

DISS. ETH Nr. 16286

WECHSELWIRKUNG ZWISCHEN FÖHN UND PLANETARER GRENZSCHICHT

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN

der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von
Stefan Gubser
dipl. math., Universität Bern
geboren am 09. November 1970
von Kriens, Schweiz

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. Hans Richner, Referent
Prof. Dr. Reinhold Steinacker, Korreferent
Prof. Dr. Huw Davies, Korreferent

2006

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	v
Summary	vii
Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole	ix
1 Einleitung.....	1
1.1 Das Forschungsprogramm MAP	2
1.2 Das Teilprojekt FORM.....	4
1.3 Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit	5
2 Messungen	7
2.1 Das Rheintal und das Seeztal.....	7
2.2 Bodenstationen	9
2.2.1 ANETZ	9
2.2.2 ENET.....	10
2.2.3 Universität München	10
2.2.4 Meteomedia	11
2.2.5 HotDog und THYGAN	11
2.2.6 ZAMG.....	12
2.2.7 Meteodat	12
2.2.8 Stationen Brandnertal	13
2.3 Radiosondierungen	14
2.4 Mikrobarographen	15
2.5 Motorsegler Dimona.....	16
3 Die Föhnfälle während MAP.....	17
3.1 Verfahren zur Identifikation der Föhnfälle	17
3.2 Beschreibung der Föhnfälle	25
3.2.1 Fall 1 (15. September 1999)	25
3.2.2 Fall 2 (18. bis 20. September 1999).....	26
3.2.3 Fall 3 (22. bis 23. September 1999).....	28
3.2.4 Fall 4 (30. September 1999)	29
3.2.5 Fall 5 (2. bis 3. Oktober 1999).....	30

3.2.6	Fall 6 (18. Oktober 1999)	31
3.2.7	Fall 7 (19. bis 21. Oktober 1999).....	32
3.2.8	Fall 8 (22. bis 23. Oktober 1999).....	33
3.2.9	Fall 9 (24. Oktober 1999)	35
3.2.10	Fall 10 (30. bis 31. Oktober 1999).....	36
3.2.11	Fall 11 (1. bis 2. November 1999).....	37
3.2.12	Fall 12 (5. bis 6. November 1999).....	38
3.2.13	Schlussbemerkungen zur Föhnfallbestimmung	40
4	Erosion des Kaltluftsees	41
4.1	Meteorologische Grundlagen	43
4.1.1	Die Entstehung des Kaltluftsees	43
4.1.2	Schwerewellen	43
4.1.3	Brunt-Väisälä-Frequenz	44
4.1.4	Richardson-Zahl	45
4.2	Bisherige Untersuchungen	45
4.2.1	Beseitigung des Kaltluftsees	45
4.2.2	Druckschwankungen und Schwerewellen.....	46
4.3	Der Föhndurchbruch im St. Galler Rheintal	47
4.3.1	Druckschwankungen	47
4.3.2	Wärmefluss	53
4.4	Der Föhndurchbruch im Seeztal	58
4.4.1	Druckschwankungen.....	58
4.5	Diskussion der Druckschwankungen	61
5	Strömungsaufteilung im Raum Sargans	63
5.1	Bisherige Untersuchungen	63
5.2	Der Föhnfall 5 und die Strömungsaufteilung	64
5.3	Diskussion und Schlussfolgerung	64
6	Föhnthesen	67
6.1	Ursachen für die Erwärmung des Föhns.....	67
6.2	Hypothesen zum Hinuntersteigen des Föhns in die Täler	69
6.2.1	Aspirationstheorie	70
6.2.2	Passive Ersatzströmung	71

6.2.3 Solenoidtheorie	71
6.2.4 Prozesse in der Föhnmauer.....	72
6.2.5 Auskühlung der Hangatmosphäre.....	72
6.2.6 Schiessende Strömung	72
6.2.7 Blocking-Theorie	73
6.3 Diskussion der Hypothesen	74
6.4 Schlussfolgerungen.....	75
7 Ausblick.....	77
Anhang A: Föhnbegriffe	79
Anhang B: Föhnwinde in unterschiedlichen Regionen der Erde	97
Anhang C: Die Bewegung des Kaltluftsees im St. Galler Rheintal	105
Literaturverzeichnis	113
Danksagung.....	119
Lebenslauf	121

Zusammenfassung

Der Föhn beeinflusst im Frühling und Herbst das Klima in den Alpentälern. Er führt nicht nur zu schönem und trockenem Wetter, seine teilweise stürmischen Winde können zu Schäden führen und er kann die Gesundheit beeinflussen (Kopfschmerzen). Aus diesen Gründen wird der Föhn seit über hundert Jahren untersucht. Trotzdem sind viele seiner Eigenschaften, wie zum Beispiel die zur Beseitigung des Kaltluftsees führenden Mechanismen während des Herabsteigens des Föhns in die Täler, noch nicht genau verstanden.

Während der „Special Observing Period“ (SOP) vom 7. September 1999 bis 15. November 1999 des „Mesoscale Alpine Programme“ (MAP) wurden im Rahmen von „Föhn im Rheintal während MAP“ (FORM) vom Julier bis an den Bodensee Messgeräte aufgestellt. Diese Messungen liefern die Grundlage dieser Arbeit, welche vor allem die Beseitigung des Kaltluftsees durch den Föhn untersucht.

Als erstes mussten die Föhnfälle der MAP-SOP identifiziert werden. Zu diesem Zweck wurden die an 19 Bodenstationen gemessenen klassischen Parameter Temperatur, Wind und Feuchtigkeit ausgewertet. Markante Änderungen dieser Parameter (Zunahme, Abnahme) kennzeichnen jeweils den Beginn und das Ende des Föhns. Mit Hilfe dieser Parameter konnten 12 Föhnfälle identifiziert werden. Die Wetterlagen, welche zu den einzelnen Föhnfällen führten, werden in dieser Arbeit ausführlich beschrieben.

Für die Beseitigung des Kaltluftsees können die drei Mechanismen turbulente Erosion, Konvektion durch Sonneneinstrahlung oder die statische und dynamische Ersetzung durch die Föhnluft verantwortlich sein. Mit Hilfe von Mikrobarographendaten aus Vaduz, Quinten und Altenrhein wurde die turbulente Erosion untersucht. Druckschwankungen vor einem Föhndurchbruch können durch Scherungswellen in der Grenzschicht zwischen Föhn und Kaltluftsee verursacht werden. Analysen der Druckverläufe vor Föhn zeigten jedoch keine klare Wellenstruktur, sondern turbulentes Verhalten.

Während zweier Flüge sammelte der Motorsegler Dimona Daten in der Grenzschicht zwischen Föhn und Kaltluft. Mit Hilfe dieser Daten verglich man den Wärmefluss in der Grenzschicht mit dem Wärmefluss am Boden. Es wurden Werte von -15 W/m^2 (oben) und von 15 W/m^2 (unten) gefunden. Dies entspricht einer Erwärmungsrate des Kaltluftsees von 25 K/d. Dieser Wert ist sehr hoch und mit dieser Erwärmungsrate würde jeder Kaltluftsee in weniger als einem Tag beseitigt. Abkühlung in der Nacht und Advektion von Norden verlangsamten jedoch diesen Prozess.

Im Raum Sargans teilt sich das Rheintal von Chur her kommend in Richtung Seeztal und St. Galler Rheintal. Hier wurde untersucht, ob eine Strömungsaufteilung des Föhns auftritt. Beim Vergleich der Föhneinsätze und der potentiellen Temperaturen in den verschiedenen Tälern, konnte diese Strömungsaufteilung nicht nachgewiesen werden. Aufgrund der erhaltenen Resultate darf die Vermutung aufgestellt werden, dass es sich beim Föhn in den beiden Tälern um zwei verschiedene Föhnäste handelt.

Die Föhnforschung hat viele Erklärungen für das Heruntersteigen des Föhns in die Täler hervorgebracht. Die wichtigsten dieser Theorien werden in dieser Arbeit aufgeführt und diskutiert. Man stellt dabei fest, dass eine einzelne Theorie das Herunter-

steigen nicht erklären kann. Es ist das Zusammenspiel der verschiedenen Ursachen, welche dies ermöglicht.

Die Arbeit wird durch eine Zusammenstellung von Föhnbegriffen und Föhnwinden aus aller Welt vervollständigt. Bei Studium der Literatur zu den verschiedenen Teilaspekten des Föhns wurde festgestellt, dass einzelne Föhnbegriffe unterschiedlich interpretiert werden. Die Auflistung der Begriffe und deren bekannten Definitionen sollen helfen, dass diese einheitlich benutzt werden.

Mit der Sammlung der Föhnwinde wird gezeigt, dass es sich beim Föhn nicht über ein im Europäischen Alpenraum begrenztes Phänomen handelt.

Summary

In spring and autumn foehn influences the climate in the alpine valleys. This warm wind is not only responsible for creating fair and dry weather, but also for creating stormy winds, which can lead to damage and influence people's health. For this reason, the research of the foehn began over a hundred years ago. Nevertheless, a lot of its characteristics, for example the exact mechanisms by which the cold pool is removed when foehn descends into the valley, are still not known exactly.

During the „Special Observing Period” (SOP) from September 7, 1999, to November 15, 1999, of the „Mesoscale Alpine Programme” (MAP), instruments were installed between Julier and Lake Constance in the framework of „Foehn in the Rhine Valley during MAP” (FORM). These measurements form the basis of this thesis. The main focus is the removal of the cold pool by foehn.

First, the foehn cases of the MAP-SOP had to be identified. For this purpose, the classical parameters of temperature, wind and humidity, measured at 19 surface stations, were analysed. Significant changes in these parameters (increase, decrease) indicate the begin and the end of foehn. With the help of these parameters, 12 foehn cases were identified. The weather situations, leading to the different foehn cases, are described in detail in the present thesis.

Three mechanisms, namely turbulent erosion, convection caused by solar radiation or static and dynamic displacement of the cold air by foehn air can be responsible for the removal of the cold pool. The turbulent erosion was studied with the help of microbarographs in Vaduz, Quinten and Altenrhein. Pressure fluctuations before a break-through of the foehn to the ground can be caused by shear waves present in the interface between the foehn flow and the cold air below. The analysis of the behaviour of the pressure showed no clear wave structure, but it did indicate turbulence.

The Motorglider Dimona collected data in the interface between the foehn flow and the cold air below during two flights. With the help of these data, a comparison of the heatflux in the interface and of the heatflux on the ground was possible. The values on the top of the cold pool were about -15 W/m^2 and the values on the ground about 15 W/m^2 . This corresponds to about 25 K/d . The value is very high and with this warming rate, any cold pool would disappear in less than a day, but cooling in the night and advection from the north slow this process down.

In the region of Sargans, the Rhine Valley splits in the direction of the Seez Valley and the Rhine Valley of Sankt Gallen. It was checked, if there is a possible flow splitting of the foehn flow. With the comparison of the foehn break-throughs and of the potential temperatures in the different valleys a flow-splitting could not be proved. Based on the obtained results, it is assumed, that there are two different foehn branches in the two valleys, present whilst the foehn is active.

The foehn research found many different explanations for the descending of the foehn in the valleys. In the thesis the most important explanations are presented and discussed. One theory alone cannot explain the descending of the foehn to the ground. It is the interaction of the different causes that is responsible for the descending.

Integrated in the present thesis is a collection of foehn terms and foehn winds from all over the world. During the study of the literature of the different aspects of foehn, it was discovered, that several foehn terms have different interpretations. The list of the terms and their definitions should be a help for a homogeneous use of the terms.

The collection of the foehn winds shows, that the foehn is not just a phenomenon known only in the European Alps, but a world-wide phenomenon.

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

AGF	Arbeitsgruppe Föhnforschung Rheintal-Bodensee
aLMo	Alpines Modell der MeteoSchweiz
ALPEX	Alpine Experiment
AMS	American Meteorological Society
ANETZ	Automatisches Bodenmessnetz der MeteoSchweiz
COC	Coordination and Operations Center
ENET	Ergänzungsnetz der MeteoSchweiz
FORM	Arbeitsgruppe „Föhn im Rheintal während MAP“
GOP	General Observing Period
GPS	Global Positioning System
IAC	Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich
IOP	Intensive Observing Period
MAI	Mountain Associated Infrasound
MAP	Mesoscale Alpine Programme
MDC	MAP Data Centre
MOC	MAP Operations Centre
m.ü.M.	Meter über Meer
POC	Project Operation Centre
ROM	Rheintal Ozonstudie während MAP
SOP	Special Observing Period
SRS 400	Schweizer Radiosonde
THYGAN	Thermo-Hygrometer ANETZ
URFEX	Urnersee Föhnexperiment
UTC	Universal Time Coordinated
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Symbole

c_p	Spezifische Wärmekapazität
g	Erdbeschleunigung
h	Geopotentielle Höhe
N	Brunt-Väisälä-Frequenz
p	Druck
Q	Wärmefluss
t	Zeit
T	Lufttemperatur
T_v	Virtuelle Temperatur

u, v	Windkomponenten
U	relative Feuchte
z	Höhe über Grund
β	Statische Stabilität
Δ	endliche Differenzen
ϑ	Temperatur in °C
θ_e	Äquivalentpotentielle Temperatur
Θ_v	Virtuelle potentielle Temperatur
ρ	Luftdichte

Kapitel 1

Einleitung

Der Föhn ist ein warmer und trockener Fallwind auf der Leeseite eines Gebirgskammes. Mit dieser Definition versucht man das komplexe und vielfältige meteorologische Phänomen Föhn zu umschreiben. Damit wird man diesem Wind jedoch nicht gerecht. Im Grundsatz ist die Definition korrekt, aber jeder Föhn zeigt seine eigenen Erscheinungsformen und Auswirkungen.

Der Begriff „Fallwind“ muss hier kritisch betrachtet werden. Dieser setzt das physikalische Prinzip des Fallens voraus. Nur Luft, welche im Vergleich zur Umgebung schwerer (dichter) ist, kann in die Täler „fallen“. Steinacker (schriftliche Mitteilung) hat die Hypothese aufgestellt, dass der Föhn meist eine maskierte Bora sei. Es fließt also tatsächlich kältere Luft von der Luvseite über die Pässe ins Lee der Alpen. Die Erwärmung am Talboden wird dann nur durch die Entfernung des dort liegenden Kaltluftsees bewirkt.

Vor allem die Bewohner der Alpentäler müssen sich immer wieder mit den verschiedenen Effekten des Föhns auseinandersetzen, bringt er doch nicht immer nur Freude sondern auch Leid. Das wiederholte Auftreten des Föhns ermöglicht es erst, dass in einigen Alpentälern, wie zum Beispiel dem Rheintal, Weinbau betrieben werden kann. Dies brachte dem Föhn einer seiner vielen, weiteren Namen ein, er wird hier auch „Traubenkocher“ genannt. Ein Ausbleiben des Föhns im Spätsommer und Herbst kann zu einer schlechten Weinernte führen. Weiter ist im Frühling der Föhn oft für eine schnelle Schneeschmelze verantwortlich und erhielt deshalb auch den Namen „Schneefresser“.

Andererseits fördert der Föhn durch seine Trockenheit und seine Stärke das Feuer. Immer wieder kam es in den letzten Jahrhunderten zu Feuersbrünsten, welche erst durch den Föhn ihre grosse Ausmasse annahmen. Balzers war eines der letzten Opfer des Föhns. Am 7. Februar 2001 zerstörte ein Grossbrand acht Wohnhäuser. Kurz nach Mitternacht brach das Feuer aus und da gleichzeitig ein Föhnsturm mit Windgeschwindigkeiten von gegen 100 Kilometern pro Stunde tobte (Funkenwurf), breitete sich das Feuer sehr schnell aus.

Dem Föhn werden auch physiologische und neurologische Wirkungen nachgesagt. Wetterfällige Personen machen oft den Föhn für ihre Beschwerden verantwortlich. Gensler (1974) bemerkte hierzu, dass die verbreitete Meinung, alle Kopfschmerzen seien vom Föhn hervorgerufen, unhaltbar sei. Dazu schrieb Richner (1974), dass auch andere Wetterlagen biotrop sind und dass bei Föhn keine meteorologische Variable existiert, die durch andere Wetterlagen nicht ähnlich beeinflusst werden könnte.

Föhnwinde treten überall auf der Erde auf. Doch neben dem Chinook in den Rocky Mountains der USA, ist der Alpenföhn wohl einer der meist erforschten. Seit über 150 Jahren wird er untersucht. Zu einem ersten Durchbruch kam es 1866, als der öster-

reichische Meteorologe Julius Hann (1866) nachweisen konnte, dass thermodynamische Effekte für die Erwärmung des Föhns verantwortlich sind. Vor dieser Entdeckung herrschte die Meinung vor, dass der Ursprung des Föhns in der Sahara liege und er darum so warm und trocken sei.

In den nachfolgenden Jahren wurden viele Hypothesen zur Entstehung dieses Fallwindes aufgestellt. Theorien über sein Absteigen in die Täler wurden erarbeitet und viele seiner Teilaspekte wurden untersucht. Trotz der jahrzehntelangen Forschung sind immer noch viele Fragen offen. Vor allem eine genaue Prognose des Durchbruchs des Föhns ist in vielen Tälern der Alpen weiterhin ein Problem. Truog (1986) schrieb, dass zu Beginn der achtziger Jahre an der Schweizerisch Meteorologischen Anstalt (jetzt MeteoSchweiz) noch immer die Meinung vorherrschte, dass der Föhn unberechenbar sei und ein Einbruch für einen bestimmten Ort nicht vorausgesagt werden könne.

Eine der wichtigsten Rollen beim Durchbruch des Föhns spielt die Kaltluft in den Tälern. Denn je nach Ausdehnung dieser Kaltluftseen kann der Föhn früher oder später den Talboden erreichen. Kuhn (1989) bemerkte zu den Kaltluftseen, dass sie das Salz und der Pfeffer des Föhnmenüs in den Alpentälern seien. Die bisherigen Föhnhypothesen beschäftigten sich nicht detailliert mit der Beseitigung der Kaltluft. Für viele Föhnforscher, wie zum Beispiel Frey (1945), genügt schon die kinetische Energie der absinkenden Föhnströmung, um die Bodenkaltluftschicht auszuräumen und den Abfluss derselben zu bewirken. Die genauen physikalischen Vorgänge in der Grenzschicht zwischen Föhn und Kaltluftsee wurden jedoch nicht untersucht.

Im Rahmen des Mesoscale Alpine Programme (MAP) wurde das Projekt „Föhn im Rheintal während MAP“ (FORM) ins Leben gerufen, um neben anderen Fragestellungen auch dieser Aufgabe nachzugehen. Seit dem Alpine Experiment (ALPEX) im Jahre 1982 ist MAP das grösste Forschungsprogramm, welches im Alpenraum durchgeführt wurde. ALPEX hatte zum Ziel, zusätzliche Messdaten für die Untersuchung des Einflusses von Gebirgen auf die atmosphärische Zirkulation bereitzustellen (Gutermann und Wanner 1982). Natürlich wollte man auch den Föhn untersuchen. Leider kam es während der Feldmessphase von ALPEX zu keinem klassischen Südföhn. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird unter „Föhn“ der „Südföhn“ verstanden.

1.1 Das Forschungsprogramm MAP

Die Maschenweite vieler Prognosemodelle ist zu gross (beim Alpinen Modell (aLMO) der MeteoSchweiz beträgt sie 7 km), als dass kleinskalige Prozesse, welche das Wetter bestimmen, gut simuliert werden. Das Projekt MAP soll dabei helfen die Wettervorhersage für Starkniederschläge, Föhn, Wellen und Turbulenzen über den Alpen zu verbessern. Damit dies möglich wird, müssen die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse verstanden und in spätere Modellversionen eingebaut werden.

MAP verfolgt die nachfolgend aufgezählten drei Hauptziele (Binder und Schär 1996). Ausführlich werden die wissenschaftlichen Fragestellungen in Bougeault *et al.* (1998) behandelt.

1. Verbesserung des Verständnisses derjenigen Prozesse, die zu Starkniederschlägen, insbesondere auf der Alpensüdseite, führen.

2. Die Dynamik des Föhns soll untersucht werden, besonders die Wechselwirkung derjenigen Luft, welche die Alpen überströmt, mit der in den Tälern und im Vorland liegenden Luft.
3. Beschaffung von Daten für die Überprüfung und Verbesserung von hochauflösenden numerischen Vorhersagemodellen, hydrologischen und gekoppelten Modellen in gebirgigem Gebiet.

Theoretische Untersuchungen innerhalb von MAP begannen 1995. Innerhalb der „General Observing Period“ (GOP), vom 1. Oktober 1998 bis am 30. November 1999, fand das eigentliche Feldexperiment, die „Special Observing Period“ (SOP), vom 7. September 1999 bis 15. November 1999, statt. Diesen Zeitraum der SOP hatte man aufgrund von klimatologischen Untersuchungen (möglichst häufiges Auftreten aller interessanten Phänomene) bestimmt.

Für die verschiedenen Untersuchungen wurden so genannte „Target Areas“ (Fig. 1.1) definiert und mit Messinstrumenten ausgerüstet (Bougeault *et al.* 1998). Die Einsatzleitung der SOP, das „MAP Operations Centre“ (MOC), hatte ihren Sitz in Innsbruck. Die Grundlage für die Einsätze bildeten die Wettervorhersagen, welche in Innsbruck erstellt wurden. Mit Hilfe dieser Vorhersagen wurden die „Intensive Observing Period“ (IOP) festgelegt. Während dieser Perioden sollten möglichst viele Daten über die interessierenden meteorologischen Erscheinungen gesammelt werden. Insgesamt wurden 17 IOPs definiert, was 42 Messtagen entsprach. In Bougeault *et al.* (2001) sind ein Überblick über die MAP-Aktivitäten und erste Auswertungen zu finden.

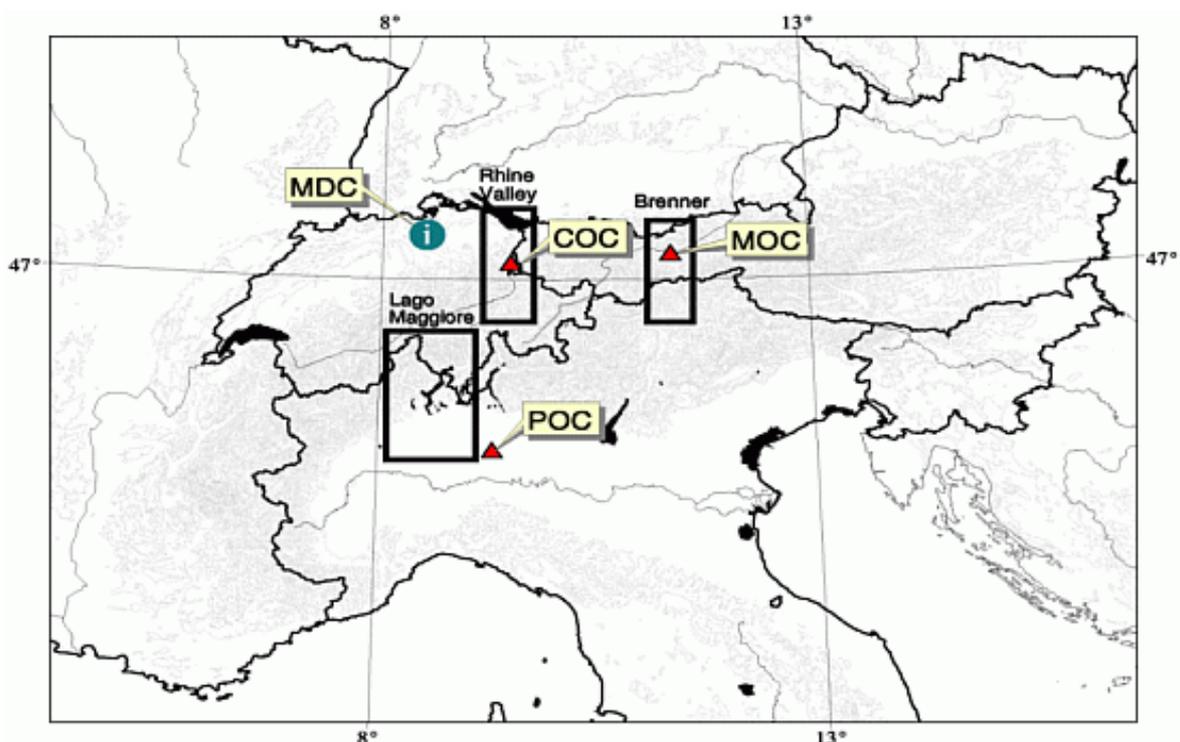


Fig. 1.1: Karte der Alpen mit den „Target Areas“ und den Einsatzzentren von MAP (MOC: MAP Operations Centre, Innsbruck; COC: Coordination Centre, Bad Ragaz; POC: Project Operation Centre, Milano-Linate; MDC: MAP Data Centre, Zürich) (aus Binder *et al.* 1999).

1.2 Das Teilprojekt FORM

FORM nimmt sich der Fragestellung zur Dynamik des Föhns an. Richner *et al.* (2002) schreibt, dass eine verbesserte Prognose für Föhntäler die Fragen „Wann erreicht der Föhn den Talgrund an einem bestimmten Ort?“, „Wie stark ist der Föhn?“ und „Wann hört der Föhn auf?“ beantworten muss. Dies führt zu den folgenden Fragestellungen mit den damit verbundenen Mechanismen:

1. Wie wird der Kaltluftsee durch den Föhn beseitigt?
2. Welche Rolle spielen die Winde aus den Seitentälern? Wann vermischen sich die Luftmassen aus dem Seitental mit der Luft des Haupttales und wann bewahren sie ihre Identität und bewegen sich weiter als unabhängige Strömung?
3. Welche Faktoren spielen eine Rolle bei der Strömungsaufteilung? Wenn ein Tal sich gabelt, warum folgt der Föhn manchmal nur einem Ast und zu einem anderen Zeitpunkt spaltet er sich auf?

Für genauere Untersuchungen zu diesen Themen hat man sich für das Rheintal zwischen Bonaduz und dem Bodensee entschieden. Verschiedene Gründe führten zu dieser Wahl. Steinacker *et al.* (2001) zeigt, dass im Herbst im ganzen Alpenraum die Föhnhäufigkeit bei klimatologischen Stationen des Rheintales am höchsten ist. In einer Statistik basierend für Vaduz wird gezeigt, dass zwischen 1971 und 1996, ausgehend von täglich drei Terminen, die Wahrscheinlichkeit für 6 oder mehr Föhnbeobachtungen bei über 80% (über 60% bei 12 oder mehr Beobachtungen) liegt. Die Wahrscheinlichkeit für mindestens eine Föhnbeobachtung im Herbst liegt jedoch nicht bei 100%, denn im Jahre 1978 kam es zum Beispiel in Vaduz zu keinem einzigen solchen Fall.

Weiter grenzen vier Länder (Schweiz, Deutschland, Österreich und Liechtenstein) an das Rheintal-Bodenseegebiet. Dies erleichtert die Zusammenarbeit der diversen Forschungsgruppen. Das Rheintal ist aber auch bereits mit einem dichten Beobachtungsnetz ausgerüstet. Die MeteoSchweiz, die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) und die Firma Meteomedia, um nur einige zu nennen, unterhalten hier seit einigen Jahren Bodenstationen. Zusätzlich können durch die Lage des Rheintales, nördlich der „Lago Maggiore Area“ (Fig. 1.1), Messsysteme in der Nähe des Alpenkamms für beide „Target Areas“ genutzt werden.

Für die Untersuchung der Strömungsaufteilung erwies sich die Region Sargans als ideal. Denn hier teilt sich das Rheintal in Richtung West (Walensee) und Richtung Nord (Bodensee). Von Beobachtungen her ist bekannt, dass es hier häufig zu Strömungsaufteilungen während Föhn kommt.

Forschungsgruppen aus der Schweiz, Österreich, Deutschland und Frankreich beteiligten sich an FORM. Unterstützt wurden die Messungen durch die Schweizer Armee mit dem Artillerie- und dem Armeewetterdienst. In Bad Ragaz (Fig. 1.1) hatten die zivile und die militärische Führung ihren Sitz (COC). Hier stand man in direkter Verbindung mit Innsbruck (MOC) und man besass direkten Zugriff auf die Datenbank des MDC.

Die räumliche Dichte der Messsysteme während der SOP ist einmalig. Vom Julierpass bis zum Bodensee wurden Instrumente installiert. Etwa 50 Bodenstationen, 2 Windprofiler, 4 SODARs, 2 Szintillometer, 2 LIDARs und verschiedene Flugzeuge kamen zum Einsatz. Nur mit Hilfe der Armee war es möglich, dass mit dem Betrieb

von zusätzlich bis zu 9 Radiosondenstationen (davon maximal 6 militärische) während der SOP über 1'300 Sondierungen durchgeführt werden konnten.

Einen ausführlichen Überblick aus meteorologischer Sicht über das Projekt FORM bietet Steinacker *et al.* (2001), während Richner *et al.* (2002) auf die Planung und den Betrieb der verschiedenen Beobachtungssysteme eingeht.

Im Rheintal wurden bereits früher Untersuchungen zum Föhn durchgeführt. Zu Beginn des letzten Jahrhunderts führte Pepler (1930 und 1935) Messungen mit Drachen und Pilotballonen in der Region des Bodensees durch. Gutermann (1970) überprüfte die Anwendbarkeit der Diskriminanzanalyse zur Bestimmung von Beobachtungsterminen mit Föhn. Dabei arbeitete er vor allem mit Daten der Station Bad Ragaz. Zusätzlich präsentierte er erste Ergebnisse einer mesoklimatischen Föhnuntersuchung im Rheintal zwischen Chur und Buchs. Waibel (1984) verglich den Gang der Föhnhäufigkeiten in Altdorf mit den Föhnhäufigkeiten an den Bodenseestationen Rohrspitz, Friedrichshafen und Konstanz.

Aus einem Projekt, welches eine Verbesserung der Vorhersage von Stürmen in der Region des Bodensees erzielen wollte, entstand 1971 die Arbeitsgruppe „Föhnforschung Rheintal-Bodensee“ (AGF). Diese Gruppe existiert noch heute und bearbeitet alle im Rheintal zwischen Chur und Bodensee auftretenden Föhnfälle. In Berichten der MeteoSchweiz werden jeweils ihre Resultate veröffentlicht.

1.3 Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt bei der Frage nach der Beseitigung des Kaltluftsees durch den Föhn. Wie bereits oben erwähnt, hat sich keine der bekannten Föhnthesen detailliert mit diesem Thema auseinandergesetzt. Das dichte Netz von Bodenstationen, Radiosondierungen und die einmaligen Messungen des Motorseglers Dimona sollen es ermöglichen, die genauen physikalischen Vorgänge vor dem Durchbruch des Föhns zu untersuchen.

Die mögliche Strömungsaufteilung im Raum Sargans zwischen Seeztal und St. Galler Rheintal wird untersucht. Zu diesem Zweck werden vor allem Daten von Bodenstationen ausgewertet. Es wird weiter ein Vergleich mit den Resultaten, welche von einem Windlidar gesammelt wurden, vorgenommen.

Bevor die oben aufgeführten Punkte behandelt werden können, müssen die während der MAP-SOP aufgetretenen Föhnfälle definiert werden. Zu bestimmen, wann der Föhn exakt an einer Station beginnt und wann er aufhört, erweist sich dabei als nicht trivial. Ferner werden die Wetterlagen, welche zu den Föhnfällen geführt haben, beschrieben.

Zur Erklärung des Föhns tauchten immer wieder verschiedene Hypothesen auf. Dürr (2000) sammelte und beschrieb diese in seiner Diplomarbeit. Hier werden diese Föhnthesen noch einmal aufgeführt und ausführlich beschrieben. Abschliessend werden sie diskutiert und mit einzelnen Föhnfällen aus FORM verglichen.

Während der Durchsicht der Literatur wurde festgestellt, dass viele Begriffe im Zusammenhang mit Föhn im Laufe der Föhnforschung entstanden sind. Im Anhang werden diese Begriffe inklusive ihrer verschiedenen Definitionen aufgeführt. Es wurde festgestellt, dass je nach Autor unterschiedliche Definitionen zu einzelnen Begriffen bestehen. In den Bemerkungen zu einigen der Begriffe wird daher versucht,

eine allgemeingültige Definition zu liefern. Abgerundet wird die vorliegende Arbeit durch eine Sammlung von Föhnwindnamen aus aller Welt.

Kapitel 2

Messungen

Die vorliegenden Messungen stammen zum grossen Teil aus dem Rhein- und dem Seeztal, welche zu den Hauptföhntälern der Alpen gehören (Fig. 2.1). Eine optimale Verteilung der vielfältigen Messstationen auf dieses Gebiet war entscheidend für das Gelingen von FORM. Einerseits sollte das Messgebiet breit abgedeckt werden. Andererseits hatte man nicht eine unbeschränkte Anzahl von Messgeräten zur Verfügung. Um diesen Umständen und den Fragestellungen gerecht zu werden, kam es zu einer hohen Dichte von Stationen im Raum Sargans (Strömungsaufteilung) und einer möglichst gleichmässigen Verteilung der weiteren Instrumente auf das restliche Gebiet (Beseitigung Kaltluftsee). Dabei musste auf Parallelinstallationen von Messgeräten verzichtet werden.

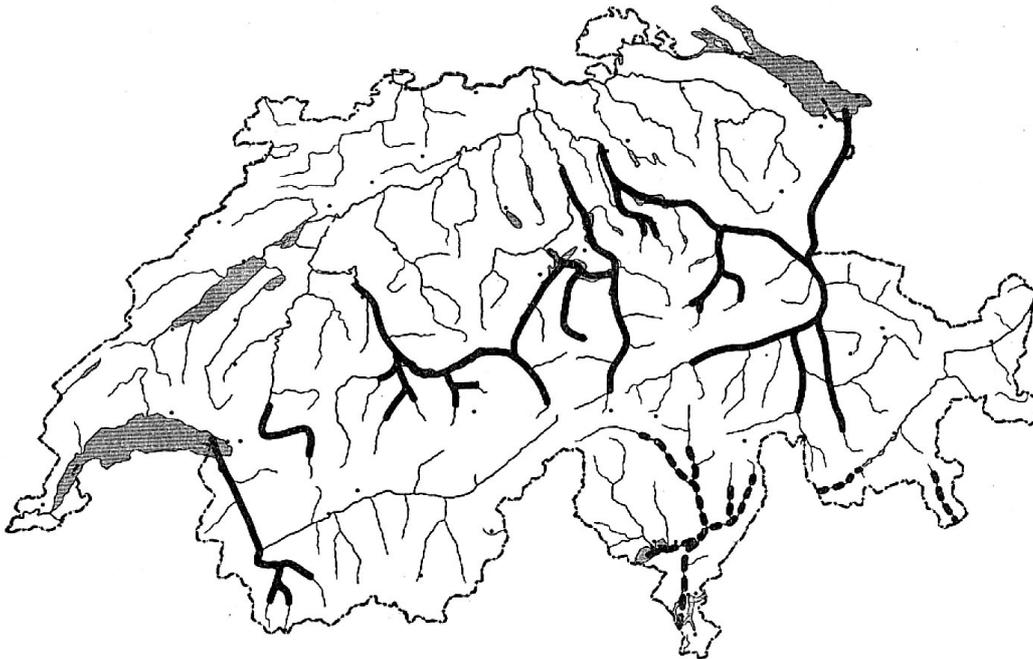


Fig. 2.1: Die Hauptföhntäler der Schweiz (ausgezogen: Südföhntäler, gestrichelt: Nordföhntäler) (aus Schüepp 1950)

2.1 Das Rheintal und das Seeztal

Das Messgebiet erstreckt sich von der Ortschaft Hinterrhein im Süden bis nach Altenrhein im Norden. Im Westen wird das Gebiet durch Quinten und im Osten durch

Lustenau begrenzt (Fig. 2.2). In dieser Region grenzen die Schweiz, Liechtenstein und Österreich an das Rheintal.

Der Vorderrhein und der Hinterrhein fließen auf der Höhe von Reichenau zusammen. Talabwärts erfährt das Rheintal zwei grössere Richtungsänderungen. Zwischen Chur und Landquart ändert die Talrichtung um etwa 100° (WSW auf SE). In der Region Sargans verzweigt sich das Tal in Richtung Westen (Seeztal) und in Richtung Norden (St. Galler Rheintal). Mit einer Distanz von etwa 130 km zwischen Disentis und Bodensee handelt es sich um eine der längsten Föhngassen der Alpen. Sie hat eine Breite von bis zu 10 km. Die wichtigsten Seitentäler sind das Hochtal von Lenzerheide und das Taminatal. Das Hochtal mündet bei Chur und das Taminatal bei Bad Ragaz in das Rheintal.

Im Rheintal wird, neben der immer wichtiger gewordenen Industrie, vor allem Landwirtschaft betrieben. Hierzu bemerkte Hammer (1973), dass das Rheintal klimatisch dank dem Auftreten warmer Föhnwinde einen günstigen thermischen Einfluss genießt, der sich unter anderem darin zeigt, dass der Mais in der Regel vorzüglich gedeiht und sich der Weinbau an den sonnigen Lagen eines ausgezeichneten Rufs erfreut.

Wald ist vor allem an den Hängen des Tales zu finden, während der Talboden meist nur entlang von Gewässern bewaldet ist. Grössere industrielle Zonen gibt es in der Region von Chur und nahe dem Bodensee. In diesen Gebieten ist das Rheintal auch jeweils am stärksten bevölkert.

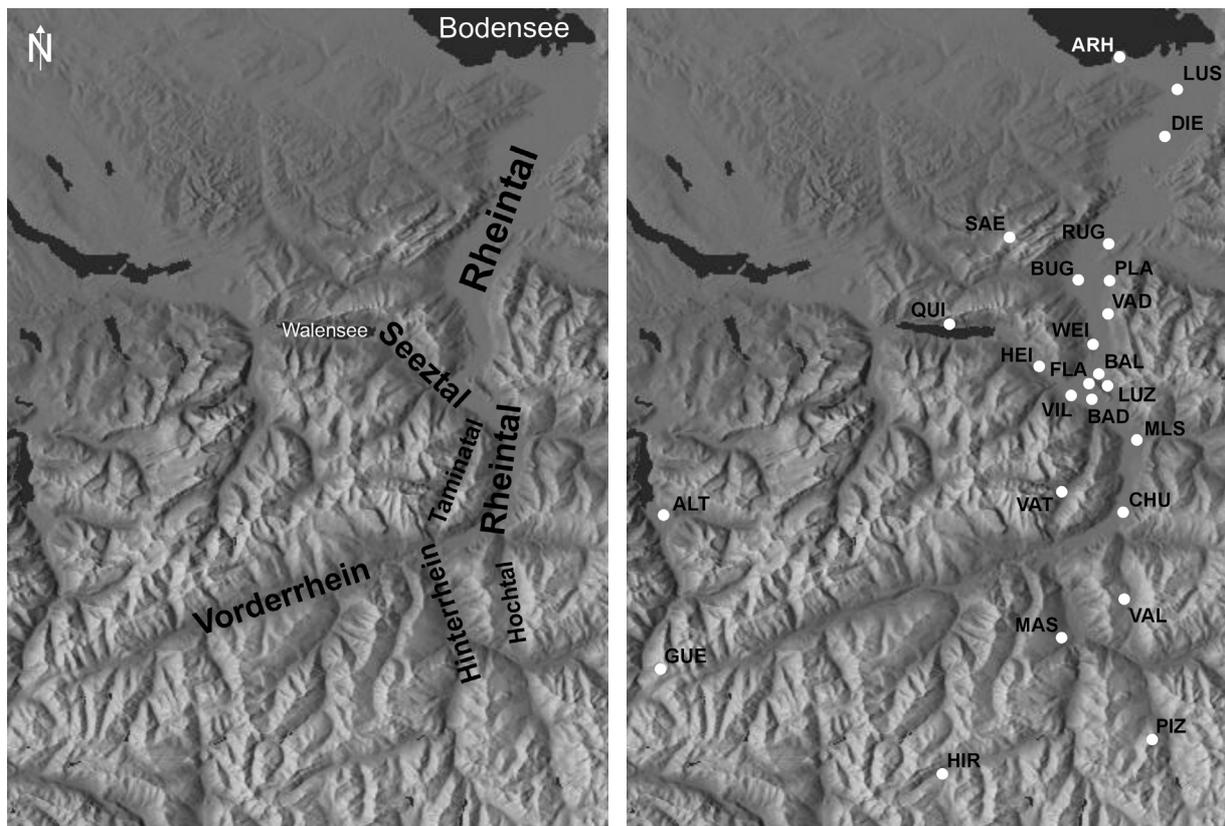


Fig. 2.2: Links: Das Messgebiet mit der Bezeichnung der wichtigsten Täler und Gewässer / Rechts: Karte mit den Stationen. (Karte © Bundesamt für Landestopographie, Schweiz)

2.2 Bodenstationen

Im Rheintal existierte bereits vor MAP ein relativ dichtes Netz von etwa 40 Bodenstationen. Der Betrieb dieser Stationen wird von privaten (z.B. Meteomedia) und nationalen Wetterdiensten (z.B. MeteoSchweiz) sichergestellt. Während der MAP-SOP waren im Rheintalgebiet insgesamt über 50 Stationen im Einsatz, wobei über 20 im Rahmen dieser Arbeit ausgewertet wurden. Für eine exakte Bestimmung der Föhnfälle und eine Beschreibung der grossräumigen Wetterlage betrachtete man zusätzlich Güttsch (Gotthardgebiet), Altdorf, Zürich und Locarno.

2.2.1 ANETZ

Beim ANETZ handelt es sich um das Automatische Meteorologische Netz der Meteo-Schweiz. Insgesamt waren zum Zeitpunkt der Messungen 72 Bodenstationen in der Schweiz im Einsatz (MeteoSchweiz 1980 und 1985). Acht dieser Stationen (Tab. 2.1) wurden in die vorliegenden Betrachtungen einbezogen.

Im ANETZ werden je nach Bedürfnis an den Stationen alle 10 Minuten (einige Messwerte nur stündlich) zwischen 10 und 20 meteorologische Grössen gemessen. Für die Föhnauswertungen betrachtete man die Parameter Temperatur, Feuchte, Wind (Richtung, Geschwindigkeit und Böenspitze) und Druck. Ausser dem Druck sind alle Parameter mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten verfügbar. Der Druck ist jeweils als Momentanwert für den Zeitpunkt XX:40 UTC vorhanden.

Für die Temperatur- und die Feuchtemessung wird das THYGAN (Thermo-Hygro-meter ANETZ) der Firma Meteolabor eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein ventiliertes, geheiztes Thermometer, kombiniert mit einem Taupunktspiegelhygro-meter. Die Lufttemperatur wird mit einem schnell reagierenden ventilierten Thermofühler erfasst. Das THYGAN misst alle 10 Minuten in der 9. Minute während 40 Sekunden etwa 10 Einzelwerte und bildet aus diesen den Durchschnittswert der Lufttemperatur. Mit der Standardabweichung wird die Qualität der Messung kontrolliert. Der Messfühler für die Temperatur ist ein Thermoelement aus Kupfer-Konstantan. Der Messbereich liegt zwischen -50°C und $+50^{\circ}\text{C}$. Die Temperaturen werden mit einer Auflösung von 0.1 K gemessen. Es wird automatisch zwischen Eis- und Wasserbelag auf dem Spiegel unterschieden und entsprechend in der Berechnung der relativen Feuchte berücksichtigt.

Ausser bei den Bergstationen (Güttsch, Säntis) wird für die Windmessung ein Lambrecht Rotationsanemometer 14512 eingesetzt. Mittels einer Windfahne wird die Windrichtung und mittels eines dreiarmligen Schalensterns die Windgeschwindigkeit gemessen. Der Messbereich liegt zwischen 0 und 35 m/s, wobei die Anlaufgeschwindigkeit 1 m/s beträgt. Auf den Bergstationen sind geheizte Windmesser der Firma SIAP im Einsatz. Auch hier wird für die Windrichtung eine Windfahne benutzt. Ein Pitotrohr (Staudruckmessung) misst die Windgeschwindigkeit. Dieser Windmesser wird seit Beginn des ANETZ bis heute auf Bergstationen eingesetzt.

Beim Druckmessgerät handelt es sich um ein thermisch stabilisiertes Barometer GB-1 der Firma Meteolabor. Die Messung geschieht mittels einer Aneroiddose. Die Messeinheit ist luftdicht gebaut und über eine Schlauchleitung mit der Aussenluft verbunden. Der Messbereich des Gerätes liegt je nach Gerät und Höhenlage zwischen 630 hPa und 1'060 hPa. Die absolute Genauigkeit mit Heizung über den

vollen Temperatur- und Spannungsbereich beträgt ± 0.2 hPa, bei einer Auflösung von mindestens 0.03 hPa. Die Dauer eines Messzyklus liegt zwischen 3 und 4 Sekunden.

Station	Name / Ort	Koordinaten	km-Koordinaten	Höhe [m.ü.M.]
ALT	Altdorf	46° 52' / 08° 38'	690 960 / 191 700	449
CHU	Chur	46° 52' / 09° 32'	759 460 / 193 170	555
GUE	Gütsch	46° 39' / 08° 37'	690 140 / 167 590	2'287
HIR	Hinterrhein	46° 31' / 09° 11'	733 900 / 153 980	1'611
SAE	Säntis	47° 15' / 09° 21'	744 100 / 234 900	2'490
VAD	Vaduz	47° 08' / 09° 31'	757 700 / 221 700	460
OTL	Locarno	46° 10' / 08° 47'	704 160 / 114 350	366
SMA	Zürich	47° 23' / 08° 34'	685 125 / 248 090	556

Tab. 2.1: Standorte der ANETZ-Stationen (Karte siehe Fig. 2.2).

2.2.2 ENET

Das ENET ist das Automatische meteorologische Ergänzungsnetz der Meteo-Schweiz. Total waren zum Zeitpunkt der Messungen 44 ENET-Stationen über die Schweiz verteilt. Sie messen hauptsächlich Windgeschwindigkeit und -richtung an exponierten Stellen (Müller 1995). In der vorliegenden Arbeit wurden vier ENET-Stationen (Tab. 2.2) betrachtet.

Die eingesetzten Messinstrumente entsprechen jenen des ANETZ (Müller 1995). Ausnahmen bilden die Windmesser der Bergstationen (Piz Martegnas). Hier wird ein orthogonaler Staudruckwindmesser Campbell vom Typ PTA-1 benutzt.

Station	Name / Ort	Koordinaten	km-Koordinaten	Höhe [m.ü.M.]
ARH	Altenrhein	47° 29' / 09° 34'	760 525 / 261 525	398
PIZ	Piz Martegnas	46° 35' / 09° 32'	760 250 / 160 550	2'670
QUI	Quinten	47° 08' / 09° 13'	734 850 / 221 275	420
VAL	Valbella	46° 45' / 09° 33'	761 125 / 179 700	1'560

Tab. 2.2: Standorte der ENET-Stationen (Karte siehe Fig. 2.2).

2.2.3 Universität München

Für die SOP wurden vom Meteorologischen Institut der Universität München sechs Bodenstationen (Tab. 2.3) zur Verfügung gestellt. Diese Systeme unterstützten vor allem die Untersuchungen in der Region der Strömungsaufteilung.

Die Windsensoren dieser Stationen stammen von der Firma Siggelkow. Die Auflösung des Windrichtungssensors RITA beträgt 1.4 Grad, wobei die Genauigkeit bei ± 2 Grad liegt. Der Windgeschwindigkeitssensor LISA hat eine Anlaufgeschwindigkeit unter 0.1 m/s, bei einer Auflösung von 0.01 m/s. Der Hersteller des Drucksensors DPA21 ist die Firma Vaisala. Bei einer Genauigkeit von ± 0.3 hPa liefert das Gerät Werte mit einer Auflösung von 0.1 hPa. Die Temperatur- und Feuch-

temessung geschieht über ein elektrisch ventiliertes Aspirations-Psychrometer mit Frankenberger PT100 Messfühler. Die Auflösung liegt bei 0.01 K.

Station	Name / Ort	Koordinaten	km-Koordinaten	Höhe [m.ü.M.]
BAL	Balzers	47° 04' / 09° 30'	756 565 / 214 700	522
FLA	Fläscherberg	47° 02' / 09° 29'	756 200 / 212 225	918
LUZ	Luzisteig	47° 03' / 09° 31'	757 800 / 212 950	550
VAT	Vättis	46° 55' / 09° 27'	753 400 / 198 200	910
VIL	Vilters	47° 02' / 09° 27'	753 450 / 211 000	485
WEI	Weite	47° 06' / 09° 30'	756 440 / 218 000	530

Tab. 2.3: Standorte der Münchner Stationen (Karte siehe Fig. 2.2).

Die Werte werden alle 10 Sekunden gemessen. Die Messintervalle der Stationen können auf eine oder zwei Minuten eingestellt werden. Bei den ausgegebenen Werten handelt es sich jeweils um Mittelwerte über das gewählte Messintervall.

2.2.4 Meteomedia

Das Wettermessnetz der Firma Meteomedia umfasst heute über 300 Stationen in Europa. Für die MAP-SOP wurden die Stundendaten (Temperatur, Feuchte, Windgeschwindigkeit, -richtung und Böigkeit) von 14 Stationen im Gebiet des Rheintales zur Verfügung gestellt. Die genauen technischen Spezifikationen der Messstationen sind nicht bekannt. Trotzdem werden zwei Stationen (Tab. 2.4) in diese Arbeit einbezogen. Denn einerseits helfen sie eine Lücke zwischen Buchs-Grabs und Diepoldsau zu schliessen und andererseits liefert Planken als Nachbarstation von Buchs-Grabs Informationen darüber, ob der Föhn bevorzugt an einer Talflanke allein gegen Norden vorstösst.

Station	Name / Ort	Koordinaten	km-Koordinaten	Höhe [m.ü.M.]
PLA	Planken	47° 11' / 09° 33'	759 800 / 227 850	795
RUG	Ruggell	47° 14' / 09° 32'	758 579 / 233 459	433

Tab. 2.4: Standorte der Stationen der Meteomedia (Karte siehe Fig. 2.2).

