst (Silltal) ist der Föhn in höher gelegenen Orten (Igls) von längerer Dauer als an der Einmündung des Föhntales in das Haupttal (bei Innsbruck).

Die absteigende Föhnströmung scheint sich nur in Tälern zu entwickeln und scheint nur dort von den Zentralalpen in die Tiefe hinabzusinken, wo Täler der Luftströmung gewissermaßen einen Weg bieten. Dies stimmt mit einer Beobachtung überein, die ich an Föhntagen häufig auf Bergturen gemacht habe. Wenn man bei starkem Föhn in Innsbruck das Oberinntal besucht, so trifft man dort, übereinstimmend mit unseren Resultaten, Windstille und tiefe Temperaturen. Besteigt man dann im Oberinntal Berge, so kommt man zwar rasch über die kalte Luftsicht in der Talsohle, aber es bleibt windstill oder man findet nur schwache Luftbewegung. Über der kalten Luft im Tale liegt also warme Luft, aber es fehlt die stürmische Luftbewegung, die wir in den Föhntälern treffen. Deshalb fehlt hier auch die Voraussetzung für den mehrfach erwähnten Aufsaugungsprozeß. Erst in großer Höhe, bei Annäherung an die Kammhöhe der Gebirge, wird die Luftbewegung wieder lebhafter. Die Beobachtung, daß die warme Luft nur in gewissen Tälern stürmisch herabsinkt, erscheint mir wichtig.

2. Der Föhnbezirk an der Ausmündung der Föhntäler in das Inntal ist von sehr geringer Ausdehnung. Die Föhnbezirke von Innsbruck und Rotholz stehen nicht im Zusammenhang. In Innsbruck dauert der Föhn länger, in Rotholz ist hingegen die Temperaturerhöhung nach Durchbruch des Föhns bedeutender.

Der verschiedene Betrag der Temperaturerhöhung bei Föhn in zwei Orten, die nur zirka 26 km von einander entfernt liegen, erklärt sich daraus, daß das bei Innsbruck ausmündende Föhntal, das Silltal, durch den niedrigen Brennerpaß 1370 m mit der Südseite der Alpen in Verbindung steht, während aus dem bei Rotholz ausmündenden Zillertal nur Hochpässe, deren niedrigste über 2500 m hoch sind, auf die Südseite hinüberführen. Die verschiedene Dauer des Föhns in Rotholz und Innsbruck würde nur durch eine sehr detaillierte Berücksichtigung der orographischen Verhältnisse zu erklären sein. Ich weise nur auf die gänzlich verschiedene Gestaltung des vorderen Zillertales einerseits, des nördlichen Silltales anderseits hin.

3. Zwischen dem Föhnbezirk von Innsbruck und den konstant oder zeitweise föhnlosen Gebieten im Westen und Osten ergeben sich bei Föhn in Innsbruck Temperaturdifferenzen, die im Tagesmittel bis zu 4 bis 5° betragen können, in den Nachtstunden aber auch auf 10° und darüber anwachsen können.

Die Tatsache, daß die beiden verschieden temperierten Gebiete oft lange Zeit im Gleichgewichte nebeneinander bestehen, zwingt zu der Annahme, daß in der Nähe des Föhnbezirkes die kalte Luft nur eine seichte Bodenschicht bildet, die mit zunehmender Entfernung von der Ausmündung des Föhntales keilförmig anschwillt. Über dem Keil kalter Luft breitet sich warme Luft aus, die nur in der Nähe des Föhntales in stärkerer Bewegung zu sein scheint. An der Grenzfläche findet eine sprungweiser Übergang von niedriger zu absolut höherer Temperatur statt. Die verschiedenen temperierten Luftgebiete können im Gleichgewichte sein. (Siehe die Ausführungen von M. Margules in der bereits zitierten Abhandlung im Hannband der Meteorologischen Zeitschrift über die Helmholtz'sche Trennungsfläche zweier Luftmassen von sprungweise verschiedener Temperatur). Das Gleichgewicht wird gestört werden, wenn im föhnlosen Gebiet nachts durch Ausstrahlung die Temperatur sinkt. Dadurch wird der Temperaturgegensatz verstärkt, die kalte Luft setzt sich gegen die warme in Bewegung und es kommt in den Föhnorten zu Föhnpausen. Die Ursache der Föhnpausen kann in Innsbruck demnach sowohl im Osten wie im Westen liegen.

4. Da der Föhnbezirk an der Ausmündung der Föhntäler ein eng begrenzter ist, finden wir in der Talsohle einen warmen, von der Seite in das Inntal einbrechenden und von zwei lateralen Kaltluftgebieten eingeschlossenen Luftstrom. Dieses lokale Hinabsteigen des Föhns in die Tiefe muß dadurch erklärt werden, daß der warme, durch das Föhntal wehende Wind die kalte Luft an der Ausmündung des Föhntales durch Aufsaugen entfernt. Da in Telfs kein Föhntal ausmündet, fehlt hier auch die hauptsächlichste Bedingung für die Ausbildung eines solchen Aufsaugungsprozesses, was ebenfalls ein Beweis dafür ist, daß der Föhn als stürmischer Wind nur eine Erscheinung gewisser Täler ist.

5. Dem durch eine jähre Temperaturstufe gekennzeichneten Durchbrüche des Föhns in Innsbruck und Rotholz geht zumeist langsame Erwärmung voraus. Eine ähnliche Erwärmung finden wir auch in Telfs, ohne daß Föhn nachfolgt. Während dieser langsamen Erwärmung, die von Luftbewegung begleitet ist (aus West oder Südwest), sind die Talorte kälter als höher gelegene, bereit von Föhn bestrichene Orte. Die langsame Erwärmung steht also mit der Föhnströmung in keinem direkten Zusammenhang, weil wir erst dann in einem Talorte den Föhn als ausgebrochen betrachten dürfen, wenn die potentielle Temperatur gleich jener in höheren, föhnbestrichenen Orten geworden ist.

Die in Punkt 5 besprochene Erscheinung bedarf sowohl einer weiteren Bestätigung wie sie anderseits den Übergang bildet zu den Fragen, die wir in den folgenden Abschnitten untersuchen werden und die mit der Entstehung der absteigenden Luftbewegung bei Föhn enge zusammenhängen.

II. Untersuchungen über den Föhnverlauf auf der Linie Igls—Seefeld—Mittenwald.

Wir haben uns bisher nur mit dem Föhnverlaufe im Inntal befaßt, sowohl im 1. Teile der Innsbrucker Föhnstudien wie auch im Vorstehenden. Der Innsbrucker Föhn kommt von den Zentralalpen herab durch das Silltal, weht quer in und über dem westöstlich streichenden Inntal nach Norden gegen die nördlich des Inntales bis zu 2500 bis 2700 m aufragenden nördlichen Kalkalpen. Wir finden ihn als Südwind auf den Kämmen der Kalkalpen und nördlich derselben steigt der Südwind wieder als Föhn hinab zu den Orten, die am Nordfuße der Alpen liegen, an der Schwelle des flachen Landes. Hier liegt, vom Inntal durch die nördlichen Kalkalpen getrennt, die bayrische, durch häufigen Föhn ausgezeichnete Station Mittenwald, ungefähr in gleicher Höhe wie Igls.

Es drängt sich folgende Frage auf: Warum steigt der Föhn zuerst von den Zentralalpen in das Inntal hinab, um dann wieder zu den Kalkalpen aufzusteigen und nochmals zum Alpenvorland hinabzusinken? Warum überweht er nicht auf dem kürzesten Wege das Inntal? Welches sind die Ursachen, die ihn zu einem ersten Absteigen in das Inntal und zu einem zweiten Absteigen zum Nordfuß der Alpen veranlassen? Da im Unterinntal oft kein Föhn weht, wenn er in Innsbruck stark ist, kann man ja auch nicht annehmen, daß der Föhn in Innsbruck durch das Inntal abfließt.

Mit Rücksicht auf die Vorstellungen, die man sich bisher über die Entstehung der absteigenden **Luftbewegung** bei Föhn gemacht hat, muß man untersuchen, welche Verhältnisse dem Föhn vorausgehen, in der Höhe sowohl wie in den Tälern. Man muß untersuchen, ob der Föhn früher in der nördlichen Randzone der Alpen beginnt oder in dem durch die Kalkalpen von der Ebene geschiedenen Inntal. Eine Reihe von Detailfragen werden nebenbei in Erörterung gezogen werden müssen. Wir wollen bei Untersuchung der Frage, warum unter Umständen potentiell wärmere, also spezifisch leichtere Luft in absteigende Bewegung gerät, keine hypothetische Ansicht voranstellen, sondern werden uns vorerst begnügen, nur Beobachtungstatsachen vorzuführen, so langwierig und ermüdend dieser Weg auch ist.

Der Untersuchung werden vor allem die Beobachtungen folgender Stationen zugrunde gelegt:

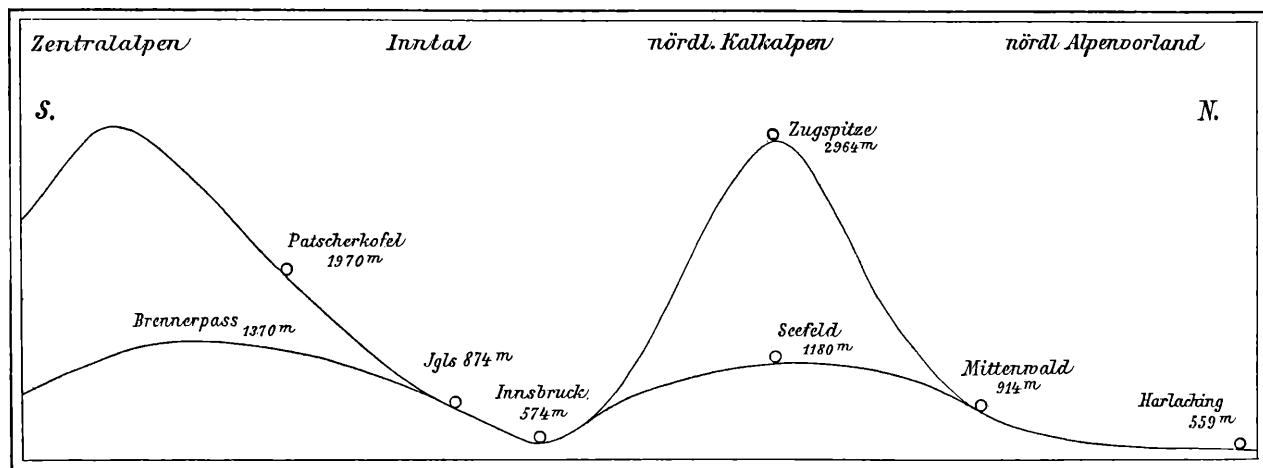
Patscherkofel 1970 m, Igls 874 m, Seefeld 1180 m, Scharnitz 964 m, Mittenwald 914 m,
Harlaching 559 m (bei München), Zugspitze 2964 m.

Die Lage der Stationen ist auf der Kartenskizze der Einleitung ersichtlich. Patscherkofel und Igls sind aus »Föhnstudien I« bekannt. Seefeld liegt in einer breiten und tiefen Einsenkung der nördlichen Kalkalpen, westlich von Innsbruck. Die breite Senkung von Seefeld ist der Ausbildung lokaler Ansammlung kalter Luft günstig. Scharnitz liegt zirka 10 km NNW von Seefeld, zirka 200 m tiefer, in einer kesselartigen Ausbuchtung des Isartales, das hier, von Osten kommend, nördlich umbiegt und sich zirka 1 km nördlich von Scharnitz zu einem Engpass zusammenschürt. Das Talbecken von Scharnitz ist besonders im Winter ein Sammelbecken kalter Luft, für unsere Zwecke daher wenig verwendbar. 6 km nördlich liegt, jenseits des Engpasses und nur 50 m tiefer als Scharnitz, die bayerische Station Mittenwald, mitten in einer weiten, durch Lokaleinflüsse wenig gestörten Talung. Die Thermometerhütte steht in der Sonne, woraus manchmal zu hohe Mittagstemperaturen resultieren. Zirka 80 km NNW (Luftlinie) von Mittenwald liegt in der bayrischen Ebene, ebenfalls an der Isar, Harlaching bei München. Das Hochobservatorium auf der Zugspitze liegt fast 22 km WSW von Mittenwald, 2050 m höher als Mittenwald.

Die Längenunterschiede in der Position der einzelnen Orte sind so unbedeutend, daß man ruhig sagen kann, die Stationen stellen einen Querschnitt durch die Alpen, vom Kamme der Zentralalpen angefangen bis hinab zur bayrischen Hochebene dar, einen Querschnitt in der Föhnrichtung.

Das nachstehende rohe Profil wird das Verständnis mancher Tatsache erleichtern.

Fig. 8.



Querprofil durch das Föhngebiet von Innsbruck und Mittenwald.

Die Lage des Innsbrucker Föhngebietes ist deshalb ungewöhnlich, weil der Föhn im Norden des Föhngebietes nochmals hohes Gebirge trifft, nach dessen Überschreitung wir ein zweites Föhngebiet bei Mittenwald treffen.

1. Föhn am 4. und 5. November 1904.

Die Untersuchung wird mit diesem ungewöhnlich heftigen Föhn begonnen, weil bei der Intensität dieses Föhnfalles und dem ungestörten Verlaufe desselben in Innsbruck erwartet werden kann, daß auch in den übrigen Stationen der Ablauf des Föhns ein möglichst ungestörter ist.

Temperaturverhältnisse und relative Feuchtigkeit vor dem Föhn: Im Inntal herrscht am Morgen des 4. November Temperaturumkehr; Igls ist bedeutend wärmer als die in der Talsohle gelegenen Orte (Innsbruck, Telfs, Rotholz). In Igls und Mittenwald, die gleich hoch liegen, finden wir gleiche Temperatur. In Scharnitz und Seefeld liegen die Temperaturen infolge lokaler Ansammlung kalter Luft sehr niedrig. Seefeld ist gleich temperiert wie der um 700 m höhere Patscherkofel. Die Temperaturdifferenz Patscherkofel—Zugspitze beträgt 4 bis 5°, bei einem Höhenunterschiede von 1000 m. Sehr kalt ist es in der bairischen Ebene, wo Harlaching 559 m eine Morgentemperatur von $-4\cdot3^{\circ}$ verzeichnet, eine niedrigere Temperatur, als wir sie gleichzeitig auf dem Patscherkofel in 1900 m Höhe finden. Auch Wendelstein, 1727 m, verzeichnet die hohe Morgentemperatur von $-1\cdot2^{\circ}$. Wir finden also eine ungemein stabile Temperaturschichtung, potentiell sehr kalte Luft in der Tiefe, potentiell warme Luft in der Höhe, stellenweise ausgesprochene Temperaturumkehr.

Die Hygramme ergeben folgendes: Auf der Zugspitze ist die relative Feuchtigkeit im Sinken seit 4^h p. des 3. November, in Igls und Mittenwald seit 8^h p. des 3. November, so daß am Morgen des 4. November die relative Feuchtigkeit auf der Zugspitze zwischen 75 und 65%, in Mittenwald und Igls bei 65% liegt. In Innsbruck, Scharnitz, Seefeld und Harlaching liegt die relative Feuchtigkeit zwischen 90 und 100%, also nahe dem Sättigungspunkt. Potentiell warme und trockene Luft liegt also über kalter und feuchter. Die Bewölkung ist gering, der Luftdruck liegt bedeutend über dem Normalstande. Die Temperaturschichtung und die Feuchtigkeitsverhältnisse sind antizyklonal. Nach der Wetterkarte vom 4. November liegt das beobachtete Gebiet in der nordwestlichen Randzone einer Antizykline.

Windverhältnisse vor dem Föhn: In Innsbruck weht am 4. November um 7^h a. W₂, in Mittenwald SW₄, Harlaching Kalme, Zugspitze SW₆. In Innsbruck fließt also kalte Luft aus dem Oberinntal durch das Tal abwärts. Dem SW₆ auf der Zugspitze muß der sinkende relativen Feuchtigkeit wegen eine absteigende Komponente zugekannt werden; ganz sicher passiert auf der Zugspitze noch nicht Luft, die auf der Südseite der Alpen aufgestiegen ist. Bemerkenswert ist SW₄ in Mittenwald. An Föhn, der aus größerer Höhe herabkommt, kann nicht gedacht werden, ebensowenig wie in Igls. Beide Orte sind zwar wärmer wie die Talsohle des Inntales und die bayrische Ebene, aber potentiell viel kälter als Patscherkofel, Wendelstein und Zugspitze. Würde am Morgen des 4. November bereits Luft von den Zentralalpen als Föhn nach Igls und Mittenwald hinabwehen, so müßten wir in diesen Orten Temperaturen von 8 bis 12° finden, statt der beobachteten 2 bis 3°. Trotzdem weist auch in Igls und Mittenwald die relative Feuchtigkeit auf absteigende Luftbewegung hin. Da, von lokal gestörten Orten abgesehen, in der ganzen Luftschierte bis in Zugspitzhöhe hinauf die potentielle Temperatur mit der Höhe rasch zunimmt, können wir sagen, daß in der Tiefe potentiell kalte, in der Höhe potentiell warme Luft von den Alpen wegfließt, daß dabei stellenweise absteigende Bewegung vorhanden ist, daß aber noch in keiner Höhenschichte Föhn weht, weil wir nirgends die für Föhn charakteristische Temperaturabnahme mit der Höhe finden. Temperaturumkehr, die geringe, relative Feuchtigkeit in der Höhe, die geringe Bewölkung, der hohe Luftdruck, die allgemeine Wetterlage berechtigen uns, die Verhältnisse vor dem Föhn als antizyklonal zu bezeichnen.

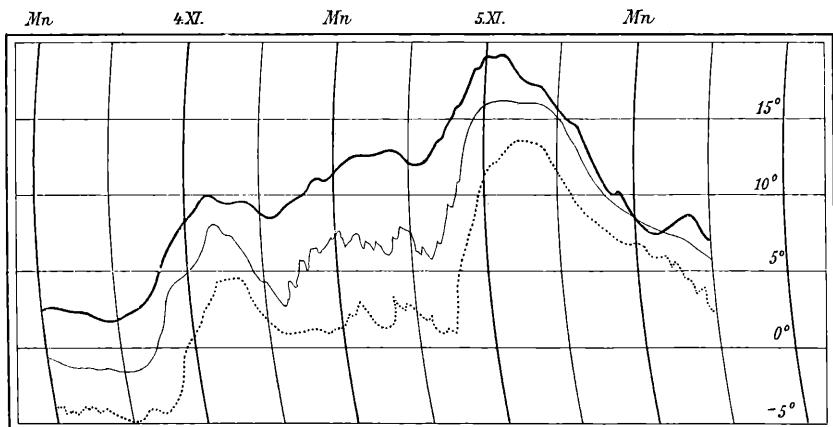
Beginn, beziehungsweise Durchbruch des Föhns: Auf der Zugspitze und auf dem Patscherkofel beginnt Erwärmung um Mitternacht des 3./4. November. Da die tieferen Stationen am Morgen des 4. Novembers noch abkühlen (trotz des SW₄ in Mittenwald!), verringern sich anfänglich die Temperaturdifferenzen zwischen Gipfel und Tal. Um 10^h a. des 4. Novembers bricht Föhn gleichzeitig in Igls und Mittenwald aus; die Temperaturabnahme mit der Höhe zwischen diesen Orten und dem Patscherkofel steigt, auf zirka $1^{\circ}/_{100}m$.

Temperatur-differenz am	Zugspitze-Patscherkofel	Patscherkofel-Igls	Patscherkofel-Mittenwald	Patscherkofel-Seefeld	Patscherkofel-Harlaching
4. Nov. 2 a.	5° 6°	7° 3°	7° 4°	0° 4°	2° 4°
6 a.	4° 4	6° 0	6° 8	— 0° 8	0° 0
Mtg.	4° 6	10° 6	9° 3	2° 3	8° 3
4 p.	2° 5	10° 0	9° 7	4° 5	7° 0
Mittern.	3° 0	10° 7	10° 3	0° 0	2° 7
Höhendiffer.	1000 m	1100 m	1060 m	800 m	1480 m

In Seefeld und ebenso in Scharnitz tritt wohl Erwärmung, im Laufe des Nachmittags aber auch wieder Abkühlung ein. Seefeld wird in der Nacht vom 4. bis 5. November gleich kalt wie der um 800 m höhere Patscherkofel, während Scharnitz gleichzeitig um 5 bis 6° kälter ist als das nur 6 km nördlicher liegende Mittenwald. Die Lage von Scharnitz macht die Störung ohneweiteres verständlich. Durch die drei großen Quelltäler der Isar, die sich hier vereinigen, fließt kalte Luft zu, die infolge der Talverengung nördlich von Scharnitz nicht nach Mittenwald abfließen kann. Weniger verständlich ist die Störung in Seefeld. Dieses breite, in die Kalkalpen eingesenkte Hochplateau fällt im Süden und im Norden steil ab. Man

möchte meinen, daß der in Igls und Innsbruck wehende Föhn gerade über diese niedrigste, breite Einsenkung nach Norden abfließen müßte. Das ist nicht der Fall. Seefeld, das westlich von Innsbruck und von dem bei Innsbruck ausmündenden Föhnthal liegt, ist gleichsam ausgeschaltet aus dem Föhnstrom. Starker Föhn ist eben nur auf die Föntäler beschränkt. Durch Nachfrage in Scharnitz kann man in Erfahrung bringen, daß der Föhn in Scharnitz nur selten von Seefeld herabkommt, sondern immer aus dem südlichsten

Fig. 9.



4. und 5. November 1905.

Mittenwald ————— Scharnitz Seefeld

der Isarquelltäler herausweht, dem Gleirschtale. Die Arbeit würde zu lokales Gepräge bekommen, wollten wir uns mit diesen lokalen Störungsursachen noch weiter beschäftigen. Die Beobachtungen von Scharnitz und Seefeld werden wir künftig nur nebensächlich behandeln. Aber die Tatsache ist von gewisser Wichtigkeit, daß der Föhn in Innsbruck viel früher durchbricht als in dem hoch gelegenen Seefeld. Das in »Föhnstudien I« gezogene Resultat, der Föhn beginne früher in der Höhe, bedarf einer Ergänzung. Der Satz ist nur dann richtig, wenn die zwei zum Vergleiche kommenden Orte im gleichen Föntale liegen.

In der Ebene finden wir eine normale Temperaturamplitude. Harlaching ist morgens gleich kalt wie Patscherkofel, mittags bei heiterem Himmel und SE₂ Erwärmung, abend bei E₂ starke Abkühlung. Es weht also am 4. November in der Ebene kein Föhn, aber die Luft fließt langsam gegen Norden und Westen ab. Harlaching bleibt kälter wie Mittenwald. Um 9 p. des 4. November ist Harlaching bei E₂ um 6° kälter als das um 370 m höher liegende Mittenwald.

Der Föhn beginnt also im Inntal und im nördlichen Alpenvorland in gleicher Höhe gleichzeitig, überweht aber die Ebene, ohne den Boden zu erreichen.

Verlauf des Föhns: Der Föhn verläuft in Innsbruck, Igls und Mittenwald ohne jede Störung. Die Erwärmung beträgt in Innsbruck 19° , in Mittenwald 16° , in Igls 15° , auf dem Patscherkofel 9° , auf der Zugspitze 10° . Diese Unterschiede erklären sich aus der großen Stabilität der Temperaturschichtung vor dem Föhn. Da die Talstationen vor dem Föhn potentiell viel kälter waren als die Höhe, während nach Durchbruch des Föhns die potentielle Temperatur wenigstens bis in Patscherkofelhöhe hinauf gleich wird, muß die Gesamterwärmung in den Talstationen größer werden.

In Harlaching kommt Föhn erst am 5. November zum Ausbruch (7^{h} a.: S_7 bei 52% , 2^{h} p.: SE_2 bei 42%), wobei die Temperatur bis auf $18 \cdot 2^{\circ}$ steigt. Da Harlaching vor dem Föhn kälter war, ist hier der Gesamtbetrag der Erwärmung sogar größer als in den alpinen Föhnorten und beträgt $22 \cdot 5^{\circ}$. Dieser Föhn gelangt also, wenn auch stark verzögert, bis in die Ebene hinab.

In Seefeld und Scharnitz kommt der Föhn am 5. November nur während weniger Stunden zum Durchbruch, ähnlich wie in Telfs und Harlaching. In Seefeld und ganz besonders Scharnitz geht dem Föhn langsame Erwärmung voraus, mit lebhaften Temperaturschwankungen (siehe Diagramm, Fig. 9, p. 16 [000], Scharnitz ist dabei aber um 6° kälter als das nahe Mittenwald, Seefeld gleich temperiert wie der um 800 m höhere Patscherkofel, so daß die langsame Erwärmung sicher nicht durch die Föhnströmung verursacht ist).

In Harlaching findet man in der Nacht vom 4. zum 5. November einen ganz analogen Vorgang. In Igls und Innsbruck ist er nicht zu finden, weil er durch die dem Föhn vorausgehende, normale Erwärmung in den Vormittagstunden verdeckt wird.

Während der ganzen Dauer des Föhns beträgt der Temperaturgradient zwischen Igls—Mittenwald und dem Patscherkofel nahezu 1° pro 100 m . Zwischen Patscherkofel und Zugspitze, also zwischen 2000 und 3000 m beträgt die Temperaturabnahme pro 1000 m im Mittel beider Tage nur $0 \cdot 42^{\circ}$, bei anhaltenden Südstürmen auf der Zugspitze. Der Temperaturgradient ist sogar während des antizyklonalen Stadiums vor dem Föhn größer als während des Föhns. Während des Föhns ist also die Zugspitze potentiell zu warm, das heißt, absteigende Luftströmungen dürften während des Föhns zwischen 2000 und 3000 m nur eine geringe Rolle spielen.

Übersicht: Dem Föhn geht antizyklonale Temperaturschichtung voraus, mit abnehmender Feuchtigkeit in der Höhe. Bereits vor dem Föhn finden wir eine nördlich (im Inntal östlich) abfließende Luftbewegung in den unteren, durch Temperaturinversion ausgezeichneten Schichten. Die Erwärmung beginnt am frühesten auf den Gipfeln. Der Föhn bricht im Inntal und im nördlichen Alpenvorland in gleicher Höhe gleichzeitig aus und kommt auch, stark verzögert, in der Ebene für kurze Zeit zum Ausbruch. Von gleich hohen Orten ist der Gesamtbetrag der Erwärmung in jenem am größten, der vor dem Föhn am kältesten war. In der Luftschihte zwischen Igls—Mittenwald und 2000 m (Patscherkofel) ist nach erfolgtem Ausbruch des Föhns die potentielle Temperatur überall gleich, das heißt, nach erfolgtem Föhdurchbruch ist der Temperaturlauf in den Föhntälern dem Gange in 2000 m parallel, bei 1° Temperaturabnahme pro 100 m . Zwischen 2000 und 3000 m nimmt die potentielle Temperatur mit der Höhe zu. In jenen Orten, in welchen der Föhn später ausbricht als in Igls und Mittenwald, geht dem Durchbruche des Föhns langsame Erwärmung mit Temperaturschwankungen voraus, ohne daß Föhntemperaturen (potentiell gleiche Temperatur wie in der Höhe) erreicht würden.

2. Föhn am 1. und 2. November 1905.

Dieser Föhnfall bietet einige interessante Details.

Verhältnisse vor dem Föhn: Wir müssen bis zum 27. Oktober zurückgehen. An diesem Tage bei sehr hohem Luftdrucke (in Innsbruck Monatsmaximum) Strahlungskälte in der Tiefe, sehr niedrige Temperaturen in der Höhe, dann bei fallendem Druck starke Temperaturzunahme in der Höhe; am 30. Oktober in Innsbruck Föhn, am 31. Oktober föhnig mit Unterbrechung (Regen) bis zum

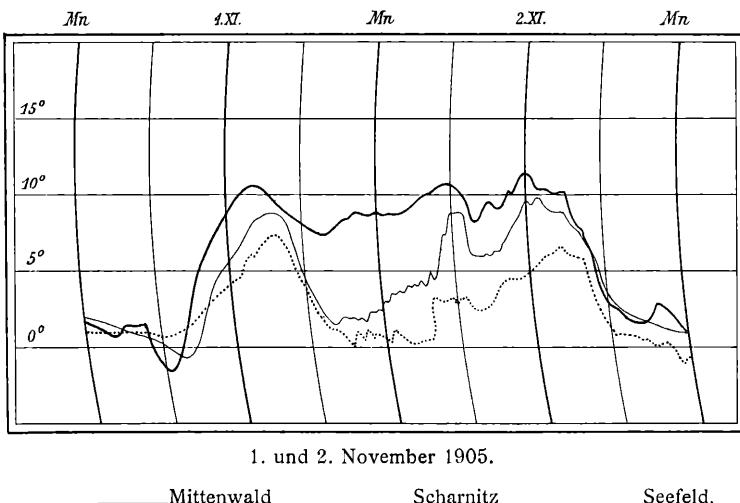
1. November morgens. Die Föhnperiode entwickelt sich also aus typisch antizyklonalen Verhältnissen.

