

Entwicklung und Eigenschaften des Südföhns

Beitrag für ein modifiziertes Föhnmodell

Am 22. Dezember 1989 brachte die «Schweizer Illustrierte» einen Sensationsartikel im Umfang von sechs Seiten von Jörg Kachelmann mit dem Haupttitel «Rätsel ist gelöst» und den folgenden Schlagzeilen: «Vergessen Sie, was Sie in der Schule über den Föhn gelernt haben – Der «älteste Schweizer» ist ganz anders – Ein Deutscher aus Österreich fand heraus, wie der trockenwarme Südwind ganz genau funktioniert – Mit dem Schulbuchwissen, das Generationen von jungen Schweizerinnen und Schweizern büffeln mußten, wird aufgeräumt – Die Föhndarstellung in den Schulbüchern ist falsch – Die Schweizer Geographielehrer müssen umdenken – Das größte, aber noch nicht das letzte Rätsel um den Föhn ist gelöst.»

Diese Zeilen lassen aufhorchen. Schulbuchverlage, Schulbuchautoren und die Lehrer werden medienwirksam auf die Anklagebank versetzt, wobei letztere auf sich nehmen sollten, daß sie lebenslang desinformierend unterrichtet haben.

Wenn der Föhn auch zumeist als beeindruckender Sturm in Erscheinung tritt, so erweist sich dieser sensationelle und sehr ungenügend recherchierte Artikel bei näherer Prüfung als eigentlicher Sturm im Wasserglas.

Sogar der Föhnforscher, auf dessen Untersuchungen sich das Presseergebnis stützt, hat sich in aller Form von dieser ungenauen und verzerrten Darstellung distanziert, für deren Prüfung er nicht beigezogen worden ist.

Die Strömungsverhältnisse auf der Luvseite bei Südföhn

Ein Grundanliegen im Artikel ist richtig: Das in den meisten Schulbüchern und in vielen Lehrbüchern präsentierte klassische Föhnmodell enthält einige Ungenauigkeiten hinsichtlich der Strömungsverhältnisse auf der Luvseite bei Südföhn. Dies sollte in den Föhnmodellen behoben werden. Südwärts der Alpen strömt der Südwind zumeist über eine Kaltluftschicht von einigen hundert Metern Höhe, eine Luftmasse, in der fast Windstille besteht oder sogar schwache nördliche Winde wehen. Ein derartiges Strömungsfeld kann man auch als Luvwirbel bezeichnen. Dies heißt mit anderen Worten: Auf der Südseite der Alpen verlaufen die Stromlinien bei Südföhn flacher als das Geländeprofil, womit der «Hebeeffekt» der Luftmassen bedeutend abgeschwächt wird.

Wenn nun jedoch diese Erkenntnis als neueste Entdeckung und Lösung des größten Rätsels des Föhns bezeichnet wird, so entspricht dies in keiner Weise den Tatsachen. Meine Dissertation vom Jahre 1944 und die späteren Arbeiten über das Föhnproblem enthalten diese für den Südföhn charakteristischen Strömungsverhält-

nisse in klarer Weise. Dabei ist das Vorhandensein einer fast windstillen Bodenkaltluftschicht oder die Existenz eines Luvwirbels bei Südföhn vereinzelt bereits in der älteren Föhnliteratur zu finden. In dieser Hinsicht sind insbesondere die Publikationen von P. WENGER (1916) und L. LAMMERT (1920) zu erwähnen.

Vorerst gebe ich einen Überblick über die Geschichte der Föhnforschung in den letzten 150 Jahren, die vor allem von Forschern aus den Alpenländern Österreich, von Deutschland und der Schweiz bestimmt worden ist.

1. Geschichte der Föhnforschung

1.1 Föhn und Sahara

Im Jahr 1846 beschrieb der Naturforscher OSWALD HEER den Glarner Föhn in der folgenden Weise, eine Beschreibung, die auch heute noch ihre Gültigkeit hat:

«Diese Föhnstürme sind am heftigsten im Hinterland, ja nicht selten ist in Glarus zu gleicher Zeit Windstille oder Nordwind, während im Sernftal und Linthal der Föhn die Täler durchheult. Doch dringt er heftig bis ins Haupttal, bis Glarus, Mollis und auch weiter vor; selten jedoch bis nach Zürich herunter; wo er übrigens seine Heftigkeit meistens verloren hat.»

Von diesem Zeitpunkt an, der Mitte des 19. Jahrhunderts, begann man, sich auch wissenschaftlich mit dem Föhn zu befassen und rätselte über seine Herkunft. CONRAD ESCHER VON DER LINTH und OSWALD HEER vertraten im Jahr 1852 die Ansicht, daß der Föhn aus den nordafrikanischen Saharagebieten stamme und deshalb so warm und trocken sei. Es wurde darauf hingewiesen, daß die Sahara früher ein Meer gewesen sei, was in unserer Region, da der Föhn ausgeblieben sei, die Bildung von Eiszeiten ermöglicht habe.

Im Jahr 1863 erfolgte eine Expedition in die Sahara, wobei das Auffinden von Meeresfossilien die frühere Existenz eines Meeres in dieser Region nachwies.