2.2.5 HotDog und THYGAN

Ein HotDog ist ein Datenlogger zur Erfassung der Temperatur und Feuchtigkeit. Das Messintervall ist programmierbar zwischen 2 Sekunden und 3 Stunden. Für die MAP-SOP wurde ein Intervall von 10 Minuten gewählt. Der HotDog ermittelt die Temperatur mittels eines NTC-Moduls (NTC: Negative Temperature Coefficient). NTC-Thermistoren sind thermisch empfindliche Halbleiterresistoren, die mit einem Ansteigen der absoluten Temperatur ihren Widerstand verringern. Der Messbereich liegt zwischen -50°C und 140°C. Die relative Feuchtigkeit misst ein Hygromer-C94 der Firma Rotronic. Hier beträgt der Messbereich 0% bis 100%. Die HotDogs kamen an den Radiosondenstationen des Artilleriewetterdienstes in Buchs-Grabs und Heiligkreuz zum Einsatz. Ein weiteres Gerät wurde bei der Klimastation Bad Ragaz installiert (Tab. 2.5).

Beim THYGAN handelt es sich um dasselbe Messgerät, wie es bei den ANETZ-Stationen eingesetzt wird. Die Beschreibung ist oben (Kapitel 2.2.1) zu finden. Die beiden THYGAN gehören zur Standardausrüstung der Radiosondenstationen des Armeewetterdienstes und wurden in Masein und Diepoldsau eingesetzt.

Station	Name / Ort	Koordinaten	km-Koordinaten	Höhe [m.ü.M.]
BAD	Bad Ragaz	47° 01' / 09° 30'	756 880 / 208 375	496
BUG	Buchs-Grabs	47° 11' / 09° 28'	753 580 / 227 900	445
DIE	Diepoldsau	47° 22' / 09° 40'	767 600 / 249 150	411
HEI	Heiligkreuz	47° 04' / 09° 25'	749 500 / 214 180	475
MAS	Masein	46° 42' / 09° 26'	751 980 / 174 575	865

Tab. 2.5: Standorte der HotDogs (Karte siehe Fig. 2.2).

2.2.6 ZAMG

In Lustenau (Tab. 2.6) wurde mit einem Ultrasonic Anemometer USA-1 der Firma Metek in 10 m Höhe der dreidimensionale Windvektor gemessen (Piringer *et al.* 2001). Das USA-1 misst die Windgeschwindigkeit durch Laufzeitmessung von Ultraschallimpulsen auf drei unterschiedlichen Messstrecken (ca. 10 bis 20 cm). Das Gerät kann Windgeschwindigkeiten zwischen 0 und 60 m/s und Temperaturen zwischen -40°C und +60°C messen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles ist abhängig von der Lufttemperatur, jedoch annähernd unabhängig von Druck und Feuchtigkeit. Daher kann diese physikalische Eigenschaft für eine Temperaturmessung der Luft benutzt werden. Dabei handelt es sich um die virtuelle Temperatur. Dank der hohen Auflösung der Windgeschwindigkeitskomponenten und der virtuellen Temperatur ist die Bestimmung des sensiblen Wärmeflusses mittels der Kovarianz möglich. Die Frequenz des USA-1 beträgt 40 kHz.

Die relative Feuchte wurde mittels eines kapazitiven Temperatur- und Feuchte-sensors (Genauigkeit: ±2%; Auflösung: 0.01%) und der Druck mittels eines kapazitiven Druckmessers (Genauigkeit: ±0.5 hPa; Auflösung: 0.1 hPa) gemessen. Beide Geräte waren am USA-1-Mast in 2 m über Grund angebracht.

Station	Name / Ort	Koordinaten	km-Koordinaten	Höhe [m.ü.M.]
LUS	Lustenau	47° 28' / 09° 41'	768 985 / 258 994	410

Tab. 2.6: Standort der Bodenstation des ZAMG (Karte siehe Fig. 2.2).

2.2.7 Meteodat

Meteodat stellte für MAP die Daten der Klimastation in Malans (Tab. 2.7) zur Verfügung. Die Station ist ein Produkt der Firma Markasub und misst Temperatur (Messbereich: -40°C bis +60°C; Genauigkeit: ±0.3°C), relative Feuchtigkeit (Messbereich: 0% bis 100%; Genauigkeit: ±1%) und Wind (Richtung, Geschwindigkeit und Böen-spitze; Messbereich: 1.0 m/s bis 60 m/s; Genauigkeit: ±0.3 m/s (Geschwindigkeit), ±3° (Richtung)).

Station	Name / Ort	Koordinaten	km-Koordinaten	Höhe [m.ü.M.]
MLS	Malans	46° 58' / 09° 34'	761 240 / 204 300	533

Tab. 2.7: Standort der Bodenstation von Meteodat (Karte siehe Fig. 2.2).

2.2.8 Stationen Brandnertal

Durch die Universität Wien wurden Messungen im Brandnertal durchgeführt. Spatzierer (2002) verglich mit Hilfe dieser Stationen die Föhnströmung im Rheintal mit der Föhnströmung im Brandnertal.

Name / Ort	Koordinaten	Höhe [m.ü.M.]
Bürseberg	47° 08' / 09° 47'	985
Brand-Nesler	47° 07' / 09° 45'	1'011
Brand-Innerdorf	47° 06' / 09° 44'	1'022
Schattenlagantalpe	47° 05' / 09° 44'	1'369
Talstation	47° 04' / 09° 45'	1'565
Lünersee	47° 04' / 09° 45'	1'979



Tab. 2.8: Standorte der Bodenstationen im Brandnertal

Fig. 2.3: Karte mit den Stationen im Brandnertal (aus Spatzierer, 2002 / Karte © Bundesamt für Landestopographie, Schweiz).

2.3 Radiosondierungen

Im Rahmen von FORM kamen gleichzeitig bis zu 9 Radiosondenstationen zum Einsatz. Die militärischen Stationen vom Typ P-763, in Malans, Buchs-Grabs und Heiligkreuz, sowie die Stationen vom Typ P-760 in Diepoldsau und Masein wurden für Auswertungen in dieser Arbeit ausgewählt (Tab. 2.9). Beide Anlagen, P-760 und P-763, sind ein Produkt der Firma Meteolabor.

Station	Name / Ort	Koordinaten	km-Koordinaten	Höhe [m.ü.M.]
MLS	Malans	46° 59' / 09° 35'	762 425 / 204 375	533
BUG	Buchs-Grabs	47° 11' / 09° 28'	753 580 / 227 900	445
HEI	Heiligkreuz	47° 04' / 09° 25'	749 500 / 214 180	475
DIE	Diepoldsau	47° 22' / 09° 40'	767 600 / 249 150	411
MAS	Masein	46° 42' / 09° 26'	751 980 / 174 575	865

Tab. 2.9: Standorte der Radiosondenstationen im Rheintal (Karte siehe Fig. 2.2).

Beim P-760 handelt es sich um eine Hochaufstiegsanlage des Schweizerischen Armeewetterdienstes, welche der automatischen Vermessung und Verfolgung von meteorologischen Ballonsonden dient. Mit der Schweizer Radiosonde SRS-400 (Hoegger *et al.* 1989, Richner 1999) werden abhängig von der Höhe Druck (Wasser-Hypsometer; Richner *et al.* 1996), Temperatur (Kupfer-Konstantan-Thermoelement) und Feuchtigkeit (Karbonelement) gemessen. Ein Sekundärradar verfolgt die Sonde zur Berechnung des Windes. Die maximale Sondierungshöhe beträgt ca. 35 km bei einer Distanz (Sicht) von 250 km. Die technischen Daten zur SRS-400 sind der Tab. 2.10 zu entnehmen.



Fig. 2.4: Die Empfangs- und Sendeantennen der militärischen Radiosondenanlagen. Links: P-760; Rechts: P-763 (mit angehobener Schutzhaube).

	Druck [hPa]	Temperatur [°C]	Feuchte [%]
Messbereich	1'050 bis 6	-90 bis +50	10 bis 100
Messgenauigkeit	± 2 (Troposphäre) ± 1 (Stratosphäre)	± 0.3	± 2

Tab. 2.10: Technische Angaben zur Sonde SRS-400.

Der P-763 (Schweizer Armee 1993) wird vom Schweizerischen Artilleriewetterdienst eingesetzt. Bei dieser Anlage wird eine Sonde benutzt, mit welcher die Temperatur (Kupfer-Konstantan-Thermoelement) und der Wind gemessen werden kann. Der Messbereich für die Temperatur beträgt -70°C bis $+40^{\circ}\text{C}$, bei einer Messgenauigkeit von $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (bis 6'000 m.ü.M.). Auch diese Sonde wird für die Berechnung des Windes mit einem Sekundärradar verfolgt. Die maximale Sondierungshöhe beträgt etwa 20 km bei einer maximalen Distanz (Sicht) von 70 km.

Station	Name / Ort	Koordinaten	Höhe [m.ü.M.]
MIL	Milano-Linate	45° 26' / 09° 17'	103
MUN	München	48° 15' / 11° 33'	489
STU	Stuttgart	48° 50' / 09° 12'	315

Tab. 2.11: Standorte der Radiosonden-Stationen ausserhalb des Hauptmessgebietes.

Zur Untersuchung grossräumiger Abläufe wurden weiter die Radiosondenstationen Mailand, Stuttgart und München betrachtet (Tab. 2.11). Diese Stationen benutzen Sonden vom Typ VRS80 der Firma Vaisala (Tab. 2.12). Die Windbestimmung geschieht je nach Ausbaustand über GPS oder Sekundärradar.

	Druck [hPa]	Temperatur [°C]	Feuchte [%]
Messbereich	1'060 bis 3	-90 bis +60	0 bis 100
Messgenauigkeit	0.5	0.2 (-50 hPa) 0.3 (50-15 hPa) 0.4 (15 hPa -)	< 3

Tab. 2.12: Technische Daten zur VRS80

2.4 Mikrobarographen

Die ANETZ-Station Vaduz und die ENET-Stationen Quinten und Altenrhein wurden zusätzlich mit Mikrobarographen ausgerüstet. Der Mikrobarograph vom Typ PTB220A ist ein Produkt der Firma Vaisala. Als Messgenauigkeit wird vom Hersteller ± 0.15 hPa angegeben. Die Messfrequenz beträgt 1 Hz. Ziel dieser Messungen war ein Nachweis der Schwerewellen auf dem Kaltluftsee, da diese ein Drucksignal am Boden verursachen.

2.5 Motorsegler Dimona

Die Dimona, ein Motorsegler, wird von der Firma MetAir eingesetzt. Die chemischen und meteorologischen Sensoren des Seglers befinden sich in zwei Flügelbehältern und im Flugzeugrumpf (Neininger *et al.* 2001). Die Reisegeschwindigkeit liegt zwischen 40 und 50 m/s. Die Messauflösung der meteorologischen Parameter variiert zwischen 10 Hz und 0.1 Hz. Es erfolgte eine Integration der Daten zu 1s-Intervallen. Die Bewegung und Orientierung im zur Erde fixierten System wird durch einen GPS-Empfänger gemessen. Die Strömung relativ zum Segler bestimmt man durch differentielle Drucksensoren. Diese 5-Loch-Sonde befindet sich in einem der bereits genannten Behälter, in welchem man auch die Beschleunigung misst. Die Genauigkeit der Windmessung liegt bei etwa 0.5 m/s pro Windkomponente für jede individuelle Messung bei 10 Hz.

Der Motorsegler hatte zur Aufgabe, die Grenzschicht zwischen dem Kaltluftsee und der Föhnströmung zu untersuchen. Zu diesem Zweck führte man so genannte „Delfinflüge“ (Fig. 2.5) durch. Dieses Flugmuster wurde während der MAP-SOP zwei Mal geflogen, einmal kurz nach einem Föhnzusammenbruch (21. Oktober 1999) und einmal kurz vor einem Föhndurchbruch (22. Oktober 1999). Die Messungen sind einmalig und sollen vor allem Aufschlüsse über die Erosion des Kaltluftsees durch den Föhn liefern.

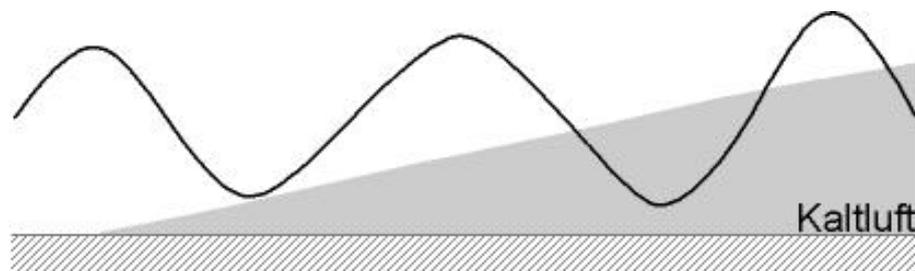


Fig. 2.5: Schematische Darstellung des Delfinfluges (ausgezogene Linie) der Dimona in der Grenzschicht Kaltluft – Föhn.

Kapitel 3

Die Föhnfälle während MAP

Damit eine optimale Untersuchung der während der MAP-SOP aufgetretenen Föhnfälle möglich ist, müssen die exakten Termine des jeweiligen Föhnbeginns und -endes bestimmt werden. Die anschließende Beschreibung der Föhnfälle trägt dazu bei, die Vorgänge vor und während Föhn besser zu verstehen.

3.1 Verfahren zur Identifikation der Föhnfälle

Bereits Gutermann (1970) wies darauf hin, dass sich bei Föhnuntersuchungen das Fehlen einer allgemein anerkannten Föhndefinition nachteilig auswirkt. Dadurch kann nicht in jedem Fall entschieden werden, ob zu einem festen Zeitpunkt an einem bestimmten Ort Föhn herrscht oder nicht. Das Problem einer allgemeinen Föhndefinition wird in Anhang A behandelt. In diesem Kapitel soll darauf eingegangen werden, wie der Föhn an einer Station identifiziert werden kann. Hoinka (1990) sah die Problematik darin, aus den an einer Beobachtungsstation gemessenen und beobachteten Daten im Nachhinein festzustellen, ob an dieser Station Föhn herrschte oder nicht. Dies ist zum Beispiel auch der Grund dafür, dass seit 1906 in Innsbruck ein eigener Föhnkalender geführt wird, welcher vom meteorologischen Beobachter ausgefüllt wird.

Im Laufe der Zeit kam es zu diversen Vorschlägen zur Bestimmung von Föhnfällen. Brinkmann (1971) führte Conrad (1936), Osmond (1941) und Obenland (1956) an, welche den Föhnbeginn durch eine simultane und schlagartige Zunahme der Temperatur und Abnahme der Feuchtigkeit, bei gleichzeitigem Bodenwind vom Bergkamm (Bergwind), definierten.

Ekhart (1949) benutzte für die Bestimmung von Föhnfällen in Innsbruck signifikante Fluktuationen in der Richtung des mittleren Südwindes. Es wurde jedoch vorgeschlagen, dass dieses Kriterium nur in Tälern, welche parallel zum Bergkamm ausgerichtet sind, angewendet wird. Für ein Tal, welches normal zum Bergkamm steht, verwendete Ungeheur (1952) die mittlere Windrichtung zusammen mit einem Schwellenwert der Windgeschwindigkeit von 2 m/s zur Identifikation von Föhnfällen. Für einen Standort nördlich der Alpen wurde weiter ein Böigkeitsfaktor (nach Ekhart 1949: v_{\max}/v_{\min}) von 2.0 zusammen mit einer Temperatur- und Feuchtigkeitsänderung vorgeschlagen (Schlegel 1952).

Truog (1986) legte bei Föhn das Schwergewicht auf den Wind. Daher definierte er den Föhn an einer Station nur über die Windrichtung, -stärke und Böigkeit. Für seine Arbeiten im Reusstal mit dem klassischen Föhn genügte diese Definition. Es kann dabei jedoch zu Verwechslungen mit einem reinen Bergwind kommen, welcher ein ähnliches Bild zeigen kann.

Da der Föhn der Name eines Windes ist, ist Hoinka (1990) der Meinung, sollten Windrichtung oder Windgeschwindigkeit einen brauchbaren Indikator für die Bestim-

mung des Föhns liefern. Es zeigt sich jedoch, dass lediglich die mittlere Strömungsrichtung quer zum Gebirge eine notwendige Bedingung für Föhn darstellt. Hinreichend ist dieses Kriterium jedoch nicht, wie Volkert (1983) nachwies.

Brinkmann (1971) zeigte, dass die Temperatur und zu einem gewissen Teil auch die Feuchtigkeit keine absoluten Kriterien für Föhn sind, da diese von den Bedingungen vor und nach dem Föhn abhängig sind. Daneben nimmt ihre relative Bedeutung während der warmen Jahreszeit und in den niederen Breiten ab. Zusätzlich weist Brinkmann (1971) darauf hin, dass als Resultat des absteigenden Föhns von einer Station auf dem Bergkamm und einer Station im Tal die gleiche potentielle Temperatur Θ gemessen werden muss. Denn Θ verändert sich nicht, wenn kein Wasserdampf kondensiert oder keine Wassertröpfchen verdunsten.

Bei den Kriterien, welche zum grössten Teil für die Bestimmung von Beginn und Ende eines Föhnfalles benutzt werden, handelt es sich um Wind (Richtung, Geschwindigkeit und Böigkeit), Temperatur (Zu- bzw. Abnahme) und relative Feuchtigkeit (Ab- bzw. Zunahme). Seibert (in Kuettner 1982) bemerkte hierzu, dass es natürlich in einigen Fällen nicht genügt, wenn nur diese drei Kriterien betrachtet werden. Zusätzliche Beobachtungen und lokale Erfahrung sind dann notwendig.

Im Rheintal hat sich vor allem Gutermann (1970) und die Arbeitsgruppe Föhnforschung Bodensee-Rheintal (AGF; Burri *et al.* 1999) mit dem Problem der Föhnfallbestimmung auseinandergesetzt. Gutermann (1970) überprüfte die Anwendbarkeit eines statistischen Trennverfahrens für eine objektive Abgrenzung der Föhnbeobachtungstermine. Mit diesem Verfahren führte er eine lokalklimatologische Untersuchung im Rheintal durch. Er konnte zeigen, dass sich für die Abtrennung der Föhnfälle Windrichtung, Windstärke, Temperatur und relative Feuchtigkeit eines Ortes als bestgeeignete Merkmale erweisen. Eine Verwendung grossräumiger Variablen (z.B. Druckgradient Alpensüd-/Alpennordseite) brachte keine Verbesserung. Im Sommer ist ein allgemeiner Rückgang der Trennschärfe festzustellen. Dies war zu erwarten, da in der warmen Jahreszeit die Föhnlagen neben der geringeren Häufigkeit auch weniger ausgeprägt sind. Gutermann (1970) führte weiter an, dass für die Bestimmung der Föhnfälle die Betrachtung der Abweichung der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit zu langjährigen Mittelwerten (Monatswerte) von Vorteil wären.

Die AGF (Burri *et al.* 1999) stellte mesoskalige und lokale Bedingungen auf, um zu bestimmen, ob an einer Station im Rheintal Föhn herrscht oder nicht. Im Süden der Alpen muss der Luftdruck höher sein als im Norden. Weiter muss eine gut gelegene Bergstation (über 2'000 m.ü.M.) in Alpenkammnähe, wenn möglich knapp nördlich davon, Wind mit einer Stärke von mindestens 8 m/s aus dem Sektor Süd aufweisen. Die lokalen Bedingungen sind in Tab. 3.1 aufgeführt.

Als Bergstation wählte die AGF die ANETZ-Station Gütsch ob Andermatt aus. Um auf einen Föhnfall schliessen zu können, soll die Windrichtung zwischen 90° und 240° liegen. Der Grund für die Wahl dieses Sektors liegt in der Ausrichtung des Alpenkammes in diesem Gebiet.

Parameter	Alpental	Flachland	Föhn-Einsatz	Föhn	Föhn-Ende
Windrichtung	Bergwind $\pm 45^\circ$	SW...S...E	muss	muss	e1 *)
Windstärke	≥ 7 m/s	≥ 4 m/s	X	X	e2 *)
Böenspitze	≥ 10 m/s	≥ 6 m/s	X	X	e3 *)
Temperaturänderung	≥ 3 K/h	≥ 3 K/h	X	--	--
Relative Feuchte	< 45% (sinkt bei Einsatz deutlich)	< 55% (sinkt bei Einsatz deutlich)	X	X	steigt deutlich
Anzahl erfüllter Bedingungen (X)	-	-	3 von 4	2 von 3	-

Tab. 3.1: Föhndefinition der AGF. Die Grenzlinie Alpentäler/Flachland verläuft etwa entlang der geologischen Grenze der alpinen Region (Montreux-Thun-Luzern-Rapperswil-Bregenz-Füssen).

*) Entweder e1 oder (e2 und e3) ändern sich (aus Burri *et al.* 1999).

Dass die persönlichen Föhnvorstellungen weit auseinander liegen können, zeigte Gutermann (1970). 14 Meteorologen, Klimatologen oder sonstige Fachleute der damaligen Meteorologischen Zentralanstalt in Zürich bestimmten die Föhntermine des Jahres 1966 in Bad Ragaz.

	Sichere Termine	Eventuelle Termine
Person mit der kleinsten Anzahl	54	48
Mittel der 14 Personen	103	30
Person mit der grössten Anzahl	155	20

Tab. 3.2: Anzahl der von 14 Versuchspersonen subjektiv bestimmten Föhntermine des Jahres 1966 in Bad Ragaz (aus Gutermann 1970)

Das Resultat ist aus Tab. 3.2 ersichtlich. Beim Vergleich der objektiven Beurteilung (statistisches Trennverfahren nach Gutermann 1970) mit der subjektiven Beurteilung zeigte sich, dass die Erfolgswerte bei beiden Verfahren praktisch dieselben waren. Dies trotz des Umstandes, dass beim angewandten Trennverfahren nur drei Föhnmerkmale der Station Bad Ragaz Verwendung fanden, während von den Untersuchungspersonen teilweise weitere Kriterien beigezogen wurden. Folgend sind einige dieser zusätzlichen Kriterien der Untersuchungspersonen aufgeführt:

- Druckgradient Alpensüdseite - Alpennordseite
- Windrichtung und -stärke auf dem Gütsch
- Gleichzeitige Föhntermine in Altdorf
- Temperaturdifferenz Bad Ragaz - Zürich/Kloten

- Allgemeine Wetterlage (Bodenwetterkarte, absolute Topographie des 500 hPa-Niveau)
- Terminbeobachtungen von weiteren Wetterstationen

In der vorliegenden Arbeit wurden die Föhnfälle zuerst mittels strikter Grenzwerte, wie sie die AGF (Burri *et al.* 1999) benutzt, bestimmt. Dieses Vorgehen hat sich als nicht effektiv erwiesen. Die Föhnfälle während der MAP-SOP zeigten bei den verschiedenen Talstationen unterschiedliche Ausprägungen. Zwischen Chur und Sargans sind zum Beispiel die Föhneigenschaften weniger ausgeprägt als im St. Galler Rheintal. Der Grund liegt wohl in der Beimischung von aus den Bündnertälern ausfliessender Kaltluft (Gutermann, 1970). Auch mit zunehmender Höhe nehmen die Auswirkungen auf Temperatur, relative Feuchtigkeit und Wind zum Föhnbeginn und während des Föhns ab. Es konnten also für die Stationen keine einheitlichen Werte benutzt werden, da Grenzfälle sonst nicht erkannt würden.

Benutzt man zum Beispiel auf dem Fläscherberg für die Windrichtung bei Föhn das Kriterium Bergwind $\pm 45^\circ$ können Fehler auftreten. Denn gemäss Gutermann (1970) erfolgt auf dem Fläscherberg während Föhn eine Ablenkung des Windes von SSE auf SE durch die nach Südwesten abfallende Felswand des die Messstation überragenden Hauptgipfels.

Auch die Föhnfälle untereinander können an einer einzelnen Station ein unterschiedliches Bild zeigen. Aufgrund des begrenzten Zeitraumes der Messungen (07.09.1999 bis 15.11.1999) wurde deshalb entschieden, dass für jede Station die Föhnfälle manuell bestimmt werden. Dabei wandte man die folgenden Kriterien für Föhn an einer Station an:

1. Die Druckdifferenz Locarno (LOC) - Zürich (SMA) ist positiv. Diese beiden Stationen wählte bereits Truog (1986), da sie leicht erhöht sind und damit der Effekt eines Kaltluftsees geringer ist.
2. Die Windrichtung bei der ANETZ-Station Gütsch liegt zwischen 90° und 240° . Die Windgeschwindigkeit beträgt gleichzeitig 8 m/s.
3. Der Föhnbeginn ist durch einen Sprung in der Temperatur (Zunahme) und der relativen Feuchtigkeit (Abnahme) erkennbar. Die Windrichtung entspricht der Richtung des Bergwindes. Die Windgeschwindigkeit und die Böigkeit nehmen zu.
Das Zutreffen der Windrichtung ist notwendig und von den restlichen 4 Kriterien müssen 3 erfüllt sein, dies in Übereinstimmung mit der AGF (Burri *et al.* 1999).
4. Ist der Föhnbeginn nicht deutlich durch die genannten Punkte gekennzeichnet, wird die potentielle Temperatur mit der potentiellen Temperatur von bergwärts liegenden Stationen und deren Föhnbeginn verglichen. Bricht der Föhn an der Station durch, muss er die gleiche potentielle Temperatur wie die höher liegenden Stationen (sofern keine Beimischung von Kaltluft aus den Seitentälern erfolgt), bei welchen der Föhn schon durchgebrochen ist, aufweisen.
5. Vergleich der kritischen Fälle mit einem Strahlungstag. Damit kann bei einer Föhnlage erkannt werden, ob es sich um ein normales Bild an einer Station oder um Föhn handelt. Weiter können Bergwinde so erkannt und eliminiert werden.

6. Das Föhnende wird entweder durch eine Abnahme der Temperatur und Zunahme der relativen Feuchtigkeit gekennzeichnet oder der Wind dreht sich. Ein weiteres Kennzeichen ist eine Abnahme der Windgeschwindigkeit und der Böigkeit.

Wie aus dem zweiten Punkt ersichtlich, ist eine Voraussetzung für Föhn im Rheintal, dass sich der Wind an der Station Gütsch innerhalb bestimmter Parameter bewegt. Die Station befindet sich etwa 80 km südwestlich des Rheintals. Trotz dieser westlichen Lage, zeigt ein Vergleich mit anderen Bergstationen, dass die Station Gütsch als bester Indikator für einsetzenden Föhn im Rheintal eingesetzt werden kann.

Station	Daten vom	Daten bis	Datenauflösung	Parameter
Altdorf	06.09.1999	14.11.1999	10'	T, U, FFF, PFF, DDD
Altenrhein	06.09.1999	14.11.1999	10'	T, U, FFF, PFF, DDD
Bad Ragaz	30.09.1999	12.11.1999	10'	T, U
Balzers	06.09.1999	14.11.1999	10'	T, (U), FFF, DDD
Buchs-Grabs	22.09.1999	10.11.1999	10'	T, U
Chur	06.09.1999	14.11.1999	10'	T, U, FFF, PFF, DDD
Diepoldsau	14.09.1999	10.11.1999	10'	T, U
Fläscherberg	06.09.1999	14.11.1999	10'	T, (U), FFF, DDD
Gütsch	06.09.1999	14.11.1999	10'	T, U, FFF, PFF, DDD
Heiligkreuz	18.09.1999	10.11.1999	10'	T, U
Luzisteig	06.09.1999	14.11.1999	10'	T, (U), FFF, DDD
Malans	06.09.1999	14.11.1999	10'	T, U, FFF, PFF, DDD
Masein	14.09.1999	10.11.1999	10'	T, U
Planken	15.09.1999	14.11.1999	60'	T, U, FFF, PFF, DDD
Quinten	06.09.1999	14.11.1999	10'	T, U, FFF, PFF, DDD
Ruggell	15.09.1999	14.11.1999	60'	T, U, FFF, PFF, DDD
Vaduz	06.09.1999	14.11.1999	10'	T, U, FFF, PFF, DDD
Valbella	06.09.1999	14.11.1999	10'	T, U, FFF, PFF, DDD
Vättis	06.09.1999	14.11.1999	10'	T, U, (FFF), (DDD)
Vilters	10.09.1999	14.11.1999	10'	T, (U), FFF, DDD
Weite	06.09.1999	14.11.1999	10'	T, (U), FFF, DDD

Tab. 3.3: Bodenstationen (alphabetisch geordnet), welche zur Bestimmung der Föhnfälle eingesetzt wurden, und die betrachteten Parameter (T: Temperatur; U: Relative Feuchte; FFF: Windgeschwindigkeit; PFF: Böenspitze; Windrichtung). (): Bei diesem Parameter traten längere Datenausfälle auf. Die Station Altdorf wurde zum Vergleich mit den Föhnfällen im Reusstal eingesetzt.

Der Gütsch wurde mit Säntis und Piz Martegnas verglichen. Zum Säntis hat bereits Gutermann (1970) erwähnt, dass der Säntisgipfel zwar häufig bei Föhn in einer

Höhenströmung liegt, welche aber keine oder zumindest nur noch geringe Föhnneigenschaften aufweist. Piz Martegnas und Gütsch zeigen beim Wind ein ähnliches Bild. Beide Stationen sind darum als Indikatoren für einsetzenden Föhn im Rheintal geeignet. In dieser Arbeit entschied man sich für den Gütsch, da diese Station bereits als Indikator für ein weiteres Föhntal, dem Reusstal, eingesetzt werden kann. Mit Hilfe der Station Aldorf wurde der zeitliche Einsatz des Föhns im Reusstal mit dem Einsatz des Föhns im Rheintal verglichen.

Mit dem beschriebenen Verfahren wurden die Föhnfälle im Rheintal während der MAP-SOP bestimmt. Zu diesem Zweck setzte man die in Tab. 3.3 aufgeführten Stationen ein.

Längere Datenausfälle wurden vor allem bei den Münchner Stationen festgestellt. In Balzers, Fläscherberg, Luzisteig und Weite fiel ab 15. Oktober 1999 und in Vilters ab 17. Oktober 1999 die Feuchtemessung aus. Weiter versagte in Vättis zwischen 24. September 1999 und 26. Oktober 1999 die Windmessung.

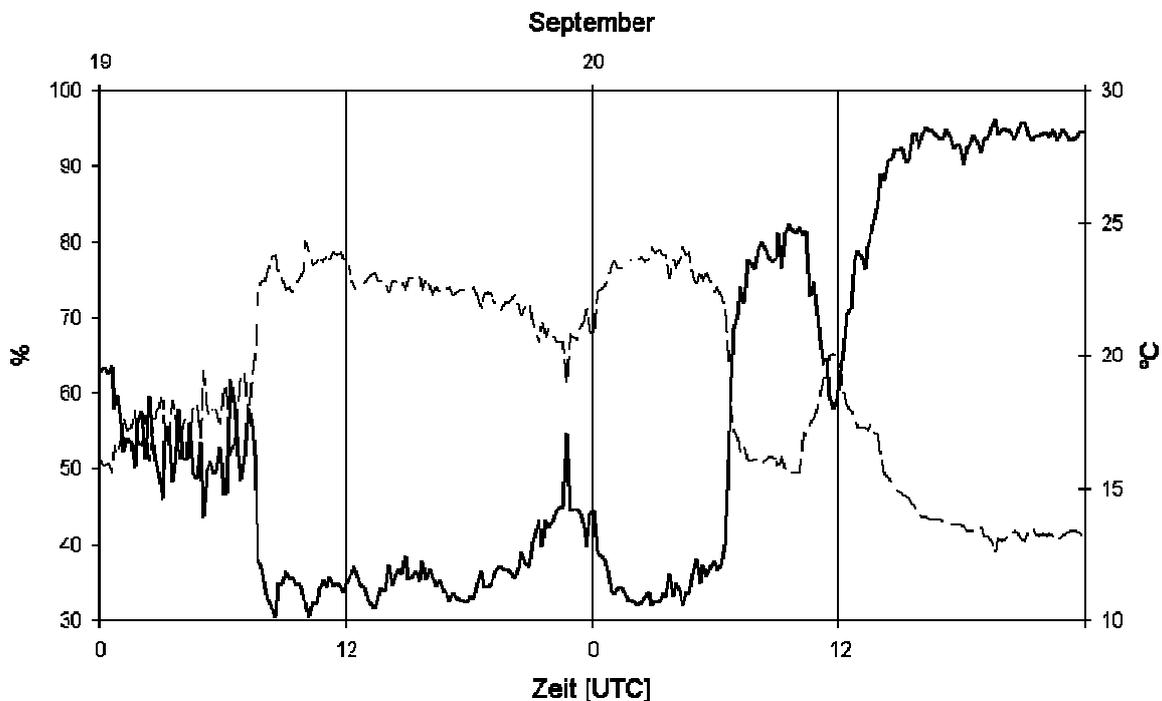


Fig. 3.1: Die relative Feuchtigkeit (ausgezogen) und die Temperatur (gestrichelt) in Vaduz vom 19. September 1999 bis am 20. September 1999.

Das Verfahren zur Bestimmung von Föhnfällen soll anhand eines Föhns zwischen dem 19. September 1999 und 20. September 1999 in Vaduz beschrieben werden. Ab 18.09.1999, 05:00 UTC, bis 20.09.1999, 10:00 UTC, war die Druckdifferenz zwischen Locarno und Zürich positiv. Sie erreichte am 20.09.1999, 00:00 UTC, ihren maximalen Wert von +11.2 hPa. Ab 18.09.1999, 21:10 UTC, war auf der Station Gütsch Wind aus Sektor Süd mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von über 8 m/s zu beobachten. Diese Phase dauerte mit kurzen Unterbrüchen bis am 20.09.1999 um 16:50 UTC. In Vaduz brach der Föhn am 19.09.1999 um 07:40 UTC durch. Der Föhnbeginn ist deutlich an der Temperatur- und Feuchtekurve erkennbar (Fig. 3.1). Gleichzeitig nahm die Windgeschwindigkeit schlagartig zu und der Wind

drehte auf Sektor Süd (Fig. 3.2). So scharf wie der Beginn war dann auch das Ende des Föhns (20.09.1999, 06:30 UTC) gekennzeichnet. Die Temperatur nahm schlagartig ab und die relative Feuchtigkeit stieg wieder an. Zum selben Zeitpunkt nahm die Windgeschwindigkeit ab.

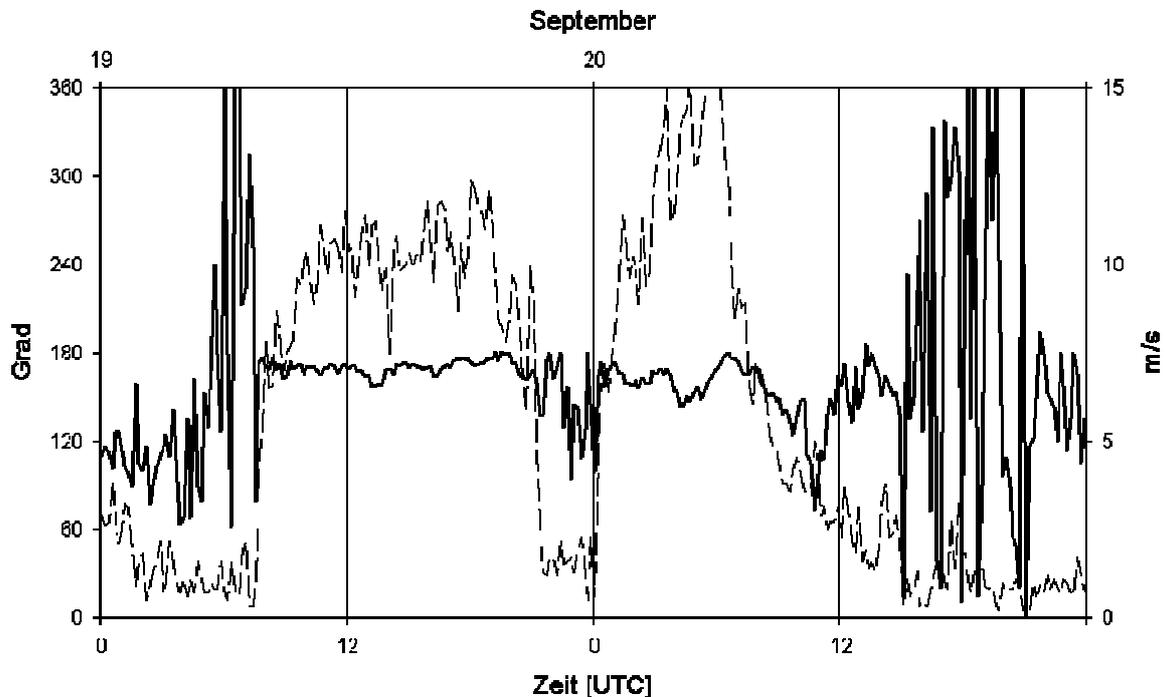


Fig. 3.2: Die Windrichtung (ausgezogen) und die Windgeschwindigkeit (gestrichelt) in Vaduz vom 19. September 1999 bis am 20. September 1999.

In der Nacht auf den 20. September 1999 ist ein kurzer Unterbruch des Föhns erkennbar. Bei einem Vergleich mit Fig. 3.3 und Fig. 3.4 (auf der folgenden Seite), welche typische Strahlungstage zeigen, erkennt man, dass sich der sonst wehende Bergwind durchzusetzen schien. Weiter sieht man, wie an einem Strahlungstag der Einsatz des Bergwindes jeweils einen jähen Anstieg der Temperatur, Abnahme der relativen Feuchte und Zunahme der Windgeschwindigkeit, ähnlich wie bei Föhn, hervorrufen kann.

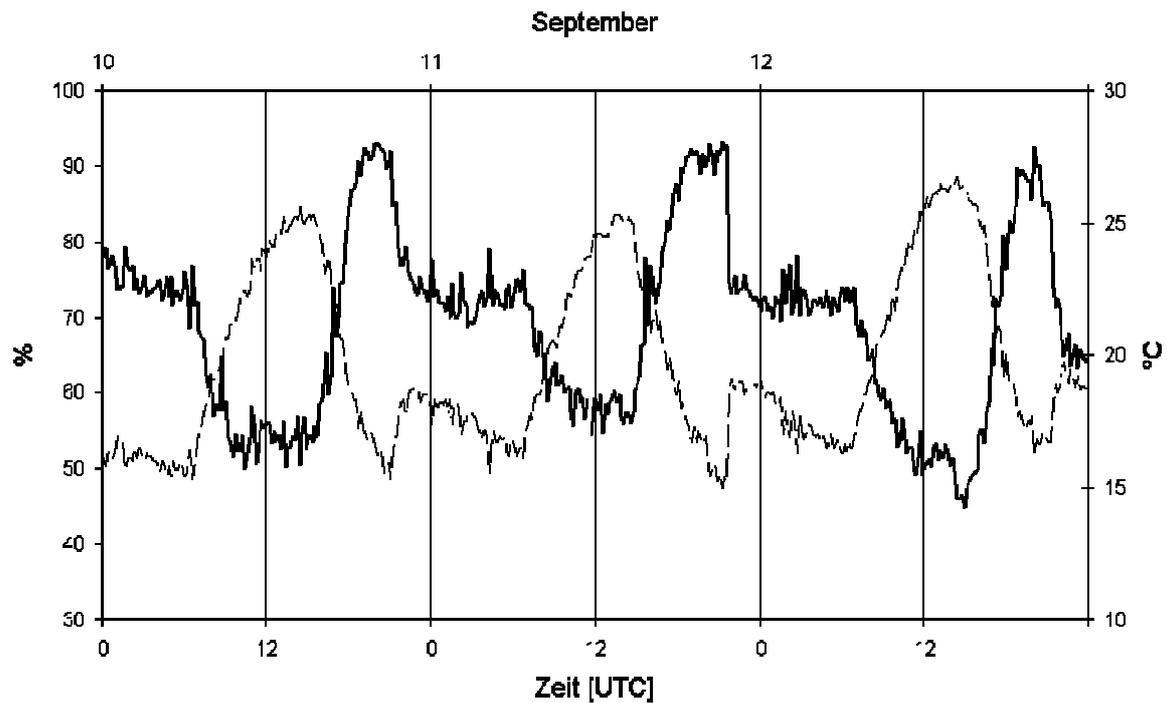


Fig. 3.3: Die relative Feuchtigkeit (ausgezogen) und die Temperatur (gestrichelt) in Vaduz vom 10. September 1999 bis am 12. September 1999.

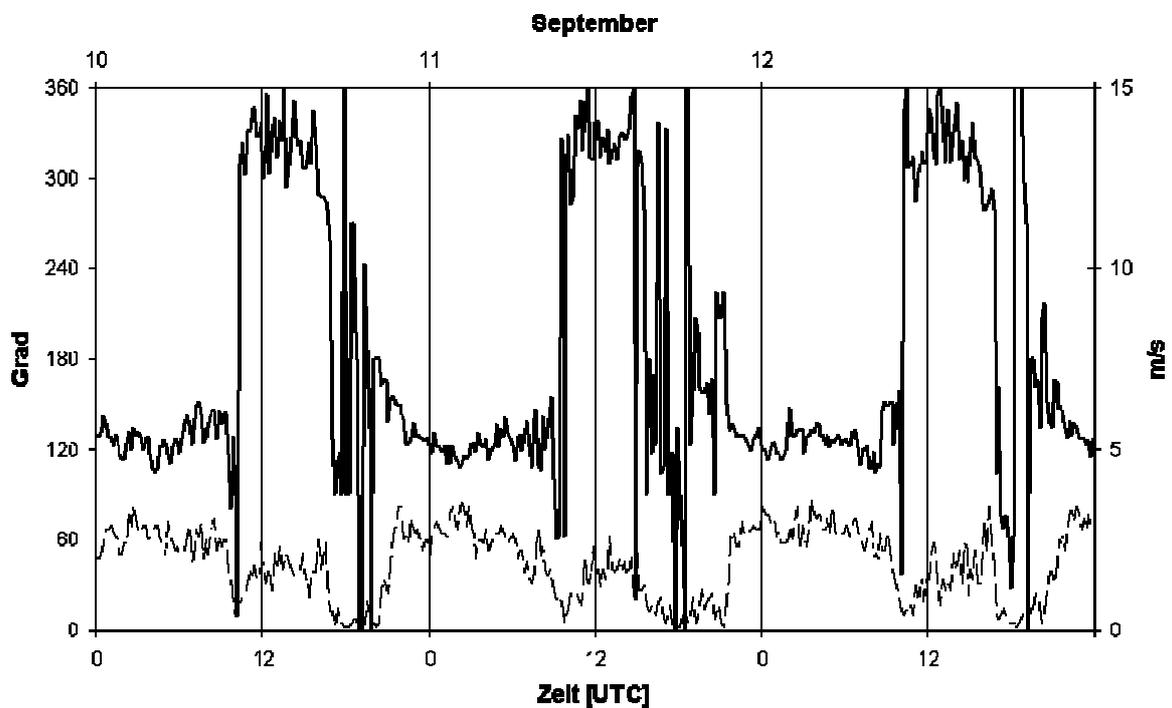


Fig. 3.4: Die Windrichtung (ausgezogen) und die Windgeschwindigkeit (gestrichelt) in Vaduz vom 10. September 1999 bis am 12. September 1999.

3.2 Beschreibung der Föhnfälle

Zur Bestimmung des bestmöglichen Zeitraumes für Föhnereignisse im Rheintal wurde von Steinacker (in Binder *et al.* 1999) das „Strawman Scenario“ entwickelt. Dieses basiert auf einer Auswertung der MAP-Seasons von 1989 bis 1998. Die Auswertungen wurden mit Hilfe der täglichen Wetterkarten der Universität von Berlin (Berliner Wetterkarte, 1989 bis 1998) ausgeführt. Die Berliner Wetterkarte enthält eine sehr gute Übersicht der grossskaligen Wettersituation, die zentrale Europäische Wettersituation, inklusive der Alpenen Regionen, und eine extensive Übersicht von lokalen Beobachtungen, welche sich auf extreme Ereignisse konzentrieren.

Ein Föhnfall wurde ausgewählt, wenn in der hochaufgelösten Wetterkarte eine signifikante Druckdifferenz (etwa 5 hPa, auf Meereshöhe reduziert) quer zu den Alpen vorlag, ohne (seichter Föhn) oder mit (hochreichender Föhn) einer ausgeprägten Südströmung auf Kammhöhe und darüber. Die Resultate dieser Auswertung sind in Tab. 3.4 aufgeführt.

Ø Anzahl Tage (/SOP)	Ø Anzahl Ereignisse	Ø Dauer der Ereignisse	Ø maximales Intervall
16.4	9.0	1.8	22

Tab. 3.4: Zehnjahresstatistik der Föhnfälle im Rheintal für den selben MAP-SOP-Zeitraum im Herbst (Steinacker, in Binder *et al.* 1999). Beschreibung der Tabelle: Ø **Anzahl Tage (/SOP)**: Durchschnittliche Anzahl Tage, an welchen Föhn während der SOP-Perioden der Jahre 1989-1998 auftrat; Ø **Anzahl Ereignisse**: Ein Ereignis ist eine zusammenhängende Periode bei welcher Föhn auftrat; Ø **Dauer der Ereignisse**: Mittelwert der Anzahl Tage durch den Mittelwert der Anzahl Ereignisse; Ø **maximales Intervall**: Mittelwert der maximalen Intervalle in Tagen zwischen zwei Föhnereignissen für die SOP-Perioden der Jahre 1989-1998.

Im Folgenden werden die einzelnen Föhnfälle beschrieben. Dabei wird jeweils zuerst auf die Grosswetterlage eingegangen. Anschliessend werden die Vorgänge im Messgebiet und bei den Bodenstationen beschrieben. Die Darstellung der Grosswetterlagen entstand unter der Mithilfe von Steinacker *et al.* (2001).

Wichtige Eckdaten zu den Föhnfällen sind in den aufgeführten Tabellen zu finden. Dabei ist zu beachten, dass falls der Höchstwert der Druckdifferenz Locarno - Zürich mehrmals erreicht wurde, nur der Zeitpunkt des ersten Erreichens angegeben wird.

3.2.1 Fall 1 (15. September 1999)

Am 14. September 1999 erstreckte sich auf 500 hPa zwischen dem Mittelmeer und Skandinavien ein Hochdruckrücken. Ein schmaler Trog befand sich westlich der Britischen Inseln und erreichte den Norden von Spanien. Vor diesem Trog wurde in einer süd-südwestlichen Strömung warme subtropische Luft in Richtung Zentraleuropa transportiert. Um 12:00 UTC des 15. September 1999 erstreckte sich eine schwache Kaltfront von Gibraltar bis Spitzbergen. Diese lag etwa 200 km westlich des Rheintales. Der Trog auf 500 hPa wurde zur selben Zeit über Frankreich abgetrennt. Die Strömung über den Alpen drehte dadurch auf eine südliche Richtung. Im Zusam-

menhang mit der Kaltfront zog am späten Nachmittag des 15. September 1999 eine Zone mit schwachem Niederschlag vom Südwesten der Schweiz zu den Zentralalpen.

Südlich der Alpen, in Locarno, wurde am 15. September 1999 kein Niederschlag gemessen. Die Sonne schien beinahe durchgehend zwischen 07:00 UTC und 17:00 UTC.

Druckdifferenz Locarno – Zürich		
Positiv		Höchstwert [hPa] / Zeit [UTC]
von [UTC]	bis [UTC]	
12.09.1999 11:00	15.09.1999 23:00	4.7 / 15.09.1999 12:00
Station Gütsch erfüllt Voraussetzungen für Föhn		
von [UTC]		bis [UTC]
15.09.1999 04:00		15.09.1999 18:40
Talföhn		
Beginn / Station		Ende / Station
15.09.1999 07:50 / Valbella		15.09.1999 18:10 / Masein

Tab. 3.5: Eckdaten zum Föhnfall 1

In Luzisteig begann der Föhn zur selben Zeit wie in Valbella (Tab. 3.5). Auf dem Fläscherberg brach der Föhn erst um 8:50 UTC durch. Diese Station lag 400 m höher als Luzisteig und etwa 1.75 Kilometer östlich. Es dauerte eine weitere halbe Stunde bis der Föhn im St. Galler Rheintal in Balzers durchbrach. All diese Durchbrüche geschahen kurz bevor der Föhn auch bei der Station Vilters wehte. Also bevor der Föhn am Boden bis in die Region Sargans vorstieß, wo es zu keiner Strömungsaufteilung zwischen dem Seeztal und dem St. Galler Rheintal kam.

Der Föhnfall dauerte an bis um 18:10 UTC, als auch in Masein der Talföhn endete. Hier ist zu bemerken, dass in Vilters der Föhn über eine halbe Stunde früher als in Balzers aufhörte zu wehen. Nördlich von Vaduz und westlich von Vilters kam es an diesem Tag zu keinem Föhndurchbruch.

3.2.2 Fall 2 (18. bis 20. September 1999)

Ein ausgeprägtes Tiefdruckgebiet befand sich am 18. September 1999 westlich von Irland. Eine bereits okkludierte Front erstreckte sich am 19. September 1999 von Grossbritannien bis nach Spanien. Ausgelöst durch das Tief stellte sich eine Südströmung über Mitteleuropa ein (Fig. 3.5). In den meisten Teilen der westlichen Poebene war an diesem Tag intensiver Niederschlag zu beobachten. Ein zweites Niederschlagsgebiet erstreckte sich vom Osten Frankreichs bis zur Zentralschweiz. Auch in Locarno kam es am 19. September 1999 zu Niederschlägen (über 15 mm).

Das Tiefdruckzentrum verschob sich bis am 20. September 1999 leicht nach Süden und die damit verbundene Kaltfront erreichte am Morgen das Rheintal, was zum Ende dieses Föhnfalles führte.

