

HAM¹, daß sämtliche blasenziehenden Substanzen die Hexokinase inaktivieren.

Die Bearbeitung der genannten Probleme wird kaum unmittelbar praktisch verwendbare Resultate liefern. Aber sie hilft mit, die sichere Grundlage zu schaffen, auf der die praktisch orientierte Erforschung der Antimitotika, z. B. in der Klinik, weiterbauen kann, die ihrerseits der entwicklungsphysiologischen Forschung neue Fragen und Anregungen zukommen lassen wird.

Diese Überlegungen mögen erkennen lassen, daß die Scheidung der Forschung in reine und angewandte nicht glücklich ist. Die Methoden ernsthafter Forschung bauen in der reinen wie in der angewandten Forschung auf denselben Grundsätzen auf. Es ist nie vor auszusehen, welche Tragweite eine gefundene Einsicht haben wird, wie weit sie der allgemeinen Erkenntnis und wie weit unmittelbaren Nützlichkeitsansprüchen dienen wird. Gerade die Entdeckungsgeschichte der Antimitotika zeigt dies in aller Deutlichkeit. Wir haben daraus die Lehre zu ziehen, daß die Zielsetzungen der Entwicklungsphysiologie wie der Klinik wohl nur dann auf Erfüllung rechnen können, wenn Entwicklungsphysiologen und Mediziner bei der Erforschung der Antimitotika aufs engste zusammenarbeiten.

Summary

According to modern views the mitotic activity of a tissue is determined by its actual morphogenetic activity. This holds true especially for regenerating and tumor tissues. There we find a relatively high number of cells ready for mitosis and concomitant with this

a specific metabolic activity. It might be possible to influence morphogenetically active tissues by chemical influences, whereas resting tissues are not influenced. Furthermore it might be expected that it would be possible to dissociate the mechanism of cellular division by chemical means: the division of the nucleus and the protoplasm. Substances that suppress cellular division and therefore are called antimitotic substances may reduce either the mitotic activity in general, or may inhibit nuclear or plasmatic division. For the experimental analysis of antimitotic substances the eggs of the freshwater worm *Tubifex* and the regenerating tail of the *Xenopus* tadpoles proved to be especially well suited, as they are available during the whole year. The action of several narcotics and quinones on the egg of *Tubifex* has been studied, and a method was developed that allowed one to estimate the quantity of quinone absorbed by a single egg. There are two types of quinones, acting in a different way, the benzoquinone shows a more inhibiting action on the plasmatic division, whereas the quinone of phenanthrene has a strong destructive action on the nucleus. There seem to be correlations between chemical constitution and the mode of action of an antimitotic substance.

An analysis of the action of colchicine on the tail of the *Xenopus* larva is given, which is mainly based on the experimental work of LÜSCHER. LÜSCHER has found that colchicine blocks the regeneration by acting on cells which are ready for mitosis. These cells are forced to form a division spindle, are blocked in the metaphase, and dye later without being able to reconstitute a new resting nucleus. Colchicine acts also on the hind limb buds of *Xenopus*, where it causes a reduction of the developing limb. Small epitheliomas of the tail of *Rana* tadpoles, which contain almost no mitosis, are not influenced by colchicine (BERNHARD).

The actions of chemicals on tumors are discussed in connection with the results obtained on the eggs of *Tubifex* and the regenerating tail of the *Xenopus* larva.

¹ M. DIXON und M. NEEDHAM, *Nature* 158, 432 (1946).

Neuere Anschauungen über die Meteorologie und Klimatologie des Föhns

Von F. PROHASKA, Davos¹

1. Einleitung

Im Wettergeschehen Zentraleuropas ist der warme Südwind der Nordalpentäler eine so markante Erscheinung, daß es begreiflich ist, daß sich von jeher Fachmann und Laie um seine Erklärung bemüht haben, und es gibt kein Spezialproblem der Meteorologie und Klimatologie, über das bisher soviel publiziert worden ist wie über den Föhn. So steht schon seit Beginn einer wissenschaftlichen Wetterkunde die Entstehung des Föhns zur Diskussion, und der Altmeister der Meteorologie, JULIUS VON HANN², hat schon vor 80 Jahren die physikalische Erklärung des Föhneffektes gegeben.

Seit dieser Zeit sind eine große Zahl von wissenschaftlichen, halbwissenschaftlichen und populären Theorien und Darstellungen über das Zustandekommen dieses Föhneffektes veröffentlicht worden. Es ist nicht Aufgabe dieser Zeilen, einen historischen Überblick über die Föhntheorien zu geben. Das ist in der Schweiz schon des öfteren, vor allem in den letzten Jahren, geschehen¹. Dagegen soll gezeigt werden, wo die Föhnforschung derzeit steht und wie man sich heute die Mechanik des Föhneinbruches vorstellen kann. Außerdem hat die Anwendung des Föhnbegriffes in den letzten Jahren eine wesentliche Erweiterung erfahren, so daß auch noch die klimatologische Bedeutung des Föhns und die damit zusammenhängenden Fragen gestreift werden müssen.