Der Neuenburger Forscher DESOR, MARTINS aus Montpellier und auch der Engländer LYELL schlossen sich dieser *Saharatheorie des Föhns* an. Im Jahre 1864 reiste der Berliner Meteorologe H. W. DOVE zu einer Tagung der Schweizer Naturforscher nach Zürich und bestritt in

kämpferischer Weise, daß der Föhn ein «Wildes Kind der Sahara» sei. Er wies in überzeugender Weise darauf hin, daß der Föhn auf der Südseite der Alpen feucht sei und dort oft große Niederschläge verursache. Die Strömung, die auf der Alpennordseite in Erscheinung trete, sei deshalb die Trägerin maritimer Luft und stamme vom Atlantik. Die Schweizer Forscher waren sehr betroffen und erstaunt, daß ausgerechnet ein Berliner in ihr Land reiste, um ihnen zu sagen, was der Föhn sei. Schon bald wurden jedoch die unterschiedlichen Auffassungen, die auch polemische Höhepunkte erreichten, in vorläufig befriedigender Weise geklärt.

fizierte. Unter Hinweis auf die Föhnwinde in Grönland erbrachte Hann den Nachweis, daß die hohe Temperatur und die geringe relative Feuchtigkeit des Föhns einzig auf das Absteigen der Strömung in die Niederungen zurückzuführen sei. Wenn ein Luftquantum von einem Bergkamm in das Tal hinunter befördert wird, so gelangt es unter einen höheren Druck und erfährt eine Volumenverkleinerung, ein Vorgang, der mit einer Temperaturerhöhung verbunden ist. Diese läßt sich nach der Poisson'schen Formel berechnen und beträgt zufälligerweise ziemlich genau ein Grad Celsius pro 100 Meter Höhenunterschied. Diese thermodynamische Theorie vermochte zahlreiche Eigenschaften des Föhns zu erklären und trug zu der folgenden Föhndefinition bei: «Der Föhn ist ein Wind in den Gebirgen, der durch sein Absteigen in die Täler – zumeist entlang des Geländeprofiles – warm und trocken wird.»

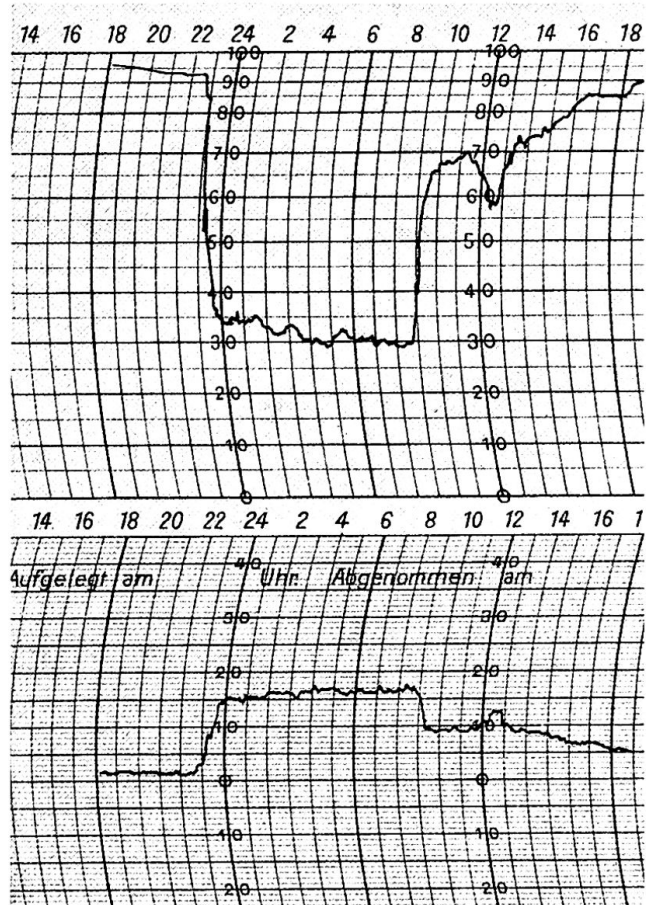


Abb. 1 Thermogramm und Hygrogramm bei einem Föhn-einbruch in Glarus. Am 24. Dezember 1935 setzte in Glarus der Föhn um 22.30 Uhr ein und verursachte in einer Zeitspanne von anderthalb Stunden einen Temperaturanstieg von 1 auf 15° und ein Absinken der relativen Feuchtigkeit von 93% auf 34%. Die Temperatur am Weihnachtsmorgen entsprach derjenigen eines Frühsommertages. Doch um 9.00 Uhr fand dieser Weihnachtsföhn mit einem Temperaturfall von 9° sein Ende.

1.2 Die physikalische Föhntheorie

Im Jahre 1866 erschien der bahnbrechende Artikel «Über den Ursprung des Föhns» vom österreichischen Meteorologen JULIUS HANN, der die «Saharatheorie» des Föhns endgültig widerlegte und die Ansichten von Dove modi-

Abb. 1 zeigt den typischen Verlauf von Temperatur und relativer Feuchtigkeit, wie er bei einem Föhn einbruch an einer Talstation im nördlichen Alpenvorland erfolgt.