500hPa Z 1999-09-19 12h, sfc MSL 1999-09-19 12h

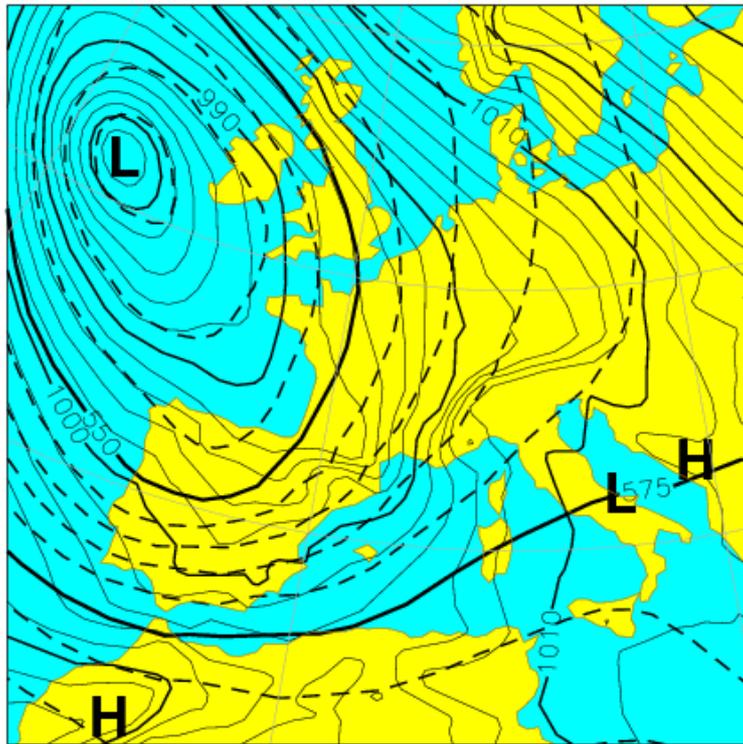


Fig. 3.5: 500 hPa-Niveau am 19. September 1999, um 12:00 UTC

Beachtenswert waren bei diesem Föhnfall die Föhndurchbrüche auf der Linie zwischen Vättis und Balzers. In Vättis brach der Föhn zum ersten Mal am 18. September 1999, um 19:30 UTC, durch. Ab 21:50 UTC kam es dann zu einem Föhnunterbruch von 3 Stunden. Anschliessend brach der Föhn in der folgenden Reihenfolge von Nord nach Süd durch: Balzers (18. September 1999, 22:30 UTC), Luzisteig (19. September 1999, 02:30 UTC) und Fläscherberg (19. September 1999, 07:30 UTC).

Druckdifferenz Locarno – Zürich		
Positiv		Höchstwert [hPa] / Zeit [UTC]
von [UTC]	bis [UTC]	
18.09.1999 06:00	20.09.1999 10:00	11.2 / 20.09.1999 00:00
Station Gütsch erfüllt Voraussetzungen für Föhn		
von [UTC]		bis [UTC]
18.09.1999 21:10		20.09.1999 16:50
Talföhn		
Beginn / Station		Ende / Station
18.09.1999 19:30 / Vättis		20.09.1999 08:10 / Altenrhein

Tab. 3.6: Eckdaten zum Föhnfall 2

Bei diesem Fall hat es sich gezeigt, dass die Bestimmung des Föhneinsatzes vor allem dann problematisch ist, wenn vor dem Durchbruch bereits der Bergwind wehte.

Der Durchbruch ist dadurch in seinen Parametern nicht mehr genau gekennzeichnet und Übergänge sind nicht immer genau erkennbar. Dies galt hier unter anderem für die Station Luzisteig. Der Bergwind begann am 18. September 1999 ab 20:10 UTC zu wehen. Die Temperatur nahm gleichzeitig zu, doch die relative Feuchte blieb ausserhalb der Werte wie sie sonst bei Föhn in Luzisteig beobachtet werden. Ein Grund für die hohen Feuchtwerte könnte auch darin gelegen sein, dass sich mit der Föhnströmung abfliessende Kaltluft vermischte.

In Vaduz kam es zwischen 19. September 1999, 21:20 UTC, und 20. September 1999, 00:00 UTC, zu einem Föhnunterbruch. Die Windstärke nahm ab (auf unter 2.5 m/s), während die Temperatur hoch und die relative Feuchte tief blieben. Aufgrund der Windrichtungen (aus Sektor Ost) ist anzunehmen, dass es sich hier um den Einfluss des Bergwindes handelte.

In Vilters setzte der Föhn erst am 19. September 1999, um 6:40 UTC, ein, acht Stunden später als in Balzers. Es kann also in der Region Sargans wieder nicht zu einer Strömungsaufteilung gekommen sein. Der Föhn reichte im Seetal bis nach Quinten, wo der Föhn früher als in Vilters durchbrach (19. September 1999, 4:30 UTC).

In Altenrhein war einer der seltenen Föhndurchbrüche zu beobachten. Der Einsatz des Föhns erfolgte eine Stunde vor dem südlicher gelegenen Diepoldsau. Dies und die Windrichtung (183°) bei Föhndurchbruch lassen vermuten, dass die Föhnluft nicht aus dem Rheintal stammt, sondern von den direkt nördlich liegenden Bergen in den Talgrund hinunter kommt. Bemerkenswert ist weiter, dass Altenrhein zum Ende des Föhns als letzte Talstation Föhn meldete (Tab. 3.6).

3.2.3 Fall 3 (22. bis 23. September 1999)

Das bereits oben beschriebene Tiefdrucksystem westlich von Irland blieb stationär. Dies führte zu einer Südwestströmung von der Iberischen Halbinsel bis nach Zentral-europa. Die Entwicklung einer schwachen Antizyklone über Sardinien und Sizilien führte zu einem Druckgradienten über den Alpen. Es kam zu einem seichten Föhn im Rheintal. Anschliessend an den Föhn überquerte langsam eine Kaltfront das Rheintal.

Druckdifferenz Locarno – Zürich		
Positiv		Höchstwert [hPa] / Zeit [UTC]
von [UTC]	bis [UTC]	
21.09.1999 00:00	25.09.1999 19:00	6.5 / 22.09.1999 11:00
Station Gütsch erfüllt Voraussetzungen für Föhn		
von [UTC]		bis [UTC]
21.09.1999 06:30		23.09.1999 21:30 (mit Unterbrüchen)
Talföhn		
Beginn / Station		Ende / Station
22.09.1999 07:30 / Valbella		23.09.1999 14:30 Uhr Valbella

Tab. 3.7: Eckdaten zum Föhnfall 3

Auf der Alpensüdseite waren in Locarno am 22. und 23. September 1999 keine Niederschläge zu verzeichnen. Am 23. September 1999, von 12:00 UTC bis 17:00 UTC, kam es zu Sonnenschein.

Die Station Gütsch erfüllte die Voraussetzungen für Talföhn beinahe durchgehend ab 21. September 1999, 10:40 UTC, bis am 23. September 1999, 21:30 UTC. Ab 22. September 1999, 17:30 UTC, lies die Föhnströmung zwischenzeitlich nach, die Windgeschwindigkeiten sanken jeweils auf 6 m/s.

Der Übergang von Bergwind zu Föhn lief am Morgen des 22. September 1999 in Valbella fließend ab. Die Windrichtung (180°) blieb dieselbe, doch bei der Windgeschwindigkeit, der Temperatur und der relativen Feuchte waren zu Beginn des Föhns die typischen Zu- bzw. Abnahmen zu erkennen.

Auf der Linie zwischen Vättis und Balzers kam es am 22. September 1999, zwischen 7:50 UTC und 8:10 UTC, beinahe gleichzeitig an allen Stationen zum Föhndurchbruch. Föhn konnte bei diesen Stationen bis in den Mittagsstunden des 23. September 1999 gemessen werden, wobei es in den Nachtstunden zu einer Abschwächung und teilweisem Aussetzen des Föhns kam. Dies war auch durchwegs bei allen anderen Stationen zu beobachten.

Zwischen dem Churer Rheintal und dem Seetal setzte der Föhn am 22. September 1999, um 8:20 UTC gleichzeitig in Malans und in Quinten ein. An den Stationen Vilters und Heiligkreuz, welche zwischen Malans und Quinten liegen, brach der Föhn beinahe drei Stunden später, zwischen 11:10 UTC und 11:20 UTC durch. Auch diese Föhndurchbrüche geben einen Hinweis auf eine mögliche Strömungsaufteilung in der Region Sargans, da wie oben gesehen, der Föhn im St. Galler Rheintal wieder früher einsetzte. Am 23. September 1999 war dann im Churer Rheintal ab Malans Richtung Seetal kein Föhn mehr zu beobachten.

In Masein kam es bei diesem Fall zu keinem Föhndurchbruch. Am 22. September 1999 erkennt man in der Mittagsondierung, dass der Wind bis 200 m über Grund aus Sektor Nord blies. Erst ab dieser Höhe drehte der Wind auf Sektor Süd. Auch die Bodenwinddaten während beider Tage zeigen beinahe keinen Wind.

3.2.4 Fall 4 (30. September 1999)

Verglichen zu den vorhergehenden Fällen hatte sich die zonale Strömung verstärkt. Dies führte zu einer Erhöhung der Verlagerungsgeschwindigkeit der eingebetteten Tröge. Einer dieser Tröge bewegte sich vom 30. September 1999, 00:00 UTC, bis am 1. Oktober 1999, 00:00 UTC, von den Britischen Inseln nach Zentraleuropa. Vor der dazugehörigen Kaltfront kam es zu einer kurzen Föhnperiode.

Im Süden des Rheintales startete am 30. September 1999 um etwa 9:00 UTC der Niederschlag und dauerte bis zum frühen Abend. Im nördlichen Teil kam es nur nach Mittag zu drei Stunden Regen.

In Locarno konnte man am 30. September 1999 leichten Niederschlag messen und es war während des ganzen Tages kein Sonnenschein zu verzeichnen.

Wiederum begann dieser Föhnfall am 30. September 1999 auf der Linie zwischen Vättis (3:20 UTC) und Balzers (8:00 UTC), wobei in Balzers nur dieser eine Föhntermin um 08:00 UTC gemessen wurde. Der Föhn drang im Churer Rheintal nicht weiter als bis Chur vor, wo der Föhn erst ab 9:40 UTC während 40 Minuten blies. Bei diesem Fall kam es übrigens zu keinem Föhndurchbruch in Altdorf.

Druckdifferenz Locarno – Zürich		
Positiv		Höchstwert [hPa] / Zeit [UTC]
von [UTC]	bis [UTC]	
29.09.1999 03:00	30.09.1999 12:00	6.3 / 30.09.1999 04:00
Station Gütsch erfüllt Voraussetzungen für Föhn		
von [UTC]		bis [UTC]
29.09.1999 07:50		30.09.1999 12:20
Talföhn		
Beginn / Station		Ende / Station
30.09.1999 03:20 / Vättis		30.09.1999 12:50 / Valbella

Tab. 3.8: Eckdaten zum Föhnfall 4

3.2.5 Fall 5 (2. bis 3. Oktober 1999)

Nach dem Durchzug der Kaltfront vom 30. September 1999 führte am 1. Oktober 1999 in der mittleren und der oberen Troposphäre ein „Cut-off“ über der Adria zu einer westlichen Strömung über den Alpen. Ein neuer Trog baute sich westlich der Britischen Inseln auf und verlagerte sich nach Osten. Dabei wurde die troposphärische Strömung über den Alpen nach Südwest abgelenkt. Eine Kaltfront bewegte sich vom Süden Englands her zu den Alpen. Die Kaltfront erreichte das Rheintal in den frühen Morgenstunden des 3. Oktober 1999. Am 2. Oktober 1999 waren in Locarno im Verlauf des Tages schwache Niederschläge zu messen, welche dann am 3. Oktober 1999 an Stärke zunahmen.

Wieder brach der Föhn am 2. Oktober 1999, um 05:00 UTC, zuerst in Vättis durch. Dabei nahm innerhalb von 10 Minuten die Temperatur um über 4°C zu und die relative Feuchtigkeit sank im gleichen Zeitraum von 83% auf 56%. Kontinuierlich arbeitete sich dann der Föhn im St. Galler Rheintal Richtung Norden vor, bis er um 19:00 UTC auch in Ruggell durchbrach. Es wurde jedoch kein Föhn in Planken gemessen, welches weiter südlich als Ruggell liegt.

Druckdifferenz Locarno – Zürich		
Positiv		Höchstwert [hPa] / Zeit [UTC]
von [UTC]	bis [UTC]	
01.10.1999 22:00	03.10.1999 07:00	6.8 / 02.10.1999 15:00
Station Gütsch erfüllt Voraussetzungen für Föhn		
von [UTC]		bis [UTC]
01.10.1999 21:20		03.10.1999 11:20
Talföhn		
Beginn / Station		Ende / Station
02.10.1999 05:00 / Vättis		03.10.1999 03:20 / Fläscherberg

Tab. 3.9: Eckdaten zum Föhnfall 5

In Bad Ragaz brach der Föhn am 2. Oktober 1999, um 7:40 Uhr, durch und es vergingen anschliessend beinahe neun Stunden bis der Föhn in Vilters (16:20 UTC) durchbrach. Es dauerte weitere 30 Minuten und der Föhn blies auch in Heiligkreuz. Quinten verzeichnete an diesem Tag keinen Föhn.

In Bad Ragaz endet der Föhn am 3. Oktober 1999, um 02:30 Uhr. Ab 2. Oktober 1999, 18:40 UTC, nahm jedoch die relative Feuchte bereits leicht zu (auf ca. 54%), was auf abfliessende Kaltluft hinweisen könnte, welche sich mit der Föhnluft vermischte.

3.2.6 Fall 6 (18. Oktober 1999)

Am 18. Oktober 1999 wurde die Situation im ganzen MAP-Gebiet durch eine Warmfront, welche in der südöstlichen Strömung vor einem Tiefdrucksystem über der Iberischen Halbinsel eingebettet war, dominiert. In höheren Schichten führte ein über Osteuropa liegendes Tiefdruckzentrum weiterhin Luft aus Norden in Richtung der Alpen. Die höchste Druckdifferenz am 18. Oktober über den Alpen betrug, zwischen 13:00 UTC und 15:00 UTC, 3.3 hPa. Der tiefste Druck war im oberen Rheintal zu finden. Dies führte zu drei verschiedenen Schichten über dem Rheintal: Zwischen dem Talgrund und etwa 850 hPa (~1'500 m.ü.M.) herrschte eine kalte Nordströmung. Darüber befand sich bis auf etwa 700 hPa (~3'000 m.ü.M.) eine kanalisierte Föhnströmung. Diese wurde dann durch eine westliche/nordwestliche Strömung begrenzt.

In Locarno kam es am 18. Oktober 1999 zu keinem Niederschlag, aber auch Sonnenschein war nicht zu verzeichnen.

Druckdifferenz Locarno – Zürich		
Positiv		Höchstwert [hPa] / Zeit [UTC]
von [UTC]	bis [UTC]	
18.10.1999 01:00	25.10.1999 13:00	3.3 / 18.10.1999 13:00
Station Gütsch erfüllt Voraussetzungen für Föhn		
von [UTC]		bis [UTC]
17.10.1999 23:40		19.10.1999 01:20
Talföhn		
Beginn / Station		Ende / Station
18.10.1999 09:30 / Valbella		18.10.1999 15:20 / Masein

Tab. 3.10: Eckdaten zum Föhnfall 6

Bei diesem Fall konnte nur in Masein und Valbella eine Föhnströmung beobachtet werden. Im selben Zeitraum zeigte zum Beispiel in Chur keiner der gemessenen Parameter ein Anzeichen von Föhn und der Wind blies aus Sektor Nord.

Weiter ist zu diesem Fall zu bemerken, dass er den Beginn eines längeren Zeitraumes mit vier Föhnfällen markierte. Man beachte dabei die Druckdifferenz zwischen Locarno und Zürich, welche ab dem 18. Oktober 1999, 1:00 UTC, bis am 25. Oktober 1999, 13:00 UTC, positive Werte zeigte (Tab. 3.10).

3.2.7 Fall 7 (19. bis 21. Oktober 1999)

Auch wenn am 19. Oktober 1999 der Druckgradient senkrecht zu den Alpen und die Südströmung in der Schicht zwischen 1'500 und 3'000 m.ü.M. bestehen blieben, kam es nicht zu Föhn im Süden des Rheintals. Auf der Hinterseite des östlichen Troges gelangte am 20. Oktober 1999 in den unteren Schichten Kaltluft über den Balkan bis zur Adria und in die Poebene. Zur selben Zeit näherte sich vom Golf von Biskaya den Alpen ein Höhentief. Die Strömung wechselte von schwach westlich/südwestlich auf stark südlich/südwestlich. Diese Lage dauerte bis am 24. Oktober 1999 an.

Ein Seitentrog überquerte die Alpen zur zweiten Tageshälfte des 21. Oktober 1999 und das entsprechende Höhentief über Italien verursachte ein fast totales Verschwinden der alpenüberquerenden Druckdifferenz und damit einen Föhnunterbruch im Rheintal.

Mit 13.5 hPa konnte am 20. Oktober 1999 um 19:00 UTC die höchste Druckdifferenz zwischen Locarno und Zürich während der ganzen SOP gemessen werden. Ab 20. Oktober 1999, 11:00 UTC, regnete es in Locarno während des ganzen Föhnfalles. Der Föhn erreichte im Seetal Quinten und im St. Galler Rheintal Ruggell.

Druckdifferenz Locarno – Zürich		
Positiv		Höchstwert [hPa] / Zeit [UTC]
von [UTC]	bis [UTC]	
18.10.1999 01:00	25.10.1999 13:00	13.5 / 20.10.1999 19:00
Station Gütsch erfüllt Voraussetzungen für Föhn		
von [UTC]		bis [UTC]
19.10.1999 17:50		23.10.1999 05:10
Talföhn		
Beginn / Station		Ende / Station
19.10.1999 20:10 / Vättis		21.10.1999 15:50 / Chur

Tab. 3.11: Eckdaten zum Föhnfall 7

In Bad Ragaz zeigte sich nicht der übliche Durchbruch des Föhns. Zuerst kam es am 20. Oktober 1999 um 1:40 UTC zu einem ersten Durchbruch, die Temperatur stieg innerhalb von 10 Minuten um 4°C auf 8.3°C und gleichzeitig sank die relative Feuchte auf 64.3% (Fig. 3.6). Bis 6:40 UTC blieben die Temperatur und die relative Feuchte in etwa konstant um dann kontinuierlich anzusteigen, beziehungsweise zu sinken. Der Höhepunkt war um 12:00 UTC erreicht. Danach sank die Temperatur beziehungsweise stieg die relative Feuchte wieder. Am 21. Oktober 1999 setzte ab 05:40 UTC wieder die Erwärmung ein und das definitive Ende des Föhns war um 12:40 UTC zu beobachten. Ähnliche Bilder zeigten sich in Vilters, Fläscherberg, Luzisteig, Balzers und Weite.

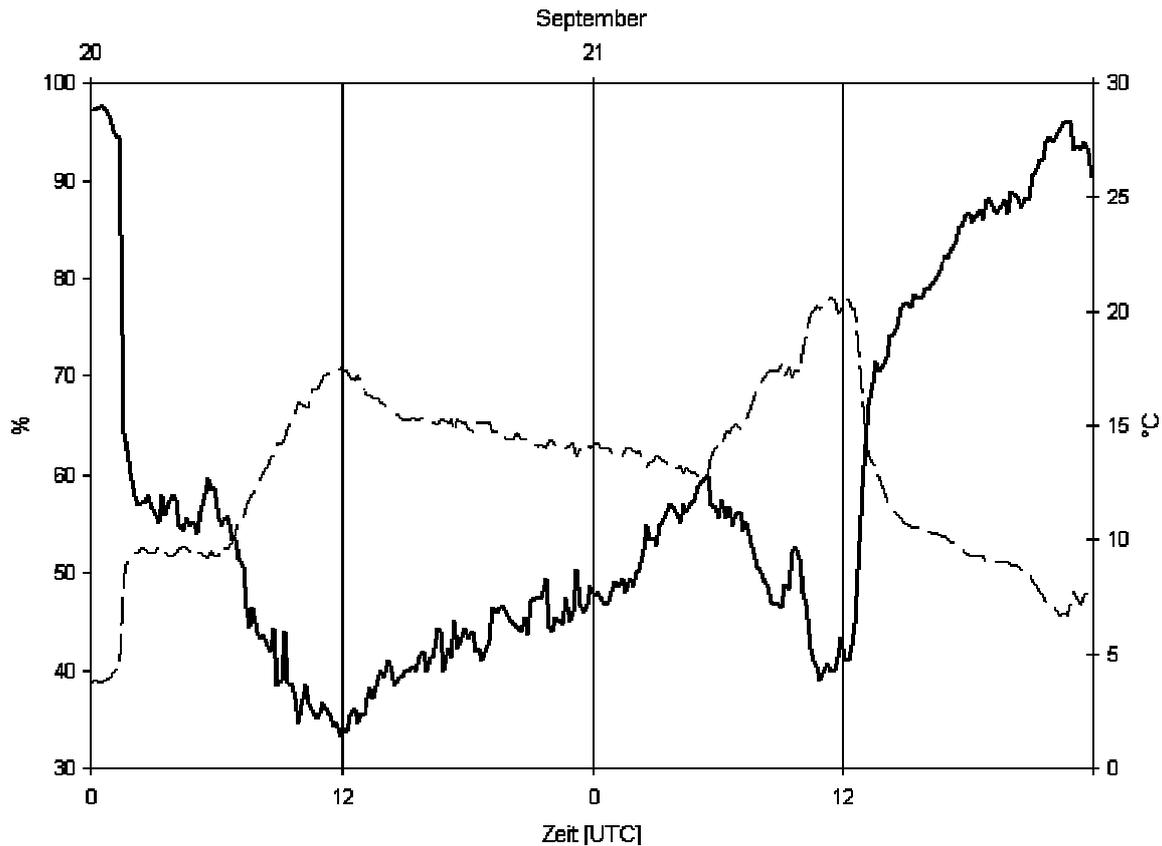


Fig. 3.6: Die relative Feuchtigkeit (ausgezogen) und die Temperatur (gestrichelt) in Bad Ragaz vom 20. Oktober 1999 bis am 21. Oktober 1999.

3.2.8 Fall 8 (22. bis 23. Oktober 1999)

Am 22. Oktober 1999 herrschte auf 500 hPa eine sich verstärkende Südwestströmung vor (Fig. 3.7). Das oben genannte Höhentief bewegte sich schnell nach Südosten und verlor seinen Einfluss auf die Alpen. Der Druckgradient über den Alpen baute sich innerhalb weniger Stunden wieder auf. Eine okkludierte Kaltfront überquerte das Rheintal nach Mitternacht des 23. Oktober 1999 und beendete diesen Föhnfall.

In Locarno regnete es beinahe durchgehend. Eine Regenpause war nur am 22. Oktober 1999 von 13:00 UTC bis 22:00 UTC zu beobachten.

Innerhalb von zwei Stunden arbeitete sich der Föhn bis nach Quinten und bis nach Weite durch die Täler vor. In Luzisteig war beim Föhndurchbruch um 8:10 UTC innerhalb von 10 Minuten ein Temperaturanstieg von 7°C zu verzeichnen. Bei Föhnende am 23. Oktober 1999, um 3:40 UTC, ging dann die Temperatur innerhalb von 20 Minuten um beinahe 6°C zurück. Der Föhn reichte im Norden maximal bis nach Diepoldsau, wo der Föhn mit kurzen Unterbrechungen am 23. Oktober 1999 von 00:00 UTC bis 1:40 UTC wehte.

500hPa Z 1999-10-22 12h, sfc MSL 1999-10-22 12h

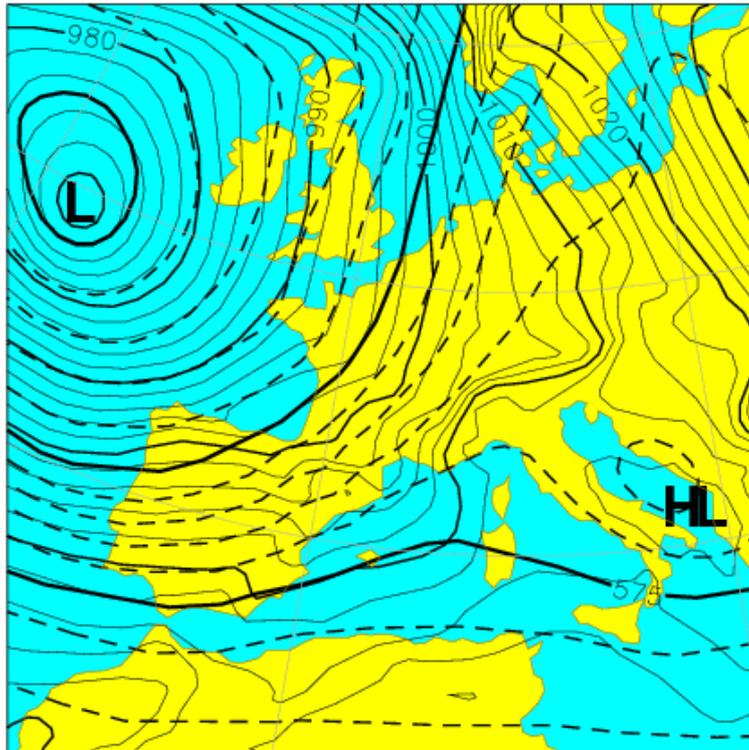


Fig. 3.7: 500 hPa-Niveau am 22. Oktober 1999, um 12:00 UTC

Druckdifferenz Locarno – Zürich		
Positiv		Höchstwert [hPa] / Zeit [UTC]
von [UTC]	bis [UTC]	
18.10.1999 01:00	25.10.1999 13:00	10.7 / 22.10.1999 15:00
Station Gütsch erfüllt Voraussetzungen für Föhn		
von [UTC]		bis [UTC]
19.10.1999 17:50		23.10.1999 05:10
Talföhn		
Beginn / Station		Ende / Station
22.10.1999 07:30 / Vättis		23.10.1999 05:20 / Valbella

Tab. 3.12: Eckdaten zum Föhnfall 8

Am 22. Oktober 1999, um 12:00 UTC, waren auf dem Satellitenbild (Fig. 3.8) nördlich der Alpen sehr gut die wolkenfreien Zonen verursacht durch den Föhn zu erkennen.

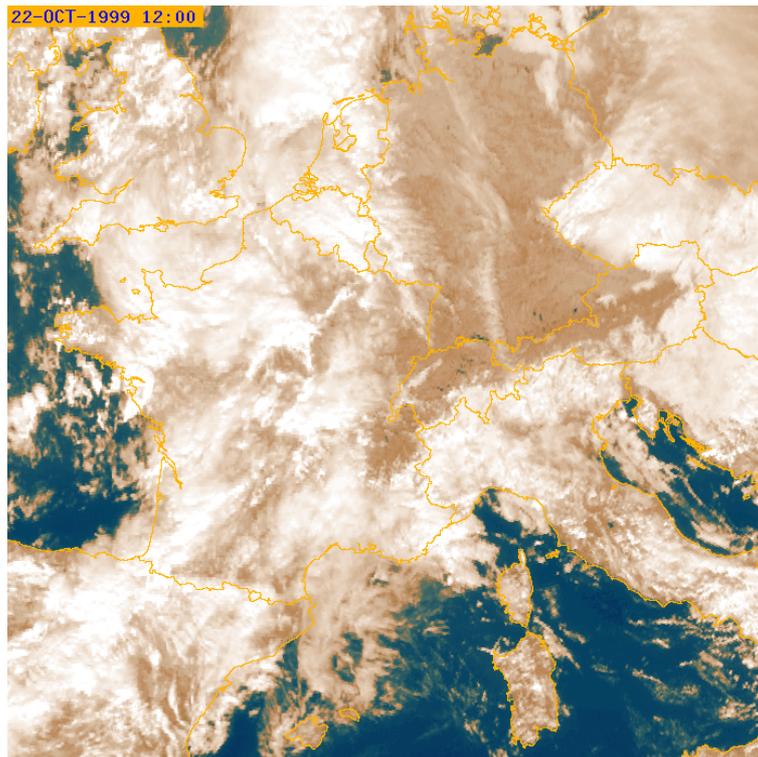


Fig. 3.8: Satellitenbild von Europa am 22. Oktober 1999, 12:00 UTC

3.2.9 Fall 9 (24. Oktober 1999)

Am 24. Oktober 1999 zeigte das Bodendruckfeld einen schwachen Trog verbunden mit einem frontalen Wolkensystem. Auf der Vorderseite eines Tiefdrucksystems, welches sich vom Atlantik näherte, verstärkte sich auf 500 hPa die Strömung wieder und drehte auf Südwest (Fig. 3.9).

Am 24. Oktober 1999 ab 08:00 UTC regnete es in Locarno durchgehend bis am Abend des darauf folgenden Tages.

Alle Stationen meldeten am 24. Oktober 1999 Föhn. In Altenrhein kam es damit während der MAP-SOP zum zweiten Föhndurchbruch. Bemerkenswert ist weiter, dass der Föhn zuerst in Balzers (3:10 UTC) und 10 Minuten später in Quinten durchbricht, bevor bei den südlicher gelegenen Stationen Föhn gemeldet wurde.

Dieser Föhnfall zeichnete sich unter anderem durch seine hohen Windgeschwindigkeiten aus. In Balzers konnte am 24. Oktober 1999, um 10:50 UTC, eine durchschnittliche Windgeschwindigkeit von 18.5 m/s gemessen werden. Die Höchsttemperatur wurde um 16:20 UTC mit beinahe 20°C erreicht. Der Bodendruck betrug zu diesem Zeitpunkt 936 hPa.

In Lustenau (Piringer *et al.* 2001) erreichte der Wind Geschwindigkeiten von 8 bis 10 m/s, die Temperatur lag bei beinahe 20°C bei einer relativen Feuchte von 35%. Der Minimaldruck betrug um 14:00 UTC 949 hPa. Beim abrupten Ende des Föhns um 16:00 UTC drehten die Winde auf Nord und schwächten sich ab. Die Temperatur fiel auf 12°C und die relative Feuchte stieg auf 70%.

500hPa Z 1999-10-24 12h, sfc MSL 1999-10-24 12h

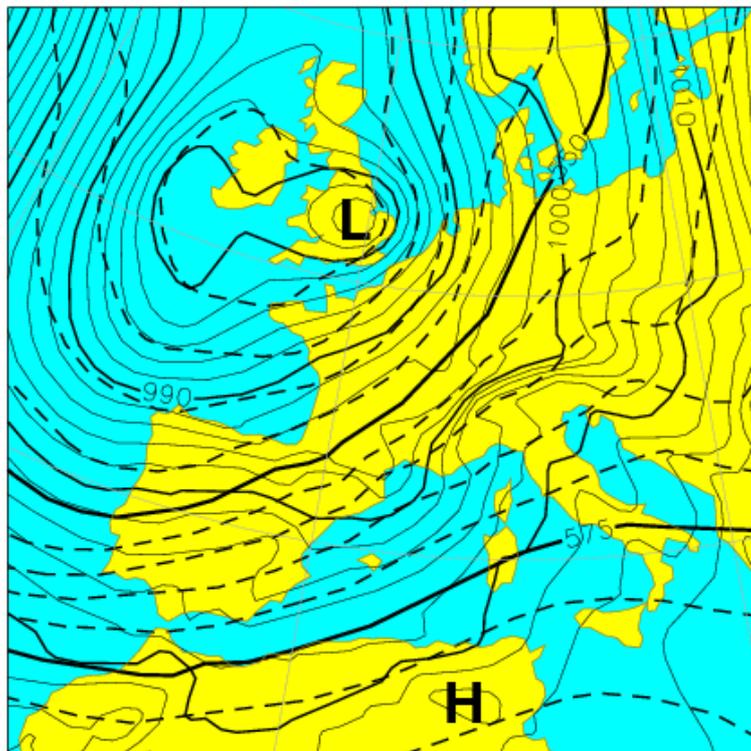


Fig. 3.9: 500 hPa-Niveau am 24. Oktober 1999, um 12:00 UTC

Druckdifferenz Locarno – Zürich		
Positiv		Höchstwert [hPa] / Zeit [UTC]
von [UTC]	bis [UTC]	
18.10.1999 01:00	25.10.1999 13:00	12 / 24.10.1999 14:00
Station Gütsch erfüllt Voraussetzungen für Föhn		
von [UTC]		bis [UTC]
23.10.1999 22:20		26.10.1999 08:10
Talföhn		
Beginn / Station		Ende / Station
24.10.1999 03:10 / Balzers		25.10.1999 01:40 / Vättis

Tab. 3.13: Eckdaten zum Föhnfall 9

3.2.10 Fall 10 (30. bis 31. Oktober 1999)

Am 29. Oktober 1999 strömte vor einem Trog westlich der Iberischen Halbinsel sehr warme Luft vom Nordwesten Afrikas in Richtung Südfrankreich. Ein Teil dieser Luftmassen erreichte die Regionen nördlich der Alpen. In Genf konnte an diesem Tag grosse Mengen von Saharastaub registriert werden. Der Iberische Trog verlagerte sich gegen Nordwesten und vereinigte sich mit dem starken westlichen Jet über dem Nordost-Atlantik. Das Bodendruckfeld wurde durch eine grosse Antizyklone über Osteuropa dominiert. Diese Antizyklone bewegte sich weiter nach Südosten und eine

seichte, südwestliche Strömung setzte über den Alpen ein. Die mit dem Iberischen Tief verbundene Kaltfront erreichte das Rheintal nach Mitternacht des 31. Oktober 1999.

Zwischen 8:00 UTC und 12:00 UTC kam es in Locarno zu wenig Sonnenschein und am Nachmittag zwischen 16:00 UTC und 19:00 UTC zu geringen Niederschlägen.

Bemerkenswert an diesem Föhnfall waren die hohen Temperaturen. In Balzers lag die Höchsttemperatur bei über 24°C.

Der nördlichste Punkt, welcher der Föhn erreichte, war Diepoldsau, dies acht Stunden nachdem der Föhn im etwa 10 Kilometer entfernten, südlicher gelegenen Ruggell durchgebrochen war. Der Föhn dauerte anschliessend zwei Stunden länger als in Ruggell an.

Im Seetal reichte der Föhn bis Quinten, wobei dort der Föhn erst sehr spät, um etwa 18:00 UTC, einsetzte (in diesem Zeitraum kurzer Datenausfall). Der Föhn benötigte zehn Stunden um von Heiligkreuz bis nach Quinten vorzustossen.

Druckdifferenz Locarno – Zürich		
Positiv		Höchstwert [hPa] / Zeit [UTC]
von [UTC]	bis [UTC]	
29.10.1999 15:00	31.10.1999 05:00	9.0 / 30.10.1999 13:00
Station Gütsch erfüllt Voraussetzungen für Föhn		
von [UTC]		bis [UTC]
30.10.1999 03:10		31.10.1999 01:40
Talföhn		
Beginn / Station		Ende / Station
30.10.1999 06:30 / Fläscherberg		31.10.1999 02:00 / Luzisteig

Tab. 3.14: Eckdaten zum Föhnfall 10

3.2.11 Fall 11 (1. bis 2. November 1999)

Nach der Kaltfront, welche den vorangehenden Föhnfall beendet hatte, bildete sich eine Antizyklone über Zentraleuropa. Diese verlagerte sich rasch nach Osten und erreichte am 1. November 1999 Ungarn. Ein neues Frontensystem bildete sich über dem Golf von Biskaya. Nördlich der Alpen begann der Druck vor der Warmfront zu fallen, was wiederum zu einem alpenüberquerenden Druckgradienten führte. Mit einem Maximum von 5.7 hPa (2. November 1999, 8:00 UTC) zwischen Locarno und Zürich war er stark genug, um einen seichten Föhn herbeizuführen. Der Föhn wurde am späten Nachmittag des 2. November 1999 durch eine Kaltfront beendet. Während der Föhn im Rheintal wehte, wurde südlich der Alpen in Locarno kein Regen gemessen.

Dieser Föhnfall zeigte zwei Phasen. Am 1. November 1999 brach der Föhn zuerst in Valbella durch (5:10 UTC) und erreichte um 9:30 UTC Malans. Zu weiteren Föhn-durchbrüchen kam es in Vättis (8:40 UTC) und auf dem Fläscherberg (11:50 UTC). Am Nachmittag war ab 15:10 UTC im ganzen Messgebiet kein Föhn mehr zu messen. Bei der Station Fläscherberg fiel bei Föhnende innerhalb von 10 Minuten die Temperatur um 5.5 K. Die zweite Phase des Föhns begann am 2. November 1999

zwischen 7:20 UTC und 8:40 UTC als der Föhn wieder im Churer Rheintal und auf dem Fläscherberg durchbrach. In Altdorf brach der Föhn weder am 1. noch am 2. November 1999 durch.

Druckdifferenz Locarno – Zürich		
Positiv		Höchstwert [hPa] / Zeit [UTC]
von [UTC]	bis [UTC]	
31.10.1999 22:00	02.11.1999 21:00	5.7 / 02.11.1999 08:00
Station Gütsch erfüllt Voraussetzungen für Föhn		
von [UTC]		bis [UTC]
31.10.1999 20:50		02.11.1999 16:40
Talföhn		
Beginn / Station		Ende / Station
01.11.1999 05:10 / Valbella		02.11.1999 15:50 / Masein

Tab. 3.15: Eckdaten zum Föhnfall 11

In Vilters und Quinten kam es nie zu einem Föhndurchbruch, jedoch in Heiligkreuz wehte am 2. November 1999 zwischen 7:50 UTC und 10:40 UTC der Föhn. Die Parameter Temperatur, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit zeigten in Vilters und Quinten am 2. November 1999 alle typischen Anzeichen von Föhn, doch der Wind wehte aus Richtung West und nicht aus Richtung Ost wie es bei Föhn an diesen Stationen zu erwarten wäre.

Im St. Galler Rheintal kam der Föhn am 2. November 1999 bis nach Balzers. In Vaduz scheint es, als ob der Föhn am 2. November 1999 ab 0:10 UTC wehte. Doch auch hier kam der Wind nicht aus der üblichen Richtung wie sonst bei Föhn. Der Wind blies zu dieser Zeit aus Osten, was zur Vermutung führt, dass der Bergwind die hohen Temperaturen und tiefen Feuchtwerte mitverursachte.

3.2.12 Fall 12 (5. bis 6. November 1999)

Zwischen dem 4. und dem 6. November 1999 folgte die Leezyklogese dem klassischen Ablauf: Ein ausgeprägter Höhentrog und die dazugehörige Kaltfront verlagerten sich nach Südosten über Zentraleuropa, mit einer Nordströmung auf der westlichen Seite des Höhentrogs und einer ausgeprägten Südströmung an der Ostflanke (Fig. 3.10).

Über dem Osten Frankreichs bildeten sich diverse präfrontale Niederschlagslinien. Die erste zerfiel bevor sie die „Target Area“ erreichte. Die zweite Linie, mit schwachem Niederschlag, verlagerte sich am Abend des 5. November 1999 von der Westschweiz Richtung Osten und überquerte das Rheintal ohne dass der Föhn unterbrochen wurde. Die dritte Linie bewegte sich rasch nach Osten und bedeckte zum Ende des Föhns in den frühen Morgenstunden des 6. November 1999 fast das ganze Schweizer Mittelland.

Im Süden der Alpen kam es am 5. und 6. November 1999 immer wieder zu Niederschlägen. Die Niederschlagsmenge betrug an diesen beiden Tagen zusammen über 50 mm.

500hPa Z 1999-11-06 12h, sfc MSL 1999-11-06 12h

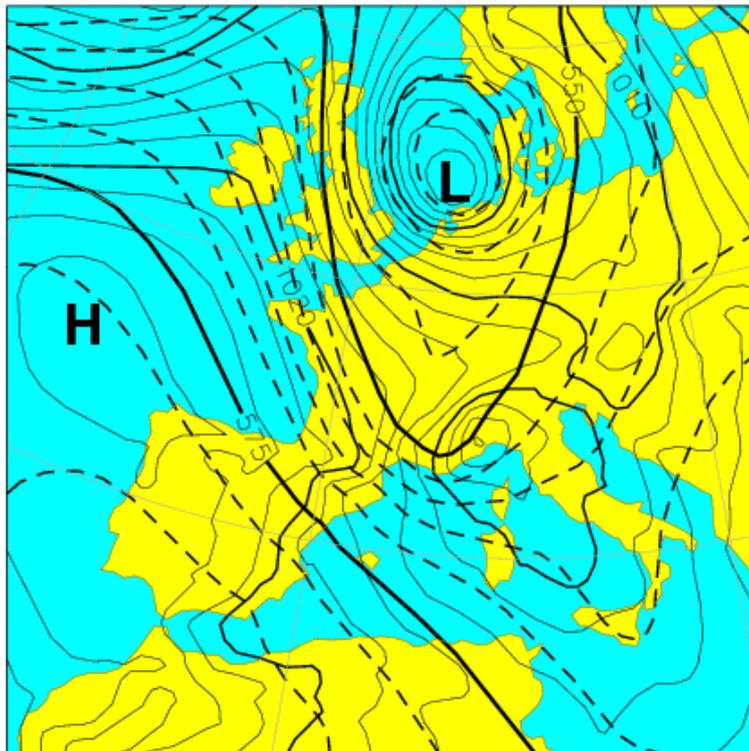


Fig. 3.10: 500 hPa-Niveau am 6. November 1999, um 12:00 UTC

Im St. Galler Rheintal stiess der Föhn bis nach Ruggell vor, wobei weiter südlich in Planken der Föhn nicht durchbrach. In Planken waren die Temperaturen über die Nacht hoch (Höchstwerte von 13°C), doch die weiteren Parameter entsprachen nicht den sonst bei Föhn zu erwartenden Werten.

Der Föhn erreichte weiter Quinten im Seeztal. In Bad Ragaz begann sich der Föhn am 5. November 1999 zwischen 11:00 UTC und 12:00 UTC durchzusetzen. Jedoch erst um 17:50 UTC brach dann der Föhn in Vilters durch. Bevor der Föhn weiter Richtung Quinten vordrang, wehte bis nach Vilters ein Westwind durch das Seeztal.

Druckdifferenz Locarno – Zürich		
Positiv		Höchstwert [hPa] / Zeit [UTC]
von [UTC]	bis [UTC]	
04.11.1999 14:00	06.11.1999 07:00	6.7 / 05.11.1999 20:00
Station Gütsch erfüllt Voraussetzungen für Föhn		
von [UTC]		bis [UTC]
04.11.1999 13:10		06.11.1999 07:30
Talföhn		
Beginn / Station		Ende / Station
05.11.1999 07:30 / Vättis		06.11.1999 06:40 / Vättis

Tab. 3.16: Eckdaten zum Föhnfall 12

3.2.13 Schlussbemerkungen zur Föhnfallbestimmung

Während der MAP-SOP 1999 konnten mit dem in Kapitel 3.1 beschriebenen Verfahren 12 Föhnfälle identifiziert werden. Zum Vergleich zu den Auswertungen von Steinacker (in Binder *et al.* 1999) wird auf Tab. 3.17 verwiesen. Die Wahl des Zeitraumes der MAP-SOP kann für den Föhn als Erfolg gewertet werden. Die Wahrscheinlichkeit für 12 Föhnbeobachtungen oder mehr lag bei 60% (Steinacker *et al.* 2001). Insgesamt wehte der Föhn in den Tälern während 264 Stunden. Mit beinahe 44 Stunden dauerte der Föhnfall 7 am längsten.

Die Föhnfälle 7 und 8 wurden nicht als ein einzelner Fall betrachtet. Der Föhn wehte zwar in der Höhe auch während des Unterbruchs weiter, doch wurde bei der Definition eines Föhnfalles (Anhang A) festgelegt, dass zwei Föhnfälle getrennt betrachtet werden, falls es zu einem Unterbruch von mindestens 12 Stunden kommt. Die Pause zwischen den Föhnfällen dauerte über 15 Stunden.

Anzahl Tage	Anzahl Ereignisse	Ø Dauer der Ereignisse (Tage)	maximales Intervall
23	12	1.9	14

Tab. 3.17: Statistik der Föhnfälle im Rheintal während der MAP-SOP 1999.

Die Termine der Föhndurchbrüche in den Tälern lagen meist in den frühen Morgenstunden. Ausnahmen bildeten hier nur die Föhnfälle 2 und 7, bei welchen der Föhn jeweils zwischen 19:30 UTC und 20:10 UTC durchbrach.

Kapitel 4

Erosion des Kaltluftsees

Ein Kaltluftsee ist eine Ansammlung lokal gebildeter Kaltluft in abgeschlossenen konkaven Geländeformen oder an Hindernissen infolge Kaltluftstaus. Kuhn (1989) bemerkte zu den Kaltluftseen, dass sie das Salz und Pfeffer des Föhnmenüs in den Alpentälern seien. Das heisst aber nicht, dass sie eine notwendige Voraussetzung für Föhn sind. Zur Erosion des Kaltluftsees machen übrigens die bisher aufgestellten Föhnthesen (Kapitel 6) keine genauen Aussagen. Einzig die Frage nach den Auswirkungen des Zusammentreffens von Föhnluft und stabiler Kaltluft in den Tälern wurde zum Teil untersucht.

Die hohe Stabilität der Atmosphäre und die schwachen Winde beim Auftreten von Kaltluftseen verursachen eine Zunahme der Konzentration der Luftverunreinigung. Zusätzlich sind eine grössere Nebelhäufigkeit und eine erhöhte Frostgefahr zu erwarten. Im Winter können auch bei wolkenlosem Wetter Kaltluftseen über Tage existieren, weil die tägliche Einstrahlung nicht stark genug ist, diese aufzulösen (Petkovsek 1985, Furger 1990). Für die Bewohner der betroffenen Gebiete ist daher die Vorhersage der Auflösung von Kaltluftseen von grossem Interesse.

Für den jähen Beginn oder das Ende des Föhns ist die jeweilige Position und Ausdehnung des Kaltluftsees auf der Leeseite der Alpen mitverantwortlich. Drei Mechanismen können zur Beseitigung der Kaltluft führen:

- a) Turbulente Erosion der Kaltluft aufgrund starker Windscherung an der Inversionsbasis (Fig. 4.1),

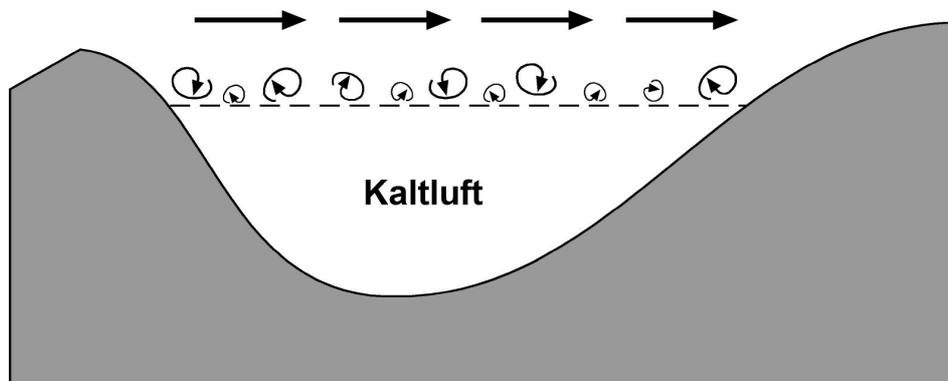


Fig. 4.1: Turbulente Erosion der Kaltluft

- b) durch die Sonneneinstrahlung wird die Bodenoberfläche erwärmt und damit die aufliegende Kaltluft, es kommt zu Konvektion (Fig. 4.2) oder

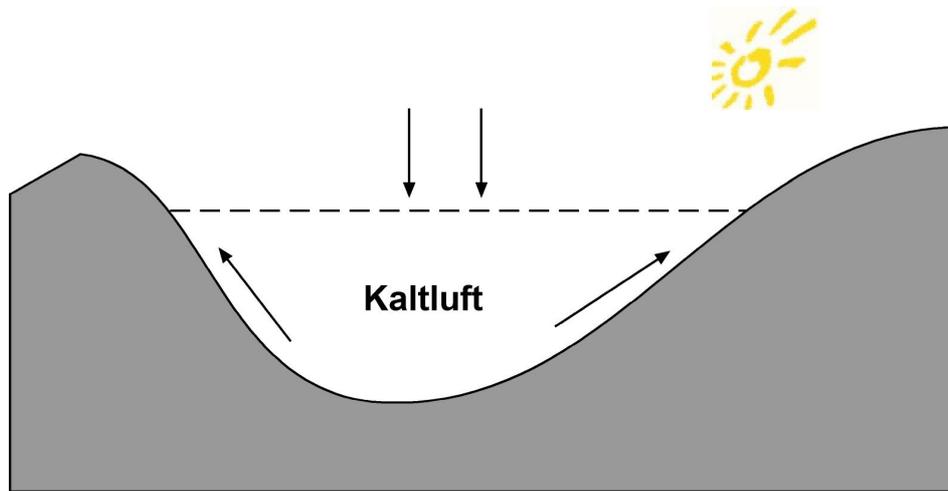


Fig. 4.2: Konvektion durch Sonneneinstrahlung

- c) der Hangaufwind in der Kaltluft nimmt ab, dadurch wird diese ausgewaschen und durch wärmere Föhnluft ersetzt oder die Kaltluft fließt in einer katabatischen Strömung in tiefer gelegene Regionen ab (Fig. 4.3).

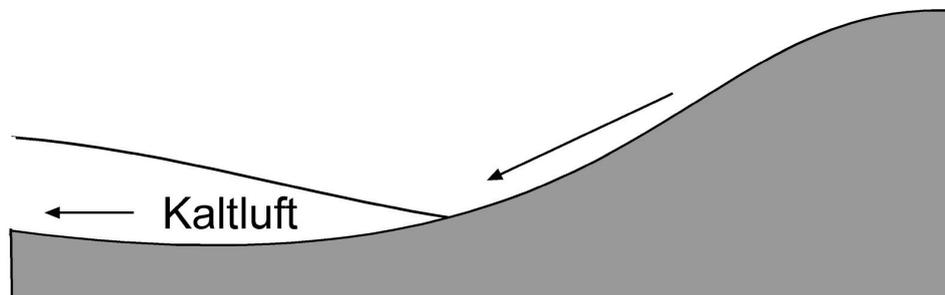


Fig. 4.3: Katabatische Strömung

Es ist wahrscheinlich, dass nicht ein einzelner Mechanismus für die Beseitigung des Kaltluftsees verantwortlich ist. Erst das Zusammenspiel aller drei Mechanismen ermöglicht diese.

In der vorliegenden Arbeit soll nun vor allem die Rolle des ersten und des zweiten Mechanismus untersucht werden. Es werden dabei vor allem die Föhnfälle 7 (19. bis 21. Oktober 1999) und 8 (22. bis 23. Oktober 1999) untersucht. Das St. Galler Rheintal und das Seeztal werden dabei getrennt betrachtet, damit überprüft werden kann, ob es zu einem unterschiedlichen Verhalten des Föhns in den beiden Tälern kommt.

4.1 Meteorologische Grundlagen

4.1.1 Die Entstehung des Kaltluftsees

Petkovsek (1992) beschreibt die Phasen und Charakteristika des Entstehungszyklus eines Kaltluftsees wie folgt: Beginn, Ausdehnung in die Höhe, Persistenz, Durchmischung und Auflösung.

Die Abkühlung des Talbodens und der aufliegenden Luft in der Nacht bewirken, dass die Luft in tiefere Gebiete abfließt. Luft, welche relativ wärmer als die Abfließende ist, wird zum Aufsteigen gezwungen, was zur Bildung einer Temperaturinversion führt.

