

**Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt
Rapports de travail de l'Institut Suisse de Météorologie
Rapporti di lavoro dell'Istituto Svizzero di Meteorologia
Working Reports of the Swiss Meteorological Institute**

Zürich

DER FOEHN VOM 14. - 18. JANUAR 1975 IM BODENSEERAUM

Arbeitsgemeinschaft Föhnforschung Rheintal / Bodensee

Redaktion: Th. Gutermann

Oktober 1979

Klimatologie

551.555.3

Zusammenfassung

Im Rahmen der zehnjährigen, von 1973 - 1982 dauernden "Föhnforschung Rheintal / Bodensee" bringt die vorliegende Arbeit Ergebnisse einer Studie der ausgeprägten Föhnlage vom 14. - 18. Januar 1975, in welcher im östlichen Bodenseegebiet während 27 Stunden Föhn herrschte.

Auf die Beschreibung des Wetterablaufs folgt vorerst ein Kapitel über den Luftdruck. Erstmals wurden alle 60 luftdruckmessenden Stationen der Schweiz für Detaildruckanalysen beigezogen. Deutlich zeigen diese Druckbilder bei Föhn starke örtliche Unterschiede, welche die Folge des ausgeprägten Reliefs sind. Im Abschnitt Wind fällt auf, dass die stärksten Korrelationen zwischen den Stationen Gütsch (Gotthardgebiet) und Rohrspitz am Bodensee errechnet wurden. Im weiteren wird die unterschiedliche Föhndauer an den verschiedenen Messstellen mitgeteilt. Im Kapitel Temperaturen sticht die föhntypische starke horizontale Temperaturzunahme in Gipfelhöhe vom Alpenkamm ins nördliche Vorland (Gütsch - Säntis) hervor. Einen beschränkten Einblick in die Föhnströmungsverhältnisse erlauben die sechs auswertbaren aerologischen Aufstiege, welche während dieser Untersuchungsperiode im Rheintal ausgeführt wurden. Abschliessend wird gezeigt, dass zwischen Föhn und Atmosphericus kein direkter Zusammenhang bestehen kann.

Résumé

On étudie ici la situation de foehn qui a régné du 14 au 18 janvier 1975. Durant ce laps de temps, ce vent particulier a soufflé durant 27 heures dans la région orientale du Bodensee. Cette étude fait partie intégrante d'une recherche plus vaste s'étendant à la décennie 1973 - 1982 et nommée: "Föhnforschung Rheintal / Bodensee".

On décrit tout d'abord la situation générale et l'évolution du temps qui en découle. Le chapitre suivant est consacré à la pression atmosphérique. C'est la première fois que les relevés des 60 stations suisses où la pression est mesurée sont utilisés dans une analyse de détail. Ces cartes de pression montrent nettement des différences locales dues au relief accentué qui est le nôtre. Dans le chapitre consacré au vent, les plus fortes corrélations sont celles calculées entre les valeurs relevées au Güttsch (Massif du Gotthard) et au Rohrspitz sur les bords du Bodensee. On mentionne également les différences entre les points de mesure quant à la durée du foehn. Dans un autre chapitre, la hausse horizontale de la température, typique dans de telles situations, est mise en évidence. Cette hausse se propage des Alpes vers le Moyen Pays (Güttsch - Säntis) à l'altitude des cimes. Parmi ceux qui furent effectués dans la Vallée du Rhin durant cette période, les six sondages aérologiques exploitables donnent un aperçu limité des conditions d'écoulement de l'air par situations de foehn. On montre pour terminer qu'il ne peut y avoir de relation directe entre le foehn et le nombre d'atmosphériques.

Riassunto

Nel quadro della decennale "Ricerca sul favonio nella Valle del Reno/Lago Bodanico", iniziata nel 1973 e che durerà fino al 1982, il presente lavoro dà i risultati di uno studio sulla particolare situazione favonica del 14 - 18 gennaio 1975, durante la quale il favonio regnò per 27 ore nella regione del Lago Bodanico.

Alla descrizione dello sviluppo del tempo, fa seguito dapprima un capitolo sulla pressione atmosferica. Per la prima volta vennero considerati in dettaglio i valori della pressione di tutte le 60 stazioni svizzere, che fanno queste misurazioni. I campi barici durante il favonio sono sottoposti a forti differenze locali, causate dal pronunciato rilievo orografico. Nella parte dedicata al vento le maggiori correlazioni sono state calcolate tra le stazioni del Güttsch (regione del Gottardo) e Rohrspitz sul Bodanico. Più oltre viene comunicata la durata del favonio nei diversi posti di misurazione. Nel capitolo delle temperature spicca il forte aumento orizzontale, tipicamente favonico, della temperatura all'altezza delle cime, dalla catena alpina alle regioni antistanti più a nord (Güttsch - Säntis). I sei radiosondaggi aerologici analizzabili, eseguiti nella Valle del Reno durante questo periodo di ricerca, permettono una limitata visione delle condizioni delle correnti favoniche. In chiusura viene mostrato che non può esistere una correlazione diretta tra favonio e "atmosphériques".

Summary

As part of the project "Föhnforschung Rheintal / Bodensee" which covers the period 1973 - 1982, this work is a case-study of a very strong föhn wind situation during which föhn winds blew for 27 hours between the 14th and the 18th of January 1975.

After a description of the evolution of the synoptic situation, follows a chapter on the surface pressure. For the first time, pressure observations of the 60 stations where this parameter is measured in Switzerland have been used for the derivation of detailed surface pressure charts.

By föhn wind occurrence, these pressure patterns show marked local pressure differences which are a consequence of our very differentiated orography. In the chapter devoted to the wind, it is between the locations Gütsch (in the Gotthard massif) and Röhrspitz (at the Lake of Constance) that the highest correlation coefficients have been found. The respective lengths of the föhn wind periods at the observational locations are also reported. In the chapter on temperatures, the typical strong increase in horizontal temperatures at the height of the summits is to be found between the crest of the Alps (Gütsch) and the northern part of the pre-alpine region (Säntis). A limited insight into the air-flow structure in cases of föhn winds could be gained by evaluation of six usable upper air soundings performed during this period in the Rhine Valley. Finally, it is shown that there is no relation between occurrences of föhn winds and atmospheric.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Verfasser</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	Gutermann Th. Mühleisen R.	2
2. Stationsnetz	Gutermann Th.	6
3. Wetterablauf	Güller A.	6
4. Luftdruck		
4.1. Die Luftdruckverhältnisse vor, während und nach der Föhlage auf der Alpennordseite	Güller A.	10
4.2. Zeitlicher Druckdifferenzver- lauf Alpensüdseite-Alpennord- seite	Güller A.	14
4.3. Zeitlicher Druckverlauf in ver- schiedenen Niveaus	Mühleisen R.	16
5. Wind		
5.1. Windverlauf	Pfisterer W.	18
5.2. Korrelationsuntersuchung der Windgeschwindigkeiten	Waibel K.	21
5.3. Tägliche Windwege	Klar K.	23
6. Föhndauer an den einzelnen Stationen	Gutermann Th.	25
7. Temperatur	Gutermann Th.	27
8. Aerologische Aufstiege	Mühleisen R.	34
9. Föhn und Atmosferics	Mühleisen R. Schmidt W.	38
Literaturverzeichnis		41
Dank		41
Anschriften der Autoren		42

1. Einleitung

Föhn ist eine spezielle Luftströmung über Gebirge (airflow over mountains), die im Lee der Hindernisse durch Absteigen zu einer Erwärmung und Austrocknung der Luft führt. Die lokale Topographie spielt dabei eine bedeutende Rolle. Daneben werden aerodynamische und thermodynamische Effekte wirksam, welche durch die mit dem im Luv erzwungenen Aufsteigen verbundenen Kondensations- und Niederschlagsprozesse ausgelöst werden. Da den Meteorologen hauptsächlich der Föhn am Boden interessiert, ergibt sich die Aufgabe, aus den meteorologischen Anfangsbedingungen, das heisst in der Praxis aus den verfügbaren Daten vornehmlich im Anströmen und über dem betreffenden Gebirge, das Eintreten des Föhns am Boden vorherzusagen.

Bei Föhn herrscht im Lee des Gebirges in der freien Atmosphäre eine wellenförmige Luftbewegung vor. Die entscheidenden Parameter für die Ausbildung von Leewellen sind Windgeschwindigkeit und -richtung in Funktion der Höhe sowie der Stabilitätsgrad der atmosphärischen Schichtung. Letzterer kann mit Hilfe aerologischer Aufstiege ermittelt werden. Der Scorer-Parameter

$$F = \frac{(\gamma^* - \gamma)g}{\bar{T} \cdot \bar{u}^2} \quad (1)$$

wo: γ^* = trockenadiabat. Temperaturgradient
 γ = wahrer Temperaturgradient
 g = Erdbeschleunigung
 \bar{T} = Mitteltemperatur [K] der Schicht
 \bar{u} = mittlere Windgeschwindigkeit im ungestörten Feld

liefert ein Mass für die Tendenz der Atmosphäre, Leewellen zu bilden. Man erkennt aus (1), dass für eine rechnerisch-dynamische Beurteilung ein Einschichtenmodell zur Strömungsbeurteilung meist nicht genügt, weil sich häufig sowohl Wind wie auch Temperatur mit der Höhe unstetig ändern. Man hätte daher mit Mehrschichtenmodellen zu rechnen, was erhöhten Aufwand erfordert. Ein zweites Problem bildet der Einbezug des Gebirgsreliefs in eine solche Modellrechnung. Dies ist besonders schwierig im Falle der Zentralalpen südlich des Rheintals. Bis jetzt wurde diese Rechnung nur für einfache Bodenprofile im Falle der Vogeisen von MAYER [1976] und für ein kompliziertes Profil am Brennerpass und bei Innsbruck von VERGEINER [1975] durchgeführt. Einem gleichartigen Vorgehen im Rheintal - Bodenseegebiet stellen sich die folgenden Schwierigkeiten entgegen:

1. Die meteorologischen Daten aus dem Gebirgsraum im Luv sind zu spärlich.
2. Das bei Föhn wirksame Alpenprofil im südlichen Vorfeld des Rheintals ist stark strukturiert und je nach Windrichtung deutlich verschieden.

Deshalb ist an eine Computerberechnung zu Vorhersagezwecken im Einzelfall im heutigen Zeitpunkt nicht zu denken; sie würde enorme Anstrengungen erfordern, die im Routinedienst untragbar wären.

Aufgrund der aufgeführten Schwierigkeiten wurde für die Föhnuntersuchung im Rheintal vorläufig ein anderer Weg eingeschlagen:

Anhand von meteorologischen und aerologischen Messungen im oberen Rheintal und am Bodensee sollen in einer von 1973-1982 dauernden Föhnuntersuchung die besonderen Verhältnisse für dieses Gebiet bearbeitet werden.

Zunächst erfolgte die Einrichtung eines engmaschigen Netzes von meteorologischen Registrierstationen im oberen Rheintal und am Bodensee (vgl. Abb. 2.1), welches eine möglichst genaue Analyse jedes Föhnfalles hinsichtlich Stärke sowie räumlicher und zeitlicher Ausdehnung erlaubt.

Für die Bearbeitung der Föhnlagen wurden folgende Kriterien festgelegt:

- Grossräumige meteorologische Bedingungen für Südföhn:

1. Druckunterschied Alpensüdseite - Alpennordseite positiv (Ueberdruck im Süden)
2. Wind über dem Alpenkamm aus südlichen Richtungen

- Lokale Merkmale des Föhns:

3. Südliche Winde mit deutlichem Anstieg der Windgeschwindigkeit
4. Temperaturerhöhung mit markantem, plötzlichem Anstieg und entsprechendem Feuchterückgang

Da die Entscheidung Föhn/kein Föhn gebietsmässig erfolgt, lässt sich Föhn für Einzelstationen in der Mehrzahl der Fälle eindeutig festlegen, sodass auf exakte Grenzwerte für Windgeschwindigkeit sowie Temperatur- und Feuchtigkeitsänderung verzichtet werden konnte. Dank dem engmaschigen Netz mussten nicht alle Stationen mit registrierenden Windmessern ausgerüstet werden. Zusätzlich ergänzen zeitweise einzelne aerologische Messungen die Bodenregistrierungen. Zeitrafferaufnahmen während mehrerer Föhnfälle von Lindau a. Bodensee aus veranschaulichen den Ablauf des Föhns anhand zu beobachtender Wolkenbewegungen und typischer Wolkenauflösungs- und -bildungsvorgänge. Erstmals entsteht so für das obere Rheintal eine detaillierte Sammlung zahlreicher Föhnfälle, welche den zeitlichen Ablauf beim Vordringen bis zum Bodensee zu beurteilen erlaubt. Von dieser statistischen Bestandsaufnahme ausgehend, die bis 1982 fortgesetzt wird, sollen dann kausale Zusammenhänge mit der synoptischen Lage gesucht und empirische Regeln für die Vorhersage abgeleitet werden.

Der vorliegende Arbeitsbericht will als Fallstudie des stark ausgeprägten Föhns Nr. 026 vom 14.-18. Januar 1975 (projektbezogene Numerierung aller Föhnvorstösse 1973-1982 in den Bodenseeraum) das vorhandene Material und typische Eigenschaften des Föhns im Untersuchungsgebiet aufzeigen. Die hier bearbeitete Föhnlage ist nicht in allen Erscheinungen repräsentativ für die Föhnfälle dieses Gebiets. Mit seinem nur kurzen Durchbruch am Nordfuss des Rorschacherbergs hebt sie sich von der Mehrzahl der Föhnvorstösse ab.