¹ Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos.

² J. v. HANN, Zur Frage über den Ursprung des Föhns, *Z. österr. Ges. Met.* 1, 257 (1866); Der Föhn in den österreichischen Alpen, *Z. österr. Ges. Met.* 2, 158 (1867).

¹ O. LEHMANN, Geschichte der Föhntheorie, *Vierteljahresschr. naturf. Ges. Zürich* 82, 45 (1937).

2. Definition des Föhns

Der Föhn ist eine Luftströmung, die durch Absteigen warm und trocken wird. Nur wenn man die Definition so knapp hält, ist es möglich, alle Erscheinungen zu erfassen, die in der modernen Meteorologie als «Föhn» bezeichnet werden. Die Ursache und die Bedingungen, unter denen dieses Absteigen der Luft erfolgt, ergeben dann erst seine Unterteilung in die zwei Hauptarten: in den Zyklonalföhn und in den Antizyklonalföhn. Der erstere ist es, den wir meinen, wenn wir vom Föhn schlechthin, vom Alpen- oder Südföhn sprechen. Dieser echte Föhn ist es auch, der zu vielen und oft stark umstrittenen Föhntheorien Anlaß gab. Über die Ursache des Antizyklonalföhns oder freien Föhns sind die Meinungen nicht geteilt, so daß wir uns darauf beschränken können, ihn nur kurz zu beschreiben und seine Wirkung auf das Großraumklima zu besprechen.

3. Der Zyklonalföhn

a) *Meteorologie.* Wie schon der Name sagt, handelt es sich hier um denjenigen Föhn, der einem zyklonalen Strömungssystem angehört. Sein Zustandekommen hängt jedoch davon ab, daß diese zyklonale Luftströmung über ein quer zur Strömungsrichtung liegendes Gebirge weht. In der Tat sind an fast allen Gebirgen der Erde unter diesen beiden Voraussetzungen föhnartige Fallwinde beobachtet worden, die wegen ihrer großen Wirkung auf Klima und Mensch meist schon seit altersher ihre eigenen Namen haben. Welches Stadium und welche Seite einer Zyklone diese Fallwinde hervorruft, hängt allerdings von der Lage der Zugstraßen der Zyklonen zur Lage der Gebirge ab. So verursacht z. B. an den Alpen die Vorderseite einer meist über Südwest- oder Westeuropa liegenden Depression den Südföhn der Nordalpentäler und ihre Rückseite, wenn das Tief nach Nordosteuropa gezogen ist, den Nordföhn der Südalpentäler. Im allgemeinen sind die Wetterlagen, die zu Föhnsituationen führen, seit langem bekannt, nicht nur für den Alpenföhn, sondern auch für die Fallwinde an den andern Gebirgen. Das Isobarenbild allein ist jedoch nicht entscheidend und gibt sozusagen nur die Disposition zu seinem Auftreten. Ausschlaggebend für seine Entwicklung sind vielmehr die speziellen Temperaturverhältnisse in der freien Atmosphäre über den betreffenden Gebieten.

Die Frage nach der Ursache des Heruntersteigens einer Luftströmung im Lee eines Gebirges ist so lange kein Problem, solange die Luft beim Absteigen trotz ihrer adiabatischen Erwärmung kälter und damit schwerer ist als die jeweils umgebende Luft, d. h. solange es sich um einen reinen Fallwind handelt. Die Erklärung des Auftretens von kalten Fallwinden, deren bekannteste in Europa die Bora und der Mistral sind, bot daher keinerlei Schwierigkeit, da als Ursache für sein Absteigen und seine große kinetische Energie

direkt die Temperaturdifferenz zwischen Fallwind und umgebender Luft angesehen wurde. Diese Betrachtungsweise *per analogiam* auf die Fallwinde angewendet, die nicht temperaturerniedrigend, sondern temperaturerhöhend wirken, wie vor allem der Südföhn der Nordalpentäler, mußte zu großen Schwierigkeiten führen, da mit einem Schlag die Hauptursache, nämlich das Absteigen durch die eigene Schwere, in Fortfall kam. Die ausschließliche Fragestellung nach dem Warum des Absteigens war Anlaß zu den vielen Föhntheorien, indem nur dieser *einen* Seite des Föhnproblems alle Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Daher blieb meistens die *andere* Seite des Föhnproblems: wieso es vorkommen kann, daß der Föhn trotz großer Windgeschwindigkeit in der Höhe nur sehr langsam in das Tal heruntersteigt oder oft tagelang *nur* in der Höhe wehen kann, *ohne* bis zum Talboden durchzudringen, unberücksichtigt. Da zudem der Föhn ein *Lokalwind* einzelner Täler ist, der sehr von den speziellen orographischen Verhältnissen beeinflusst wird, zeigt sein Ablauf oft beträchtliche Modifikationen. So wurde auf diese lokalen Unterschiede des Föhnverlaufes in den einzelnen Tälern zu großes Gewicht gelegt und jeweils eine andere Teilerscheinung als «Hauptursache für das Heruntersteigen des Föhns» angesehen; doch wurde dabei die *Gesamtheit* der den Föhn auslösenden Ursachen und seiner Begleiterscheinungen aus den Augen verloren.