Ein Föhn einbruch bewirkt im betroffenen Gebiet – vor allem in der winterlichen Jahreszeit – eine Wärmeinsel, wobei in horizontaler Richtung außergewöhnliche Temperaturdifferenzen eintreten, wie die folgenden Extremfälle bei Südföhn zeigen:

11. Dezember 1942, 07.30 Uhr: Altdorf + 14,4° und Zürich – 5,3°, 8. November 1982 14.00 Uhr: Luzern + 21,8° und Locarno-Magadino + 1,6°.

Es können in den Niederungen sowohl auf der Nordseite der Alpen oder beidseits der Alpen Temperaturunterschiede in der Größenordnung von 20° eintreten.

1.3 Weitere Marksteine in der Föhnforschung

Das Problem des Föhns hat die Forscher aus den Alpenländern auch in den darauffolgenden 125 Jahren unentwegt beschäftigt, gab Anlaß zu zahlreichen Untersuchungen und Theorien, wobei es oft zu weiteren leidenschaftlichen Auseinandersetzungen kam. Der sehr umfangreichen Föhnliteratur entnehmen wir nachfolgend, in chronologischer Reihenfolge, einige Hinweise über Forschungen und Ansichten über die Entwicklung des Föhns, die von Bedeutung sind, (in Klammer weitere Arbeiten über das Föhnproblem).

Chronologische Übersicht

1867: Am 15. November hält HEINRICH WILD an der Universität Bern seine Rektoratsrede über das Thema «Föhn und Eiszeit». Er stellt dabei eine Frage, mit der sich die Forschung mehr als ein Jahrhundert beschäftigte: «Welches ist die Ursache, daß der warme und leichte Föhn in die Täler hinunter stürzen und hier die dichtere Kaltluft verdrängen kann?»

WILD postuliert, daß die südliche Höhenströmung über dem oberen Bereich der Täler eine Luftverdünnung bewirke, wodurch der Südwind in die Täler hinein aspiriert werde und auf diese Weise nach unten vordringen könne (1868, 1901).

- 1876: Der Franzose HÉBERT führt das Tiefergreifen der Föhnströmung auf absteigende Wirbel und die Existenz von Teilminima des Luftdrucks in den Niederungen der Alpennordseite zurück.
- 1878: ROBERT BILLWILLER, der spätere Direktor der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, sieht das Problem einfacher. Die geheimnisvolle Kraft, die den Föhn in die Täler zwingt, sei nichts anderes als ein Ansaugen der in den Niederungen liegenden Kaltluftmassen durch die im Westen oder Nordwesten liegenden Tiefdruckgebiete. Der Föhn ströme dann als Ersatz der abfließenden Kaltluft in die Täler (1895, 1899).
- 1882: HANN und die meisten Meteorologen der Alpenländer entscheiden sich im umstrittenen Problem des Föhns für die Ansicht von BILLWILLER.
- 1895: BILLWILLER weist erstmals auf die Existenz eines Antizyklalföhns hin, der in der freien Atmosphäre auftreten könne, ohne daß die Strömung ein Gebirge überqueren müsse. Zugleich weist er darauf hin, daß eine strenge Unterscheidung der verschiedenen Föhnarten nur schwer zu treffen sei, da Übergangsformen auftreten.
- 1901: WILD war lange Zeit als russischer Staatsrat in Petersburg tätig und kehrte 1896 in die Schweiz zurück. Er widmet sich erneut in intensiver Weise dem Föhnproblem. In seiner Denkschrift «Über den Föhn und Vorschlag zur Beschränkung seines Begriffs» kritisiert er die barometrische *Aspirationstheorie* Billwillers und weist mit Nachdruck darauf hin, daß der Föhn mit stürmischer Heftigkeit im Hintergrund der Täler beginne. Dies stehe mit einem primären Abfluß der trägen Kaltluft in keiner Weise im Einklang.
- 1905: HEINZ VON FICKER führt umfangreiche Untersuchungen über den Föhn in den österreichischen Voralpen und Alpen durch, wobei selbstregistrierende Meßinstrumente zum Einsatz kamen und auch Ballonfahrten vorgenommen wurden. FICKER unterscheidet drei Stadien der Föhnentwicklung: das Vorstadium, das Antizyklonalstadium und das stationäre Stadium. In der Auseinandersetzung zwischen Wild und Billwiller über die Ursache des Durchgreifens des Föhns bis in die Niederungen entscheidet sich FICKER vorwiegend für die *Aspirationstheorie* BILLWILLERS, die dem Abfließen der trägen Kaltluftschicht in den Niederungen die entscheidende Bedeutung beimißt. Der eigentliche Föhn wird damit als sekundäre Ersatzströmung betrachtet (1906–1913).
- 1916: R. WENGER hat im Jahre 1916 in einer Berliner Antrittsvorlesung über den damaligen Stand der Föhntheorien orientiert. Aufgrund von hydrodynamischen Gleichungen weist er nach, daß die Föhnströmung nicht wirbelfrei sein könne. Seine Darlegungen enthielten den theoretischen Ansatz zur *Solenoidtheorie*, fanden jedoch nicht die gebührende Beachtung.
- 1925: Als einer der besten Kenner des Alpenföhns begründet der Glarner R. STREIFF-BECKER seine *Injektortheorie*. Der südliche Höhenwind soll durch eine Injektorwirkung im Lee einen luftverdünnten Raum erzeugen, in den die Höhenströmung einbrechen und in die Täler hinunterstürzen könne. Seine Anschauungen haben eine große Ähnlichkeit mit derjenigen von Wild und betonen eindrücklich die aktive Rolle der Föhnströmung beim Durchgreifen in die Niederungen (1930, 1931, 1935, 1942).
- 1939: J. KÜTTNER erforscht die Strömungsvorgänge in den höheren Luftschichten bei Föhn und weist auf die Existenz von Leewellen hin. Diese waren später die Voraussetzung für Höhenflüge mit Segelflugzeugen, die eine Höhe bis zu 12 000 m erreichten.
- 1944: In seiner Basler Dissertation findet K. FREY für das seit 1867 so hart umstrittene Problem des Hinunterstürzens des «warmen und leichten Föhns» in die Täler eine physikalische Erklärung, die an die Erkenntnisse von Wenger anschließt. Er weist auf das Vorhandensein eines ausgeprägten baroklinen Solenoisfeldes auf der Leeseite bei Föhn hin. Dieses verleiht der Föhnströmung die notwendige Absinkbeschleunigung und Energie, um mit machtvoller Stärke bis in die Täler hinunter vordringen zu können.
- 1950: F. ROSSMANN führt das Hinuntersteigen des Föhns auf ein feuchtlabiles Absinken der Wolkenluft innerhalb der Föhnmauer zurück, wodurch sie sich gegenüber der Umgebung abkühlt. Allerdings gibt es auch stürmischen Talföhn ohne die Existenz einer Föhnmauer.
- 1953: H. SCHWEITZER vergleicht den Föhn mit einer «schießenden Strömung», wie eine solche in der Hydrodynamik bekannt ist. Dies habe zur Folge, daß ein Einbiegen der Strömung zu den Niederungen erfolgen könne.
- 1960: R. WIDMER entwickelt eine objektive Methode zur Prognose des Föhns auf statistischer Grundlage.
- 1975: M. SCHLEGEL veröffentlicht eine Dokumentation «Der Alpenföhn», in der die wichtigsten Arbeiten über das Föhnproblem aus der Zeitperiode 1945–1975 zusammengestellt sind.
- 1981: Im Rahmen eines Forschungsprogramms ALPEX der Meteorologischen Weltorganisation werden vom 1. September 1981 bis 30. September 1982 umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, in die auch einzelne Föhnlagen einbezogen worden sind.
- 1989: Der Band «FÖHNSTUDIEN» (Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt) gibt einen Überblick über die Föhnforschung aus der Zeitperiode 1866–1986. Er enthält 29 Beiträge von 25 Autoren.