Am 1. November morgens ist die Ebene und das nördliche Alpenvorland kälter als das Inntal; teilweise Temperaturumkehr, Mittenwald gleich kalt wie Seefeld. Im Inntal liegt Bodennebel. Auf der Zugspitze ist die relative Feuchtigkeit im Sinken begriffen und fällt bis 10^h a. des 1. November bis auf 50%, bei leichtem Südwest und geringer Bewölkung. Es herrschen also am Morgen des 1. November antizyklonale Verhältnisse, am Westrande eines Hochdruckgebietes bei niedrigem Luftdruck.

Beginn des Föhns: Der Föhn beginnt in Igls und Mittenwald um Mittag des 1. November; starker Fall der relativen Feuchtigkeit, die gleichzeitig auf der Zugspitze zu steigen beginnt.

Verlauf des Föhns: In Innsbruck, Igls und Mittenwald kurze Föhnpausen am Morgen des 2. November. Bemerkenswert sind Scharnitz und Seefeld. Obwohl der Föhn hier gleichzeitig wie in Mittenwald beginnt, erlischt er bereits wieder zirka um 4 p des 1. November und es tritt in beiden Orten starke Abkühlung ein, bei andauerndem Föhn in Igls und Mittenwald. Um 10 p. des 1. November ist Scharnitz um 6°, Seefeld um 7° kälter wie Mittenwald. In Scharnitz beginnt nun langsame, kontinuierliche Erwärmung mit kleinen Schwankungen, die sich bis Seefeld hinauf erstrecken. (Siehe Diagramm.) Scharnitz bleibt dabei aber um 4 bis 5° kälter wie Mittenwald. In Scharnitz weht also kein Föhn. Dies ersieht man besonders deutlich daraus, daß zirka um 6 a. des 2. November in Scharnitz und Seefeld Föhn wirklich für kurze Zeit durchbricht, wobei Scharnitz fast gleich warm wie Mittenwald wird. Die langsame Erwärmung geht also dem Föhdurchbruch voraus. In Harlaching kommt der Föhn überhaupt nicht zum Durchbruch; es finden sich in der Nacht vom 1. bis 2. November unbedeutende Temperaturschwankungen und frühzeitiges Aufhören der nächtlichen Abkühlung was allerdings auch als eine Art Erwärmung angesehen werden kann.

Fig. 10.



Die Temperaturdifferenz Igls-Zugspitze beträgt unmittelbar vor Durchbruch des Föhns 10 bis 12° und steigt während des Föhns auf 15 bis 16°, bei einer Höhendifferenz von 2100 m; im Mittel aller Föhnstunden ergibt sich ein Gradient von 0,72° pro 100 m. Dieser langsame Gradient erklärt sich nach dem, was früher über die Temperaturabnahme zwischen 2000 und 3000 m gesagt

wurde. Die Zugspitze ist während des Föhns potentiell zu warm. Am ersten Föhntag ist die Zugspitze relativ trocken, am zweiten Föhntag steigt die relative Feuchtigkeit bis zur Sättigung.

Ende des Föhns: Starker Temperaturfall beendet den Föhn in Mittenwald um 3 p des 2. November in Scharnitz um 3 p., in Seefeld um 4 p., in Innsbruck um 5 p., in Igls um 6 p. Die Abkühlung tritt also zuerst im nördlichen Alpenvorland ein, später im Inntal.

Übersicht: Der Föhn entwickelt sich aus antizyklonalen Verhältnissen. Während des Föhns steigt die relative Feuchtigkeit auf der Zugspitze. Vor Durchbruch des Föhns tritt in einzelnen Orten langsame Erwärmung ein, wobei diese Orte kälter bleiben als gleich hohe, föhnbestrichene.

3. Föhn am 18. und 19. November 1905.

Über den Verlauf dieses heftigen Föhns im Inntale siehe p. 7ff. [119]. Leider sind die Hygramme von Scharnitz, Seefeld, Zugspitze unbrauchbar.

Verhältnisse vor dem Föhn: Ein intensiver Kälteeinbruch geht voraus, der in der Höhe (Sonnblick, Zugspitze) Temperaturen von -15° bis -18° bringt. Bis zum Morgen des 18. November sinkt dann in den Alpentälern, im Alpenvorlande, in der Ebene die Temperatur durch Ausstrahlung bei Ausheiterung noch tiefer, während in der Höhe bereits Erwärmung begonnen hat, ebenfalls bei abnehmender Bewölkung. Am Morgen des 18. November tritt im nordalpinen Gebiete das Monatsminimum der Temperatur und das Monatsmaximum des Luftdruckes ein. Ein geschlossenes Hochdruckgebiet lagert über Mitteleuropa (Alpen, Deutsches Reich, Österreich, erstreckt sich bis zum Balkan). Die Alpen liegen am Westrande dieses Maximums.

Temperaturen um 7 a. (18. November):

Harlaching	Mittenwald	Scharnitz	Seefeld	Innsbruck	Iglis	Wendelstein	Patscherkofel	Schmittenhöhe	Zugspitze	Sonnblick
$-6^{\circ}30'$	$-5^{\circ}50'$	$-9^{\circ}70'$	$-12^{\circ}80'$	$-6^{\circ}00'$	$-6^{\circ}00'$	$-11^{\circ}50'$	$-9^{\circ}00'$	$-12^{\circ}30'$	$-11^{\circ}00'$	$-14^{\circ}10'$

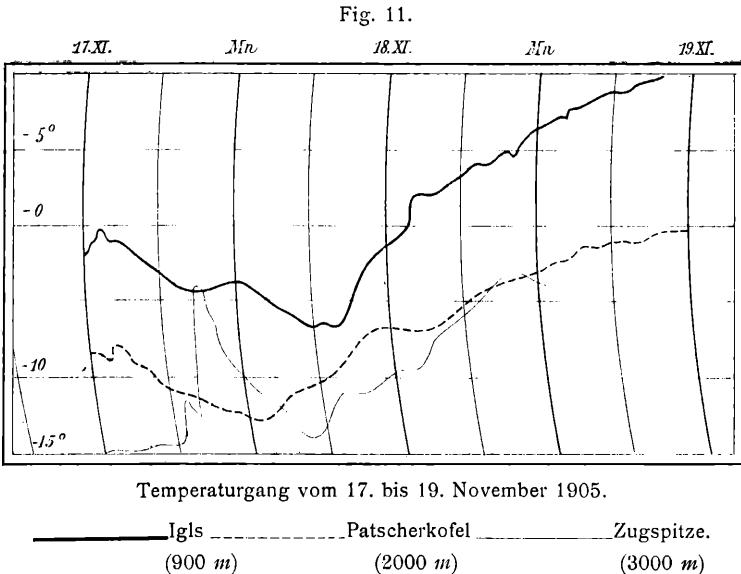
Relativ warm sind die höchsten Gipfel, Sonnblick und Zugspitze. Stellenweise finden wir Temperaturumkehr, im großen und ganzen sehr stabile Temperaturschichtung. Die Höhe von 2000 m (Patscherkofel, Wendelstein, Schmittenhöhe) ist gegenüber der Höhe von 3000 m potentiell kalt. Die Verhältnisse sind typisch antizyklonal.

Windrichtung und Stärke um 7 a. (18. November):

Harlaching	Mittenwald	Innsbruck	Wendelstein	Schmittenhöhe	Zugspitze	Sonnblick
SE ₁	S ₂	Kalme	SW ₆	E ₃	SW ₆	SW ₃

Die Luft strömt im allgemeinen im ganzen Gebiete von den Alpen weg in nördlicher Richtung. In den tiefsten, potentiell kältesten Schichten ist die Strömung am langsamsten, am raschesten anscheinend in der Schichte zwischen Wendelstein und Zugspitze, in der die potentielle Temperatur mit der Höhe überaus rasch zunimmt. Obwohl der Wind überall aus der Föhnrichtung weht, kann von Föhn nicht gesprochen werden, wegen der überaus langsamen Temperaturabnahme mit der Höhe. Kalte Luft fließt also von den Alpen nordwärts ab, darüber fließt potentiell wärmere Luft in gleicher Richtung. Föhnartiges Absteigen der Luft findet wohl nur in den höchsten Schichten statt, ohne bis 2000 m hinabzudringen. Zwischen 2000 m und 3000 m hätten wir dann eine Fläche zu suchen, in der die Temperatur sprungweise sich ändert.

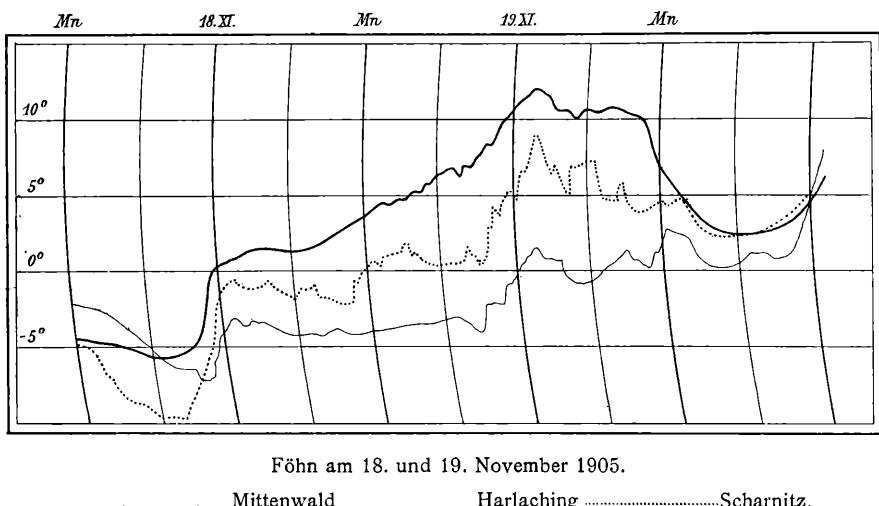
Beginn der Erwärmung, Ausbruch und Verlauf des Föhns: Auf dem Patscherkofel beginnt Erwärmung um Mitternacht des 17. und 18. November. Viel bemerkenswerter sind die Vorgänge auf der Zugspitze. (Siehe Diagramm). Hier beginnt die Erwärmung bereits am 17. November um 6^hp. und zwar steigt die Temperatur in zwei jähnen Stufen um fast 12° und fällt dann langsam wieder um 10°



ab, bis um 5 a. des 18. November wieder, diesmal langsame, Erwärmung beginnt, die bis um 9 p. des 18. November 12° beträgt, worauf die Temperatur konstant bleibt. Die rasch verlaufende, nächtliche Schwankung hat also die Temperatur temporär auf den gleichen Betrag erhöht, der später, während des Föhns im Tale, im langsamen Anstiege wieder erreicht wird. Die Erscheinung kann nur so gedeutet werden, daß ein Luftstrom viel höherer Temperatur schon lange vor Beginn der endgültigen Erwärmung oberhalb der Zugspitze weht und für ganz kurze Zeit sich einmal, gewissermassen als Vorläufer, zur Zugspitze niedersetzt. Während dieser kurzen Schwankung ist die Zugspitze gleich warm, teilweise sogar wärmer als Orte, die um mehr als 2000 m tiefer liegen.

Die Erwärmung auf dem Patscherkofel beginnt um Mitternacht und dauert an fast bis um Mittag des 19. November. In Igls beginnt der Föhn um 2 p. des 18. November, scharf markiert durch eine kleine Temperaturstufe. In Mittenwald beginnt Föhn anscheinend etwas früher als in Igls, doch bietet sich für

Fig. 12.



Föhn am 18. und 19. November 1905.

Mittenwald Harlaching Scharnitz.

diese Annahme kein ganz sicheres Kriterium. Mittenwald notiert bereits um 7 a. S_2 (bei tiefer Temperatur und hoher Feuchtigkeit!), um 2 p S_4 , abends S-SW-W, Stärke 6 bis 7. Von 2 p an weht in Mittenwald sicher Föhn.

In Innsbruck kommt der Föhn erst am 19. November zum vollen Durchbruch, ebenso in Rotholz (siehe p. 7, [119]). Wir finden in Innsbruck zwar in der Nacht vom 18. bis 19. November langsame Erwärmung mit lebhaften Schwankungen, in Rotholz ebenfalls langsame Erwärmung. Dabei notiert Innsbruck um 9 p. SW_3 , um 7 a. (19. November) SW_4 , aber beide Orte sind noch viel kälter als Igls und Mittenwald. Es fließt hier also noch kalte Luft, nicht Föhn. Letzterer kommt in Innsbruck erst 20 Stunden, in Rotholz 26 Stunden später als in Igls zum Durchbruch.¹ Wir finden also in Innsbruck vor Durchbruch des Föhns ein Abfließen kalter Luft, gerade so wie in Mittenwald. Nur tritt in Mittenwald der Vorgang früher ein.

In Scharnitz, Seefeld, Harlaching kommt der Föhn überhaupt nicht zu vollem Durchbruch. Wir finden in diesen Orten ähnlich wie in Telfs langsame Erwärmung, ohne daß Föhntemperaturen eintreten würden. Es bestehen jedoch graduelle Unterschiede zwischen den einzelnen Orten. In Scharnitz finden wir neben der langsamen Erwärmung starke Temperaturschwankungen, welche die Temperatur temporär

¹ Daß ein Beobachter schon vorher Föhn notiert, ist erklärlich. Er konstatiert Wind aus der Föhnrichtung, fühlt die langsame Erwärmung und die Temperaturschwankungen, er sieht die bei Föhn typische Färbung der Berge und die Föhnmauer. Aber er hat keine Ahnung, daß es im Tale noch viel zu kalt ist. Unsere Kriterien stehen ihm nicht zu Gebote. Sie ergeben sich erst aus dem Vergleiche mehrerer Stationen.

fast bis auf Föhnhöhe erwärmen. Am kältesten bleibt die Ebene und das Oberinntal trotz langsamer Erwärmung. In Harlaching steigt die Temperatur nicht viel höher als in Seefeld, das 600 m höher liegt und selbst zu kalt ist. Die Ebene ist während des Föhns um 10° kälter als das höher gelegene Mittenwald. Die kalte Luft bleibt während des Föhns in der Ebene liegen — ebenso im Oberinntal (siehe p. 8 [120] — der Föhn erreicht den Boden der Ebene nicht, sondern weht über derselben nach Norden.¹

Diese Verhältnisse spiegeln sich auch in den nachstehend mitgeteilten Temperaturdifferenzen wieder:

Temperatur-differenz	Patscherkofel—Zugspitze	Igls—Patscherkofel	Mittenwald—Patscherkofel	Innsbruck—Patscherkofel	Seefeld—Patscherkofel	Harlaching—Patscherkofel*
Höhendifferenz	1000 m	1100 m	1060 m	1400 m	800 m	1410 m
18. Nov. 2 a.	0°7	6°3	6°5	7°7	4°0	8°5
6 a.	3°6	4°7	4°5	4°5	-0°5	5°0
Mittag	3°2	4°6	6°8	5°5	1°8	3°3
6 p.	0°3	8°7	6°0	5°3	1°0	1°7
19. Nov. Mittern.	0°1	9°9	8°0	6°8	1°7	0°3
6 a.	2°1	10°4	8°2	3°2	0°2	-1°3
Mittag	3°0	11°5	10°2	11°2	2°2	0°2
6 p.	3°0	10°6	11°3	12°3	2°7	-0°5

* Die Differenz Harlaching—Patscherkofel dürfte nur bis auf $\pm 1^{\circ}$ genau sein.

Daß besonders in der Ebene die kalte Luft liegen bleibt, sieht man an dieser Zusammenstellung sehr gut. Harlaching 559 m ist während des Föhns gleich temperiert wie der um 1410 m höhere Patscherkofel.

Wir können alle uns zur Verfügung stehenden Stationen demnach in 3 Gruppen teilen: 1. Stationen, in welchen der Föhn ungestört weht (Igls, Mittenwald); 2. Stationen, in welchen der Föhn gegenüber den Stationen der ersten Gruppe sehr verspätet durchbricht und in welchen dem Föhn langsame Temperaturerhöhung vorausgeht. (Innsbruck, Rotholz); 3. Stationen, in welchen der Föhn überhaupt nicht zum Durchbruch kommt und in welchen wir nur langsame Erwärmung finden, ohne daß die Temperatur den Föhn-betrag erreichen würde (Telfs, Harlaching, Seefeld, Scharnitz).

Erklärungsversuch, die langsame Erwärmung in den föhnlosen Orten und vor Durchbruch des Föhns in den Föhnorten selbst betreffend.

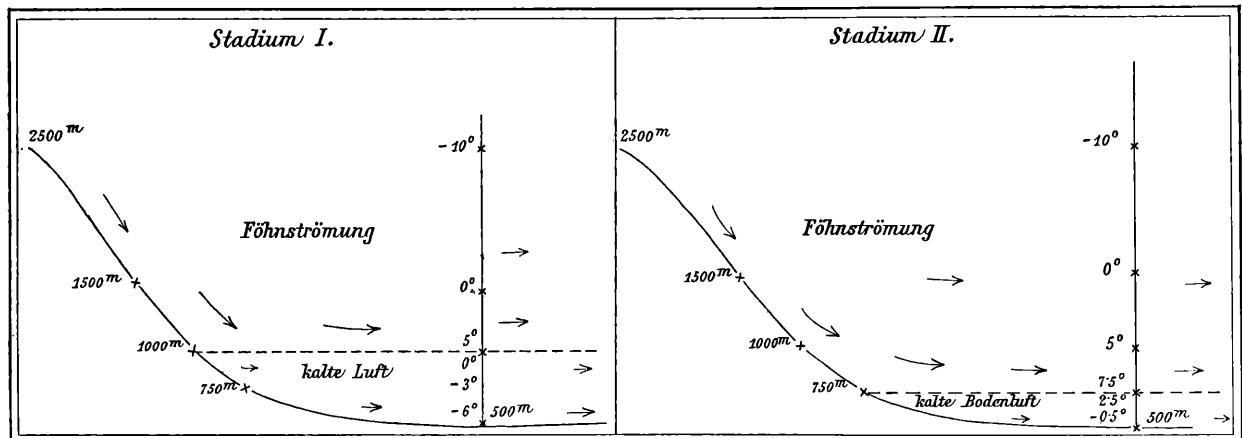
Um der weiteren Untersuchung gewissermaßen ein Ziel zu geben, wird versucht, die gefundenen, komplizierten Vorgänge zu erklären. Vor dem Föhn finden wir in den tieferen Luftsichten meist eine Inversionsschichte, die in abfließender Bewegung ist. Wenn Luft auf der Nordseite der Alpen in abfließender Bewegung ist, wird Luft zum Ersatz der abfließenden zuströmen müssen. Horizontaler Zufluß von Luft

¹ Die Annahme, daß der Föhn in der nördlichen Randzone der Alpen erlischt, weil er in den nördlich vorgelagerten Ebenen nicht angetroffen wird, ist wenig wahrscheinlich. Er fließt vielmehr in einer Höhe von wenigen Hektometern über dem Boden und wird unter Umständen durch Drachenauftiege weit ab von den Alpen konstatiert (siehe Met. Zeitschr., 1909, Heft 5, p. 219). Doch kann der Föhn auch in der Ebene (siehe Harlaching am 4. und 5. November 1905) zum Boden niedersinken, dadurch, daß die kalte Luft abfließt oder dadurch, daß der warme Föhn die kalte Bodenschicht aufsaugt. Bei großer vertikaler Mächtigkeit kalter Bodenschichten kann der Föhn durch das Aufsaugen und Wegtransportieren der kalten Luft allmählich zum Erlöschen kommen, weil mit diesem Aufsaugen eine Dämpfung der Bewegung, ein Verlust an kinetischer Energie verbunden ist. Die kalte Luft wird ja dabei der Schwerkraft entgegen bewegt, wobei Energie verbraucht wird, die in der kinetischen Energie des warmen bewegten Luftstromes nur in begrenztem Ausmaße zur Verfügung steht. Die Betrachtungsweise geht auf Margules zurück.

ist nur in sehr beschränktem Maße möglich, weil die im Süden aufragende Alpenkette horizontalen Luftzufluß hindert. Als Ersatz der kalten abfließenden Luft wird sich deshalb Luft aus der Höhe herab senken. Die Luft in der Höhe ist an sich potentiell wärmer und erwärmt sich beim Absteigen um 1° pro 100 m. Wir beobachten aber auch außerdem langsame Temperaturzunahme an der Basis der kalten Inversionsschicht, die nicht mit der Föhnströmung in der Höhe in Zusammenhang gebracht werden kann. Durch das Abfließen der kalten Luft verringert sich die vertikale Mächtigkeit der Inversionsschicht. Als Ersatz der abfließenden, kältesten, untersten Schicht der Inversionsschicht sinken ursprünglich höher liegende, potentiell viel wärmere Schichten der Inversionsschicht herab, wodurch am Boden Erwärmung eintritt. Aber wir haben es noch immer mit Luft zu tun, die der Inversionsschicht angehört, also potentiell kälter ist als die Föhnströmung. Erst wenn der letzte Rest der Inversionsschicht abgeflossen ist oder durch Aufsaugung entfernt worden ist, bricht Föhn durch und es erfolgt sprungartiger Temperaturanstieg.

Wir wollen diese Ansicht mit Hilfe sehr roher Skizzen verfolgen. Die beiden Skizzen sollen den Abfall der Alpen zur bayrischen Ebene darstellen, von der Höhe von 2500 m bis hinab zu 500 m. Über

Fig. 13.



einem Punkte in der Ebene (500 m) errichten wir eine Vertikale, neben die wir die Temperaturen in verschiedenen Höhen schreiben.

Stadium I. Föhn weht bereits bis 1000 m hinab. Temperatur in 2500 m -10° , in 1000 m $+5^{\circ}$. In der Tiefe liegt eine kalte Inversionsschicht; zwischen 500 bis 1000 m nimmt die Temperatur von -6° bis 0° zu. Auch diese kalte Luftmasse ist in nördlich abfließender Bewegung. An der gestrichelten Grenzfläche zwischen kalter Luft und Föhnströmung nimmt die Temperatur sprungartig um 5° zu. In einem Orte, der knapp unterhalb 1000 m liegt, wird bei geringem Tieferrücken der Föhnströmung die Temperatur plötzlich um 5° steigen. Eine Abnahme der vertikalen Mächtigkeit der kalten Inversionsschicht muß mit einem Herabsinken des Föhns verbunden sein, weil die Alpen einen horizontalen Luftzufluß nicht gestatten.

Stadium II. Durch Abfließen hat sich die vertikale Mächtigkeit der kalten Luftsicht um 250 m verringert, wodurch sich die Föhnströmung um den gleichen Betrag gesenkt hat. Oberhalb 1000 m hat sich nichts geändert. In der Höhe von 750 m, oberhalb der herabgesunkenen Grenzfläche ist Föhn durchgebrochen und eine Temperatursteigerung von 10.5° eingetreten. Knapp unterhalb der Grenzfläche finden wir eine viel tiefere Temperatur, obwohl auch hier Erwärmung eingetreten ist. Denn die oberste Schicht der Inversionsschicht hat sich um 250 m gesenkt und dabei um 2.5° erwärmt. Ebenso ist die Luftsicht, die vorher in 750 m lag (-3°) zum Boden herabgesunken. Hätten wir es in der Inversionsschicht nur mit absteigender Luft zu tun, so würden wir am Boden -0.5° , in 250 m Höhe 2.5° treffen, also gegenüber dem ersten Stadium beträchtliche Erwärmung. In Wirklichkeit aber fließt die kalte Luft auch horizontal nördlich ab, wodurch Luft aus dem Alpenvorland in die Ebene hinaustransportiert wird. Die horizontal

fließenden und die absteigenden Luftströme werden sich mischen, wodurch die Erwärmung verstärkt oder vermindert werden kann. In diesem Falle können wir den Vorgang auch in rohesten Schätzung nicht mehr quantitativ verfolgen. Aber wir sehen, wie durch das Abfließen der kalten Luft auch innerhalb der Inversionsschicht Temperaturänderungen eingeleitet werden, die mit der Föhnströmung nicht in Zusammenhang stehen, sondern ein Vorstadium darstellen. Ob der letzte Rest der Inversionsschicht verschwindet oder nicht, das hängt von Faktoren ab, die wir hier nicht berücksichtigen können. Würde in unserem Beispiel der Föhn bis in die Ebene durchbrechen, so würde in 500 m Höhe eine Föhn-temperatur von 10° eintreten. Die Gesamterwärmung wäre dann 16°. Dem Durchbruche ging die langsame Erwärmung von -6° auf 0,5° voraus, eine Folge des Abfließens der Inversionsschicht, worauf weitere sprungartige Erwärmung bei Durchbruch des Föhns erfolgt. Die Diagramme von Innsbruck und Rotholz zeigen diese ganze Entwicklung auf das schönste, während Telfs, Harlaching, Scharnitz, Seefeld über Stadium II nicht hinwegkommen. Denn selbstverständlich läßt sich die ganze Betrachtungsweise auf die Vorgänge in den Tälern in gleicher Weise anwenden. Ein Unterschied ergibt sich nur insoferne, als wir es in der Ebene mit einer ungemein ausgedehnten Schichte kalter Luft zu tun haben, in den Tälern mit einer durch die Bergkämme eng begrenzten. An den Ausmündungen der Föhntäler in das Inntal wird also auch der Aufsaugungsprozeß eine größere Rolle spielen neben dem Abfließen der kalten Luft.

Die Höhe der kalten Luftsicht können wir vor dem Föhn bis in beliebige Höhe erstrecken. Es muß nicht in der ganzen Luftsicht Temperaturumkehr herrschen, aber unter allen Umständen muß die Temperaturschichtung sehr stabil sein. Fließt die kalte Luft ab, so sinkt die potentiell wärmere Luft aus der Höhe nach. Wir bekommen hiendurch eine ziemlich bestimmte Vorstellung über die Entstehung der absteigenden Luftbewegung auf der Nordseite der Alpen, die dann im weiteren Verlaufe in den Tälern als Föhn auftritt.¹ Der weitere Verlauf der Untersuchung wird den Wahrscheinlichkeitswert dieser Hypothese erhöhen. Die Frage nach den Ursachen der abfließenden Bewegung der Inversionsschicht, die wir als Beobachtungstatsache gefunden haben, lassen wir vorerst unerörtert. — Wir haben der Besprechung des Föhns vom 18. und 19. November noch einige Bemerkungen beizufügen.

Temperaturabnahme zwischen 2000 und 3000 m; Gesamtbetrag der Erwärmung: Wie der Tabelle auf p. 21 [133] zu entnehmen ist, ergeben sich während des Föhns im Tale zwischen Patscherkofel und Zugspitze so geringe Temperaturdifferenzen, daß die Luftsicht zwischen 2000 und 3000 m fast als isotherm angesehen werden kann, wobei durchwegs stürmische, südliche Winde wehen. Die Zugspitze ist potentiell zu warm. Würde Luft aus Zugspitzhöhe nach Igls und Mittenwald kommen, müßten wir Temperaturen von 17° statt solcher von 10 bis 12° treffen. Eine Erklärung der geringen Temperaturdifferenz Patscherkofel—Zugspitze ist wohl in folgender Richtung zu suchen: Den Patscherkofel kann Luft bestreichen, die von der Südseite über den niedrigen Brennerpaß (1370 m) auf die Nordseite übertritt, also auf der Südseite nicht bis Zugspitzhöhe emporgestiegen ist. Der Südwind auf der Zugspitze führt aber Luft, die auf der Südseite bis 3000 m aufgestiegen ist und dann von den Zentralalpen als horizontaler Luftstrom zur Zugspitze fließt. Dann finden wir als Folge der orographischen Verhältnisse auch auf der Föhnseite der Alpen zwischen 2000 und 3000 m die gleiche langsame Temperaturabnahme wie auf der Luvseite. Innerhalb der Kondensationszone nimmt aber auf der Luvseite die potentielle Temperatur mit der Höhe rasch zu. Diese Erklärung faßt die geringe Temperaturdifferenz Patscherkofel—Zugspitze also als vorwiegend lokale Erscheinung auf, wodurch sie für uns an Interesse verliert.