Eine Persistenz-Phase ist dann erreicht, falls der Kaltluftsee seine typische Höhe erreicht hat und über einen Tag bestehen bleibt. In den wärmeren Jahreszeiten wird der in der Nacht gebildete Kaltluftsee in den Morgenstunden durch die Einstrahlung aufgelöst. Im Winter ist die Auflösung des Kaltluftsees an eine Änderung der vorherrschenden Wetterlage gebunden. Der Kaltluftsee bleibt bestehen, falls nur schwache Winde über diesen wehen. Bei starken Winden beginnt jedoch die Auflösung des Kaltluftsees von oben. In diesem Fall muss zuerst die Inversionsschicht aufgelöst werden.

Hünerbein (1999) schreibt zur typischen Höhe eines Kaltluftsees, dass diese durch den Geländecharakter bestimmt wird. Entscheidend sind dabei die niedrigsten begrenzenden Höhenzüge. Weiter weist Hünerbein (1999) darauf hin, dass wenn ein Tal im tiefsten Punkt in eine Ebene mündet, sich das Tal nur dann mit Kaltluft auffüllt, wenn ein starker Druckgradient das Abfließen der Kaltluft blockiert. In diesem Fall hängt die typische Höhe von der Stärke des Windes ab.

4.1.2 Schwerewellen

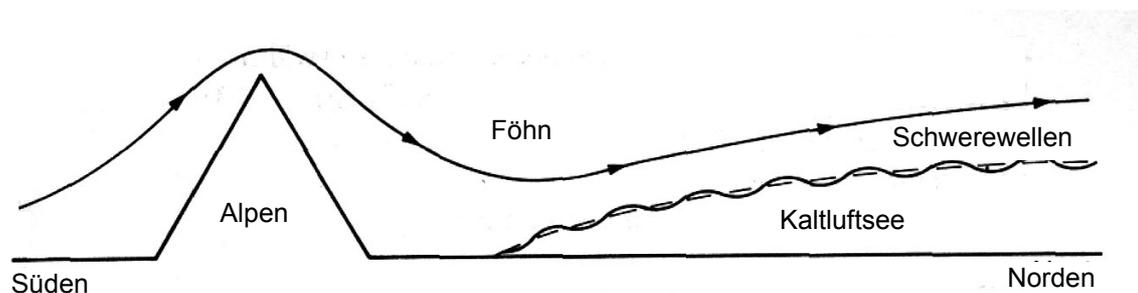


Fig. 4.4: Querschnitt durch die Alpen während einer Südföhnlage (nach Nater *et al.* 1979b)

Strömt die warme Föhnluft über den Kaltluftsee (Fig. 4.4), kommt es zu einer Windscherung. Die Anregung der Schwerewellen kann durch diese Windscherung erfolgen (Nater 1979a). Mittels Mikrobarographen ist es möglich, die Welleneigenschaften dieser Schwerewellen zu bestimmen. Eine ausführliche Theorie der Scherungswellen ist bei Nater (1979a) zu finden.

Falls stabile Luft über ein Hindernis strömt, kann es zur Bildung von Schwerewellen über oder im Lee des Hindernisses kommen. Stabile Luft, welche über eine Gebirgsbarriere gehoben wird, kühlt sich ab und wird dichter als die sie umgebende Luft.

Unter dem Einfluss der Schwerkraft sinkt sie wieder auf ihre Ruhelage. Die Luft überschiesst und oszilliert um diese Höhe (Fig. 4.5). Diese oft bei Föhn auftretenden Leewellen (bezüglich der Erde stationäre Wellen) dürfen jedoch nicht mit den in der Grenzschicht zwischen Föhnluft und Kaltluftsee auftretenden Wellen verwechselt werden. Die Leewellen sind ein Spezialfall der Schwerewellen mit wesentlich grösseren Wellenlängen (Nater 1979a).

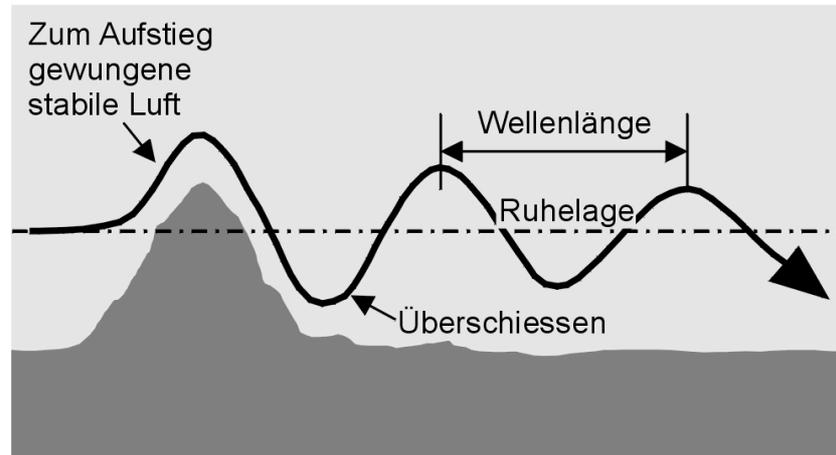


Fig. 4.5: Stabil geschichtete Luft, welche über ein Hindernis gehoben wird und um die Ruhelage oszilliert (nach Whiteman 2000).

4.1.3 Brunt-Väisälä-Frequenz

Die Brunt-Väisälä-Frequenz N kann als Mass für die Stabilität in der Atmosphäre verwendet werden. Sie gibt die Frequenz der Schwingung eines Luftteilchens um seine Ruhelage bei einer stabil geschichteten Atmosphäre an. Die Stabilität der Atmosphäre ist gross, wenn N gross ist und die Schwingungsdauer ist dann auch kürzer. N wird wie folgt berechnet:

$$N^2 = \frac{g}{\Theta_v} \cdot \frac{\partial \Theta_v}{\partial h}$$

Die virtuell-potentielle Temperatur Θ_v kann dabei wie folgt bestimmt werden (Richner 1999):

$$T_v = (9 + 273.16) \cdot \left(1 + 2.3087 \cdot \frac{U}{100 \cdot p} \cdot e^{\frac{17.27 \cdot 9}{237.3 + 9}} \right)$$

$$\Theta_v = T_v \cdot \left(\frac{p_0}{p} \right)^{0.286}$$

$\partial \Theta_v / \partial h$ muss positiv sein, damit reelle Lösungen für N existieren. Sonst ist die Atmosphäre labil geschichtet und es kann keine Wellenbewegungen geben. Es gilt weiter zu beachten, dass Wellenfrequenzen für interne Schwerewellen auf jeder Höhe kleiner als die entsprechende Brunt-Väisälä-Frequenz sein müssen (Stull 1988).

In der unteren Troposphäre kommen im Mittel Werte um 0.01 s^{-1} vor, was einer Schwingungsdauer $\tau = 2\pi/N$ von etwa 10 Minuten entspricht (Furger 1990).

4.1.4 Richardson-Zahl

Für diese Arbeit wurde wie von Furger (1990) die Bulk-Richardsonzahl verwendet:

$$Ri_B = \frac{g \cdot \Delta \bar{\Theta}_v \cdot \Delta h}{\bar{\Theta}_v \cdot \left[(\Delta \bar{u})^2 + (\Delta \bar{v})^2 \right]}$$

Eine Mittelung der Werte für die Windkomponenten u und v und die virtuell-potentielle Temperatur Θ_v fällt weg, da nur Momentanmessungen durch die Radiosondenstationen vorliegen.

Mit Hilfe der Richardson-Zahl ist es möglich über das Vorhandensein oder Fehlen von Turbulenzen zu entscheiden. Dabei betrachtet man die Werte $Ri_C = 0.25$ und $Ri_T = 1$. Falls $Ri_B < Ri_C$ ist, wird die Strömung turbulent. Wenn jedoch $Ri_B > Ri_T$ entspricht, wird die Strömung laminar. Liegt Ri_B zwischen den beiden Grenzwerten, so behält die Strömung den Zustand bei, den sie vor der Überschreitung des Grenzwertes hatte.

Bei der Berechnung der Richardsonzahl-Profile weist Furger (1990) darauf hin, dass noch einige Details zu berücksichtigen sind. So ist die Bestimmung der Bulk-Richardsonzahl abhängig von der Schichtdicke Δh . Furger (1990) hat für die Schichtdicke 150 m gewählt. Dieser Wert wurde auch für die vorliegende Arbeit gewählt.

Zusätzlich kann die Richardson-Zahl als Mass für die Stabilität der Atmosphäre verwendet werden. Bei negativem Vorzeichen von Ri_B ist die Atmosphäre superadiabatisch geschichtet. Ist Ri_B gleich 0, so ist die Schichtung adiabatisch und falls Ri_B positiv stabil.

Für die graphische Darstellung der Richardson-Zahlen wurden wie bei Furger (1990) die erhaltenen Daten mit der arctan-Funktion transformiert. Dadurch werden die Werte in der Nähe von $\pm\infty$ auf ± 1.57 abgebildet. Der Bereich zwischen 0 und 1 wird jedoch fast überhaupt nicht verzerrt. Gemäss Stull (1988) darf diese Transformation durchgeführt werden, da die Richardson-Zahl nur über Ja und Nein von Turbulenz entscheidet und nichts über deren Stärke aussagt.

4.2 Bisherige Untersuchungen

4.2.1 Beseitigung des Kaltluftsees

Wie bereits oben darauf hingewiesen wurde, liefern die Föhnthesen keine konkrete physikalische Beschreibung zur Beseitigung des Kaltluftsees. Gemäss Ficker (1910) fließt die Luft während des Antizyklonalstadiums des Föhns (Kapitel 6 Föhnthesen) aus den Tälern wie Wasser aus einem Becken. Stationen, welche sich auf gleicher Höhe befinden, werden gleichzeitig vom Föhn erreicht. Streiff, Wild und Kuhn gehen vom sukzessiven Mitreissen oder "Auflecken" der Kaltluft durch die darüberstreichende Höhenströmung aus (Kuhn, in Streiff *et al.* 1984).

Für Frey (1945) genügt die kinetische Energie der absinkenden Föhnströmung um die Bodenkaltluftschicht auszuräumen und den Abfluss derselben zu bewirken. Vielfach gelingt es der Föhnströmung nur die Kaltluft entlang des Alpenhauptkammes wegzuräumen und wird dann entlang der Bodenkaltluftschicht, in der meist noch nördliche Winde wehen, zum Aufgleiten gezwungen.

Von Hünenbein (1999) schreibt, dass bei hinreichend intensiver Sonneneinstrahlung im Frühjahr und Herbst die Konvektion den Auflösungsprozess dominiert. Petkovsek (1985) berechnete den Wärmefluss um abzuschätzen, ob im Winter die Sonneneinstrahlung ausreicht, um den Kaltluftsee durch Konvektion aufzulösen. Er schätzte ab, dass für die in den Dinarischen Alpen typische Höhe des Kaltluftsees von etwa 200 m zur konvektiven Auflösung ein Gesamtwärmefluss von 1.4 kW/m^2 nötig ist. Petkovsek (1985 und 1992) fand weiter heraus, dass der Kaltluftsee im Winter vor allem durch mechanische Turbulenz infolge von Windscherung an der Inversionsobergrenze aufgelöst wird. Gleichzeitig dürfen die Prozesse, welche den Kaltluftsee bilden und aufrechterhalten, nicht mehr wirken. Hier gilt es zu beachten, dass Petkovsek die Auflösung von Kaltluftseen in Mulden betrachtet hat. Ein Abfließen der Kaltluft ist hier also auszuschliessen.

Piringer *et al.* (2001) hatten innerhalb von FORM das Ziel, die vertikale Struktur der Planetaren Grenzschicht zu analysieren und mittels Ozon als Indikator den Kaltluftsee vom darüberwehenden Föhn zu unterscheiden. Das Hauptmessgebiet lag südlich des Bodensees in der Nähe von Lustenau (Ultrasonic Anemometer) und Füssach (Fesselballon). Mit Hilfe des Fesselballons konnte gezeigt werden, dass die kurzzeitigen Fluktuationen, im Speziellen diejenigen der Windrichtung, zwischen den beiden Luftmassen Kaltluft und Föhn, grösser als in diesen selber ist. Weiter ist die Mächtigkeit des oft in der Nähe des Bodensees beobachteten Kaltluftsees variabel und wahrscheinlich nur von der Stärke des Föhns abhängig. Zur Existenz des Kaltluftsees können die drei folgenden Effekte beigetragen haben:

1. Nächtlicher Zyklus des Talwindsystems.
2. Seewind aus Richtung Bodensee.
3. Mögliche Advektion durch den vom Föhn verursachten regionalen Druckgradienten.

Während verschiedener Fälle wurde mit Hilfe des Fesselballons beobachtet, dass sogar während Föhn die Kaltluftschicht weiter anwächst.

4.2.2 Druckschwankungen und Schwerewellen

In den siebziger Jahren (Nater 1979a) konnte im unteren Reusstal (zwischen Zugersee und Brugg) sowohl experimentell wie auch theoretisch nachgewiesen werden, dass die typischen, föhnbedingten Druckschwankungen durch Schwerewellen in der Grenzschicht Föhnluft - Kaltluftsee erzeugt werden. Die charakteristischen Druckschwankungen, welche damals gemessen wurden, besaßen Perioden von 300 bis 400 Sekunden. Es konnte gezeigt werden, dass die aus den gemessenen Sinuswellen berechneten Druckschwankungsamplituden gut mit jenen am Boden beobachteten übereinstimmten. Die für Föhn typischen Amplitudenwerte schwankten zwischen 0.1 hPa und 0.5 hPa.

Weiter wurde nachgewiesen (Nater 1979a), dass die Frequenzen der Druckschwankungen alle kleiner als die mittleren Brunt-Väisälä-Frequenzen im Kaltluftsee oder in der Grenzschicht sind. Es handelte sich also bei den beobachteten

Wellen eindeutig um Schwerewellen, welche in der Grenzschicht (Scherungsschicht) zwischen warmer Föhnluft und Kaltluftsee angeregt werden.

Nater (1979a) wies darauf hin, dass wenn der Föhn bis auf den Boden durchbricht, die Druckschwankungen augenblicklich verschwinden und es werden nur noch die Windturbulenzen und der so genannte „Mountain Associated Infrasound“ (MAI) registriert. Der MAI wird möglicherweise durch die Topographie verursacht. Der genaue Entstehungsmechanismus ist jedoch ungeklärt.

4.3 Der Föhndurchbruch im St. Galler Rheintal

Im St. Galler Rheintal kam es während den 12 Föhnfällen der MAP-SOP ausser bei Fall 6 immer zu einem Föhndurchbruch. Dabei stiess der Föhn zwei Mal bis zum Bodensee vor.

Während der 12 Föhnfälle war oft zu beobachten, wie sich der Kaltluftsee Richtung Norden zurückzog, was zuerst ein Abfliessen der Kaltluft vermuten liess. Doch kam es immer wieder zu einer Rückwärtsbewegung in Richtung Süd. Eine solche Abfolge wird im Anhang C mit Hilfe der potentiellen Temperaturen vom 20. bis am 21. Oktober 1999 der neun Bodenstationen Balzers, Weite, Vaduz, Buchs-Grabs, Feldkirch, Diepoldsau, Lustenau, Heerbrugg und Dornbirn schematisch entlang der Talachse dargestellt und beschrieben.

4.3.1 Druckschwankungen

Während der MAP-SOP kam es in Vaduz zu 9 Föhndurchbrüchen (Tab. 4.1). Hier wird der Föhnfall 7 genauer beschrieben.

Fall	Föhnbeginn	Föhrende	Dauer
1	15.09.1999 11:20	15.09.1999 14:40	3 h 20 min
2	19.09.1999 07:40	20.09.1999 06:30	22 h 50 min
3	22.09.1999 11:40	22.09.1999 15:10	3 h 30 min
5	02.10.1999 15:30	03.10.1999 01:40	10 h 10 min
7	20.10.1999 19:10	21.10.1999 12:40	17 h 30 min
8	22.10.1999 10:40	23.10.1999 02:50	16 h 10 min
9	24.10.1999 05:40	24.10.1999 17:10	11 h 30 min
10	30.10.1999 08:00	30.10.1999 23:50	15 h 50 min
12	05.11.1999 19:40	06.11.1999 04:20	8 h 40 min

Tab. 4.1: Die Termine der Föhndurchbrüche in Vaduz während der MAP-SOP

Eine Stunde vor dem Föhndurchbruch vom 20. Oktober 1999 um 19:10 UTC wehte der Wind aus Sektor Nord bei vorherrschenden potentiellen Temperaturen um 289 K. In der Region Buchs-Grabs befand sich gemäss der Sondierung von 18 UTC der Föhn auf einer Höhe von etwa 100 m über Grund. Die mittlere Temperatur der Föhnströmung betrug 294 K. Weiter zeigte die Sondierung, dass sich die Föhnströmung

auf Höhen unterhalb der Bergkämme beschränkte. Darüber herrschten Windrichtungen aus Westen vor.

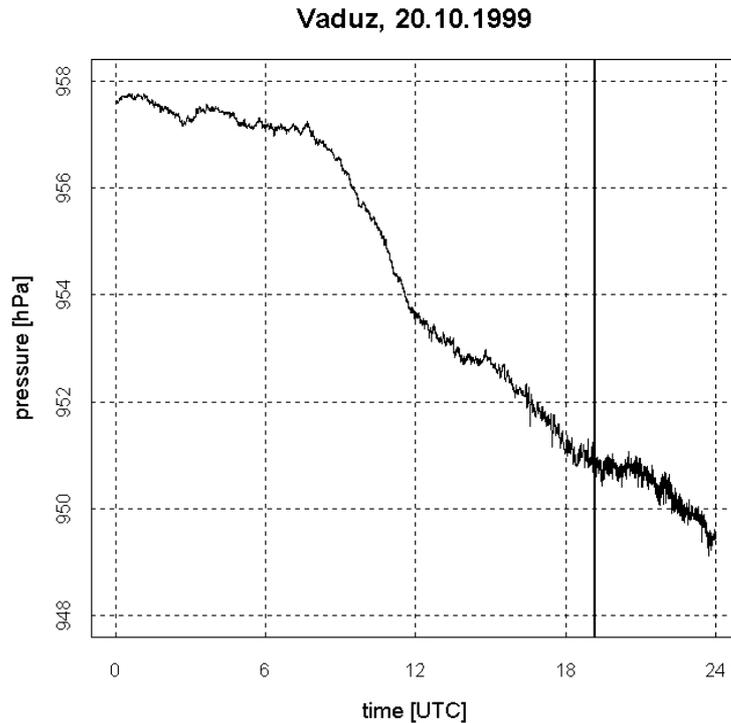


Fig. 4.6: Verlauf des Druckes in Vaduz am 20. Oktober 1999. Der ausgezogene vertikale Strich kennzeichnet den Föhndurchbruch um 19:10 UTC.

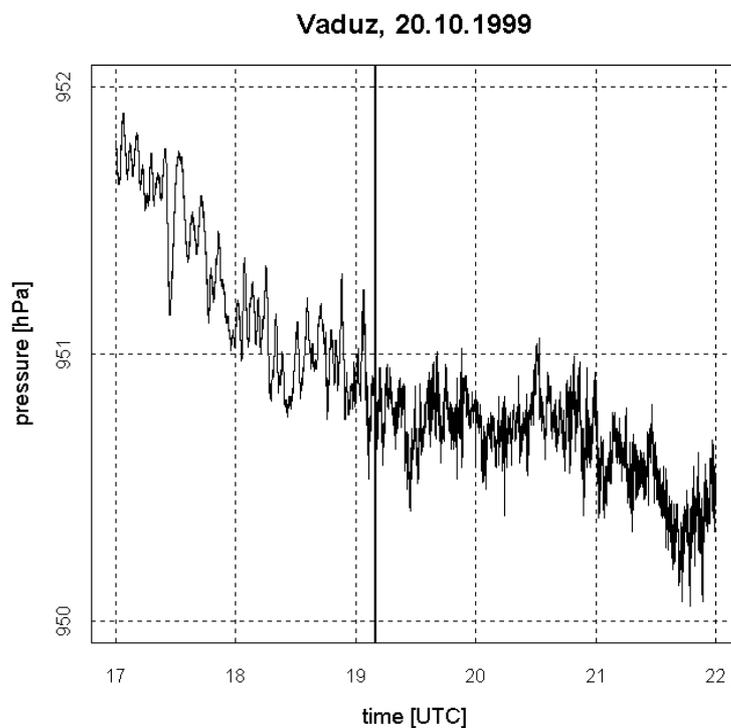


Fig. 4.7: Ausschnittsvergrößerung des Druckverlaufes in Vaduz am 20. Oktober 1999 zwischen 17:00 UTC und 22:00 UTC. Der ausgezogene vertikale Strich kennzeichnet den Föhndurchbruch um 19:10 UTC.

Der Druckverlauf in Vaduz (Fig. 4.6) zeigt das typische Bild vor einem Föhndurchbruch. Der Druck sinkt bis zum Durchbruch und anschliessend noch eine gewisse Zeit weiter. Nach dem Durchbruch ist eine Zunahme der Frequenz der Fluktuationen zu beobachten (Fig. 4.7). Diese Zunahme ist wohl auf die auftretenden Windturbulenzen zurückzuführen, wie dies schon von Nater (1979a) erwähnt wurde.

Der Druckverlauf wurde mittels einer Spektralanalyse untersucht, um herauszufinden, welche Perioden der Druckschwankungen vor einem Föhndurchbruch wie stark vertreten sind. In Fig. 4.8 wird die geglättete Schätzung der Spektraldichte in Dezibel ($10 \cdot \log_{10} S(f_k)$) für den Föhnfall 7 dargestellt.

Über einen Zeitraum von 10 Stunden, innerhalb welchem der Föhndurchbruch stattfand, wurde schrittweise im Abstand von 5 Sekunden jeweils für ein Zeitfenster von 3'600 Sekunden (in der Zeit zurück) das Spektrum berechnet. Der lineare Trend des Druckverlaufes wurde vorgängig entfernt.

In ersten Auswertungen wurden die Zeitreihen mit einem Bandpassfilter bearbeitet. Mit Hilfe dieses Filters konzentrierte man sich auf den Bereich der Perioden zwischen 300 und 400 Sekunden. Diese Bearbeitung zeigte jedoch keine befriedigenden Resultate, da die Amplituden für alle Perioden stark gedämpft wurden. Aus diesem Grund wurde auf einen Bandpassfilter verzichtet.

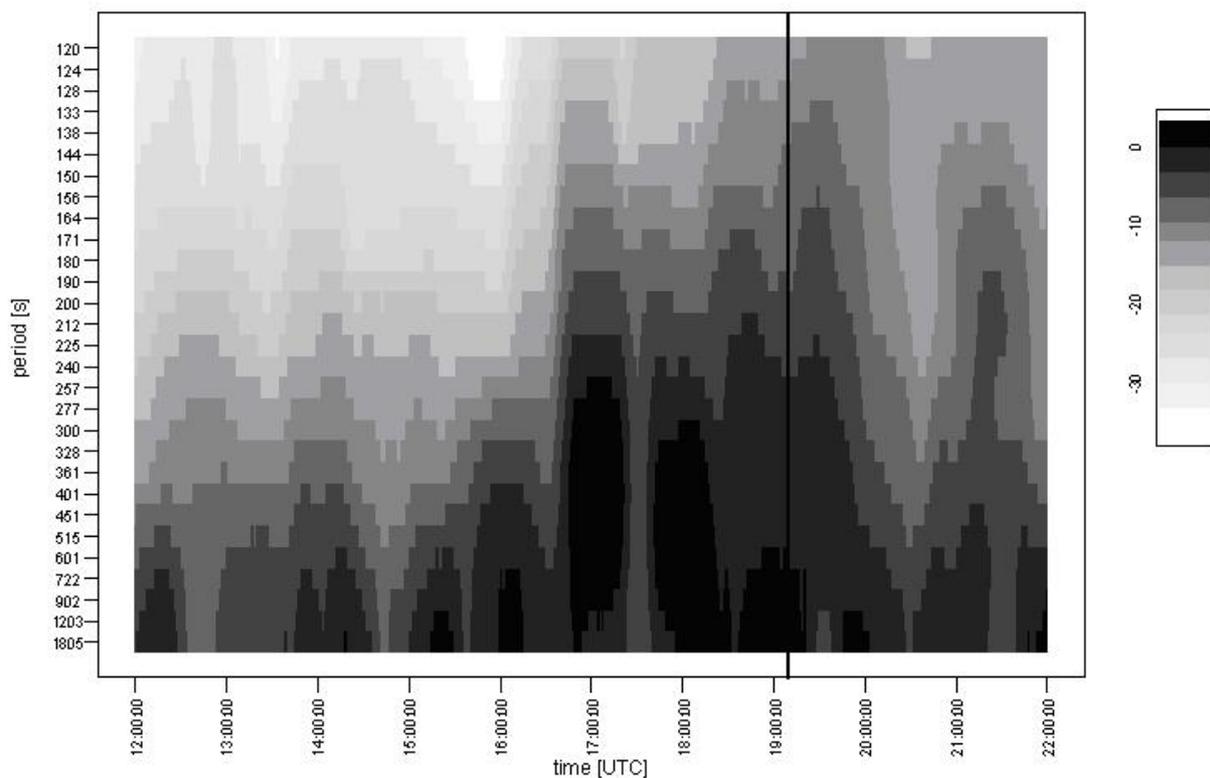


Fig. 4.8: Zeitreihe der spektralen Energiedichte für Vaduz vom 20.10.1999, von 12 UTC bis 22 UTC. Der Zeitpunkt des Föhndurchbruchs ist durch den vertikalen Strich markiert.

Zwei Stunden vor dem Föhndurchbruch, kann das Ansteigen der spektralen Energiedichte bei Perioden um 150 bis 1'200 Sekunden beobachtet werden. Vorherrschend sind dabei die Perioden über 450 Sekunden. Diese Werte sind jedoch nicht signifikant.

Um ein besseres Bild über den Aufbau der planetaren Grenzschicht zu erhalten, wurden die Brunt-Väisälä-Frequenzen (Fig. 4.9) und die Richardson-Zahlen (Fig. 4.10) mit Hilfe der Sondierung in Diepoldsau vom 20. Oktober 1999 um 18 UTC berechnet. Die Brunt-Väisälä-Frequenzen zeigen einen mittleren Wert von 0.01 s^{-1} , dies entspricht dem Wert, welchen Furger (1990) für die untere Troposphäre bestimmt hat. Die Richardson-Zahlen deuten in der Höhe über 3'000 m.ü.M. auf eine laminare Strömung hin, während zwischen 1'500 und 2'000 m.ü.M. die Strömung turbulent ist.

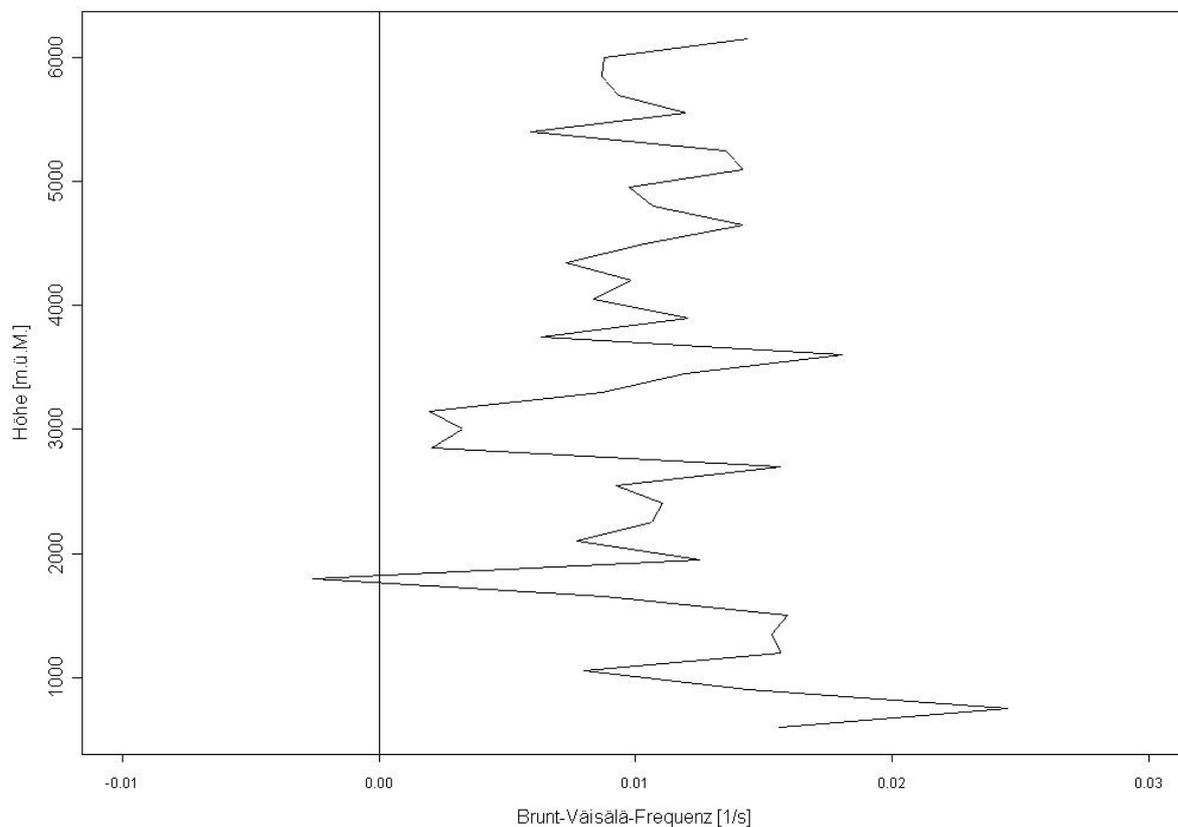


Fig. 4.9: Brunt-Väisälä-Frequenzen in Abhängigkeit der Höhe (bis 6'200 m.ü.M.) berechnet mit Hilfe der Sondierung in Diepoldsau vom 20.10.1999 um 18 UTC.

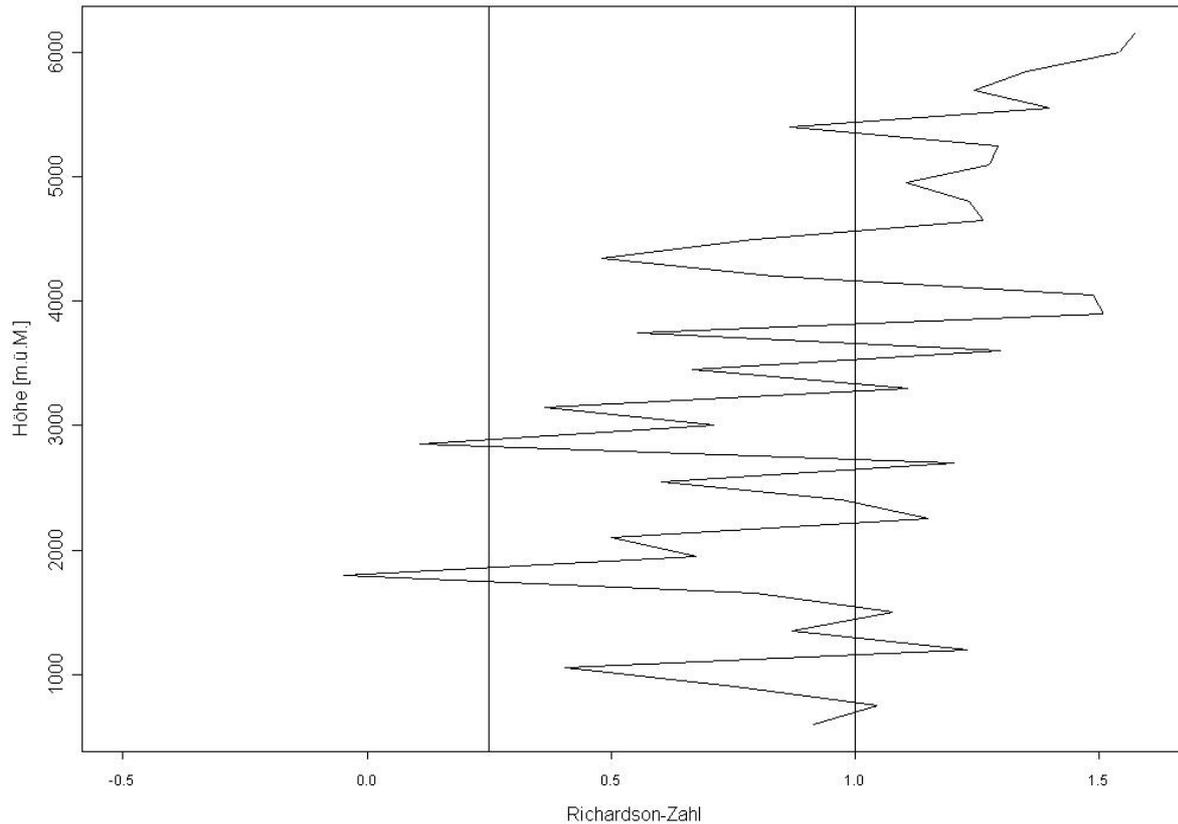


Fig. 4.10: Richardson-Zahlen in Abhängigkeit der Höhe (bis 6'200 m.ü.M.) berechnet mit Hilfe der Sondierung in Diepoldsau vom 20.10.1999 um 18 UTC.

Bei der Betrachtung aller 12 Föhnfälle der Mikrobarographendaten in Vaduz konnte das Ansteigen der spektralen Energiedichte bei Perioden zwischen 150 bis 400 Sekunden in 7 Fällen beobachtet werden (Tab. 4.2). Jedoch waren alle erhaltenen Werte nicht signifikant. In 6 dieser Fälle kam es jeweils auch zu einem Föhndurchbruch. In 3 Fällen kam es vor dem Föhndurchbruch zu keinem Anstieg der Energiedichte.

Bis Altenrhein stiess der Föhn nur zwei Mal vor (Tab. 4.3). Wobei hier angemerkt werden muss, dass Altenrhein nicht in der direkten Verlängerung des St. Galler Rheintal liegt. Dies gibt zu der Vermutung Anlass, dass der Föhn in Altenrhein seinen Ursprung nicht im St. Galler Rheintal hat.

In Altenrhein konnte das Ansteigen der spektralen Energiedichte bei Perioden zwischen 150 bis 400 Sekunden in 6 der 12 Föhnfälle beobachtet werden (Tab. 4.4), wobei es vor beiden Föhndurchbrüchen zu einem Anstieg kam.

Datum	Föhndurchbruch	Anstieg Energiedichte
15.09.1999	ja	ja
19.09.1999	ja	nein
22.09.1999	ja	nein
30.09.1999	nein	ja
02.10.1999	ja	ja
18.10.1999	nein	nein
20.10.1999	ja	ja
22.10.1999	ja	ja
24.10.1999	ja	ja
30.10.1999	ja	nein
02.11.1999	nein	nein
05.11.1999	ja	ja

Tab. 4.2: Auftreten von Föhndurchbrüchen und Anstieg der Spektraldichten im Bereich der Perioden von 150 bis 400 s in Vaduz während der 12 Föhnfälle

Fall	Föhnbeginn	Föhnende	Dauer
2	19.09.1999 11:50	20.09.1999 08:10	20 h 20 min
9	Datenausfall	24.10.1999 15:10	-

Tab. 4.3: Die Termine der Föhndurchbrüche in Altenrhein während der MAP-SOP

Datum	Föhndurchbruch	Anstieg Energiedichte
15.09.1999	nein	nein
19.09.1999	ja	ja
22.09.1999	nein	ja
30.09.1999	nein	nein
02.10.1999	nein	nein
18.10.1999	nein	ja
20.10.1999	nein	ja
22.10.1999	nein	nein
24.10.1999	ja	ja
30.10.1999	nein	nein
02.11.1999	nein	nein
05.11.1999	nein	ja

Tab. 4.4: Auftreten von Föhndurchbrüchen und Anstieg der Spektraldichten im Bereich der Perioden von 150 bis 400 s in Altenrhein während der 12 Föhnfälle.

4.3.2 Wärmefluss

Viele Studien, welche mit Hilfe von strömungsdynamischen Prozessen den Föhn beschreiben wollen, vernachlässigen oft den Kaltluftsee. Während die Beseitigung des Kaltluftsees indirekt angesprochen wird (Ficker 1931), wurden die dabei beteiligten physikalischen Prozesse nicht im Detail beschrieben. Mit Hilfe von MAP sind nun Daten vorhanden, die einen tieferen Einblick in die Grenzschicht zwischen Föhn und Kaltluftsee gewährleisten.

An zwei Tagen flog der Motorsegler Dimona in der Grenzschicht zwischen Föhn und Kaltluftsee. Dabei wurde jeweils ein wellenförmiges Muster geflogen, wobei immer wieder versucht wurde, in die Kaltluft einzudringen. Dabei handelte es sich um ein kritisches Manöver, da sich die obere Grenze des Kaltluftsees an einigen Stellen nur etwas mehr als 100 Meter über Grund befand und Turbulenzen den Flug weiter erschwerten. Konsequenterweise ist also anzumerken, dass der Segler eher an der Oberfläche des Kaltluftsees kratzte, als in diesen eindrang. Als weitere Quelle für zusätzliche Daten diente die Bodenstation der ZAMG in Lustenau, welche neben den klassischen Parametern Temperatur, Wind und Feuchtigkeit auch den Wärme- und den Impulsfluss gemessen hat. Dies ist das erste Mal, dass Daten verfügbar sind, mit welchen eine quantitative Abschätzung des Wärme- und des Impulsflusses zwischen der Föhnströmung und dem Kaltluftsee ermöglicht werden. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch nur auf den Wärmefluss eingegangen.

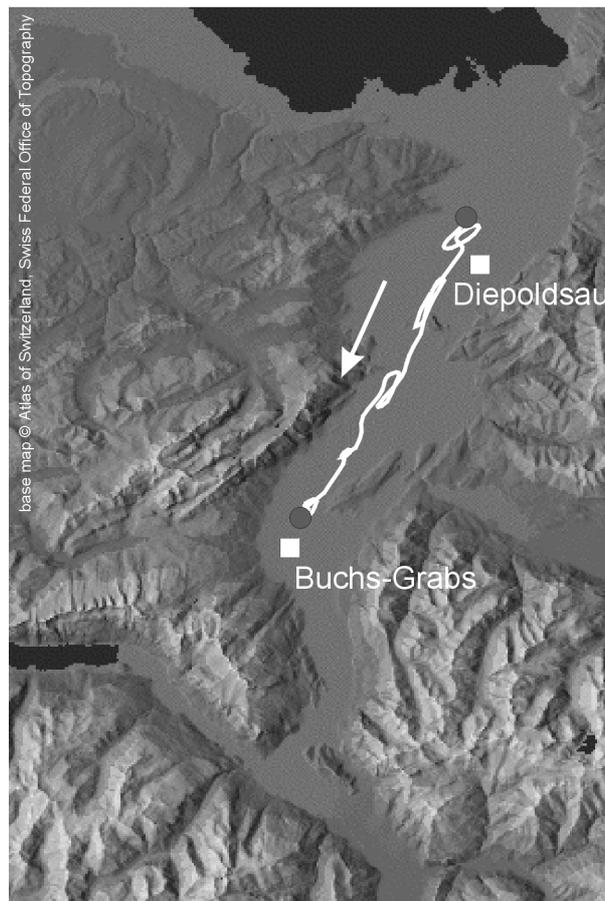


Fig. 4.11: Flug des Motorseglers Dimona am 22. Oktober 1999 im St. Galler Rheintal von Nord nach Süd. (Karte © Bundesamt für Landestopographie, Schweiz)

In Fig. 4.11 ist der Flug vom 22. Oktober 1999 der Dimona von Nord nach Süd dargestellt. Die Resultate werden in Fig. 4.14 aufgeführt. Man erkennt dabei, dass es beinahe gelang, ein Sägezahnmuster mit einer Amplitude von 500 m zu fliegen. Aus Fig. 4.12 ist die Neigung der Grenzschicht zwischen Föhn und Kaltluftsee ersichtlich, welche etwa 3° beträgt. Ähnliche Werte von 1.5° bis 2.0° konnten bei Föhnfällen im unteren Reusstal bestimmt werden (mündliche Mitteilung Richner).

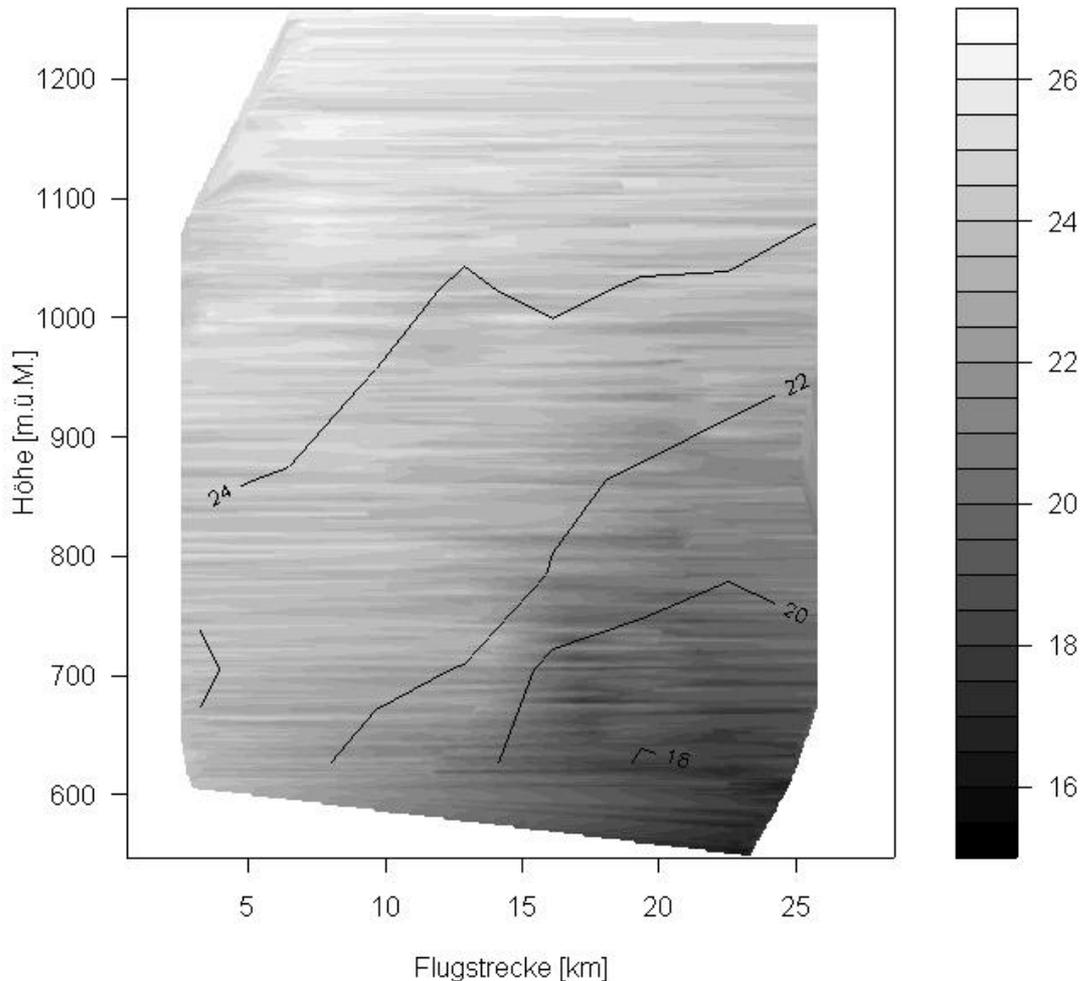


Fig. 4.12: Querschnitt der potentiellen Temperaturen in $^\circ\text{C}$ während des Fluges vom 22. Oktober 1999.

Aus der potentiellen Temperatur, dargestellt im mittleren Diagramm von Fig. 4.14, kann der Gradient der potentiellen Temperatur berechnet werden. Während er im Norden relativ hoch ist ($1.2 \text{ K}/100 \text{ m}$), nimmt er gegen Süden langsam ab ($0.4 \text{ K}/100 \text{ m}$), wo die Durchmischung mit der Föhnluft schon weiter fortgeschritten ist. Zum Zeitpunkt des Fluges des Vortages war der Gradient über den ganzen Flug konstant hoch auf $1.9 \text{ K}/100 \text{ m}$.

Mit Hilfe der vorliegenden Daten wurde der Wärmefluss bestimmt. Diesen berechnete man mit der Kovarianz der potentiellen Temperatur und der vertikalen Windgeschwindigkeit. Weil die Höhenänderungen sehr schnell abliefen, mussten die Glättungsintervalle für die Mittelwerte der beiden Parameter eher kurz gewählt werden. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte, dass der berechnete Wärmefluss für Glättungsinter-

valle zwischen einer und zwei Minuten etwa gleich blieben. Davon ausgehend wurde für das Glättungsintervall 120 s gewählt.

Im untersten Diagramm der Fig. 4.14 ist ein zyklisches Verhalten des Wärmeflusses erkennbar. Ein ähnliches Verhalten konnte am Vortag festgestellt werden. Zuerst wurde befürchtet, dass diese Variation mit der Bewegung des Seglers zusammenhängt. Nähere Untersuchungen und Vergleiche mit weiteren Daten, welche während horizontalen Flugwegen gesammelt wurden, ergaben, dass es sich um reale Wellen handelt. Es ist zu vermuten, dass es sich bei diesen zyklischen Variationen um einzelne Luftpakete handelt, welche durch Turbulenz nach oben oder unten gezwungen werden. Um das räumliche Mittel des Wärmeflusses zu bestimmen, wurden diese Variationen über Perioden gemittelt, welche die gleiche Anzahl an positiven und negativen Abweichungen umfassten. Dabei wurde bei den Flügen mit dem Sägezahnmuster und bei direkten Flugwegen während der Föhnfälle vom 21. und 22. Oktober 1999 der Wärmefluss mit 15 W/m^2 abgeschätzt.

Für die Schätzung des Wärmeflusses am Boden, wurden die Daten der Bodenstation Lustenau analysiert. Fig. 4.13 zeigt den täglichen Verlauf von einigen charakteristischen Parametern. Über die ganze dargestellte Periode lag die Station im Kaltluftsee. Am 21. Oktober 1999 war der Himmel teilweise bewölkt, daher die tieferen Werte des Wärmeflusses. Am 20. Oktober 1999 kann ein typischer Föhntag beobachtet werden, an welchem der Föhn bis zum Boden durchbrach. Aus diesem Grund wurden die Werte dieses Tages als Referenz gewählt. Gemittelt über 24 Stunden beträgt der Wärmefluss 13.6 W/m^2 ; als Referenzwert wurden 15 W/m^2 bestimmt.

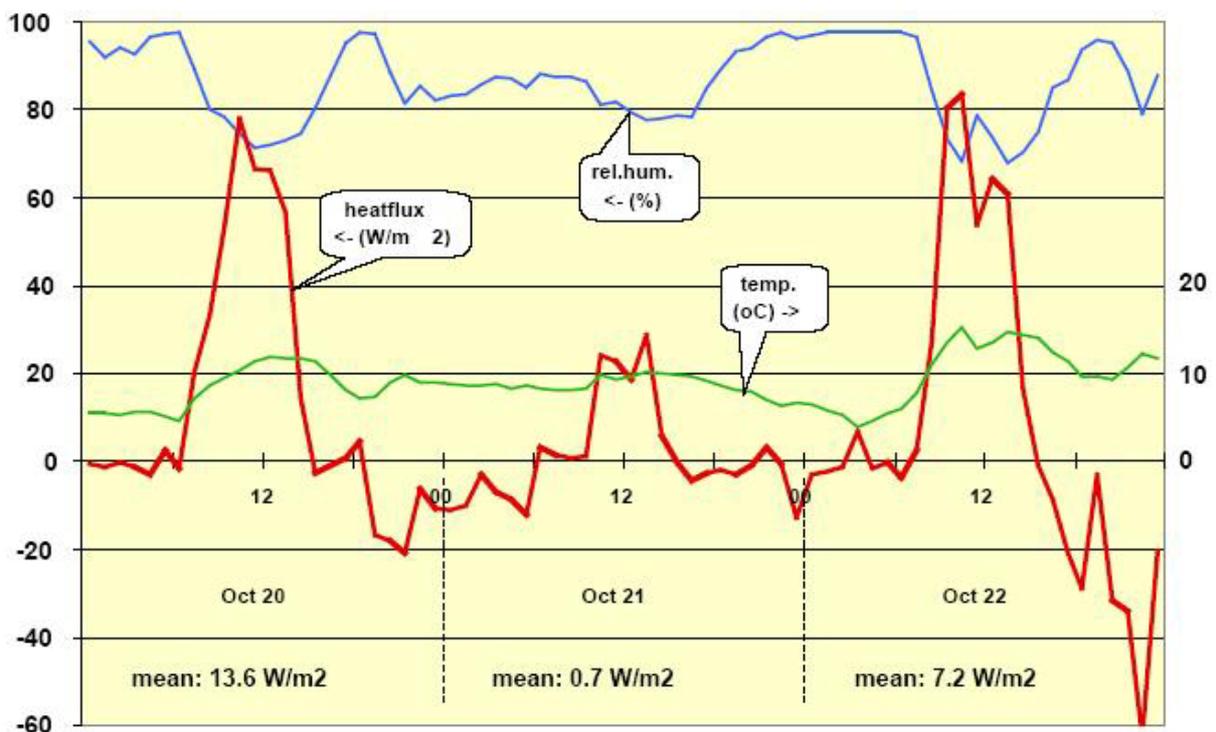


Fig. 4.13: Temperatur, Feuchtigkeit und Wärmefluss gemessen im Kaltluftsee bei der Bodenstation Lustenau. Für einen typischen Föhntag scheint der Wärmefluss in der Grössenordnung von 15 W/m^2 zu liegen.