Abb. 2 Der Föhn als Gestalter ufoartiger Wolkenformen.

2. Das Werden und Vergehen einer Süd föhnlage

Am 8. November 1982, 6.00 Uhr, fand in unseren Voralpen eine Süd föhnlage ihren Höhepunkt, die zu den eindrücklichsten und machtvollsten der letzten Jahrzehnte gehört, da sie mit der größten bisher festgestellten Druckdifferenz zwischen Kloten und Locarno verbunden war.

Das Beobachtungsnetz, das zur Untersuchung dieser und anderer Föhnlagen diente, ist in Abb. 3 dargestellt. Verwendung fanden ebenfalls die Radiosondenaufstiege von Payerne und Mailand.

Nachfolgend beschreiben wir den Entwicklungsgang einer Föhnlage, wie er in vielen Fällen zu beobachten ist. Um Hinweise auf die räumlichen Felder von Druck, Temperatur und Strömung zu erhalten, verwenden wir die Messungen und Beobachtungen der erwähnten «Jahrhundert föhnlage» vom 7. und 8. November 1982. Dabei ist zu beachten, daß auch der typische Talföhn in vielfältigen Erscheinungsformen auftreten kann, mit entsprechenden Abweichungen von dieser ausgeprägten und typischen Föhnlage.

Bei einer Süd föhnlage unterscheiden wir zwei Hauptstadien der Entwicklung, die in ähnlicher Form bei allen Föhnlagen in unserem Alpengebiet auftreten.

2.1 Das antizyklonale Föhnstadium

Großräumig besteht über dem Atlantik bis nach Europa hinein eine vorerst zonale Strömung, in die zahlreiche Tiefdruckgebiete eingelagert sind. Eine westliche Richtung des Höhenwindes dreht sich nun allmählich im Gegenuhrzeigersinn und geht in eine südwestliche bis südliche Richtung über.

Vor der Ausbildung der Süd föhnlage ist in unserer Region zumeist ein Kaltluft einbruch erfolgt, verbunden mit

Nord föhn und einem Druckanstieg, der vorerst im nördlichen Alpenvorland und später auch in der Höhe und auf der Alpensüdseite erfolgt.

In der Troposphäre setzt dann ein antizyklonales Absinken der Luftmassen ein. Kräftige positive Änderungen der relativen Topographie 500/1000 Hectopascal (hPa) und der Höhen der oberen Druckflächen, verbunden mit einer Abkühlung und Verschiebung der Tropopause nach oben, führen zum Aufbau eines Hochdruckkeils in der Höhe über dem Alpengebiet.