Da die Zugspitze vor dem Föhn kälter ist als der Patscherkofel, während des Föhns aber fast gleich warm wird, ist der Gesamtbetrag der Erwärmung auf der Zugspitze größer (16° gegenüber 12°). In den übrigen Stationen stellt sich die Totalerwärmung, wie folgt:

Das Absteigen warmer Luft bei Föhn erklärt sich also auf ganz andere Weise als das Absteigen kalter Fallwinde. Hierüber noch später.

Rotholz 22°, Innsbruck 19, Mittenwald 19, Igls 17·5, Scharnitz 17·5, Seefeld 17, Harlaching 10°

Die Unterschiede erklären sich leicht aus früheren Erörterungen.

Nach erfolgtem Föhndurchbruch geht die Temperatur in Igls und Mittenwald parallel jener auf dem Patscherkofel. Die Erwärmung, die wir nach erfolgtem Durchbruch des Föhns im Tale beobachten, ist bedingt durch die Temperaturzunahme in der Höhe. Man begegnet vielfach der Ansicht, daß bei Föhn im Tale sich in den Temperaturverhältnissen größerer Höhen nichts ändere.

Dies gilt annäherungsweise nur für die allerdings sehr häufigen, leichten Föhnfälle. Beobachten wir hingegen bei Föhn so bedeutende Erwärmung wie am 4. und 5. und am 18. und 19. November 1905, so geht man mit der Annahme, daß auch in der Höhe von 3000 m noch bedeutende Temperaturerhöhung zu finden sei, fast nie fehl.

Ende des Föhns: In Mittenwald endet der Föhn am 19. November um 10^h 30^m p., in Innsbruck um 11^h 45^m p., in Igls am 20. November um 2^h a., kommt aber in letzterem Orte noch einmal zum Ausbruch und erlischt gänzlich erst am 20. November um 6^h p. Der Föhn weht also in den inneren Alpentälern länger als im Alpenvorlande. Das Ende des Föhns wird in den Föhnorten durch den Einbruch kalter Luft herbeigeführt, die sich unter die Föhnströmung einschiebt. Während auf der Zugspitze am 20. November noch durchaus südliche Winde wehen, verzeichnet Mittenwald Nordwestwinde.

Ganz anders markiert sich das Föhnende in jenen Orten, in welchen der Föhn nicht durchgebrochen ist, also in Harlaching und Telfs. Die kalte Luft, die in den Föhnorten starke Abkühlung erzeugt, ist wärmer als die Luft in den fohnlosen Orten, so daß hier das Föhnende durch Erwärmung markiert ist. Diese Erwärmung tritt in Harlaching mit Sturm in der Nacht vom 19. bis 20. November ein, in Telfs als ausgesprochene Temperaturstufe um 8p des 20. November ein, also gerade zu jener Zeit, wo in Igls das gänzliche Erlöschen des Föhns durch Abkühlung und mächtigen Anstieg der relativen Feuchtigkeit gekennzeichnet ist. Während Igls vorher wärmer als Telfs war, wird es jetzt kälter, es stellt sich also normale Temperaturschichtung ein. In geringer Höhe über diesen »fohnlosen« Orten, wo vorher ja auch warme Luft strömte, tritt natürlich Abkühlung ein, so daß wir am Boden trotz der Erwärmung starke Drucksteigerung finden können.

Übersicht: Dem Föhn gehen typisch antizyklonale Verhältnisse voraus mit hohem Luftdruck bei großer Kälte in der Tiefe, Erwärmung in der Höhe. Der Föhn bricht im Inntal und im nördlichen Alpenvorland ungefähr gleichzeitig aus, kommt in der Ebene und im Oberinntal nicht zum Durchbruch. Die langsame und relativ geringe Erwärmung in den letztgenannten Gegenden ist nicht auf Föhn, sondern darauf zurückzuführen, daß die kalte Inversionsschichte selbst in abfließender Bewegung ist, wodurch potentiell wärmere Luftsichten zum Boden niedersinken, ohne daß die Föhnströmung selbst den Boden erreicht. Das Föhnende tritt im Alpenvorlande früher ein als im Inntal. Die Luft, die in das Föhngebiet einströmt und den Föhn zum Erlöschen bringt, ist nur im Vergleich zu den hohen Föhntemperaturen kalt, aber wärmer als die Temperatur in den fohnlosen Orten. Da in letzteren die Erwärmung nur auf die untersten Luftsichten sich beschränkt, tritt überall Drucksteigerung ein. Während des Föhns ist die Höhe von 3000 m potentiell viel wärmer als die ganze Luftmasse unterhalb dieser Höhe.

4. Föhn vom 9. bis 12. März 1905.

Verhältnisse vor dem Föhn: Ein geschlossenes Hochdruckgebiet lagert am Morgen des 9. März über den Alpen und Südfrankreich. In den Tälern und in der Ebene tiefe Temperaturen bei hohem Druck; in der Höhe ebenfalls sehr kalt, bei Aufheiterung nach Kälteeinbruch am 8. März. Am kältesten ist es im nördlichen Alpenvorlande; im Inntal und in der Ebene gleich hohe Temperaturen. Es notiert um 6 a Harlaching —2·7° bei S₁, Mittenwald —6·5° bei SW₄, Scharnitz —7·9°, Seefeld —7·0°, Innsbruck —2·2° bei S₀, Igls —3·7°, Zugspitze —17·0° bei N₅ (um 7 a nur mehr —13·5°). Die Temperaturabnahme zwischen Igls-Zugspitze ist rasch, 0·7° pro 100 m. Soweit Windnotierungen vorliegen,

beweisen sie, daß die potentiell kalte Luft in der Tiefe in nördlich abfließender Bewegung ist, besonders stark in Mittenwald; dabei ist Mittenwald noch sehr kalt. Auf der Zugspitze weht gleichzeitig noch Nordwind. In der Höhe weht also noch Wind gegen das Gebirge, in der Tiefe vom Gebirge weg.

Beginn der Erwärmung: Auf der Zugspitze beginnt rasche Erwärmung am 9. März um 7 a., die in langsame Erwärmung übergeht. Gleichzeitig fällt die relative Feuchtigkeit bis 60%. In Mittenwald beginnt langsame Erwärmung um 5 a. mit SW₄, bleibt aber feucht bis 9 a., wo tiefer Fall der relativen Feuchtigkeit den Durchbruch des Föhns anzeigt. In Igls lag die Feuchtigkeit vor dem Föhn niedriger als in Mittenwald; Föhn bricht um 8 a. durch, also fast gleichzeitig wie in Mittenwald. Die übrigen Stationen sind stark gestört, sie bleiben auch während des Föhns meist potentiell kälter als die Föhnorte.

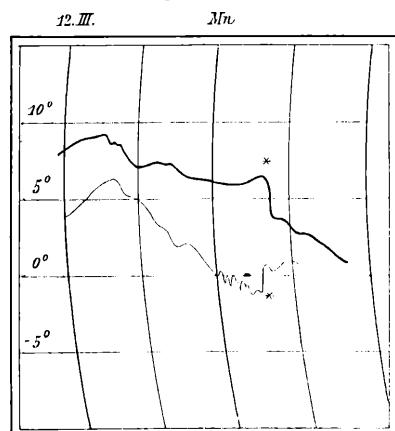
Verlauf des Föhns: Eine Föhnpause großen Stils, die nicht auf lokale Ursachen zurückgeführt werden kann, unterbricht der Föhn am 10. März. Die Böe erstreckt sich bis in Zugspitzhöhe und breitet sich von Norden gegen Süden aus. Es lagert sich im Föhngebiete kalte Luft, die bald wieder in abfließende Bewegung gerät. Um 9 p. des 10. März notiert Mittenwald bereits wieder S₃, bei hoher Feuchtigkeit und niedriger Temperatur, Harlaching SW₅ bei starkem Fall der Feuchtigkeit und einer Temperatur, die um 5·7° höher ist als in Mittenwald. In Seefeld sinkt die Feuchtigkeit bereits seit 3 p. In Igls beginnt Föhn wieder um 10 p., in Mittenwald um 2 a. des 11. März. Vorher finden wir in Mittenwald Abfließen kalter Luft. Der Wiederausbruch des Föhns geht also in gleicher Weise vor sich wie der erste Beginn am 9. März. Der Föhn steigt nieder, entsprechend dem Abflusse der kalten Luft. Die Zugspitze wird wieder trocken und warm bis zum Ende des Föhns.

Einige Bemerkungen über den Einbruch der Böe und den Wiederausbruch des Föhns sind notwendig. Föhn beginnt am 9. März damit, daß von dem alpinen Luftdruckmaximum Luft gegen eine Depression abfließt, die nördlich von Schottland liegt. Nach Abfluß der potentiell kalten Luft in der Tiefe senkt sich die potentiell wärmere Luft der Höhe als Föhn nieder. Am 10. März ist die Depression bis Südkandinavien vorgerückt, in Mitteleuropa wehen stürmische Südwestwinde, der Föhn hält an, bis die Nordseite der Alpen in den Bereich der Rückseite der Depression kommt. Es erfolgt böenartiger Einbruch kalter Luft bis in Zugspitzhöhe hinauf mit starker Drucksteigerung in der Tiefe; auf der Zugspitze Windwechsel (7 a. SW₆, 2 p. WNW₆). Der Föhn erlischt zuerst im nördlichen Alpenvorlande, dann in den inneren Alpentälern. Die Depression wird rückläufig und liegt am 11. März über Irland. In West- und Mitteleuropa setzen wieder stürmische Südwestwinde ein, die kalte Luft fließt ab; es wiederholt sich der gleiche Vorgang wie am 9. März, Föhn bricht neuerdings durch. Die Böe stellt also nichts wie eine große und sehr hoch reichende Föhnpause dar. Die kalte Luft breitet sich sehr rasch aus; Eintritt der Böe in Harlaching um 10 a., in Mittenwald 11 a., Scharnitz um Mittag, Seefeld 1 p., Telfs 1 p., Innsbruck und Igls 2 p.

In Zugspitzhöhe strömt während des Föhns potentiell wärmere Luft als in den Tälern. Die Temperaturabnahme zwischen Igls und Zugspitze beträgt im Mittel der vier Tage 0·63° pro 100 m. Nach Früherem müssen wir annehmen, daß bis zirka 2000 m hinauf der Föhngradient herrscht, daß aber dann zwischen 2000 m und 3000 m die Temperaturabnahme eine sehr langsame ist.

Ende des Föhns: In Mittenwald erlischt der Föhn um Mitternacht des 12./13. März, in Innsbruck um 2 a. des 13. März, in Igls um 4 a.; im Inntale also um 6 Stunden später als in gleicher Höhe des Alpenvorlandes. In Scharnitz und Seefeld war schon früher, aus lokalen Ursachen, langsame, aber sehr beträchtliche Abkühlung eingetreten. Auf den Einbruch kalter Luft, der in Igls und Mittenwald den Föhn beendigt, reagieren diese bereits föhnlosen, abgekühlten Stationen mit einer raschen, wenn auch nicht starken Erwärmung, die zeitlich genau mit der raschen Abkühlung in Igls zusammenfällt (siehe Diagramm). Hierüber wurde das nötige bereits auf p. 24 [136] gesagt. Bei oberflächlicher Betrachtung könnte man glauben, in Scharnitz und Seefeld breche neuerdings Föhn durch. Aber gleichzeitig steigt die relative Feuchtigkeit sehr stark, wodurch der Unterschied gegenüber den Temperaturstufen bei Durch-

Fig. 14.



Föhnende (*) am 13. März 1905.
Igls Seefeld.

bruch des Föhns gegeben ist. — Die Erwärmung der fohnlosen Gebiete bei gleichzeitiger Abkühlung in den Föhnorten ist eine häufige, aber durchaus keine regelmäßige Erscheinung.

Übersicht: Dem Föhn gehen antizyklonale Verhältnisse voraus. Noch vor Durchbruch des Föhns ist in den Föhnorten kalte Luft in abfließender Bewegung, ein Vorgang, der sich wiederholt, nachdem das Gebiet temporär bis hoch hinauf mit kalter Luft infolge eines Böeneinbruches angefüllt worden ist. Auch auf der Zugspitze tritt beträchtliche Erwärmung ein, wobei während des Föhns die relative Feuchtigkeit auf der Zugspitze zwischen 50 und 70% sich hält. Das Föhnende tritt im Alpenvorland früher ein als im Inntale, während der Föhnzausbau in gleicher Höhe fast gleichzeitig erfolgt. In den fohnlosen Orten tritt bei Ende des Föhns geringe Erwärmung ein. Der Wiederausbruch des Föhns nach Einbruch der Böe kann mit einer rückläufigen Bewegung der fohnverursachenden Depression in Verbindung gebracht werden.

5. Föhn vom 16. bis 18. Jänner 1905.

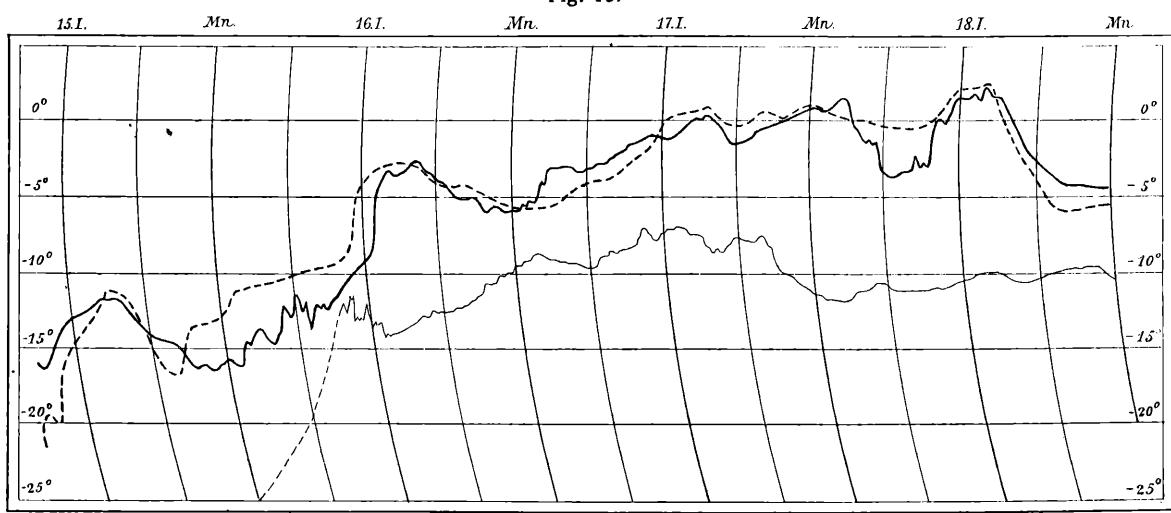
Dieser Fall bedarf einer eingehenden Erörterung.

Verhältnisse vor dem Föhn: Ein von Norden kommender, außerordentlich intensiver Kälteinbruch (am 14. und 15. Jänner) hat in der Höhe von 3000 m die Temperaturen bis auf -30° erniedrigt und auch in der Tiefe sehr starke Abkühlung herbeigeführt. Dem Kälteeinbruch folgten typisch antizyklonale Verhältnisse mit Ausheiterung, wobei die Alpen am Südwestrande des Hochdruckgebietes lagen. Erwärmung in der Höhe, weiteres Sinken der Temperatur in der Tiefe durch Ausstrahlung; es bildet sich Temperaturumkehr aus zwischen Ebene und nördlichem Alpenvorland, Talsohle und Gehänge des Inntales. Scharnitz und Seefeld sind lokale Sammelbecken kalter Luft. Um 7 a. des 16. Jänner finden wir folgende Temperatur- und Windverhältnisse:

Harlaching	Mittenwald	Scharnitz	Seefeld	Innsbruck	Iglis	Zugspitze
— 15·6 SE ₂	— 9·7 W ₇	— 15·5 ?	— 19·0 ?	— 16·2 SW ₂	— 12·0 ?	— 17·2 S ₅

Die in der Tiefe notierten südlichen Winde sind nicht Föhnwinde, da Temperaturumkehr herrscht und Harlaching und Innsbruck fast gleich kalt wie die um 2400 m höhere Zugspitze sind. Die kalten Luftsichten sind in abfließender Bewegung. Auf der Zugspitze ist um diese Zeit die Temperatur in raschem Anstiege, in Iglis und Mittenwald langsame Erwärmung, in Innsbruck und Scharnitz sehr langsame Erwärmung, in Harlaching und Seefeld Abkühlung.

Fig. 15.



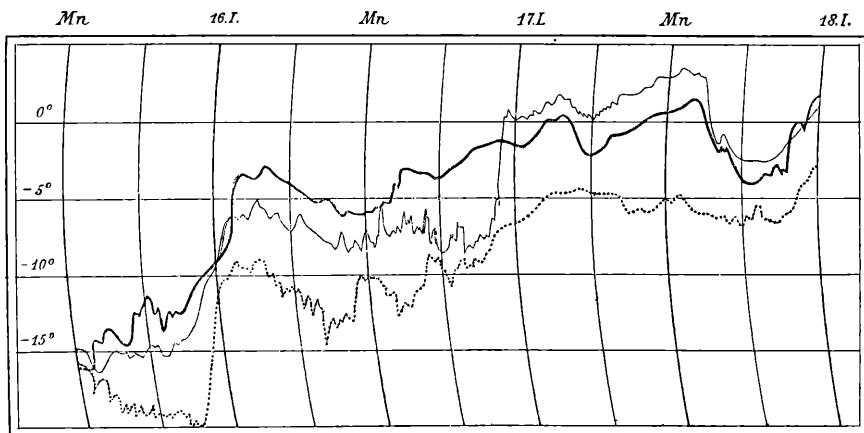
Föhn vom 16. bis 18. Jänner 1909.

Iglis Mittenwald Zugspitze.

Beginn der Erwärmung: Da der Thermograph auf der Zugspitze am 14. und 15. Jänner nicht funktioniert hat, kann der Beginn der Erwärmung nicht genau fixiert werden. Nach Sonnblick zu schließen, begann die Erwärmung bereits am 15. Jänner. Von Mitternacht bis 7 a. des 16. Jänner ist die Erwärmung rasch und intensiv, weil auf der Zugspitze bei einem Morgenminimum von $-25\cdot7^{\circ}$ um 7 a. nur mehr $-17\cdot2^{\circ}$ notiert werden. In Mittenwald beginnt langsame Erwärmung um 8 p. des 15. Jänner, in Igls um Mitternacht. Föhn bricht in Mittenwald mit jäher Erwärmung erst um 10 a. des 16. Jänner durch, in Igls ungefähr gleichzeitig. Die langsame, dem Föhndurchbrüche vorausgehende Erwärmung erstreckt sich also über 10 bis 14 Stunden und ist verursacht durch das Abfließen der unteren Inversionsschichte. Die potentiell wärmeren höheren Schichten der Inversionsschichte senken sich nieder und erst, wenn der letzte Rest der Inversionsschichte abgeflossen ist, sinkt auch die Föhnströmung herab und erzeugt die jähe Temperaturstufe (siehe Diagramm). Es folgt dann weitere langsame Temperaturzunahme in den Föhnorten, die durch den Temperaturgang auf der Zugspitze ihre Erklärung findet.

Daß die langsame Temperaturzunahme vor dem Föhn auf das Abfließen der Inversionsschichte und nicht auf den Föhn selbst zurückzuführen ist, sieht man deutlich an der langsamen Erwärmung, die in Innsbruck gleichzeitig wie in dem um 300 m höheren Igls vor sich geht, wobei aber Innsbruck kälter bleibt als Igls. Wäre die langsame Erwärmung durch Föhn erzeugt, so müßte Innsbruck wärmer sein. Fließt hingegen die kalte Inversionsschichte ab, so ist die niedrigere Temperatur selbstverständlich. Innsbruck bleibt bis um 10 a. des 17. Jänner kälter als Igls, wobei wir es mit einer Störung vom Oberinntal her (Föhnpause) zu tun haben dürften, hervorgerufen durch das Abfließen kalter Luft. Bemerkenswert ist, wie Innsbruck auf eine rasche Erwärmung, die in Igls um 2 a. des 17. Jänner eintritt, durch lebhafte Temperaturschwankungen reagiert.

Fig. 16.



Föhn vom 16. bis 18. Jänner 1905.

— Igls ————— Innsbruck Seefeld.

In Seefeld ergibt sich das gleiche. Nur finden wir hier infolge lokaler Störungen am Morgen des 16. Jänner noch Abkühlung, während in Mittenwald und Igls bereits langsame Erwärmung im Gange ist. Der weitere Temperaturverlauf ist parallel jenem in Igls und Mittenwald, von zahlreichen kleinen Störungen abgesehen.

In Harlaching kommt der Föhn nicht zum Ausbruch. Über der Ebene bleibt kalte Luft liegen, wobei schwache Winde aus Südost vorherrschend sind. Langsame Erwärmung ist auch hier zu finden; starker Druckfall beweist, daß die vertikale Mächtigkeit der kalten Luftsichtie durch Abfließen sich verringert, wodurch potentiell wärmere Luftsichten zum Absteigen veranlaßt werden. Am Morgen des 17. Jänner

ist Harlaching um $4 \cdot 3^\circ$ kälter als die Zugspitze, die um 2400 m höher liegt; oben weht S₅, in Harlaching E₁. Gleichzeitig ist Harlaching fast um 10° kälter als das föhnbestrichene, um fast 400 m höhere Mittenwald.

Wenn wir unser Kriterium, daß erst dann Föhn weht, wenn zwischen Gipfeln und Föhntälern die potentielle Temperatur überall gleich ist, streng anwenden, so dürfen wir den Beginn des eigentlichen Föhns erst auf die Nachmittagsstunden des 17. Jänner verlegen. Denn vorher sind auch Föhnstationen wie Igls und Mittenwald potentiell viel zu kalt. Da aber die Inversionsschichte in diesem Falle vor dem Föhn wohl über Zugspitzhöhe reicht, ist bei dem Abfließen der potentiell kalten Schichten doch fast die ganze Luftmasse auf der Nordseite der Alpen in absteigender Bewegung, ohne daß die in der Höhe einsetzenden, potentiell viel wärmeren Luftströme in die Föhntäler herabsinken. Überdies ist nach früher Gesagtem der Gradient Igls — Zugspitze kein zuverlässiges Föhnkriterium.

Überblicken wir den Vorgang im ganzen, so stellt er sich folgendermaßen dar: Potentiell kalte Luft, in den unteren Schichten mit Temperaturumkehr, reicht bis über Zugspitzhöhe, darüber warme Luft. Die potentiell kalte Luft fließt ab, die warme Luft erreicht die Zugspitze — rascher Temperaturanstieg auf der Zugspitze, langsamer Temperaturanstieg in den Tälern bei südlichen Winden. Bei weiterem Abfließen der kalten Luft Temperaturzunahme in der Höhe und in den Tälern. Wo der letzte Rest der Inversionsschichte abfließt, bricht Föhn durch. In der Ebene ist dies nicht der Fall.

Wir betrachten die Wetterlage. Am 15. Jänner liegt ein ausgedehntes Maximum über Nordost- und Mitteleuropa, eine Depression westlich von Irland. Im Kanal Südoststürme. In Mitteleuropa schwache Winde bei tiefen Temperaturen. Der Kälteeinbruch erreicht an diesem Tage die atlantische Küste. Am Nachmittage und Abend beginnt Erwärmung auf Zugspitze und Sonnblick, in der Nacht langsame Erwärmung in den Föhnorten.

Am 16. Jänner liegt das Maximum ungefähr an gleicher Stelle, die Depression über Irland. Eine keilförmige Isobarenausbuchtung liegt zu beiden Seiten der Alpen. Der Luftdruck ist nördlich der Alpen gefallen; die wärmeren Luftströme der Höhe reichen bereits tiefer hinab. In Mittel- und Westeuropa ist die Temperatur durch Ausstrahlung noch weiter gefallen; die lebhafteren Südostwinde beweisen, daß die kalten Luftmassen gegen das Meer abfließen. In den Alpen kann als Ersatz der abfließenden Luft nur Luft aus der Höhe nachströmen. Gleichzeitig muß auf der Nordseite der Alpen die vertikale Mächtigkeit der potentiell kalten Schichten abnehmen, was unter allen Umständen auch Druckfall in der Tiefe nach sich ziehen muß, wenn nicht in der Höhe gleichzeitig starke Drucksteigerung eintritt. Letzteres ist nicht der Fall.

Am 17. Jänner typische Föhnsituation mit Keil am Südrand der Alpen. In Westeuropa ist starke Erwärmung eingetreten mit Südwinden. In Mitteleuropa fließt viel kältere Luft mit südöstlichen Winden gegen das Meer. In Westeuropa finden wir schon die warme Luft den Boden bestreichend, in Mitteleuropa fließen noch Reste der Inversionsschichte (auch in Harlaching, während es in geringer Höhe darüber [Igls, Mittenwald] viel wärmer ist).

Unsere Betrachtungsweise erklärt uns zwei Dinge: erstens die langsame Erwärmung bei anhaltendem Abfließen kalter Luft, vorausgesetzt, daß die Temperaturschichtung in der kalten Luftmasse stabil ist; je stabiler sie ist, um so beträchtlicher wird die Erwärmung, wenn die potentiell wärmeren, höheren Schichten der Inversionsschichte herabsinken; zweitens sehen wir, daß das Absteigen der Luft in die Föhntäler durch das Abfließen der kalten Luft verursacht wird.

Man kann auf der Nordseite der Alpen an eine Art Saugwirkung denken. Horizontal kann Luft als Ersatz der abfließenden nicht zufließen. Wenn kein Vakuum entstehen soll, muß Luft aus der Höhe nachströmen. Der warme Föhn bricht nicht durch potentiell kältere Luft durch, sondern tritt an deren Stelle, wobei ein Aufsaugungsprozeß in beschränktem Maße mitwirken kann.

Wodurch die abfließende Bewegung der kalten Luft zustande kommt, fällt nicht in den Rahmen dieser Untersuchung. Dieses Abfließen ist für jene Meteorologen selbstverständlich, die den Luftaustausch zwischen Maximum und Minimum auf rein dynamische Ursachen zurückführen. Für diesen Fall können wir uns von dieser Anschauung freimachen. Eine kalte kontinentale Luftmasse fließt gegen warme, ozeanische Gegenden. Über der kalten kontinentalen Luft strömt potentiell viel wärmere. Je mehr durch weitere Ausbreitung der kalten Luft deren vertikale Mächtigkeit abnimmt, um so tiefer sinkt die warme Luft herab. Dieser Vorgang scheint typisch für die Randgebiete der Antizyklonen im Winter zu sein. Der Föhn ist dann nichts als ein alpin modifizierter Spezialfall. Die von uns eingeschlagene Betrachtungsweise könnte vielleicht weit über die Grenzen von Föhnuntersuchungen ausgedehnt werden.

Verlauf des Föhns: Der Föhnverlauf ist in Igls und Mittenwald gleich, von einer Föhnpause in Igls abgesehen. Das Maximum der Erwärmung tritt am 18. Jänner ein, das Minimum der relativen Feuchtigkeit bereits am 17. Jänner; am 18. Jänner nimmt die relative Feuchtigkeit zu, trotz der Erwärmung. Der

Gang der relativen Feuchtigkeit steht in Übereinstimmung mit jenem auf der Zugspitze: in der Höhe enden die antizyklonalen Verhältnisse um 8 p. des 17. Jänner. Die relative Feuchtigkeit steigt, wobei Temperaturabnahme eintritt, bei gleichzeitiger Erwärmung im Tal. Die Temperaturdifferenz Tal—Gipfel nimmt zu. In der Höhe fließt jetzt aus Süden kalte und feuchte Luft zu, aller Wahrscheinlichkeit nach Luft, die auf der Südseite der Alpen aufgestiegen ist. Denn am 17. Jänner beginnen auf der Südseite der Alpen Niederschläge, am 18. Jänner halten sie verstärkt an. Das allmähliche Feuchtwerden der Höhe und der Alpensüdseite nach anfänglich antizyklonalen Verhältnissen sieht man schön in der folgenden Gegenüberstellung:

	Sonnblick		Obir		Riva		Graz		Laibach	
	Bewölk.	Nieder-schlag	Bewölk.	Nieder-schlag	Bewölk.	Nieder-schlag	Bewölk.	Nieder-schlag	Bewölk.	Nieder-schlag
16. Jänner	0	0	0	0	5	0	3	0	0	0
17.	6	3·2	8	1·3	10	2·8	7	0·6	7	4·9
18.	10	12·2	10	12·5	10	14·9	10	5·4	10	11·2

Am 16. Jänner und am 17. Jänner bis abends haben wir es auf der Nordseite der Alpen mit absteigender Luft zu tun, ohne daß ein Aufsteigen auf der Südseite stattfindet. Die Föhnströmung wird genährt durch relative trockene Luft, die den Zentralalpen von Süden her horizontal zufließt oder über dem Alpenkamm absteigt. Dieses Stadium des Föhns muß als antizyklonal bezeichnet werden. Allmählich beginnt auf der Südseite aufsteigende Luftbewegung mit Kondensation, den Höhen und Föhntälern wird feuchtere Luft zugeführt.