Nr. Station	Höhe/m	Allgemeine Lage	Geogr. Koord. φ λ	Registrierte meteorologische Elemente	Messperioden/Beobachtungstermine	Verantw. Institution
1 Altdorf (Reusstal)	449 m	Talebene	46°52' 08°38'	Temperatur, Feuchtigkeit und Wind	durchgehend seit Okt 1863	MZA
2 Altenrhein	398 m	Talebene	47°29' 09°33'	Wind	ab März 1972	MZA
3 Altstätten	473 m	Hanglage (schwach nach SE geneigt)	47°23' 09°32'	-	alte Station seit 1864/Nov.71 3 Termine: 07 13 19	MZA
4 Bad Ragaz	508 m	Tallage	47°00' 09°30'	Temperatur	alte Stat.seit 1939/Nov 1956 3 Termine:07 13 19	MZA
5 Bregenz	436 m	Hanglage (nach NW abfallend)	47°30' 09°45'	Temperatur, Feuchtigkeit	5 Termine: 07 10 13 16 19	ZMG
6 Eggen/Lachen AR	933 m	Flache Krete, schwach SSE exponiert	47°26' 09°35'	Temperatur, Feuchtigkeit und Wind	November 1971	MZA
7 Feldkirch	439 m	Talebene	47°15' 09°35'	Temperatur, Feuchtigkeit	5 Termine: 07 10 13 16 19	ZMG
8 Fläscherberg	940 m	Gratlage	47°03' 09°30'	Wind	Februar 1968	MZA
9 Friedrichshafen	401 m	Nähe Seeufer	47°39' 09°29'	Temperatur, Feuchtigkeit, Wind + Luftdruck	06-19, + 22 h	DWD
10 Heiden	802 m	Hanglage (nach N abfallend)	47°27' 09°32'	Temperatur und Feuchtigkeit	alte Station seit 1887/Dez 1970 3 Term: 07 13 19	MZA
11 Horn	398 m	Seeufer	47°30' 09°28'	Wind	ab März 1972	MZA
12 Konstanz	443 m	Hanglage (leicht nach SW abfallend)	47°41' 09°11'	Temperatur, Feuchtigkeit, Wind + Luftdruck	04-19 stündlich + 22 + 01 h	DWD
14 Langenargen	398 m	Seeufer	47°36' 09°32'	Wind	ab 4.73-3.75	AI
15 Landquart/Plantahof	530 m	Talebene	46°58' 09°34'	Wind	1968	MZA
16 Lindau-Hoyerberg	453 m	Hanglage (nach S abfallend)	47°34' 09°40'	Temperatur, Feuchtigkeit und Wind, Luftdruck + Feindruck	ab 1.74-1.75 TT/UU/PP ab 4.73	FaM
17 Lindau-Läutewerk	401 m	im See	47°33' 09°41'	Wind	ab 4.73 - 6.75	AI
21 Mehrerau	397 m	Seeufer	47°30' 09°43'	Wind	durchgehend ab 4.73 - 6.75	Fa.WankeI AI
22 Neue Rheimmündung	398 m	Talebene	47°30' 09°41'	Wind	17.10.73 - 6.75	AI
23 Oberriet-Loseren	420 m	Talebene	47°19' 09°35'	Wind	Juni 1971	NOK
24 Oberriet (Sturmwarnstation)	430 m	Tallage	47°19' 09°34'	autom.Windalarmanlage (keine Registrierung)	Februar 1974	MZA
25 Pfänder	1060 m	Berggipfel	47°30' 09°47'	Temperatur, Feuchtigkeit und Wind	ab 11.73 - 6.75 TT/UU ab 11.73	AI

Tab. 2.1 Im Januar 1975 betriebene Mess- und Beobachtungsstationen im Raume Bodensee / Rheintal

Nr. Station	Höhe/m	Allgemeine Lage	Geogr. Koord. φ λ	Registrierte meteorologische Elemente	Messperioden/Beobachtungstermine	Verantw. Institution
26 Rohrspitz	398 m	Talebene	47°29' 09°37'	Temperatur, Feuchtigkeit und Wind	ca 1960-30.6.75	Luftamt Wien
27 Romanshorn	400 m	Nähe Seeufer	47°34' 09°23'	Wind (nur Stärke)	Dezember 1967	MZA
28 Rorschach	420 m	Hanglage (nach N abfallend)	47°29' 09°30'	-	seit 1864, 3 Termine: 07 13 19	MZA
29 Säntis	2500 m	Gipfelstation	47°15' 09°21'	Temperatur, Feuchtigkeit, Wind + Luftdruck	seit 1888	MZA
30 St. Gallen	670 m	Tallage	47°26' 09°25'	Wind	November 1954 3 Term: 07 13 19	MZA
31 Stein AR	780 m	Hanglage (nach ENE abfallend)	47°23' 09°21'	-	April 1958 3 Term: 07 13 19	MZA
32 Vaduz	457 m	Tallage	47°08' 09°32'	Temperatur, Feuchtigkeit, Wind + Luftdruck	1971; Termine: durchgehend 3 stdl	MZA
33 Wasserburg	400 m	Seeufer	47°34' 09°38'	Wind	ab 4.73 - 6.75	AI
34 Weissenau	445 m	Ebene	47°46' 09°35'	Temperatur, Feuchtigkeit, Wind + Luftdruck	durchgehend	AI
35 Widnau-Heerbrugg	408 m	Talebene	47°25' 09°39'	Wind	April 66 - Sept 70 Febr 72 -	Firma Viscose

Tab. 2.1 (Fortsetzung)

Abkürzungen

- AI = Astronomisches Institut der Universität Tübingen, Aussenstelle Weissenau
- DWD = Deutscher Wetterdienst
- FaM = Forschungsstelle für angewandte Meteorologie, Lindau-Bodolz
- MZA = Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt
- NOK = Nordostschweizerische Kraftwerke
- ZMG = Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Abb. 2.1

Karte der Messstationen, welche in den Untersuchungen der Arbeitsgemeinschaft "Föhnforschung Rheintal/Bodensee (1973/82)" im Januar 1975 in Betrieb waren.



2. Stationsnetz

Im Rahmen des Föhnforschungsprojektes 1973/82 im Raume Bodensee - Rheintal sind über die ganze Projektdauer oder teilweise nur während einer kürzeren Messperiode zusätzlich zum Messnetz der nationalen Wetterdienste Registrierstationen in Betrieb. In der Schweiz wurden durch die Meteorologische Anstalt die Windstationen Altenrhein, Eggen/Lachen, Fläscherberg, Horn und Landquart/Plantahof eingerichtet; hier sind von Eggen/Lachen und von Landquart Temperatur- und Feuchtigkeitswerte erhältlich. Die Wetterwarte Konstanz betreute die vom Luftamt in Wien erstellte Station Rohrspitz, welche dank ihrer freien Lage in der Mitte des Rheintals nahe dem Südufer des Sees als Bezugsstation für die Föhnhäufigkeitsuntersuchungen im Raume Bodensee von besonderer Bedeutung ist. Während des Föhnfalles 026 (14.-18. Januar 1975) standen auch die vom Astr.Inst. in Weissenau betriebenen Windmessstationen Langenargen, Lindau-Läutewerk, Mehrerau, Neue Rheimmündung, Pfänder, Wasserburg und Weissenau zur Verfügung, wobei auf dem Pfänder und in Weissenau auch Temperatur und Feuchtigkeit aufgezeichnet worden sind. Von demselben Institut wurden am 15. und 16. Januar 1975 sechs aerologische Aufstiege mit einer mobilen Sondierstation im Rheintal zwischen Chur und Bodensee ausgeführt. Im weitern erhielten wir in verdankenswerter Weise die Daten der Stationen Lindau-Hoyerberg (Projektmitarbeiter), Oberriet-Losern und Widnau-Heerbrugg von den privaten Besitzern zur Verfügung gestellt. Alle im Untersuchungsraum liegenden Stationen, von welchen Daten in diese Untersuchung miteinbezogen wurden, sind in Tabelle 2.1 und in der Abbildung 2.1 zusammengestellt. Die in diesem Bericht enthaltenen Höhenangaben m/M (Meter über Meer) entsprechen der Angabe in NN (Normalnull).

3. Wetterablauf

In der ersten Hälfte des Monats Januar 1975 herrschte über Mitteleuropa nahezu anhaltend eine flache Luftdruckverteilung mit schwachen Druckdifferenzen zwischen der Nord- und der Südseite der Alpen. Der Jetstream befand sich über den Britischen Inseln mit einer westlichen bis südwestlichen Richtung. Nur am 8. und 9. Januar wurde diese Situation kurzfristig unterbrochen durch starke nordwestliche Höhenwinde über den Alpen (vorübergehender Druckanstieg über dem östlichen Atlantik). Am 13. Januar zog ein kräftiges Tief von den Azoren gegen Schottland. Vor der dazugehörigen Störung setzte starker Druckfall ein, über Westeuropa drehten die Höhenwinde auf Südwest und über den Alpen begann sich der Druckgradient zwischen Süd und Nord rasch zu vergrössern (Vorphase, Bodenkarte vom 13. Januar 1975, 01 Uhr, vgl. Abb. 3.1).

Im Laufe des 14. Januar bildete sich an der erwähnten Störung über Nordspanien ein sekundäres Tief, welches mit der allgemeinen Südwestströmung rasch gegen Frankreich zog. Dadurch wurde der Druckfall auf der Alpennordseite noch verstärkt.

In Vaduz setzte der Föhn am 14. Januar um 02.10 Uhr ein bei einer Druckdifferenz S-N von ca. 9 mbar (reduziert auf 0 m/M). Diese vergrösserte sich im Laufe des 15. auf über 15 mbar (Hauptphase). Von diesem Zeitpunkt an begann der Luftdruck vor einer zweiten Störung über Spanien neuerdings zu fallen und zwar diesmal auch im westlichen Mittelmeerraum. Am 17. bildete sich ein schwaches Genuatief (Bodenkarte vom 17. Januar, 01 Uhr, vgl. Abb. 3.2). Dadurch wurde der Druckgradient

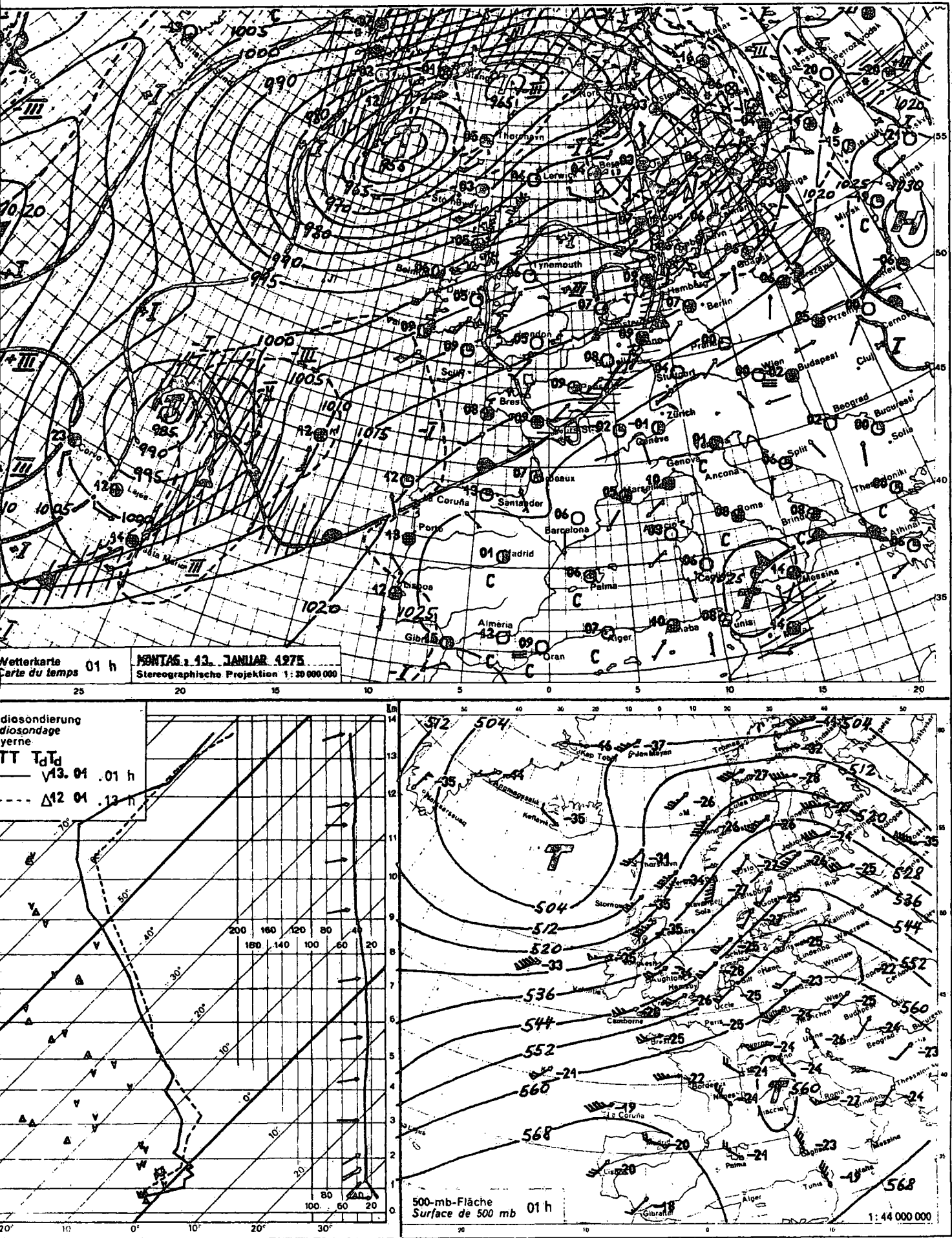


Abb. 3.1 Wetterkarten Boden und 500-mbar sowie Temp Payerne vom 13. Januar 1975, 01 Uhr: Vorphase zu Föhnlage 14.-18.1.1975. (Reproduktion aus: Tägliches Wetterbulletin des Schweiz. Wetterdienstes)