Es waren die umfangreichen Untersuchungen H. VON FICKERS¹ im Innsbrucker Föhngebiet und die Bearbeitung der mittlern Verhältnisse bei Föhn im Alpenquerschnitt Lugano – Gotthard – Altdorf von K. FREY², die durch ihre richtige Fragestellung Klarheit in die umstrittenen Punkte brachten. Hierbei legte v. FICKER in Fortführung und Erweiterung der Föhntheorie von BILLWILLER das Hauptgewicht auf die Strömungserscheinungen, während FREY die Druck-, Temperatur- und Dichteverhältnisse zum Ausgangspunkt seiner Föhntheorie machte und somit die energetische Seite des Föhnproblems in den Vordergrund stellte. Eigene noch unveröffentlichte Bearbeitungen der großangelegten Föhnuntersuchungen im Glarnerland, die in den Jahren 1934/35 unter Leitung von W. MÖRIKOFER durchgeführt wurden, haben gezeigt, daß sich auch hier der Ablauf des Föhns, abgesehen von kleinen, lokal bedingten Veränderungen, so vollzieht wie im Reußtal, aber auch wie im Innsbrucker Föhngebiet. Somit dürfte nur eine Zusammenfassung der Anschauungen v. FICKERS und FREYS allgemein für den Südföhn der Nordalpentäler Geltung haben.

¹ H. v. FICKER, Innsbrucker Föhnstudien, I und IV, Denkschr. Wiener Akad. d. Wiss., 78. und 85. Bd. – H. v. FICKER-DE RUDDER, Föhn und Föhnwirkung (mit ausführlichem Literaturverzeichnis). Akademische Verlagsgesellschaft Leipzig, 1943.

² K. FREY, Beiträge zur Entwicklung des Föhns und Untersuchungen über Hochnebel, Diss. Basel 1944. Rentsch Söhne, Trimbach-Olten 1945.

Diese beiden Föhntheorien sind kurz folgende: Nach v. FICKER kann man drei Entwicklungsstadien unterscheiden, die schematisch in Fig. 1 wiedergegeben sind. Voraussetzung für das Zustandekommen eines *Zyklonalföhns* ist ein *Antizyklonalföhn* über den Alpen, mit andern Worten das Absinken von Luft in der Höhe über einem auf der Bodenwetterkarte mehr oder weniger gut ausgeprägten Hochdruckgebiet. Unter dem Einfluß einer über Westeuropa lagernden oder von Westen heranziehenden Depression bekommen vorerst die Luftmassen nördlich des Alpenhauptkammes eine Bewegungsrichtung zum Tiefdruckzentrum hin. Dadurch kommt über den Voralpen sowohl in der antizyklonal absteigenden und sich dadurch erwärmenden Luft der freien Atmosphäre als auch in

Höhe schwach und nicht wesentlich verschieden ist. Doch kommen auch Föhnlagen vor, und diese sind in den Zentralalpen, vielleicht wegen der geringeren Entfernung zum westeuropäischen Tiefdruckgebiet, die weitaus häufigeren, bei denen dem Föhneinbruch im Tal ein wesentlich stärkerer Höhenwind vorausgeht. In diesen Fällen *verursacht* diese langsam abfließende Kaltluft nicht nur nicht das Herabsteigen des Föhns, sondern im Gegenteil, sie *verhindert* oft stunden- und tagelang den Durchbruch des Föhns bis zum Boden der Föhntäler. Die Ursache für die große Energie, mit der der Föhn dann bestrebt ist, nach unten Raum zu gewinnen, die Kaltluft beschleunigt auszuräumen und sich bis zum Talausgang durchzusetzen, liegt aber nicht nur in der Größe des Druckgradienten, sondern viel mehr, wie FREY nachweisen konnte, in den isobaren Temperaturgegensätzen, die zwischen dem Alpenhauptkamm und dem nördlichen Alpenvorland im gleichen Niveau bestehen.