Daß dabei in der Höhe Abkühlung eintritt, in den Föhntälern weitere Erwärmung, ist vielleicht dadurch zu erklären, daß durch den Übertritt kälterer Luft über die Zentralalpen auf der Nordseite die absteigende Luftbewegung verstärkt wird, weil die kältere Luft infolge ihres größeren Gewichtes auf der Nordseite herabsinken wird. Dieser Vorgang ist grundsätzlich verschieden von jenem, der den Beginn der absteigenden Luftbewegung auf der Nordseite der Alpen herbeiführt. Abkühlung in der Höhe mit Erwärmung in den Tälern bei anhaltendem Föhn ist auf der Nordseite der Alpen selten. Ein ähnlicher Fall findet sich in Föhnstudien I; es ist der dreitägige Föhn vom 12. bis 14. Jänner 1904, der überhaupt unserem Falle sehr ähnlich ist.

Das antizyklonale Föhnstadium geht also im Verlaufe des Föhns in ein zweites Stadium über, das durch aufsteigende Luftbewegung auf der Südseite der Alpen charakterisiert ist. Erst im zweiten Stadium führt der Föhn Luft, die auf der Südseite aufgestiegen ist. Nicht immer entwickelt sich der Föhn bis zu diesem zweiten, gewissermaßen stationären Stadium; oft erlischt er im ersten Stadium. Die langsame Erwärmung vor Durchbruch des Föhns können wir als Vorstadium des ersten Föhnstadiums betrachten. Wir haben Orte gefunden, in welchen die Föhnentwicklung nicht über dieses Vorstadium hinausgeht. Wir kommen zu folgender Übersicht:

1. Vorstadium: Antizyklonale Verhältnisse; in der Tiefe potentiell kalte Luft, die von den Alpen wegfließt. Starke Erwärmung in der Höhe, langsame Erwärmung in den Föhntälern.
2. Erstes (antizyklonales) Föhnstadium: Antizyklonale Verhältnisse in der Höhe; gänzliches Abfließen der kalten Luft aus den Föhntälern, Durchbruch der potentiell warmen Höhenluft als Föhn in die Föhntäler; keine aufsteigende Luftbewegung auf der Südseite der Alpen.
3. Zweites (stationäres) Föhnstadium: Höhen werden feucht, auf der Südseite der Alpen Niederschläge, also aufsteigende Luftbewegung. Temperaturänderung (Erwärmung oder Abkühlung) in der Höhe häufig, aber nicht regelmäßig. Maximum der Erwärmung in den Föhntälern, in welchen jetzt Luft

fließt, die auf der Südseite aufgestiegen ist. Die relative Feuchtigkeit nimmt auch in den Föhnorten meist zu.

Wir werden noch weitere Beispiele für diese Entwicklungsphasen beibringen.

Gesamtbetrag der Erwärmung:

Zugspitze	Harlaching	Mittenwald	Scharnitz	Seefeld	Igls	Rotholz	Innsbruck
20° 4'	15° 2'	25° 6'	20° 7'	21° 5'	18° 5'	23° 7'	20° 5'

Die Erwärmung ist auch in 3000 *m* Höhe sehr kräftig, woraus zu schließen ist, daß die potentiell kalte Inversionsschicht vor dem Föhn bis über Zugspitzhöhe gereicht hat. Am kleinsten ist die Erwärmung in Harlaching und in Igls. Harlaching war vor dem Föhn sehr kalt, ohne daß der Föhn später durchbrach; Igls war vor dem Föhn der potentiell wärmste Talort, so daß der voll durchbrechende Föhn keine so starke Temperatursteigerung bringen konnte als in jenen Orten, welche vor dem Föhn kälter waren und wo ebenfalls Föhn voll zum Durchbruch kam. Der Einfluß der größeren oder geringeren Stabilität des Anfangszustandes auf den Gesamtbetrag der Erwärmung springt in die Augen.

Übersicht: Typisch antizyklonale Verhältnisse gehen dem Föhn voraus; kalte Luft reicht bis über Zugspitzhöhe. Die kalte Luft ist in nördlich abfließender Bewegung, wodurch zuerst in der Höhe starke Erwärmung, in der Tiefe langsame eintritt. Nach Abfluß der Inversionsschicht bricht Föhn durch, gleichzeitig im Inntal und im nördlichen Alpenvorland. In der Ebene kommt Föhn nicht zum Ausbruch. Im Verlauf des Föhns werden die Höhen feucht, bei Niederschlägen auf der Südseite der Alpen. Es bildet sich die stationäre Föhnströmung¹ aus, mit aufsteigender Luftbewegung auf der Südseite, absteigender Bewegung auf der Nordseite. Die Erwärmung ist auch noch in 3000 *m* Höhe sehr stark.

6. Föhn am 22. und 23. März 1905.

Dieser an sich wenig bemerkenswerte Föhn zeigt in äußerst markanter Weise die vorstehend geschilderten Föhnstadien.

Verhältnisse vor dem Föhn: Typisch antizyklonale Verhältnisse. Zugspitze potentiell sehr warm (absolut wärmer als Seefeld) und außerordentlich trocken (am 22. März um 7^h a. 21%_r relativer Feuchtigkeit, auf dem Sonnblick nur 14%). In der Höhe wehen am Morgen des 22. März noch nordwestliche Winde, in Mittenwald bereits S₂ bei tiefer Temperatur. Die Temperaturen um 7^h a. des 22. März sind folgende.

Harlaching	Mittenwald	Scharnitz	Seefeld	Innsbruck	Igls	Wendelstein	Zugspitze
0° 7'	- 0° 5'	- 3° 3'	- 6° 2'	- 1° 3'	- 1° 3'	- 2° 4'	- 5° 8'

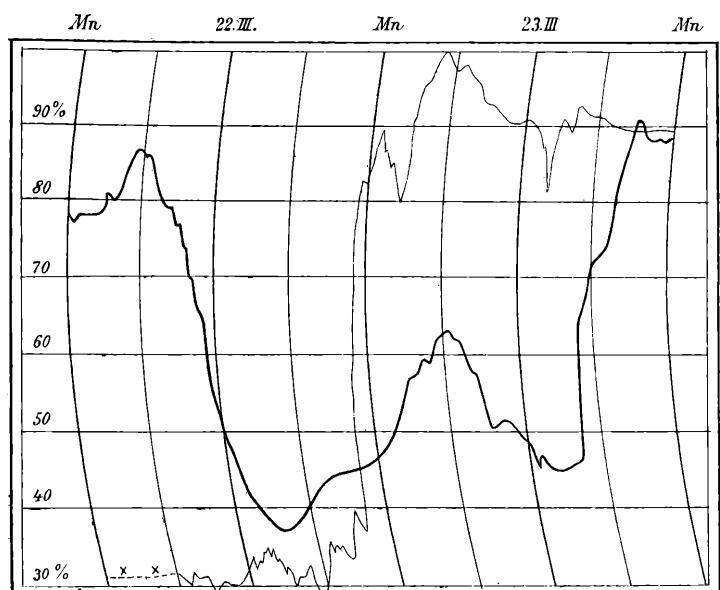
Die Temperatur ist in Mittenwald bereits seit Mitternacht in langsamem Anstiege, die relative Feuchtigkeit gleichzeitig langsam fallend, was dem Abfließen kalter, dem Herabsinken wärmerer und trockenerer Luft zuzuschreiben ist. Um 8^h a. tritt in Igls und Mittenwald gleichzeitig tiefer Fall der relativen Feuchtigkeit ein; es bricht Föhn durch.

Verlauf des Föhns: In der Höhe finden wir am 22. März starke Erwärmung bei außerordentlich geringer Feuchtigkeit. Um 10^h p. steigt die relative Feuchtigkeit auf der Zugspitze äußerst rasch bis auf 90%_r und hält sich am zweiten Föhntag nahe dem Sättigungspunkte. Gleichzeitig tritt Abkühlung ein und Schneefall. Die antizyklonalen Verhältnisse sind verschwunden, es tritt Zirkulation von der Südseite der Alpen auf die Nordseite ein (siehe Diagramm).

¹ Diese Bezeichnung hat zuerst J. Hann eingeführt.

Daß wir im Anfangsstadium es noch nicht mit Föhn zu tun haben, sieht man am besten daraus, daß Luft, die in einer Höhe von 3000 m eine Temperatur von -6° und eine Feuchtigkeit von 20% hat, als absteigender Föhn in Igls und Mittenwald die Temperaturen auf 14° erhöhen, die relative Feuchtigkeit fast auf 0% erniedrigen würde. Tatsächlich ist in Mittenwald die Temperatur um 7° a. des 22. März -0.5° , die Feuchtigkeit 73% trotz des beobachteten Südwindes (S_2). Auch nach Durchbruch des Föhns bleibt die Zugspitze potentiell wärmer. Im antizyklonalen ersten Föhnstadium ist die Temperaturabnahme zwischen Igls und Zugspitze $0.45^{\circ}/100\text{ m}$, im zweiten Föhnstadium $0.70^{\circ}/100\text{ m}$. Physikalisch ist zwischen den beiden Föhnstadien ein großer Unterschied und es ist begreiflich, daß Wild einer strengeren Fassung des Begriffes »Föhn« das Wort geredet hat. Im antizyklonalen Stadium ist die Höhe trocken, mitunter trockener als die Föntäler. Im antizyklonalen Stadium des Föhns finden wir keine Kondensation auf der Südseite; die Erwärmung in den Föntälern steht deshalb nicht in Zusammenhang mit frei werdender Verdampfungswärme auf der Luvseite. Obwohl wir also bei Antizyklonalföhn charakteristische Merkmale der typischen Föhnwinde nicht finden, scheint eine Trennung nicht opportun, weil antizyklonaler Föhn jedem Föhnwinde

Fig. 17.

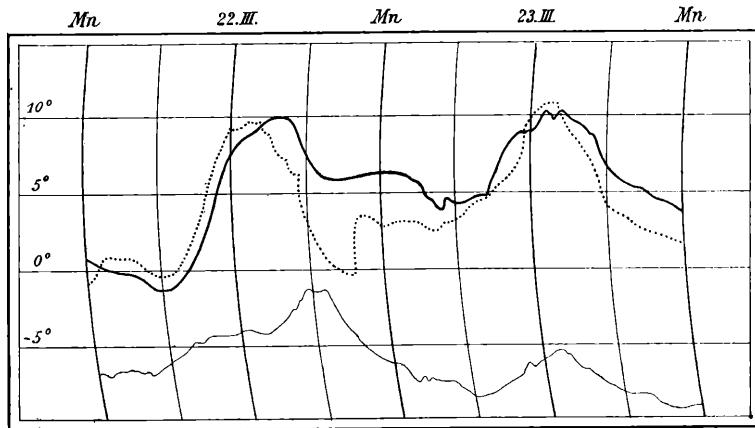


Föhn am 22. und 23. März 1903: Relative Feuchtigkeit.

Zugspitze Igls

(---x--- interpoliert)

Fig. 18.



Föhn am 22. und 23. März 1905.

Igls

Mittenwald

Zugspitze

vorausgeht. Es hängt dann wohl nur von der Dauer des Föhns ab, ob auch die Luftmassen auf der Südseite der Alpen in Bewegung gegen die Alpen geraten, wodurch das Antizyklonalstadium in das stationäre Föhnstadium übergeht. Wie das Wachsen der Temperaturgradienten andeutet, kommt eine regelrechte Strömung zwischen Gipfeln und Tälern erst im stationären Stadium zustande.

In Mittenwald tritt am Abend des ersten Föhntages starke Abkühlung ein, die wir in Igls nicht finden. Nach 9^h p. finden wir in Mittenwald plötzliche Erwärmung, bei S₃. Die kalte Luft fließt ab, wärmere sinkt herab, doch bleibt Mittenwald kälter als Igls. Föhn bricht erst wieder um 4^h a. des 23. März durch.

7. Föhn vom 9. bis 11. April 1905.

Verhältnisse vor dem Föhn: Nach starkem Kälteinbruch stellen sich typisch antizyklonale Verhältnisse ein, wie auch die Wetterkarte des 9. April zeigt. Am 8. April tritt auf Sonnblick und Zugspitze bereits vorübergehende Erwärmung ein. Andauernde Erwärmung beginnt auf der Zugspitze um Mitternacht 8./9. April. Bis zum 10. April fällt auf beiden Gipfeln bei anhaltender Erwärmung die relative Feuchtigkeit bis auf 60%, beginnt am Abend des 10. April zu steigen und liegt am 11. April nahe der Sättigung.

Um 7^h a. des 9. April liegen die Temperaturen wie folgt:

	Harlaching	Mittenwald	Scharnitz	Seefeld	Innsbruck	Igls	Zugspitze
Morgenminimum	- 0·9°	- 4·0	- 4·5	- 4·5	- 1·9	- 3·7	- 15·8
	- 4·6°	- 6·3	- 5·0	- 5·0	- 2·1	- 4·7	- 17·0

Besonders die Morgenminima zeigen die sehr stabile Temperaturschichtung vor dem Föhn. Dabei weht in Harlaching S₁, in Mittenwald S₂, bei langsamer Erwärmung, die in Mittenwald bereits um 8^h p. des Vortages begonnen hat. Gleichzeitig sind Mittenwald und Harlaching sehr feucht (90%), Mittenwald überdies fast gleich kalt wie Seefeld. Es weht also nicht Föhn, sondern die kalte Inversionsschichte fließt ab.

Verlauf des Föhns: Auf der Zugspitze tritt das Maximum der Temperatur und das Minimum der relativen Feuchtigkeit am 10. April ein. Die Temperatur bleibt bis zum 11. April fast konstant, die Feuchtigkeit jedoch steigt bis zum Sättigungspunkt. Auf dem Sonnblick tritt Schneefall ein, auf der Südseite der Alpen Regen (stellenweise sehr stark). Die antizyklonalen Verhältnisse sind verschwunden. In den Talorten tritt das Maximum der Erwärmung erst im stationären Föhnstadium ein, die relative Feuchtigkeit liegt jedoch höher als im Antizyklonalstadium. Die Erwärmung ist bei südlichen Winden auch in der Ebene, in Harlaching, sehr stark. Der Betrag der Gesamterwärmung ist:

Zugspitze	Harlaching	Mittenwald	Innsbruck	Scharnitz	Seefeld	Igls
16°	22°	25°	19°	19°	17°	20°

Seefeld war vor dem Föhn potentiell am wärmsten, Mittenwald am kältesten; darnach richtet sich der Gesamtbetrag der Erwärmung. Die langsame Erwärmung beginnt in jenen Orten am frühesten, deren potentielle Temperaturen vor dem Föhn am niedrigsten waren, also in Harlaching und Mittenwald. Dies ist leicht begreiflich. Wenn der langsame Temperaturanstieg vor dem Föhn auf das Abfließen kalter Luft und das Herabsinken potentiell wärmerer zurückzuführen ist, so muß in jenen Orten, in welchen die Temperatur lokal durch Ausstrahlung am tiefsten sinkt, die Tendenz zum Abfließen der Bodenschichten am größten sein. Auch in diesem Falle ist die Erwärmung in 3000 m Höhe sehr bedeutend.

Die Temperaturabnahme zwischen Igls und Zugspitze beträgt am 9. April 0·67°/100 m, am 10. April 0·59°, am 11. April 0·74°, ist also am kleinsten im Antizyklonalstadium des Föhns, am raschesten im stationären Föhnstadium.

Anmerkung über die Druckänderungen: In der Tiefe fällt der Druck vom 9. bis 11. April konstant, im ganzen um zirka 13 mm; auf dem Sonnblick steigt der Druck vom 9. bis 10. April, fällt vom 10. bis 11. April um 4 mm. Auf dem südalpinen Obir bleibt der Luftdruck am 9. und 10. April konstant, fällt am 11. April in geringem Maße. Der Druckfall auf der Föhnseite zwischen Gipfel und Tal erklärt sich daraus,¹ daß eine zirka 2500 m hohe Luftsäule um zirka 15 bis 20° wärmer wird, eine Folge der eintretenden absteigenden Bewegung. Die Drucksteigerung in der Höhe bei antizyklonaler Erwärmung ist eine lange bekannte Erscheinung, die allgemein auf dynamische Ursachen zurückgeführt wird. Wir können dieser Erklärung keine Beobachtungstatsache entgegenstellen.

8. Föhnfälle vom 29. April bis 7. Mai 1905.

In dieser Zeit treten zwei voneinander getrennte mehrtägige Föhnfälle ein. In der Höhe wehen auch während der Unterbrechung durchwegs südliche Winde. Eine ausführliche Behandlung dieser langen Periode wäre zu weitläufig und ergibt nichts Neues. Nur so viel sei bemerkt, daß nach einem Kälteeinbruch am 29. April antizyklonale Verhältnisse eintraten mit starker Erwärmung in der Höhe; es entwickelt sich dann der Föhn wie in allen bisherigen Fällen. Uns bieten diese Föhne ein gutes Beispiel, wie das Erlöschen des Föhns in der Niederung vor sich geht. Außerdem ist die Feststellung der Temperaturgradienten zwischen Igls und Zugspitze von Interesse, weil es sich um Frühlingsfälle handelt.

Ende des Föhns:

Der erste Föhn dauert vom 29. April bis zum 2. Mai; der zweite vom 5. bis 7. Mai.

	Föhnende am 2. Mai	Föhnende am 7. Mai
Harlaching	2 ^h 15 ^m p	Föhn nicht zum Ausbruch gekommen
Mittenwald	3 45	12 ^h 00 ^m mittags
Scharnitz	4 00	1 15 p.
Seefeld	4 00	3 00
Innsbruck	6 30	6 00
Igls	8 30	6 30

Man sieht, wie in beiden Fällen die Abkühlung zuerst im Norden beginnt und dann nach Süden vorrückt. In beiden Fällen rückt die kalte Luft von Norden auf der Rückseite östlich abziehender Depressionen vor und bildet am 3. Mai einen Keil hohen Luftdruckes auf der Nordseite der Alpen, der am 8. Mai, nach Ende des zweiten Föhns, nur angedeutet ist. In den Föhnorten beträgt die Totalabkühlung 13° bis 18°, von dieser gewaltigen Abkühlung ist im fohnlosen Gebiet, wie auf den Wetterkarten zu sehen ist, wenig zu merken. Die Abkühlung ist nur dort groß, wo vorher infolge des Föhns sehr starke Erwärmung eingetreten war. In Winterfällen haben wir im fohnlosen Gebiete das Föhnende ja sogar durch Erwärmung markiert gesehen. Da die Abkühlung nach Föhn gewöhnlich mit einem sogenannten »Wettersturz« verbunden ist, ist ohneweiters ersichtlich, daß der dabei auftretende Temperaturwechsel im Föhngebiet besonders schroff ist, viel schroffer als im fohnlosen Gebiete.

Der Temperaturgradient zwischen Igls—Zugspitze beträgt während des ersten Föhns 0·74°/100 m, während des zweiten 0·84°. Der erste Föhn (29. April bis 1. Mai) muß ungeachtet der Niederschläge auf der Südseite als Antizyklonalföhn bezeichnet werden, weil auf der Zugspitze die relative Feuchtigkeit vom 30. April bis 4 p. des 2. Mai weit vom Sättigungspunkte entfernt ist und zeitweise bis auf 60% sinkt. Während des Föhns vom 5. bis 7. Mai hingegen ist es auf der Zugspitze sehr feucht, bei zum Teil sehr starken Niederschlägen auf der Südseite. Die Temperaturabnahme mit der Höhe ist also wieder während

¹ Wenn wir nach der Formel rechnen: $dP_0 = -\frac{hP_0}{RT^2} dT$; dP_0 ist die Druckänderung in der Tiefe, wobei wir den Druck in der Höhe h als unverändert annehmen; h ist gleich 2500 m, dT die Änderung der Mitteltemperatur der Luftsäule von der Höhe h .

des Antizyklonalstadiums langsamer. Doch sind bei diesem Frühlingsföhn die Gradienten im allgemeinen größer als im Winter.

Wir reihen einen Sommerföhn an.

9. Föhn am 3. bis 5. August 1905.

Da starke Föhnfälle im Sommer selten sind, muß dieser Föhn eingehender behandelt werden.

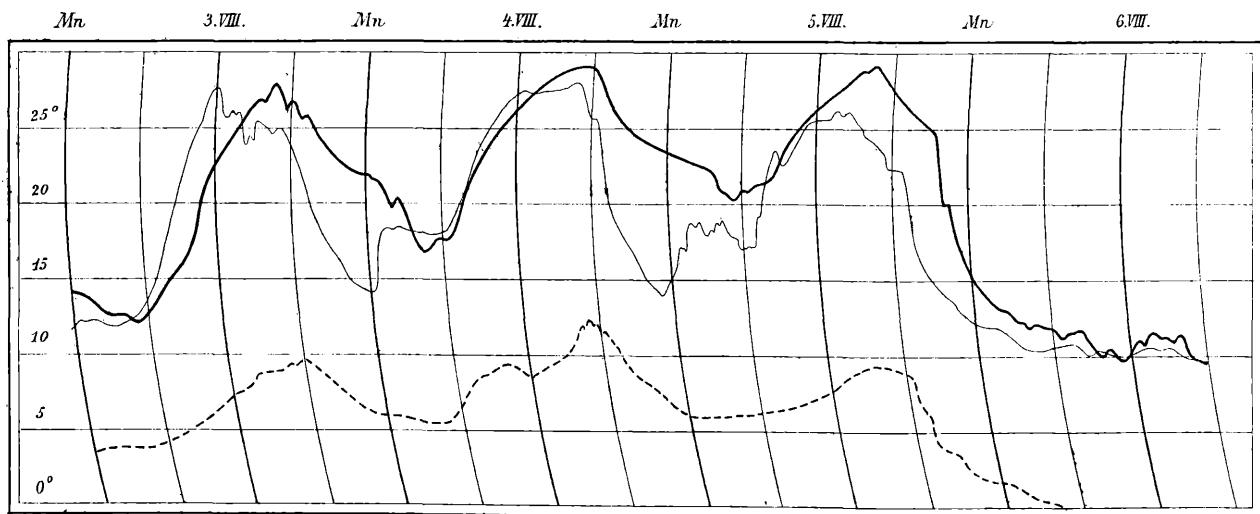
Verhältnisse vor dem Föhn: Dem Föhn geht warme Witterung voraus, bei viel höherer potentieller Temperatur in der Höhe. Die Temperaturen um 7 a. des 3. August sind die folgenden:

Harlaching	Mittenwald	Scharnitz	Seefeld	Innsbruck	Igls	Wendelstein	Zugspitze
14·3°	15·6°	12·7°	13·3°	15·2°	13·7°	12·7°	5·6°

Dabei weht in Harlaching E₁, in Mittenwald S₈, auf der Zugspitze S₄. Die relative hohe Temperatur der Höhe ist nicht nur aus der geringen Temperaturdifferenz Igls—Zugspitze (= 7°; Gradient 0·35°/100 m) ersichtlich, sondern auch aus der Temperatur des Wendelstein 1727 m, auf dem es wärmer wie in dem um 800 m tiefer gelegenen Scharnitz und fast gleich warm wie in Igls ist. Zwischen Ebene und Mittenwald und zwischen Scharnitz und Seefeld finden wir Temperaturumkehr. Die verhältnismäßig niedrigen Temperaturen in der Tiefe sind nicht nur auf nächtliche Abkühlung, sondern auch auf sehr ausgebreitete Gewitter zurückzuführen, die am 2. August von Westen her als Begleiter eines Keiles hohen Luftdruckes niedergegangen sind. Die Abkühlung erstreckte sich abgeschwächt bis in Zugspitzhöhe. Die Temperaturschichtung ist also (am Südwestrande eines Luftdruckmaximums) ganz ähnlich wie vor den Föhnfällen im Winter: Kalte Luft strömt in der Tiefe von den Alpen weg, darüber fließt in der Höhe potentiell wärmere Luft aus Süden.

Beginn der Erwärmung: Auf der Zugspitze beginnt langsame Erwärmung bereits am 2. August, einige Stunden nach der durch das Gewitter verursachten Abkühlung; gleichzeitig beginnt die relative

Fig. 19.



Föhn vom 3. bis 5. August 1905.

— Igls ————— Mittenwald -· Zugspitze

Feuchtigkeit zu fallen und fällt bis zum 4. August bis auf 40%, ein deutliches Zeichen der antizyklonalen Verhältnisse. In Mittenwald beginnt langsame Erwärmung bereits um Mitternacht des 2./3. August, begleitet von langsamem Fall der Feuchtigkeit; gleichzeitig beginnt Südwind, der aber noch

nicht als Föhn bezeichnet werden kann, da er noch kalt und feucht ist. Der Durchbruch des Föhns erfolgt in Mittenwald und Igls gleichzeitig, zirka um 7 a. des 3. August. Die Temperaturdifferenz Igls—Zugspitze wächst nach Durchbruch des Föhns sehr rasch.

Verlauf des Föhns:

Auf der Zugspitze tritt die höchste Temperatur am 4. August ein (14°), zirka um 5 p. Die Feuchtigkeit erreicht ihr Minimum bereits um 10 a. des gleichen Tages und steigt dann sehr rasch. Am 5. August liegt die relative Feuchtigkeit zwischen 70 und 100%. Am 5. August treten auf dem auf der Kammhöhe der Zentralalpen liegenden Sonnblick starke Niederschläge ein. Es entwickelt sich aus dem Antizyklonalstadium die Zirkulation quer über die Alpen. Vorstadium, Antizyklonalstadium und stationäres Föhnstadium sind also gut ausgeprägt.

Der Föhn bricht auch in der Ebene, in Harlaching durch. Bemerkenswert ist der Temperaturverlauf in Mittenwald bei Nacht. Ungefähr um 5 p. erlischt an jeden Tag der Föhn und es tritt starke Abkühlung ein, wobei Mittenwald gleich kalt wie das stark gestörte Scharnitz wird und viel kälter wie Igls (siehe Diagramm). Um 9 p. notiert Mittenwald immer Windstille. Die Feuchtigkeit steigt dabei immer bis auf 90% (in Igls bei anhaltendem Föhn 40%). Gegen Mitternacht hört dann plötzlich die Abkühlung auf und es tritt rasche Erwärmung um 4 bis 5° ein, doch wird die Temperatur von Igls nicht erreicht; auch die Feuchtigkeit sinkt nur auf 60%. Föhn bricht dann erst um 6 a. wieder durch. Wir finden also, daß die im Tale sich sammelnde kalte Luft plötzlich abfließt¹ und daß potentiell wärmere Luft, aber nicht die Föhnströmung der Höhe, nach Mittenwald herabsinkt. In Scharnitz finden wir diese langsame Erwärmung nicht, weil die Talverengung nördlich von Scharnitz den Abfluß der kalten Luft aus dem Sammelbecken bei Scharnitz hemmt.

Es könnte überflüssig erscheinen, solche an sich geringfügige Vorgänge in so ausführlicher Weise zu diskutieren; aber gerade darin liegt der Vorteil kontinuierlicher Registrierung, daß solche scheinbare Kleinigkeiten untersucht werden können, was auf Grund von Terminbeobachtungen nicht möglich ist. Die langsame Erwärmung vor dem Föhn, die Föhnpausen, die Temperaturstufen etc. bieten geradezu die einzigen Behelfe, um die Dynamik des Föhns zu untersuchen.

Die Temperaturabnahme zwischen Igls und Zugspitze war vor dem Föhn langsam ($0 \cdot 48^{\circ}/100 \text{ m}$ im Mittel), wird viel rascher nach Durchbruch des Föhns, so daß sich im Mittel der 3 Föhntage ein Gradient von $0 \cdot 76^{\circ}$ ergibt; er ist also rascher wie im Winter. Am 3. August ist der Gradient $0 \cdot 68^{\circ}$, am 4. August $0 \cdot 76^{\circ}$, am 5. August $0 \cdot 84^{\circ}$, er wächst also während des Föhns kontinuierlich und ist im stationären Föhnstadium größer als im Antizyklonalstadium, wie wir es auch im Winter gefunden haben. Auch dieser Sommerföhn ist in der Höhe mit starker Erwärmung verbunden.