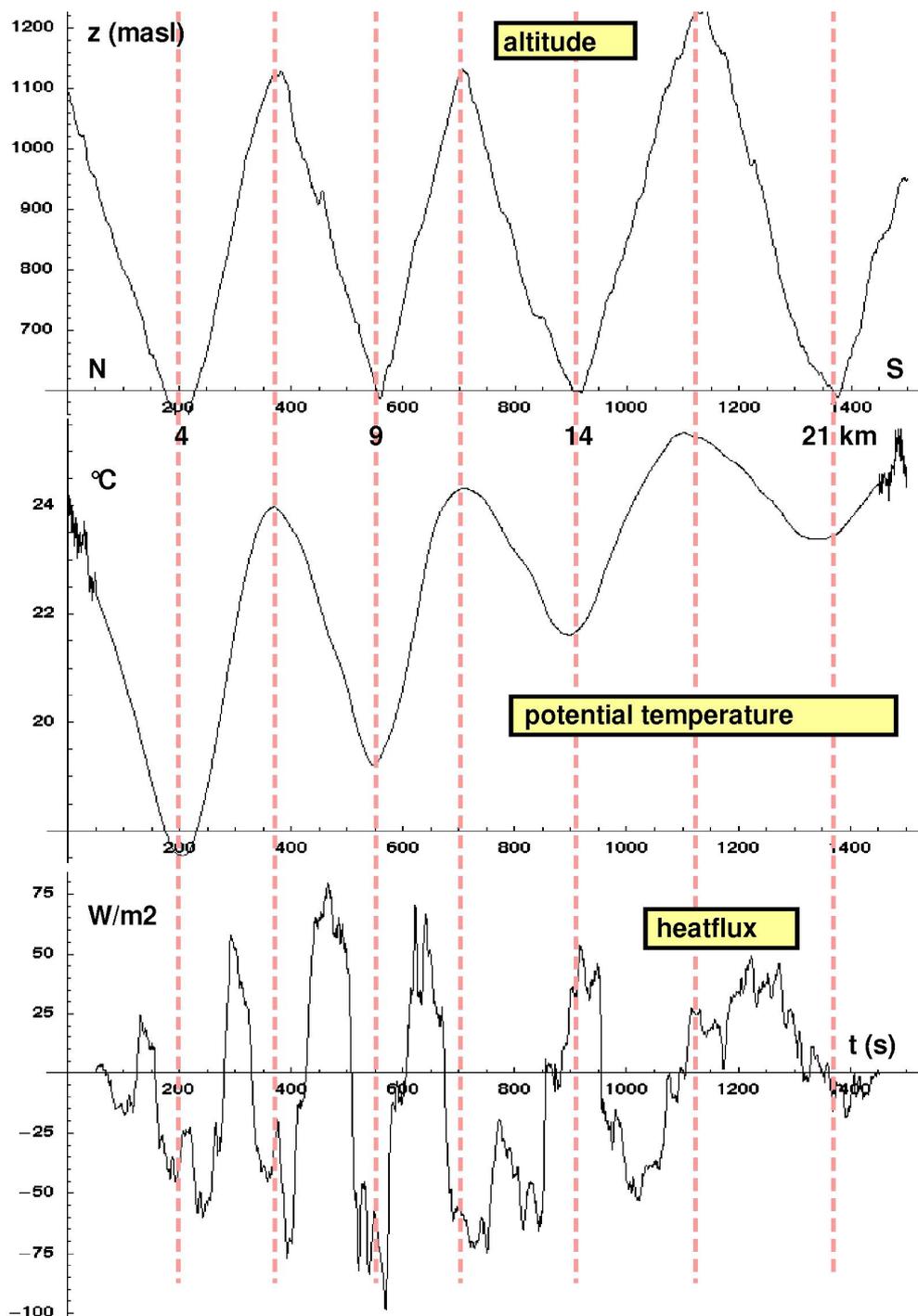


Fig. 4.14: **Obere Kurve:** Höhe des Motorseglers als Funktion der Zeit. Dies ergibt auch eine grobe Schätzung der Distanz. **Mittlere Kurve:** Potentielle Temperatur. **Untere Kurve:** Berechneter Wärmefluss

Ausgehend von den Werten des Wärmeflusses am Boden und an der Obergrenze des Kaltluftsees wurde die Erwärmungsrate einer Luftsäule berechnet (Fig. 4.15). Mit der Annahme, dass die mittlere Dichte der Luft etwa 1.0 kg/m^3 und die Tiefe des Kaltluftsees 100 m beträgt, ergibt sich für die Erwärmungsrate verursacht durch die Summe des Wärmeflusses unten (15 W/m^2) und des Wärmeflusses oben (-15 W/m^2) $3 \cdot 10^{-4} \text{ K/s}$, dies entspricht 25 K/d . Dieser Wert ist sehr hoch. Solch eine Erwär-

mungsrates würde jeden Kaltluftsee in weniger als einem Tag zum Verschwinden bringen. Damit würden Föhnperioden mit mehr oder weniger stationären und beständigen Kaltluftseen nicht auftreten. Verschiedene Gründe können für diese zu grosse Schätzung verantwortlich sein.

- Da vergleichbare Messungen fehlen, besteht eine Unsicherheit bezüglich der Messungen an der Obergrenze des Kaltluftsees. Aber auch wenn der Wert zu hoch ist, der Wärmefluss am Boden allein würde eine Erwärmung von über 10 K/d bewirken. Basierend auf den Erfahrungen mit Messungen des Wärmeflusses am Boden, besteht kein Grund diesen Wert in Frage zu stellen.
- In der Nacht kühlt die Luftsäule infolge langwelliger Strahlung ab. Durch diesen Prozess verliert die Luftsäule einen Teil der Energie, welche durch den Wärmefluss gewonnen wurde. Dies ist eine Tatsache, welche in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurde.
- Infolge turbulenter Durchmischung in der Grenzschicht Föhn–Kaltluftsee wird Luft aus dem Kaltluftsee beseitigt. Dieser Massenverlust ist verantwortlich für die leichte Advektion aus Sektor Nord, welche regelmässig im Kaltluftsee beobachtet wird. Auch dieser Prozess wurde innerhalb dieser Arbeit nicht betrachtet.

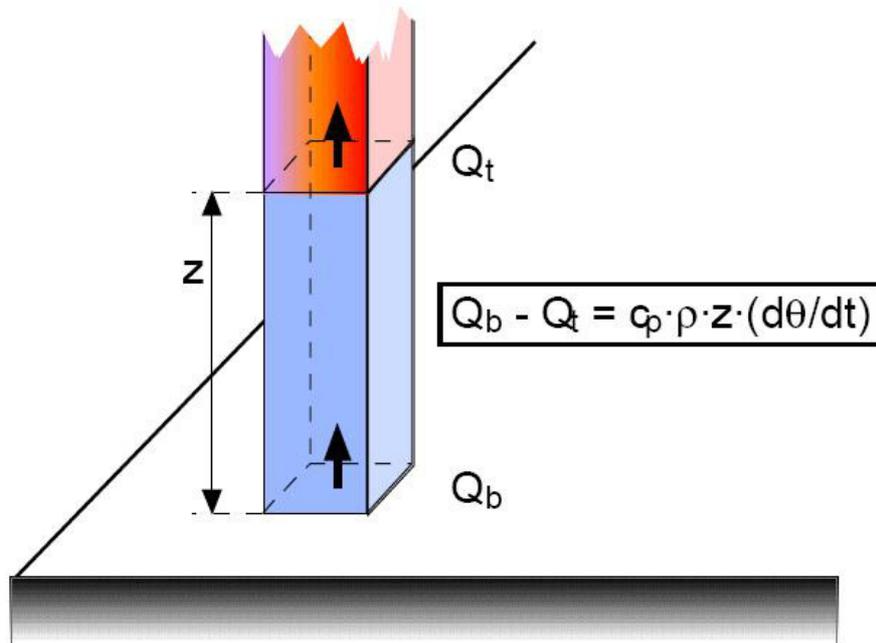


Fig. 4.15: Konzeptionelle Annahmen für die Berechnung der Erwärmungsrates innerhalb des Kaltluftsees.

4.4 Der Föhndurchbruch im Seeztal

Während der MAP-SOP kam es in Quinten zu 7 Föhndurchbrüchen (Tab. 4.5). Die genauen Termine für den Föhnbeginn und das Föhnende des Föhnfalles 10 konnten nicht genau bestimmt werden, da es zu Datenausfällen kam.

Fall	Föhnbeginn	Föhnende	Dauer
2	19.09.1999 04:30	20.09.1999 07:00	26 h 30 min
3	22.09.1999 08:20	22.09.1999 12:20	4 h
7	20.10.1999 08:00	21.10.1999 11:10	27 h 10 min
8	22.10.1999 09:40	23.10.1999 00:30	14 h 50 min
9	24.10.1999 03:20	24.10.1999 15:50	12 h 30 min
10	Datenausfall	Datenausfall	ca. 6 h
12	05.11.1999 19:30	05.11.1999 21:30	2 h

Tab. 4.5: Die Termine der Föhndurchbrüche in Quinten während der MAP-SOP.

4.4.1 Druckschwankungen

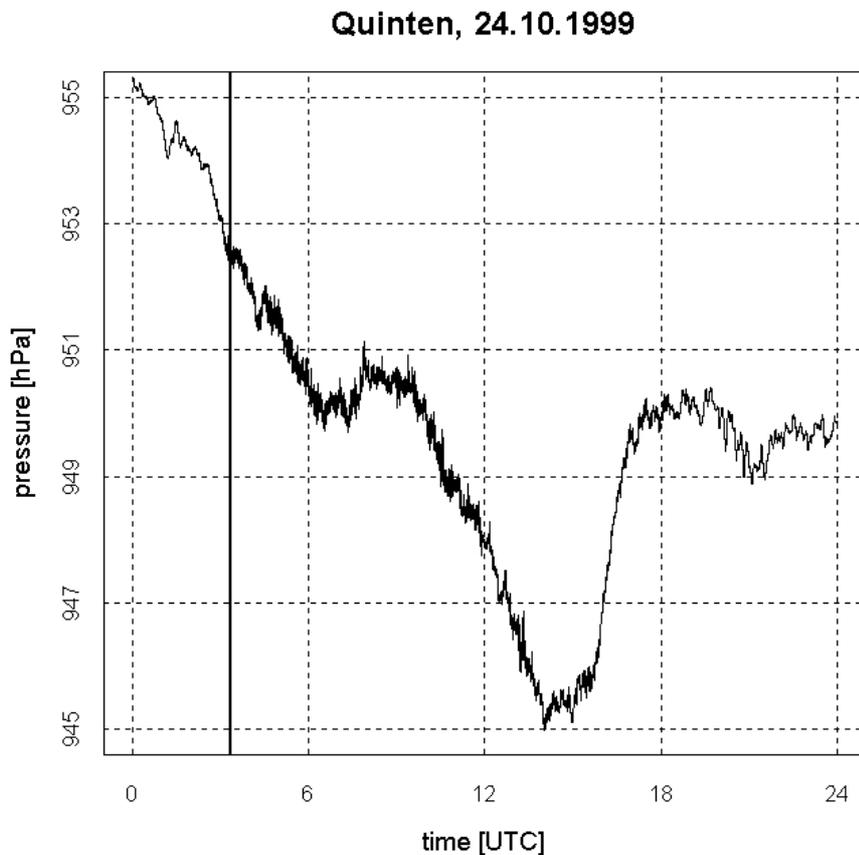


Fig. 4.16: Verlauf des Druckes in Quinten am 24.10.1999. Der ausgezogene vertikale Strich kennzeichnet den Föhndurchbruch um 03:20 UTC.

Ein weiterer Mikrobarograph stand in Quinten. Die Daten wurden gleich wie die Daten von Vaduz und Altenrhein untersucht. Als Beispiel wird der Föhnfall 9 vom 24. Oktober 1999 genauer betrachtet.

Eine Stunde vor dem Föhndurchbruch wehte der Wind in Quinten aus Sektor Nord bei Temperaturen um 9°C . Um 03:20 UTC wechselte die Windrichtung auf Sektor Ost mit Zunahme der Windgeschwindigkeiten auf bis zu 10 m/s und Böen um die 15 m/s. Die Temperaturen stiegen innerhalb von 10 Minuten um etwa 3°C .

Der Druckverlauf zeigte auch hier wieder eine sinkende Tendenz (Fig. 4.16), welche auch nach dem Föhndurchbruch anhält. Weiter ist die Zunahme der durch Turbulenzen verursachten Fluktuation zu erkennen (Fig. 4.16 und Fig. 4.17). Die Spektralanalyse (Fig. 4.18) zeigt vor dem Föhndurchbruch bei keiner der Perioden eine signifikante Zunahme.

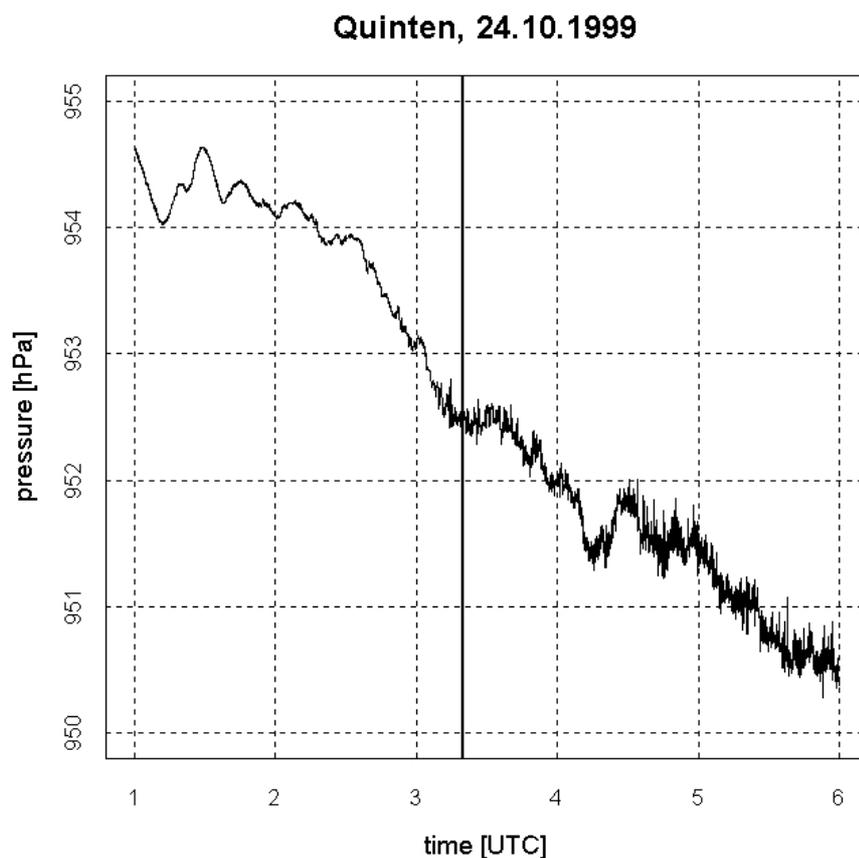


Fig. 4.17: Ausschnittsvergrößerung des Druckverlaufes in Quinten am 24.10.1999 zwischen 01:00 UTC und 06:00 UTC. Der ausgezogene vertikale Strich kennzeichnet den Föhndurchbruch um 03:20 UTC.

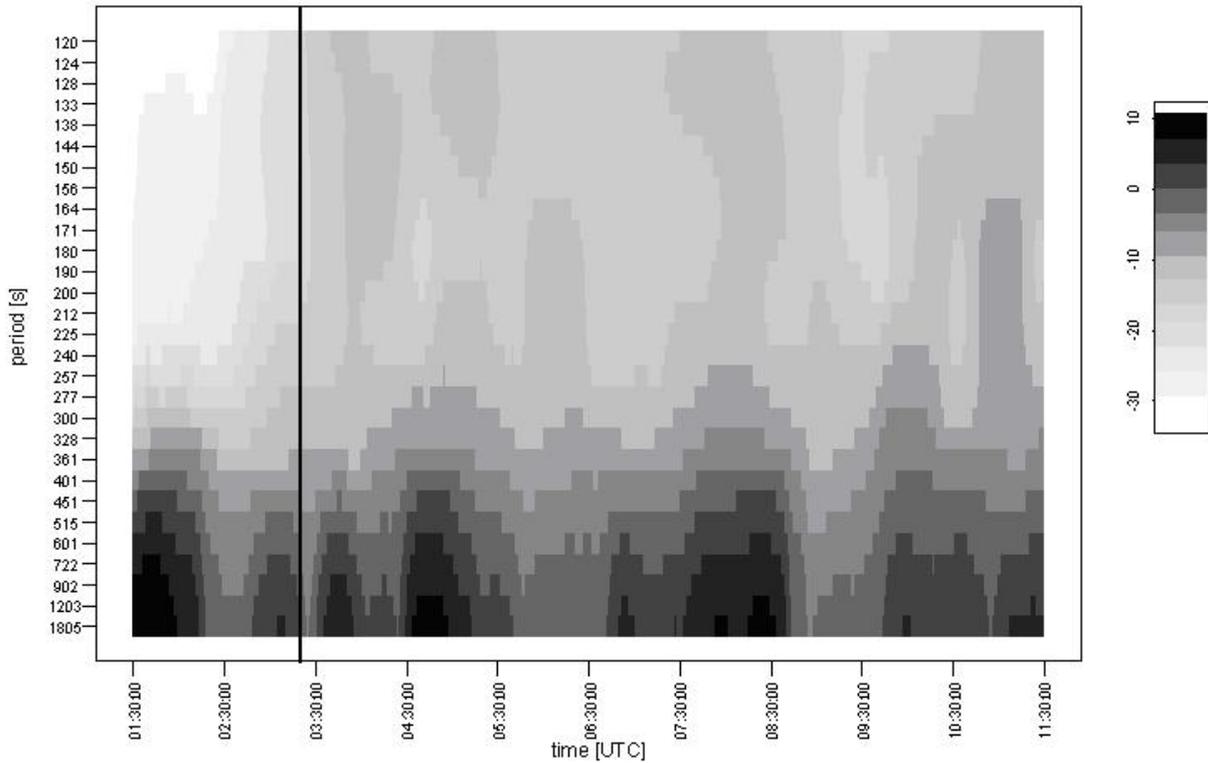


Fig. 4.18: Zeitreihe der spektralen Energiedichte für Quinten vom 24.10.1999, von 01:30 UTC bis 11:30 UTC. Der Zeitpunkt des Föhndurchbruchs ist durch den vertikalen Strich markiert.

In Quinten konnte das Ansteigen der spektralen Energiedichte bei Perioden zwischen 150 bis 400 Sekunden in 4 der 12 Föhnfälle beobachtet werden (Tab. 4.6), wobei es nur vor zwei Föhndurchbrüchen zu einem Anstieg kam.

Datum	Föhndurchbruch	Anstieg Energiedichte
15.09.1999	nein	nein
19.09.1999	ja	nein
22.09.1999	ja	nein
30.09.1999	nein	nein
02.10.1999	nein	ja
18.10.1999	nein	nein
20.10.1999	ja	nein
22.10.1999	ja	ja
24.10.1999	ja	nein
30.10.1999	ja	nein
02.11.1999	nein	ja
05.11.1999	ja	ja

Tab. 4.6: Auftreten von Föhndurchbrüchen und Anstieg der Spektraldichten im Bereich der Perioden von 150 bis 400 s in Quinten während der 12 Föhnfälle.

4.5 Diskussion der Druckschwankungen

Die Auswertung der Spektren hat gezeigt, dass es vor einem Föhndurchbruch nicht immer zu einem Anstieg der spektralen Energiedichte der Perioden zwischen 150 und 400 Sekunden kommt. Das Fehlen eines Anstiegs der Dichte im Bereich der betreffenden Perioden und damit das Fehlen ausgeprägter Schwerewellen kann zwei Gründe haben:

1. Die Temperaturdifferenz zwischen der Kaltluft und der Föhnluft ist zu gering, als dass es zu ausgeprägten Schwerewellen kommt.
2. Die Überlagerungen verschiedener Strömungen und der Turbulenz verhindert ein deutliches Wellensignal in den Mikrobarographendaten.

Weiter kann man mittels der Spektren allein nicht die Aussage machen, dass die auftretenden Anstiege der spektralen Energiedichte auf Schwerewellen zurückzuführen sind. Am Beispiel vom 20. Oktober 1999 in Vaduz (Fig. 4.8) erkennt man, dass die hohe Energiedichte von Perioden über 200 Sekunden auch nach dem Föhndurchbruch einige Zeit anhält. Sind diese Druckschwankungen aber durch Schwerewellen in der Grenzschicht Föhnluft - Kaltluft erzeugt worden, sollten diese Schwankungen nach der Beseitigung der Kaltluft verschwunden sein. Dies ist hier und auch in einigen anderen Fällen nicht der Fall, dasselbe gilt für Quinten und Altenrhein.

Der Unterschied der Resultate zwischen dem Rheintal und dem unteren Reusstal kann unter anderem in den geographischen Gegebenheiten begründet werden. Das untere Reusstal ist ein breites und eher flaches Tal. Im Vergleich dazu sind das Rheintal im Bereich von Vaduz und das Seetal im Bereich von Quinten enger und tiefer. Das Reusstal hat fast eine modellhafte Ausprägung.

Die Mikrobarographen allein sind bereits eine grosse Hilfe um den Föhndurchbruch besser zu verstehen. Durch diese Messungen wurde auch erst das untypische Verhalten am 02. November 1999 in Quinten erkannt. Aufgrund der Druckdaten (starke Fluktuationen), wurde ein Föhndurchbruch vermutet. Doch die genaue Betrachtung weiterer Parameter zeigte, dass sich hier ein starker Westwind durchsetzte.

Damit die verschiedenen Ursachen der Druckschwankungen bestimmt werden können, genügt es nicht, nur die Messungen durch Mikrobarographen zu betrachten. Es müssen Messungen von Geräten herangezogen werden, welche uns in der Höhe Daten liefern. Von Vorteil wäre es, wenn diese Messungen an denselben Orten durchgeführt werden, bei welchen die Mikrobarographen platziert sind. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Vergleich von Vaduz mit den Radiosondierungen von Diepoldsau durchgeführt. Doch durch die räumliche Distanz der beiden Standorte ist ein direkter Vergleich mit Vorsicht zu geniessen.

Piringer *et al.* (2001) zeigte, dass die unterschiedlichen Eigenschaften der zwei Luftmassen zu einer ausgeprägten Abgrenzung führen, deren Wellenbewegungen unregelmässig zu sein scheinen. Diese Grenze kann gleichzeitig sehr beständig sein. Dies bestätigt zum Teil die oben gemachten Beobachtungen.

Kapitel 5

Strömungsaufteilung im Raum Sargans

Im Rahmen dieser Arbeit wurde kurz die mögliche Strömungsaufteilung in der Region von Sargans untersucht. Die Hypothese lautete, dass sich die Föhnströmung von Chur her kommend, in zwei Strömungen Richtung Seeztal und Richtung St. Galler Rheintal aufteilt (Fig. 5.1).

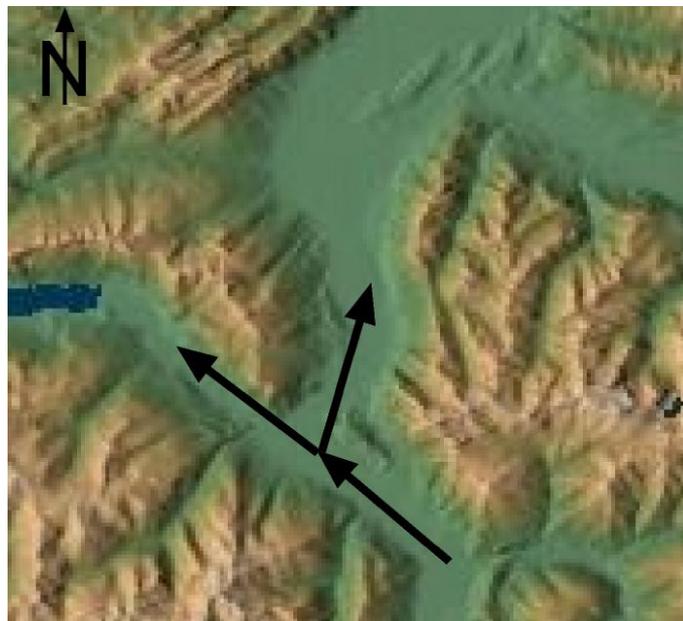


Fig. 5.1: Die Region Sargans mit der möglichen Strömungsaufteilung während Föhn.

5.1 Bisherige Untersuchungen

Bereits Gutermann (1970) und Dürr (2000) untersuchten die Strömungsaufteilung. Gutermann (1970) hat festgestellt, dass es bei Föhn in Buchs immer deutlich wärmer als in Bad Ragaz ist, wobei der Unterschied am Morgen am grössten ausfällt. Daraus muss gefolgert werden, dass die Mischföhnluft in Bad Ragaz, welche offensichtlich noch einen merklichen Anteil an Kaltluft enthält, grösstenteils durch das Seeztal nach Westen abfliesst, während im Rheintal unterhalb Sargans wärmere Luft aus der Höhe zugeführt wird. Ähnliche Temperaturverhältnisse wie in Buchs sind auch an den weiter nördlich gelegenen Stationen Altstätten und Rorschach festzustellen.

Dürr (2000) vermutete, dass es sich beim Föhn zwischen Masein und Vilters, und beim Föhn im St. Galler Rheintal zwischen Fläscherberg und Vaduz, um zwei in ihren potentiellen Temperaturen verschiedene Föhnäste handelt. Diese Vermutung wurde mittels Vergleich der potentiellen Temperaturen von Bodenstationen entlang

dieser Täler aufgestellt. Dabei stellte Dürr (2000) fest, dass sich diese um etwa 2 K unterschieden, wobei die Temperaturen im St. Galler Rheintal höher waren. Dies deckt sich mit den Untersuchungen von Gutermann (1970).

Drobinski (2001) untersuchte die mögliche Strömungsaufteilung mit einem transportablen Windlidar in Vilters. Er betrachtete im Speziellen den Föhnfall 5 (2. bis 3. Oktober 1999). Um die zur Strömungsaufteilung führenden Prozesse zu untersuchen, benutzte er die Theorie von zweidimensionalen und inkompressiblen Strömungen entlang von Seitenbegrenzungen und verglich diese mit seinen Messungen. Die Messungen von Drobinski (2001) weisen auf eine Strömungsaufteilung im Raum Sargans hin.

5.2 Der Föhnfall 5 und die Strömungsaufteilung

Damit ein direkter Vergleich mit den Untersuchungen von Drobinski (2001) angestellt werden kann, wird hier der Föhnfall 5 (2. bis 3. Oktober 1999) genauer betrachtet.

Am 2. Oktober 1999 brach der Föhn auf der Linie Vättis–Weite um 05:00 UTC in Vättis durch. Es dauert anschliessend 3 Stunden, bis um 08:00 UTC der Föhn auf dem Fläscherberg weht und sich anschliessend über Luzisteig und Balzers nach Weite (Föhndurchbruch um 11:40 UTC) vorarbeitete. In Vilters brach der Föhn erst um 16:20 UTC durch, also über 8 Stunden später als auf dem Fläscherberg. Die potentiellen Temperaturen lagen nach dem jeweiligen Föhndurchbruch auf der Linie Vättis–Weite bei etwa 300 K, während sie in Vilters und Heiligkreuz bei etwa 297 K lagen. Weiter herrschte in Vilters bis kurz vor dem Föhndurchbruch Westwind.

Allein die Betrachtung der Parameter Temperatur und Wind lassen darauf schliessen, dass es beim Föhnfall 5 zu keiner Strömungsaufteilung in der Region Sargans kam. Viel mehr wird die Vermutung von Dürr (2000), dass es sich um zwei verschiedene Föhnäste in den Tälern handelt, unterstützt.

Bei der Betrachtung aller 12 Föhnfälle der MAP-SOP konnte festgestellt werden, dass der Föhn, ausser beim Föhnfall 9 (24. Oktober 1999), immer zuerst auf der Linie Vättis–Weite durchbrach. Am 24. Oktober 1999 brach der Föhn auf beiden Linien fast gleichzeitig durch. Auch die potentiellen Temperaturen unterschieden sich jeweils auf den beiden Linien.

5.3 Diskussion und Schlussfolgerung

Durch die gemachten Untersuchungen wird weiter die Vermutung erhärtet, dass es zu keiner Strömungsaufteilung im Raum Sargans kommt und es sich um zwei verschiedene Föhnäste handelt (Fig. 5.2).

Es stellt sich jedoch die Frage, warum der Windlidar und die Modelle von Drobinski (2001) auf eine Strömungsaufteilung hinweisen. Bei der Betrachtung der Modellierung der Region Sargans durch Drobinski (2001) erkennt man, dass der Fläscherberg vernachlässigt wurde. Der Fläscherberg ist jedoch ein massgebliches Hindernis dafür, dass die von Chur her kommende Strömung Richtung St. Galler Rheintal abfliessen kann.

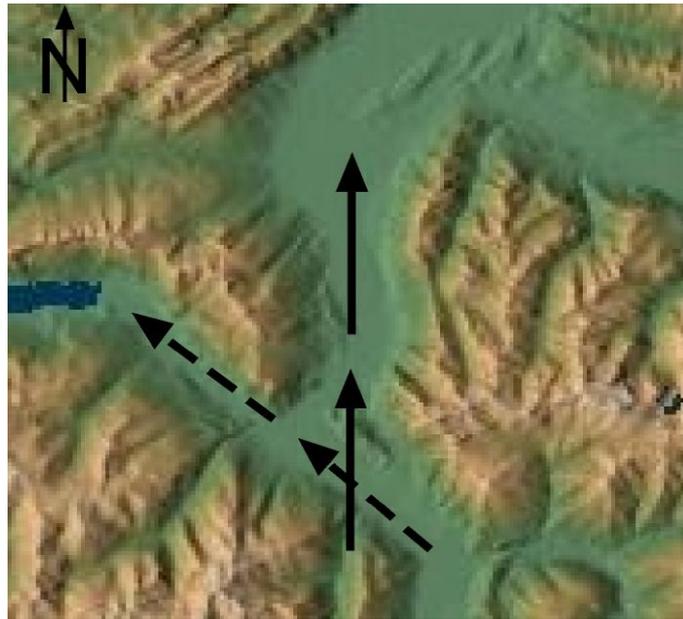


Fig. 5.2: Die zwei vermutlich auftretenden Föhnäste im Churer Rheintal/Seeztal (gestrichelter Pfeil) und im Taminatal/St. Galler Rheintal (ausgezogene Pfeile)

Weiter wurde nur der Wind betrachtet. Bei den Auswertungen der Lidar-Daten ergibt sich ein Bild wie in Fig. 5.1. Da der Bereich aus Sektor Süd bei den Auswertungen nicht ersichtlich ist, kann dies falsch interpretiert und als Strömungsaufteilung betrachtet werden. Bei der Hypothese mit zwei Föhnästen ergibt sich dasselbe Bild, falls der Sektor Süd ausser Acht gelassen wird.

Kapitel 6

Föhnthesen

In den letzten 150 Jahren wurden einige Hypothesen zum Föhn und dessen Herabsteigen in die Täler aufgestellt. Eine abschliessende, den Föhn beschreibende Theorie existiert bis heute jedoch nicht. Seit den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden auch keine neuen Föhnthesen aufgestellt. Nun stellt sich die Frage, ob wir in der heutigen Zeit der Vorhersagemodelle überhaupt eine solche Theorie benötigen. Doch immer wieder wird darauf hingewiesen, dass diejenige Föhntheorie, wie man sie in den Lehrbüchern findet, nicht korrekt sei. Die Lösung kann nicht darin bestehen, dass man diese aus den Büchern ersatzlos verschwinden lässt.

Auch diese Arbeit wird nicht eine abschliessende Föhntheorie liefern. Viel mehr sollen hier die verschiedenen Ursachen, welche für die Erwärmung und für das Herabsteigen des Föhns verantwortlich sein können, aufgelistet und im Zusammenhang mit den Föhnfällen der MAP-SOP kurz diskutiert werden.

6.1 Ursachen für die Erwärmung des Föhns

Lange Zeit wurde die Theorie vertreten, dass der Föhn nur deshalb so warm sei, weil er aus der Sahara stamme und als ein Ausläufer des Scirocco zu betrachten sei. Diese Theorien vertraten in der Schweiz Conrad Escher von der Linth und Oswald Heer. Helmholtz (1865) jedoch konnte zeigen, dass thermodynamische Effekte der Grund für die Temperaturerhöhung des Föhn sind. Unabhängig von Helmholtz wurde diese Ansicht auch durch den österreichischen Meteorologen Julius Hann (1866) vertreten. Billwiller (1971) bemerkt hierzu, dass Espy, ein amerikanischer Meteorologe, bereits um 1835 den wahren Grund für die Erwärmung und Austrocknung von absteigender Luft gefunden hatte.

Viele Lehrbücher gehen von der so genannten „klassischen Föhntheorie“ aus. Dabei wird die Erwärmung des Föhns immer wieder auf die durch freiwerdende latente Wärme beim Aufsteigen der Luftmassen im Luv der Alpen zurückgeführt. Jedoch bemerkte bereits Hann (1885), dass es nicht immer zu Niederschlag auf der Luvseite der Alpen kommen muss. Da schon die Kompression von sinkender Luft zu relativ warmen Temperaturen und Trockenheit führen kann.

Mit statistischen Daten zeigte Seibert (1990), dass die populäre Version der „Thermodynamischen Föhntheorie“, welche von einer Erwärmung des Föhns durch freiwerdende latente Wärme und einem Aufsteigen von Luftmassen aus der Poebene ausgeht, nicht korrekt ist. Viel mehr ist der Ursprung des Föhns 2'000 bis 2'500 m.ü.M. über der Poebene zu suchen, während gleichzeitig die Luftmassen direkt über Grund blockiert bleiben. Der Grund für die Temperaturdifferenz zwischen Süd und Nord während Föhn besteht in der stabilen Schichtung im Süden der Alpen.

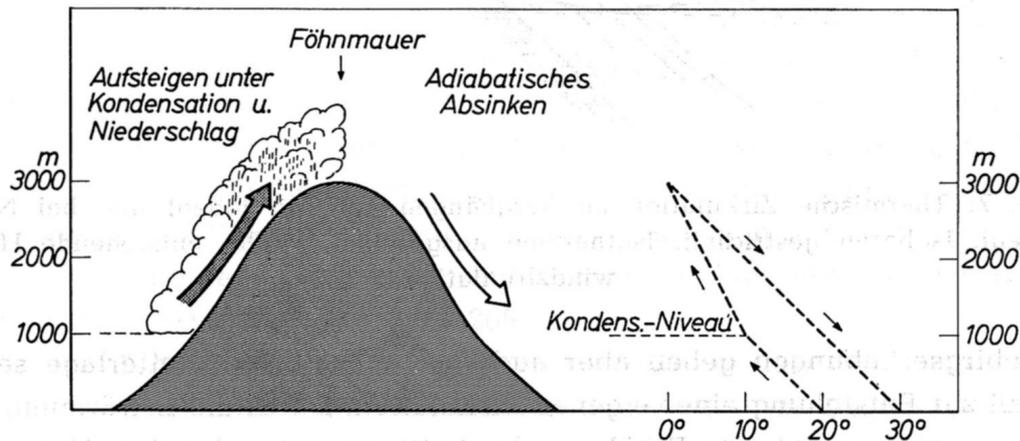


Fig. 6.1: Schematische Darstellung der „thermodynamischen Föhntheorie“ wie sie in vielen Lehrbüchern zu finden ist (in Schamp 1964).

Seibert (1990) wies weiter darauf hin, dass die Theorie von Hann immer mehr vereinfacht, verstümmelt und modifiziert wurde. In vielen Textbüchern (Beispiele aus Seibert (1990): Albright 1943, Donn 1975, Liljequist und Cihak 1984, Ficker und de Rudder 1943, Schamp 1964) wird die thermodynamische Föhntheorie ähnlich der Fig. 6.1 dargestellt. Auch Hoinka (1990) wird Hann nicht gerecht, wenn er schreibt, dass im Luvbereich über Oberitalien Stauniederschlägen von entscheidender Bedeutung für den von Hann (1866) beschriebenen Föhnprozess sind. Schamp (1964) weist sogar das in Fig. 6.1 zu sehende Schema Hann zu.

Seibert (1990) zählt die folgenden Einwände gegen diese vereinfachte Theorie auf:

1. Nur Niederschlag produziert einen Nettogewinn von Energie und es gibt Föhnfälle ohne Niederschlag auf der Alpensüdseite.
2. Die quantitativen Effekte des Niederschlags sind zu klein (maximale Erwärmung der Föhnluft zwischen 1 und 2 K).
3. Die äquivalentpotentielle Temperatur θ_e bleibt entlang einer Trajektorie erhalten, wenn die einzigen adiabatischen Effekte die Freigabe oder Aufnahme von latenter Wärme sind. Entlang einer Föhntrajektorie sind die anderen diabatischen Effekte klein. Publierte Querschnitte durch die Alpen (Steinacker 1983, Seibert 1984 und 1985) zeigen jedoch unterschiedliche äquivalentpotentielle Temperaturen in der Poebene und nördlich der Alpen. Der Föhn steigt also nicht von der Poebene aus auf.
4. Anstelle von südlichen Winden, wie sie nach der „thermodynamischen Föhntheorie“ erwartet werden, wurden nördliche Winde in den Tälern der Schweiz beobachtet (z.B. Frey 1953).

Aber auch nach der Anerkennung von Hann's thermodynamischen Föhntheorie wurden weitere Gründe für die Erwärmung des Föhns gesucht. So war für Weber (1904) der Wärmeaustausch am Erdreich für die Eigenart des Föhns ausschlaggebender. Seiner Ansicht nach wird die ruhende oder langsam über das Gebirge ziehende Luft von der Erdoberfläche aufgewärmt. Diese Luft sei nun zu warm, wenn sie den Gebirgskamm erreicht hat, da diese sich aufgrund dieser Erwärmung nicht trockenadiabatisch abgekühlt hat. Die Luft wird daraufhin so schnell ins Tal gezogen, dass sie unterwegs keinen Wärmeaustausch mit der Erdoberfläche erfährt.

Gemäss Whiteman (2000) tragen vier Faktoren zur Erwärmung und der Austrocknung des Föhns bei (Fig. 6.2):

1. Die Luft, welche auf der Leeseite absteigt, wird durch Kompression erwärmt und getrocknet.
2. Strömen Luftmassen vom Boden über das Hindernis, wird latente Wärme bei Wolkenbildung und Niederschlag auf der Luvseite frei.
3. Warme, absteigende Luft auf der Leeseite des Hindernisses kann die kalte und feuchte Luftmasse ersetzen.
4. Die turbulente Föhnströmung verhindert die Bildung der nächtlichen Inversion auf der Leeseite, somit bleiben die Temperaturen in der Nacht erhöht.

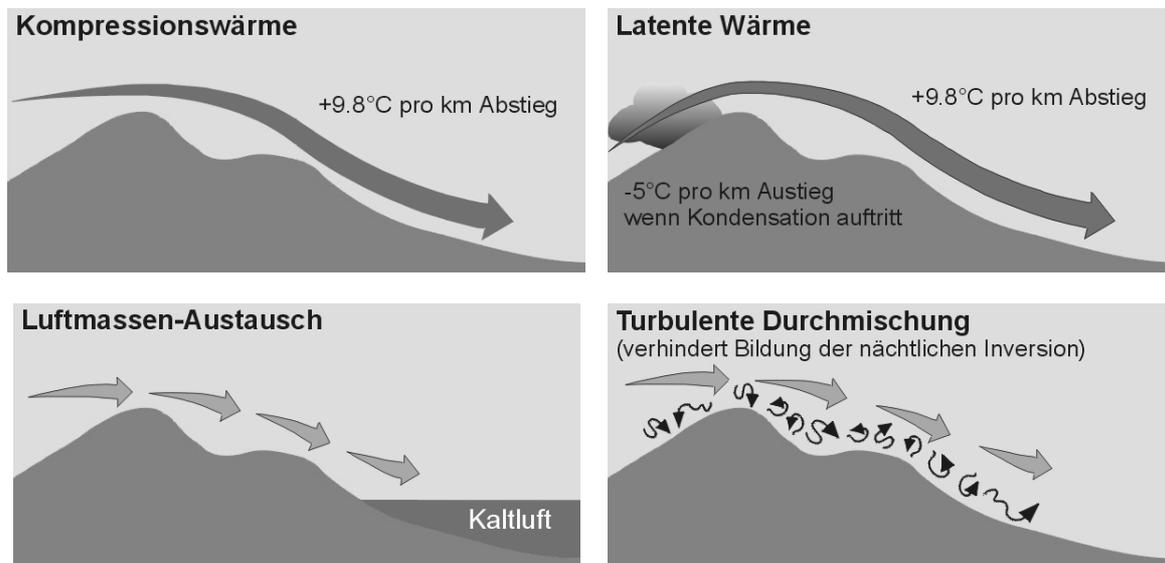


Fig. 6.2: Die Faktoren, welche zur Erwärmung und Austrocknung des Föhns führen (nach Whitemann 2000).

Hoinka (1990) weist darauf hin, dass die „klassische“ Föhntheorie zwar eine mit dem Föhn einhergehende mögliche Temperaturzunahme erklärt, jedoch nicht die Böigkeit und die Stärke des Föhns.

6.2 Hypothesen zum Hinuntersteigen des Föhns in die Täler

Kuhn (1989) beantwortete die von mehreren Meteorologengenerationen gestellte Frage, warum der Föhn in die Täler absteigt mit der Gegenfrage, warum das der Föhn dies nicht tun sollte. Er fügte hinzu, dass Föhn und Frontdurchgänge schon unter den verschiedensten Begleitumständen gezeigt hätten, dass sie Luftreste aus den Becken der Alpen beseitigen können. Dennoch wird die Frage so formuliert, als ob man das gar nicht erwarte.

Hier werden nun alle bekannten Hypothesen, welche das Hinuntersteigen des Föhns zu erklären versuchen, in der Reihenfolge ihrer Entstehung aufgeführt.

6.2.1 Aspirationstheorie

Diese dynamische Föhntheorie stammt von Wild (1868 und 1901) und von Streiff-Becker (1925 und 1948). Damit es zu Föhn kommen kann, benötigt es einen Jet über den Alpen, welcher an seiner Unter- und Oberseite Luft ansaugt. Bedingt durch die Topographie kann in den Alpentälern keine Luft von der Seite nachströmen. Weiter ist die stabile Kaltluft in den Tälern zu schwer, als dass diese nachfließen kann. Als Ersatz für die mitgerissene Luft steigt die Höhenströmung in die Täler ab.

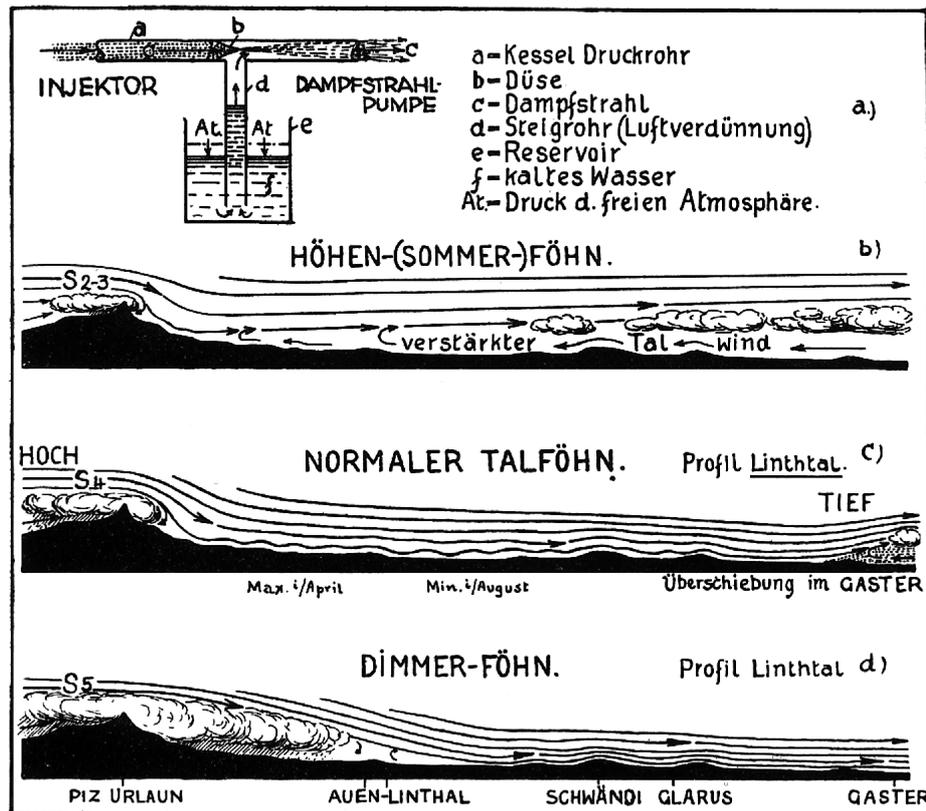


Fig. 6.3: Haupttypen des Föhnwindes, schematisch dargestellt anhand von Stromlinien im Profil Glarneralpen-Linthtal-Gaster (nach Streiff *et al.* 1984).

Streiff benutzte als Begründung für die Luftverdünnung die Tatsache, dass bei Beginn einer Föhnlage der auf gleiche Höhe reduzierte Luftdruck im Talhintergrund meist etwas tiefer ist als am Talausgang oder weiter draussen im Mittelland. Es ist zu beachten, dass die Beobachtungen von Streiff aus dem Glarnerland stammen.

Streiff-Becker fragte sich (Streiff *et al.* 1984), wieso beim heftigen Südwind die hintersten Teile des Sernf- und Linthtales vom Sturm ergriffen werden, während in den vordern Talstücken der N-Wind regiert. Oft bemerkte der Forscher, wie schwierig es für einen Autodidakten ist, sich bei den Fachkollegen durchzusetzen und anerkannt zu werden. Besonders hart traf es ihn, als bei einer Föhnwind-Diskussion unter Fachleuten seine neuen Erkenntnisse stillschweigend übergangen wurden (Ficker, Prof. Lehmann).

Der grösste Erfolg für den unermüdlichen Streiter war eine internationale Tagung für alpine Meteorologie in Davos vom 11.-14. April 1954, als sein eifrigster Widersacher,

Ficker, bei einer Rede erklärte „...und über die Dynamik des Föhn hat uns Streiff-Becker eine sehr schöne Erklärung gegeben.“ Damit wurde seine Föhntheorie offiziell anerkannt.

6.2.2 Passive Ersatzströmung

Die Theorie von Billwiller (1878 und 1899), welche von Ficker (1912 und 1943) modifiziert wurde, geht davon aus, dass die zur Depression über dem Atlantik abfließende Luft im Alpenraum nur durch Luft von oben und vom Alpenkamm ersetzt werden kann. Denn auch hier verhindert die Topographie, dass Luft von der Seite nachfließen kann. Der Föhn kann als Ersatzströmung für die abfließende Luft betrachtet werden. Kuhn (1989) bemerkt hierzu, dass Billwiller auch den Ausdruck „Aspiration“ verwendete, was manchmal zu Verwirrungen führen konnte. Diese Theorie wurde auch von Hann (1885) und Weber (1904) vertreten.

Ficker (1910a) unterscheidet drei Entwicklungsstadien des Föhns:

1. **Vorstadium:** Ein Kaltluftsee lagert bei antizyklonalen Verhältnissen in den Tälern, der in der Höhe durch eine antizyklonale Abgleitfläche mit Temperaturzunahme und Feuchtigkeitsabnahme nach oben begrenzt ist.
2. **Antizyklonalstadium:** Die Kaltluft fließt aus den Tälern ab, und zum Ersatz strömt die antizyklonale Warmluft nach. Im Moment, da die Obergrenze der Kaltluft unter eine Beobachtungsstation sinkt, tritt hier der typische Temperatur- und Feuchtigkeitssprung ein, und der Föhn hat damit eingesetzt.

Auf der Alpensüdseite sind gleichzeitig noch antizyklonale Verhältnisse vorhanden, und die auf der Leeseite absteigende Luft fließt dem Alpenkamm noch horizontal zu.

3. **Stationäres Stadium:** Auf der Luvseite entwickelt sich eine aufsteigende Luftbewegung, und es tritt dort Bewölkungszunahme und Niederschlag ein.

Nach dieser Hypothese müssten Orte, welche sich auf gleicher Höhe befinden, auch gleichzeitig in die Föhnströmung kommen.

6.2.3 Solenoidtheorie

Für Frey (1945) ist das Solenoidfeld verantwortlich für das Absteigen des Föhns in die Täler. Ein Solenoid besteht dann, wenn die Flächen gleichen Druckes und gleicher Temperatur gegeneinander geneigt sind. Frey zeigte anhand von Föhnmessungen, dass die Temperatur auf gleicher Höhe Richtung Norden zunimmt und der Druck gleichzeitig fällt. Frey (1945) betont, dass die grosse kinetische Energie des Föhns nicht allein auf der Grösse des Druckgradienten beruht, sondern im Wesentlichen eine Folge des gut entwickelten Solenoidfeldes nordwärts der Alpen ist. Die Besonderheiten des Föhnverlaufes in verschiedenen Gebieten seien in erster Linie durch die Geländebeschaffenheit und den damit verbundenen Änderungen des Solenoidfeldes bestimmt.

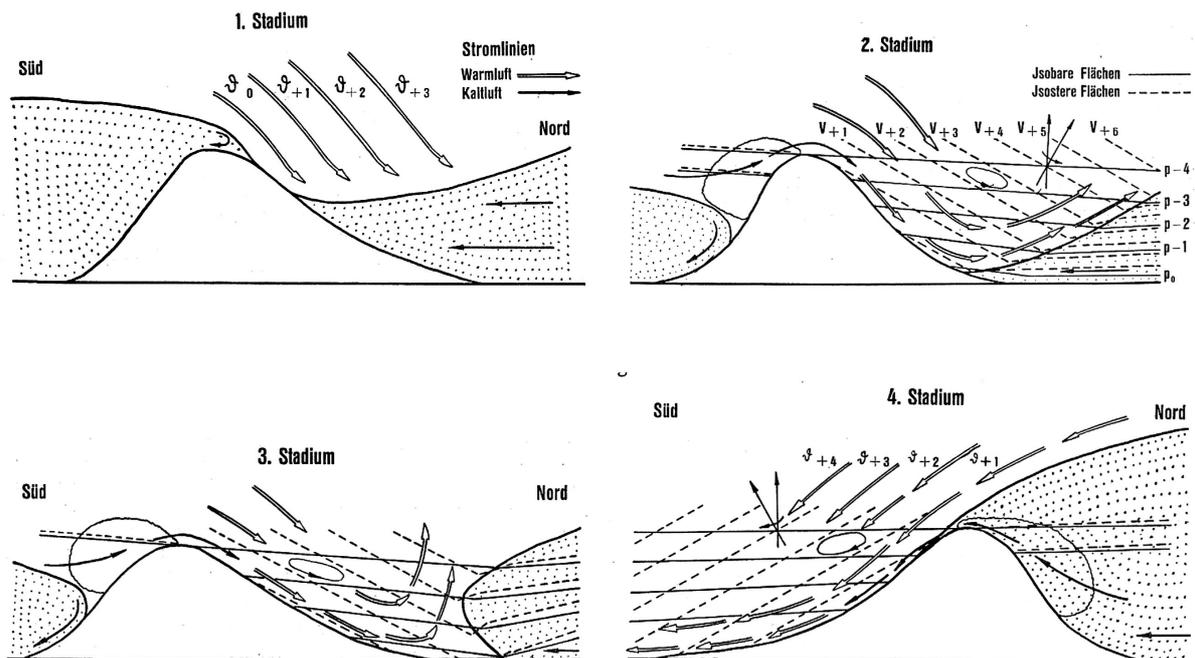


Fig. 6.4: Die Entwicklung des Föhns nach Frey (1945)

6.2.4 Prozesse in der Föhnmauer

Den Auslöser für das Absteigen des Föhns sahen Rossmann (1950) und Schüepp (1952) in der Föhnmauer. Die Föhnmauer entsteht dann, wenn die Bewölkung südlich der Alpen über den Alpenkamm bis in die oberen Bereiche der Nordtäler tritt. Beginnt die von Süden her wehende Luft im Lee abzustiegen, fängt die Verdunstung von mitgeführten Wolkentröpfchen an. Die umgebende Luft wird dadurch abgekühlt. Da diese Luft kälter als die Luft ausserhalb der Föhnmauer ist, fließt diese unter dem eigenen Gewicht als Bora in die Nordtäler ab. Sind alle Wolkentröpfchen verdunstet, erwärmt sich die Luft trockenadiabatisch. Die zu Beginn gewonnene Bewegungsenergie lässt die erwärmte Boraströmung bis weit in die Täler vorstossen.