FREY fand bei Föhn ein Temperaturgefälle vom Pilatus zum Gotthard von im Mittel 7° , in extremen Fällen sogar 10° C, so daß im gleichen Druckniveau über dem Alpenhauptkamm eine wesentlich dichtere Luft vorhanden ist als über den Voralpen. Daraus folgert FREY: «Durch diese räumliche Druck- und Temperatur- bzw. Dichteverteilung schneiden sich die isobaren und isosteren Flächen (Flächen gleichen Druckes und gleicher Dichte) auf der Leeseite, und es entsteht eine baroklines Feld. Dieses Solenoidfeld, das eine Zirkulation zur Folge hat, die vom Volumenazendenten zum Druckgradienten gerichtet ist, hat also eine absinkende Komponente der südlichen Kaltluftströmung auf der Nordseite der Alpen zur Folge. Die kinetische Energie der absinkenden Föhnströmung bewirkt die Ausräumung der Bodenkaltluftschicht und den Abfluß derselben. Das Hin-

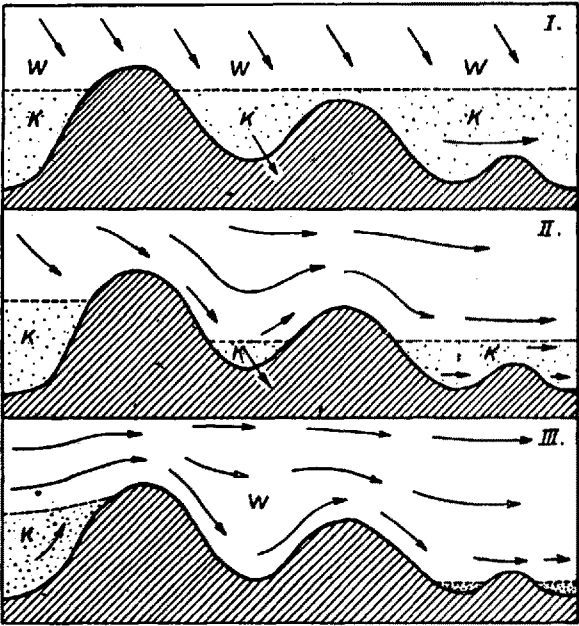


Fig. 1. Entwicklungsstadien des Südföhns nach v. FICKER.
K = Kaltluft, W = Warmluft.

der darunter lagernden Kaltluft der Nordalpentäler ein leichter Südwind auf (Fig. 1, Stadium I). Da die Kaltluft aus den Alpentälern herausfließt und ein horizontaler Zufluß wegen des Alpenmassivs im Süden nicht möglich ist, kann Ersatz für die abfließende Luft nur aus der Höhe kommen, was ein Tiefergreifen des Antizyklonalföhns zur Folge hat (Fig. 1, Stadium II). Den Höhepunkt der Föhnentwicklung und damit sein stationäres Stadium erreicht der Föhn erst dann, wenn im Luv des Alpenhauptkammes die Luft unter Kondensation aufsteigt, wodurch es zur Bildung einer Föhnmauer kommt, und im Lee unter adiabatischer Erwärmung wieder absteigt (Fig. 1, Stadium III). Auf diese Weise kann in denjenigen Fällen das Tiefergreifen des Föhns erklärt werden, in welchen die Windgeschwindigkeit in der abströmenden Kaltluft und in der antizyklonal erwärmten Warmluft in der

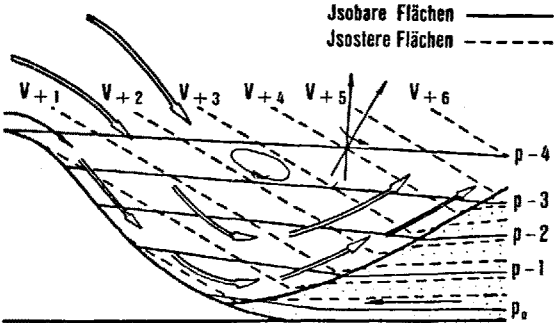


Fig. 2. Föhn-schema nach K. FREY.
Stromlinien: einfach = Kaltluft, doppelt = Warmluft.

untersteigen und weitere Vordringen des Föhns steht in engem Zusammenhang mit der weiteren Ausbildung des Solenoidfeldes über dem nördlichen Alpenvorland.» In Fig. 2 sind diese Verhältnisse veranschaulicht und geben strömungsmäßig ein dem Stadium III des v. FICKERSchen Schemas ähnliches Bild. Der einzige

wesentliche Unterschied besteht in der Steilheit des Neigungswinkels mit der Bodenkaltluft und in ihrer Bewegungsrichtung, worauf wir noch zu sprechen kommen. Nach den Berechnungen von FREY muß die Vertikalkomponente nur einen kleinen Bruchteil der Horizontalkomponente betragen, damit der Föhn dem absteigenden Geländeprofil folgt. Eine Vertikalkomponente von 1–2 m/sec, wie sie in den Ostalpen gemessen wurde, dürfte groß genug sein, damit auch stürmischer Föhn dem Geländeprofil folgt. Eine solche Größe der Vertikalkomponente kann schon allein «durch das isobare Dichtegefälle der Luftmassen und das bestehende Solenoidfeld erklärt werden».