Ende des Föhns: Am Abend des 5. August tritt ein gewaltiger Wettersturm ein, der sich rasch ausbreitet und den Föhn in Mittenwald um 7 p., in Innsbruck um 8 p., in Igls um 9 p. zum Erlöschen bringt. Die Abkühlung reicht hoch über Zugspitzhöhe hinauf, ist mit starker Drucksteigerung und mit Ausbildung eines Keiles hohen Luftdruckes auf der Nordseite der Alpen verbunden. Der Gesamtbetrag der Abkühlung beträgt:

Zugspitze	Harlaching	Mittenwald	Scharnitz	Seefeld	Igls	Innsbruck
15°	20°	20°	17°	19°	20°	18°

Der Einbruch kalter Luft verursachte stellenweise enorme Niederschläge: Innsbruck am 5. und 6. August zusammen 90 mm Regen (München 73 mm).

¹ Wohl infolge lokaler Druckdifferenzen, die durch die starke Abkühlung in den Tälern eintreten, ähnlich wie während der Föhnpausen im Inntale bei einem gewissen Betrage der Temperaturdifferenz zwischen Föhngebiet und dem Oberinntal die kalte Luft in letzterem sich gegen Innsbruck in Bewegung setzt.

Übersicht: Dieser typische Sommerföhn bietet keine prinzipiellen Unterschiede gegenüber den Fällen im Winter. Dem Föhn gehen antizyklonale Verhältnisse voraus mit sehr stabiler Temperaturschichtung, starker Erwärmung und starkem Fall der relativen Feuchtigkeit in der Höhe. In der Tiefe geht dem Föhn langsame Erwärmung mit südlichen Winden voraus. Die drei Entwicklungsstadien des Föhns sind gut ausgeprägt.

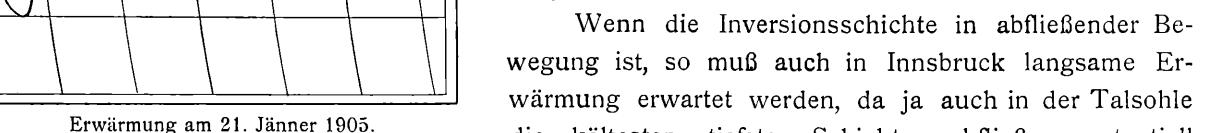
10. Föhn am 21. Jänner 1905.

Dieser Fall zeigt auf das deutlichste den Beginn der Erwärmung in den Tälern. Es herrschen vor dem Föhn antizyklonale Verhältnisse; auf der Zugspitze sinkt am 21. Jänner die relative Feuchtigkeit bis auf 55%, bei hohem Luftdruck in der Tiefe. Wir stellen die Temperaturen am 20. Jänner um 10 p. und am 21. Jänner um 7 a. einander gegenüber.

	Mittenwald	Scharnitz	Seefeld	Innsbruck	Igls	Zugspitze
20. Jän. 10 p.	- 9.5°	- 6.3°	- 5.5°	- 5.6°	- 3.4°	- 8.0°
21. 7 a.	0.0	- 9.0	- 9.0	- 6.5	- 1.0	- 10.4

Am 20. Jänner um 10^h p. herrscht zwischen Mittenwald und Seefeld und zwischen Innsbruck und Igls ausgesprochene Temperaturumkehr. In Mittenwald ist es um 6° kälter als in dem gleich hoch gelegenen Igls. In beiden Orten tritt vor dem Föhn Erwärmung ein, die in Mittenwald 9°, in Igls nur 2° beträgt, so daß um 7^h a. beide Orte angenähert gleich temperiert sind; in Mittenwald ist der tieferen Anfangstemperatur wegen die Erwärmung viel stärker. Wenn diese Erwärmung durch das Abfließen der Inversionsschichte bedingt ist, so ist leicht einzusehen, warum in beiden Orten gleiche Temperatur sich einstellt. Die beiden Orte liegen ja gleich hoch; in gleicher Höhe fließt gleich temperierte Luft zu.

Wenn die Inversionsschichte in abfließender Bewegung ist, so muß auch in Innsbruck langsame Erwärmung erwartet werden, da ja auch in der Talsohle die kältesten, tiefsten Schichten abfließen, potentiell wärmere Schichten sich senken müssen. Dies ist tatsächlich der Fall. Nach dem Diagramm beginnt in Innsbruck gleichzeitig mit Igls langsame Erwärmung; sie kann nicht auf Föhn zurückgeführt werden, denn die Temperaturumkehr bleibt während dieser langsamen Erwärmung bestehen, Innsbruck bleibt kälter wie Igls. Diese Erscheinung kann nur so gedeutet werden, daß die Inversionsschichte in abfließender Bewegung ist, wodurch die höheren wärmeren Schichten der Inversionsschichte sich senken. Hierdurch tritt zwar in der ganzen untersten Luftsicht Erwärmung ein, aber die Temperaturumkehr bleibt so lange bestehen, bis Föhn durchbricht.



Erwärmung am 21. Jänner 1905.

Mittenw. Igls Innsbruck

sätzlich der Fall. Nach dem Diagramm beginnt in Innsbruck gleichzeitig mit Igls langsame Erwärmung; sie kann nicht auf Föhn zurückgeführt werden, denn die Temperaturumkehr bleibt während dieser langsamen Erwärmung bestehen, Innsbruck bleibt kälter wie Igls. Diese Erscheinung kann nur so gedeutet werden, daß die Inversionsschichte in abfließender Bewegung ist, wodurch die höheren wärmeren Schichten der Inversionsschichte sich senken. Hierdurch tritt zwar in der ganzen untersten Luftsicht Erwärmung ein, aber die Temperaturumkehr bleibt so lange bestehen, bis Föhn durchbricht.

Ein ganz gleich verlaufender Fall findet sich in der Nacht vom 26. bis 27. November 1905. Weiteren Fällen werden wir im dritten Abschnitt begegnen.

Überblicken wir das im vorliegenden Abschnitte zusammengestellte Tatsachenmaterial, so kommen wir zu folgenden Ergebnissen:

1. Allen untersuchten Föhnfällen gehen antizyklonale Verhältnisse voraus, wobei das betrachtete Gebiet fast stets im Randgebiete von Antizyklonen liegt.
2. Die Temperaturschichtung ist vor dem Föhn sehr stabil, am stabilsten in den untersten Luftsichten, wo meist ausgesprochene Temperaturumkehr herrscht, entsprechend den antizyklonalen Verhältnissen.
3. Warme Südwinde setzen in der Höhe früher ein als in den Föhntälern. In den letzteren fließt vor Beginn des Föhns die kalte Inversionsschichte ab, bei südlichen Winden. Als Ersatz der abgeflossenen kältesten, untersten Luftsichten senken sich die potentiell (oft auch absolut) wärmeren Luftsichten aus der Höhe zum Boden nieder, da horizontaler Luftzufluss nicht eintreten kann. Dieses Herabsinken potentiell wärmerer Schichten der Inversionsschichte bedingt in den Föhnorten langsame Temperaturzunahme, die trotz südlicher Winde nichts mit Föhn zu tun hat, da die Tiefe bis zum gänzlichen Abfließen der Inversionsschichte potentiell kälter als die Höhe bleibt. Diese langsame Erwärmung vor dem Föhn kann als Vorstadium des Föhns bezeichnet werden. In dem Abfließen der Inversionsschicht haben wir die Ursache zu sehen, welche die potentiell warme Luft der Höhe zum Absteigen in die Täler zwingt.
4. Die relative Feuchtigkeit liegt vor und bei Beginn des Föhns auf der Zugspitze verhältnismäßig niedrig und fällt während des Föhns im Tale in der Höhe noch weiter, um im weiteren Verlauf oft sehr rasch bis zur Sättigung anzusteigen. Dadurch ergibt sich die Einteilung in zwei Föhnstadien: 1. Antizyklonales Stadium, wobei die Luft über den Alpen in absteigender oder horizontal zufließender Bewegung ist. 2. Stationäres Föhnstadium mit aufsteigender Luftbewegung auf der Luvseite der Alpen, wodurch dem Alpenkamm feuchte Luft zugeführt wird. Im ersten Stadium finden wir in der Höhe fast immer (antizyklonale) Erwärmung, im zweiten Stadium oft Abkühlung bei anhaltenden südlichen Winden. In den Föhntälern tritt das Maximum der Erwärmung meist im zweiten, das Minimum der relativen Feuchtigkeit meist im ersten Föhnstadium ein. Die Temperaturabnahme mit der Höhe ist im stationären Föhnstadium rascher als im Antizyklonalstadium. Das Antizyklonalstadium fehlt keinem Föhn, doch kann mancher Föhn erlöschen, ehe es zur Entwicklung des stationären Stadiums gekommen. Letztere Föhnfälle sind als Antizyklonalföhne zu bezeichnen. Eine Beschränkung des Begriffes »Föhn« auf das stationäre Stadium ist trotz des physikalischen Unterschiedes nicht möglich, da alle untersuchten Föhne vor dem stationären Stadium das Antizyklonalstadium durchlaufen.
5. Der Durchbruch des Föhns erfolgt im Inntal und im nördlichen Alpenvorland in gleicher Höhe gleichzeitig. Das Vorstadium des Föhns (Abfließen der kalten Inversionsschichte) ist in Mittenwald besser ausgeprägt als in Igls, weil letzteres eine Gehängestation, ersteres eine Talstation ist und infolgedessen immer an der Basis der Inversionsschichte liegt.
6. In dem betrachteten Gebiete ist der Zeitpunkt des Föhnbeginnes nicht davon abhängig, ob ein Ort näher oder entfernter dem Alpenkamm liegt, sondern ausschließlich von der Höhe des Ortes. Der Föhn beginnt in Innsbruck später als in Igls und Mittenwald. Aber auch jene wenigen Föhnfälle, die auch in der Ebene (Harlaching) zum Durchbruch kommen, beginnen dort später als in den höher gelegenen Alpenorten. In jenen Fällen, in welchen der Föhn in der Ebene nicht zum Durchbruch kommt, finden wir in Harlaching langsame Temperaturzunahme bei südlichen Winden, wobei aber die Temperatur niedriger bleibt als in den höher gelegenen Föhnorten. Die Inversionsschichte fließt in diesen Fällen über der Ebene nicht vollständig ab; wir finden dann nur das oben erwähnte Vorstadium des Föhns, in welchem die potentiell wärmeren, höheren Schichten der Inversionsschichte zum Boden niedersinken.
7. Nach Durchbruch des Föhns findet man zwischen den Tälern und 2000 m die Temperaturgradienten des indifferenten Gleichgewichtes (potentielle Temperatur in der ganzen Luftsäule gleich).

Zwischen 2000 und 3000 m ergibt sich eine langsamere Temperaturabnahme mit der Höhe, so daß auch während des Föhns in der Höhe Luft höherer, potentieller Temperatur strömt.

8. In allen Fällen, bei welchen in den Tälern sehr starke Erwärmung eintrat, ist auch in der Höhe von 3000 m meist noch sehr intensive Temperaturerhöhung zu konstatieren, die auch oft noch nach Erlöschen des Antizyklonalstadiums in der Höhe anhält. Die Temperaturerhöhung in den Föhntälern ist dann nicht nur auf die auf der Luvseite frei werdende latente Verdampfungswärme zurückzuführen, ist auch nicht lediglich ein Effekt der beim Abstieg auf der Föhnseite eintretenden Kompression, sondern ist zum Teile auch auf die höhere Temperatur der von Süden zugeführten Luft zurückzuführen.

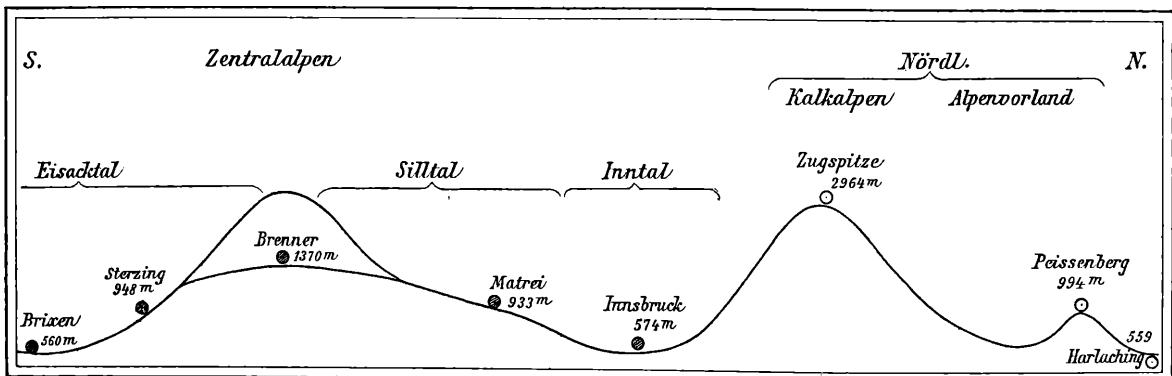
9. Je stabiler vor dem Föhn die Temperaturschichtung in den Föhntälern ist, um so größer ist die infolge des Föhns eintretende Temperatursteigerung; diese ist in jenen Orten am größten, welche vor dem Föhn potentiell am kältesten waren.

10. Das Ende des Föhns wird bewirkt durch den Einbruch kalter Luft, die sich im allgemeinen von Norden nach Süden ausbreitet. Der Föhn endigt zuerst im nördlichen Alpenvorlande, später im Inntale. Die Abkühlung ist dort am größten, wo die Erwärmung durch den Föhn am bedeutendsten war. War stellenweise der Föhn nicht zum Boden durchgebrochen, so kann statt der Abkühlung in diesen Orten geringe Erwärmung eintreten. Da aber auch über diesen Orten in geringer Höhe über dem Boden warme Luft fließt, die durch kalte Luft verdrängt wird, finden wir trotz der Erwärmung Drucksteigerung. So wie die exzessive Temperaturerhöhung bei Föhn eine spezifische Erscheinung der alpinen Föhntäler ist, ist auch die oft sehr starke Abkühlung nach dem Erlöschen des Föhns eine auf die Föhnorte beschränkte Erscheinung.¹

III. Untersuchungen über den Föhnverlauf auf der Brennerlinie.

Das in den Jahren 1902/03 gewonnenen Registriermaterial, das in überraschend dankenswerter Weise von Herrn Prof. Paul Czermak in Innsbruck zur Verfügung gestellt wurde, stammt aus den Stationen Innsbruck 574 m (Inntal), Matrei 993 m (Silltal, durch welches der Föhn in das Inntal herabkommt), Brenner 1370 m (Paßhöhe, Kamm der Zentralalpen), Sterzing 948 m (Eisacktal, Südtirol, Südseite der Alpen), Brixen 561 m (Eisacktal). Die Lage der Stationen ist auf der Kartenskizze der Einleitung sowie aus dem nachstehenden rohen Profil ersichtlich.

Fig. 21.



Die Talkessel von Sterzing und Brixen sind der lokalen Ansammlung kalter Luft ungemein günstig, weil südlich von jedem Orte sich die weiten Talbecken des Eisacktales zu engen Schluchten zusammenschließen. Die Inversionsschicht erstreckt sich häufig bis zur Höhe des Brennerpasses. Matrei ist auch bei Föhn lokal sehr wenig gestört und ersetzt das bisher als Föhnnormalstation betrachtete Igls in bester Weise.

Die Terminbeobachtungen der Zugspitze 2964 m und des Peissenberges 994 m, der in der bayrischen Ebene fast isoliert aufragt, werden häufig benutzt, fallweise auch Termindaten von einer Reihe nord- und südalpiner Stationen.

¹ Wenn ein sehr starker Wettersturm den Föhn beendigt, tritt natürlich auch in der föhnlosen Ebene Abkühlung ein, aber sie ist nicht so intensiv wie in den Örtlichkeiten, deren Temperatur durch den vorhergehenden Föhn abnorm gesteigert war.

Die Untersuchung hat folgenden Zweck: Es soll untersucht werden, ob die im zweiten Abschnitte gefundenen, teilweise sehr auffälligen Tatsachen auch auf dieser Föhnlinie gefunden werden, was die Überzeugung von der Richtigkeit unserer Schlüsse wesentlich kräftigen würde. Zweitens bietet uns die gleiche Höhenlage von Innsbruck und Brixen einerseits, Matrei und Sterzing andererseits die Möglichkeit, die gleichzeitigen Verhältnisse bei Föhn auf der Luv- und Leeseite zu vergleichen. Besonders günstig ist dabei der Umstand, daß der Peißenberg in der bayr. Ebene gleich hoch wie Matrei und Sterzing liegt. Hierdurch wird es möglich, die dynamischen Vorgänge bei Föhn auf der Luvseite in rohen Umrissen festzulegen. Die auf p. 37 in Punkt 4. geäußerte Ansicht bedarf ohnehin noch eines genaueren Nachweises.

1. Föhn am 6. und 7. November 1902.

Vorgänge vor dem Föhn: Typisch antizyklonale Verhältnisse gehen voraus. Vom 1. bis 6. November (inklusive) ist es auf Zugspitze und Sonnblick wolkenlos bei relativ schwachen Winden. Die relative Feuchtigkeit sinkt auf der Zugspitze bis auf 18%, auf dem Sonnblick bis auf 35%. In den Tälern und in der Ebene liegt feuchte, kalte Luft; viel Bodennebel; Temperaturumkehr. Peißenberg 994 m liegt zumeist noch innerhalb der Inversionsschichte, ist aber meist wärmer als Harlaching 559 m. Im Verlaufe des 6. November werden die Höhen feuchter, am Abend des 6. November (Zugspitze 6^h 45^m p.) beginnen in der Höhe Südstürme (9 p.: Zugspitze S₈, Sonnblick WSW₆, Peißenberg S₆). Auf dem Peißenberg tritt gleichzeitig Erwärmung ein. Der Himmel vorerst noch wolkenlos, die Feuchtigkeit noch weit von Sättigung entfernt: Die antizyklonalen Verhältnisse dauern bei stärkeren Winden bis zum 7. November an.

Vorgänge auf der Nordseite des Brenners: In Innsbruck am 5. November typische Strahlungsamplitude der Temperatur; die Temperatur bleibt aber auch zur Zeit stärkster Erwärmung niedriger als in dem um 400 m höher liegenden Matrei. In der Nacht vom 5./6. sinkt in Innsbruck die Temperatur bis auf —1·9°. Auch in Matrei sinkt die Temperatur am Abend bis auf 1·2°, dann tritt langsame, von Schwankungen unterbrochene Erwärmung ein. (siehe Diagramm). Die kalte Luft fließt ab, warme sinkt herab; die letztere gehört den oberen Schichten der Inversionsschichte an, nicht der Föhnströmung. Diesem Vorstadium folgt am Vormittag des 6. November Föhndurchbruch, während Innsbruck kälter bei normalem Temperaturgang bleibt. Die Inversionsschichte hat sich bis unterhalb Matrei gesenkt, liegt aber noch über Innsbruck.

In Matrei bleibt es bei Föhn warm; um 11 p. des 6. November ist Matrei um 5° wärmer als Innsbruck. Nun beginnt aber in Innsbruck langsame Erwärmung, die kalte Luft im Inntal fließt ab (um 9 p. notiert Innsbruck bereits S₂), warme Luft sinkt herab; aber Innsbruck bleibt vorerst noch kälter wie Matrei. Die Föhnströmung bricht noch nicht durch, sondern es senken sich nur jene Luftsichten, in welchen Temperaturumkehr herrscht. Dieses Vorstadium des Föhns beginnt in Innsbruck um 24 Stunden später als in Matrei. Am Vormittag des 7. November bricht in Innsbruck Föhn durch, Innsbruck wird wärmer wie Matrei, die potentielle Temperatur wird in beiden Orten gleich.

Da der Peißenberg höher als Innsbruck liegt, senkt sich die Inversionsschichte früher unter die Höhe des Peißenberges. Um 9 p. des 6. November fließt die kalte Luft stürmisch (S₆) im Alpenvorland ab, um 7 a. des 7. November ist der Peißenberg um fast 6° wärmer als das um 400 m niedrigere Innsbruck.

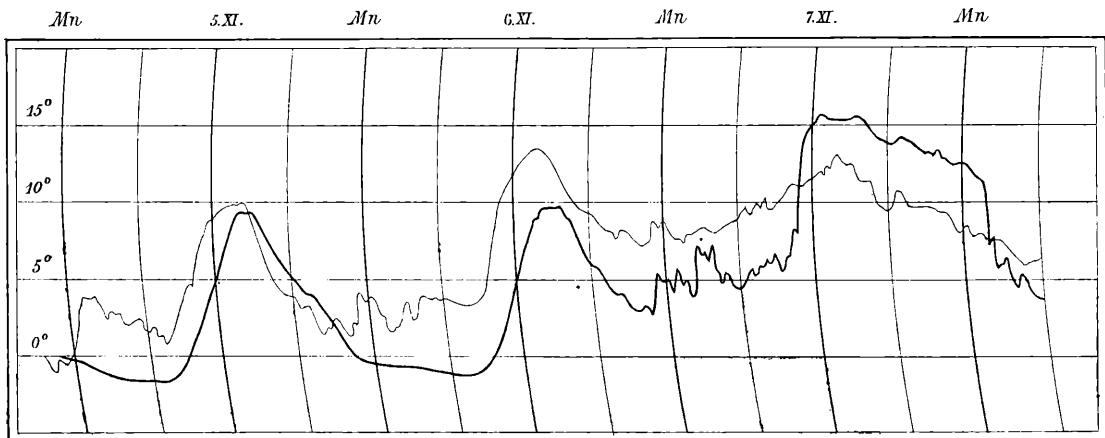
Man hat also scharf zu unterscheiden zwischen der langsamen Erwärmung vor dem Föhn (Vorstadium) und dem Durchbruche des Föhns selbst. Letzterer ist markiert durch eine schroffe Temperaturstufe, so daß wir annehmen müssen, daß an der oberen Grenze der Inversionsschichte sprunghafter Übergang zu absolut höherer Temperatur erfolgt.

Ursachen der abfließenden Luftbewegung im Vorstadium des Föhns: Wir sehen jetzt deutlich, welche geheimnisvolle Kraft die potentielle warme Luft der Höhe zwingt, als Föhn in die Täler hinabzusteigen. Durch die Ansammlung kalter Luft (Luft, durch starke Ausstrahlung erkaltet, fließt in die Talbecken ab) in den Gebirgstälern muß eine talabwärts gerichtete Luftströmung eintreten. Denn in den hochgelegenen Tälern liegen die kältesten, auf dem Boden lagernden Luftsichten in

viel höherem Niveau als in der Ebene und im Alpenvorlande. Über den letztgenannten Gebieten finden wir ja in der freien Atmosphäre Temperaturzunahme mit der Höhe, also höhere Temperaturen, als wir sie in gleicher Höhe in der Talsohle der Alpentäler finden. Hiedurch ist ein von den Alpen nach Norden gerichtetes Druckgefälle bedingt, wodurch die kalte Luft aus den Tälern abfließt, ohne daß zunächst an die aspirierende Tätigkeit eines Luftdruckminimums gedacht werden müßte. Die Alpentäler stellen hochgelegene Sammelbecken durch Ausstrahlung erkalteter Luft dar. Die

Fig. 22.

Nordseite.



Föhn am 6. und 7. November 1902.

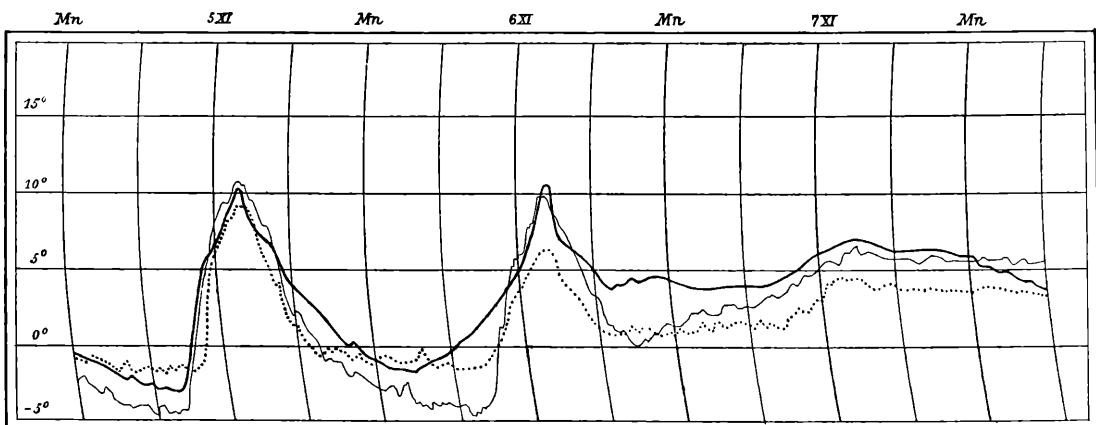
Innsbruck

Matrei.

antizyklonale Witterung, die wir ja zu Beginn eines jeden Föhns finden, erzeugt das Vorstadium des Föhns, das darin besteht, daß die kalte Luft aus den Tälern abfließt. Daß dabei langsame Erwärmung ein-

Fig. 23.

Südseite.



Föhn am 6. und 7. November 1902.

Brixen

Sterzing

Brenner.

treten muß, haben wir bereits gezeigt. Horizontaler Luftzufluß kann der Berge wegen nicht stattfinden, so daß Luft aus der Höhe herabsinken muß. Es senken sich zuerst die Schichten der Inversionsschicht, langsame Erwärmung bei anhaltend niedriger potentieller Temperatur in der Tiefe; nach Abfluß der Inversionsschicht sinkt die darüber lagernde, potentiell wärtere, an der Grenzfläche wohl meist absolut wärtere Luft herab, die potentielle Temperatur wird in der ganzen Luftsäule gleich, Föhn bricht durch. Das Abfließen der kalten Luft kann natürlich mit sehr verschiedener Geschwindigkeit vor sich gehen. Die Geschwindigkeit der nachströmenden, warmen Luft, die aus allen Seitentälern in das Föhntal zuströmt, wird aber auch wesentlich von den Querschnittsverhältnissen und dem ganzen Verlaufe der Föhntäler bedingt sein. Wir sehen hier auch deutlich, warum der Föhn eigentlich nur in den Tälern weht. Bemerkens-

wert ist die Tatsache, daß auf den Hochgipfeln die südlichen Winde in diesem Falle erst dann auffrischen, nachdem in der Tiefe das Abfließen der Inversionsschichte im Gange ist. Letzterer muß ja auch auf der Kammhöhe verstärkten Luftzufluß zur Folge haben.

Es erklärt sich ferner leicht, warum der Föhn in der Ebene später und meist überhaupt nicht zum Durchbruch kommt. In letzterem Falle fließt dann die warme Strömung in geringer Höhe über dem Boden. In Harlaching zum Beispiel ist die Temperatur am 7. November morgens $-0\cdot8^\circ$, auf dem Peißenberg, 350 m höher, $+10\cdot5^\circ$. Dieser warme Luftstrom sinkt erst dann zum Boden herab, wenn die kalte Luft abgeflossen ist. In der Ebene darf aber horizontaler Luftzufluß nicht übersehen werden. Wenn wir in einem Orte wie Harlaching Abfließen der kalten Luft finden, so kann zunächst Luft zuströmen, die aus gleich hohen, wenn auch südlicher gelegenen Gebieten kommt; diese zuströmende Luft wird im allgemeinen gleich temperiert sein. Ebenso kann aber auch Luftzufluß aus seitlichen Gebieten eintreten, so daß es unter allen Umständen lange dauern wird, bis die kalten Bodenschichten in der Ebene gänzlich abgeflossen sind.

Da auch über der Ebene die vertikale Mächtigkeit der Inversionsschichte abnimmt (siehe Peißenberg), die horizontale Erstreckung dieses Kaltluftsees über der Ebene aber eine unvergleichlich größere ist als in den engen Gebirgstälern, so wird die in den Tälern nachströmende Luft zum Teile in stürmische Bewegung kommen müssen.

Ist die Entwicklung so weit gediehen, daß die ganzen Luftmassen auf der Nordseite der Alpen in nordwärts gerichteter Bewegung sich befinden, wobei auch auf dem Alpenkamm bereits starke südliche Winde wehen, so wird allmählich auch auf der Südseite der Alpen ein Zuströmen der Luft und ein Aufsteigen an dem Gebirgshange eintreten, womit das Antizyklonalstadium des Föhns sein Ende erreicht. Dies trat im vorliegenden Falle am 7. November ein, einen Tag nach Ausbruch des Föhns in Matrei; die Feuchtigkeit steigt auf den Gipfeln bis zur Sättigung. Wir betrachten nunmehr die Vorgänge auf der Südseite.