6.2.5 Auskühlung der Hangatmosphäre

Berg (1952) sah aufgrund von empirischen Messdaten den Grund für den Föhneinsatz in der nächtlichen Auskühlung der Hangatmosphäre. Durch Ausstrahlung werden die Luftmassen abgekühlt und fließen dann als Bora Richtung Nordtäler. Der Föhn ersetzt dann die abgeflossene Hangatmosphäre und stösst bis in die Täler hinab.

6.2.6 Schiessende Strömung

Schweitzer (1952 und 1953) stellte die Theorie der schiessenden Strömung auf. Die Föhnströmung wird als eine Flachwasserströmung über ein Hindernis betrachtet.

Die Föhnströmung muss bei dieser Theorie als nach oben abgegrenzter Kanal vorgestellt werden. Eine starke Inversion bildet die Abgrenzung in der Atmosphäre ungefähr zwischen 2'000 m.ü.M. und 4'000 m.ü.M. Die Luft, welche dem Druckgradienten folgend über die Pässe nach Norden fließt, ist in der Horizontalen durch die

Topographie eingengt. Die Strömung zwischen der Inversion oben und der Kaltluft unten wird nun durch das Druckgefälle von Süd nach Nord, welches sich durch ein von Nordwesten her näherndes Tief vergrößert, beschleunigt. Die geschieht so lange, bis die so genannte kritische Geschwindigkeit erreicht wird. Zu diesem Zeitpunkt sind die Advektionsgeschwindigkeit und die Ausbreitungsgeschwindigkeit von wellenförmigen Strömungen identisch. Weiter ist die maximale Förderleistung durch einen Querschnitt des hypothetischen Kanals erreicht. Wird die Strömung weiter beschleunigt, nimmt die Förderleistung wieder ab und die Inversion senkt sich im Lee Richtung Erdoberfläche. Hier spricht man von einer überkritischen Geschwindigkeit oder Strömung. Ist die Luft stabil geschichtet, sinkt die Luft mit Arbeitsaufwand ab. Ein Teil der gewonnen kinetischen Energie wird stromabwärts vom Hindernis in einen hydraulischen Sprung turbulent in Wärmeenergie umgewandelt. Bei dieser Theorie beginnt der Föhn immer zuerst an den Pässen und endet auch dort.

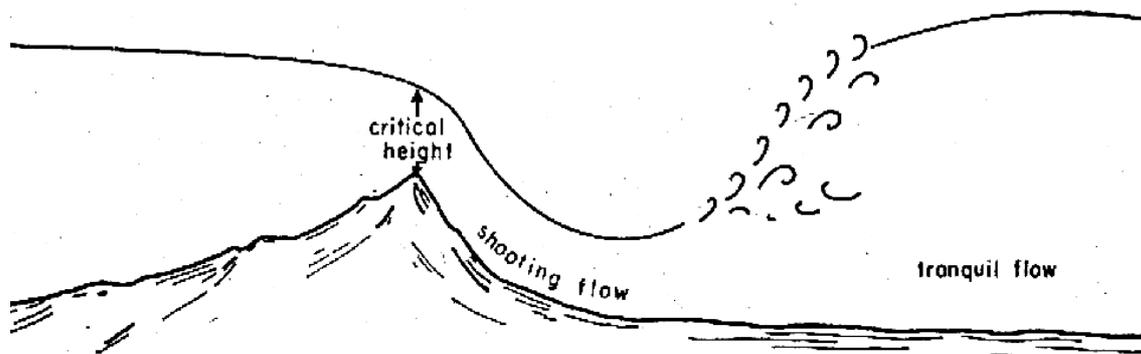


Fig. 6.5: Schematische Darstellung einer hydraulischen Strömung über einen Bergkamm (aus Brinkmann 1971)

Diese Theorie verwendet sehr einfache Randbedingungen und berücksichtigt weder Feuchteprozesse noch Phänomene aufgrund der thermischen Schichtung der Atmosphäre.

6.2.7 Blocking-Theorie

Scorer und Klieforth (1959) kamen im Zusammenhang mit einer mathematisch-physikalischen Untersuchung von Schwerewellen und Rotoren im Lee eines Gebirgshindernisses auf die Vermutung, dass ab einer kritischen Höhe des Gebirgshindernisses die untersten Luftschichten im Luv des Gebirges blockiert sind, das heisst sie können das Gebirge nicht überströmen. Dadurch kann nur diejenige Luft, welche über die blockierten Luftmassen strömt, im Lee des Hindernisses bis in die Täler vorstossen. Da die Atmosphäre auf der Luvseite stabil geschichtet ist, hat diese aus der Höhe stammende Luft nach dem Abstieg in die Täler eine höhere potentielle Temperatur als die blockierte Luft im Luv des Gebirges. Der Unterschied der potentiellen Temperatur zwischen Lee und Luv ergibt sich somit nur durch die Tatsache, dass im Luv stabile Kaltluft liegt und im Lee Luft aus höheren Bereichen der Atmosphäre hinabsteigt.

Scorer und Klieforth (1959) waren der Meinung, dass Leewellen mit grossen Amplituden für die Entstehung gewisser Föhnwinde verantwortlich sind. Diese Ansicht wird auch von Whiteman (2000) vertreten. Scorer (1951) zeigte, damit in einer Luftströmung Wellen auftreten, muss eine Abnahme des Parameters l^2 mit der Höhe stattfinden.

$$l^2 = \frac{g \cdot \beta}{U^2} - \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}$$

wobei g = Erdbeschleunigung

$$\beta = \text{statische Stabilität} = \frac{1}{\theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

U = Windgeschwindigkeit senkrecht zum Alpenkamm

z = Höhe

θ = potentielle Temperatur

6.3 Diskussion der Hypothesen

Mit Hilfe des Reusstalföhns hat Truog (1986) gezeigt, dass für den Föhndurchbruch in Altdorf weniger die Höhenwinde, sondern vor allem die Druckunterschiede verantwortlich sind. Als wesentlichen Faktor betrachtet er deshalb den Unterschied des Geopotentials auf 850 hPa, respektive den daraus resultierenden Wind. Weiter wies er darauf hin, dass der über dem Gotthard kanalisierte und damit verstärkte Wind wegen einer oft sehr stabilen Schichtung in Kammhöhe (2'500 - 3'000 m.ü.M.) nicht nur seitlich, sondern auch nach oben kanalisiert ist. Die Strömung kann deshalb auch weiter nördlich im Reusstal nicht ausfächern. Seitlich sind weitere Bergzüge vorhanden und nach oben verhindert eine Inversion Durchmischung. Diese Beobachtungen sprechen für die Hypothese der Schiessenden Strömung.

Das Hauptargument von Wild gegen die Theorie von Billwiller (1878) war, dass diese nicht den früheren Beginn des Föhns im Talhintergrund erklären konnte. Ficker (1910b) löste diesen Einwand damit, dass er aufgrund der Innsbrucker Föhnstudien zeigen konnte, dass bei Föhnlagen Kaltluft aufgrund des Dichteunterschiedes abfließt. Dadurch beginnt der Föhn zuerst im Hintergrund des Tales. Dieses Abfließen der Kaltluft konnte jedoch im St. Galler Rheintal während MAP nicht immer beobachtet werden. Ganz im Gegenteil, es fließt sogar Kaltluft aus Norden Richtung Süden, während sich der Föhn im Süden durchsetzt. Dies wurde unter anderem am 22. Oktober 1999 (Föhnfall 8) beobachtet. In Balzers brach der Föhn um 08:30 UTC durch, während in Vaduz zum gleichen Zeitpunkte ein leichter Nordwind wehte. Dieser hielt in Vaduz bis um 10:40 UTC an, als der Föhn durchbrach.

Auch beim Föhnfall 7 ist kein Abfließen der Kaltluft zu beobachten. Weiter war bei diesem Fall keine Föhnmauer auf dem Fläscherberg zu beobachten, welche ein Absteigen der Föhnströmung verursachte.

Da Hann ein Verfechter der Theorie von Billwiller war, liessen sich die meisten Meteorologen dazu verleiten, die Wild'sche Hypothese abzulehnen (Kuhn in Streiff *et al.* 1984). Weiter schreibt Kuhn, dass bis heute keine der Föhnthesen von Billwiller, Wild und Streiff auf strömungstheoretischer Grundlage eindeutig bewiesen oder widerlegt worden ist.

Das Beispiel von Frey gegen die Befürworter der „Schiessenden Strömung“ ist der Föhnfall vom 13.12.1981, als gleichzeitig Nord- und Südföhn herrschte. Gleichzeitig gibt Kuhn (in Streiff *et al.* 1984) Wild recht, dass vor dem Talföhn eine Höhenströmung aus Süden vorhanden sein muss. Weiter bemerkt Brinkmann (1971), dass diese Theorie nur auf ein System mit zwei homogenen Schichten angewendet werden kann und keine Leewellen zulässt.

Zur Theorie von Scorer und Klieforth (1959) führte Brinkmann (1971) an, dass diese Theorie in der Praxis nicht brauchbar sei, da Schwierigkeiten bei der geeigneten Definition von l^2 in Abhängigkeit der vorhandenen Daten in der Atmosphäre und im Hinblick auf die hohe Sensitivität von „mountain wave solutions“ bezüglich der Charakteristika der Luftströmung. Aus diesem Grund folgerte Vergeiner (1971), dass Resonanz-Leewellen nicht ein Teil des Mechanismus von Föhnwinden seien.

Mörikofer (1950) führte an, dass bei den divergierenden Anschauungen (Föhnthesen) zwar durchwegs richtige Beobachtungen zu Grunde liegen, dass aber auf Einzelheiten des Föhnablaufes zu grosses Gewicht gelegt worden ist. Daher erklärt es sich, dass von den einzelnen Forschern und für die verschiedenen Föhntäler jeweils eine andere Teilerscheinung als Hauptursache für das Herabsteigen des Föhns angesehen wurde, während die gemeinsamen Züge zu wenig beachtet wurden.

6.4 Schlussfolgerungen

Mörikofer (1950) fasst in seinen oben aufgeführten Aussagen die Problematik am besten zusammen. Bei den Versuchen den Föhn zu beschreiben, konzentriert man sich auf Einzelheiten des Föhnablaufes, aber auch auf verschiedene Täler. Während der MAP-SOP wurde unter anderem festgestellt, dass sich das Rheintal und das Brandnertal während Föhn sehr unterschiedlich verhielten (Steinacker *et al.* 2002). Die Strömung im Brandnertal wurde von Luftmassen gebildet, welche eine höhere potentielle Temperatur als im Rheintal aufwiesen. Steinacker *et al.* (2002) schlossen daraus, dass der Föhn im Brandnertal sehr gut mit der klassischen Föhntheorie von Hann (1866) übereinstimmt und die Luftmassen während einer südlichen Strömung aus höheren Schichten stammen, als diejenigen im Rheintal.

Es konnte in dieser Arbeit auch ein Unterschied zwischen dem Rheintal und dem unterem Reusstal aufgezeigt werden. Konnten doch die typischen Druckschwankungen von 300 bis 400 Sekunden vor Föhndurchbrüchen, welche auf Schwereellen schliessen lassen, im Rheintal nicht nachgewiesen werden.

Es muss bei der Suche einer Föhntheorie in Betracht gezogen werden, dass es nicht nur den einen typischen Föhn gibt. Man kann unterscheiden zwischen Dimerföhn, seichten Föhn und hochreichenden Föhn. Auf diesen Unterschied geht zum Beispiel die Aspirationstheorie ein, nicht aber alle Hypothesen. Hierzu vertritt Brinkmann (1971) die Ansicht, dass es mehr als eine Ursache für die Fallwinde und damit mehr als ein Typ von Fallwind gibt.

Der Ansatz für eine abschliessende Föhntheorie muss darin gesucht werden, dass alle bekannten Hypothesen gleichzeitig betrachtet werden. Keine der Hypothesen ist falsch. Aber erst als Einheit vermögen sie das Herabsteigen des Föhns zu erklären (Fig. 6.6). Die offene Frage bleibt, wie stark die einzelnen Ursachen daran beteiligt sind.

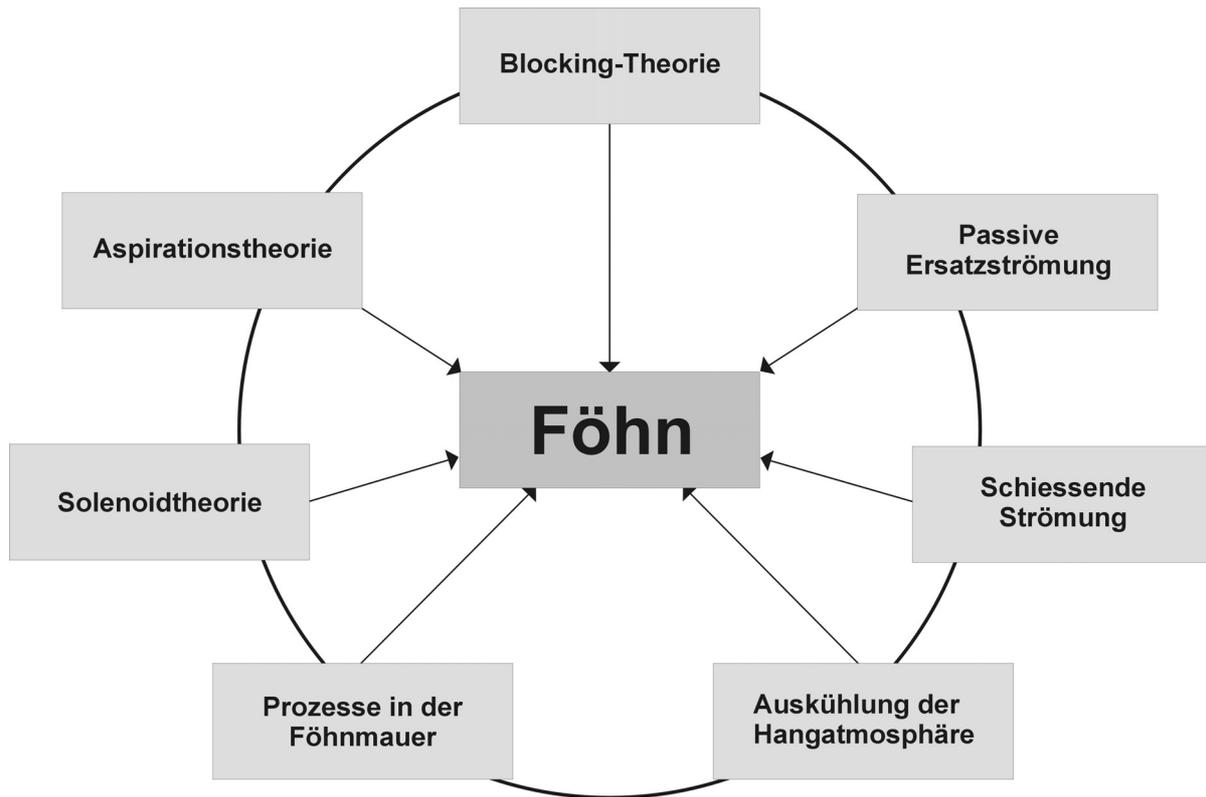


Fig. 6.6: Die Hypothesen erklären als Einheit das Herabsteigen des Föhns.

Kapitel 7

Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden einige Teilaspekte des Föhns behandelt. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand dabei die Beseitigung des Kaltluftsees durch Föhn. Zur Beantwortung der einzelnen Fragestellungen betrachtete man vor allem Daten von Bodenstationen, von Flügen des Motorseglers Dimona und von einzelnen Radiosondierungen. Trotz der enormen Datenmenge aus der MAP-SOP und der damit genauen Beschreibung der Verhältnisse im Rheintal, konnten einige Fragen noch nicht abschliessend beantwortet werden.

Bestimmung von Föhnfällen

Zur Bestimmung von Föhnfällen an einzelnen Bodenstationen müssen einheitliche, allgemein anerkannte Kriterien erarbeitet werden. Dabei sollte man in Betracht ziehen, dass nicht nur die klassischen Parameter Temperatur, Wind und Feuchtigkeit zur Bestimmung der Föhnfälle herangezogen werden. Piringer *et al.* (2001) haben bereits nachgewiesen, dass Ozon ein weiteres Unterscheidungsmerkmal für die Kaltluft vom darüberwehenden Föhn ist.

Erosion des Kaltluftsees

Neben dem Wärmefluss muss der Impulsfluss berechnet werden, um die Erosion des Kaltluftsees genauer zu untersuchen. Die vom Motorsegler Dimona gesammelten Daten liefern dafür eine optimale Grundlage. Zusätzlich können Auswertungen der Radiosondierungen von Diepoldsau dabei helfen, den Ablauf der Erosion eingehender zu beschreiben. Die Berechnungen verschiedener Werte, wie zum Beispiel der Brunt-Väisälä-Frequenzen und der Richardson-Zahlen, aus allen Sondierungen während Föhnfällen, können das Verständnis der Vorgänge in der Grenzschicht Kaltluft – Föhn verbessern.

Strömungsaufteilung im Raum Sargans

Eine Auswertung der Radiosondierungen von Malans, Heiligkreuz und Buchs-Grabs könnte sich lohnen. Mit Hilfe dieser Daten kann der Massenfluss innerhalb der Täler abgeschätzt werden. Falls es zu einer Strömungsaufteilung kommt, müsste nach der Verzweigung der Täler in Richtung Seeztal ein Massenverlust erkennbar sein.

Föhnthesen

Die Diskussion der Föhnthesen und der Vergleich mit den verschiedenen Fällen der MAP-SOP muss ausführlicher sein. Die Anzahl der Föhnfälle und die gesammelte Datenmenge ermöglichen, dass das Mass der Beteiligung der einzelnen Ursachen für das Herabsteigen des Föhns bestimmt werden kann. Dies führt möglicherweise zu einer Theorie, welche das Herabsteigen im Rheintal zu erklären vermag.

Abschliessend soll angemerkt werden, dass Modellbetrachtungen allein bis jetzt noch nicht alle Aspekte des Föhns beschreiben. Einzelbetrachtungen, zum Beispiel von Bodenstationen oder Radiosondierungen, dürfen nicht vernachlässigt werden. Die Modelle gestatten uns vieles zu untersuchen, was sonst nur mit einer grossen Anzahl von Messstationen möglich ist. Aber die Natur in der Natur selber zu beobachten, darf dabei nicht vergessen werden.

Anhang A: Föhnbegriffe

Im Laufe von Diskussionen innerhalb von FORM stellte man fest, dass einzelne Föhnbegriffe nicht korrekt angewandt werden oder sogar neue entstanden sind. Dies führte zu einer Sammlung dieser Begriffe und ihrer Definitionen. Eine möglichst vollständige Liste ist hier zu finden. Sie beginnt mit „Föhn“ und wird alphabetisch weitergeführt. Die einzelnen Definitionen sind chronologisch aufgelistet. Dabei handelt es sich jeweils, wenn nicht anders vermerkt, um Zitate aus der angegebenen Literatur. In den Untertiteln wird neben dem deutschsprachigen Begriff in Klammern der entsprechende englische Term aufgeführt.

FÖHN (FOEHN)

Hann (1906)

Ursprünglich war der Föhn die volkstümliche Bezeichnung eines sehr warmen und trockenen Lokalwindes, der in den inneren Alpentälern, im Voralberg, der Nordostschweiz, im Wallis, namentlich in der kälteren Jahreshälfte häufiger und mit besonders auffallenden Eigenschaften auftritt. Nachdem man die lokale, durch das Gebirge selbst bedingte Entstehung dieses warmen trockenen Windes erkannt hat, fand man, dass auch andere Gebirge solche warme trockene Winde haben, wie die Alpen, und bezeichnet mit Recht auch diese als Föhnwinde.

Das charakteristische der Föhnwinde ist, dass sie vom Gebirgskamm oder von einem Gebirgssattel herab wehen und dabei trocken und warm sind, auch wenn sie von schneebedeckten oder vergletscherten Höhen kommen. Sie folgen der Talrichtung und haben deshalb nicht überall die gleiche Richtung. Im Allgemeinen kann jede Windrichtung als Föhn auftreten, es kommt nur auf die Richtung des Gebirgszuges an, welcher denselben erzeugt. Nur sind bei Winden aus niedrigen Breiten die Föhn-eigenschaften stets viel intensiver.

Die Haupteigenschaften des Föhn sind grosse Temperaturerhöhung, besonders im Winterhalbjahr, und erhebliche Abnahme der relativen Feuchtigkeit.

Lammert (1920)

Nach der Definition des bekannten Föhn-Forschers H. v. Ficker darf man streng genommen nur dann von Föhn sprechen, wenn „die potentielle Temperatur in einem Talorte gleich jener in höheren, föhnbestrichenen Orten geworden ist“. Bei Föhn treten die typischen Merkmale Erwärmung und Trockenheit der Luft an der Leeseite auf.

Streiff-Becker (1931)

Der Föhn des Alpentales ist warm und sehr trocken. Er ist ein ausgesprochener Fallwind, der gerade am stärksten und häufigsten die hintersten, tiefliegenden Talgründe heimsucht, die infolge ihrer Lage am Nordfusse hoher, steiler Bergmauern am besten gegen den Südwind geschützt sein sollen.

Hinweis: Diese Definition führte Streiff-Becker zur Unterscheidung des Alpentalföhns (→ Talföhn) und des → Alpenvorlandföhns ein.

Schüepp (1950)

Wärme, Trockenheit und Klarheit der Luft sind zwar Begleiterscheinungen des echten Föhns, genügen aber allein nicht zu seiner Charakterisierung, da sie auch bei anderen Wetterlagen auftreten. Wichtig ist vor allem die Überströmung eines Gebirgszuges. Erst hinter diesem Hindernis entsteht in den Tälern die stürmische, stossweise Strömung, die wir als Föhn bezeichnen.

American Meteorological Society (1959)

Ein warmer und trockener Wind auf der Leeseite eines Gebirgskammes. Die Wärme und die Trockenheit der Luft resultiert aus der adiabatischen Kompression durch das Absteigen an den Berghängen. Der Föhn ist für fast alle Gebirge charakteristisch.

Schamp (1964)

Warmtrockener Fallwind auf der Leeseite der Alpen. Der Begriff wurde auf alle entsprechenden Windscheinungen im Lee hoher Gebirge übertragen.

Brinkmann (1971)

Der Föhn ist ein warmer und trockener Fallwind auf der Leeseite eines Gebirgskammes.

Die Haupteigenschaft dieses Windes sind hohe Temperaturen und tiefe relative Luftfeuchtigkeit. Temperatur- und Feuchtenwechsel zu Beginn und am Ende des Föhns sind manchmal sehr schnell und im Falle des Alpenföhns teilweise auf die involvierte warme Luft aus Süden zurückzuführen.

Weiter sind Föhnwinde bekannt für ihre Heftigkeit und Böigkeit. Aber die Grössenordnung von beiden ist zu einem gewissen Teil abhängig vom Standort der Messinstrumente in Bezug auf die Topographie.

Hinweis: Brinkmann (1970) benutzte auch synoptische Kriterien zur Definition, dies aber vor allem im Zusammenhang mit dem Chinook. Die Strömung oberhalb des Gebirges muss senkrecht zum Kamm liegen und das Druckfeld muss eine → Föhnase oder einen -keil über dem Gebirge zeigen.

Barry (1981)

Er definiert den Föhn über die Beobachtungen an einer Bodenstation. Das heisst, bei Föhn muss der Wind aus Richtung der Berge kommen und zu Beginn muss ein abrupter Anstieg der Temperatur bei gleichzeitiger Abnahme der relativen Feuchte beobachtet werden.

Seibert (in Kuettner 1982)

Traditionell ist der Föhn ein Phänomen, welches am Boden oder innerhalb der Talatmosphäre beobachtet oder definiert wird. An einer Bodenstation kann der Föhn aufgrund der drei wohlbekanntesten Kriterien bestimmt werden:

1. Böiger Wind aus Süden setzt ein,
2. plötzlicher Anstieg der Temperatur, und
3. gleichzeitiger Rückgang der Feuchte.

Seibert betont, dass die Windrichtung ein wichtiges Kriterium für Föhn ist. Sie hängt aber von der lokalen Topographie ab und kommt nicht immer aus Sektor Süd. Weiter

sind diese Kriterien gut anwendbar auf Stationen auf dem Talgrund, geht man jedoch höher hinauf, werden die Auswirkungen geringer. An einer Gipfelstation erkennt man in der Temperatur und Feuchte keine Effekte mehr und auch keinen jähen Wechsel in der Windrichtung. Darum darf in der freien Atmosphäre nicht von Föhn gesprochen werden.

Meiers kleines Lexikon (1987)

Warmer, trockener und meist stark böiger Fallwind auf der N-Seite (Südföhn) bzw. S-Seite (Nordföhn) der Alpen, allgemein auf der Leeseite hoher Gebirge. Er entsteht, wenn Luft ein Gebirge überströmt.

Je höher die überströmten Gebirgszüge, umso ausgeprägter sind die Föhnerscheinungen. Der Südföhn bringt gewöhnlich höhere Temperaturanstiege (infolge höherer Ausgangstemperatur), während der Nordföhn mehr durch seine Trockenheit charakterisiert wird.

Das Auftreten von Föhn ist an eine bestimmte Luftdruckverteilung mit charakteristischer Isobarendeformation (→ Föhnnase) und die daraus resultierende Windverteilung gebunden: Der Südföhn der Alpen tritt bei Winden aus südlicher Richtung, der Nordföhn bei Winden aus nördlicher Richtung auf.

Hoinka (1990)

Im Lee von Gebirgen werden starke böige Winde beobachtet, die in Abhängigkeit von ihrem geographischen Auftreten Föhn, Chinook und Bora genannt werden. An den Alpen heißen diese Gebirgswinde Föhn, wobei Südföhn und Nordföhn definiert sind als Föhn bei einer Alpenüberströmung von Süden bzw. von Norden. Neben der Böigkeit ist die Temperaturzunahme charakteristisch für Föhn.

Meteorological Office (1991)

Ein warmer, trockener Wind auf der Leeseite eines Gebirgskammes.

World Meteorological Organization (1992)

Wind, welcher beim Abstieg erwärmt wird und austrocknet, üblicherweise auf der Leeseite eines Gebirges.

Whiteman (2000)

Ein warmer, trockener Wind auf der Leeseite einer Gebirgskette.

Bemerkung

Die beiden Haupteigenschaften des Föhns (neben dem Wind), Erwärmung und Trockenheit, werden in allen Definitionen angesprochen. Die Ausnahme bildet Hoinka (1990), er führt die Trockenheit nicht an, holt dies aber in der Definition zum → hochreichenden Föhn nach.

Beim Wind unterscheiden sich die Definitionen schon eher. Nicht immer wird darauf eingegangen, dass es sich um einen Fallwind handelt. Denn wie bereits Seibert (in Kuettner 1982) erwähnt, darf in der freien Atmosphäre nicht von Föhn gesprochen werden, dort sind auch die Auswirkungen auf Temperatur, Feuchte und Wind geringer. Erst das Herabsteigen in die Täler macht die Strömung zum Föhn. Hann (1906) bemerkt, dass seine Beobachtungsergebnisse nicht nur die Eigenschaften des Föhns erläutern, sie beweisen zugleich, dass diese Eigenschaften erst in den

Tälern selbst, beim Herabkommen des Windes aus der Höhe entstehen. Auch Frey (1945) spricht erst dann von Föhn, wenn dieser in die Täler vordringt. Burri *et al.* (1999) wird noch genauer und verlangt, dass der Föhn mindestens bis in die inneren Täler, unterhalb etwa 1'000 m.ü.M., hinunterweht. So wird auch die Forderung von Lammert (1920) erfüllt, dass die potentielle Temperatur im Tal gleich derjenigen an einem Höhenstandort der gleichen Stromlinie ist.

Gewagt ist es, den Südföhn (bzw. Nordföhn) als einen Südwind (bzw. einen Nordwind) zu bezeichnen. Auslösender Mechanismus für Föhn ist in den meisten Fällen einer Wetterlage aus Sektor Süd (bzw. aus Sektor Nord). Eine Ausnahme bildet hier zum Beispiel der → Doppelföhn. Doch wie Seibert (in Kuettner 1982) betont, hängt die Windrichtung des Föhns in den Tälern von der lokalen Topographie ab (siehe auch Hann 1906). Üblicherweise kommt der Föhn aus derselben Richtung wie der Bergwind.

Der Föhn ist ein Phänomen der Alpen. Windsysteme, welche ähnliche Ursachen und Auswirkungen wie der Alpenföhn besitzen, sollen als Föhnwinde bezeichnet werden. Diese Bezeichnung ist bereits bei Hann (1906) zu finden. Ob er dies bewusst zu einer Unterscheidung dieser Begriffe tat, wird nicht klar. Ein Beispiel für einen Föhnwind ist der Chinook in den Rocky Mountains, weitere sind in Anhang B zu finden.

Zwischen Föhn und absteigender Luft in einer Antizyklone gibt es keinen grossen Unterschied, da beide Typen durch dynamische Erwärmung charakterisiert sind. Billwiler (1899) schlug deshalb vor, dass der Föhn nach seinen Charakteristika und nicht nach seinem Ursprung definiert werden sollte und dass konsequenterweise beide Luftbewegungen als Föhn bezeichnet werden sollen. Damit man die beiden Strömungen unterscheiden kann, führte er die Begriffe → Antizyklonalföhn und → hochreichender Föhn ein. Die Gebirgsüberströmung ist jedoch ein herausragender Bestandteil des Föhns und darf nicht vernachlässigt werden (siehe auch Schüepp 1950). Der Begriff → Antizyklonalföhn ist aus diesem Grund irreführend.

Zur Problematik der Definition von Föhn schreibt Brinkmann (1971), dass eine allgemein akzeptierte Definition erschwert wird durch die Variation der Oberflächencharakteristika in Abhängigkeit von Standort und Jahreszeit, möglichen Übergangsformen und den teilweise immer noch schlecht verstandenen Mechanismen.

Ein Vorschlag für die Definition von Föhn lautet wie folgt: Der Föhn ist ein warmer, trockener Fallwind auf der Leeseite der Alpen. Das typische Merkmal des Föhns ist das Durchbrechen vom Alpenkamm bis zum Talboden mit gleichzeitigem plötzlichen Temperaturanstieg und Feuchterückgang. Der Wind in den Tälern ist böig und hat die gleiche Richtung wie der Bergwind. Auf der Alpennordseite wird er als Südföhn und auf der Alpensüdseite als Nordföhn bezeichnet.

ALPENFÖHN (ALPINE FOEHN)

→ Föhn

ALPENVORLANDFÖHN (ALPINE FORELAND FOEHN)

Streiff-Becker (1931)

Der Föhn des Alpenvorlandes ist warm, aber feucht. In seinem Bereich geniessen Orte auf der Leeseite eines Hügelzuges im Windschatten verhältnismässige Ruhe.

Bemerkung

Diese Definition führte Streiff-Becker zur Unterscheidung zum Föhn in den Alpentälern (→ Föhn) ein, da der Begriff Föhn durch Laien auf jeden warmen Wind aus mehr oder weniger südlicher Richtung angewandt wurde. Vor der Einführung des Begriffs Alpenvorlandföhn, bezeichnet er diesen als warmen Südwestwind des Vorlandes. Damit ist auch die Feuchte in seiner Definition erklärt. Es handelt sich hier also um keinen Föhn.

Ein Vorschlag besteht darin, den Alpenvorlandföhn ähnlich wie die → föhnige Aufheiterung zu behandeln, wobei sich diese in der Feuchtigkeit unterscheiden.

ANTIZYKLONALFÖHN (ANTICYCLONIC FOEHN)

→ Freier Föhn

BERGWIND (MOUNTAIN WIND)

Emeis (2000)

Nachts kühlt die Luft im Gebirge stärker aus als über der Ebene in gleicher Höhe, somit steigt der Luftdruck über dem Gebirge über den im Umland. Es bildet sich eine Kaltluftströmung aus dem Gebirge heraus, der Bergwind. Er beginnt zwei bis drei Stunden nach Sonnenuntergang und dauert bis kurz nach Sonnenaufgang.

Bemerkung

Eine Definition des Bergwindes wurde hier aufgeführt, da es zu Verwechslungen mit Föhn kommen kann. Der Bergwind hat ähnliche Charakteristika. Beim Einsatz nimmt die Windgeschwindigkeit zu und er weht das Tal hinunter. Vor allem bei Föhnepisoden in den Abendstunden muss abgeschätzt werden, ob es sich um einen Föhn oder einen Bergwind handelt.

DIMMERFÖHN (DIMMERFOEHN)

Schamp (1964)

Abart des Südföhns, bei der das sonst für den Alpenföhn typische rasche Absteigen der Luftmassen in die Täler unterbleibt, diese überweht werden und erst im Vorland starker Südoststurm mit oft trüber, staubführender Luft herrscht.

Frey (1996)

Der zyklonale Talföhn (→ Föhnphase) kann sich zum Dimmerföhn steigern, wobei die Föhnmauer bis weit zur Leeseite hinüber reicht und gelegentlich auch hier feiner Niederschlag fällt. Die föhnklare Durchsichtigkeit der Luft auf der Leeseite ist verschwunden und in einen diffusen und dämmerigen Zustand übergegangen. Der Druckunterschied zwischen der Süd- und der Nordseite sowie die Höhenwinde haben sich erheblich verstärkt. Der den Alpenkamm überquerende Höhenwind vermag dem absteigenden Geländeprofil nicht mehr zu folgen, überweht den oberen Bereich der Föhntäler und stürmt dann heftiger und weiter als gewöhnlich ins Mittelland vor.

DOPPELFÖHN (DOUBLE FOEHN)

Frey (1996)

Der Süd- und der Nordföhn (→ Föhn), mit ihren typischen Eigenschaften, wehen für kurze Zeit gleichzeitig. Dieser seltene Fall kann dann eintreten, wenn in höheren Lagen eine stürmische Westströmung besteht und ein in der unteren Troposphäre bestehendes Kaltlufthoch rasch über das Alpenmassiv hinwegzieht.

Bemerkung

Diese Art von Föhn ist sehr selten. Ein Beispiel in den Alpen vom 13. Dezember 1981 wird von Frey (1986) beschrieben.

FLACHER FÖHN (FLAT FOEHN)

→ Seichter Föhn

FÖHNFALL (FOEHN CASE)

Dürr (2000)

Ein Föhnfall liegt vor, wenn die mesoskaligen Bedingungen für Föhn erfüllt sind, und an mindestens zwei Stationen unterhalb von 1'000 m.ü.M. die lokalen Bedingungen für Föhn erfüllt sind.

Ein Föhnfall wird als getrennt von einem zweiten betrachtet, wenn zwischen dem letzten Föhntermin an irgendeiner Station unterhalb von 1'000 m.ü.M. und dem ersten Föhntermin eines neuen Föhnfalls mindestens 12 Stunden vergangen sind.

Bemerkung

Bei Dürr muss es also an mindestens zwei Stationen zu Föhn kommen, damit man von einem Föhnfall spricht. In dieser Arbeit genügt es für einen Föhnfall, dass an einer einzigen Station die Kriterien für Föhn erfüllt werden. Dadurch fällt ein örtlich sehr begrenzter Föhnfall nicht aus der Statistik.

Dürr (mündliche Mitteilung) würde heute zur Trennung zweier Föhnfälle neu mit einer Pause zwischen den Fällen von 24 Stunden arbeiten. Wobei er sich bei der Begründung dieser Wahl auf die klassischen Messtermine 6, 12 und 18 UTC abstützt. In dieser Arbeit wurde das 12-Stunden-Kriterium verwendet.

FÖHNFENSTER (FOEHN WINDOW)

Hiermit wird der häufig auftretenden wolkenfreien Himmel im Lee der Alpen bezeichnet.

FÖHNIG (FOEHNIC)

Seibert (in Kuettner 1982, nach Reiter 1958)

Mässige bis starke Südwinde auf den Bergen, die jedoch nicht bis in die Täler durchgreifen. Vom Tal aus ist diese Föhnsituation durch die folgenden Punkte erkennbar:

- a) Wolkenbild: → Föhnmauer am Alpenhauptkamm, Aufreissen der Wolken-
decke im Lee (→ Föhnlücke), Bildung von Lenticulariswolken, Wolkenzug
aus Süd bis Südwest;
- b) Sehr gute Sicht, Näherrücken der fernen Objekte;
- c) Klare Luft, die Farben der Umgebung erscheinen dunkler und intensiver.

Bemerkung

Diese Definition gilt für die Stufe 0 der dreistufigen Skala der Klassifikation des Föhns in Innsbruck. Die Skala ist seit 1952 in Gebrauch. Föhnige Tage mit Skalenswert 0 werden nicht als → Föhntage gezählt.

FÖHNIGE AUFHEITERUNG (FOEHN CLEARANCE)

Hoinka (1985/1990)

Die Böigkeit des Föhns nimmt auf der Leeseite mit der Distanz zum Alpenrand ab. In einer Distanz von etwa 50 km ist der Föhn nur noch durch eine Zunahme der Temperatur und eine Abnahme der relativen Feuchte bemerkbar, bei gleichzeitigen schwachen Winden. Der zumeist signifikante Rückgang der Bewölkung wird mit dem Begriff „Aufheiterung“ berücksichtigt.

Bemerkung

Ein weiterer Vorschlag ist, die Föhnige Aufheiterung ähnlich wie den → Alpenvorlandföhn zu behandeln, wobei sich diese in der Feuchtigkeit unterscheiden.

FÖHNINSEL (FOEHN ISLAND)

American Meteorological Society (1959)

Ein isoliertes Gebiet, in welchem der Föhn den Boden erreicht hat, im Kontrast zur Umgebung, wo die Föhnluft die kältere Bodenluftschicht nicht ersetzt hat.

FÖHNKEIL (FOEHN WEDGE)

→ Föhnnase

FÖHNLAGE (FOEHN CONDITION)

Burri et al. (1999)

Hier sollen die mesoskaligen Bedingungen für Südföhn der AGF als Definition herangezogen werden. Eine Südföhnlage im Alpenraum beinhaltet, dass Süd-Nordgerichtete, alpenüberquerende Trajektorien vorhanden sind. Dasselbe gilt für den Nordföhn, nur mit umgekehrten Vorzeichen. Eine Quantifizierung der Bedingungen geschieht über den Luftdruck und den Wind an einer günstig gelegenen Bergstation.

Bemerkung

Bei einer Föhnlage muss also noch kein Föhn auftreten, aber eine Föhnlage kann zu diesem führen. Die Föhnlage und die → präfrontale Föhnlage sind zu unterscheiden.

FÖHNLÜCKE (FOEHN BREAK / FOEHN GAP)

Meiers kleines Lexikon (1987)

Auf der Leeseite von Gebirgen bei Föhn oder föhnartigen Erscheinungen zu beobachtende Wolkenauflösung (ganz oder teilweise).

World Meteorological Organization (1992)

Eine Lücke in den Wolken, welche höher liegen als das den Föhn verursachende Gebirge.

FÖHNLUFT (FOEHN AIR)

American Meteorological Society (1959)

Die im Zusammenhang mit Föhn stehende Luft, sie ist sehr warm und trocken.

World Meteorological Organization (1992)

Warme, trockene Luft in Verbindung mit Föhn.

FÖHNMAUER (FOEHN WALL)

Streiff-Becker (1931)

Der Höhenwind schmiegt sich dem Terrain des Gebirgskammes nur dort glatt an, wo der Gebirgsabfall nicht allzu steil ist. Wo der Kamm in steilen Wänden plötzlich abfällt, muss hinter den scharfen Kanten, entsprechend den Gesetzen über Flüssigkeitsströmungen, eine Rückwirbelung eintreten, welche an diesen Stellen die adiabatische Erwärmung verhindert und Kondensation verursacht. Es tritt die walzenförmige Wolke auf, die man als Föhnmauer bezeichnet.

American Meteorological Society (1959)

Die steile Grenze einer flachen, kumuliformigen Wolke, welche über den Gipfeln und der Luvseite der Gebirge während Föhn gebildet wird.

Meiers kleines Lexikon (1987)

Bei Föhn von der Leeseite eines Gebirges aus zu beobachtende mächtige Wolkenbank über dem Gebirgskamm, die durch die Staubewölkung der Luvseite gebildet wird.

Meteorological Office (1991)

Im Zusammenhang mit Föhn entsteht oft eine Masse von ausregnenden Wolken an den Hängen der Luvseite der Gebirge. Die Wolken sinken zum Teil an den leeseitigen Hängen ab und verdunsten bis zu einer Linie parallel zum Gebirgshauptkamm.

World Meteorological Organization (1992)

Wolken, welche während Föhn über und entlang eines Gebirgskammes liegen und welche für einen Beobachter windabwärts des Kammes als eine Mauer erscheinen.

Whiteman (2000)

Die steile, leewärts gerichtete Grenze einer ausgedehnten Wolkenschicht, welche während einer → Föhnlage durch gehobene Luft an einem Bergkamm entsteht.

FÖHNNASE (FOEHN NOSE)

American Meteorological Society (1959)

Eine typische Deformation der Isobaren während einer gut ausgebildeten Föhn-situation, wie sie auf einer synoptischen Bodenkarte beobachtet wird. Ein Hochdruck-keil liegt auf der windwärts gelegenen Seite des Gebirgskammes, während sich ein → Föhntrog auf der Leeseite bildet. Die Isobaren „bauchen aus“, was zu einem nasenähnlichen Bild führt.

Brinkmann (1971)

Isobarische "Ausbauchung" über den Alpen.

Meiers kleines Lexikon (1987)

Für den Alpenföhn charakteristische Isobarendeformation in Form eines Keils, der bei Nordföhn nördlich des Alpenhauptkamms von West nach Ost, bei Südföhn südlich des Hauptkamms von Ost nach West gerichtet ist.

Bemerkung

Der Begriff Föhnnase wird vor allem im englischen Sprachgebrauch benutzt. Das Föhnknie ist im Deutschen eher üblich.

FÖHNPAUSE (FOEHN PAUSE)

Lammert (1920)

Der Föhn weht im Einzelnen keineswegs gleichmässig, sondern in Stößen und sein Verlauf ist mit Störungen verbunden, die als typische Föhnpausen bekannt sind.

Streiff-Becker (1931)

Die Föhnpausen sind nichts anderes als vertikale Schwingungen des Föhnluftbogens, der je nach dem Wechsel in der Stärke des Höhenwindes flacher wird oder tiefer greift, und demzufolge die kalte Bodenluft taleinwärts fließt oder durch den Impuls eines neuen Föhnstosses fortgerissen wird.

American Meteorological Society (1959)

Durch die Bildung oder das Eindringen von Kaltluft bedingter temporärer Unterbruch des Föhns. Dies geschieht oft in den frühen Morgenstunden, kurz vor Sonnenaufgang. Es kommt zu einer schnellen Temperaturabnahme und einer Feuchtezunahme, welche eine Stunde oder mehr andauern kann.

Weiter bezeichnet die Föhnpause im englischen die Grenze zwischen der Föhnluft und der sie umgebenden Luft.

Whiteman (2000)

Vorübergehender Unterbruch des Föhns am Boden, ausgelöst durch die Bildung oder das Eindringen einer Kaltluftschicht, welche den Föhn vom Boden abhebt.

Bemerkung

Die Benutzung des Begriffs Föhnpause für die Grenze zwischen Föhnluft und der sie umgebenden Luft (AMS) ist eher selten. Um Verwechslungen zu vermeiden, soll an Stelle von Föhnpause von der Grenzschicht zwischen Föhn und umgebender Luft gesprochen werden.

FÖHNPERIODE (FOEHN PERIOD)

American Meteorological Society (1959)

Die ununterbrochene Dauer des Föhns an einem gegebenen Ort.

Dürr (2000 / schriftliche Mitteilung)

Der Begriff Föhnperiode wird nicht verwendet. Der Begriff Föhnfall wird als Synonym für Föhnperiode benutzt. Um zwei Föhnfälle zu unterscheiden, muss es zwischen zwei Föhnterminen mindestens zu einer Pause von 12 Stunden kommen. Diese würde Dürr heute auf 24 Stunden ausdehnen.

Hächler (schriftliche Mitteilung)

Eine Periode bezeichnet einen Ablauf, der in bestimmten und stets etwa gleichen Zeitintervallen verläuft. Daher ist die Art und Weise, wie Föhnperiode in der Umgangssprache verwendet wird, im Prinzip falsch. In der Regel ist dies ein Zeitabschnitt, während dem eine Station Föhn hat. Auf das Ereignis bezogen wäre dies also ein Föhn, der mindestens stellenweise ins Tal hinunter greift und dabei die Teststationen unterschiedlich betrifft. In der gleichen Föhnperiode kann Vaduz 48 Stunden Föhn haben, Altenrhein aber vielleicht nur 4 Stunden. Die gleiche Föhnperiode hat vielleicht in Altdorf schon 3 Stunden früher begonnen.

Ein besserer Sprachgebrauch wäre zum Beispiel → Föhnfall.

Bemerkung

Während die American Meteorological Society den Begriff der Föhnperiode auf einen einzigen gegebenen Ort bezieht, werden bei Dürr und Hächler mehrere Stationen betrachtet. Sobald eine oder mehrere Stationen die Kriterien für Föhn erfüllen, sprechen sie von einer beginnenden Föhnperiode. Jedoch sollte durch die nicht korrekte Verwendung des Begriffs Periode, dieser durch → Föhnfall ersetzt werden.

Die Definition der American Meteorological Society entspricht hier der Definition des → Föhnvorstosses.

FÖHNPHASE (FOEHN PHASE)

Ficker (1910a)

Ficker fasst die Ergebnisse seiner Untersuchungen über die Entwicklung (Föhnphasen) des Föhns wie folgt zusammen:

Verhältnisse vor dem Föhn: Antizyklonal, in der Höhe relativ warm und trocken, in den Tälern kalt, häufig mit Temperaturumkehr.

Vorstadium des Föhns: Die kalte Inversionsschicht in den Tälern fließt ab, die höheren Schichten der Inversionsschicht senken sich, womit in den Tälern der Leeseite

langsame Erwärmung verbunden ist. Gleichzeitig senken sich die warmen Luftmassen der Höhe. Sowohl die warme Luft der Höhe wie die kalte in den Tälern strömen vom Gebirge weg.

Antizyklonalstadium: Die kalte Luft ist in den Tälern der Föhnseite gänzlich abgeflossen, der Föhn in den Tälern ausgebrochen. In der Höhe und auf der Luvseite dauern die antizyklonalen Verhältnisse fort. Die Föhnströmung wird genährt durch Luft, die dem Alpenkamm aus der Höhe oder horizontal zufließt.

Stationäres Föhnstadium: Die antizyklonalen Verhältnisse in der Höhe und auf der Luvseite erlöschen. Die Luft steigt auf der Luvseite unter Niederschlägen auf. Die relative Feuchtigkeit in der Höhe steigt meist bis zur Sättigung. Bildung der → Föhnmauer. Die eintretenden Temperaturveränderungen sind in den einzelnen Fällen sehr verschieden.

Ficker bemerkt zu dieser Aufstellung, dass nicht jeder Föhn die ganze Entwicklung zeigen muss.

Seibert (1990)

Phase I: Kalte Luftmassen, stabil oder feuchtadiabatisch, beidseits der Alpen.

Phase II: Warmluftadvektion mit W- oder SW-Strömung, diese dringt aufgrund der Orographie nicht in die Poebene ein. Über den Alpen entwickelt sich ein Temperaturgradient unterhalb des Alpenkamms, dieser bildet einen Druckgradient aus und provoziert → seichten Föhn. In vielen Fällen herrscht weiterhin schönes Wetter südlich der Alpen.

Phase III: Ein Trog nähert sich und in höheren Lagen dreht die Strömung auf SW oder S, Geschwindigkeiten und Feuchtigkeit erhöhen sich. Die Gradienten über die Alpen erreichen ihr Maximum und der hochreichende Föhn beginnt. Die Luftmassen über der Poebene bleiben blockiert. Es kommt zu Niederschlag südlich der Alpen fortschreitend von West nach Ost.

Phase IV: Durchgang der Front und Zusammenbruch des Föhn. Jet-Achse über den Alpen, maximale Süd-Komponente des Windes auf 500 hPa. In manchen Fällen entsteht eine Leezyklone.

Frey (1996)

Frey beschreibt die folgenden Entwicklungsformen bzw. Föhnphasen des Föhns:

Antizyklonaler Höhenföhn: Über den Alpen stellt sich ein Divergenzgebiet der Luftmassen ein, mit einem leichten Gefälle des Luftdruckes vom Alpenkamm nach Norden. Die Winde drehen zuerst in mittleren Höhen über dem nördlichen Alpenvorland auf eine südliche Richtung. Im Alpengebiet ist noch keine wesentliche Wolkenbildung eingetreten.

Zyklonaler Höhenföhn: Der verstärkte südliche Höhenwind erhält südwärts der Alpen eine durch das Gelände bewirkte aufsteigende Bewegungskomponente, wobei sich vermehrte Bewölkung und später auch eine → Föhnmauer bildet. Die Föhnströmung vermag sich jedoch auf der Leeseite noch nicht bis in die Niederungen durchzusetzen.