Es war nun interessant, zu prüfen, welche der beiden Ursachen, ob die Ausbildung des Solenoidfeldes (FREY) oder das Abfließen der Kaltluft aus den Tälern (v. FICKER) der primäre Grund für das Heruntersteigen des Föhns im Glarnerland ist. Diese Untersuchungen haben folgendes ergeben: Ein bis zwei Tage

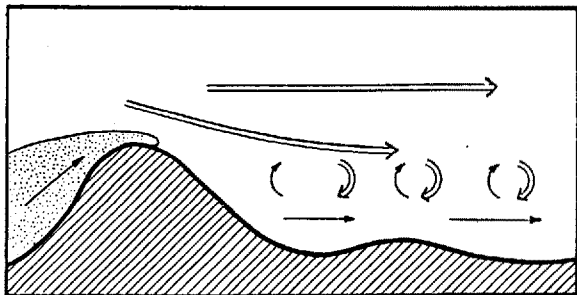


Fig. 3. Strömungsverhältnisse bei Föhn im Glarnerland.
Einfache Pfeile = Kaltluft, Doppelpfeile = Warmluft.

vor Föhneinbruch weht bei antizyklonaler Lage ein leichter Südwind in der Höhe, wobei die Temperaturen im Alpenvorland höher sind als im gleichen Niveau am Alpenhauptkamm, wo manchmal (wie auch FREY feststellen konnte) noch leichter Nordwind weht. Diese Südströmung setzt sich bis zum Boden der Föhntäler durch, wo sie 10–20 Stunden vor Föhneinbruch weht, wobei Temperatur und Feuchtigkeit ihren normalen witterungsbedingten Tagesgang aufweisen. Dieses langsame Abfließen der Kaltluft aus dem Linthtal wurde stets festgestellt, und Pilotierungen haben gezeigt, daß es sich dabei nicht um einen lokalen Bodenwind handelt, sondern daß dieses Abströmen einheitlich den ganzen Talquerschnitt erfüllt und mit dem Südwind in der Höhe zusammenhängt. Durch Vergrößerung des Föhngradienten und die weitere Ausbildung des Solenoidfeldes verstärkt sich der Südwind in der Höhe, und es kommt aus den früher beschriebenen Ursachen zum Absteigen der Föhnströmung (Fig. 3). Ebenso wie im Innsbrucker Föhngebiet konnte auch hier eindeutig festgestellt werden, daß der Föhn von oben nach unten vordringt und nur deshalb zuerst im Talhintergrund weht, weil dieser höher liegt als der Talausgang. Das Herabsteigen geht im Verhältnis zu

der Windgeschwindigkeit sehr langsam vor sich, und die Hauptenergie der Föhnströmung wird dazu verwendet, die langsam abfließende Kaltluft beschleunigt auszuräumen. Hört aus irgendeinem Grunde der Kaltluftabfluß auf oder fließt aus dem Vorland am Boden eine seichte Kaltluft ins Föhntal ein, so dringt der Föhn überhaupt nicht oder nur kurzdauernd bis zum Talboden durch.

Der Kampf an der Föhninversion zwischen der energiereicheren und wärmeren Föhnströmung und der trägen Bodenkaltluft der Föhntäler verursacht einen «Inversionswirbel», dessen unterer Ast kurz vor Föhneinbruch ein Umspringen des Windes auf Nord hervorruft. Dieser kurzdauernde Nordwind wurde *ausnahmslos* in Glarus vor Föhneinbruch registriert. Er tritt aber erst dann auf, wenn der Föhn nur mehr wenige hundert Meter über der Station weht. Seine Stärke nimmt mit dem Herabsinken der Föhninversion zu und erreicht daher knapp vor Föhneinbruch seine maximalen Werte, die aber trotzdem nur einen Bruchteil der Föhnwindgeschwindigkeit ausmachen. Da wir einwandfrei nachweisen konnten, daß dieser Nordwind nur von der darüberwehenden Föhnströmung hervorgerufen ist, da außerdem bei seinem Beginn schon meist der den Föhneinbruch charakterisierende Temperatur- und Feuchteprung einsetzt, möchten wir ihn als *passive* Nordströmung bezeichnen, im Unterschied zu der aktiven Nordströmung, die als Kaltlufteinbruch den Föhn zum Erlöschen bringt. Ein derartiges Ausräumen der Kaltluft durch den Föhn wurde in Innsbruck von MARGULES und von v. FICKER als Vorgang des «Aufleckens» bezeichnet. Es ist auch anzunehmen, daß im Reußtal – Schema von FREY – es sich nur um diese passive Nordströmung am Inversionswirbel handelt und die Bodenkaltluft (Fig. 2) eine *Südkomponente* hat. Daher dürfte auch die Inversion in Wirklichkeit weniger steil sein.