Durch eine aus der mittleren Troposphäre absinkende Inversion wird eine von oben nach unten fortschreitende Erwärmung erzeugt, verbunden mit einer gleichzeitigen Abnahme der relativen Feuchtigkeit.

Diese Vorgänge wirken sich auf der Südseite der Alpen im allgemeinen schwächer aus und werden dort früher beendet, wobei der Druckfall in den Niederungen nördlich des Alpenkamms beginnt.

Während in der Höhe, auf der Ostseite des durch die troposphärische Erwärmung gebildeten Hochdruckkeils, zumeist noch Winde mit nördlicher Komponente wehen, stellt sich in mittleren Höhen ein schwaches Druckgefälle vom Alpenkamm nach Norden ein. So beginnt der Föhn in vielen Fällen über dem nördlichen Alpenvorland als «Zwischen föhn», da über dem Alpengebiet eine Divergenzgebiet der Luftmassen entstanden ist.

Im Norden bildet sich in mittleren Höhen ein gegen die Alpen gerichtetes isobares Temperaturgefälle, das schon in diesem Vorstadium des Föhns ein bedeutendes Ausmaß, in der Größenordnung von 4° bis 8°, annehmen kann. Von Bedeutung ist, daß die Luftmassen über dem Alpenkamm gegenüber denjenigen über dem nördlichen Alpenvorland zunehmend kälter und damit dichter werden.

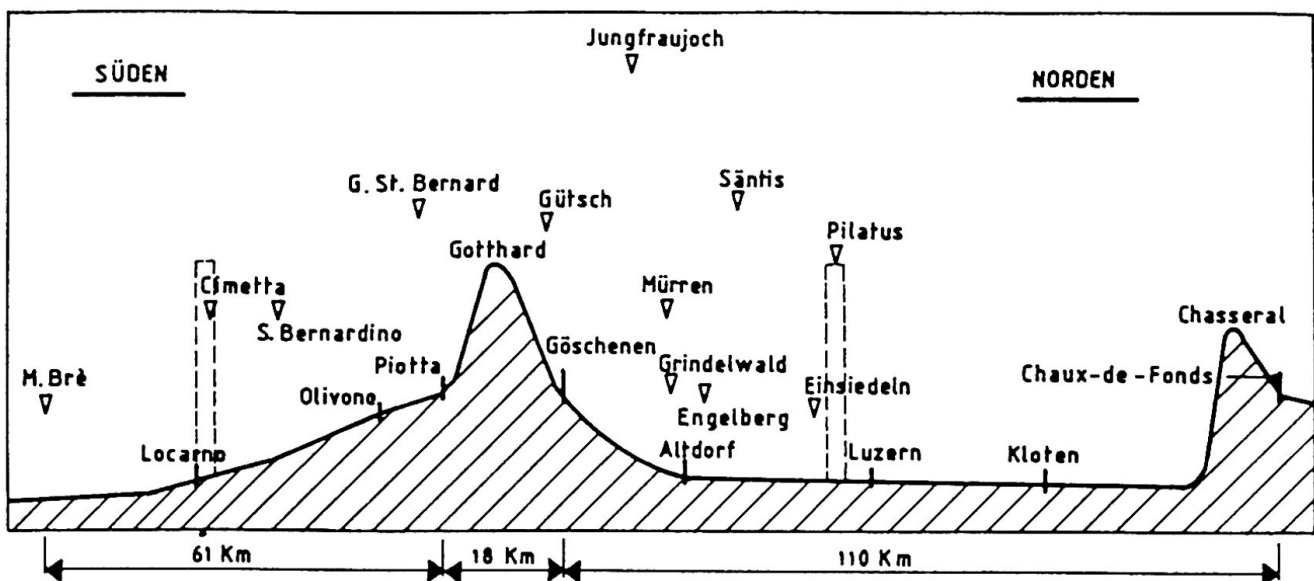


Abb.3 Das Beobachtungsnetz in einem Querschnittprofil über den Alpenkamm von Südsüdost nach Nordnordwest.

2.2 Das zyklonale Föhnstadium

Die Zirkulation erhält nun in der Höhe allmählich ein meridionales Gepräge, wobei die Höhenströmung in gewissen Fällen, auch bei typischem Talföhn, einen zonalen Charakter beibehalten kann.

Mit dem zunehmenden Druckgradienten verstärken sich die Winde mit südlicher Komponente. Durch die von Süden aufsteigenden, stabil geschichteten Luftmassen stellt sich in den meisten Fällen nicht nur eine Föhnmauer ein, sondern es setzt über dem Alpenkamm eine trocken- bzw. feuchtadiabatisch bedingte Abkühlung ein, wodurch sich über dem nördlichen Alpenvorland die isobare Temperaturdifferenz vergrößert und in vielen Fällen ein Ausmaß von über 10° erreichen kann. Abb. 4 zeigt das für eine vollausgebildete Föhnlage typische räumliche Feld für Druck, Strömung und Temperatur am Beispiel der «Jahrhundertföhnlage».