Vorgänge auf der Südseite der Alpen: Am 5. November finden wir in Brenner, Sterzing und Brixen mächtige Tagesamplituden der Temperatur (siehe Diagramm); zwischen Sterzing und Brenner nachts und morgens Temperaturumkehr; typisch antizyklonales Wetter. Auch am 6. November tritt noch starke Erwärmung ein, mit starker Abkühlung in den Nachmittagsstunden (in Matrei weht bereits Föhn). Um 7 p. endigt die Abkühlung in Brixen und Brenner, um 9 p. in Sterzing. In letzterem Orte, der vorher zu kalt war, tritt starke Erwärmung während der Nacht ein, in den beiden anderen Orten langsame. Gleichzeitig wird es trüb. In Riva am Gardasee, weiter südlich, ist es bereits während des ganzen Tages trüb, auf dem südalpinen Obir 2044 m noch wolkenlos. Am 7. November tritt auch auf dem Obir mit Südsturm Trübung ein. Die Bewölkung breitet sich von S nach N aus. Infolge des früheren Beginnes der Trübung beträgt in Riva die Tagesschwankung der Temperatur nur mehr $1\cdot6^\circ$, in Sterzing 13° . Am 7. November ist dann, bei Niederschlägen, auch in den inneren Alpentälern der tägliche Gang der Temperatur gänzlich verwischt. Die Temperaturen erreichen in den Alpentälern zwar nicht die Maximalhöhe der vorhergehenden, wolkenlosen Tage; aber da anderseits die nächtliche Abkühlung fehlt, sind die Tagesmittel höher als an den vorhergehenden, antizyklonalen Tagen.

Tagesmittel der Temperatur.

	Brixen	Sterzing	Brenner	Innsbruck	Matrei	Obir	Sonnblick
5. November	$1\cdot6^\circ$	$0\cdot8^\circ$	$1\cdot0^\circ$	$2\cdot1^\circ$	$3\cdot9^\circ$	$3\cdot2^\circ$	$-1\cdot5^\circ$
6.	$3\cdot5$	$1\cdot1$	$0\cdot8$	$2\cdot9$	$7\cdot4$	$3\cdot4$	$-2\cdot1$
7.	$5\cdot2$	$4\cdot4$	$3\cdot1$	$11\cdot0$	$9\cdot6$	$0\cdot0$	$-3\cdot8$

Von der gewaltigen Temperatursteigerung auf der Föhnseite ist auf der Südseite nicht viel zu merken. In den Tälern der Luvseite tritt im stationären Föhnstadium geringe Erwärmung, auf den Gipfeln Abkühlung ein. Vor dem Föhn ist es, den antizyklonalen Verhältnissen entsprechend, in den Tälern sehr kalt, auf den Gipfeln sehr warm (Obir wärmer als Brixen und Innsbruck, die um 1500 m tiefer liegen). Nach Durchbruch des Föhns auf der Nordseite ist Innsbruck zeitweise um 8 bis 10° wärmer als das gleich hohe Brixen, Matrei um 5 bis 7° wärmer als das gleich hohe Sterzing, aber auch um 6 bis 7° wärmer als der nur um 400 m höhere Brennerpaß, so daß sich auf der Föhnseite zwischen Brenner und Matrei Temperaturgradienten ergeben, die den adiabatischen Wert übersteigen.

In Riva (90 m) liegt während des Föhns die Temperatur bei 10°, so daß sich im stationären Föhnstadium auf der Luvseite zwischen Riva und Brixen ein Temperaturgradient von 1°/100 m ergibt. Zwischen Brixen und Brenner ergibt sich während des Föhns eine Temperaturdifferenz von nur zirka 2°, bei 800 m Höhendifferenz. Diese Schichte ist fast als isotherm anzusehen. Auch von Brenner- bis Sonnblickhöhe nimmt die Temperatur sehr langsam ab, um zirka 7° bei einem Höhenunterschiede von 1700 m. Wir werden die Temperaturschichtung auf der Luvseite in weiteren Fällen untersuchen.

Übersicht: Dem Föhn gehen antizyklonale Verhältnisse voraus. Das Abfließen der kalten Inversionsschichte vor Durchbruch des Föhns kann auch auf der Brennerlinie deutlich verfolgt werden. Antizyklonalstadium und stationäres Föhnstadium sind scharf getrennt. Während des Antizyklonalföhns auf der Föhnseite finden wir auf der Luvseite typisch antizyklonale Witterung, mit mächtigen Tagesamplituden der Temperatur. Die Ausbildung des stationären Stadiums ist auf der Luvseite mit Trübung, Niederschlägen, geringer Erwärmung in den Tälern, Abkühlung in der Höhe bei gänzlicher Verwischung des täglichen Ganges verbunden. Die Temperaturabnahme mit der Höhe auf der Luvseite ist während des Föhns oberhalb 500 m ungemein langsam, auf der Föhnseite hingegen zwischen Brenner und Matrei rascher als 1°/100 m.

2. Föhn am 29. und 30. Dezember 1902.

Vorgänge vor dem Föhn: Am 28. Dezember am Nordostrand eines Luftdruckmaximums antizyklonale Verhältnisse; auf dem Sonnblick sinkt am 28. Dezember die relative Feuchtigkeit bis auf 40%. An diesem Tage wehen auf dem Sonnblick und auf der Zugspitze Nordwestwinde; am 29. Dezember setzen Südweststürme ein, bei zunehmender Feuchtigkeit und abnehmender Temperatur. Am 30. Dezember liegt in der Höhe bei andauernd südlichen Winden die Feuchtigkeit nahe der Sättigung, bei Schneefall. Bis zum 29. Dezember abends finden wir antizyklonale Verhältnisse, dann wird es feuchter und kälter mit Niederschlägen.

Antizyklonal tiefen Temperaturen finden wir nur in den Alpentälern, nicht in der Ebene. Zwischen Tälern und Gipfeln Temperaturumkehr.¹

Vorgänge auf der Nordseite: Die Inversionsschichte in den Alpentälern fließt ab, warme Luft erreicht zuerst jene Orte, die im oberen Verlaufe der Alpentäler liegen. In Matrei beginnt Erwärmung bereits um 11 p. des 28. Dezember, mit Temperaturstufe, also zu einer Zeit, wo in der Höhe noch antizyklonale Verhältnisse herrschen. Die Temperaturstufe in Matrei kennzeichnet in diesem Falle den Durchbruch des Föhns; das Vorstadium ist kaum angedeutet. Matrei dürfte also vor dem Föhn nahe der oberen Grenze der Inversionsschichte gelegen haben. Um 7 a. des 29. Dezember ist Matrei um 7° wärmer als

¹ Temperatur um 7 a. des 29. Dezember:

Ebene: Harlaching -0·6°, Augsburg 2·4°, Bregenz 0·0°, Kremsmünster -0·5°, Salzburg 1·0°.

Täler: Innsbruck -5·5°, Ischl -5·0°, Zell am See -9·4°, Gastein -4·4°, Langen -4·9°.

Gipfel: Peißenberg 0·9°, Wendelstein -1·0°, Schmittenhöhe -4·4°, Schafberg -2·2°, Untersberg -1·6°.

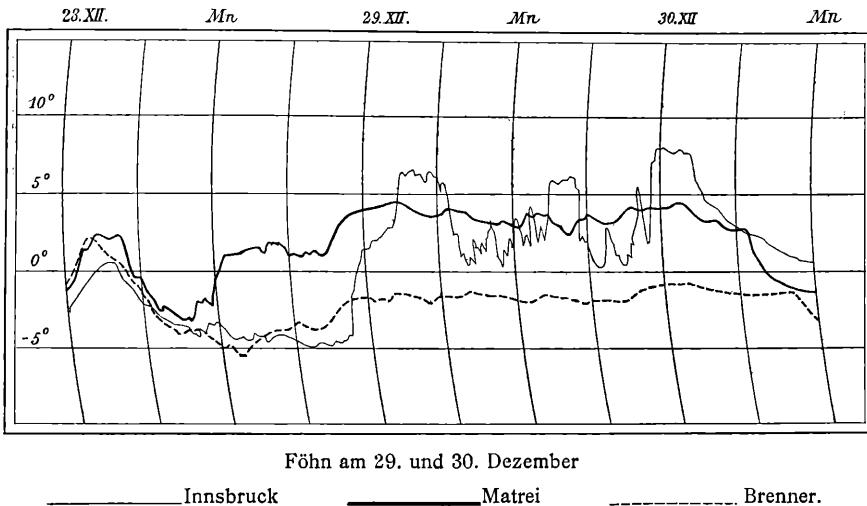
Hochgipfel: Sonnblick -7·4°, Zugspitze -7·6°.

Die Gipfel mittlerer Höhe sind also viel wärmer als die Täler; auch die potentielle Temperatur der Hochgipfel ist sehr hoch. Die Temperaturschichtung ist im alpinen Gebiete sehr stabil, viel weniger stabil über der Ebene.

Innsbruck. Über Innsbruck fließt die Inversionsschicht ab, wir finden von 10 a. bis 2^h 30^m p. Erwärmung mit starkem Südwind, wobei Innsbruck kälter bleibt als Matrei. Nach gänzlichem Abfließen der Inversionsschicht bricht in Innsbruck um 2^h 30^m p. Föhn durch mit jäher Temperaturstufe; Innsbruck wird wärmer wie Matrei. Die Temperaturdifferenz Innsbruck—Matrei erreicht den vollen Föhnbetrag und bleibt auf demselben, von langdauernden Föhnpausen in Innsbruck abgesehen.

Fig. 24.

Nordseite.



Föhn am 29. und 30. Dezember

Innsbruck

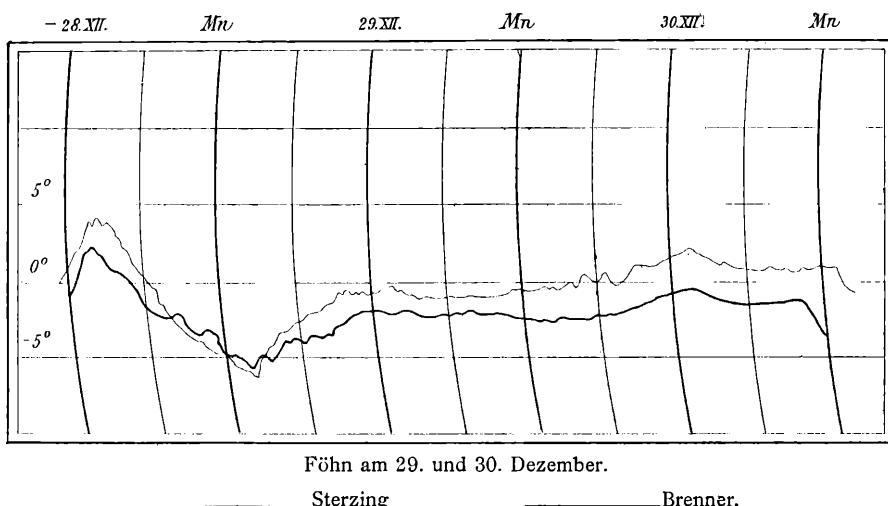
Matrei

Brenner.

Der Föhn erlischt am 30. Dezember in Innsbruck mit starker Abkühlung um 2^h 15^m p., in Matrei um 6^h 30^m p., also um vier Stunden später. Kalte Luft strömt in das Föhngebiet ein, breitet sich von Norden nach Süden aus, erscheint zuerst in der Tiefe, später in der Höhe. Gleichzeitig beginnen starke Schneefälle.

Fig. 25.

Südseite.



Föhn am 29. und 30. Dezember.

Sterzing

Brenner.

Vorgänge auf der Südseite: Am 28. Dezember herrscht auf der Südseite der Alpen in 2000 m Höhe (Obir) heiteres, fast wolkenloses Wetter, bei relativ hoher Temperatur. Vom 28. bis 29. Dezember tritt auf dem Obir mit Südweststurm beträchtliche Abkühlung ein, die Feuchtigkeit steigt auf 100%, zu einer Zeit, wo in 3100 m Höhe (Sonnblick) noch antizyklonale Verhältnisse herrschen. Unterhalb 2000 m beginnt auf der Südseite die Trübung anscheinend früher.

In Brixen, Sterzing, Brenner finden wir am 28. Dezember normale Temperaturamplituden. Die normale Abkühlung in der Nacht vom 28. bis 29. Dezember findet ihr Ende in Brixen um Mitternacht, in

Sterzing und Brenner um 2 a.; es beginnt langsame Erwärmung, welche die Temperatur von -5° auf zirka 0° erhöht, worauf die Temperatur während des Föhns auf der Nordseite auf der Südseite konstant bleibt, bei totaler Verwischung des täglichen Temperaturgangs. Die Tagesmittel der Temperatur werden etwas höher, während man in der Höhe Abkühlung findet. Die Verwischung des täglichen Ganges der Temperatur nach Eintritt des stationären Stadiums ersieht man aus folgender Gegenüberstellung

Temperaturamplitude	Riva	Brixen	Sterzing	Brenner
am 28. Dezember	4·1°	6·8°	8·2°	10·8°
29.	0·6	2·5	5·5	3·5
30.	1·1	2·6	2·4	1·9

Daß die Amplituden bei eintretender Trübung und Niederschlägen klein werden müssen, ist selbstverständlich. Sie sind charakteristisch für die südalpinen Orte, wenn das stationäre Föhnstadium eingetreten ist. Die Niederschläge selbst sind am 30. Dezember sehr ergiebig:

Riva	Gries	Brixen	Gossensaß	Arabba	Rollepaß	Schneeberg
66 mm	24	36	36	43	50	40

Da auf der Föhnseite am 30. Dezember nachmittags ein Kälteeinbruch mit Niederschlag den Föhn beendigt, während in der Höhe und auf der Südseite ¹ die südlichen Winde vorerst noch andauern, regnet es am 30. Dezember abends auf beiden Seiten der Alpen sehr stark. Aber auf jeder Alpenseite werden die Niederschläge verursacht durch Winde, die gegen die Alpen gerichtet sind.

Temperaturabnahme auf der Südseite während des Föhns: Die Tagesmittel der Temperatur einer Reihe südalpiner Stationen sind die folgenden:

	Gries 279 m	Brixen 560 m	Sterzing 948 m	Gossensaß 1082 m	Brenner 1370 m	Arabba 1618 m	Rollepaß 2000 m	Obir 2044 m	Sonnblick 3106 m
29. Dezember	0·9°	-1·8°	-2·0°	-1·3°	-2·9°	-3·9°	-4·7°	-5·6°	-10·0
30. Dezember	1·5	-0·7	-0·5	-0·3	-1·6	1·3	-4·3	-5·2	-11·2

Die Temperaturabnahme mit der Höhe ist zwischen 300 und 1600 m ungemein langsam; im Mittel der beiden Tage ist diese hohe Schichte fast als isotherm anzusehen, worauf über 1600 m die Gradienten rasch größer werden.

Brixen ist während des Föhns bis um 8° kälter als das gleich hohe Innsbruck, Sterzing um 3 bis 5° kälter als Matrei, ähnlich wie in dem früheren Falle.

Übersicht: Das Vorstadium des Föhns auf der Nordseite, hervorgerufen durch das Abfließen einer kalten Inversionsschichte, ist deutlich ausgesprochen, aber von kurzer Dauer. Das Erlöschen des Antizyklonalstadiums und der Eintritt des stationären Stadiums sind auf der Luvseite durch Trübung, Niederschläge, Verwischung des täglichen Temperaturgangs gekennzeichnet. Das Föhnende wird herbeigeführt durch den Einbruch kalter Luft von Norden her.

¹ Die einbrechende kalte Luft erreicht erst um 11 p. die Brennerhöhe, um fünf Stunden später als Matrei, neun Stunden später als Innsbruck (siehe Diagramm).

3. Föhn am 31. Jänner und 1. Februar 1903.

Vorgänge vor dem Föhn: Typisch antizyklonal, wolkenlos, ungemein trocken, intensive Temperaturumkehr; ¹ relative Feuchtigkeit sinkt auf dem Sonnblick bis auf 14, Zugspitze 18, Peißenberg 24%. Am 31. Jänner treten in der Höhe stärkere südliche Winde ein, die vorerst noch sehr trocken sind. Am 1. Februar folgen Südstürme, bei zunehmender Feuchtigkeit und abnehmender Temperatur in der Höhe. Die Feuchtigkeit liegt um 7 a. noch bei 50, 2 p. bei 70, 9 p. bei 90%. Bis etwa um Mittag des 1. Februar dauern also in der Höhe antizyklonale Verhältnisse an.

Vorgänge auf der Nordseite: In Matrei beginnt langsame Erwärmung bereits um 8^h p. des 31. Jänner (siehe Diagramm), wird um 8^h a. des 1. Februar rascher; um diese Zeit bricht Föhn durch, während vorher die potentiell wärmeren Schichten der Inversionsschichte herabgesunken sind. In Innsbruck beginnt Erwärmung nach 4^h a. des 1. Februar, ziemlich rasch; aber Innsbruck bleibt vorerst kälter wie Matrei. Daß die Inversionsschichte im Abfließen ist, beweist der um 7^h a. notierte SW₂, wobei die relative Feuchtigkeit 93% beträgt; es kann sich also noch nicht um Föhn handeln. Dieser bricht erst um 11^h a. durch, wobei Innsbruck wärmer als Matrei wird. Der Föhn erlischt in Innsbruck um Mitternacht, in Matrei um 4^h 15^m a. des 2. Februar also um 4 Stunden später als in Innsbruck. Alles verläuft wie im vorhergehenden Falle.

Vorgänge auf der Südseite: Auch hier herrscht am 31. Jänner morgens Temperaturumkehr.

Temperatur 7^h a.: Täler Brixen -9.8°, Sterzing -12.0°

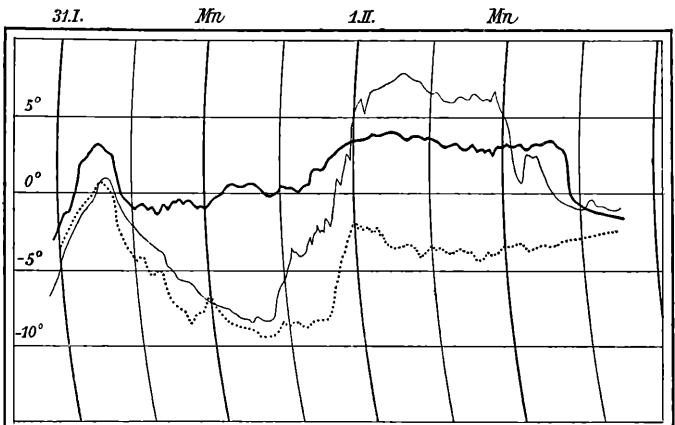
Gipfel und Pässe . Rollepaß -5.8 Brenner -9.5°, Obir 0.0°

Um 7 a. des 31. Dezember folgende Temperaturen:

Alpentäler							
Innsbruck	Ischl	Gastein	Bucheben	Langen	Feldkirch	Zell am See	Harlaching
-10.4°	-6.1°	-7.8°	-8.6°	-4.8°	-7.8°	-4.8°	-6.1°

Gipfel							
Zugspitze	Sonnblick	Untersberg	Schafberg	Schmittenhöhe	Wendelstein	Peißenberg	
-5.8	-6.4	-0.7	-2.0	-3.0	-2.0	-0.4	

Man sieht, daß die hochgelegenen Alpentäler viel kälter sind als niedrigere, isolierte Gipfel in der Ebene (Peißenberg), trotz allgemein bestehender Temperaturumkehr. Die kälteste Luft liegt überall am Boden, aber letzterer steigt eben in den Alpen an; die Sammelbecken kalter Luft sind in den Alpen in die Höhe gehoben, so daß es in gleicher Höhe viel kälter ist als über der Ebene.



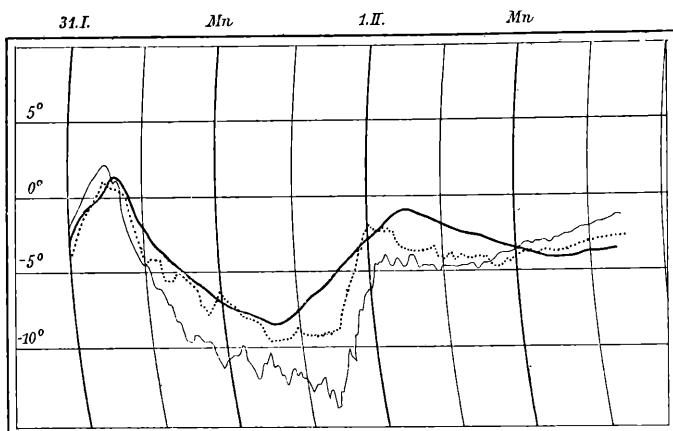
Föhn am 31. Jänner und 1. Februar 1903.

Innsbruck Matrei Brenner

Am 31./I. typisch antizyklonaler Temperaturgang; auch am Morgen des 1. Februar liegen die Temperaturen in den Tälern auch sehr tief. Bis Mittag tritt normale Erwärmung ein; diese hört um Mittag auf, worauf die Temperatur bei Verwischung des täglichen Ganges konstant auf gleicher Höhe bleibt.

Fig. 27.

Südseite.



Föhn am 31. Jänner und 1. Februar 1903.

Brixen —————— Sterzing Brenner

Höhe bleibt bis in den 2. Februar hinein. Zugleich tritt am 1. Februar, also im stationären Föhnstadium, Niederschlag ein, der in nachstehender Übersicht verzeichnet ist:

Riva	Gries	Brixen	Gossensaß	Arabba	Schneeberg	Rollepass
mm						
19	12	2	22	16	14	25

Die Temperaturdifferenz Brixen—Innsbruck steigt während des Föhns auf 8 bis 9°, während Matrei um 6 bis 12° wärmer ist wie das südalpine Sterzing. Die enormen Differenzen sind aber zum Teile darauf zurückzuführen, daß auf der Südseite noch Temperaturumkehr herrscht, während in Matrei bereits Föhn weht.

Wir stellen noch die Tagesmittel der Luv- und Leeseite und der Höhe gegenüber:

	Luvseite			Höhe		Leeseite	
	Brixen	Sterzing	Brenner	Sonnblick	Obir	Matrei	Innsbruck
31. Jänner	- 5.3°	- 7.0°	- 6.2°	- 6.8°	- 0.1°	- 2.8°	- 6.2°
1. Februar	- 4.2	- 6.8	- 4.9	- 11.2	- 5.4	1.8	1.1
Temperaturänderung vom 31. Jän. bis 1. Febr.	+ 1.1	+ 0.2	+ 1.3	- 4.4	- 5.3	+ 4.6	+

Der Übergang vom Antizyklonalstadium zum stationären Föhnstadium ist also in der Höhe mit Abkühlung, in den Tälern der Luvseite mit geringer Erwärmung verbunden; auch auf der Föhnseite tritt das Maximum der Erwärmung erst im stationären Stadium ein, trotz der Abkühlung in der Höhe. Es fließt auf der Luvseite im stationären Stadium dem Alpenkamm kältere Luft zu, welche die anti-

zyklonal warme Luft der Höhe verdrängt. Wir dürfen schließen, daß in der Höhe keine Abkühlung eingetreten wäre, wenn die antizyklonale Erwärmung vor dem Föhn nicht so intensiv gewesen wäre.

Den früheren Fällen gegenüber ergibt sich nichts wesentlich Neues.

4. Föhnerscheinungen vom 9. bis 12. Dezember 1902.

Bisher hatten wir es ausschließlich mit Föhn zu tun, bei welchem sich das stationäre Stadium aus antizyklonalen Anfängen entwickelte. Unter Antizyklonalföhn im strengen Sinne des Wortes aber versteht man Föhn, bei dem das stationäre Stadium nicht eintritt. Ein solcher Fall ist der nachstehende. Am 11. und 12. Dezember ist in Innsbruck Föhn notiert, der auch dadurch bemerkenswert ist, daß er bei steigendem Luftdrucke abläuft und nicht Schlechtwetter nach sich zieht.

Vorgänge vor dem Föhn: Am 9. Dezember morgens sind die Höhen noch kalt. Es beginnt bei wolkenlosem Himmel in der Höhe langsame, andauernde Erwärmung, verbunden mit Fall der relativen Feuchtigkeit, die am 12. Dezember auf der Zugspitze bis auf 16%, auf dem Sonnblick am 15. Dezember bis auf 20% sinkt. Die antizyklonalen Verhältnisse dauern ungestört vom 8. bis 16. Dezember an, also auch während des Föhns und nach Erlöschen desselben. In der Ebene und in den Tälern sinkt die Temperatur sehr stark; zeitweise herrscht äußerst stabile Temperaturschichtung, wie aus folgender Gegenüberstellung hervorgeht, in der die Föhntemperaturen durch fetten Druck hervorgehoben sind.

Temperatur um 7 a.:	8.	9.	10.	11.	12.	13.
	Dezember					
Harlaching	559 m	— 14° 3°	— 11° 3°	— 6° 6°	— 13° 4°	— 14° 7°
Innsbruck	574	— 10° 3	— 9° 5	— 8° 8	— 8° 0	— 1° 0
Peißenberg	964	— 12° 2	— 6° 3	— 9° 6	0° 8	3° 1
Zugspitze	2964	— 12° 9	— 11° 0	— 7° 4	— 4° 8	4° 7

Am 11. Dezember beginnt in Innsbruck Föhn, dauert am 12. Dezember an, ist am 13. Dezember erloschen. Gleichzeitig findet sich in der Ebene am Boden (Harlaching) keine Spur von Föhnwirkung, wohl aber sehr ausgeprägt auf dem isolierten, um 400 m höheren Peißenberg.

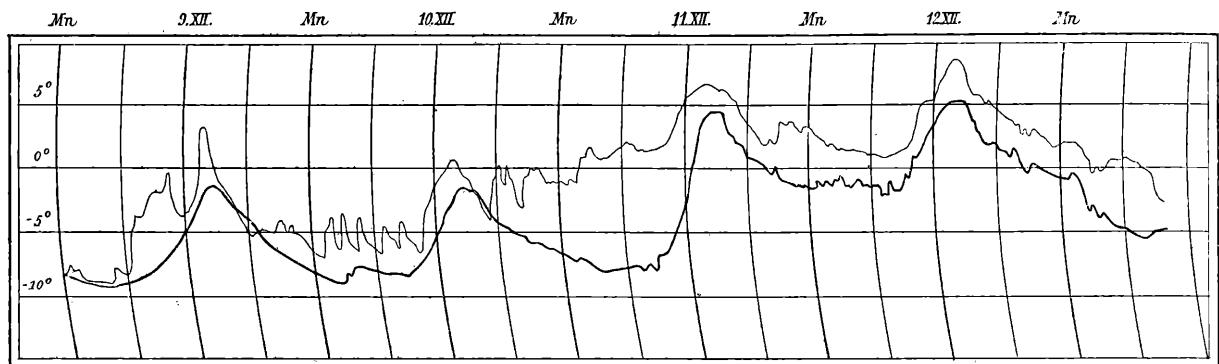
Vorgänge auf der Nordseite: Wie auf dem Diagramme ersichtlich, ist der Temperaturlang in Matrei vom 9. Dezember angefangen ein sehr eigentümlicher. Es treten zahlreiche und sehr intensive Temperaturschwankungen auf, die deutlich beweisen, daß Matrei nahe der oberen Grenze der Inversionschichte liegt. Es kommt zu keiner abfließenden Bewegung der letzteren, vermutlich deshalb, weil die kalten Luftmassen der Ebene und des Alpenvorlandes in Ruhe verbleiben; dort reicht ja die kalte Luft am 10. December noch bis über die Höhe des Peißenberges. Zeitweise dringt nach Matrei warme Luft herab, die wieder von kalter Luft verdrängt wird. Die regelmäßigen Schwankungen von 1 bis 10° a. des 10. December legen den Schluß nahe, daß es sich dabei um ein regelmäßiges Oszillieren der Inversionschichte handelt. Es ist dabei in Matrei konstant wärmer als in Innsbruck. Erst am Abend des 10. Dezember wird das Abfließen der Inversionsschichte über der Ebene rascher. Um 9 p. des 10. Dezember notiert Peißenberg Bodennebel mit Südoststurm (um 2° p. noch NE₁), es fließt also potentiell kalte Luft nordwärts stürmisch ab und es folgt bis 7° a. des 11. Dezember mächtige Erwärmung ein. Dieses Abfließen der kalten Luft über der Ebene zwingt die kalte Luft in den Alpentälern zum Nachströmen. Um 8 p. des 10. November beginnt auch in Matrei andauernde Erwärmung, die in den Vormittagsstunden des 11. Dezember in Föhn übergeht. Innsbruck ist am Morgen des 11. Dezember zeitweise um 10° kälter als Matrei; trotzdem notiert Innsbruck SE₁. Die kalte Luft fließt also auch hier ab, es folgt föhnartige Erwärmung.

mung. Aber Innsbruck bleibt kälter als Matrei, so daß der Föhn in Innsbruck überhaupt nicht ungestört zum Ausbruch kommt.