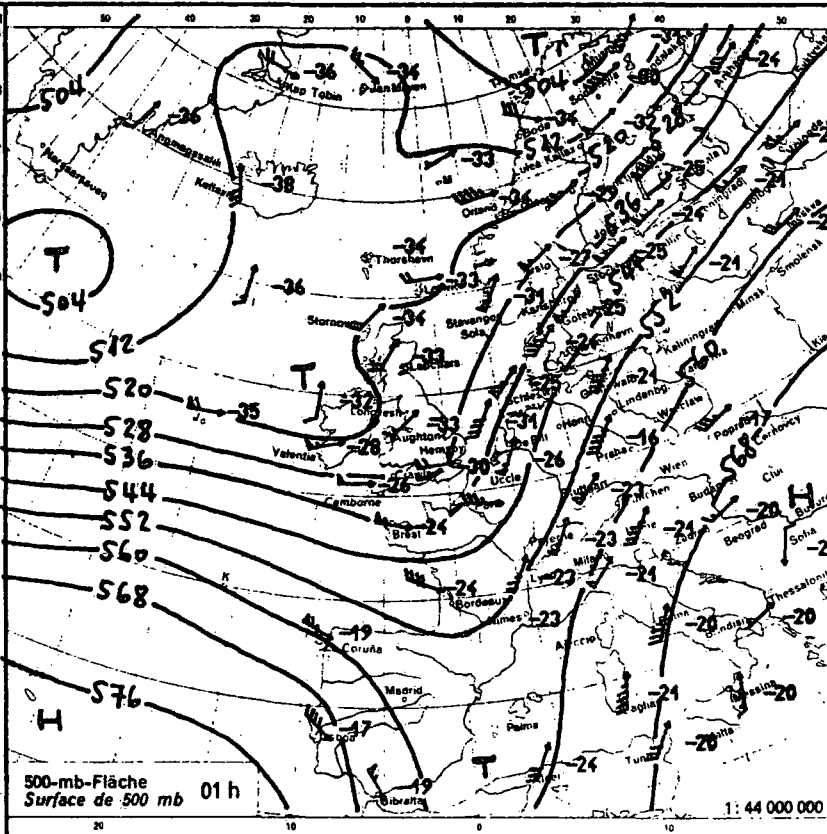
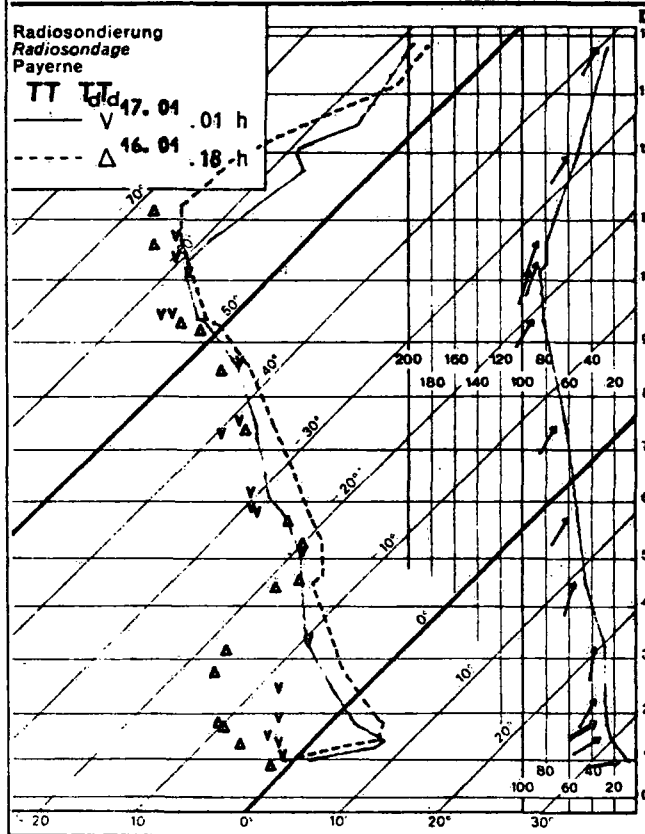
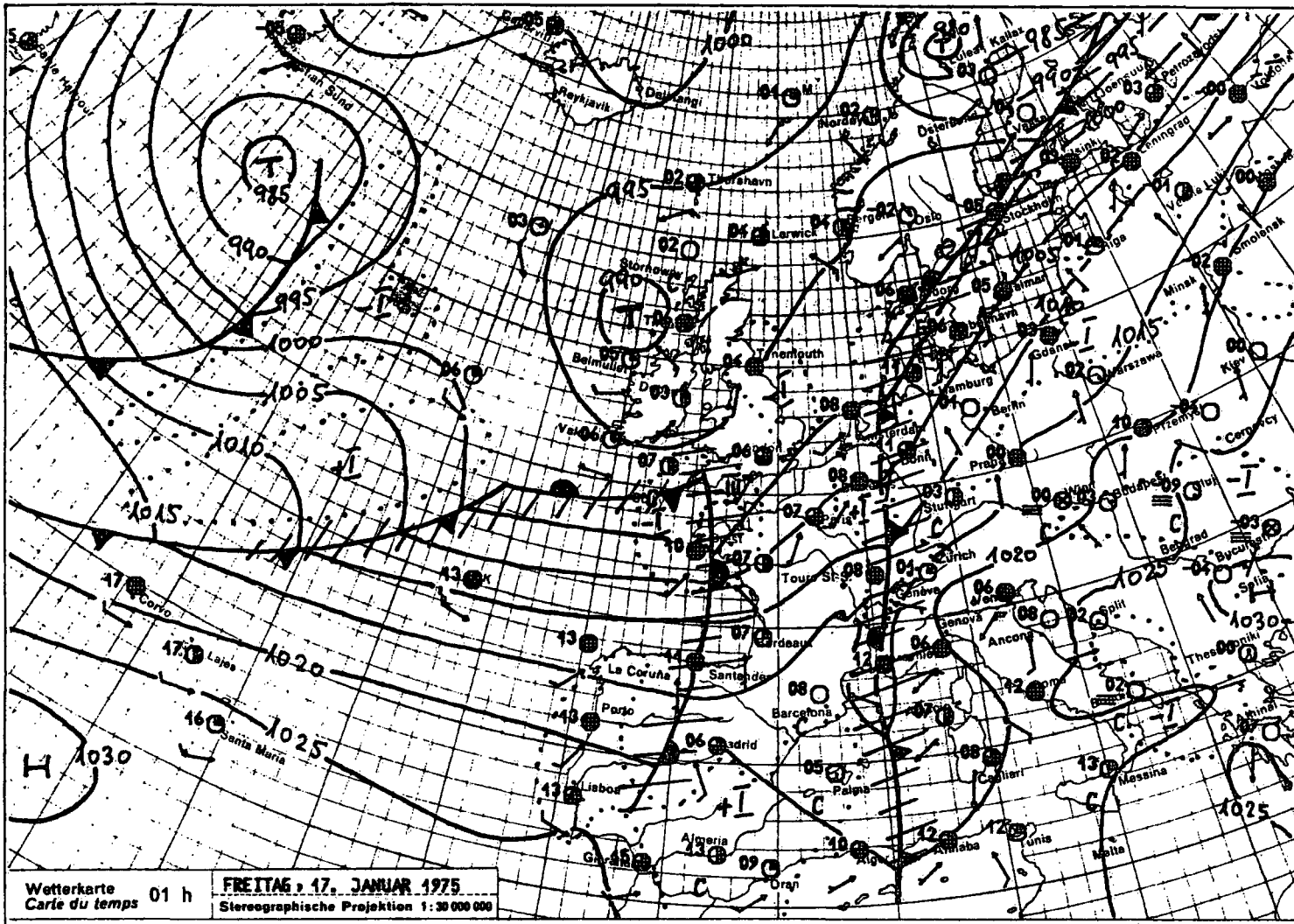





Abb. 3.2 Wetterkarten Boden und 500-mbar sowie Temp Payerne vom 17. Januar 1975, 01 Uhr: Ausgangslage zu Föhnpause im Laufe des 17.1.1975. (Reproduktion aus: Tägliches Wetterbulletin des Schweiz. Wetterdienstes)

	01 h		04 h		07 h		10 h		13 h		16 h		19 h		22 h			
	(Böen) TT		(Böen) TT		(Böen) TT		(Böen) TT		(Böen) TT		(Böen) TT		(Böen) TT		(Böen) TT			
	PPP	UU	PPP	UU	PPP	UU	PPP	UU	PPP	UU	PPP	UU	PPP	UU	PPP	UU		
Kloten	13,3	01 100	14,9	02 93	15,2	03 93	15,6	05 87	12,7	08 100	10,4	09 66	10,7	09 66	9,8	09 66		
Rorschach					↗	7,0 80			┌	7,0 82			└	6,2 86				
Rohrspitz	15,0 25		↙	7,0 73	↖	7,2 82	↖	7,0 90		↖	7,7 86		↖	9,0 75		↖	3,2 100	4,2 95
St.Gallen	Föhnende 24.35				✓	6,1 66			✓	10,4 52			↗	4,5 80				
Heiden	Föhnende 02.00				✓	6,4 76			└	6,1 81			○	4,1 89				
Altstätten					○	6,0 82			○	10,0 65			○	5,6 93				
Vaduz	16 9,9 36		15 10,1 36		14 10,9 41		9 12,7 76		13 11,0 62		16 7,8 39		15 7,8 41		14 7,5 41			
Altdorf	(64)		Föhnende 06.00		↗	8,8 67		↖	↖	10,2 64		F.einbr. 13.10		(60) 13,4 34		(68)		
ΔP L - K1/V	12,1 15,5		8,3 13,1		8,4 12,7		7,1 11,0		9,5 11,2		10,5 13,1		10,7 13,6		10,9 13,2			
Gütsch (2288 m/M)	(58) -04		(42) -05		(34) -05		(48) -05		(45) -05		(46) -04		(51) -04		(50) -05			
Locarno	25,4	01 91	23,2	01 94	23,6	01 94	23,7	01 91	22,2	01 94	20,9	01 94	21,4	01 94	20,7	01 100		

Tabelle 3.1 Räumliches und zeitliches Auftreten des Föhns während des Unterbruchs vom 17. Januar 1975

Legende: PPP Druck [mbar - 1000] Wind:  Südostwind, 45 Knoten
TT Temperatur [°C]  Nordwestwind, 15 Knoten
UU Feuchtigkeit [%]
ΔP L - K1 Druckdifferenz Locarno - Kloten ○ Schwache, variable Winde
ΔP L - V Druckdifferenz Locarno - Vaduz (42) Böengeschwindigkeit [Knoten]
 Föhn am Beobachtungsort

über den Alpen vorübergehend etwas abgebaut. Die Folge davon war, dass trotz des starken SSW-Jets über den Alpen der Föhn am 17. Januar sowohl in Vaduz wie in Altdorf für einige Stunden zusammenbrach. Nach dem Durchgang dieser Störung ostwärts über Genua hinaus nahm der Druckgradient wiederum etwas zu, sodass der Föhn auf der Alpennordseite am 18. Januar nochmals mit voller Stärke einsetzen konnte (vgl. Abb. 4.3: Zeitlicher Verlauf der Druckdifferenzen sowie Tab. 3.1: Räumliches und zeitliches Auftreten des Föhns).

Nach dem Durchgang einer weiteren Störung über Frankreich und Deutschland hinweg setzte am 18. Januar auf der Alpennordseite rascher Druckanstieg ein, sodass der Föhn in Altdorf um 19.10 Uhr, in Vaduz um 20.15 Uhr endgültig zusammenbrach. Am Morgen des folgenden Tages war der Druck zu beiden Seiten der Alpen praktisch ausgeglichen (Nachphase) und im Laufe des Tages liessen auch in der Höhe (500 mbar) die Südwestwinde nach.

4. Luftdruck

4.1. Die Luftdruckverhältnisse vor, während und nach der Föhnlage auf der Alpennordseite

Im täglichen Wetterdienst werden die Bodenwetterkarten nach den auf Meeresspiegel reduzierten Luftdruckwerten (QFF) konstruiert. Die Messwerte werden vom synoptischen Beobachtungsnetz geliefert. Die geringe Stationsdichte, welche bei diesem Netz auf das engere Alpengebiet entfällt, sowie der grosse Isobarenabstand von 5 zu 5 mbar gestatten nur eine angenäherte Darstellung des Druckfeldes im Alpengebiet.

Durch die Verwendung der ungefähr 60 mit Barometern ausgerüsteten Klimastationen des schweizerischen Beobachtungsnetzes bzw. deren Luftdruckablesungen wurde es möglich, ein hinreichend dichtes Netz von Stationen zu erhalten. Die Reduktion dieser Druckwerte auf 0, 450 oder 1000 m/M ($m/M = NN$) und deren Eintragung in grossmassstäbliche Karten sowie deren Analyse mit einem Isobarenabstand von 1 mbar lassen eine detaillierte Darstellung der Druckverhältnisse beidseits der Alpen zu. Diese Karten (vgl. Abb. 4.1) gestatten, unter zusätzlicher Berücksichtigung der Temperatur und der Bodenwinde, genauere Einblicke in die Geschehnisse vor, während und nach einer Föhnperiode.

Im Rahmen der Untersuchung der Föhnlage vom 14.-18. Januar 1975 auf der Alpennordseite wurden für jeden klimatologischen Beobachtungstermin (07, 13 und 19 Uhr) die Druckkarten, auf 1000 und 450 m/M, zum Teil auf 0 m/M reduziert, über die ganze Schweiz gezeichnet und die Modifikationen des Druckfeldes festgestellt. Auf diesen Druckbildern lassen sich gewisse Vorgänge erkennen, die zwar vielfach bekannt, auf einer konventionellen synoptischen Wetterkarte aber nicht ersichtlich sind. Als eigentliche Föhnperiode sei im folgenden die Zeit zwischen dem Föhneinsatz und dem Föhnzusammenbruch in Vaduz (siehe Kapitel 3) definiert, da diese Ereignisse dort, wie bekannt, durch scharfe Windeinsätze und -zusammenbrüche deutlich markiert sind.

Es sei hier ausdrücklich festgehalten, dass die nachfolgend beschriebenen Beobachtungen ausschliesslich für den Föhnfall vom 14.-18. Januar 1975 Gültigkeit haben und nicht verallgemeinert werden dürfen.

Vom 9. bis 11. Januar zog eine Hochdruckzelle von der Biskaya her ostwärts über die Alpen. Sie hielt die Störungen von Mitteleuropa fern und führte zur Bildung einer kräftigen Bodeninversion über dem schweizerischen Mittelland. Am 12. und 13. Januar verlagerte sich der Kern gegen Osteuropa. Die anfänglich aus Nordwest wehenden Höhenwinde drehten auf West zurück und eine erste Störung drang über Nordfrankreich und Deutschland gegen Osten vor. Zwischen Jura und Alpen breitete sich die Kaltluft über das ganze Mittelland aus und erstreckte sich zu dieser Zeit bis weit in die nördlichen Alpentäler hinein.

Am 12. Januar um 19 Uhr zeigt sich auf den Isobarenkarten (450 m/M) ein geschlossenes Tief im mittleren Wallis und ausgeprägte Rinnen in den Tälern des Thunersees und des Vierwaldstättersees. Im St.Galler Rheintal fehlt aber eine entsprechende Vertiefung. Dafür zeigt sich in der Nordostschweiz im Einzugsgebiet der Sitter und auf den Höhen des Schwarzwaldes ein Tiefdruckgebiet. Der Luftdruckgradient Süd-Nord über den Alpen ist bis auf 1,5 mbar ausgeglichen (Reduktionshöhe 450 m/M: Locarno 971,9 mbar, Kloten 970,4 mbar).