Diese passive Nordströmung ist es auch, die zu den umstrittenen Föhntheorien von H. WILD¹ und R. STREIFF-BECKER² führte, welche Forscher der richtigen Beobachtung dieses Inversionswirbels eine falsche Bedeutung beigemessen haben, da sie in dieser sekundären Erscheinung die Hauptursache für das Heruntersteigen des Föhns erblickten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Energie des Südföhns aus zwei Quellen stammt, die ineinandergreifend wirken und aus denen zwanglos die beobachteten Windstärken, die lokal ganz erhebliche Werte annehmen können, zu erklären sind: Der *Druckgradient*, der die Ursache für das Entstehen der Südströmung bis in große Höhen ist, dadurch das Ab-

¹ H. WILD, Der Schweizer Föhn, Z. schweiz. Statistik, Bern 1868; Über den Föhn und Vorschlag zur Beschränkung seines Begriffs, Neue Denkschr. Schweiz. naturf. Ges., 38, Abh. 2 (1901).

² R. STREIFF-BECKER, Die Föhnwinde, Vierteljahresschr. Naturf. Ges. Zürich, 78, 66 (1933); Neue Untersuchungen über den Föhn in den Schweizer Alpen, Denkschr. Schweiz. naturf. Ges., 74, Abh. 4, 239 (1942).

fließen der Kaltluft in den Tälern und das Tiefergreifen des antizyklonalen Absinkens im Vorföhnstadium hervorruft, und vor allem das durch letzteres verursachte *barokline Feld*. Im Antizyklonalstadium ist daher die abfließende Kaltluft die primäre Ursache für das Heruntersteigen des Föhns, im Zyklonalstadium die durch das Solenoidfeld bedingte Bewegungsrichtung. Die aus diesem Feld stammende kinetische Energie ist zudem so groß, daß sie auch hinreicht, um die stets langsam abfließende Bodenkaltluft beschleunigt auszuräumen.

Wir haben uns bis jetzt nur auf die Verhältnisse bei Südföhn in den Nordalpentälern beschränkt, da dieser bei weitem am besten untersucht ist und auch die auffallendsten Wirkungen hat. Der häufiger auftretende *Nordföhn* der Südalpentäler war bisher noch nicht Gegenstand so zahlreicher Untersuchungen. Über sein Zustandekommen gehen die Ansichten v. FICKERS und FREYS insofern auseinander, als FREY prinzipiell keinen Unterschied zwischen Nord- und Südföhn sieht, indem auch bei Nordföhn eine wenn auch geringere Temperaturerhöhung auftritt, und sich auf der Leeseite ein Solenoidfeld bildet, das eine absteigende Komponente der Nordföhnströmung bewirkt. Nur liegt auch bei Nordföhn die primäre Ursache, nämlich die Rückseitenkaltluft einer Depression, nördlich der Alpen. VON FICKER dagegen erklärt das Absteigen des Nordföhns als boraartigen Fallwind, solange er kälter als seine Umgebung ist, und nimmt erst als Ursache für das weitere Heruntersteigen in die tieferen Schichten ein Abfließen der Bodenkaltluft an, hervorgerufen durch eine südliche Zyklone.

Noch eine Erscheinung, die bis jetzt vor allem bei Südföhn beobachtet wurde, darf nicht unerwähnt bleiben. Es ist dies die sogenannte *Föhnwelle*. Das Auftreten einer mächtigen, anscheinend unbewegt stehenden Wogenwolke im Lee der Alpen mit einer Längenerstreckung von über 100 km in den oberen Schichten der Troposphäre ließ schon lange vermuten, daß hier über der absteigenden Föhnströmung ein Aufwindfeld vorhanden sein muß. Ähnliche Wolkenformen konnten auch an den deutschen Mittelgebirgen, vor allem am Riesengebirge, bei Föhn beobachtet werden, wo an der seither berühmt gewordenen Moazagotlwolke tatsächlich durch Segelflugzeuge starke Aufwindfelder festgestellt wurden. Segelfliegern war es auch vorbehalten, diese Aufwindfelder über der absteigenden Föhnströmung in den Alpen nachzuweisen, die mit einer Vertikalkomponente bis zu 7 m/sec bis hinauf an die Stratosphäregrenze reichen. Über die Ausbildung dieser Föhnwelle ist man heute gut unterrichtet¹. Es handelt sich um eine Resonanzschwingung, die dann auftritt, wenn ein Hindernis von einer einheitlich hoch reichenden Luftströmung überweht wird;

diese Föhnwelle wird aber nur dann sichtbar, wenn hierfür günstige Feuchtigkeitsverhältnisse vorhanden sind.