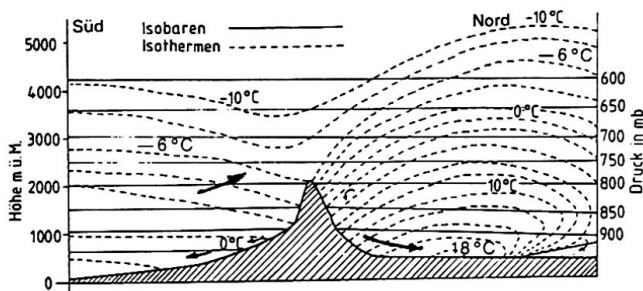


Abb. 4 Das Druck-, Strömungs- und Temperaturfeld im Höhepunkt der Föhnlage vom 8. November 1982 um 6 Uhr.

Die Druckverhältnisse

Im Höhepunkt der «Jahrhundertföhnlage» erreichen die *Druckdifferenzen* (in Klammer die Druckgradienten in hPa pro 100 km) das folgende Ausmaß, wobei die Druckangaben auf die gleiche Höhe bezogen sind und bei e die Entfernungen der Stationen angegeben sind.

Wesentlich sind die folgenden Erkenntnisse:

- Die Druckdifferenzen und Druckgradienten zwischen Süd- und Nordseite der Alpen erreichen ein beträchtliches Ausmaß, wobei $-23,6$ hPa zwischen Kloten und Locarno einen Rekordwert darstellen dürfte.
- Die Druckgradienten nehmen vor allem im unteren Bereich mit der Höhe rasch ab, sind jedoch auch in der Höhe des Alpenkamms noch bemerkenswert hoch.

Tab. 1 Die Druckdifferenzen (8.11.82, 6.00 Uhr)

400 m ü. M.	Kloten-Locarno Monti	(e = 130 km)	- 23,6 hPa (- 18,2)
	Kloten-Altendorf	(e = 56 km)	- 5,0 hPa (- 8,9)
1000 m ü. M.	Chaux-de-Fonds-Mt. Brè	(e = 189 km)	- 20,3 hPa (- 10,7)
	Olivone-Mt. Brè	(e = 52 km)	- 0,5 hPa (- 1,0)
	Göschenen-Piotta	(e = 18 km)	- 6,1 hPa (- 33,9)
1600 m ü. M.	Chasseral-Cimetta	(e = 157 km)	- 14,4 hPa (- 9,2)
	Mürren-San Bernhardino	(e = 60 km)	- 13,3 hPa (- 22,2)
2100 m ü. M.	Pilatus-Cimetta	(e = 96 km)	- 11,0 hPa (- 11,3)

- Das Druckgefälle ist erwartungsgemäß im Bereich des Alpenmassivs am größten und nördlich der Alpen sehr deutlich größer als südlich davon, auf der Luvseite und damit sehr asymmetrisch.
- In der dargelegten räumlichen Druckverteilung liegt das große Potential, das den Föhn auf der Leeseite oft zu verheerenden Sturmstärken anwachsen läßt, während in den Niederungen der Alpensüdseite fast Windstille besteht.

Die Temperaturverhältnisse

Das räumliche Temperaturfeld ist für die Dynamik des Föhns von besonderer Bedeutung (s. Abb. 4).

Entlang des *Geländeprofils* (s. Abb. 3) wurden im Höhepunkt der außerordentlichen Föhnlage die folgenden Werte für die Temperatur und die relative Feuchtigkeit gemessen, mit der Angabe des bestehenden Wetters:

Locarno Monti	1,2°	und 92% mit Schneefall
Olivone	- 0,8°	und 95% mit Schneefall
Piotta	- 1,0°	und 97% mit Schneefall
Gütsch	- 3,9°	und 93% mit Schneefall
Jungfraujoch	- 8,5°	und 98% mit Schneefall
Göschenen	5,8°	und 45% und stark bewölkt
Altendorf	15,2°	und 30% und stark bewölkt
Kloten	17,2°	und 27% und stark bewölkt

Die *Temperaturgradienten* (Temperaturabnahme pro 100 m Höhendifferenz) betragen entlang des Geländeprofils: Leeseite zwischen Altendorf und Gütsch: 1,04 (13 Uhr: 1,13), Luvseite zwischen Locarno und Gütsch: 0,27 (13 Uhr: 0,28). Für die Leeseite ergibt sich der Temperaturgradient, der dem klassischen Föhnmodell entspricht und aus physikalischen Gründen auch eintreten muß, da die Druckzunahme über einen Höhenbereich von 100 m fast genau eine Temperaturzunahme von 1° bewirkt. Vor allem tagsüber können zudem meist strahlungsbedingte, überadiabatische Temperaturgradienten auftreten.

Besonders eindrücklich sind die *horizontalen Temperaturdifferenzen* in den *verschiedenen Höhenlagen* im Höhepunkt der außerordentlichen Südöhnlage vom 8. November 1982 zwischen der Nord- und der Südseite der Alpen. Mit einem Temperaturgradienten von $0,8^\circ/100$ m sind die Temperaturen auf die gleiche Höhe reduziert.