Diese Druckverteilung bleibt vorerst mit geringen Modifikationen bis zum 13. Januar bestehen. Bei zunehmendem Gefälle beginnt sich auch im Rheintal (Vaduz - Ragaz) eine solche Rinne abzuzeichnen, obwohl das Tief über dem Appenzellerland und dem westlichen Bodensee bestehen bleibt (Vorphase: Abb. 4.1 a vom 13. Januar, 07 Uhr). Die Druckdifferenz auf 450 m/M beträgt 5,2 mbar bezogen auf Kloten, bzw. 4,1 mbar bezogen auf Vaduz. Bei einem Gradienten von ca. 7,5 mbar setzt in Altdorf um 00.50 Uhr des 14. Januar und um 02.00 Uhr auch in Vaduz der starke Südwind, d.h. der eigentliche Föhn ein. In den nördlicheren Teilen des St.Galler Rheintales (Widnau, Altstätten) sowie im Appenzellerland spricht der Wind und die Temperatur noch nicht an, obwohl das Tief über Stein - St.Gallen immer noch vorhanden ist.

Erst 30 Stunden später, am Morgen des 15. Januar, erfolgte der Föhndurchbruch auch in Altstätten und Heiden. Dieser späte Einsatz des Föhn in Heiden ist indessen eine Ausnahme, erfolgt doch normalerweise der Föhneinsatz dort mehrere Stunden vor demjenigen in Vaduz. Das Bild der Druckfläche zeigt aber auf 450 m/M keine wesentliche Aenderung. Das stärkste Gefälle zwischen der Alpensüdseite und der -nordseite liegt in den Querschnitten der Bereiche Haslital, Reusstal und hinteres Glarnerland, während im Rhone- und Rheintal das Gefälle deutlich in zwei Stufen aufgeteilt ist, im obern Wallis auf das Goms, unten auf den Talabschnitt Martigny - Genfersee, in der Ostschweiz oben auf das Gebiet zwischen Hauptkamm der Alpen und Vorderrheintal und unten zwischen Chur und Bodensee. Die Gebiete mit dem grössten Druck liegen südlich der Alpen nicht im Sotto Ceneri, sondern im nördlichen Tessin und im Engadin (Hauptphase: Abb. 4.1 b und 4.1 c vom 15. Januar 07 Uhr).

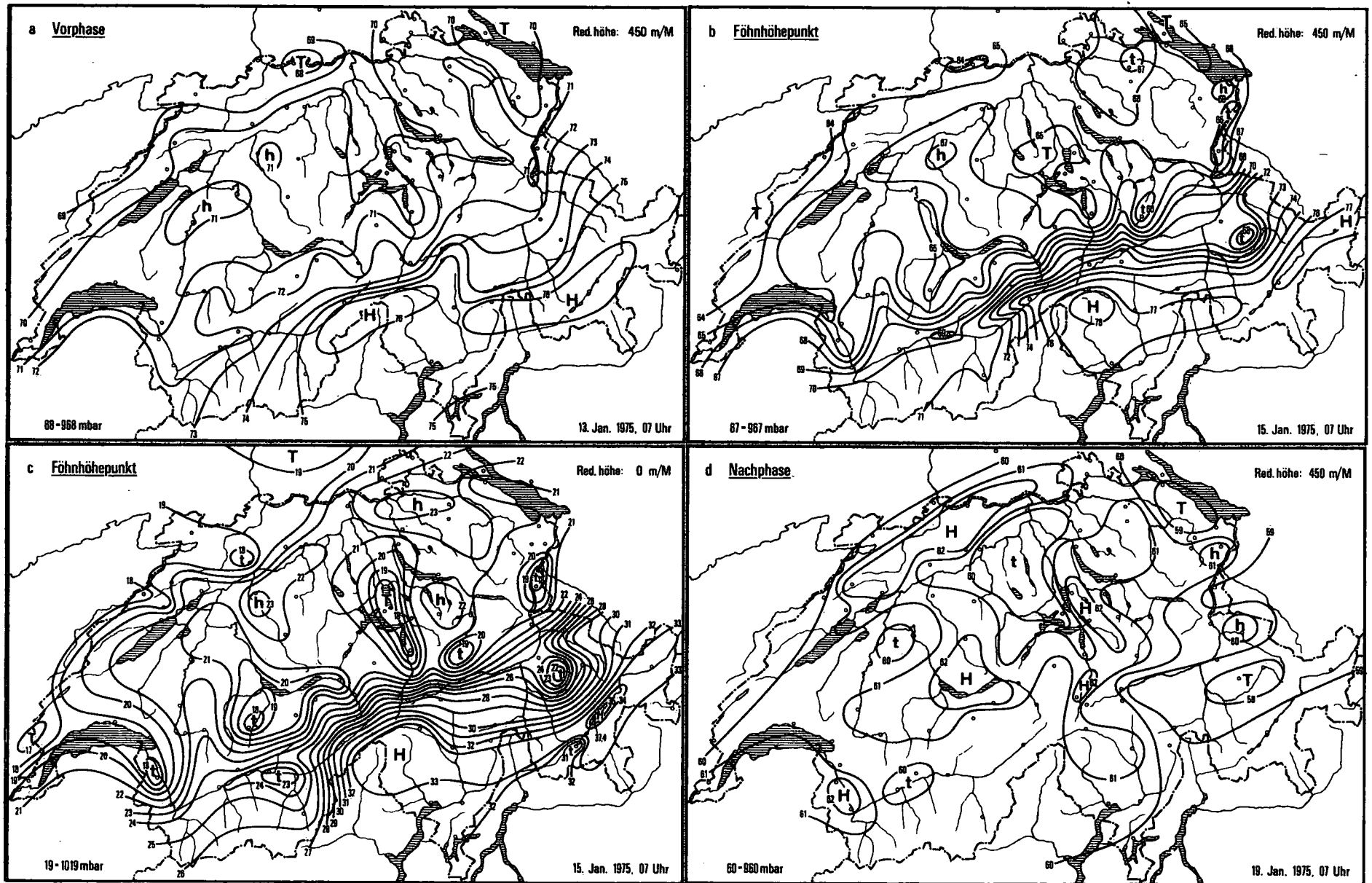


Abb. 4.1 Detaillierte Luftdruckanalysen des Föhnfalles 026 (13.-19.1.1975):
a Vorphase b Föhnhöhepunkt, Druckreduktion auf 450 m/M c Föhnhöhepunkt, Druckreduktion auf Meeresniveau
d Nachphase

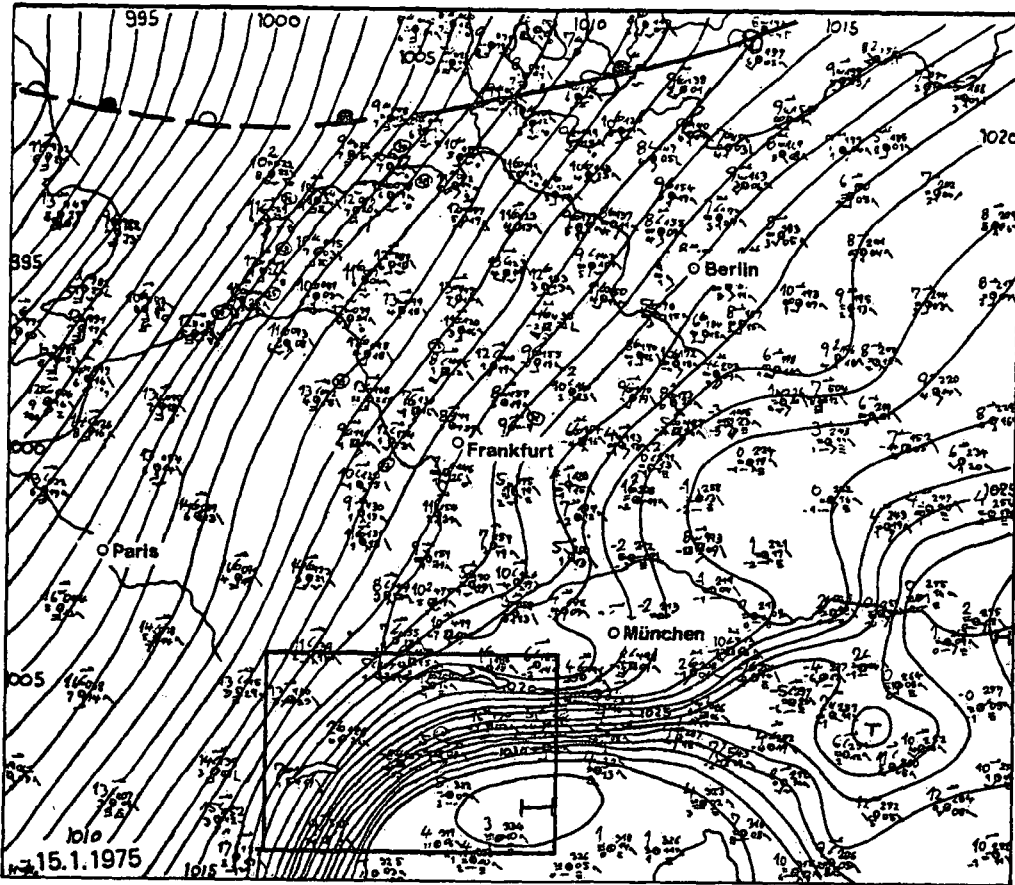


Abb. 4.2 Berliner Bodenwetterkarte vom 15. Januar 1975, 01 Uhr.
□ Ausschnitt Schweiz zum Vergleich mit der nachfolgenden Abb. 4.1 c.

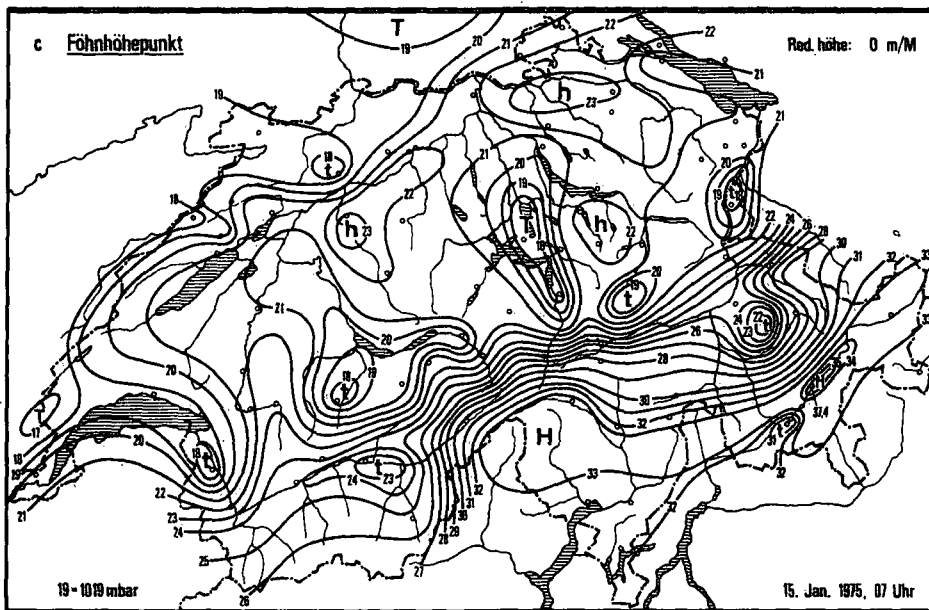


Abb. 4.1 c Föhnwindpunkt. Detaillierte Luftdruckanalyse vom 15. Januar 1975, 07 Uhr. (Aus Abb. 4.1 zum besseren Vergleich mit Abb. 4.2 hier wiederholt).

Während des Föhnunterbruchs vom 17. Januar ging die Druckdifferenz Locarno - Kloten auf rund 7 mbar, diejenige Locarno - Vaduz auf rund 10 mbar zurück, stieg aber alsbald nochmals auf rund 11 bzw. 14 mbar an. Die Föhnpause dauerte in Altdorf 10 Stunden (von 03.10 - 13.10 Uhr), in Vaduz 6 Stunden und 20 Minuten (von 06.50 - 13.10 Uhr).

Am Nachmittag des 18. Januar begann der Luftdruck auf der Alpensüdseite stark zu fallen. Bereits kurz nach Mittag setzte der Föhn in Heiden, dann in Altstätten-Widnau und um 20.15 Uhr in Vaduz aus, während er in Altdorf schon um 19.10 Uhr (Reusstal) zusammen gebrochen war. Am Morgen des 19. Januar war der Druck in allen Niveaus praktisch ausgeglichen, wie aus Abbildung 4.1 d vom 19. Januar 07 Uhr (Druckkarte der Nachphase) ersichtlich ist.

Die Karte vom 15. Januar (Abb. 4.1 c), welche das Druckbild während der Hauptphase auf 0 m/M reduziert wiedergibt, wurde beigelegt, um den Unterschied gegenüber derjenigen von 450 m/M zu zeigen. Das Bild ist genau dasselbe, nur ist die Zahl der Isobaren entsprechend den grösseren Druckdifferenzen dichter. Auch veranschaulicht diese Karte die komplexen Verhältnisse im Alpengebiet, die in einer grossräumigen synoptischen Wetterkarte mit dem gleichen Isobarenabstand (vgl. Abb. 4.2: Berliner Wetterkarte vom gleichen Datum) gar nicht zum Ausdruck kommen. Andererseits zeigen diese Karten, sowohl auf 450 wie auf 0 m/M reduziert, durch die unterschiedlichen Temperaturverhältnisse Föhn-/Kaltluft hervorgerufene Druckbilder, die auf einen wesentlich komplizierteren Vorgang des Föhnablaufes in den Alpen schliessen lassen, als im allgemeinen angenommen wird. Jedenfalls muss die Vorstellung eines einheitlichen Ueberströmens der Alpen durch den Föhn bei detaillierteren Studien verlassen werden. Die Bilder zeigen zu deutlich, dass der Vorgang des Hinabgleitens in die einzelnen Täler je nach Relief, Druckgradienten, Richtung und Dauer der Föhnperiode recht komplex sein kann. Das erklärt auch, weshalb bestimmte Orte ausserhalb der Haupttäler vom Föhn im einen Fall kräftig heimgesucht, im andern anscheinend völlig unberührt gelassen werden.