b) *Klimatologie*. Nach diesem Überblick über die Ursache des Föhns wollen wir uns noch kurz mit seiner Wirkung beschäftigen. Der Föhn verändert das Klima eines Ortes, indem er Temperatur-, Feuchtigkeits- und Windverhältnisse stark beeinflusst. Aber nicht nur die Größe, sondern auch die Häufigkeit der Veränderung dieser drei Elemente durch den Föhn ist von großer Bedeutung für das Klima und damit für jegliches Leben. Betrachten wir beispielsweise wieder die Nordalpen. Hier finden wir, daß der Föhn in fast allen Tälern, die parallel zur Föhnrichtung liegen, in einem Gebiet zwischen Genf und Salzburg mehr oder weniger stark in Erscheinung tritt. Die Häufigkeit seines Auftretens ist von Jahr zu Jahr sehr verschieden, so daß es ausgesprochen föhnarme und föhnreiche Jahre gibt; doch kann man hier im Mittel mit 30 bis 50 Föhntagen pro Jahr rechnen. Es hängt von der Orographie der einzelnen Föhntäler ab, wie stark und wie weit der Föhn ins Tal hinunterdringt. So hat z. B. nach STREIFF-BECKER¹ Glarus im Jahresdurchschnitt $14\frac{1}{2}$ Föhntage und das im selben Tal nur 400 m höher und 14 km südlich gelegene Linthal $24\frac{1}{2}$ Föhntage im Jahr. Auch in den einzelnen Monaten ist die Föhnhäufigkeit sehr verschieden. Die hauptsächlichsten Föhnmonate in den Alpen sind März/April und Oktober/November. Im Sommer kommt es am seltensten zu den typischen Föhnwetterlagen, und wenn sie auftreten, ist der Föhneffekt nicht so stark ausgeprägt wie in den anderen Jahreszeiten, da im Sommer die höheren Luftschichten relativ kälter sind. Der einzelne, meist sehr böige Föhnsturm kann wenige Stunden, aber auch mehrere Tage anhalten. Die dabei auftretenden Temperatur- und Feuchtesprünge betragen 10–20° C resp. 50–80%. Dadurch werden auch die Monatsmittel wesentlich erhöht, und Föhnorte zeigen Temperaturwerte, die Orten zukommen, die wesentlich südlicher oder 200–300 m tiefer liegen. Außerdem bewirkt der Jahresgang des Föhnvorkommens eine Verlängerung der Vegetationsperiode, indem das Frühlingsmaximum eine verfrühte Schneeschmelze und das Herbstmaximum ein Hinausschieben der Winterkälte verursacht. Föhntäler können somit als «klimatische Inseln» bezeichnet werden.

Viel häufiger als der Südföhn der Nordalpen ist der Nordföhn der Südalpen. Er ist klimatisch von ebenso großer Bedeutung, doch liegt hier das Hauptgewicht nicht so sehr in der Erhöhung der Temperatur der betreffenden Gebiete als vielmehr in seiner austrocknenden und daher wolkenauflösenden Wirkung. Der große Sonnenscheinreichtum z. B. des Tessins, Südtirols und der Côte d'Azur sind vor allem auf die

¹ J. KÜTTNER, Zur Entstehung der Föhnwelle, Beitr. Phys. fr. Atm. 26, 79 (1939). – U. KRUG-PIELSTICKER, Beobachtung der hohen Föhnwelle an den Ostalpen, Beitr. Phys. fr. Atm. 27, 140 (1942).

¹ R. STREIFF-BECKER, 71 Jahre Glarnerföhn, Meteorolog. Z., 52, 147 (1935). – E. EKHAART, Einiges zur Statistik des Innsbrucker Föhns, Meteorolog. Z. 49, 452 (1932).

Wirkung dieses Nordföhns zurückzuführen. Da, wie eingangs erwähnt, an allen Gebirgen Föhnerscheinungen festgestellt werden können, deren Auswirkungen auf das Klima je nach der geographischen Lage verschieden sind, soll auf Einzelheiten nicht weiter eingegangen werden. Nur ein Föhnwind muß noch erwähnt werden, der die größten bisher gemessenen und durch den Föhneffekt hervorgerufenen plötzlichen Erhöhungen der Temperatur um $30-45^{\circ}\text{C}$ verursacht. Es ist der Chinook im Osten der Rocky Mountains. Seine Wirkung erstreckt sich Hunderte von Kilometern ostwärts und macht in weiten Gebieten überhaupt erst Viehzucht und Landwirtschaft möglich.