Tab. 2 Die Temperaturdifferenzen (8.11.82, 6.00 Uhr)

400 m ü. M.	Kloten-Locarno Monti	(e = 130 km):	+ 16,6°
1000 m ü. M.	Einsiedeln-Olivone	(e = 66 km):	+ 17,2°
	Grindelwald-Mt. Brè	(e = 97 km):	+ 11,6°
	Göschenen-Piotta	(e = 18 km):	+ 7,7°
1600 m ü. M.	Mürren-San Bernardino	(e = 60 km):	+ 15,2°
2100 m ü. M.	Pilatus-Gotthard	(e = 53 km):	+ 11,4°
2500 m ü. M.	Säntis-Gr. St. Bernhard	(e = 50 km):	+ 9,9°

Unter Berücksichtigung von Abb. 4 ergeben sich temperaturmässig die folgenden Eigenschaften dieser ausgeprägten Föhnlage, die in ähnlicher, doch zumeist abgeschwächter Form auch bei anderen Föhnsituationen eintreten:

- Die außergewöhnlichen horizontalen Temperaturdifferenzen zwischen der Nord- und der Südseite der Alpen schwächen sich mit zunehmender Höhe ab, sind jedoch auch noch in der Höhe des Alpenkamms auf der Leeseite beträchtlich.
- Auf der südlichen Luvseite läßt sich unterhalb 2000 m ü. M. sogar ein leichter Temperaturfall gegen den Alpenkamm von ungefähr 1° feststellen.
- Für die Dynamik des Föhns ist die sehr große isobare Temperaturdifferenz in der Höhenlage von 2000 m ü. M. über dem nördlichen Alpenvorland, die ihren Schwerpunkt in der Nähe des Alpenkammes hat, von wichtiger Bedeutung. Am 8. November, 1 Uhr, war dieser Temperaturunterschied zwischen Pilatus und Gotthard, fünf Stunden vor dem Höhepunkt der Föhnlage, sogar auf den höchsten bisher festgestellten Wert von 13,8° angewachsen.
- Die von Süden aufgestiegenen, stabil geschichteten Luftmassen haben sich adiabatisch abgekühlt, so daß die Luft über dem Alpenkamm am kältesten und damit am dichtesten geworden ist.
- Über der Leeseite schneiden sich die isobaren und isothermen Flächen und bilden ein sogenanntes baroklines Solenoidfeld, das der Föhnströmung die notwendige Absinkbeschleunigung und eine zusätzliche Energie verleiht.
- Die Luftsäule über Locarno ist im Höhenbereich von 2100 m ü. M. bis zum Boden um rund 14° kälter und damit schwerer als eine solche über Luzern.
Am 8. November 1982, 14 Uhr, wurden sogar die folgenden Temperaturen gemessen:
Locarno Magadino (198 m ü. M.): + 1,6° und Luzern (456 m ü. M.): + 21,8°. Dies entspricht somit, ohne Höhenkorrektur, einer Temperaturdifferenz von 20,2°.

Die Wind- und Niederschlagsverhältnisse

Es ist sehr bemerkenswert, daß die *Winde* auf der Luvseite und bis auf 1600 m ü. M. hinauf während der ganzen Föhnperiode schwach bleiben. Während der Föhn mit sturmartiger Heftigkeit und gewaltiger Zerstörungskraft

die Quertäler der Voralpen durchbraust, wird an zahlreichen Stationen im Tessin sogar Windstille verzeichnet. Am 8. November haben die Böenspitzen des Föhnsturmes die folgenden Höchstwerte erreicht:

Gütsch	194 km/Std. um 14 Uhr
Engelberg	158 km/Std. um 9 Uhr
Jungfrauoch	156 km/Std. um 7 Uhr
Altdorf	138 km/Std. um 9 Uhr
Pilatus	130 km/Std. um 6 Uhr
Luzern	98 km/Std. um 9 Uhr
Cimetta (Luvseite)	24 km/Std. um 1 Uhr

Dem Radiosondenaufstieg vom 8. November, 1 Uhr, von Payerne ist zu entnehmen, daß sich in 4100 m ü. M., somit in der Höhe der Spitzen der Berner Alpen, ein Windmaximum von 123 km/Std. befindet. Oberhalb dieser Starkwindzone, abgegrenzt durch eine leichte Inversion, nimmt die Windstärke ab und beträgt in 7900 m ü. M. nur noch 45 km/Std.

Die Föhnlage, die am 6. November, 20.10 Uhr, in Altdorf mit dem Föhneinbruch begann, dauerte an dieser Station bis am 9. November, 03.40 Uhr, somit 55 Stunden 30 Minuten.

Die bisher längste Föhndauer von 96 Stunden wurde in Altdorf in der Zeitperiode 18.-22. März 1956 beobachtet.

Die während dieser außerordentlichen Föhnlage gefallenen *Niederschlagsmengen*, in der Zeit vom 7.-9. November, sind sehr typisch, wie dies die folgende Verteilung zeigt:

Mt. Brè	108 mm
San Bernardino	88 mm
Olivone	83 mm
Locarno Monti	79 mm
Piotta	25 mm
Göschenen	10 mm
La Chaux-de-Fonds	32 mm
Pilatus	3 mm
Luzern	2 mm
Altdorf	1 mm

An das «Zyklonale Föhnstadium» kann sich in Ausnahmefällen ein «Dimmerföhn-Stadium» anschließen, bei

dem der südliche Höhenwind so stark wird, daß er den oberen Bereich der Föhntäler überweht, den Talboden später erreicht und dann weiter als gewöhnlich ins Mittelland hinein vordringt.