4.2. Zeitlicher Verlauf der Druckdifferenzen Alpensüdseite - Alpennordseite

In Abb. 4.3 wurde der Verlauf der Luftdruckdifferenz zwischen der Nord- und der Südseite der Alpen im Querschnitt Tessin - Reusstal und Tessin - St.Galler Rheintal graphisch dargestellt. Hierzu wurden die jeweiligen Druckwerte und die dazugehörigen Temperaturen der Stationen Locarno-Monti für die Alpensüdseite und der Stationen Altdorf und Vaduz als typische Föhnlokalitäten für die Alpennordseite gewählt. Die Druckwerte wurden auf die Höhen 0 Meter, 450 Meter und 1000 Meter über Meer reduziert und die Druckdifferenzen zwischen Locarno und den beiden andern Stationen gebildet.

Die graphische Darstellung dieser Differenzen zu den Beobachtungsterminen 07, 13 und 19 Uhr sowie der am Fusse der Darstellung markierten Einsatz- und Endzeiten des Föhn lassen für diesen Fall folgende Merkmale erkennen:

- Die Grösse der Druckdifferenzen nimmt mit zunehmender Höhe des Bezugsniveaus ab.
- Die Schwankungen der Druckdifferenzen Locarno - Altdorf und Locarno - Vaduz verlaufen, von unbedeutenden Abweichungen abgesehen, konform.
- Auf 450 m/M erfolgt der Föhnwindbruch, wenn die Druckdifferenz 7-8 mbar überschreitet.
- Der Rückgang der Druckdifferenz von 12 auf 9 mbar führt zu einem Unterbruch des Föhns in den Tälern.
- Das definitive Föhnende erfolgt, wenn die Druckdifferenz auf 450 m/M 10 resp. 8 mbar unterschreitet.

Bemerkenswert ist, dass der Föhnunterbruch am 17. Januar bei einer Druckdifferenz erfolgte, die grösser war als diejenige beim Einsatz des Föhns am 14. Januar und beim endgültigen Föhnende am 18. Januar. Dieses Phänomen zeigt, dass Beginn und Ende des Föhns nicht allein vom Druckgradienten abhängig sind.

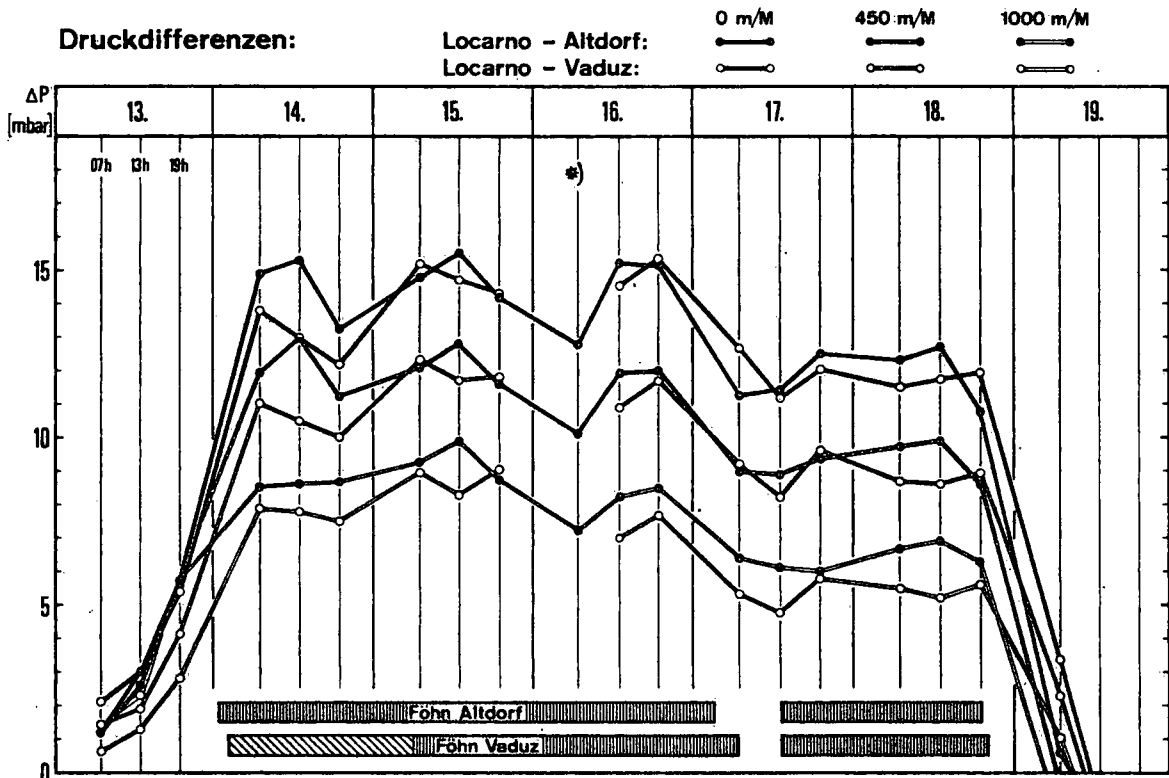


Abb. 4.3 Zeitlicher Verlauf der Druckdifferenzen Alpensüdseite - Alpennordseite (Locarno - Altdorf, bzw. Locarno - Vaduz) bei verschiedenen Reduktionshöhen (0, 450 und 1000 m/M) während des Föhnfalles Nr. 026 vom 13.-18. Januar 1975.

*) Messwert Vaduz ausgefallen

4.3. Zeitlicher Druckverlauf in verschiedenen Niveaus

Ein sehr klares und eng mit dem Föhnverlauf zusammenhängendes Bild liefert der Druckverlauf am Boden an verschiedenen Stationen im Süden und am Nordrand der Alpen. Während vor dem Föhnbeginn die Stationen im Alpenraum etwa gleichen, auf NN reduzierten Bodendruck aufweisen, fallen München und Stuttgart durch einen ca. 3, bzw. 6 mbar niedrigeren Luftdruck auf. Ab Föhnbeginn verlaufen diese Werte nahe beieinander und verkünden das herannahende Tief. Im Gegensatz dazu steigt der Luftdruck an der Station Locarno auf 1032 mbar, um dann erst 2 Tage nach Föhnbeginn ebenfalls zu fallen (s. Abb. 4.4, unten). Während der ganzen Föhndauer bleibt dann zwischen Locarno und den Stationen auf der Alpennordseite eine Druckdifferenz von ca. 10 mbar bestehen, welche am Ende des Föhns ziemlich abrupt verschwindet.

Die Höhen der 850 mbar- und 700 mbar-Flächen wurden aus den aerologischen Aufstiegen und aus den Druckregistrierungen an einigen Bergstationen bestimmt. Dazu dienten südlich der Alpen die aerologischen Aufstiege von Milano. In der Mitte des Alpenkamms lieferte die Wetterstation auf dem Gütsch (2288 m) die Werte. Für die Nordseite der Alpen konnten sowohl aerologische Stationen als auch Bergstationen verwendet werden. Dort haben wir also mehrere Stationen für die 850 mbar- und 700 mbar-Fläche zur Verfügung.

Charakteristisch sind die unterschiedlichen Höhen der 850 mbar-Fläche während des Föhns (s. Abb. 4.4, Mitte). Die Höhe der 850 mbar-Fläche liegt im Süden vom 14.1. - 18.1.75 ständig ca. 80 m höher als auf der Nordseite. Dazwischen liegen die Höhen der 850 mbar-Fläche, welche aus dem Druckverlauf an der Station Gütsch berechnet wurden.

Die Unterschiede der Höhen der 700 mbar-Fläche (s. Abb. 4.4, oben) zwischen Süden und Norden sind etwas geringer: am 14.1.75 lag die 700 mbar-Fläche über Milano ca. 40 m über der aus Druckmessungen auf dem Jungfraujoch, dem Säntis und nach den aerologischen Aufstiegen von Payerne berechneten Höhe der 700 mbar-Fläche. Vom 15. - 18.1.75 beträgt der Höhenunterschied zwischen 60 und 75 m.

Vergleicht man die Drucke in 1500 m Höhe, dann beträgt der Druckunterschied Süd - Nord etwa 9 mbar und in 3000 m Höhe ca. 6-7 mbar.

Sowohl in der 850 mbar-Fläche, wie auch in der 700 mbar-Fläche verschwinden die Höhenunterschiede sehr abrupt in der Nacht vom 18. auf den 19.1.75 gleichzeitig mit dem Zusammenbruch des Föhns.

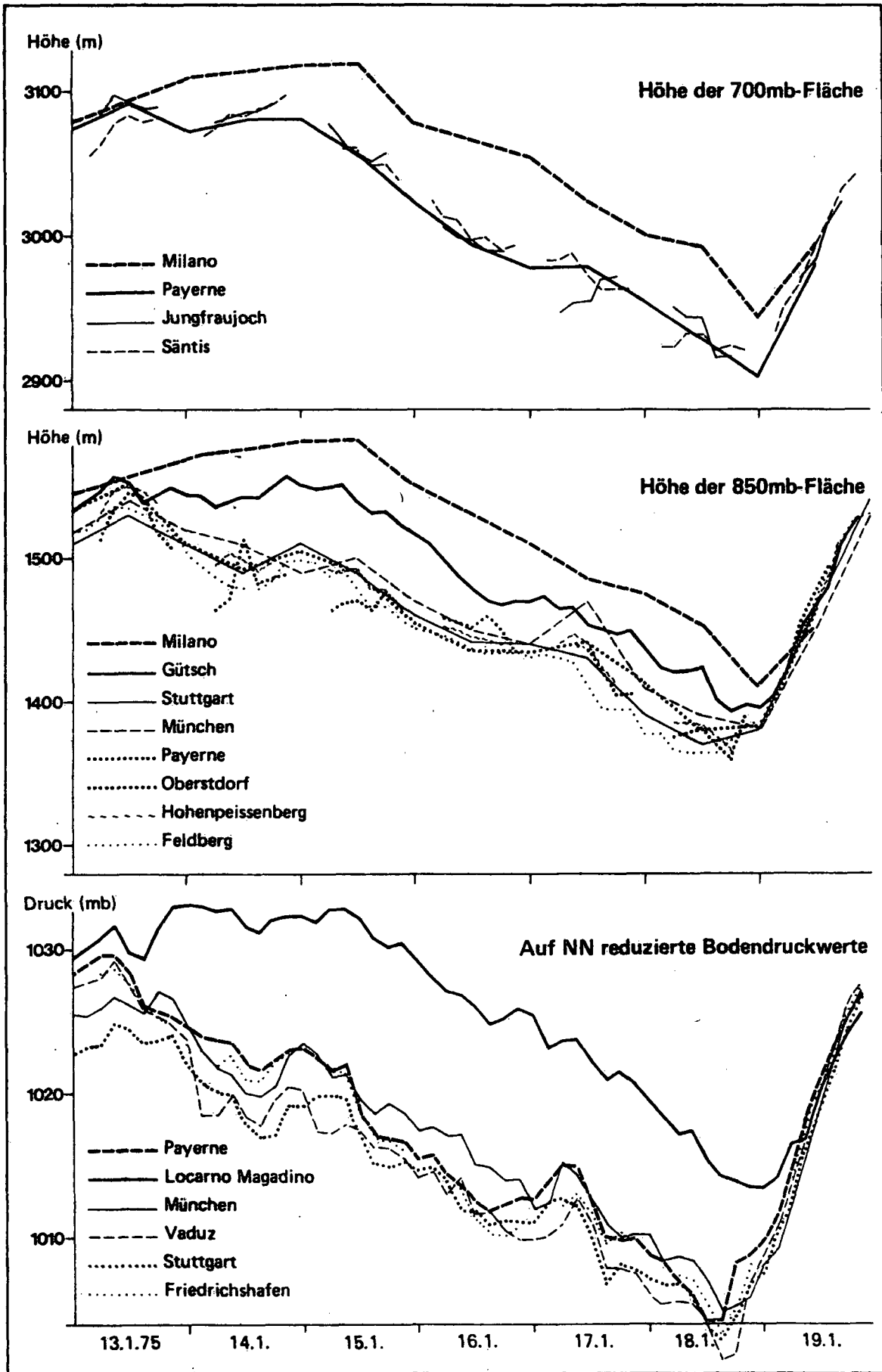


Abb. 4.4 Zeitlicher Verlauf des Luftdrucks reduziert auf Meeressniveau (unten) und zeitliche Aenderung der Höhe der Standardflächen 850 mbar (Mitte) und 700 mbar (oben) während des Föhnfalles Nr. 026 vom 13.-19. Januar 1975.

5. Wind

5.1. Windverlauf

Die Windregistrierungen vom Gütsch und Fläscherberg und von Vaduz und Rohrspitz wurden in Stundenmitteln nach Geschwindigkeit und Richtung ausgewertet. Momentanwerte liegen nur von den Stationen Rohrspitz, Vaduz und Gütsch vor.

Für die Station Rohrspitz werden hier nur die Winddaten während der Zeit des Föhndurchbruchs bis zur Station herangezogen.

Der Windverlauf (Abbildung 5.1) an den einzelnen Stationen zeigt ein uneinheitliches Bild. Während die Geschwindigkeiten zeitweise fast parallel verlaufen, gibt es wiederum Phasen, in denen sie sogar gegenläufig werden.

Besonders auffällig tritt dies beim Gütsch (Abb. 5.1, unten) und Fläscherberg (Abb. 5.1, oben) auf. Während in der Anfangsphase am 13.1. vormittags auf dem Fläscherberg schon ein mässiger Südostwind weht, herrscht auf dem weiter stromaufwärts und wesentlich höher gelegenen Gütsch Windstille, was sicher nicht dem Normalfall entspricht. Erst mit stürmisch auffrischendem Wind auf dem Fläscherberg lebt er auch auf dem Gütsch auf und pendelt sich auf die Südrichtung ein.

Besonders auffällig ist, dass die Windgeschwindigkeit auf dem Gütsch am 16. ihren Höchstwert erreicht, während sie gleichzeitig auf dem Fläscherberg stark abnimmt.

Das Ende der Föhnlage ist dadurch gekennzeichnet, dass der Wind auf dem Gütsch bereits am Morgen des 18. deutlich abflaut, während er auf dem Fläscherberg in seiner Stärke noch unvermindert anhält (ähnlich Anfangsphase).