Das Abfließen der kalten Luft scheint auch auf die Winde in der Höhe beschleunigend einzuwirken; der Sonnblick verzeichnet am 11. und 12. Dezember stürmische, südliche Winde bei wolkenlosem Himmel

Fig. 28.

Nordseite.



Antizyklonalföhn am 11. und 12. Dezember 1902.

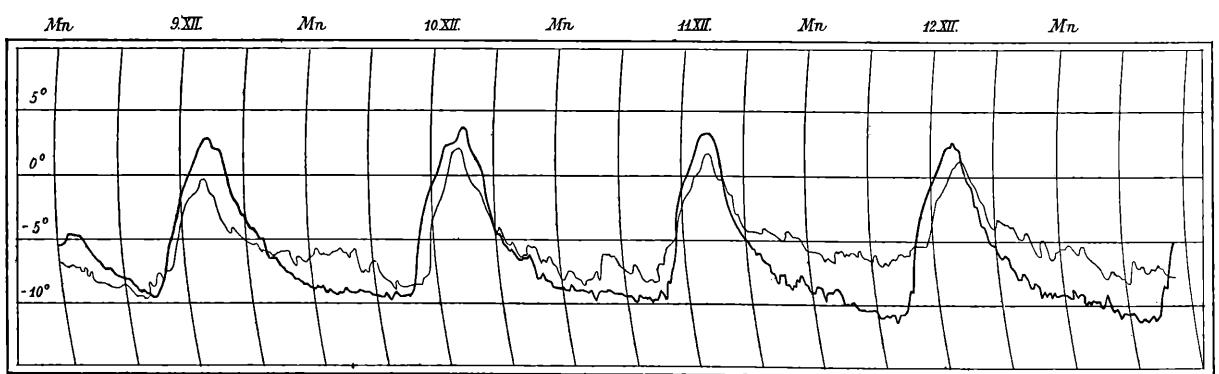
Innsbruck

Matrei.

und einer relativen Feuchtigkeit von 30 bis 40%, während auf der Zugspitze 16 bis 20% notiert werden. Als Minimum der relativen Feuchtigkeit während des Föhns findet man in Innsbruck 31%, ein deutlicher Beweis, daß die Strömung in Innsbruck nicht aus Zugspitzhöhe herabkommt.

Fig. 29.

Südseite.



Antizyklonalföhn am 11. und 12. Dezember 1902.

Sterzing

Brenner.

Würde man am 12. Dezember morgens in der Ebene in Harlaching einen Drachen emporsenden, würde man in Peißenberghöhe, also 430 m höher, eine um 18° höhere Temperatur finden. Unten ist gleichzeitig die relative Feuchtigkeit 85, oben 27%, bei wolkenlosem Himmel.

Warum der Föhn am 12. Dezember wieder in ungestörte, antizyklonale Verhältnisse übergeht, kann ohne Aufstellung gewagter Hypothesen nicht erklärt werden.

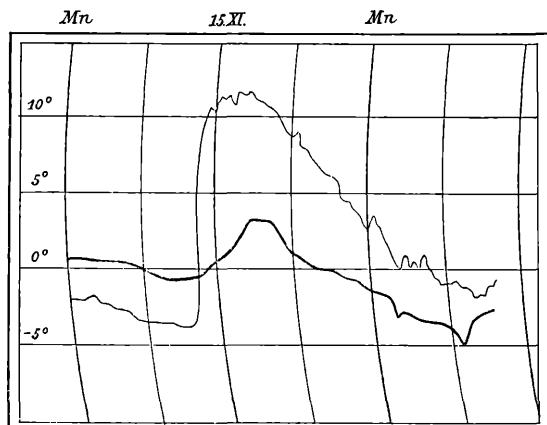
Vorgänge auf der Südseite: Auf der Südseite der Alpen zeigt sich während der ganzen Periode nichts, was auf den Föhn der Nordseite hinweisen würde. Der antizyklonalen Witterung entsprechend

finden wir ungemein starke Temperaturamplituden; nachts und morgens tritt regelmäßiger Temperaturumkehr ein. Auf dem Obir ist die Zeit vom 8. bis 15. Dezember wolkenlos bei schwachen, variablen Winden, die relative Feuchtigkeit liegt höher als auf dem Sonnbliek. Während des Föhns auf der Nordseite bleibt die Luft auf der Südseite in Ruhe und wird nicht in die Zirkulation einbezogen, trotzdem wir auf dem Alpenkamme stürmische, trockene, südliche Winde finden. Die Föhnströmung auf der Nordseite der Alpen führt also keine Luft, die vorher auf der Südseite der Alpen aufgestiegen ist; sie wird durch Luft erhalten, die dem Alpenkamme von Süden her wohl vorwiegend horizontal zufließt; die große Trockenheit der in der Höhe zugeführten Luft läßt auf eine vorhandene, vertikale Bewegungskomponente schließen. Das stationäre Föhnstadium kommt nicht zur Ausbildung.

Übersicht: Der Föhn entsteht in gleicher Weise wie in früheren Fällen, das Vorstadium ist gut ausgeprägt; die Entwicklung schreitet nicht bis zum stationären Stadium fort. Die Temperaturverhältnisse der Luvseite sind in keiner Weise beeinflußt, trotz stürmischer Winde in der Höhe. Es zeigt sich sehr schön, in welcher Weise in Antizyklonen die warme Luft aus der Höhe herabsinkt; vor allem ist wichtig, daß in den Alpentälern das Absteigen der Luft erst dann eintritt, nachdem die kalte Luftschierte über der Ebene in abfließende Bewegung geraten ist.

In ähnlichen Fällen kommt es vor, daß die warme Luft auch die Talsohle des Inntales nicht mehr erreicht, daß also die Inversionsschierte nicht nur in der Ebene, sondern auch im Inntale als Bodenschichte bestehen bleibt. Ein solcher Fall findet sich nachstehend.

Fig. 30.



Föhn am 15. November 1902 in Matrei.

Innsbruck ————— Matrei

6. Föhn vom 7. bis 11. Jänner 1903.

In der Höhe herrschen vom 5. bis 10. Jänner antizyklonale Verhältnisse, worauf sich das stationäre Föhnstadium entwickelt. Wir untersuchen die Temperaturabnahme mit der Höhe auf der Südseite. Nachstehend die Tagesmittel einer Reihe von Südtiroler Stationen.

Am 6. Jänner herrscht auf der Südseite der Alpen Temperaturumkehr; besonders die Höhen zwischen 1200 bis 2000 m sind abnorm warm, wobei (antizyklonaler) Nordföhneinfluß nicht ausgeschlossen ist. Vom 6. bis 7. Jänner tritt in der Tiefe Erwärmung ein, in der Höhe von 1000 m ändert sich nichts, die am Vortage abnorm warmen Höhen werden abgekühlt. Vom 7. bis 8. Jänner Erwärmung bis zirka 1400 m hinauf, darüber Abkühlung. Vom 8. bis 9. Erwärmung bis zirka 2400 m hinauf, in der Höhe Abkühlung. Am 10. Jänner Erwärmung in der ganzen Luftsäule. An diesem Tage beginnt das stationäre

Station	Höhe <i>m</i>	6.	7.	8.	9.	10.	11.
		J ä n n e r					
Riva	90	3°20'	5°00'	4°00'	5°50'	5°70'	6°70'
Gries	279	- 1°1	0°8	2°3	2°9	2°8	2°1
Brixen	560	3°7	- 3°0	- 0°9	- 0°5	0°7	1°1
Sterzing	1000	- 5°8	- 5°9	0°1	0°8	1°5	2°1
Brenner	1380	- 2°5	- 2°3	- 1°7	- 0°8	0°8	1°0
Arabba	1612	- 0°5	- 4°4	- 4°7	- 2°4	0°2	0°2
Rollepaß	2000	2°3	- 4°6	- 5°2	- 1°6	0°2	- 0°4
Obir	2044	2°1	0°8	- 2°9	- 3°0	- 1°6	- 0°9
Schneeberg	2370	- 0°1	- 6°9	- 6°5	- 3°3	- 2°3	- 2°9
Sonnblick	3106	- 6°7	- 6°3	- 7°1	- 8°2	- 6°8	- 6°9

Stadium, Zirkulation über die Alpen, Niederschläge in der Höhe, nachdem sie am Vortage bereits in den niedrigsten und südlichsten Stationen begonnen haben. Die Niederschläge halten am 11. Jänner an bei wenig veränderten Temperaturen.

Niederschlagsmengen:

	Riva	Gries	Brixen	Gossens- saß	Arabba	Rollepaß	Obir	Schnee- berg	Sonn- blick
<i>mm</i>									
9. Jänner	3°6	0°0	2°2	0°0	0°0	0°0	0°0	1°0	0°0
10.	48°1	11°2	15°2	0°0	11°3	24°8	5°4	7°0	4°6
11.	33°8	13°6	12°8	25°0	11°2	40°0	8°7	8°0	9°9

Während der ganzen Periode vom 6. bis 11. Jänner wehen in der Höhe südliche Winde; erst am 9. Jänner beginnt aufsteigende Luftbewegung auf der Südseite. Vorher strömt dem Alpenkamm horizontal in der Höhe oder aus der Höhe absteigend trockene Luft zu. Solange das stationäre Föhnstadium nicht eingetreten ist, ist die Temperaturabnahme mit der Höhe auf der Luvseite bei antizyklonalen Verhältnissen langsam, wird aber nach Eintritt der aufsteigenden Luftbewegung am Alpenkamm rascher. Der Gradient wird im stationären Föhnstadium zwischen 100 und 600 m sehr rasch, zwischen 600 und 2000 m ungemein langsam; die Schichte zwischen 600 und 1400 m ist fast als isotherm anzusehen, da die Brennerhöhe gleich temperiert ist wie das um 800 m niedriger gelegene Brixen. Zwischen 2000 und 3000 m wird der Gradient größer.

Temperaturabnahme pro 100 m zwischen:

	10. Jänner	11. Jänner
Riva—Brixen ¹	1°06°	1°19°
Brixen—Brenner	0°00	0°00
Brenner—2000 m ²	0°23	0°27
2000 m—Sonnblick	0°55	0°56

¹ Riva ist zu warm; gehört dem klimatisch sehr begünstigten Gebiet der oberitalienischen Seen an.

² Mittel aus Obir und Rollepaß.

Wir finden ganz gleiche Verhältnisse wie in früheren Fällen. Die Gradienten entsprechen unseren theoretischen Erwartungen nicht im geristen. Die rasche Temperaturabnahme in der untersten Schichte ist selbstverständlich, wenn man annimmt, daß das Kondensationsstadium erst höher beginnt. Auch die Gradienten zwischen 2000 und 3000 m sind normal. Überraschend ist nur in allen Fällen die Isothermie der mittleren Schichten. Obwohl die Temperatur in dieser Mittelschichte nahe bei 0° liegt, kann der verschwindend kleine Gradient nicht gut darauf zurückgeführt werden, daß bei Beginn des Schneestadiums die Temperaturabnahme im aufsteigenden Luftstrom so lange gleich Null ist, bis alles flüssige Wasser in Eis (Schnee) verwandelt ist. Dieser an sich sehr plausiblen Annahme widerstreitet die große Mächtigkeit der isothermen Mittelschichte. Näher liegend scheint die Annahme, daß die Temperaturabnahme mit der Höhe deshalb verschwindend klein wird, weil die von Süden gegen die Alpenmauer wehenden Luftströme in ihrer horizontalen Bewegung gehemmt werden und sich regellos mischen, ein Vorgang, der im individuellen Falle nicht rechnerisch verfolgt werden kann.

Auf ähnliche Überlegungen wird man geführt, wenn man die Temperaturabnahme mit der Höhe auf der Nordseite der Föhnseite betrachtet. Wir bestimmen hier die Gradienten pro 100 m für den 9. und 10. Jänner, weil am 11. Jänner der Föhn nachmittags erlischt, wodurch die Tagesmittel für uns unbrauchbar werden.

Temperaturabnahme pro 100 m zwischen:

	9. Jänner	10. Jänner	Mittel
Peißenberg — Schmittenhöhe	0·84°	0·71°	0·77°
Schmittenhöhe — Sonnblick	0·74	0·83	0·79
Peißenberg — Sonnblick	0·75	0·74	0·75

Die Gradienten sind zwar viel größer wie auf der Südseite, aber kleiner, als es die Theorie fordert, wobei zu beachten ist, daß die gewählten Stationen auf Gipfeln liegen. Die Höhen sind also auch auf der Leeseite während des Föhns potentiell zu warm, was wir bereits im Abschnitt II festgestellt haben. Wir vergleichen noch die Tagesmittel gleich hoher Stationen der Luv- und Leeseite.

Temperaturabnahme pro 100 m zwischen

	9. Jänner	10. Jänner	11. Jänner
Luvseite — Brixen	— 0·5°	0·7°	1·1°
Leeseite — Innsbruck	2·5	5·0	5·8
Luvseite — Sterzing	0·8	1·5	2·1
Leeseite } Matrei	5·3	6·6	6·0
Peißenberg	8·3	9·4	5·0
Luvseite — Obir	— 3·0	— 1·6	— 0·9
Leeseite — Schmittenhöhe	— 0·1	2·3	2·1
Zentral- } Sonnblick 3100 m	— 8·2	— 6·8	— 6·9
alpen } Brenner 1370	— 0·8	0·8	1·0

Wir beschränken uns auf den 10. Jänner. Würde Luft vom Brenner allein nach Matrei kommen, so müßte in Matrei eine Temperatur von zirka 5° eintreten. Käme Luft aus Sonnblickhöhe nach Matrei, so müßte eine Temperatur von 14° eintreten. Die tatsächliche Temperatur ist höher als bei der ersten, aber viel niedriger als bei der zweiten Annahme; die Peißenbergtemperatur liegt ungefähr in der Mitte.

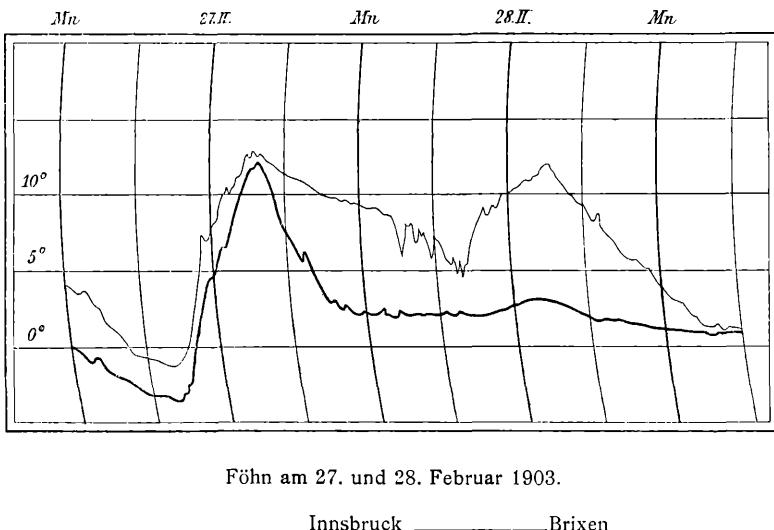
Die Temperaturen in Matrei, Peißenberg und Innsbruck sind unerklärlich hoch bei der Annahme, daß der Föhn nur Luft führt, die von der Südseite über den Brennerpaß kommt. Sie wären unerklärlich

niedrig, wenn der Föhn aus Sonnblickhöhe käme. Da nun der Brenner unter der mittleren Kammhöhe der Zentralalpen (in dem betrachteten Gebiet), der Sonnblick über derselben liegt, löst sich die Schwierigkeit bei der Annahme, die Temperatur der Föhnströmung werde erzeugt durch Mischung von Strömungen, die zum Teil über die zu niedrigen Pässe, zum Teil über die zu hohen Hochalpen auf die Nordseite der Alpen übertreten. In Matrei passiert bei Föhn nicht nur Luft, die vom Brenner herabkommt, sondern auch Luft, die von den viel höheren Gebirgen östlich und westlich des Passes in das Föhntal herabsinkt. Durch die orographischen Verhältnisse ist einerseits eine zu rasche Temperaturabnahme zwischen Matrei und Brenner, andererseits eine zu langsame zwischen den Tälern und Gipfeln auf der Leeseite bedingt. Hierdurch erklären sich auch die langsamen Gradienten, die wir in Abschnitt II zwischen Patscherkofel und Zugspitze gefunden haben.

7. Föhn am 27. und 28. Februar 1903.

Dieser Föhn ist ein typisches Beispiel, wie auch auf der Luvseite, nicht nur in der Höhe, Antizyklonalstadium und stationäres Stadium sich scharf voneinander abgrenzen.

Fig. 31.



Föhn am 27. und 28. Februar 1903.

Innsbruck Brixen

ebenso hoch wie in den Föhnorten der Leeseite unter Fallwindeinfluß. Am Abend des 27. Februar tritt Trübung ein, auf dem Obir starker Südwest. Am 28. Februar hält die Trübung bei Südweststurm auf dem Obir an, es tritt das stationäre Föhnstadium ein, der tägliche Gang der Temperatur in den Tälern ist gänzlich verwischt. Der Gegensatz zwischen 27. und 28. Februar ist aus dem Diagramm dieser Tage besonders schön ersichtlich, während auf der Föhnseite in gleicher Höhe der Gegensatz zwischen Antizyklonal- und stationärem Stadium verschwindet. Dieser Gegensatz prägt sich nur in der Höhe und auf der Luvseite aus.

8. Föhn am 15. und 16. März 1903.

Vorgänge vor dem Föhn: Am 14. und 15. in der Höhe typisch antizyklonale Verhältnisse: heiterer Himmel, Feuchtigkeit sinkt bis auf 35%. Am 15. März beginnen in der Höhe Südstürme, die vorerst trockene Luft führen, am 16. März feucht werden. Am 14. und 15. März morgens Temperaturumkehr zwischen Harlaching—Peißenberg, Salzburg—Untersberg, Ischl—Schafberg, Zell am See—Schmittenhöhe. Der Föhn entwickelt sich aus dem uns bereits wohlbekannten Anfangszustande.

Nordseite: Um Mitternacht des 14./15. März beginnt in Matrei langsame Erwärmung, die in Föhn übergeht. Bis um 10^h a. ist Matrei wärmer als Innsbruck, dann bricht auch in Innsbruck Föhn aus; Innsbruck wird wärmer als Matrei. Der Föhn dauert bis 16. März abends.

Vorgänge in der Höhe: Die Zeit vom 25. bis 28. Februar mittags ist auf den Hochgipfeln typisch antizyklonal, wenig bewölkt und sehr trocken (Sonnblick, Minimum der relativen Feuchtigkeit 40%, Zugspitze 25%). In der Ebene und in den nördlichen Alpentälern stellenweise Temperaturumkehr. Der Föhn beginnt wie in den früheren Fällen.

Vorgänge auf der Südseite: Am 26. und 27. Februar in Brixen und Sterzing mächtige Tagesamplitude der Temperatur. In den Mittagsstunden steigt unter Insolationseinfluß die Temperatur

In Innsbruck bringt auch die maximale Erwärmung durch den Föhn nicht höhere Temperaturen als jene, die an den vorhergehenden Tagen mit antizyklonalem Charakter um Mittag eintreten. In Matrei werden während des Föhns nicht einmal die maximalen Temperaturen der Vortage erreicht. Die Tagesmittel liegen aber bei Föhn höher, weil die nächtliche Abkühlung fehlt.

Südseite: Es tritt zwar das stationäre Föhnstadium und damit eine Zirkulation von der Südseite auf die Nordseite hinüber ein. Aber wir finden auch im stationären Stadium Niederschlag am 16. März nur auf den Hochgipfeln. Es wird also auf der Luvseite Luft zugeführt, die erst in großer Höhe die Kondensationsgrenze erreicht. Hierdurch verwischen sich einerseits die großen Temperaturunterschiede, die wir sonst bei Föhn zwischen gleich hohen Stationen der Luv- und Leeseite gefunden haben. Zweitens finden wir, da die auf der Luvseite aufsteigende Luft trocken ist, eine rasche Temperaturabnahme zwischen Brixen und Brenner, abweichend von früheren Fällen. Drittens entspricht die Temperaturabnahme auf der Föhnseite zwischen Matrei und Brenner dem theoretischen Werte, weil es bei mangelnder Kondensation auf der Luvseite prinzipiell ohne Einfluß ist, ob in Matrei Luft strömt, die über den Brenner oder aus größeren Höhen herabkommt, da bei mangelnder Kondensation ja auch auf der Luvseite die potentielle Temperatur in der aufsteigenden Strömung gleich ist.

Es tritt auf der Luvseite vom 15. bis 16. März Erwärmung ein, die durch den ohne Kondensation verlaufenden Zirkulationsprozeß auf die Föhnseite übertragen wird.

Der geringe Temperaturunterschied zwischen Föhn- und Luvseite (am 16. März) ist aus nachstehender Übersicht zu ersehen.

Tagesmittel der Temperatur.

	Innsbruck	Matrei	Brenner	Sterzing	Brixen
am 15. März	5·4°	4·4°	— 0·8°	1·3°	4·7°
16.	8·4	6·0	1·6	4·7	6·3

Der Fall, daß auch bei Ausbildung des stationären Föhnstadiums auf der Luvseite bis in große Höhe hinauf keine Kondensation eintritt, ist selten (Föhnfälle im Frühling und Sommer stehen nicht zur Verfügung). Tritt dieser seltene Fall ein, so ergeben sich den mit Kondensation verbundenen Fällen gegenüber bedeutende Unterschiede, die aber auf Grund der Theorie leicht zu erklären sind.

9. Föhn am 18. und 19. November 1902.

Vorgänge in der Höhe und auf der Nordseite: Nach einer langen Periode antizyklonaler Witterung ist es am Morgen des 18. November in der Höhe sehr kalt und feucht. Auch in der Tiefe finden wir niedrige Temperaturen bei heiterem Himmel ohne Temperaturumkehr. Den Südostwinden in der Höhe entsprechen in tieferen Stationen und auf der Südseite der Alpen östliche Winde von teilweise sturmärtiger Heftigkeit. Die Verhältnisse am Morgen des 18. November stellen einen Kälteeinbruch aus dem Osten des Kontinentes dar, der sich in große Höhen hinauf erstreckt, wie besonders deutlich aus den Wetterkarten hervorgeht.

Temperaturen um 7 a.

	Sonnblick	Zugspitze	Obir	Untersberg	Schmittenhöhe	Peissenberg
18. November	— 18·2°	— 14·6°	— 16·4°	— 12·4°	— 13·0°	— 9·8°
	Salzburg	Innsbruck	Augsburg	Feldkirch	Zell am See	Harlaching
18. November	— 4·8°	— 5·6	— 6·3	— 2·2	0·0	— 7·7

Auf der Zugspitze beginnt bereits am 18. November wieder Erwärmung bei sinkender Feuchtigkeit (7^h a.: 100%; 9^h p.: 58%) und abflauendem Wind (7^h a.: SSE₃; 9^h p.: Kalme). Es treten also auf der Zugspitze unmittelbar nach dem Kälteeinbruch wieder antizyklonale Verhältnisse ein, während in der Tiefe, in der Ebene vor allem, die Temperatur der von Osten zugeführten kalten Luft durch Ausstrahlung noch weiter sinkt. Am Morgen des 19. November herrscht bereits Temperaturumkehr, wie aus folgenden Daten (19. November, 7^h a.) hervorgeht.

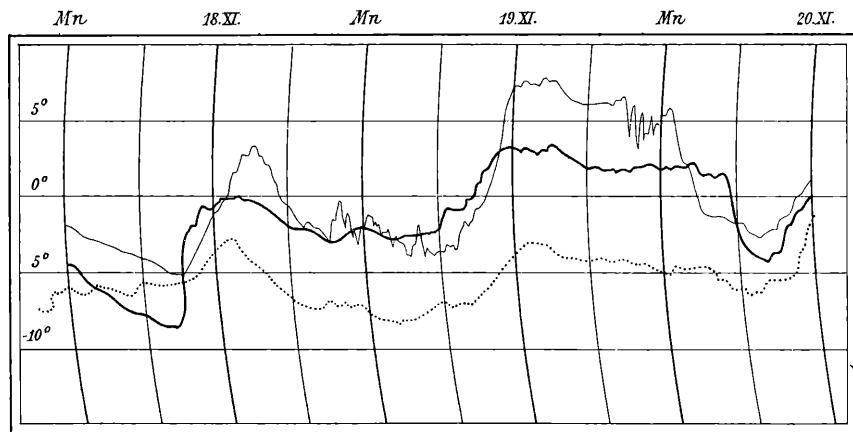
Untersberg	Langen	Bucheben	Matrei	Zugspitze	Salzburg	Feldkirch	Ischl	Innsbruck	Harlaching
- 1° 8'	- 1° 6'	2° 4'	- 1° 0'	- 10° 4'	- 5° 5'	- 5° 6'	- 7° 4'	- 3° 4'	- 9° 0'

In den hochgelegenen Alpentälern und auf den Gipfeln ist Erwärmung eingetreten, im Alpenvorland und in der Ebene Abkühlung. Wie die Erwärmung in der Höhe vor sich geht, sieht man besonders schön in Matrei.

In Matrei beginnt starke Erwärmung bereits um 9^h a. des 18. November. In Innsbruck finden wir vorübergehend Erwärmung, dann starke Schwankungen. Das Vorstadium endigt um 6^h a. des

Fig. 32.

Nordseite



Föhn am 18. und 19. November 1902.

Innsbruck _____ Matrei Brenner

19. November; es tritt in Matrei weitere starke Erwärmung ein, es bricht Föhn durch, der in Innsbruck um 9^h a. zum Ausbruch kommt. Um 7^h a. notiert Innsbruck SW₃ bei einer relativen Feuchtigkeit von 95% und ist um diese Zeit noch kälter als Matrei. Wir haben es also um 7^h a. noch nicht mit Föhn, sondern bei langsamer Erwärmung mit dem Abfließen der Inversionsschichte zu tun.

Vorgänge auf der Südseite: Auf der Südseite ist es vom 17. bis 20. November stark bewölkt, mit Niederschlag am 19. und 20. November. Am 19. November entwickelt sich die stationäre Föhnströmung. Die Tagesamplituden der Temperatur sind klein, der starken Bewölkung entsprechend. Wir finden am 18. und 19. November folgende Tagesmittel der Temperatur, die auf der nächsten Seite angegeben sind.

Bis zu einer Höhe von 1000 m ist also die Ausbildung des stationären Föhnstadiums auf der Südseite der Alpen mit Abkühlung, über dieser Höhe mit Erwärmung verbunden. Das Sinken der Temperatur in den tiefsten Tälern kann nicht auf Ausstrahlung zurückgeführt werden, weil es regnet. Es weht also im stationären Föhnstadium ein Luftstrom gegen die Alpen, der in der Tiefe relativ kalt, in der Höhe relativ warm ist, gerade umgekehrt, wie in früheren Fällen. Man kann also gewiß nicht behaupten, daß die Entwicklung des stationären Föhnstadiums von ganz bestimmten Temperaturänderungen in den ein-

	18. November	19. November	Temperaturänderung vom 18. bis 19. November
Riva	5° 5	2° 5	- 3° 0
Gries	3° 7	0° 7	- 3° 0
Brixen	- 0° 3	- 1° 0	- 0° 7
Sterzing	- 1° 8	- 2° 4	- 0° 6
Gossensaß	- 1° 4	- 1° 7	- 2° 3
Brenner	- 6° 1	- 5° 5	+ 0° 6
Arabba	- 7° 6	- 4° 8	+ 2° 8
Rollepaß	- 7° 0	- 5° 5	+ 1° 5
Schneeberg	- 13° 0	- 7° 1	+ 5° 9
Sonnblick	- 18° 4	- 12° 5	+ 5° 9

zernen Höhenschichten der Luvseite begleitet ist. Sind die Höhen vor dem Föhn infolge antizyklonaler Verhältnisse abnorm warm, die Täler abnorm kalt, so wird in letzteren bei Ausbildung des stationären Stadiums im allgemeinen Erwärmung, in der Höhe Abkühlung eintreten. Ist aber die Temperaturschichtung auf der Luvseite vor dem Föhn weniger stabil, so kann das Gegenteil eintreten. Im vorliegenden Falle finden wir vor dem stationären Stadium zwischen Riva und Sonnblick einen Gradienten von $0\cdot8^{\circ}/100\text{ m}$, nach Eintritt einer Zirkulation über die Alpen nur $0\cdot5^{\circ}/100\text{ m}$; die Temperaturschichtung wird also in diesem Ausnahmsfall stabiler.