Zyklonaler Talföhn: Der zyklonale Höhenföhn stürzt mit machtvoller Stärke und Böigkeit in die Quertäler des nördlichen Alpenvorlandes hinunter und gleitet über die in den Niederungen nicht ausgeräumte Kaltluftschicht auf. Die Grenze zwischen der

warmen Föhnluft und der nordwärts zurückweichenden kälteren Luft pendelt manchmal hin und her, wodurch die → Föhnpausen entstehen. Die → Föhnmauer ist gut entwickelt, und südwärts der Alpen setzen Niederschläge ein. In den unteren Bereichen der Luvseite wehen nur schwache Winde, was auf die Bildung eines Luvwirbels hinweist.

Antizyklonaler Talföhn: Dem antizyklonalen Höhenföhn gelingt es unter Auslassung des zyklonalen Stadiums, bis in die Täler hinunter vorzudringen. Bei nur leichter bis mässiger Bewölkung kommt es zu keiner Ausbildung einer → Föhnmauer über dem Alpenkamm. Das südliche und das nördliche Alpenvorland bleiben niederschlagsfrei.

Bemerkung

In Ficker's (1910a) Definition ist die von ihm bevorzugte Hypothese für das Absteigen des Föhns in die Täler zu erkennen (Passive Ersatzströmung, siehe auch Kapitel 6, Föhnypothesen).

FÖHNSTUNDE (FOEHN HOUR)

→ Föhntag

FÖHNSTURM (FOEHN STORM)

American Meteorological Society (1959)

Typ eines destruktiven Sturms, wie er häufig im Oktober in den Bayrischen Alpen auftritt.

Bemerkung

Wo Föhn auftreten kann, kommt es zu Föhnstürmen. Eine Einschränkung auf die Bayrischen Alpen ist nicht korrekt.

FÖHN TAG (FOEHN DAY)

Waibel (1984)

Als Föhntag gilt ein Tag, an welchem Föhn an der Station aufgetreten ist, wobei die Dauer unberücksichtigt bleibt.

Bemerkung

Ausgehend von dieser Begriffsbestimmung soll auch die Föhnstunde definiert werden. Dabei handelt es sich um eine Stunde, an welcher Föhn an der Station aufgetreten ist, wobei auch hier die Dauer unberücksichtigt bleibt.

FÖHNTERMIN (FOEHN TIME)

Quelle Internet (www.foehnwind.dusnet.de / Autor unbekannt)

Äquidistante Zeitpunkte eines Tages oftmals drei bis fünf Termine, an denen die Entscheidung Föhn, kein Föhn getroffen wurde. Dies erfolgte in früheren Zeiten ohne Zuhilfenahme konkreter Grenzwerte. Diagnostizierte man Föhn auf zwei oder

mehrere aufeinander folgende Termine, so wurde das Intervall als Föhnstundenanzahl vermerkt

Bemerkung

Vielfach wird nur während der Klimatermine über Föhntermine entschieden (Waibel 1984). Kommt es dann zu Föhn zwischen zwei Terminen, wird der Föhn nicht erkannt. Es ist deshalb unerlässlich, dass bei Statistiken die Termine angegeben werden, auf welchen die Föhntermine basieren.

FÖHNTROG (FOEHN TROUGH)

American Meteorological Society (1959)

Der dynamische Trog, welcher in Verbindung mit Föhn gebildet wird.

FÖHNVORSTOSS (FOEHN THRUST)

Waibel (1984)

Die Zeitdauer, bei welcher der Föhn an einer Station ohne Unterbruch weht, gilt als ein Föhnvorstoss. Es ist zu beachten, dass ein über Mitternacht anhaltender Föhn zwar als zwei → Föhntage, aber nur als ein Föhnvorstoss gerechnet wird.

Bemerkung

Die → Föhnperiode und der Föhnvorstoss sind aufgrund dieser Definition identisch.

FÖHNWELLEN (FOEHN WAVES)

Meiers kleines Lexikon (1987)

Bei einer Föhnlage auftretende Leewellen.

World Meteorological Organization (1992)

Wellenbewegung der Luft über der Region wo sich der Föhn bildet.

FÖHNWIND (FOEHN WIND)

→ Föhn

FÖHNWOLKE (FOEHN CLOUD)

American Meteorological Society (1959)

Jede Wolkenform in Verbindung mit Föhn. Aber normalerweise werden Lenticulariswolken so bezeichnet, welche sich in der Leewelle parallel zum Gebirgskamm gebildet haben.

Meiers kleines Lexikon (1987)

Linsenförmige Wolken (Lenticularis), die sich bei Föhn im Lee von Gebirgen bilden; sie sind ortsfest und parallel zum Gebirge angeordnet.

World Meteorological Organization (1992)

Wolkenform in Verbindung mit Föhn, allgemein die Lenticulariswolken, welche sich in der Leewelle parallel zu einem Gebirgskamm gebildet haben.

FÖHNZUNGE (FOEHN TONGUE)

Jaubert / Häberli (mündliche Mitteilung)

Die Zone warmer Föhnluft, welche aus einem Föhntal fließt.

Bemerkung

Diese Definition entstand aufgrund von Beobachtungen im Rheintal. Dort kommt es vor, dass der Föhn einmal an der linken und einmal an der rechten Seite des Tales vorstösst, der Föhn „züngelt“.

FÖHNZYKLONE (FOEHN CYCLONE)

American Meteorological Society (1959)

Eine Zyklone, welche sich als Resultat eines Föhnprozesses auf der Leeseite einer Gebirgskette gebildet hat.

FREIER FÖHN (FREE FOEHN)

Hoinka (1990)

Unter freiem Föhn versteht man grossräumige Absinkvorgänge, die vor allem in Hochdruckgebieten auftreten, wobei Temperaturzunahme, Feuchterückgang und Abnahme der Bewölkung zu beobachten sind. Der freie Föhn hat nichts mit den böigen Gebirgswinden zu tun.

Frey (1996)

Dieser Föhn ist von der orographischen Geländebeschaffenheit, der Windrichtung in der Höhe und dem Luftdruckgefälle unabhängig. Es handelt sich um ein Absinken der Luftmassen in der freien Atmosphäre, das unten durch eine Inversion, oft verbunden mit einer Hochnebelschicht, begrenzt ist.

Bemerkung

Der freie Föhn ist weder ein Föhn noch ein Föhnwind. Die Ursachen und der Ursprungsort sind nicht die gleichen. Der Begriff Föhn sollte für diesen Prozess nicht verwendet werden.

HOCHREICHENDER FÖHN (HIGH-REACHING FOEHN)

Pichler (in Kuettner 1982) / Hoinka (1990)

Eine derartige Situation zeichnet sich aus durch eine hochreichende Südwestströmung über den Alpen verbunden mit der typischen Bodendruckverteilung, gekennzeichnet durch ein mesoskaliges Hoch über Norditalien und ein Tief über Süddeutschland. Die sich südlich des Alpenhauptkamms ausbeulenden Bodenisobaren bilden die so genannte → Föhnnase. Dabei kommt es zu den bekannten typischen

Föhnerscheinungen: Leewellen, lentikulare Wolkenformen, → Föhnmauer am Alpenhauptkamm, Rotorbildung im niedertroposphärischen Lee und Winde mit hohen Geschwindigkeiten, die vielfach in Abhängigkeit von der Stabilität bis zur Talsohle durchgreifen. Temperaturerhöhung mit Rückgang der Luftfeuchte wird dabei in den typischen Föhngebieten beobachtet. Wegen des reichlich gegliederten Alpenmassivs ist die Überströmung der Alpen von dreidimensionalem Charakter (Vergeiner 1976), wodurch es zu räumlich unterschiedlicher regionaler Ausprägung des Föhns kommt.

Bemerkung

Beim hochreichenden Föhn handelt es sich um den klassischen Föhn. In der oben aufgeführten Definition kann beim Wind noch die Böigkeit des hochreichenden Föhns in den Tälern hinzugefügt werden. Der hochreichende und der → seichte Föhn bilden Unterarten des Föhns.

LEICHTER FÖHN (STRONG FOEHN)

Seibert (in Kuettner 1982, nach Reiter 1958)

Zeitweises Auftreten von südlichen Winden auch in den Tälern, die Böen erreichen nicht Sturmstärke. Es kommt zu einer Temperaturzunahme und Feuchteabnahme. Die Wolken und die optischen Phänomene verhalten sich wie unter → Föhnig beschrieben.

Bemerkung

Diese Definition gilt für die Stufe 1 der dreistufigen Skala der Klassifikation des Föhns in Innsbruck. Die Skala ist seit 1952 in Gebrauch.

PASSFÖHN (PASS FOEHN)

Steinacker et al. (2001)

Ein Föhnfall wird als Passföhn klassifiziert, wenn an mindestens einer Pass- oder Höhenstation die Föhnkriterien erfüllt sind.

Bemerkung

Die Aufteilung von Föhnfällen in Pass- und Talföhn wurde zur Untersuchung von Situationen eingeführt, die zu keinem Durchbruch des Föhns bis auf den Talboden führen. Der Passföhn kann auch als → Föhnlage bezeichnet werden.

PRÄFRONTALER FÖHN, PRÄFRONTALE FÖHNLAGE (PREFRONTAL FOEHN CONDITION)

Burri et al. (1999)

Präfrontale Föhnlagen sind gekennzeichnet durch eine grossräumige Westströmung, bei der die laufenden Wellen mit Tiefdruckgebieten verbunden sind. Sie führen auf ihrer Vorderseite, meist kurz vor der Kaltfront, zu → Föhnvorstössen. Aus Zeitmangel gelangt der Föhn nicht weit nach Norden und beschränkt sich somit auf die inneren Alpentäler. Der Durchgang der Kaltfront führt zu einem eindeutigen Föhnende.

In seltenen Fällen erfolgt auch ein → Föhnvorstoss vor aktiven Warmfronten, dabei kann in grosser Höhe gar Nordwestwind herrschen. In diesen Fällen herrscht in der Regel dichte hohe Bewölkung, bedingt durch Warmfronthebung, sodass kein Föhnfenster auftritt.

Bemerkung

Die präfrontale Föhnlage und die → Föhnlage sind zu unterscheiden.

SEICHTER FÖHN (SHALLOW FOEHN)

Seibert (1990)

Dies ist ein Föhn (ursprünglich entdeckt von Kanitscheider 1932) mit all seinen typischen Eigenschaften in den Tälern, aber ohne ausgeprägte Südwindkomponente in höheren Schichten (über dem Gebirgskamm). Der seichte Föhn kann als Kompensationsströmung aufgrund eines Druckgradienten über dem Gebirgskamm verstanden werden, dieser ist ein Resultat von unterschiedlichen Luftmassen beidseits des Gebirges. Aus diesem Grund kommt der seichte Föhn im Lee von Alpenpässen vor, welche als "Löcher" im Gebirgshindernis agieren.

Da solche Temperatur- und Druckgradienten auch während eines → hochreichenden Föhns vorhanden sind (dann sogar noch stärker), überlagert eine Art von seichtem Föhn den hochreichenden Typ. Dies wird ersichtlicht durch relativ tiefe Föhntemperaturen in den betroffenen Regionen. Der seichte Föhn ist oft ein temporäres Stadium (→ Föhnphase) in der Evolution einer Föhnlage.

Bemerkung

Der seichte und der → hochreichende Föhn bilden Unterarten des Föhns.

STARKER FÖHN (STRONG FOEHN)

Seibert (in Kuettner 1982, nach Reiter 1958)

Lebhafte bis stürmische Winde mit grosser Böigkeit durch mehrere Stunden anhaltend. Die anderen Merkmale verhalten sich gleich wie beim → schwachen Föhn.

Bemerkung

Diese Definition gilt für die Stufe 2 der dreistufigen Skala der Klassifikation des Föhns in Innsbruck. Die Skala ist seit 1952 in Gebrauch.

TALFÖHN (VALLEY FOEHN)

Streiff-Becker (1931)

Streiff-Becker führte zur Abgrenzung zum → Alpenvorlandföhn (oder kurz Vorlandföhn) den Begriff des Alpentalföhns oder kurz Talföhns ein. Der Talföhn bezeichnet bei ihm den klassischen Föhn.

Steinacker et al. (2001)

Ein → Föhnfall in einem alpinen Tal wird als Talföhn bezeichnet, wenn die Föhnkriterien an mindestens einer Höhenstation und an mindestens einer Station innerhalb der Talströmung erfüllt sind.

Bemerkung

Beim Talföhn handelt es sich um eine → Föhnphase, er sollte also nicht als Bezeichnung für den klassischen Föhn benutzt werden.

TROGFÖHN (TROUGH FOEHN)

Burri et al. (1999)

Trogröhnlagen stehen in Verbindung mit einem quasistationären Trog über Westeuropa. Die Ostverlagerung ist über mehrere Tage vernachlässigbar, allenfalls sogar negativ.

Anhang B: Föhnwinde in unterschiedlichen Regionen der Erde

Das Phänomen des Föhns, wie er in den Europäischen Alpen auftritt, ist nicht einmalig. Auf der ganzen Erde werden Fallwinde mit ähnlichen Auswirkungen (Temperaturzunahme, Feuchteabnahme, etc.) beobachtet. Eine Sammlung dieser Föhnwinde ist hier aufgeführt. Wenn nicht anders vermerkt, stammt die Beschreibung aus Schamp (1964).

Die Gewähr auf Vollständigkeit der Liste kann nicht geliefert werden, denn überall wo sich Gebirge befinden, können Föhnwinde auftreten und jedes Gebiet kennt dafür lokale Namen. Es existieren also sicher weitere, dem Autor nicht bekannte Namen.

Aperwind	Alpen Frühjahrsföhn insbesondere der Schweizer Alpen, der den Schnee zum Schmelzen bringt und die Hänge schneefrei (aper, von lat.: apertus = offen) macht.
Aspre	Westhang des Zentralmassivs, Südfrankreich Föhnig trockene und erwärmte, in die Garonneebene vom Zentralmassiv herabwehende Ostwinde, auch „lou Cantalié“ nach der Landschaft im Zentralmassiv genannt.
Austru	Rumänien, Walachei Nach Überquerung des Balkan-Gebirges und der Transsylvanischen Alpen föhnig trockener West- bis Südwestwind, der zur Zeit seines stärksten Auftretens in den Wintermonaten in Folge des Aufklarens durch die föhnige Wolkenauflösung häufig strenge Strahlungsfröste zur Folge hat.
Autan	Südfrankreich Nach Überschreiten der Cevennen und der Pyrenäen föhnig trockener und warmer Fallwind aus südöstlicher bis östlicher Richtung; bei besonders heftigem Auftreten und bei wolkenlosem Himmel auch „Autan blanc“ genannt, der sich oft bis zur atlantischen Küste südlich der Gironde erstreckt. Wenn von einem Tief über der Biskaya hervorgerufen, folgt dem föhnigen Autan bei Weiterziehen der Depression oft Regen, dann wird er als „Autan noir“ bezeichnet.
Berg Wind	Südafrika Das deutsche Wort Bergwind, allerdings meist in zwei Worten geschrieben, bezeichnet hier jedoch einen trockenheissen, föhnartigen östlichen Wind, der von den südafrikanischen Hochebenen in die Küstenebene, besonders Südwest-Afrikas, im Südwinter herabweht.

Bohorok (auch Bokorot)	Ost-Sumatra Trockener, vom Karo-Plateau herabwehender Fallwind, in den Ebenen Nordost-Sumatras, föhnig erwärmter Südost-Passat.
Boulder Windstorm (mündliche Mitteilung Kuettner)	Boulder, USA So bezeichnen die Einwohner von Boulder den Chinook.
Bregenzer Fallwind	Bregenzer Bucht Wird auch Ostföhn, falscher Föhn (da nicht wie gewohnt aus Süden, sondern aus Osten wehend) oder Pfänderwind genannt. Ein über Gebhardsberg und Pfänder herabwehender Ost- bis Nordostwind, der sich föhnartig erwärmt, sodass bei gleicher Wetterlage Bregenz höhere Temperaturen als das benachbarte Lindau aufweisen kann, kommt am häufigsten im Frühjahr bei nordöstlicher Luftströmung vor.
Broebro (auch Brubru)	Sulawesi (Celebes), Indonesien Böiger, föhnig erwärmter Ostwind, Teil des nordsommerlichen Ostmonsuns bei Makassar an der Westküste der Insel.
Cape Doctor	Kapstadt Ein besonders in den Sommermonaten von der False-Bay her über Kapstadt in die Tafelbai wehender oft sehr stürmischer Südostwind, der als maritime Kaltluftströmung, trotz föhniger Erwärmung, zur Reinigung der Luft über Kapstadt und zur Erfrischung der Bewohner der Stadt beiträgt. In der Literatur auch fälschlich als Euryclydon erwähnt, der jedoch ein Fallwind an der Südküste Kretas ist.
Chinook	Rocky Mountains, USA Der Name wird in den Küstenregionen von Oregon und Washington für einen warmen, feuchten ozeanischen Südwestwind, der über das Stammesgebiet der Chinook-Indianer weht, gebraucht. Er bezeichnet weiterhin einen warmen trockenen Fallwind der Ostseite der Rocky Mountains, der aus dem oben genannten Westwind entsprechend dem Alpenföhn durch Überschreiten der Gebirgskette entsteht und im Frühjahr und selbst im Winter zu rascher Schneeschmelze führt. Meteorologisch wird heute nur dieser föhnartige Wind als Chinook bezeichnet.

Beim Chinook handelt es sich um den bekanntesten Föhnwind neben dem Föhn der Alpen. Aus diesem Grund werden hier die Hauptunterschiede dieser Fallwinde aufgeführt, welche Hoinka (1990) zusammengetragen hat.

Die Rocky Mountains bilden eine Nord-Süd-Barriere, während die Alpen in Ost-West-Richtung liegen. Der Chinook entsteht also bei zonaler und der Föhn bei meridionaler Strömung. Beide Gebiete, über denen diese Winde auftreten, befinden sich

im Bereich des Westwindgürtels. Aus diesem Grund treten pro Jahr mehr Chinookfälle als Föhnereignisse auf. Die Werte der meteorologischen Parameter wie Temperaturänderung, Minimum der relativen Feuchte, maximale Windgeschwindigkeiten und Böigkeit des Windes sind beim Chinook deutlich grösser als beim Föhn.

Der Chinook ist warm bei südwestlicher und kalt bei nordwestlicher Anströmung der Rocky Mountains (Brinkmann 1973). Der Föhn hingegen ist immer mit einer Temperaturzunahme verbunden.

Die grosse Trockenheit des Chinook ist darauf zurückzuführen, dass sich die Atmosphäre an den nordamerikanischen Küstengebirgen durch Stau ausregnet, so dass im Bereich der Kammlinie der Rocky Mountains die Atmosphäre viel trockener ist als die Luft über der Kammlinie der Alpen bei vergleichbarer Strömungskonfiguration. Weiter ist auch das Höhengiveau auf dem der Föhn (~500 m.ü.M.) und Chinook (~1'700 m.ü.M.) weht, unterschiedlich, wodurch ebenfalls ein Feuchteunterschied erklärt werden kann.

Der Unterschied der Orographie muss auch in Betracht gezogen werden. Die von den Alpen beeinflussten Strömungen besitzen einen deutlich dreidimensionalen Charakter (Vergeiner, 1976). Denn die Alpen bestehen aus einer Vielzahl einzelner Gebirgsketten und tiefen Tälern, die teilweise über tief eingeschnittene Pässe miteinander verbunden sind. Dazu kommt noch die Nachbarschaft der Pyrenäen, der Apenninen und der Dinarischen Alpen. Durch die geringe Ausdehnung können die Alpen umströmt werden. Die Form des amerikanischen Zentralgebirges lässt vermuten, dass diese Topographie für numerische und theoretische Überlegungen durch eine zweidimensionale Barriere angenähert werden kann.

Obwohl der Chinook an den Rocky Mountains viel kräftiger ist als der alpine Föhn, ist dennoch der Schadensumfang bei Föhn deutlich grösser. Dies liegt daran, dass die Schadenshöhen nur begrenzt vergleichbar sind, da Stürme in dicht besiedelten Gebieten mehr Schaden anrichten können, als Stürme über dünnbesiedeltem Gebiet.

Gending	Java Zur Zeit des Südostmonsuns (Nordsommer) auftretende föhnartige Winde in den nördlichen Ebenen Javas.
Ghibli	Lybien Besonders im Frühjahr auf der Vorderseite kräftiger Mittelmeerdepressionen aus den schon heissen Wüsten Nordafrikas wehender Staubsturm, der besonders dort, wo er über Randgebirge absteigt, noch zusätzliche föhnige Erwärmung erfährt. Auch freier Föhn über der Sahara wird für seine hohen Temperaturen verantwortlich gemacht.
Grosser Wind	Innerasien Föhnartiger Nordost-Wind an der Südwestseite des Alatau.
Guggiföhn	Schweiz Der Guggiföhn tritt im Berner Oberland im Lauberhorn-Gebiet auf.

Halny Wiatr (AMS 1959)	Polen Dieser Wind bläst normalerweise Anfang Frühling von Süden in der Hohen Tatra.
Helm Wind	Nord-England Kräftiger, föhnartiger Fallwind vom Cross Fell, der durch eine Wolkenkappe über den Berggipfeln gekennzeichnet ist.
Himmelsbesen	Palma de Mallorca Trockener, föhnartiger Wind aus NW, der das Randgebirge übersteigt.
Hot Winds	Nordamerika, insbesondere Great Plains Neben den allgemeinen Hitzewellen (hot waves) werden insbesondere auch föhnartig (freier Föhn) erwärmte Winde der Plains so bezeichnet.
Ibe (AMS 1959)	West-China Ein lokaler, starker Wind, welcher durch das Dzungarische Tor, eine Lücke in den Bergen, weht. Der Wind ist dem Föhn ähnlich und verursacht einen jähen Anstieg der Temperatur.
Jauk	Klagenfurter Becken Name des von den Karawanken herabwehenden Südföhns.
Kâchchan (Thambyahpillay 1958)	Sri Lanka Dieser Föhnwind tritt während des SW-Monsuns in den östlich gelegenen Küstengebieten von Sri Lanka auf. Die tamilisch sprechende Bevölkerung nennt ihn „solaha-kâchchan“, den trockenen, brennenden Monsun.
Kumbang (auch Koembang)	Java Trockener, nach Überschreiten der Pembarisan-Berge föhnartig erwärmter Südostwind bei Tjiriban und Tegal an der mitteljavanischen Nordküste zur Zeit des Südostmonsuns (Nord-sommer).
Lenzbote	Alpenländer Name des schneesmelzenden Frühjahrsföhns.
Levanto	Kanarische Inseln Ostwind auf den Kanarischen Inseln, besonders ein aus dem Orotavatal auf Teneriffa wehender, föhnig erwärmter Wind.

- Livas** Griechenland
Ursprünglich vom antiken Lips, dem warmen, aus Richtung Lybien wehenden Südwestwind abgeleiteter Name, als solcher heute auch Garbis genannt. Mit Livas (Mehrzahl: Lives) bezeichnet man heute aber auch jeden föhnig erwärmten Fallwind, so den im Mai oft vom Pindos in die Thessalische Ebene herabwehenden Westwind.
- Ljuka** Kärnten
Einheimischer Name für den Föhn, wohl vom slowenischen Wort „jug“ (Südwind) abzuleiten.
- Llebetg
(auch Llebetjado)** Roussillon, Ost-Pyrenäen
Arabischer bzw. katalanischer Name eines föhnartig erwärmten Südwestwindes in der Landschaft Roussillon am Nordhang der Ost-Pyrenäen.
- Megas** Griechenland
Ein vom Parnass nach Böotien, besonders in die Ebene des trockengelegten Kopaissees herabwehender, föhnig erwärmter Südwestwind.
- Mikuni-Oroshi** Japan
Der "Fallwind von Mikunitoge" genannte Wind ist ein bei Durchzug eines Tiefs an der Ostküste ins Tone-Tal bei Maebaschi herabwehender W- bis NW-Föhn.
- Moazagotl
(Küttner 1938)** Riesengebirge
Eigentlich handelt es sich hier um eine Wolke. Diese entsteht bei Zyklonalföhn (präfrontales Stadium). Durch diesen tritt einerseits eine Steigerung der Niveaudifferenz und andererseits eine Feuchte-Anreicherung in der Höhe ein, die die Wellenberge durch Kondensation sichtbar werden lassen und auf diese Weise das Moazagotl erscheinen lässt.
Der Name „Moazagotl“ ist folgendermassen zu erklären: Ursprünglich sagte man im schlesischen Dialekt „Moazagotl's Waterwolke“, das heisst aller Wahrscheinlichkeit nach „Matz-Gottliebs Wetterwolke“. Ein wetterkundiger Landwirt, namens Gottlieb Matz, prophezeite beim Auftreten dieser Wolke am Riesengebirge für die nächsten 24 Stunden schlechtes Wetter.
- Montana Monsoon** Montana, USA
Volkstümlicher Name des Chinook in der Prärie Montanas.
- Norder, Norther
oder auch Nortés** Golf von Mexiko, Mittelamerika
Auf der Rückseite einer sich von einem ostwärts abziehenden Tief über Nordamerika bis zu den tropischen Mallungen erstreckenden Tiefdruckrinne vorstossende, oft stürmische Kaltluftleinbrüche, die in der Zeit vom November bis April am häufigsten auftreten. Kennzeichnend für eine typische Nord-

	wetterlage ist ein westlich der Tiefdruckrinne von Texas nach Mittelamerika ausgreifender Hochdruckrücken, an dessen Südostseite die Norder auch den Isthmus von Tehuantepec überschreiten, wobei im Stau Bewölkung und Niederschlag, im Lee der pazifischen Seite föhnige Aufheiterung auftreten.
Northwester (auch Canterbury Northwester)	Neuseeland Nordwestwinde, die nach Abregnen an der Westseite der neuseeländischen Alpen als föhnig erwärmte, trockene Fallwinde die Ebene von Canterbury auf der Südinsel erreichen.
Pacific Wind	Colorado, USA Name des Föhns in Colorado.
Pfänderwind	Bregenzer Bucht Ostwind bei antizyklonaler Wetterlage mit starkem Gradienten, der vom 700 m über den Bodensee ragenden Pfänder föhnartig herabstürzt; da er aus ungewohnter östlicher Richtung kommt, wird er auch als "Falscher Föhn" bezeichnet, obwohl er sich thermodynamisch durchaus föhnartig verhält (siehe auch Bregenzer Fallwind).
Puelche	Anden Warmer Fallwind in Südchile, auch für den nächtlichen Landwind (sonst Terral) gebraucht.
Rotenturmwind	Siebenbürgen Föhnartiger südlicher Wind bei Hermannstadt, der von den Südkarpaten (Rotenturmpass) ins Siebenbürger Becken weht, nach dem Ort Nagy-Talmacs oberhalb Hermannstadt auch Talmescher Wind genannt.
Santa Ana	Kalifornien Bezeichnung für den im Los Angeles Basin, besonders im Winter auftretende, NE-Föhnwind, nach dem Fluss und Pass gleichen Namens benannt.
Solano	Spanien Föhnartiger südlicher bis südöstlicher Wind; manchmal wird auch der sommerliche Ostwind, der vom Mittelmeer monsunartig ins östliche Spanien weht und hier zu sommerlichen Regenfällen führt, mit Solano bezeichnet.
Talmescher Wind	siehe Rotenturmwind
Tenggara	Speimonde-Archipel bei Sulawesi (Celebes) Trockene, föhnartige Winde zur Zeit des Ostmonsuns im Lee der Südhalbinsel von Sulawesi.
Tourello	Dept. Arriège, Südfrankreich Föhnartiger, durchs Tal der Ariège und von den Pyrenäen herabwehender Südwind, der besonders im Frühjahr und Herbst

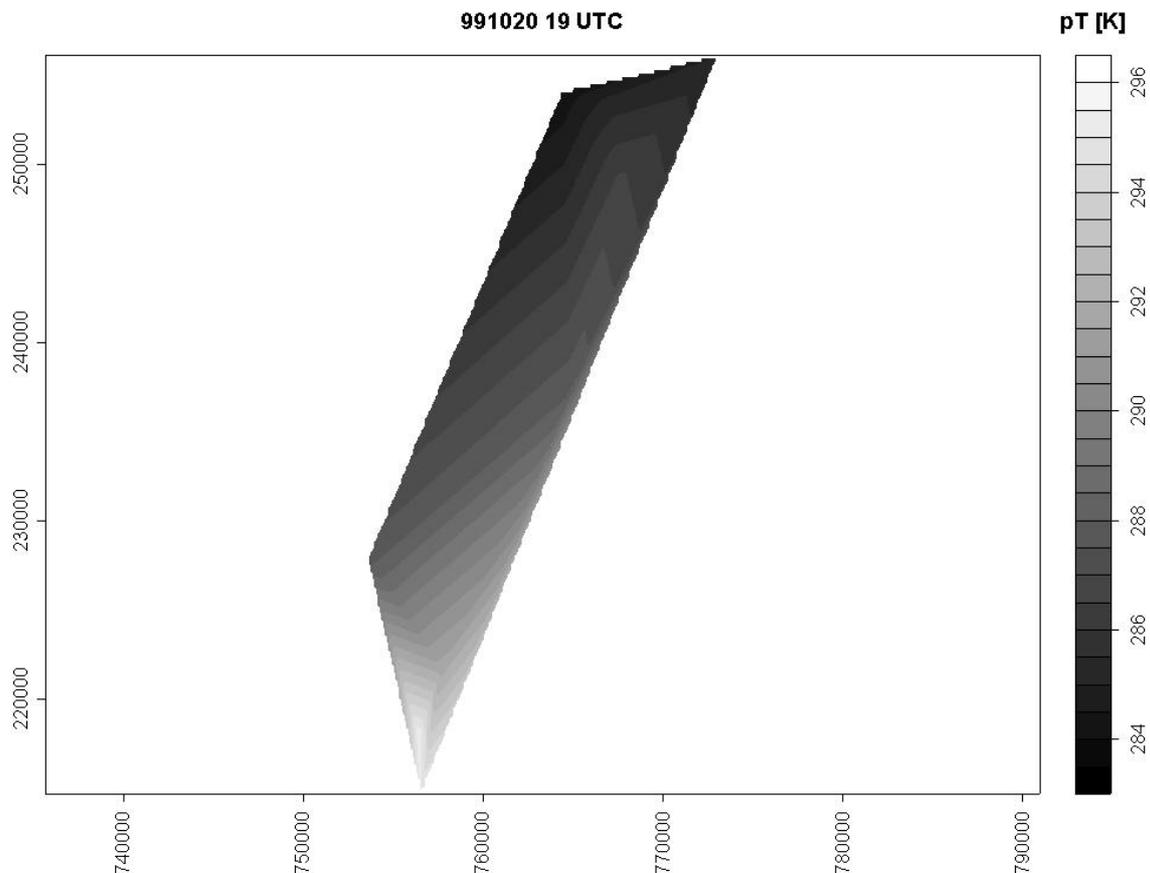
- auftritt. Wie dem Föhn werden auch dem Toureillo physiologische Wirkungen auf Mensch und Tier zugeschrieben.
- Tsiknias** Ägäisches Meer
Oft in böigen Stößen die steilen Südseiten der Inseln des Ägäischen Meeres zur Zeit der sommerlichen Herrschaft der Etesien herabfahrender Fallwind. Der Name wird vorwiegend auf Tinos gebraucht.
- Türkenwind** Nordtirol
Name des Föhn, da dieser das Reifen des hier Türkenskorn genannten Mais beschleunigt.
- Vent d'Espagne** Südfrankreich
Warmer föhnartiger West- bis Südwestwind, von den Pyrenäen her, wenn auf deren Nordseite Depressionen heranziehen.
- Wambraw
(auch Wamburu)** Neuguinea
Warmer, trockener Fallwind aus Südwesten über der Geelvink-Bay in Nordwest-Neuguinea zur Zeit des nordsommerlichen Südostmonsuns.
- Wasatch** Utah, USA
Talwinde der Canyons der Wasatch-Berge. Whiteman (2000) bezeichnet diesen Wind als östlichen Chinook.
- Zephyr** Colorado, USA
Weiterer Name für den Chinook.
- Zonda** Argentinien
Nord- bis nordwestlicher warmer und trockener Fallwind von den Anden herab; nach dem Ort Zonda benannt. Auf der Puna, dem Andenhochland, sind diese winterlichen Nordwinde jedoch durch ausserordentliche Kälte berüchtigt.

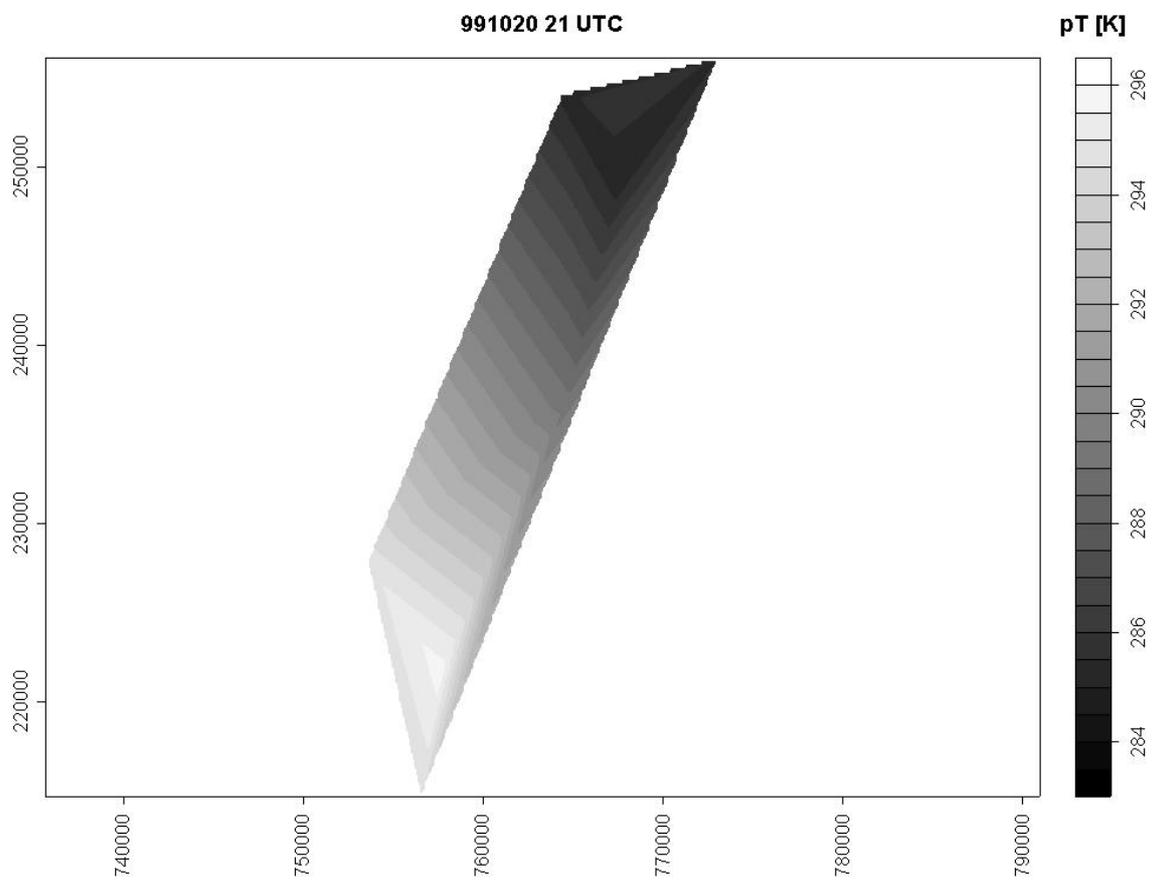
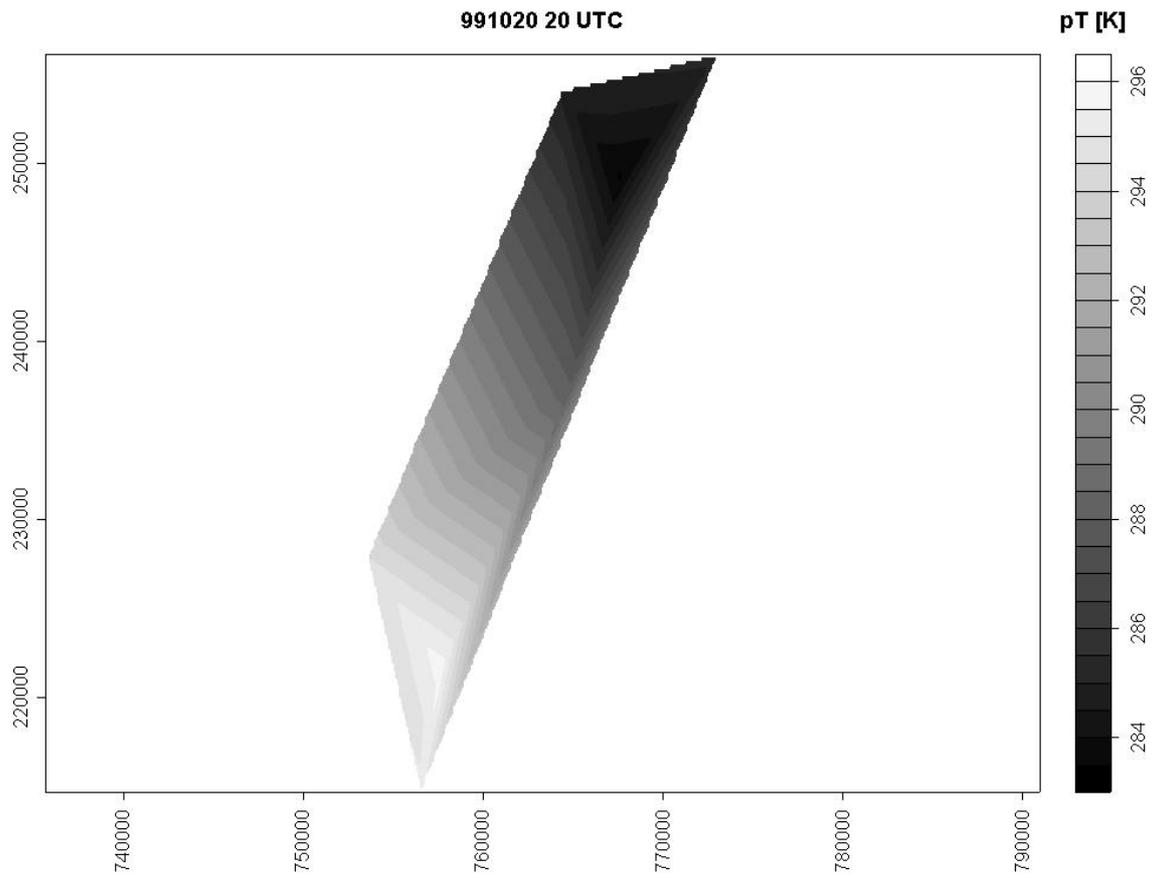
Anhang C: Die Bewegung des Kaltluftsees im St. Galler Rheintal

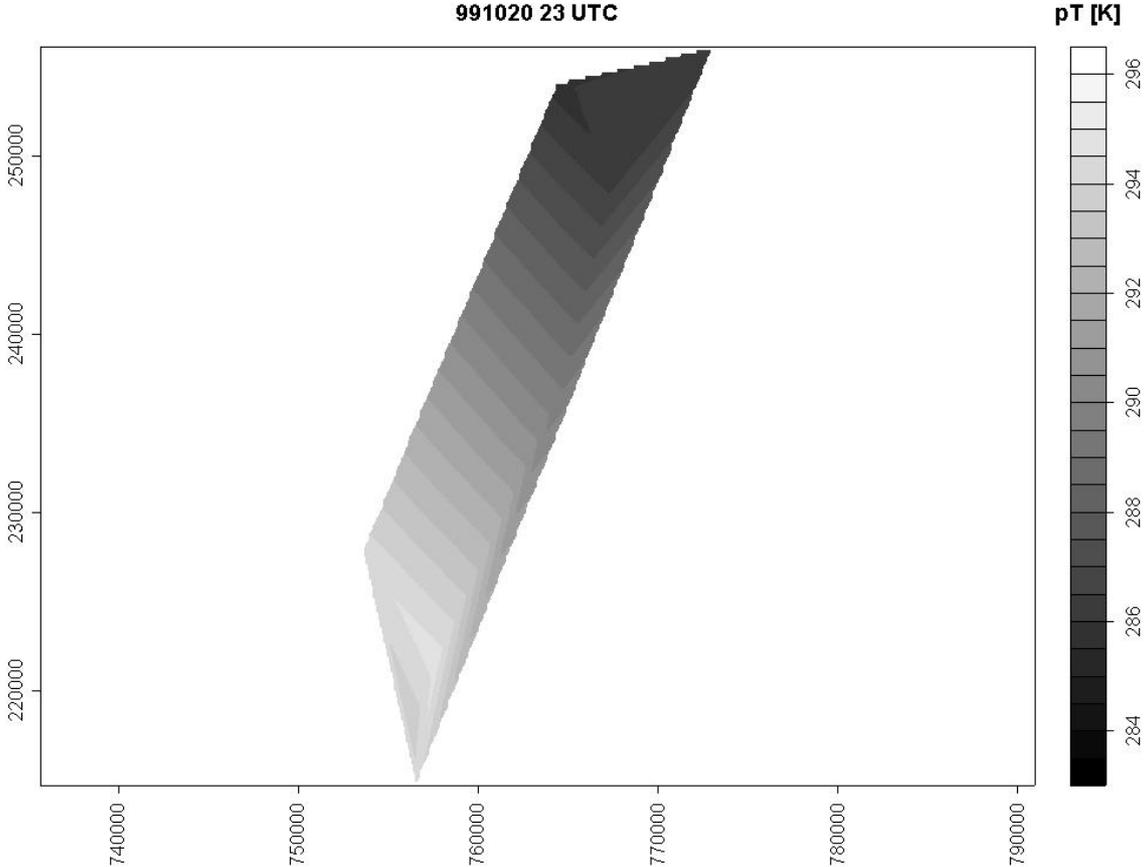
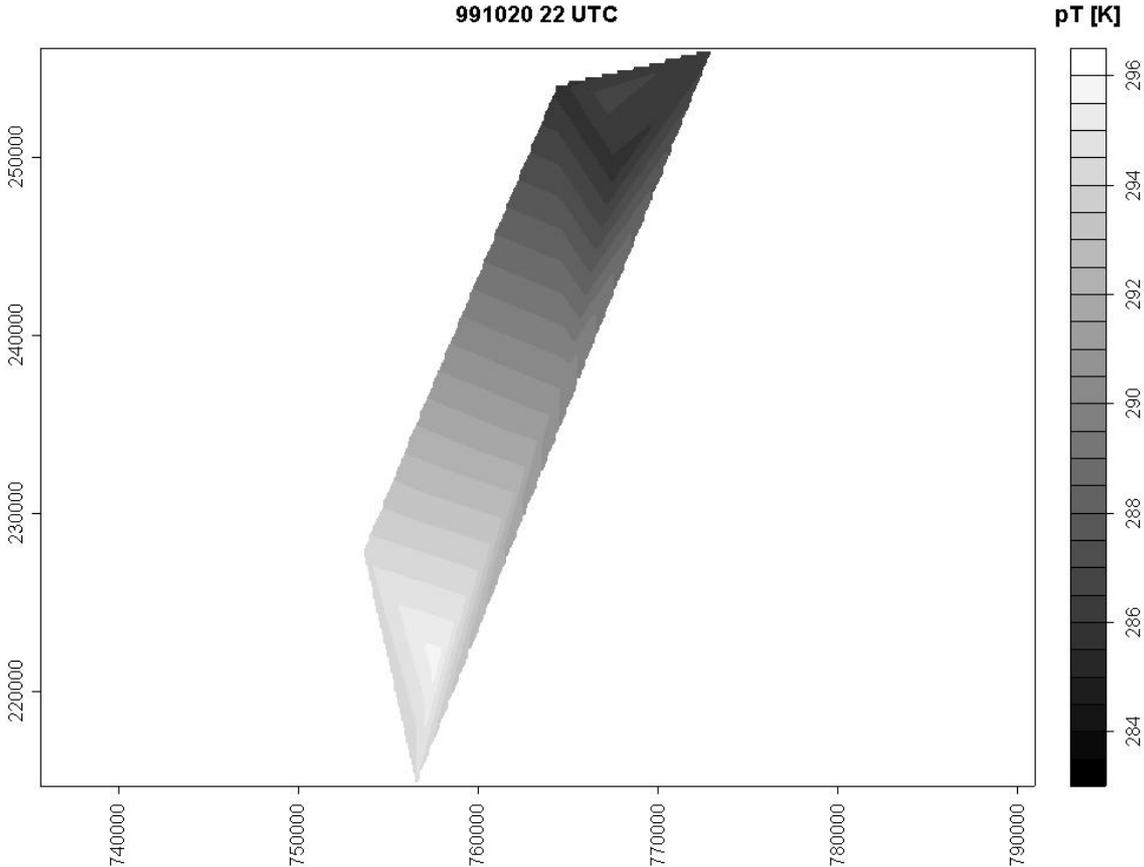
In diesem Anhang wird die Bewegung des Kaltluftsees im St. Galler Rheintal nach Nord und zurück nach Süd anhand des Föhnfalles 7 dargestellt. Die in den Grafiken angegebenen Koordinaten entsprechen den Schweizer Koordinaten. Die Graustufen entsprechen den potentiellen Temperaturen, gemessen an Bodenstationen, wobei dunklere Töne kältere Temperaturen darstellen. Die genauen Termine sind jeweils aus dem Titel der Grafiken zu entnehmen.

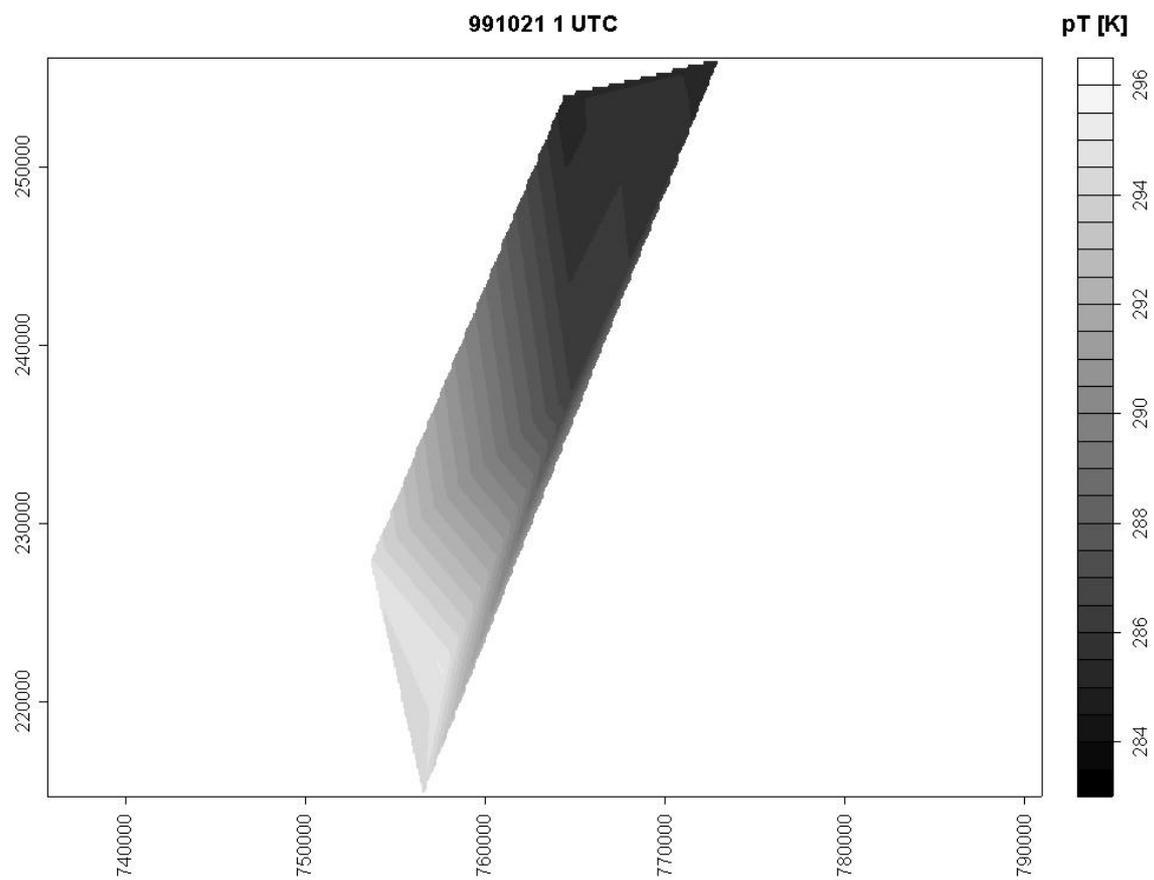
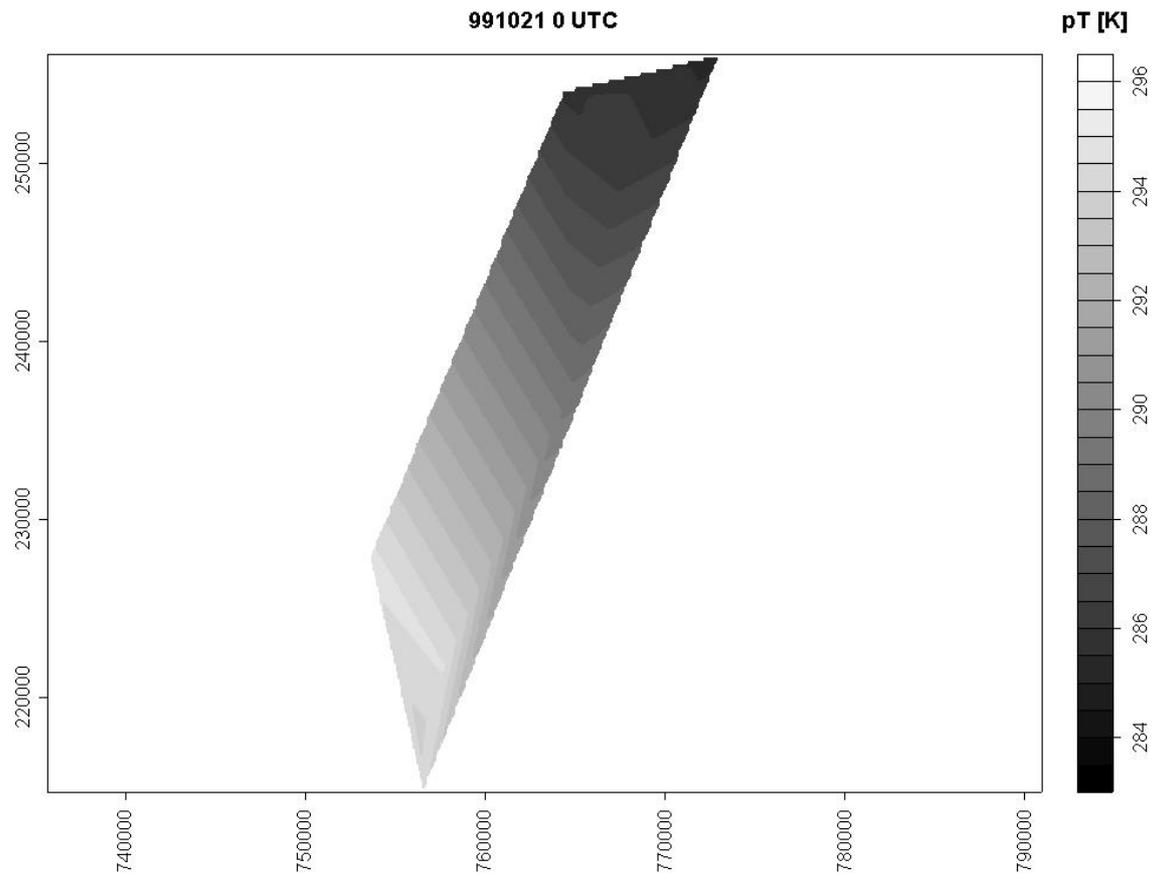
Für die Auswertung wurden die Daten der folgenden Bodenstationen (von Süd nach Nord) herangezogen: Balzers, Weite, Vaduz, Buchs-Grabs, Feldkirch, Diepoldsau, Lustenau, Heerbrugg und Dornbirn.