Das An- und Abschwollen des Windes auf dem Fläscherberg und am Talgrund in Vaduz zeigt über mehrere Zeiträume ähnliches Verhalten (Abb. 5.1, oben). Maxima und Minima der Geschwindigkeit liegen des öfters zum selben Zeitpunkt oder zeitlich nur wenig verschoben. Allerdings zeigt der markante Rückgang des Windes auf dem Fläscherberg am 16. genausowenig Auswirkung auf den Geschwindigkeitsverlauf in Vaduz, wie auf den vom Gütsch. Das Ende des Starkwindes fällt an beiden Stationen zeitlich zusammen.

Nachdem im Tal in Vaduz schon einige Zeit stärkerer Wind herrschte (Abb. 5.1, oben), schwillt er in Rohrspitz in der Nacht vom 15. auf den 16. stossweise auf seinen Maximalwert an (Abb. 5.1, unten). Mit dem Föhnunterbruch am 17. und dem abrupten Nachlassen des Südwindes in Vaduz verschwinden gleichzeitig der Föhn und damit die hohen Geschwindigkeiten im Rohrspitz (vgl. Abb. 5.2, oben).

Schwächt sich die Windgeschwindigkeit deutlich ab, dreht der Wind aus der "Generalrichtung". Sehr schön ist dies bei den Talstationen Vaduz und Rohrspitz zu sehen (Abb. 5.1, Mitte). Wenn der Wind eine bestimmte Geschwindigkeit unterschreitet, dreht er sofort auf West bis Nordwest.

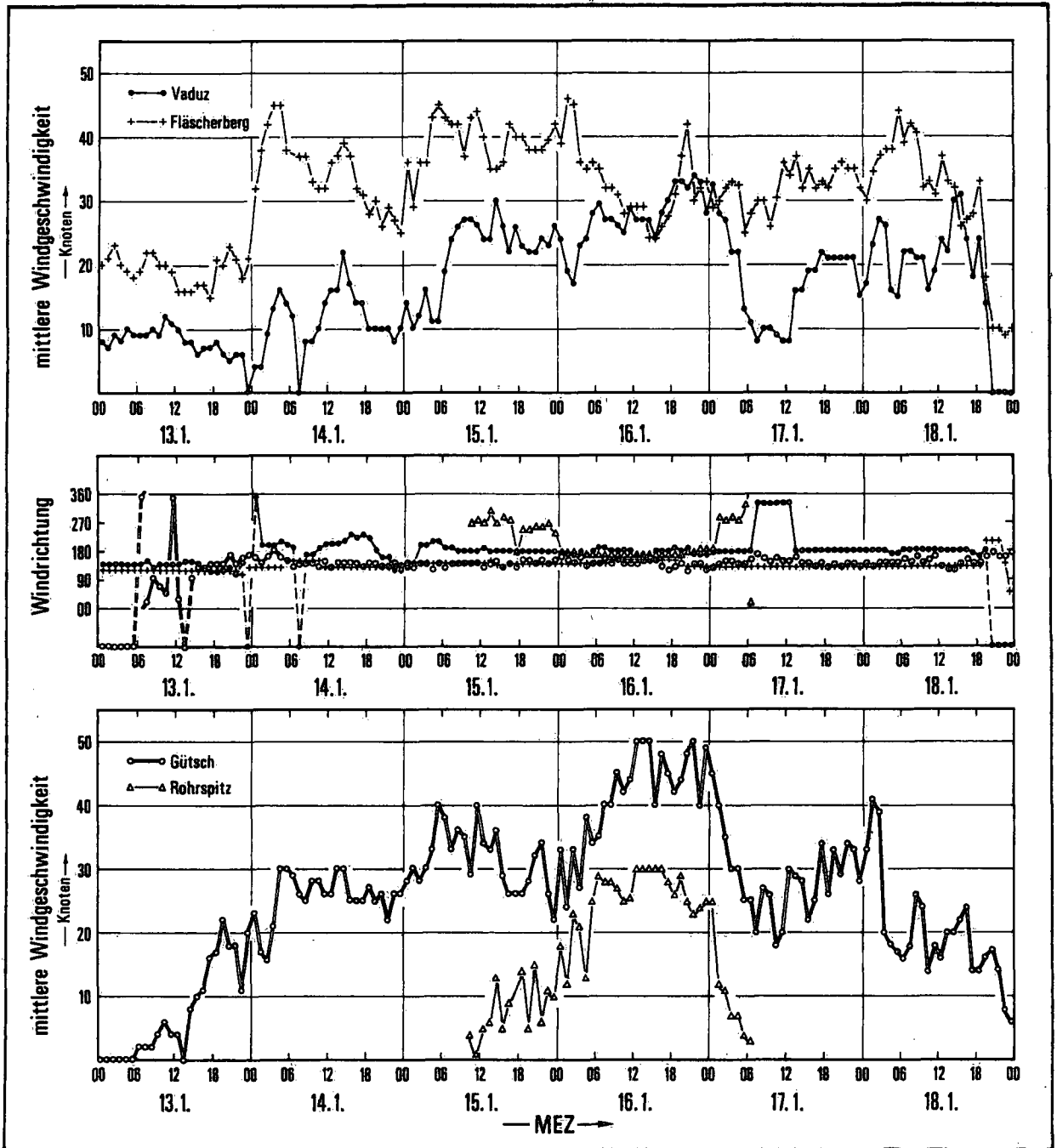


Abb. 5.1 Verlauf der mittleren Windgeschwindigkeiten während des Föhnfalles Nr. 026 vom 13.-18. Januar 1975 für die Stationspaare Vaduz - Fläscherberg (oben) und Gütsch - Rohrspitz (unten). Die Windrichtung aller vier Stationen ist in der Mitte dargestellt.

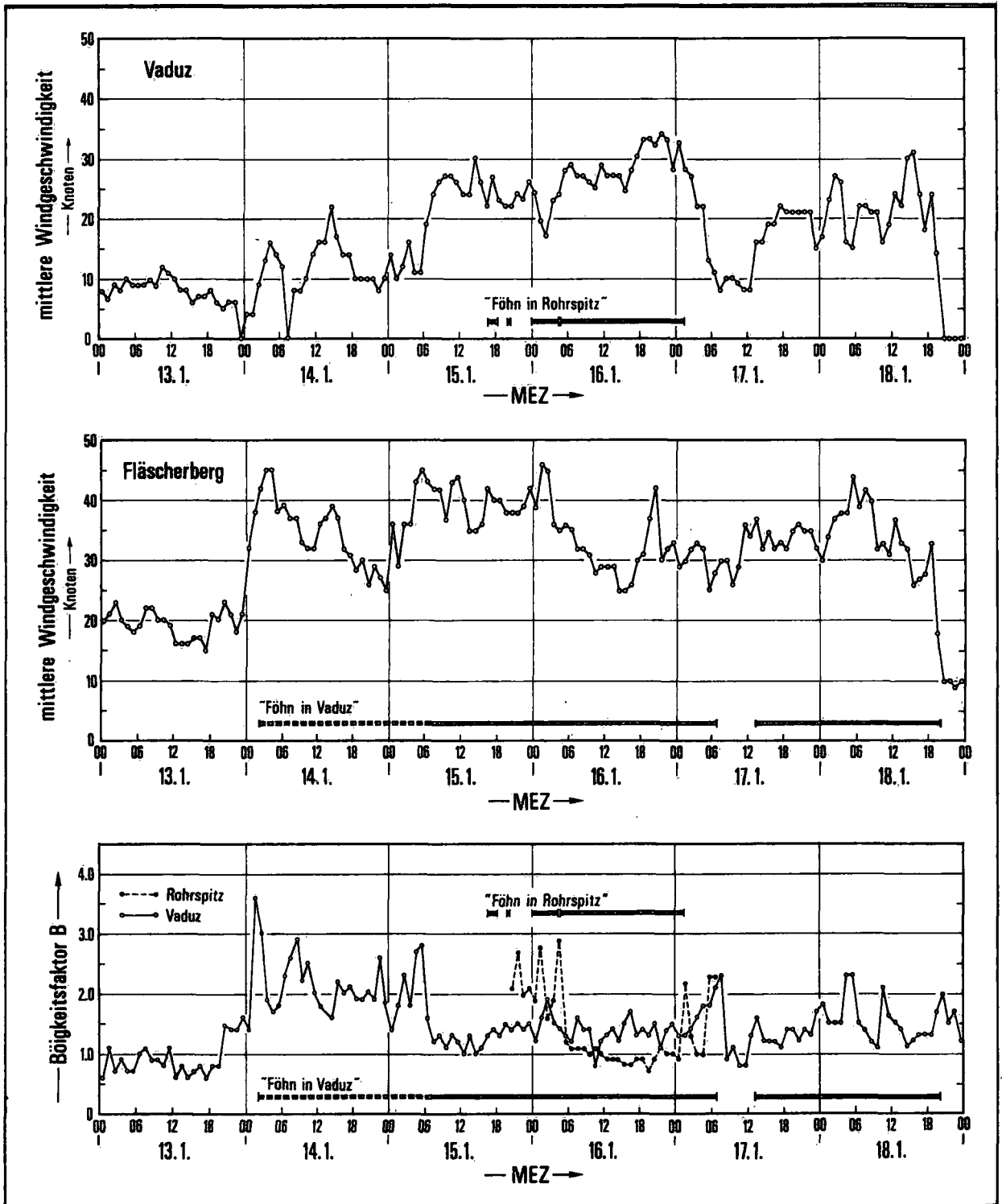


Abb. 5.2 Vergleich der Windgeschwindigkeiten mit der Föhndauer talauswärts gelegener Föhnstationen während des Föhnfalles Nr. 026 vom 13.-18. Januar 1975.

Oben: Windverlauf Vaduz verglichen mit der Föhndauer am Rohrspitz
Mitte: Windverlauf Fläschberg verglichen mit der Föhndauer Vaduz

In der untersten Darstellung ist der zeitliche Verlauf der Böigkeitsfaktoren am Rohrspitz und in Vaduz aufgezeichnet.

Obwohl der Föhn bereits in der Nacht zum 14. bis Vaduz durchbricht (Abb. 5.2, oben und Mitte), schwankt er hier zunächst zwischen Südwest und Südost (Abb. 5.1, Mitte). Erst mit andauernder hoher Geschwindigkeit ist er durch Richtungskonstanz (Süd) ausgezeichnet.

Am Talgrund wird der Föhn durch den Verlauf des Rheintals geführt. Aber selbst auf den Bergstationen Gütsch und Fläscherberg stimmt die Richtung des Föhns nicht mit der Strömung der freien Atmosphäre überein! Während der Föhnphase weht der Wind an den beiden Bergstationen konstant aus Südost, in der freien Atmosphäre dagegen aus Südwest (Abb. 5.1, Mitte und 500 mbar-Karte in Abb. 3.2).

Die Abbildungen 5.2, oben und Mitte zeigen den Zusammenhang der Windgeschwindigkeiten in Vaduz und auf dem Fläscherberg und dem Durchbruch des Föhns an der "darunterliegenden", d.h. der talabwärts liegenden Station.

In Vaduz nahm am 14., 17. und 18. die Geschwindigkeit des Föhns immer wieder kurzzeitig stark zu (Abb. 5.2, oben), aber der Föhn brach nicht bis zum See durch. Für den Durchbruch bis Rohrspitz scheint eine längere Anlaufzeit von anhaltend hoher Windgeschwindigkeit in Vaduz nötig zu sein, wie dies der 15. und 16. Januar zeigt.

Obwohl die Geschwindigkeit auf dem Fläscherberg starken Schwankungen unterliegt, behauptet sich der Föhn in Vaduz mit nur einer Unterbrechung (Abb. 5.2, Mitte). Das schwache Zurückgehen der Geschwindigkeit auf dem Fläscherberg am 17. ist kein hinreichendes Kriterium für einen Föhnunterbruch in Vaduz. An anderen Tagen lässt die Strömung sogar stärker nach, ohne dass ein Aussetzen des Föhns am Talgrund zu beobachten wäre. Föhnbeginn und -ende fallen dagegen sehr gut mit dem An- und Abschwellen des Windes auf dem Fläscherberg zusammen.

Für Vaduz und Rohrspitz konnte der Böigkeitsfaktor B berechnet werden (vgl. Abb. 5.2, unten), da hier Momentanwerte vorliegen und damit eine Auswertung nach Maximal- (v_{\max}) und Minimalwerten (v_{\min}) der Geschwindigkeit möglich war. Der Böigkeitsfaktor berechnet sich nach:

$$B = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{\bar{v}} \quad \bar{v} = \text{Stundenmittel}$$

Kurz vor Föhneinbruch in der Nacht vom 13. auf den 14. ist die Böigkeit am grössten. Danach folgt eine Phase mit relativ hohem Böigkeitswert (2.0). Sie fällt mit dem Abschnitt zusammen, während dem der Föhn in Vaduz noch zwischen Südost und Südwest schwankt (Abb. 5.1, Mitte).

Die Böigkeit erreicht fast immer dann Spitzenwerte, wenn die mittlere Geschwindigkeit an- oder abschwilt, was besonders bei Föhneinsatz und Föhnende ausgeprägt ist.

5.2. Korrelationsuntersuchung der Windgeschwindigkeiten

Im vorstehenden Kapitel 5.1 wurden die graphischen Darstellungen der Windgeschwindigkeiten von den Stationen Gütsch, Fläscherberg, Vaduz und Rohrspitz besprochen. Um den Zusammenhang zwischen den

Geschwindigkeitsvariablen quantitativ auszudrücken, lag es daher nahe, die Korrelationskoeffizienten ausgewählter Stationspaare zu berechnen. Es wurden von den stündlichen Windgeschwindigkeiten nur diejenigen Werte berücksichtigt, bei denen Föhn herrschte. So ergaben sich bei Gütsch und Fläscherberg je 120, bei Vaduz 80 und vom Rohrspitz 32 Werte. Um mögliche zeitliche Verschiebungen zu erfassen, wurden auch Korrelationskoeffizienten berechnet, bei denen die zweite Variable zwischen 1 und 4 Stunden verschoben war. Für jedes Stationspaar resultierten so 5 Korrelationskoeffizienten.