Das vorliegende Material reicht nicht aus, um die Vorgänge auf der Luvseite in detaillierter Weise zu verfolgen. Es handelt sich mehr um eine erste, flüchtige Orientierung. Es fragt sich, ob wir auf Grund der gefundenen Tatsachen uns ein Bild machen können, in welcher Weise bei Föhn auf der Nordseite der Alpen eine aufsteigende Luftbewegung auf der Südseite eintreten kann oder, kurz gesagt: Wie haben wir uns die Entwicklung des stationären Föhnstadiums aus dem Antizyklonalstadium vorzustellen? Die Frage könnte überflüssig erscheinen; man findet ja bei Föhn auf der Südseite der Alpen ein gegen die Alpen gerichtetes Druckgefälle, das Luftbewegung gegen die Alpen zur Folge hat. So einfach ist die Frage aber nicht. Wir haben dieses Druckgefälle auch bei Antizyklonalföhn, ohne daß eine aufsteigende Bewegung auf der Südseite stattfindet; nur in der Höhe finden wir dann südliche Winde. Diese südlichen Winde sind oft sehr stark, so daß trotz der geringen relativen Feuchtigkeit die horizontale Komponente der Bewegung die absteigende bei weitem überwiegen muß. Möglicherweise wird auch nur trockene Luft aus weit entfernten Gebieten horizontal dem Alpenkamm zugeführt. Wie überträgt sich nun diese Luftbewegung in der Höhe auf der Südseite der Alpen auf die tieferen Luftsichten?

Im allgemeinen wird bei Föhn der Luftaustausch zwischen Barometermaximum und -minimum auch östlich und westlich der Alpen vor sich gehen, wo die nach Norden abfließende Luft durch horizontalen Zufluß aus Süden ersetzt werden kann, was auf der Nordseite der Alpen nicht der Fall ist. Hier entsteht vielmehr eine absteigende Luftbewegung, die durch Luftzufluß aus der Höhe genährt wird. Es fließt also hier dem Alpenkamm Luft von Süden zu; zunächst wohl horizontal. Der Alpenkamm selbst aber ist von sehr verschiedener Höhe; es wechseln hohe Kämme mit tiefen Einsenkungen. Letzteren fließt ebenso aus Süden Luft zu wie den Kämmen, vielleicht sogar früher als den letzteren, weil der Impuls zum Absteigen der Luft auf der Leeseite auf letzterer selbst zu suchen ist. Beschränken wir unsere Betrachtung nur auf die Brennergegend, so werden wir gegen Ende des Antizyklonalstadiums horizontalen Luftzufluß gegen die Alpen in der ganzen Luftsicht zwischen Brennerpaß und Alpenkamm, also zwischen 1400 und zirka 3000 m haben. Die Luftbewegung überträgt sich nicht aus der Höhe auf die tieferen Schichten, sondern die gleichen Ursachen, die den Südwind auf der Kammhöhe verursachen, bewirken auch Südwinde in der Brenner-Einsenkung; wenn aber zwischen 1400 und 3000 m ein Luftstrom aus Süden gegen die Alpen weht, so wird hier bereits Wolkenbildung mit Niederschlag eintreten. Ob es dann wirklich auch auf der Südseite der Alpen in den niedriger gelegenen Talsohlen zu einer aufsteigenden Luftbewegung kommt und aus welchen Ursachen, darüber können nur haltlose Vermutungen geäußert werden. Zur Beantwortung dieser Frage müßte ein ganz anders geartetes Beobachtungsmaterial zur Verfügung stehen. Tatsächlich

findet man auch im stationären Föhnstadium stärkere Südwinde auf der Südseite der Alpen meist nur in größerer Höhe. Uns muß der Nachweis genügen, daß als Konsequenz des Antizyklonalstadiums sich auf der Südseite Südwinde in jener Luftsicht ergeben, deren Mächtigkeit durch die Höhe der tiefsten Einsenkungen und der mittleren Kammhöhe bestimmt ist.

Eine Übersicht über die auf der Brenner Föhnlinie gefundenen Tatsachen ergibt folgendes:

1. Wir finden die Resultate bestätigt, die wir in Abschnitt II, Übersicht, Punkte 1 bis 6, mitgeteilt haben. Dem Föhn gehen antizyklonale Verhältnisse voraus, mit großer Trockenheit in der Höhe, sehr stabiler Temperaturschichtung in der Tiefe. Dem Föhdurchbruch in den Tälern geht Abfließen der kalten Inversionsschicht voraus, was mit langsamer Erwärmung verbunden ist — Vorstadium des Föhns. Während des Vorstadiums ist Innsbruck trotz südlicher Winde und langsamer Erwärmung kälter als Matrei, gleichgültig, ob in Matrei der Föhn bereits voll durchgebrochen ist oder ob auch noch über Matrei die Inversionsschicht im Abfließen begriffen ist. Nach gänzlichem Abfließen der Inversionsschicht bricht Föhn durch, Innsbruck wird wärmer als Matrei, die potentielle Temperatur in beiden Orten gleich. Die Ursache, welche die potentiell warme Luft der Höhe zwingt, als Föhn in die Täler abzusteigen, haben wir in dem Abfließen der kalten Inversionsschicht zu suchen. Ist der Föhn in den Föhntälern ausgebrochen bei andauernd antizyklonalen Verhältnissen in der Höhe, so haben wir das erste Föhnstadium, das Antizyklonalstadium. Dieses geht in das stationäre Föhnstadium über, wenn auf der Südseite Luftzufluß gegen die Alpen eintritt. Die Gipfel werden feucht; Temperaturabnahme tritt im stationären Stadium in der Höhe anscheinend dann ein, wenn die vorausgehende antizyklonale Erwärmung sehr bedeutend war.

2. Auf der Südseite der Alpen, der Luvseite, sind Antizyklonalstadium und stationäres Stadium besonders deutlich ausgeprägt. Im Antizyklonalstadium ist die Luft auf der Südseite der Alpen bei heiterem Himmel in Ruhe; wir finden den normalen, täglichen Temperaturgang mit starken Tagesamplituden, häufig mit Temperaturumkehr. Erlischt der Föhn auf der Nordseite im Antizyklonalstadium, so finden wir auf der Luvseite keine Anzeichen des auf der Leeseite wehenden Föhns.

3. Das stationäre Föhnstadium tritt ein, wenn auf der Südseite Luftbewegung gegen die Alpen eintritt. Es tritt Trübung und Niederschlag ein, der tägliche Temperaturgang wird gänzlich verwischt. Die eintretenden Temperaturänderungen sind nicht eindeutig. Es kann je nach dem Anfangszustand in den Tälern Erwärmung, in der Höhe Abkühlung eintreten oder auch umgekehrt.

4. Die Temperaturabnahme mit der Höhe im stationären Föhnstadium ist auf der Luvseite in den untersten Schichten meist rasch, wird in mittleren Höhen ungemein langsam, in größeren Höhen wieder rascher. Die Isothermie der mittleren Luftsichten kann am besten auf Luftmischung zurückgeführt werden, wie auch auf der Föhnseite die aus orographischen Ursachen eintretende Luftmischung verschieden temperierter Ströme die Temperaturabnahme verlangsamt. Wird im stationären Föhnstadium auf der Südseite relativ trockene Luft zugeführt, so daß bis zur Kammhöhe der Zentralalpen Kondensation nennenswerten Betrages nicht eintritt, so wird nicht nur auf der Luvseite die Temperaturabnahme im allgemeinen rascher, sondern es verwischen sich auch die Temperaturgegensätze zwischen gleichen Höhen der Luv- und Leeseite.

5. Die auch im stationären Föhnstadium mitunter sehr großen Temperaturdifferenzen zwischen gleichen Höhen der Luv- und Leeseite sowie die zu rasche Temperaturabnahme auf der Föhnseite zwischen Matrei und Brenner beweisen, daß der Föhn auf der Brennerlinie nicht nur über den Brennerpaß

von der Luv- auf die Leeseite übertritt, sondern auch über die hohen Gebirge östlich und westlich des Brennerpasses.

6. Der Einbruch kalter Luft, der den Föhn beendigt, breitet sich auch auf der Brennerlinie von Norden nach Süden aus. Der Föhn erlischt zuerst in Innsbruck, dann in Matrei, zuletzt auf dem Brenner.

Über die Vorgänge auf der Südseite der Alpen bei Föhn auf der Nordseite scheinen weitere Untersuchungen notwendig. Desgleichen wäre die Darstellung der Verhältnisse in der Höhe vor und während des Föhns durch Mittelwerte wertvoll. Doch genügen die bereits gewonnenen Resultate, um zu den zwei wichtigsten Theorien über die Entstehung der absteigenden Luftbewegung bei Föhn Stellung nehmen zu können.

IV. Anhang: Die Entstehung der absteigenden Luftbewegung bei Föhn.

Über die Ursachen, welche die Südströmung der Höhe veranlassen, als Föhn in die Täler abzusteigen, stehen sich zwei Anschauungen schroff gegenüber. Da es sich bei Föhn nicht um einen Fall kälterer, schwererer Luft handeln kann, welche wärmere Luft verdrängt, so wie es bei Bora und boraartigen Fallwinden eintritt, suchte man nach einer »Kraft«, welche die Luft zum Absteigen zwingt.

Wild geht davon aus, daß vor Beginn des Föhns bereits ein stürmischer Luftstrom die Alpen überweht, sowie von der Beobachtung, daß der Föhn immer zuerst in den hintersten Gebirgstälern beginnt und sich gleichsam talauswärts fortpflanzt.¹ Der Luftstrom, welcher den Kamm überweht, »wird etwas in den geschützten Raum hinter der Bergwand einbiegen, die nächsten Luftsichten mit fortreißen und so einen luftverdünnten Raum bewirken, in welchen zunächst nach außen gelegene ruhige Luft im Talgrund zurückströmt, kurz, es wird sich eine Art vertikaler Luftwirbel im Tale einstellen, wie wir ihn als Wasserwirbel hinter jedem breiten Brückenjoch eines rasch fließenden Gewässers in horizontalem Sinne sich vollziehen sehen.« Nach Wild saugt also der in der Höhe wehende Luftstrom die Luft aus den Föhntälern gewissermaßen aus, erzeugt in der Talsohle einen Gegenwind und sinkt allmählich bis zur Talsohle nieder.

Unser Tatsachenmaterial spricht gegen Wild's Theorie. Wir finden Föhnwinde, die in den Tälern ganz ausgesprochen sind, ohne daß ein stärkerer Wind die Alpen überweht. »Antizyklonalföhn« erkennt Wild allerdings nicht an, übersieht aber, daß eben bei Antizyklonalföhn auch eine absteigende Luftbewegung in den Tälern vorhanden ist und daß, soweit ich sehe, jeder Föhn sich aus einem antizyklonalen Anfangsstadium entwickelt. Wild legt ferner Wert auf den Gegenwind, der vor Ausbruch des Föhns in den Föhntälern konstatierbar sein soll. Ich konnte in dem von Wild benützten Beobachtungsmaterial den Gegenwind nirgends deutlich ausgesprochen finden. Unsere Untersuchungen ergaben vor Durchbruch des Föhns mitunter starke Winde, die aber aus der Föhnrichtung kommen und potentiell kalte Luft führen, so daß trotz vorhandener langsamer Erwärmung von Föhn nicht gesprochen werden kann. Wir haben keine Erscheinung gefunden, die für die Richtigkeit von Wild's Theorie spricht. Mit Rücksicht darauf, daß jeder stationären Föhnströmung ein antizyklonales Stadium vorausgeht, müssen wir auch die von Wild proponierte Einschränkung des Begriffes »Föhn« ablehnen. Hingegen ergibt unser Tatsachenmaterial die volle Richtigkeit der von Wild angeführten Erscheinung, daß der Föhn zuerst in den hintersten Tälern beginnt. Wir schränken diese Ansicht nur dahin ein, daß der Föhdurchbruch auf dem Erdboden zuerst in den hintersten höchsten Talgründen der zentralalpinen Föhntäler beginnt. Diese Tatsache ist von größter Wichtigkeit im Hinblick auf die von Billwiller² gegebene Erklärung, betreffend die Entstehung der absteigenden Luftbewegung bei Föhn.

¹ H. Wild, Über den Föhn und Vorschlag zur Beschränkung seines Begriffes. Denkschr. der Schweiz. naturforsch. Gesellschaft, Bd. 38, 2. Hälfte, Zürich 1901.

² Billwiller, Zeitschr. f. Meteorologie, 1878, p. 219; Met. Zeitschr. 1899, p. 204.

Denkschr. d. mathem.-naturw. Kl. Bd. LXXXV.

Nach Billwiller liegt die Ursache des Föhns ganz auf der Föhnseite (Leeseite) des Gebirges. Wenn ein Luftdruckminimum an der atlantischen Küste erscheint, so saugt dieses Minimum zuerst die über Frankreich und Westdeutschland lagernde Luft gegen sich heran. Als Ersatz der abfließenden Luft strömt Luft aus Süden nach; es gerät die Luft im nördlichen Alpenvorland in nordwärts gerichtete abfließende Bewegung, wodurch die Luft in den Alpentälern in abfließende und damit auch absteigende Bewegung gerät. Es sinkt Luft aus der Höhe auf der Nordseite der Alpen herab und erst allmählich strömt von der Südseite Luft nach. Das Sinken der Luft auf der Nordseite der Alpen aber gibt Anlaß zu den Föhnerscheinungen.

Diese Theorie ist, wie ich glaube, allgemein anerkannt. Im großen und ganzen ist sie als richtig anzusehen. Die Vorgänge sind tatsächlich komplizierter. Unsere Untersuchungen beweisen zwar die Richtigkeit des Grundgedankens, aber sie zwingen uns zu einer nicht unbeträchtlichen Modifikation und verschaffen uns überdies einen viel genaueren Einblick in den Mechanismus der Föhnströmung. Vor allem läßt Billwiller's Theorie unerklärt, warum der Föhn zuerst in den hintersten Tälern ausbricht. Nach Billwiller müßte man das Gegenteil erwarten. Tatsächlich finden wir, daß der Föhn in Matrei am frühesten beginnt, in Igls und Mittenwald gleichzeitig, in Innsbruck, das zwischen diesen beiden Orten, aber tiefer liegt, später; unffern des Gebirges in der Ebene, also in der tiefsten Station, kommt der Föhn zumeist nicht zum Ausbruch. Diese Erscheinungen sind durch aspirierende Tätigkeit des föhnerzeugenden Minimums allein nicht zu erklären.

Ehe wir eine Darstellung unserer Ergebnisse im Zusammenhange geben, muß darauf hingewiesen werden, daß mit Absicht der synoptischen Druckverteilung in Europa während des Föhns in den Alpen keine große Beachtung geschenkt wurde. Das betrachtete Gebiet liegt bei Föhn immer im Randgebiet von Antizyklonen, mitunter auch nahe dem Zentrum. Der Gesamtzustand der meteorologischen Elemente in der Höhe und in den Tälern erschien wichtiger als der Isobarenverlauf, dessen Studium allein leicht vorgefaßten Meinungen Nährstoff zuführt, ohne daß wir einen Einblick in das Wesentliche der Vorgänge gewinnen. Überdies ist der Isobarenverlauf bei Föhn genau studiert.

Dem Föhn gehen stets antizyklonale Verhältnisse voraus. In der Höhe finden wir vor Beginn des Föhns und im ersten Föhnstadium Erwärmung bei geringer Feuchtigkeit und heiterem Himmel. Der Wind kann bereits aus der Föhnrichtung kommen, doch treffen wir auch Kalmen oder sogar Winde aus dem nördlichen Quadranten. Ob die Luft aus der Höhe über dem Alpenkamm herabkommt und dabei warm und trocken wird oder ob warme und trockene Luft der Höhe horizontal zugeführt wird, kann nicht entschieden werden. Am wahrscheinlichsten ist es, daß beide Vorgänge zumeist kombiniert auftreten. Die Frage ist für unsere Zwecke von sekundärer Bedeutung.

In der Tiefe treffen wir vor dem Föhn beiderseits des Alpenkamms antizyklonale Verhältnisse. Die Temperaturschichtung ist sehr stabil, in den meisten Fällen treffen wir deutlich ausgesprochene Temperaturumkehr. Wir beschränken uns nur auf die Verhältnisse der Nordseite. Sehr häufig haben hier vor dem Föhn Kälteeinbrüche kalte Luft zugeführt, welche über der Ebene und in den Tälern lagert und in den einzelnen Fällen bis zu sehr verschiedener Höhe reicht. Bei Aufheiterung sinkt die Temperatur in der Tiefe noch weiter, wodurch Temperaturinversion eintritt. Die Temperatur nimmt vom Erdboden weg zunächst mit der Höhe zu, dann wieder langsam ab. Diese ganze Schichte nennen wir Inversionsschichte. Darüber lagert Luft, die in ihrer ganzen Masse potentiell wärmer als die Inversionsschichte, an der Grenzfläche wohl auch absolut wärmer als die oberste Schichte der Inversionsschichte ist.

Das Gebiet kalter Bodenluft ist in den einzelnen Fällen von sehr wechselnder Ausdehnung, ist oft auf die Alpentäler und das nördliche Alpenvorland beschränkt, erstreckt sich aber auch oft bis an die atlantische Küste. Über dem Meere fehlen unter allen Umständen die Bedingungen für die Bildung einer Inversionsschichte.

Die kältesten Schichten liegen überall dem Boden auf. In den Tälern sammelt sich die durch Ausstrahlung (des Erdbodens) erkaltete Luft. Hierdurch entstehen bereits lokale, absteigende, talauswärts gerichtete Strömungen. Ein anderes Moment tritt hinzu. In den Alpentälern sind die intensivsten Aus-

strahlungsbezirke hoch gelegen. Wir finden hier in den Talsohlen viel kältere Luft als in gleicher Höhe über der Ebene (bei Erhebung in der freien Atmosphäre). Hierdurch entsteht eine langsam abfließende Luftbewegung aus den Alpentälern in das Alpenvorland.

Die obere Grenzfläche der Inversionsschicht dürfen wir in dem von uns betrachteten kleinen Gebiete als horizontal annehmen. Im allgemeinen ist sie es über größeren Komplexen nicht. Sie sinkt vom Inversionsgebiet bis zum Erdboden nieder und trennt Inversionsgebiet und warmes Gebiet. Die Grenze am Erdboden wird unter Umständen erst an der Meeresküste erreicht, kann aber auch viel näher den Alpen liegen. Unter allen Umständen finden wir, daß (in den unteren Schichten der Atmosphäre) ein kaltes Gebiet an ein warmes grenzt.¹ Diese beiden Gebiete stehen in einer Wechselbeziehung, die Margules² in einer Abhandlung, »Die Energie der Stürme«, ausführlich verfolgt hat. Die kalte Luft fließt in das warme Gebiet, ohne daß wir eine aspirierende Tätigkeit des Minimums annehmen müssen. Dichteunterschiede, die auf Temperaturverschiedenheit zurückzuführen sind, setzen die Luft in Bewegung.

Es fließt die Inversionsschicht über der Ebene ab und es gerät die kalte Luft im Alpenvorland ebenfalls in abfließende Bewegung. In der Ebene und teilweise auch noch im Alpenvorland kann als Ersatz kalte Luft horizontal zuströmen. Im allgemeinen wird die Ausbreitung der kalten Luftmassen gegen das warme Gebiet mit einem Sinken des oberen Niveaus der Inversionsschicht verbunden sein. Unter allen Umständen kann das Abfließen der Inversionsschicht in den nördlichen Alpentälern nicht durch horizontalen Zufluß kalter Luft ersetzt werden. Hier kann nur, soll kein leerer Raum entstehen, Luft aus der Höhe herabsinken, weil die Alpen selbst einen horizontalen Luftzufluß von Süden hindern.

Das Abfließen der Inversionsschicht und die damit verbundene Niveauerniedrigung bedingen in den Alpentälern und verspätet auch im nördlichen Alpenvorland langsame Erwärmung mit Wind aus der Föhnrichtung. Die kältesten Bodenschichten der Inversionsschicht fließen ab, die wärmeren Schichten senken sich. Dieses Stadium nennen wir das Vorstadium des Föhns. Im Vorstadium ist die Luft in den Föhnorten meist noch feucht, die Temperatur niedriger als in höheren Orten. Es fehlen also trotz langsamer Erwärmung und südlicher Winde dem Vorstadium charakteristische Merkmale des Föhns.

Entsprechend der Ausbreitung der kalten Inversionsschicht bei gleichzeitiger Niveauerniedrigung sinkt aber auch die potentiell wärmere Luft aus der Höhe herab, unter adiabatischer Temperaturzunahme. Das Abfließen der kalten Bodenschicht ist die »geheimnisvolle Kraft«, welche die potentiell warme Luft der Höhe zwingt, als Föhn abzusteigen; denn erst, wenn das obere Niveau der Inversionsschicht unter einen Ort in einem Föntale gesunken ist, wenn sie also an diesem Orte gänzlich abgeflossen ist, wobei sie aber noch tiefere Talgebiete bedeckt, bricht an diesem Orte der Föhn durch. Die langsame Erwärmung des Vorstadiums geht dann in ungemein rasche über. Eine Temperaturstufe kennzeichnet dann den Durchbruch des Föhns. In den tieferen Gebieten haben wir dann gleichzeitig noch das Vorstadium, bei absolut tieferen Temperaturen, trotz langsamer Erwärmung und Südwinden.

Die Frage, ob der Föhn zuerst in den inneren Alpentälern oder im Alpenvorland ausbricht, hat dadurch ihre Bedeutung verloren. Wenn wir gleiche Höhen, etwa Igls und Mittenwald oder Matrei und Peissenberg betrachten, finden wir, daß der Föhn gleichzeitig ausbricht, weil die Inversionsschicht in dem betrachteten Gebiet überall fast gleichzeitig unter das Niveau gleich hoher Örtlichkeiten sinkt, gleichgültig, wo diese liegen. Der frühere oder spätere Ausbruch des Föhns hängt also nur von der Höhenlage ab. Da die Talsohlen der hinteren Alpentäler höher liegen als die Ebene (Erdboden), so

¹ Wodurch der hohe Druck des Maximums, der niedrige der Depression erzeugt wird, kümmert uns nicht. Für unsere Betrachtungen genügt die Feststellung, daß die unteren Schichten des antizyklonalen Gebietes kälter sind als die unteren Schichten der Depression.

² Jahrbücher der Zentralanstalt für Meteorologie, 1903.

erscheint der Föhn am Erdboden in den hinteren Alpentälern früher; doch finden wir in gleicher Höhe über der Ebene dann ebenfalls den warmen, trockenen Luftstrom, was uns der isoliert in der Ebene aufragende Peißenberg beweist.

Fließt die Inversionsschichte auch in den tiefsten Tälern (Inntal), im Alpenvorland und in der Ebene (Harlaching) gänzlich ab, so bricht auch hier der Föhn durch. In der Ebene ist dieser Fall selten, weil kalte Luft seitlich zufließen kann. Hier finden wir meist nur das Vorstadium des Föhns, bei südlichen Winden langsame Erwärmung, hervorgerufen durch das Abfließen der kalten Luft und das Herabsinken der potentiell wärmeren Schichten der Inversionsschichte.

Mitunter findet man bei Föhn in Innsbruck östlich und westlich kalte Gebiete, so daß man nicht annehmen kann, die kalte Inversionsschichte sei gänzlich abgeflossen. Es kann nämlich lokal, zumeist an den hierfür am meisten begünstigten Ausmündungen der Föhntäler der von Margules untersuchte Mischungs- und Aufsaugungsprozeß vor sich gehen, so daß lokal die Föhnströmung tiefer reicht als in den Nachbargebieten. Die primäre Ursache zum Absteigen potentiell warmer Luft haben wir aber in der abfließenden Bewegung kalter Luftmassen in der Ebene und in den Tälern zu suchen. Der Föhn bricht im allgemeinen nicht durch kalte Luftsichten zum Boden durch, sondern letztere fließen ab und der Föhn sinkt als Ersatz herab.

Da das Abfließen der Inversionsschichte nach den Beobachtungen meist nicht besonders rasch geschieht, liegt die Frage nahe, warum die Ersatzströmung oft von sturmartiger Heftigkeit ist. Wenn über der Ebene das Niveau der Inversionsschichte sinkt, muß in den engen Tälern die Luft sehr rasch abfließen, weil hier, bei Ausschluß horizontalen Luftzuflusses, enge Kanäle einem ungemein ausgedehnten Becken Luft als Ersatz zuführen müssen. Es finden sich sich in den Beobachtungen Andeutungen, daß das Abfließen der kalten Luftmassen in der Ebene zu lebhafterem Luftzufluß auf dem Kamme der Zentralalpen Veranlassung gibt.

Die Gesamtheit dieser Vorgänge kann bei andauernd antizyklonalen Verhältnissen in der Höhe vor sich gehen. Letztere können weiterbestehen, wenn der Föhn in den Tälern durchgebrochen ist. Die Föhnströmung wird in diesem ersten, dem Antizyklonalstadium, genährt und erhalten durch Luft, die aus der Höhe über den Alpen absteigt oder dem Alpenkamm horizontal zufließt. Der Föhn kann in dieser Entwicklungsphase erloschen. Gewöhnlich aber geht die Entwicklung noch weiter vor sich.

Wir finden, daß im weiteren Verlauf des Föhns dem Alpenkamm feuchte Luft zugeführt wird, wobei oft in der Höhe Abkühlung mit Niederschlag eintritt. Die antizyklonalen Verhältnisse verschwinden. Da gleichzeitig in den südalpinen Tälern die antizyklonale Witterung aufhört, da Trübung mit oft sehr ergiebigen Niederschlägen eintritt und als Konsequenz ein gänzlich verwischter täglicher Gang der Temperatur bei anhaltend südlichen Winden in der Höhe, sind wir gezwungen, in diesem Föhnstadium eine aufsteigende Bewegung auf der Luvseite der Alpen anzunehmen. Der Föhn auf der Leeseite führt in diesem Stadium Luft, die auf der Luvseite unter Kondensation aufgestiegen ist. Wir nennen diese letzte Entwicklungsphase das stationäre Föhnstadium.

Wie man sieht, stellt diese ganze Entwicklung nur eine Modifizierung der Theorie von Billwiler dar. Die Entstehung des Südföhns, der meist in der ganzen Luftsäule zwischen Gipfel und Tal erwärmend wirkt, ist grundsätzlich verschieden von den häufigen Fallwinden auf der Südseite der Alpen (Nordföhn), die meist in den höheren Schichten zwischen Gipfel und Tal abkühlend wirken, ganz abgesehen von der echten Bora. Die Ursache der kalten Fallwinde der Südseite haben wir auf der Luvseite zu suchen. Kalte Luft bricht auf der Nordseite der Alpen ein, schwilzt bis zur Kammhöhe, tritt auf die Südseite über, hier entsteht in den oberen Schichten ein labiler Zustand, die kalte Luft senkt sich und verdrängt die warme Luft.¹ Die Ursache der warmen Fallwinde der Nordseite haben wir hingegen auf der Leeseite;

¹ Siehe »Transport kalter Luftmassen über die Zentralalpen«. Denkschr. d. kaiserl. Akad. d. Wiss., Bd. LXXX, 1906.

selbst zu suchen. Kalte Luft fließt ab, warme sinkt herab. Es kann nicht bezweifelt werden, daß Föhnfälle gefunden werden können, die sich aus einem anderen Anfangszustand entwickeln; ich habe solche nicht gefunden.

Die Untersuchung gibt uns auch einen Hinweis, wie wir uns in Hochdruckgebieten das Tieferrücken der potentiell warmen, antizyklonalen Luft aus der Höhe vorzustellen haben, nämlich als Folge des Abfließens kalter Inversionsschichten in den tiefsten Teilen der Antizyklogen. Bei manchen der mitgeteilten Fälle können Zweifel entstehen, ob man den Vorgang als Föhn auffassen soll oder als ein Tieferrücken antizyklonaler Luft. Es kann kein Zweifel bestehen, daß die Anfangsstadien des Föhns antizyklonale Vorgänge sind. Der Föhn ist nur ein Teil einer absteigenden Luftbewegung, wie Quervain meines Wissens einmal geschrieben hat. In dieser Allgemeinheit ist dies nicht zutreffend; denn das stationäre Föhnstadium dürfen wir unter keinen Umständen mehr als antizyklonalen Vorgang auffassen.

Über die Vorgänge, welche das Ende des Föhns herbeiführen, habe ich früheren Untersuchungen nichts anzufügen. Kalte Luft dringt auf der Rückseite von Depressionen vor, breitet sich von Norden nach Süden aus, schiebt sich unter die Föhnströmung keilförmig ein, schwächt in die Höhe und beendigt den Föhn.

Innsbruck, k. k. Institut für kosmische Physik der Universität, Juli 1909.