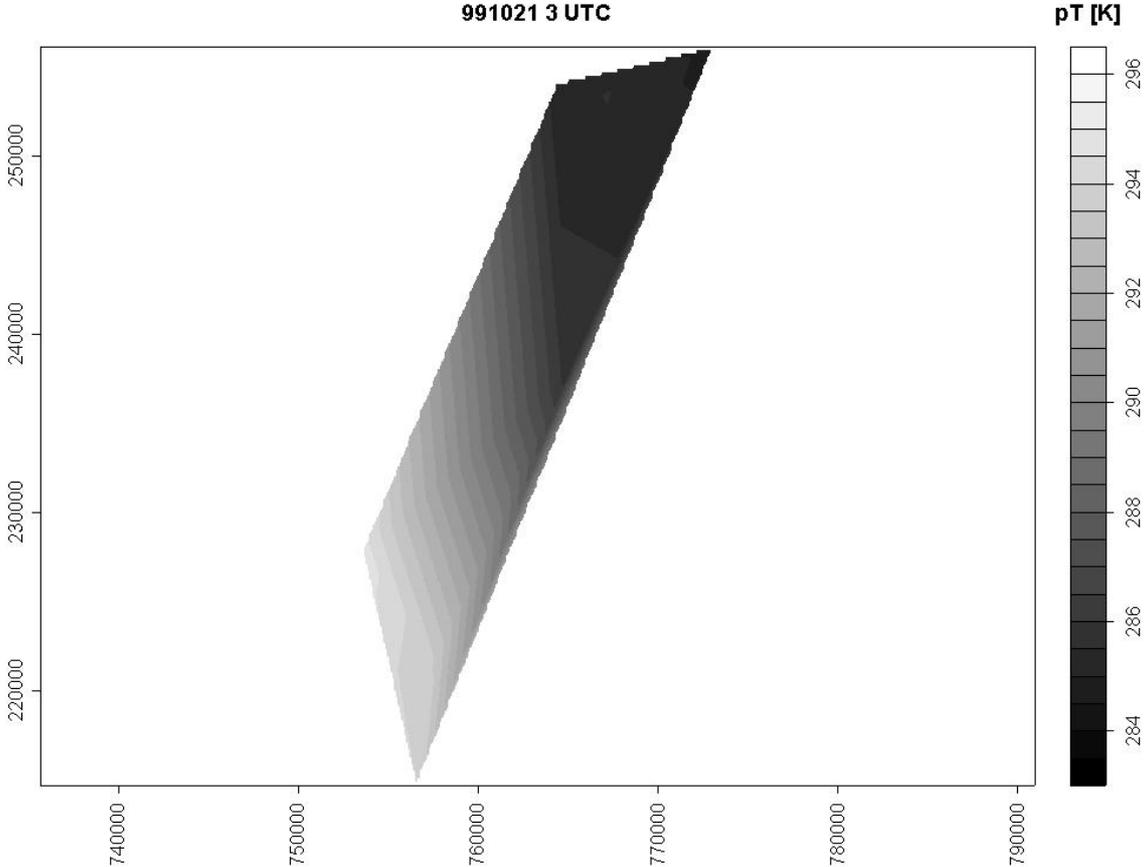
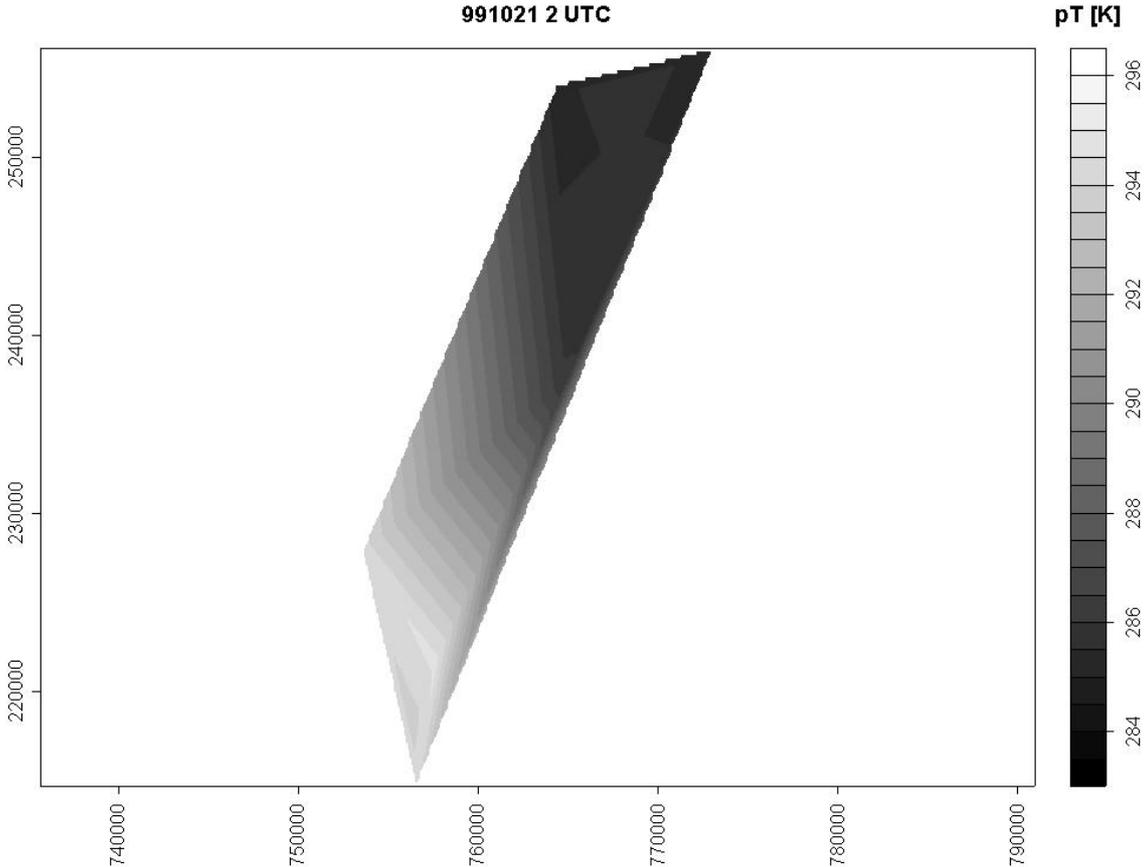
Am 20. Oktober 1999 brach der Föhn um 07:00 UTC in Balzers durch und in Vaduz um 19:10 UTC. Ab diesem Zeitpunkt arbeitete sich der Föhn in Richtung Norden vor. Ab 21. Oktober 1999, 00:00 UTC drängte die Kaltluft zurück in Richtung Süd. Bis 06:00 UTC schien sich die Lage kaum zu verändern. Während sich dann der Föhn im Süden in der Region von Balzers wieder durchsetzte, floss gleichzeitig weiter Kaltluft aus Norden nach.

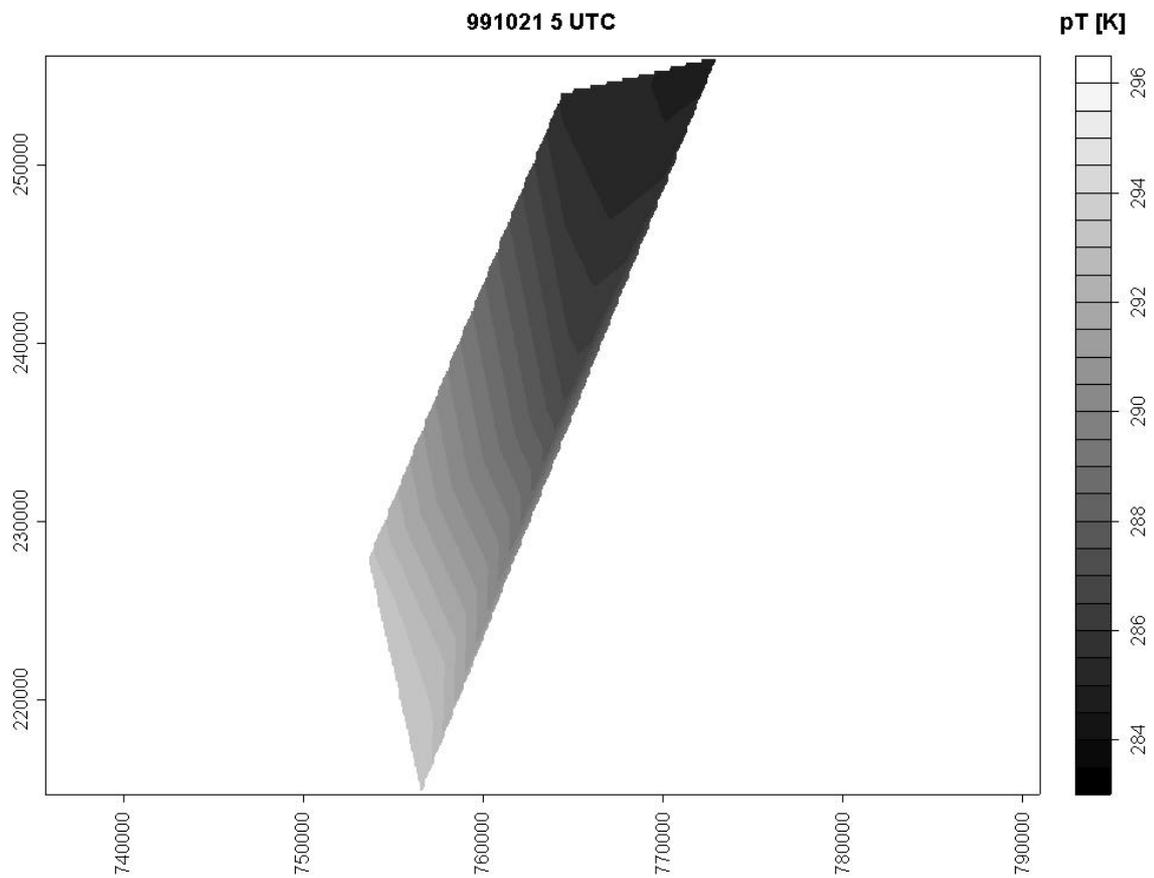
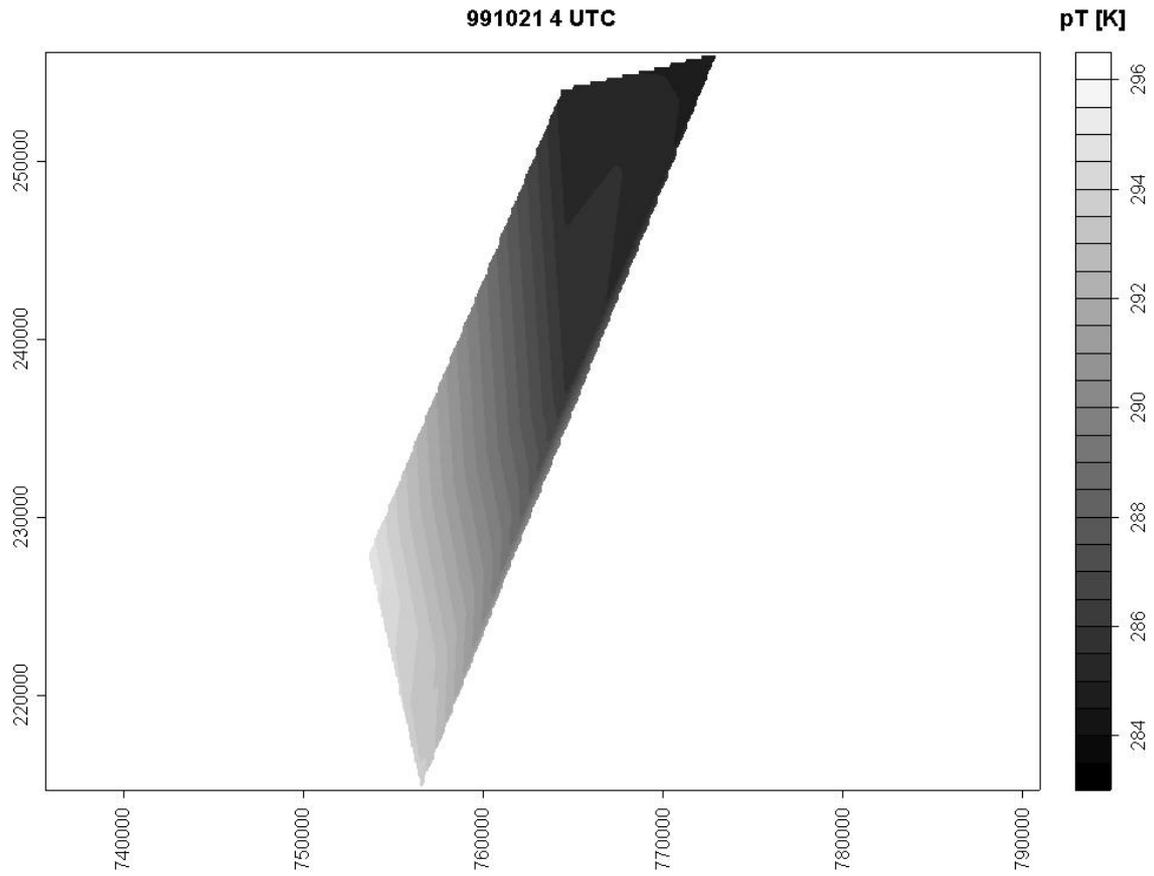


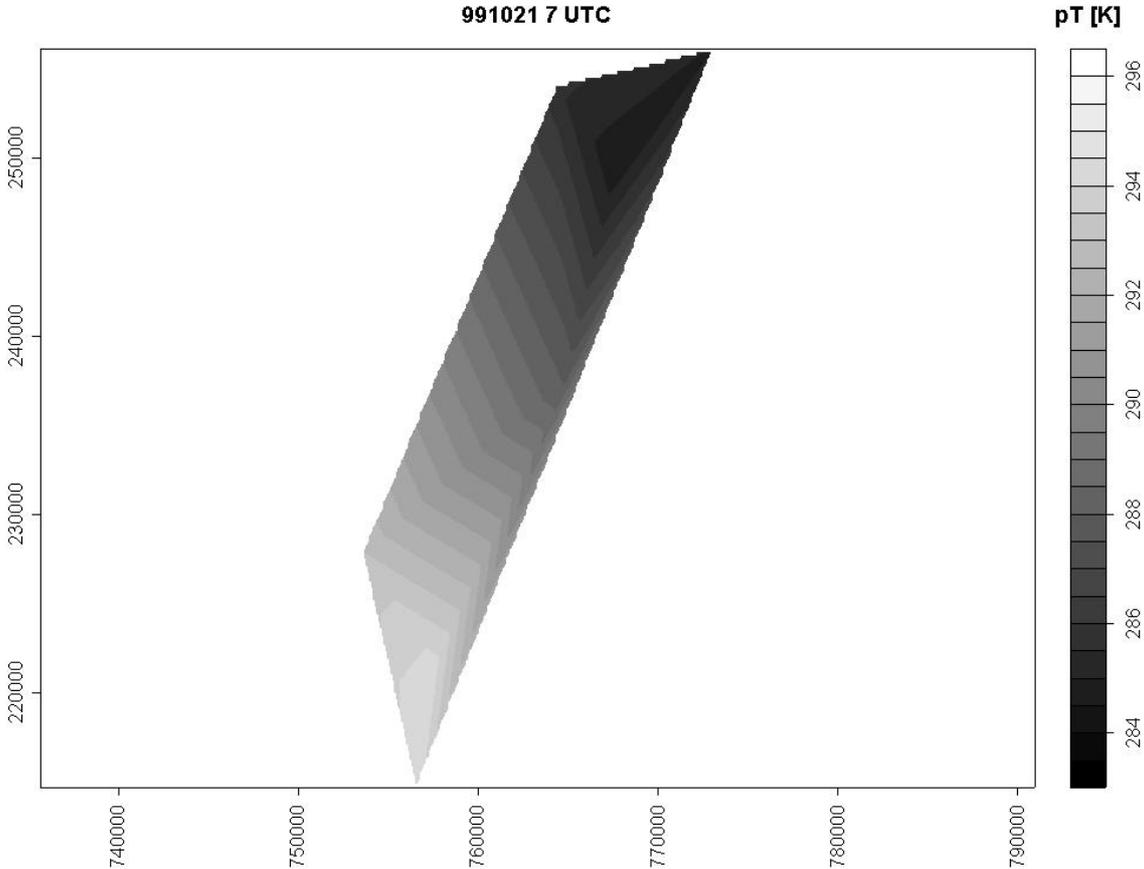
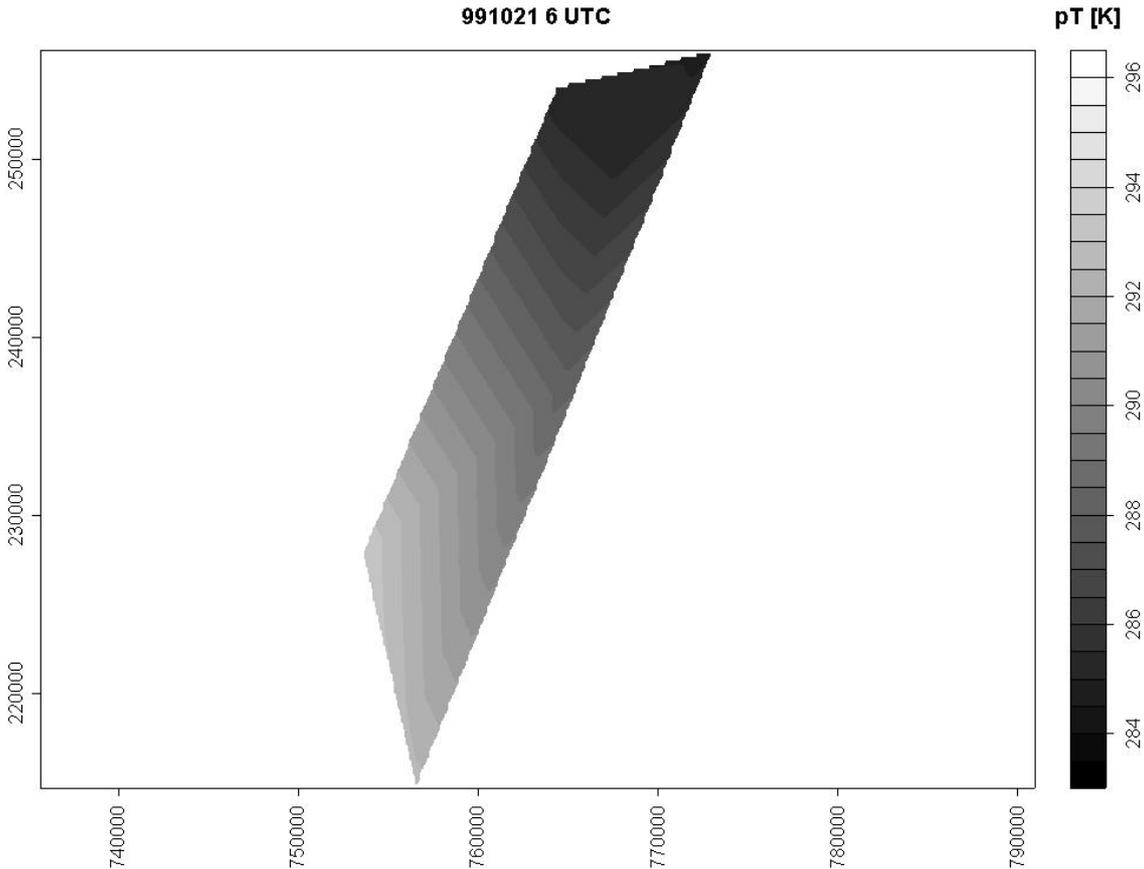


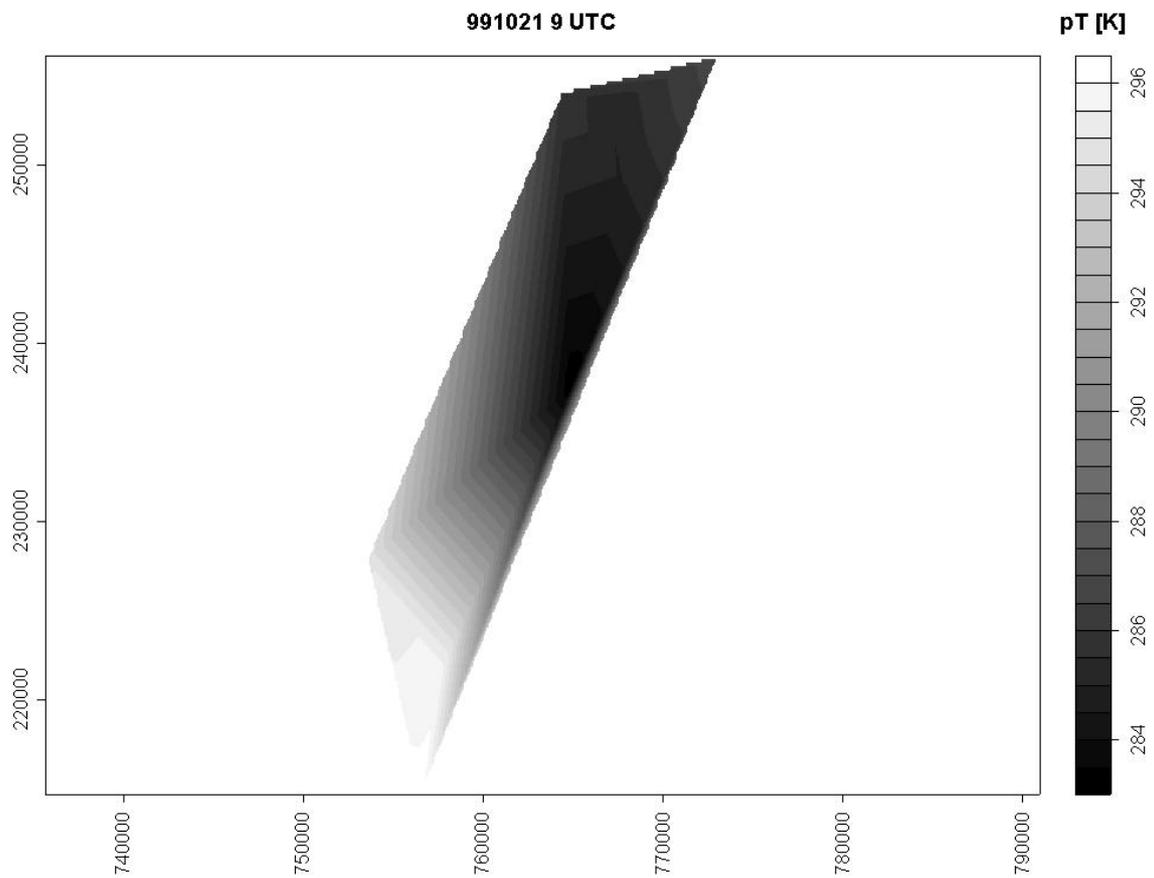
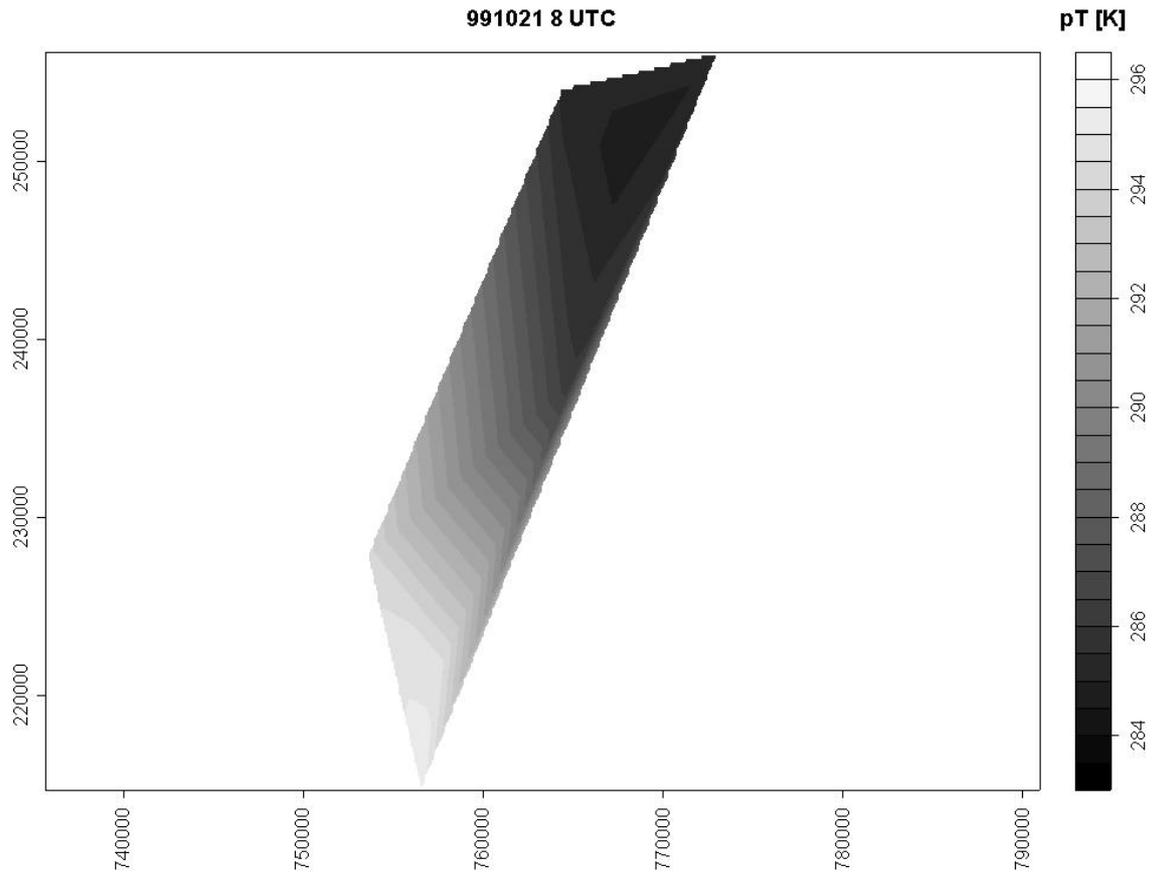












Literaturverzeichnis

- Albright, J. G., 1943: *Physical Meteorology*. Prentice Hall, New York, 392 S.
- American Meteorological Society, 1959: *Glossary of Meteorology*. AMS, Boston, 638 S.
- Barry, R. G., 1981: *Mountain Weather and Climate*. Methuen, London und New York, 313 S.
- Baumann, K., H. Maurer, G. Rau, M. Piringer, U. Pechinger, A. Prévôt, M. Furger, B. Neining, und U. Pellegrini, 2001: The influence of south Foehn on the ozone distribution in the Alpine Rhine valley - results from the MAP field phase. *Atmos. Environ.*, **35**, 6379-6390.
- Berg, H., 1952: Der Föhn im nördlichen Alpen- und Voralpengebiet vom 11. bis 14. März 1951. *Bericht deutscher Wetterdienst, US-Zone*, **35**.
- Billwiller, R., 1878: Besprechung von M.F.F. Hébert's „Etude sur les grands mouvements de l'atmosphère et sur le Foehn et le Scirocco pendant l'hiver 1876/77. *Zeitschrift der österreichischen Gesellschaft für Meteorologie*, **13**, 317-320.
- Billwiller, R., 1899: Über verschiedene Entstehungsarten und Erscheinungsformen des Föhns. *Meteorol. Z.*, **16**, 204-215.
- Binder, P., und Ch. Schär (eds.), 1996: *MAP Mesoscale Alpine Programme, Design proposal*. MAP Office, c/o MeteoSchweiz, CH-8044 Zürich, 75 S.
- Binder, P., A. Rossa, P. Bougeault, J. Moore, D. Jorgensen, and und M. Bolliger, 1999: *MAP Implementation Plan*. MAP Office, c/o MeteoSchweiz, CH-8044 Zürich, 230 S.
- Bougeault, P., P. Binder, und J. Kuettner (eds.), 1998: *MAP Mesoscale Alpine Programme, Science Plan*. MAP Office, c/o MeteoSwiss, CH-8044 Zürich, 64 S.
- Bougeault, P., P. Binder, A. Buzzi, R. Dirks, R. Houze, J. Kuettner, R. B. Smith, R. Steinacker, und H. Volkert, 2001: The MAP Special Observing Period. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **82**, 433-462.
- Brinkmann, W. A. R., 1970: The Chinook at Calgary (Canada). *Arch. Met. Geophys. Biokl.*, **18**, 279-286.
- Brinkmann, W. A. R., 1971: What is a foehn? *Weather*, **26**, 230-239.
- Brinkmann, W. A. R., 1973: A climatological study of strong downslope winds in the Boulder area. *NCAR, Coop. Thes.* **27**, INSTAAR Occasional Pap. No. 6, 229 S.
- Burri, K., P. Hächler, M. Schüepp, und R. Werner, 1999: Der Föhnfall vom April 1993. *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz*, **196**, 89 S.
- Conrad, V., 1936: Die klimatologischen Elemente und ihre Abhängigkeit von terrestrischen Einflüssen. In: Borchhardt, W., *et al.*, *Handbuch der Klimatologie*, Gebrüder Bornträger, Berlin.
- Donn, W. L., 1975: *Meteorology*. McGraw-Hill, New York, 518 S.

- Drobinski, P., 2000: Analysis of dynamical processes for flow splitting in the Rhine Valley from Doppler Lidar and Rawinsonde data. *Vortrag MAP Meeting 2000*, Bohinjska Bistrica, Slowenien.
- Drobinski, P., A. M. Dabbas, Ch. Häberli und P. H. Flamant: On the small-scale dynamics of flow splitting in the Rhine valley during a shallow foehn event. *Boundary-Layer Meteorol.*, **99**, 277-296.
- Dürr, B., 2000: *Föhn heute und gestern – ein interdisziplinäres Forschungsgebiet*. Diplomarbeit am Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich, 110 S.
- Dürr, B., und H. Richner 2001: Föhnmodelle im Laufe der Zeit. Vortrag, *DACH-Meeting*, 18.09.-21.09.2001, Wien.
- Ekhart, E., 1949: Zum Innsbrucker Föhn. *Meteorol. Rdsch*, **2**, 276-280.
- Emeis, S., 2000: *Meteorologie in Stichworten*. Gebrüder Bornträger Verlagsbuchhandlung, Berlin, Stuttgart, 199 S.
- Ficker, H., 1910a: Über die Entstehung der Föhnwinde auf der Nordseite der Alpen. *Meteorol. Z.*, **27**, 439-451.
- Ficker, H., 1910b: Innsbrucker Föhnstudien, IV. Weitere Beiträge zur Dynamik des Föhns. *Denkschr. Wiener Akad.*, **85**, 113 S.
- Ficker, H., 1912: Temperatur und Feuchtigkeit bei Föhn in der freien Atmosphäre. *Sitzungsberichte K. Akad. Wiss.*, Wien, **121**, 1-9.
- Ficker, H., 1931: Warum steigt der Föhn in die Täler herab? *Meteorol. Z.*, **48**, 227-229.
- Ficker, H., und B. de Rudder, 1943: *Föhn und Föhnwirkungen*. Akademische Verlagsgesellschaft Becker & Erler, 112 S.
- Frey, K., 1945: *Beiträge zur Entwicklung des Föhns und Untersuchungen über Hochnebel*. Dissertation, Trimbach-Olten.
- Frey, K., 1953: Die Entwicklung des Süd- und des Nordföhns. *Arch. Met. Geoph. Biocl.*, **5**, 432-477.
- Frey, K., 1986: Gleichzeitigkeit von Nord- und Südföhn bei einer Westlage. *Arch. Met. Geoph. Biocl.*, **34**, 349-366.
- Frey, K., 1996: Der Föhn. Seine Eigenschaften und Erscheinungsformen. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Solothurn*, **37**, 185-199.
- Furger, M., 1990: *Die Radiosondierungen von Payerne*. Dissertation, Universität Bern, 191 S.
- Gensler, G., 1974: Föhn und Wetterfähigkeit. *Beiheft zu den Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt*, Jg. 1972, 121-134.
- Gutermann, Th., 1970: *Vergleichende Untersuchungen zur Föhnhäufigkeit im Rheintal zwischen Chur und Bodensee*. Dissertation, Universität Zürich, 69 S.
- Gutermann, T., und H. Wanner, 1982: ALPEX SOP März/April 1982. Die spezielle Beobachtungsperiode von ALPEX.: Struktur und Aktivitäten des Operationszentrums (AOC) in Genf. *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz*, **111**, 87 S.

- Hammer, Th. A., 1973: *Die Orts- und Flurnamen des St.-Galler Rheintals*. Huber & Co. AG, Frauenfeld, 216 S.
- Hann, J., 1866: Zur Frage des Ursprung des Föhn. *Zeitschrift der österreichischen Gesellschaft für Meteorologie*, **1**, 257-263.
- Hann, J., 1885: Einige Bemerkungen zur Entwicklungsgeschichte der Ansichten über den Ursprung des Föhns. *Meteorol. Z.*, **2**, 393-399.
- Hann, J., 1906: *Lehrbuch der Meteorologie*. Tauchnitz Verlag, Leipzig, 642 S.
- Helmholtz, H., 1865: *Über Eis und Gletscher*. Vorlesung, Frankfurt am Main.
- Hoegger, B., A. Heimo, G. Levrat, und J. Rieker, 1989: SRS-400: The new Swiss radiosonde. *Fourth WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observations*. (TECIMO-IV), 4.–8. September 1989, Brussels, Belgium. WMO Report **35**, WMO/TD-303.
- Hoinka, K. P., 1985: What is a Foehn Clearance. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **66**, 1123-1132.
- Hoinka, K. P., und F. Rösler, 1987: The Surface Layer on the Leeseide of the Alps during Foehn. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **37**, 245-258.
- Hoinka, K. P., 1990: Untersuchungen der alpinen Gebirgsüberströmung bei Südföhn. *Forschungsbericht der DLR*, FB **90-30**, 186 S.
- Hünerbein, S., 1999: *Fallstudien an Hochnebelwetterlagen über komplexem Gelände mit Sodar-Geräten*. Dissertation, ETH Zürich, 133 Seiten.
- Kanitscheider, R., 1932: Beiträge zur Mechanik des Föhns. *Beitr. Phys. fr. Atmos.*, **53**, 486-508.
- Kuhn, M., 1989: *Föhnstudien*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 504 S.
- Kuettner, J., 1939: Moazagotl und Föhnwelle. *Beitr. Phys. Atmos.*, **25**, 79-114.
- Kuettner, J. (ed.), 1982: ALPEX. Preliminary Scientific Results. *GARP-ALPEX*, **7**, 266 S.
- Lammert, L., 1920: Der mittlere Zustand der Atmosphäre bei Südföhn. *Veröff. Geoph. Institut Leipzig*, **2**, 261-323.
- Liljequist, G., und K. Cihak, 1984: *Allgemeine Meteorologie* (3. Auflage). Vieweg Verlag, Braunschweig, 385 S.
- McGowan, H. A., und A. P. Sturman, 1996: Regional and local scale characteristics of foehn wind events over the South Island of New Zealand. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **58**, 151-164.
- Mahrt, L., J. I. MacPherson und R. Dejardins, 1994: Observations of Fluxes over heterogeneous Surfaces. *Boundary-Layer Meteorol.*, **67**, 345-367.
- Meteorological Office, 1991: *Meteorological Glossary*. London, HMSO, 335 S.
- MeteoSchweiz, 1980: Projekt ANETZ 1974-1980. *Zusammenfassung der Vorträge der ANETZ-Kolloquien*, 26. und 27. November 1980, Zürich, 25 S.
- MeteoSchweiz, 1985: Charakteristiken der ANETZ-Daten. *Beiträge zum ANETZ-Daten-Kolloquium*, 17. April 1985, Zürich, 56 S.

- Mörikofer, W., 1950: Zur Meteorologie und Meteorobiologie des Alpenföhns. *Verhandlgn d. Schweiz. Naturforsch. Ges.*, 130, Versammlung Davos, 11-32.
- Müller, G. (ed.), 1995: Automatisches Meteorologisches Ergänzungsnetz (ENET). *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz*, **180**, 34 S.
- Nater, W., 1979a: Grenzschichtwellen als Ursache für kurzperiodische Druckschwankungen. *LAPETH-15*, 128 S.
- Nater, W., H. Richner und P. D. Phillips, P. D., 1979b: Shear Instabilities and their Characteristics during Foehn. *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*, **13**, 215-223.
- Neininger, B., W. Fuchs, M. Bäumle, A. Volz-Thomas, A. S. H. Prévôt, und J. Dommen, 2001: A small aircraft for more than just ozone: MetAir's Dimona after ten years of evolving development. *11th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Albuquerque, New Mexico, American Meteorological Society, in press.
- Obenland, E., 1956: Untersuchungen zur Föhnstatistik des Oberallgäus. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, **23**.
- Osmond, H. W., 1941: The chinook wind east of the Canadian Rockies. *Can. J. Res.*, A, **19**, 57-66.
- Peppler, W., 1930: Schema eines Föhnausbruchs aus dem Rheintal. *Das Wetter*, **47**, 78-84.
- Peppler, W., 1935: Über die südlichen Luftströmungen auf dem Säntis und in der freien Atmosphäre über dem Bodensee. *Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre*, **22**, 1-11.
- Petkovsek, Z., 1985: The termination of air pollution periods in valley basins. *Z. Meteorol.*, **37**, 16-19.
- Petkovsek, Z., 1992: Turbulent Dissipation of Cold Air Lake in a Basin. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **47**, 237-245.
- Piringer, M., K. Baumann, U. Pechinger, und S. Vogt, 2001: Meteorological and ozone sounding experience during a strong foehn event – a MAP case study. *Meteorol. Z.*, **10**, 445-455.
- Quaile, E. L., 2001: Back to basics: Föhn and chinook winds. *Weather*, **56**, 141-145.
- Reiter, E. R., 1958: *Klima von Innsbruck (1931-55)*. 2. Sonderveröffentlichung, Stadtmagistrat Innsbruck, Statistisches Amt.
- Richner, H., 1974: Zusammenhänge zwischen raschen atmosphärischen Druckschwankungen, Wetterlage und subjektivem Befinden. *LAPETH-8*, 97 S.
- Richner, H., J. Joss, und P. Ruppert, 1996: A Water Hypsometer utilizing high-precision Thermocouples. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **13**, 175-182.
- Richner, H. (ed.), 1999: Grundlagen aerologischer Messungen speziell mittels der Schweizer Sonde SRS-400. *Veröffentlichungen der MeteoSchweiz*, **61**, 140 S.
- Richner, H., R. Steinacker, Ch. Häberli, und S. Gubser, 2002: The design and operation of the composite observing system in the Rhine Valley Target Area during the Mesoscale Alpine Programme (MAP). *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* (in review).

- Schamp, H., 1964: *Die Winde der Erde und ihre Namen*. Franz Steiner Verlag GmbH, Wiesbaden, 94 S.
- Schlegel, M., 1952: Die Böigkeit der Winde an einer Alpenvorlandstation unter Berücksichtigung des Föhns. *Deutscher Wetterdienst in der US-Zone*, **42**, 47-50.
- Schüepp, M., 1950: *Wolken, Wind und Wetter*. Büchergilde Gutenberg, Zürich, 263 S.
- Schweitzer, H., 1953: Versuch einer Erklärung des Föhns als Luftströmung mit überkritischer Geschwindigkeit. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklim.*, **5**, 350-371.
- Schweizer Armee, 1993: Die Peilausrüstung P-763 für den Artilleriewetterdienst. *Betriebsanleitung*, **55.67** d.
- Schüepp, M., 1950: *Wolken / Wind und Wetter*. Büchergilde Gutenberg, Zürich, 263 S.
- Scorer, R. S., 1951: Forecasting the occurrence of lee waves. *Weather*, **6**, 99-103.
- Scorer, R. S., und H. Klieforth, 1959: Theory of mountain waves of large amplitude. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **85**, 131-143.
- Seibert, P., 1984: Feinanalysen der Temperatur bei Südföhn. *Zbornik meteor. Hidrol. Radova*, **10**, 203-206 (proceedings 18th ICAM, Opatija).
- Seibert, P., 1985: *Fallstudien und statistische Untersuchungen zum Südföhn im Raum Tirol*. Dissertation, Universität Innsbruck, 367 S.
- Seibert, P., 1990: South foehn studies since the ALPEX experiment. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **43**, 91-103.
- Spatzierer, M., 2002: Vergleich der Föhnstruktur in 2 Alpentälern. Diplomarbeit, Universität Wien.
- Steinacker, R., 1983: Fallstudie eines Süd- und eines Nordföhnfalles über den Alpen. *Aero-Rev.*, **8**, 141-144.
- Steinacker, R., Ch. Häberli, K. Baumann, S. Gubser, M. Lothon, M. Furger, und Th. Gutermann, 2001: Unstationary aspects of foehn in a large valley: Scientific objectives and selected results of the MAP subprogram FORM. *Meteorol. Atmos. Phys.* (submitted).
- Steinacker, R., M. Spatzierer, B. Chimani, Ch. Häberli, M. Dorninger und S. Tschannett, 2002: What can we learn of surface mesonets in Foehn valleys? *AMS MMC/MAP Meeting*, Park City, Utah, American Meteorological Society.
- Streiff, D., W. Kuhn, P. Kasser und H. Gutersonn, 1984: Dr. h.c. Rudolf Streiff-Becker. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft des Kantons Glarus*, **XIV**, 111 S.
- Streiff-Becker, R., 1931: Zur Dynamik des Föhns. *Meteorol. Z.*, **48**, 149-152.
- Stull, R. B., 1988: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 670 S.
- Thambyapillay, G., 1958: The Kâchchan - A foehn wind in Ceylon. *Weather*, **13**, 107-114.

- Truog, G., 1986: URFEX (Urnersee Föhnexperiment). *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz*, **138**, 73 S.
- Ungeheuer, H., 1952: Zur Statistik des Föhns im Voralpengebiet. *Bericht des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone*. **38**, 117-120.
- Vergeiner, I., 1971: An operational linear lee wave model for arbitrary basic flow and two-dimensional topography. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **97**, 30-60.
- Vergeiner, I., 1976: Föhn- und Leewellenströmung in einem dreidimensionalen numerischen Modell. *Ber. nat.-med. Verein Innsbruck*, **63**, 11-56.
- Volkert, H., 1983: Klimatologie der Varianz meteorologischer Felder in Südbayern. Dissertation, Universität München, auch als DFVLR-FB **83-31**, 155 S.
- Waibel, K., 1984: Statistik des Föhns im Bodenseeraum im Vergleich mit dem Reusstal (Altdorf). *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz*, **118**, 60 S.
- Weber, L., 1904: *Wind und Wetter*. B.G. Teubner, Leipzig, 130 S.
- Whiteman, D. C., 2000: *Mountain Meteorology*. Oxford University Press, Oxford, 355 S.
- World Meteorological Organization, 1992: *International Meteorological Vocabulary*. Geneva, WMO-No. **182**.

Danksagung

Eine interessante, lehr- und abwechslungsreiche Zeit geht nun zu Ende. Es war eine Zeit mit Höhen und Tiefen. Doch viele Personen haben dazu beigetragen, dass vor allem die Höhen in Erinnerung bleiben werden.

Einen grossen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hat Prof. Dr. Hans Richner. Er stand mir immer zur Seite und dies nicht nur bei fachlichen Problemen. Die Zeit der abwechslungsreichen und nicht immer nur den Föhn betreffenden Diskussionen werde ich vermissen.

Meinem Korreferenten Prof. Dr. Reinhold Steinacker möchte ich für die immer wieder inspirierenden Hinweise danken. Bei ihm merkt man, dass er den Föhn nicht erforscht, er lebt ihn.

Nicht nur als Korreferent stand mir Prof. Dr. Huw C. Davies am Schluss zur Seite. Auch als Insitutsleiter des IAC habe ich ihn schätzen gelernt.

Es geht nichts über die Erfahrung einer Person, welche seit über drei Jahrzehnten den Föhn im Rheintal untersucht. Dr. Thomas Gutermann stand mir oft mit Rat zur Seite. Für die gewissenhafte Durchsicht einzelner Kapitel möchte ich mich an dieser Stelle recht herzlich bedanken.

Einen grossen Dank gebührt Esther Häller, welche mit mir in Bad Ragaz und Zürich das Büro geteilt hat. Sie hatte nicht nur Verständnis für meine Eigenarten, sondern war mir immer wieder behilflich falls ich wieder Daten benötigte. Sie war mein persönliches FORM Data Centre.

Die Diplomarbeit von Bruno Dürr und die gemeinsamen Gespräche waren sehr aufschlussreich und gaben mir immer wieder neue Ideen für meine Arbeit.

Bei der FORM-Gruppe und der Arbeitsgruppe Föhnforschung Rheintal-Bodensee möchte ich mich für die herzliche Aufnahme bedanken. Auch als so genannter Grünschnabel in der Föhnforschung wurde ich sofort akzeptiert.

Der harte Kern des ehemaligen LAPETH und jetzigen IAC darf hier natürlich nicht vergessen werden. Dr. Hans Hirter, Ruedi Lüthi, Peter Isler und Donat Högl bildeten einen Teil des Fundaments für die Untersuchungen im Rheintal. Sie sorgten für eine perfekte Infrastruktur und gut gewartete Geräte.

Einen grossen Beitrag zu FORM lieferte die Schweizer Armee mit dem Einsatz ihrer Radiosonden- und Bodenstationen. Ohne diesen Einsatz wäre FORM nicht zu diesem grossen Erfolg geworden.

Ein grosser Dank geht auch an meinen Kommandanten, Kollegen und Freund Christian Häberli. Er ist dafür verantwortlich zu machen, dass ich am Projekt FORM teilnehmen wollte. Seine Begeisterung für die Meteorologie hat mich angesteckt.

Ohne die Hilfe und Unterstützung der Bevölkerung und Gemeindeverwaltungen im Rheintal wäre ein solches Projekt wie FORM nicht möglich gewesen. Das Land für die Installation von Messgeräten wurde immer unbürokratisch zur Verfügung gestellt. Zusätzlich erfuhr ich bei Gespräche mit den Landbesitzern immer wieder etwas Neues über die Eigenarten des Föhns im Rheintal. Vielen Dank dafür, dass wir Gäste im Rheintal sein durften.

Zum Schluss möchte ich mich bei derjenigen Person bedanken, welche mir während der ganzen Zeit geduldig zur Seite stand und mich unterstützte. Ohne die Kraft, welche sie mir gab, hätte ich diese Arbeit nie zu Ende gebracht. Vielen Dank Doris!

Lebenslauf

Stefan Gubser

geboren am 9. November 1970 von Kriens, Schweiz

Bildungsweg

1977 - 1983	Primarschule Kriens
1983 - 1990	Kantonsschule Alpenquai, Luzern
1991 - 1993 /	Universität Bern
1994 - 1998	Diplom Mathematik
1999 - 2001	Nachdiplomkurs Statistik, ETH Zürich
1999 - 2002	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich Doktorarbeit am Institut für Atmosphäre und Klima
ab 2002	Höheres Lehramt, Universität Zürich

Tätigkeiten

1991 - 1998	OPACC Software AG, Kriens / Teilzeitangestellter
1999 - 2002	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich / Doktorand
2002 - 2005	Kantonsschule Schüpfheim / Lehrer (Mathematik und Physik)
ab 2005	Kantonsschule Zug / Lehrer (Mathematik und Informatik)

Militär

1990	Rekrutenschule, Dübendorf (Armeewetterdienst)
1991	Unteroffiziersschule, Dübendorf
1994	Offiziersschule, Dübendorf
2000	Stabslehrgang, Luzern

Konferenzen

- 5. MAP Meeting, 9. bis 11. Juni 1999, Appenzell, Schweiz
- 1. MAP-FORM Meeting, 28. bis 29. Februar 2000, Lochau, Österreich
- 6. MAP Meeting, 24. bis 26. Mai 2000, Bohinjka Bistrica, Slowenien
- 2. MAP-FORM Meeting, 23. bis 24. Oktober 2000, Charmey, Schweiz
- 7. MAP Meeting, 14. bis 16. Mai 2001, Schliersee, Deutschland
- 3. MAP-FORM Meeting, 9. bis 10. April 2001, Wien, Österreich
- DACH 2001, Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung, 18. bis 21. September 2001, Wien, Österreich
- Jahresversammlung der Schweizerischen Gesellschaft für Meteorologie, 18. bis 19. Oktober 2001, Yverdon, Schweiz
- 4. MAP-FORM Meeting, 8. bis 9. November 2001, Bad Ragaz
- Jahresversammlung der Schweizerischen Gesellschaft für Meteorologie, 18. bis 19. September 2002, Davos, Schweiz