4. Der Antizyklonalföhn

Man muß von fast allen Begleiterscheinungen, die die an das Gebirge gebundenen Föhnwinde charakterisieren, absehen und nur auf die Definition zurückgreifen, um den *Antizyklonalföhn* oder, wie er meistens bezeichnet wird, *freien Föhn*, zu kennzeichnen. Nur die dynamische Erwärmung und Austrocknung durch Absinken ist das gemeinsame Kennzeichen beider Föhnarten; alles andere, Ursache sowie Wirkung, ist grundverschieden.

a) *Meteorologie.* Der *freie Föhn*, über den in den letzten Jahren vor allem H. FLOHN¹ gearbeitet hat, kann in allen Arten von Hochdruckgebieten auftreten. Am stärksten ausgeprägt und daher auch klimatisch am wirksamsten ist er in den großräumigen und stationären Antizyklonen, die sich bis in große Höhen erstrecken und bis in 8–10 km Höhe wesentlich wärmer als die Tiefdruckgebiete sind. Über diesen warmen Antizyklonen ist die Tropopause 11–13 km hoch und sehr kalt (-60 bis -70°C). «Diese stratosphärische Kaltluft ist nun die eigentliche Ursache aller wesentlichen Wettererscheinungen der stationären Antizyklonen. Sie drückt wie ein Stempel die unten lagernden Luftmassen zusammen; diese erwärmen sich durch Absinken und Schrumpfen, fließen auseinander, die Wolken lösen sich auf, die Feuchtigkeit sinkt stark herab» (FLOHN). Die Ursache des freien Föhns liegt somit bei diesen dynamischen Antizyklonen in der *kalten Stratosphäre*.

Der andere Haupttypus von Antizyklonen sind die niedrigen Kältehochs, die mit der allgemeinen Strömung der Luftmassen wandern. Sie sind nur in den tieferen Schichten der Troposphäre (bis zirka 3–5 km) nachweisbar und in diesem Bereich auch relativ kalt. Sie sind gekoppelt mit einer warmen und tiefliegenden Tropopause, die über diesen Kältehochs gleiche Werte

aufweist wie über Tiefdruckgebieten (Höhe zwischen 8 und 9 km mit einer Temperatur von -40 bis -50°C). Die Kaltluftmassen dieser thermischen Hochdruckgebiete an der Rückseite von Tiefdruckgebieten fließen auseinander und zwingen dadurch Luft aus der Höhe zum Absteigen. Die Ursache dieses meist kurzdauernden Föhns ist daher das *Schrumpfen der Kaltluft* in den unteren Schichten der *Troposphäre*.

b) *Klimatologie.* Der freie Föhn wirkt primär nur auf zwei Klimaelemente, auf Temperatur und Feuchtigkeit, da hier das Absteigen der Luft an keine horizontalen Windgeschwindigkeiten gebunden ist. Er beeinflusst das Klima der freien Atmosphäre über großen Gebieten der Meere und des Festlandes. Auf seine allgemein bekannten Wirkungen wie auf das Klima der Roßbreiten und dasjenige in den winterlichen kontinentalen Antizyklonen braucht hier nur verwiesen zu werden, sowie auch auf seinen Jahresgang, der mit demjenigen des Auftretens der Hochdruckgebiete zusammenfällt.

Als Erscheinung der freien Atmosphäre wirkt der Antizyklonalföhn direkt nur auf die hochliegenden Teile der Erdoberfläche, wie z. B. auf das Klima des Hochgebirges. Neben seiner ausschlaggebenden Bedeutung für die Entwicklung des Zyklonalföhns ist er hier auch die Ursache für den Sonnenscheinreichtum im Winter, da das Austrocknen der Luft die Auflösung der Bewölkung nach sich zieht, während das Tiefland unter einer Hochnebeldecke liegt, die sich an der Schrumpfungsinversion in zirka 1000 m Höhe ausbildet. Diese Sperrschicht unterbindet jeglichen Austausch, so daß wir es mit einer denkbar scharfen und stabilen Wetterscheide zu tun haben, die die warme, trockene Höhenluft von der feuchten, kalten Bodenluft trennt. In der warmen Jahreszeit greift der freie Föhn leichter bis in die Niederung durch, wo er die Bildung von Bodennebeln verhindert, und wo es dann entweder ganz wolkenlos ist oder es nur zur Bildung flacher Haufenwolken kommt.

Summary

The results of new researches about the föhn in the Swiss Alps in connection with the theory of H. von FICKER show that the energy of the cyclonic föhn has two sources: the pressure gradient and the baroclinic field. This is caused by the isobaric differences of temperature between the Alps and the free atmosphere in the lee. The result is a current with a descending component in the lee. At the beginning, the descent of the föhn is due to the outstreaming of the cold air on the ground. In its further development the energy of the föhn increases so much as to sweep the cold air off the valleys.

The development of föhn in an anticyclonic system is also explained. Furthermore the two kinds of föhn are discussed in regard to their climatological influences.

¹ H. FLOHN, Singularitäten des freien Föhns, ein Beitrag zur modernen Klimakunde, Meteorolog. Z. 57, 134 (1940); Witterung und Klima in Deutschland, Forschungen zur Deutschen Landeskunde, Bd. 41. S. Hirzel, Leipzig 1942.