Wenn die Südföhnlage durch einen starken Kaltlufteinbruch beendet wird, so kann sie in kurzer Zeit durch eine Nordföhnlage abgelöst werden.

3. Ein Modell des Südföhns

Der Südföhn kann in den vielfältigsten Variationen in Erscheinung treten und bewirkt doch zumeist eine typische Wetterverteilung nord- und südwärts der Alpen. Abb. 5 könnte ein Modell für eine typische zyklonale Südföhnlage darstellen, mit einer schematischen Darstellung der räumlichen Felder für die Druck-, Strömungs- und Temperaturverhältnisse.

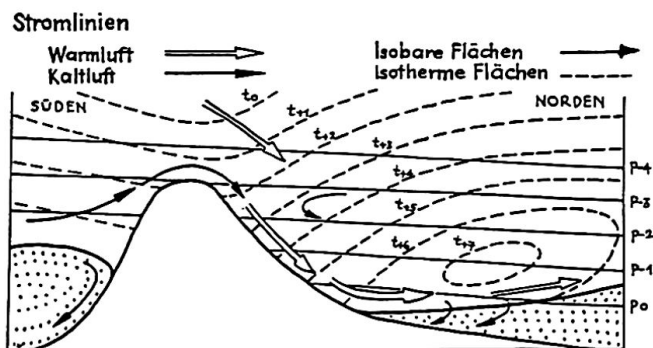


Abb. 5 Das zyklonale Hauptstadium einer Südföhnlage. Die Föhnströmung vermag bis in die Täler hinunter vorzudringen. Diese Entwicklung wird ermöglicht durch den großen Druckgradienten und das gut entwickelte Solenoidfeld, die der Föhnströmung auf der Leeseite die notwendige Absinkbeschleunigung und Energie verschaffen.

Südwärts der Alpen besteht eine meist stark ausgebildete Staubewölkung, mit dem Niederschlagsgebiet und einer Föhnmauer über dem Alpenkamm. Auf der Nordseite der Alpen ist zumeist eine stark wechselnde, nach Westen zunehmende Bewölkung anzutreffen. Cirren, als Vorboten einer heranziehenden atlantischen Störung, abschmelzende Altocumuluswolken, sogenannte Föhnfische und im eigentlichen Föhngebiet, walzenartige

Stratocumuluswolken, «Rotoren» genannt, in deren Bereich eine große Turbulenz besteht. In den wogenartigen Wolkengebilden besteht im Absinkbereich der troposphärischen Luftmassen manchmal ein ausgedehntes Aufhellungsgebiet, ein «Föhnfenster».

Das Föhnmodell läßt erkennen, wie die Temperatur auf der Luvseite gegen den Alpenkamm leicht abnimmt und dann auf der Leeseite in sehr ausgeprägtem Maß ansteigt, wobei der stärkste Anstieg unmittelbar nördlich des Alpenkammes stattfindet. Über dem Alpenkamm befinden sich somit die kältesten und dichtesten Luftmassen. Auf der Leeseite, über dem nördlichen Alpenvorland, schneiden sich die isobaren und die isothermen Flächen, und es entsteht ein Solenoidfeld mit baroklinem Charakter. Dieses erteilt der Föhnströmung eine Absinkbeschleunigung, so daß diese, im oberen Bereich boraartig, bis in die Täler hinunter vorstoßen kann. Die gewaltige Energie eines Föhnsturmes hat ihre Quellen im außergewöhnlichen Druckgradienten und im gut ausgebildeten baroklinen Solenoidfeld. Für das seit mehr als einem Jahrhundert umstrittene Problem des Hinunterstürzens des «warmen und leichten Föhns» in die Täler ist damit eine physikalische Erklärung gefunden.

Die Föhnströmung ist über dem Alpenkamm sehr kalt, hat vorerst Boracharakter und erhält durch die adiabatisch bedingte Temperaturzunahme erst in ihrem unteren Teil eine überdurchschnittlich hohe Temperatur. Süd- und Nordföhn haben in ihren Druck- und Temperaturverhältnissen ähnliche Eigenschaften, unterscheiden sich jedoch in ihrer Entstehungsart.

Die bis in die Täler hinunter vorgestoßene Föhnströmung gleitet hier schließlich über die verbleibenden Kaltluftschichten auf. In diesen wehen zumeist schwache, vor dem Föhneinbruch oft auch nördliche Winde. Durch ein Hin- und Herpendeln des Kaltluftkeils kann es in den Föhntälern zu mehrmaligen Föhnpausen kommen.

Auf der Südseite der Alpen werden die tieferen Luftschichten zumeist nicht in die südliche alpenüberquerende Strömung einbezogen. Auch im Höhepunkt der Föhnlage bleiben die bodennahen Winde auf der Luvseite schwach. Oft besteht Windstille, oder es bildet sich bei schwachen nördlichen Winden sogar ein «Luvwirbel», dies in Höhen bis zu 1500 m ü. M. Das klassische Föhnmodell der Schulbücher, das auch auf der Luvseite Stromlinien enthält, die dem Geländeprofil folgen, sollte im oben erwähnten Sinn modifiziert werden.