Folgende Abkürzungen werden anschliessend verwendet:

$F+i, R+i, V+i$ = Zeitliche Nachverschiebung des Wertes der Stationen Fläscherberg, Rohrspitz und Vaduz um i Stunden.

n = Anzahl Wertepaare

α = Signifikanzniveau

Korrelationen Gütsch (G) - Fläscherberg (F)

$$\begin{array}{llll} r_{G.F} & = & 0.04 & r_{G.F+3} & = & -0.11 & n & = & 120 \\ r_{G.F+1} & = & -0.02 & r_{G.F+4} & = & -0.12 & r_{\alpha} & = & 1\% = 0.23 \\ r_{G.F+2} & = & -0.07 & & & & & & \end{array}$$

Weder bei den gleichzeitigen Werten noch bei den stündlichen Verschiebungen ergaben sich gesicherte Zusammenhänge.

Korrelationen Gütsch (G) - Vaduz (V)

$$\begin{array}{llll} r_{G.V} & = & 0.59 & r_{G.V+3} & = & 0.47 & n & = & 80 \\ r_{G.V+1} & = & 0.57 & r_{G.V+4} & = & 0.42 & r_{\alpha} & = & 1\% = 0.28 \\ r_{G.V+2} & = & 0.50 & & & & & & \end{array}$$

Alle Korrelationskoeffizienten ergeben Zusammenhänge mittlerer Stärke, wobei eine stetige Abnahme mit den zeitlichen Verschiebungen auftritt.

Korrelationen Gütsch (G) - Rohrspitz (R)

$$\begin{array}{llll} r_{G.R} & = & 0.69 & r_{G.R+3} & = & 0.62 & n & = & 32 \\ r_{G.R+1} & = & 0.62 & r_{G.R+4} & = & 0.37 & r_{\alpha} & = & 1\% = 0.44 \\ r_{G.R+2} & = & 0.54 & & & & & & \end{array}$$

Bei den gleichzeitigen Wertepaaren ergab sich der höchste Korrelationskoeffizient der ganzen Untersuchung. Die zeitlichen Verschiebungen bewirkten einen Rückgang der Abhängigkeiten.

Korrelationen Fläscherberg (F) - Vaduz (V)

$$\begin{array}{llll} r_{F.V} & = & -0.01 & r_{F.V+3} & = & -0.11 & n & = & 80 \\ r_{F.V+1} & = & -0.09 & r_{F.V+4} & = & 0.02 & r_{\alpha} & = & 1\% = 0.28 \\ r_{F.V+2} & = & -0.12 & & & & & & \end{array}$$

Zwischen diesen zwei benachbarten Stationen mit verschiedenen Höhenlagen ergab sich kein Zusammenhang.

Korrelationen Fläscherberg (F) - Rohrspitz (R)

$r_{F.R}$	=	-0.60	$r_{F.R+3}$	=	-0.54	n	=	32
$r_{F.R+1}$	=	-0.50	$r_{F.R+4}$	=	-0.38	$r_{\alpha} = 1\%$	=	0.44
$r_{F.R+2}$	=	-0.64						

Im allgemeinen ergaben sich mittlere gegenseitige Zusammenhänge, wobei der höchste Wert bei der 2-stündigen Verschiebung liegt.

Korrelationen Vaduz (V) - Rohrspitz (R)

$r_{V.R}$	=	0.50	$r_{V.R+3}$	=	0.30	n	=	32
$r_{V.R+1}$	=	0.32	$r_{V.R+4}$	=	0.03	$r_{\alpha} = 1\%$	=	0.44
$r_{V.R+2}$	=	0.26						

Nur bei den gleichzeitigen Werten ergab sich ein Zusammenhang mittlerer Stärke; bei den zeitlichen Verschiebungen nahmen die Korrelationskoeffizienten ab.

Es ist selbstverständlich, dass Korrelationen von nur einem Föhnfall nicht genügen, um weitergehende Schlüsse zu ziehen. Die Ergebnisse zeigen aber, dass es sich nicht um leicht erkennbare Zusammenhänge handelt. Besonders auffallend sind der starke Zusammenhang zwischen den zwei am weitesten auseinanderliegenden Stationen Gütsch und Rohrspitz und die deutlich negative Korrelation Fläscherberg - Rohrspitz. Nicht erwartet wurden die geringen Korrelationen zwischen dem Fläscherberg und Vaduz sowie zwischen den beiden Bergstationen Gütsch und Fläscherberg. Diese Ergebnisse deuten an, dass einfache Föhnmodelle die Wirklichkeit nicht ausreichend beschreiben.

5.3. Tägliche Windwege

In der Abbildung 5.3 sind die 24-stündigen Windvektoren (gewonnen aus der Addition der Stundenvektoren) dargestellt.

Fläscherberg und Gütsch haben also einen mittleren Wind aus Südost und Vaduz fast genau aus Süd. Zum Vergleich hinzugefügt wurde der 24-stündige Windvektor für Stuttgart für den Kaltfrontdurchgang in der Nacht vom 31.12.78/1.1.79, welcher in Süddeutschland einen Temperatursturz von ca. 20°C und in Norddeutschland eine Schneekatastrophe brachte. In diesem Fall waren die 24-stündigen Windvektoren bei Föhn um den Faktor zwei bis drei grösser als derjenige im Bereich einer sehr markanten Kaltfront.

In der Tabelle 5.1 wird der stündliche Windweg mit dem Betrag des Windvektors verglichen. Beide Werte sind nur dann gleich, wenn während dieser Zeit die gleiche Windrichtung geherrscht hat.

Man erkennt, dass in erster Linie beim Föhnunterbruch am 17.1.1975 und etwas weniger ausgeprägt in der Anfangsphase am 14.1. stärkere Abweichungen aufgetreten sind; die gute Übereinstimmung an den anderen Tagen gibt einen Hinweis für hohe Richtungskonstanz während des Föhns.

1975	V A D U Z	
	Windweg ohne Berücksichtigung der Richtung	Windweg mit Berücksichtigung der Richtung (Vektor)
13.1.	202 naut. Meilen	197 naut. Meilen
14.1.	295	249
15.1.	516	503
16.1.	662	662
17.1.	418	320
18.1.	442	423

Tab. 5.1 Vergleich der Windwege mit und ohne Berücksichtigung der Richtung für die Station Vaduz während des Föhnfalles Nr. 026 vom 13.-18. Januar 1975.

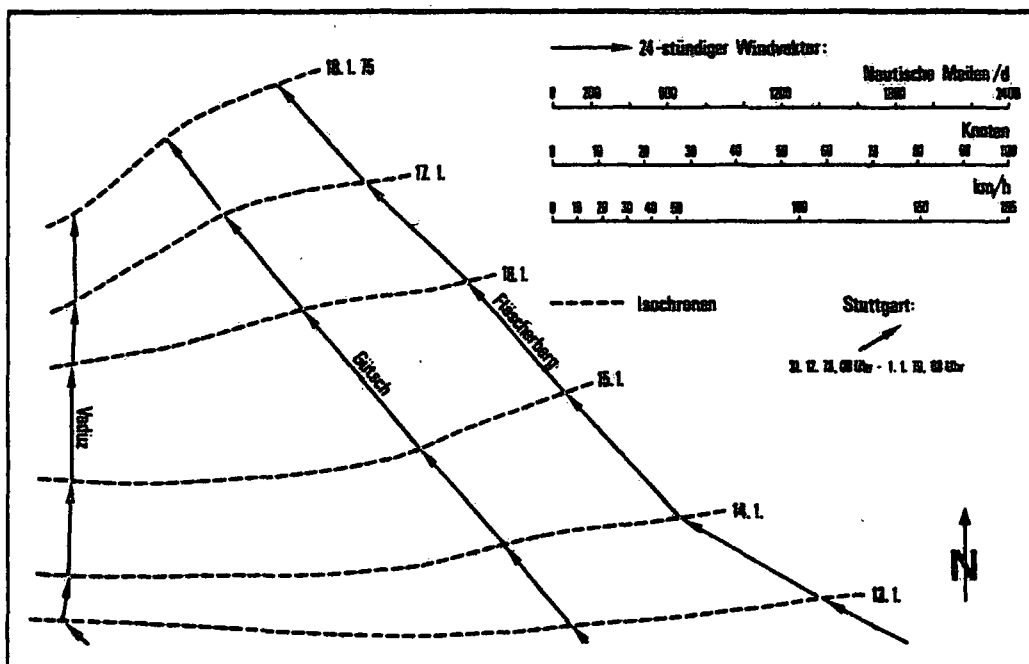


Abb. 5.3 24-stündige Windvektoren der Stationen Gütsch (2288 m/M), Fläscherberg (940 m/M) und Vaduz (457 m/M) während des Föhnfalles Nr. 026 vom 13.-18. Januar 1975.

Zum Vergleich ist der 24-stündige Windvektor von Stuttgart beim markanten Kaltlufteinbruch in Nord- und Mitteleuropa vom 31.12.78, 08 Uhr - 1.1.79, 08 Uhr eingezeichnet.

6. Föhnndauer an den einzelnen Stationen

Ueber die Föhnndauer und den zeitlichen Ablauf an den einzelnen Stationen im Untersuchungsgebiet gibt Abbildung 6.1 Auskunft. Daraus ist ersichtlich, dass der Föhn im Rheintal zuerst am 14.1. frühmorgens, ohne Durchbruch weiter talaufwärts, zwischen Vaduz und Oberriet einsetzte, was nicht einem normalen Ablauf entspricht. Erst im Verlaufe des Vormittags trat er auch im Abschnitt Bad Ragaz - Chur auf. Normalerweise setzt der Föhn zuerst taleinwärts (Vorderrheintal und Chur) ein, um dann allmählich, die Kaltluft verdrängend, über Bad Ragaz, Vaduz, Oberriet nach Norden zum Bodensee vorzustossen. Im vorliegenden Fall erfolgte der eigentliche Vorstoss in den Bodenseeraum erst am Nachmittag des 15. Januar. Dabei stiess der stürmische Föhn rasch gradlinig über das Ostende des Bodensees hinweg bis nach Lindau vor, ohne vorerst nach

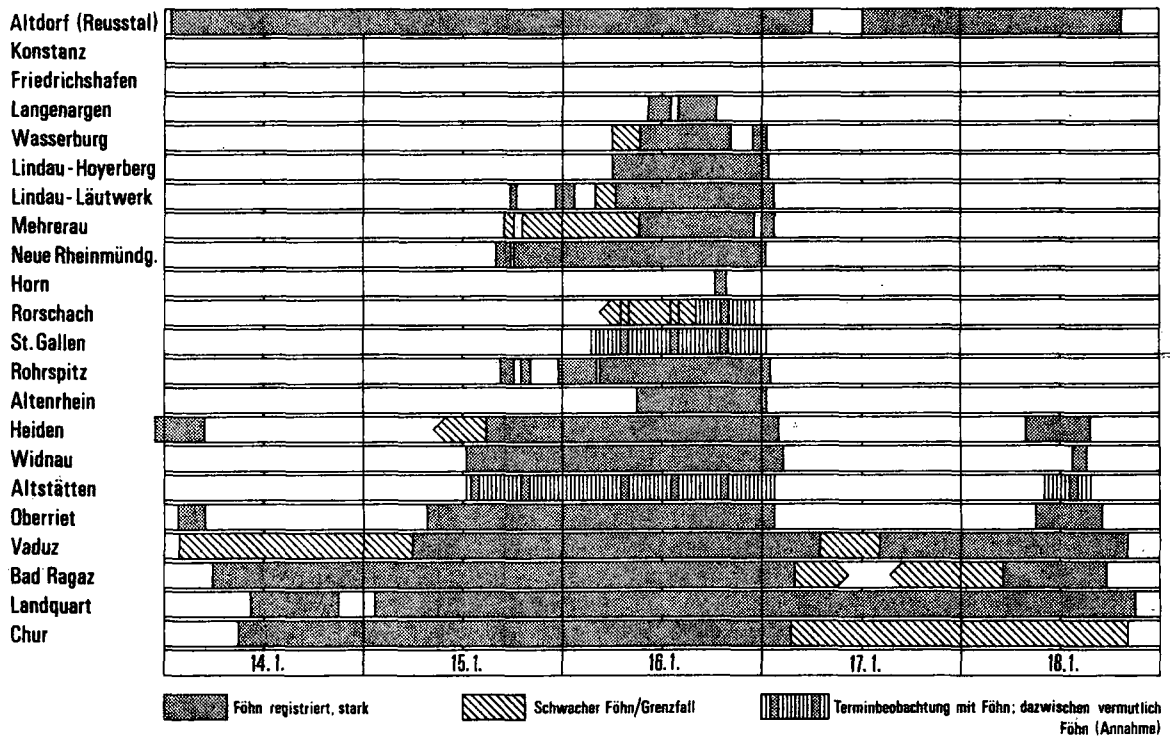


Abb. 6.1 Lokale Föhnndauer im Bodenseeraum und im oberen Rheintal bis Chur während des Föhnfalles Nr. 026 vom 14.-18. Januar 1975.

Westen aufzufächern. Erst mehr als acht Stunden später wurde im nur etwa sieben Kilometer westlich der Station Rohrspitz liegenden Altenrhein Föhn registriert. Dasselbe gilt auch für die beiden westlich von Lindau am Nordufer des Sees liegenden Stationen Wasserburg und Langenargen. Noch weiter westlich wurde in Horn nur noch ein sehr kurzer Durchbruch festgestellt und Friedrichshafen und Konstanz wurden überhaupt nicht erreicht. Der sonst häufig auftretende Appenzellerföhn am Südufer des Sees westlich Rorschach trat in diesem Falle nicht auf. Die starke Abnahme der Föhnndauer von den beiden in der Talmitte liegenden

Stationen Rohrspitz und Neue Rheinmündung nach Osten zum 5 km entfernt liegenden Mehrerau ist möglicherweise auf die Aufstellung des Windmessers zurückzuführen, steht doch im Süden, also gegen den Wind, eine das Messgerät deutlich überragende quer zum Tal verlaufende Baumallee. Der Zusammenbruch im Bodenseeraum erfolgte nach Mitternacht am frühen 17. und setzte sich rasch talaufwärts bis vor Vaduz fort. Im obern Rheintalabschnitt schwächte sich die Föhnströmung stark ab; örtlich hob sie ebenfalls vom Boden ab. Ein nochmaliger Vorstoss am Vormittag des 18. reichte im Tal nur noch bis Widnau, während in der Höhe Heiden nochmals in die Föhnströmung gelangte. Der endgültige Zusammenbruch dieser 5-tägigen Föhnlage erfolgte mit dem Kaltfrontdurchgang am Nachmittag und Abend des 18. Januar 1975.

Das Zurückweichen beim Föhnzusammenbruch entspricht dem normalen Ablauf, wie auch aus Tabelle 6.1 ersichtlich ist. Die Föhndurchbrüche dagegen waren bei der Rheinmündung am Schweizer Ufer des Bodensees überdurchschnittlich kurz: Die prozentualen Andauerwerte, verglichen mit dem Rohrspitz oder mit Bad Ragaz, liegen bei den Stationen Altenrhein, St. Gallen, Rorschach, Horn und Heiden deutlich unter den zweijährigen Mittelwerten.

Ort	Föhndauer in Stunden 14.-18.1.75 Fall 026 [Stunden]	Föhndauer relativ zu Rohrspitz		Föhndauer relativ zu Bad Ragaz	
		14.-18.1.75 Fall 026	Mittelwert 1.5.73 - 30.4.75	14.-18.1.75 Fall 026	Mittelwert 1.5.73 - 30.4.75
		[%]	[%]	[%]	[%]
Altdorf	108.3	400	630	129.7	73.3
Chur	ca. 70	260	- 2)	84	- 2)
Landquart	102.1	370	- 2)	122.3	- 2)
Bad Ragaz	83.5	310	860	100	100
Vaduz	109	400	580	130.5	67.4
Oberriet	52.5	190	310	62.9	36.0
Altstätten	ca. 42 1)	150	230	50	26.7
Widnau	39.5	140	- 2)	47.3	- 2)
Heiden	47.5	174	400	56.9	46.5
Altenrhein	15.5	5.5	90	18.6	10.5
Rohrspitz	27.25	100	100	32.6	11.6
St.Gallen	ca. 21 1)	75	170	25	19.8
Rorschach	ca. 7 1)	25	85	8	9.9
Horn	0.7	2.5	35	0.8	4.1
Neue Rheinmündung	32.3	120	94	38.7	10.9
Mehrerau	13.75	50	49	16.5	5.7
Lindau-Läutwerk	19.0	70	48	22.8	5.6
Lindau-Hoyerberg	18.75	70	- 2)	22.5	- 2)
Wasserburg	12.9	50	40	15.4	4.7
Langensargen	7.1	25	18	8.5	2.1
Friedrichshafen	0.0	0	8	0	0.9
Konstanz	0	0	0 3)	0	0

1) geschätzt, da nur Terminbeobachtung 3) (1969-75: 0.4%)

2) Daten unvollständig

Tab. 6.1 Föhndauer in Stunden und Föhndauer relativ zur Station Rohrspitz und zu Bad Ragaz für den Föhnfall 026 vom 14.-18.1.75, verglichen mit dem zweijährigen Mittelwert 1.5.73 - 30.4.75 (Intensivmessperiode am östlichen Bodensee: WAIBEL [1976]).

Hingegen sind die im Fall 026 im Vergleich mit dem Rohrspitz niedrigeren Prozentzahlen bei den Stationen im Talhintergrund auf die Tatsache zurückzuführen, dass bei den zweijährigen Mittelwerten auch die Föhnfälle miteinbezogen sind, bei welchen der Föhn nicht bis zum Bodensee vorstieß.

7. Temperatur

Bereits in einer früheren Arbeit (GUTERMANN [1970]) wurde gezeigt, dass die durch den Föhn bewirkte Temperaturerhöhung im Hintergrund des Rheintals kleiner ist als nördlich Sargans bis zum Bodensee. Dies wird vor allem durch Vermischung mit bodennaher Kaltluft bewirkt, welche als Bergwind nachts und morgens talauswärts fließt. Ein weiterer Grund für diesen Unterschied könnte sein, dass die weiter nördlich im Talgrund strömende Föhnluft teilweise aus einer grösseren Höhe stammt, so dass hier durch die längere Dauer des trockenadiabatischen Erwärmungsprozesses im Lee der Alpen ein grösserer Wärmegewinn resultiert.

Diese Temperaturunterschiede sind zumindest teilweise auch im vorliegenden Einzelföhnfall festzustellen.

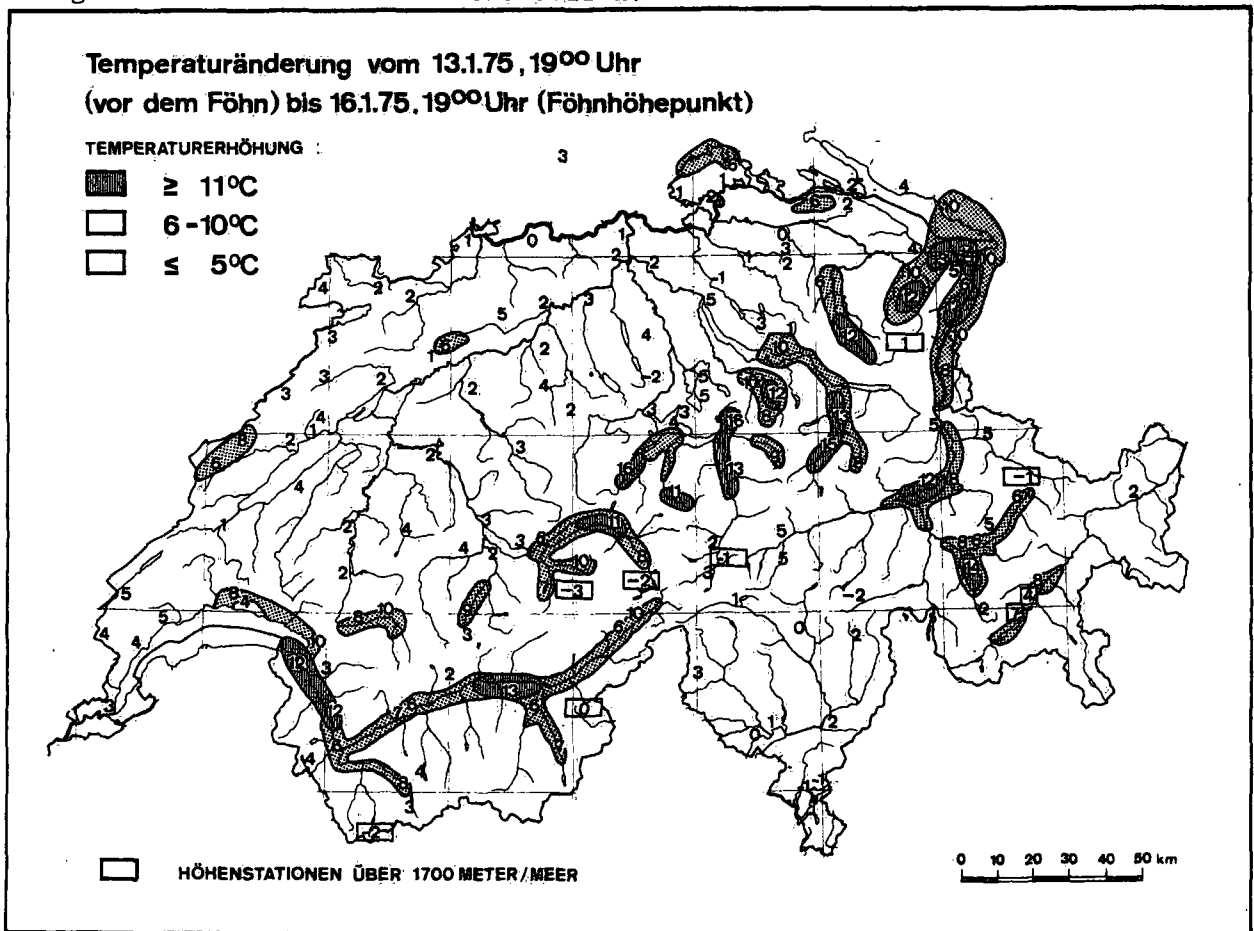


Abb. 7.1 Temperaturänderungen von "vor dem Föhn" (13.1.75, 19 Uhr) bis zum Föhnhöhepunkt (16.1.75, 19 Uhr) in der Schweiz. Die Föhndurchbruchgebiete in den nördlichen Alpentälern zeichnen sich mit Temperaturanstiegen von 11-16°C deutlich ab.

Temperaturkarten der Schweiz bei Föhn

Besonders deutlich zeigt sich die föhnbedingte Temperaturerhöhung im Winter, wenn, wie im vorliegenden Beispiel, vor dem Föhndurchbruch in den Niederungen der Alpennordseite Kaltluft von -2 bis $+4^{\circ}\text{C}$ liegt. Nach erfolgtem Föhndurchbruch erhöhen sich die Temperaturen in den Föhngebieten um 10 bis 15°C (Abb. 7.1): Den grössten Wärmegewinn weisen die eigentlichen Föhntäler auf (Maximum mit $+16^{\circ}\text{C}$ in der Zentralschweiz), dicht gefolgt vom Linthtal (Kanton Glarus) mit $+15^{\circ}\text{C}$ und vom Rheintal und dem östlichen Bodenseeraum mit $+10$ bis $+14^{\circ}\text{C}$. Deutlich ist im Rheintal die nach Norden zunehmende Temperaturdifferenz zu erkennen. Ausserhalb der Föhndurchbruchgebiete ist jedoch im Laufe der 3 Tage (13.1. bis 16.1.75) nur ein geringer Temperaturanstieg von wenigen Grad festzustellen.

Die Karte der Temperaturverteilung während des Föhnhöhepunktes am 16. Januar 1975 um 1900 Uhr (Abb. 7.2) erlaubt eine klare Abgrenzung der eigentlichen Föhndurchbruchgebiete.

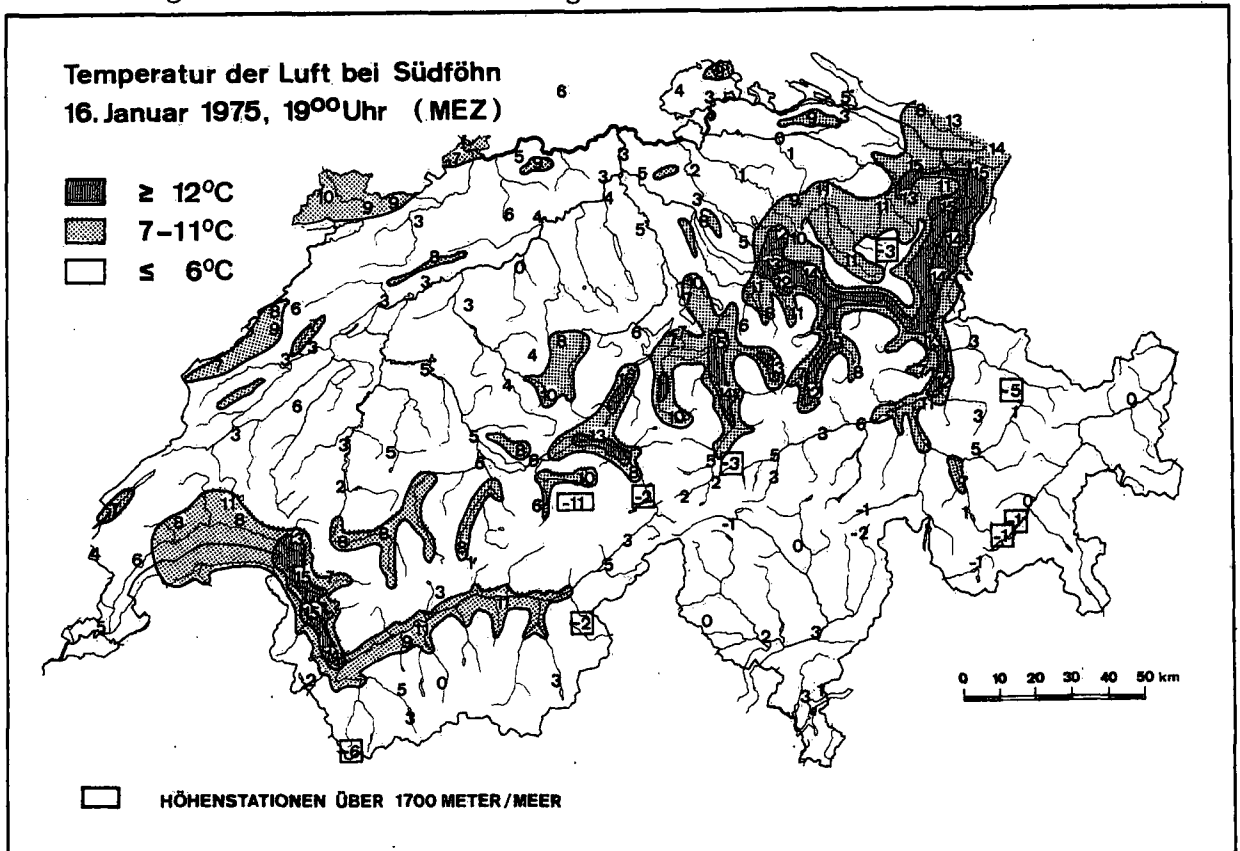


Abb. 7.2 Lufttemperaturen in der Schweiz bei Südföhn im Rheintal. Die Temperaturen sind nicht auf ein einheitliches Höhen-niveau reduziert. Die hervorgehobenen Föhndurchbruchgebiete liegen im allgemeinen auf Höhen zwischen 400 und 600 Metern über Meer.

Klar zeichnet sich der flächenmässige Schwerpunkt in der Ostschweiz ab: Das Rheintal und der östliche Bodenseeraum gehören zu den Gebieten mit den stärksten Temperaturerhöhungen. Während in den Talniederungen mehrheitlich Temperaturen von 12 bis 15°C herrschten, meldeten die in der Föhnströmung gelegenen höheren Stationen (ca. 600 m/M und höher) je nach Lage und Durchmischung mit Kaltluft Temperaturen von 7 bis 11°C. Dies trifft besonders auch für Gebiete im Hoch- und Nordjura zu. In den Niederungen des Mittellandes blieb die Kaltluft liegen. Mit Temperaturen von meist 0 bis 5°C war es in diesen Gebieten daher 10 bis 15°C kälter als in den Föhngebieten.

Temperaturverlauf auf den Bergstationen Gütsch und Säntis

FREY [1945] weist im Zusammenhang mit der von ihm aufgestellten Solenoidtheorie auf den ausgeprägten Temperaturgradienten hin, welcher in der Höhe vom Alpenkamm zum nördlichen Alpenvorland gerichtet sei. Daher sollen hier kurz die Temperaturen der Bergstation Gütsch (2288 m/M)

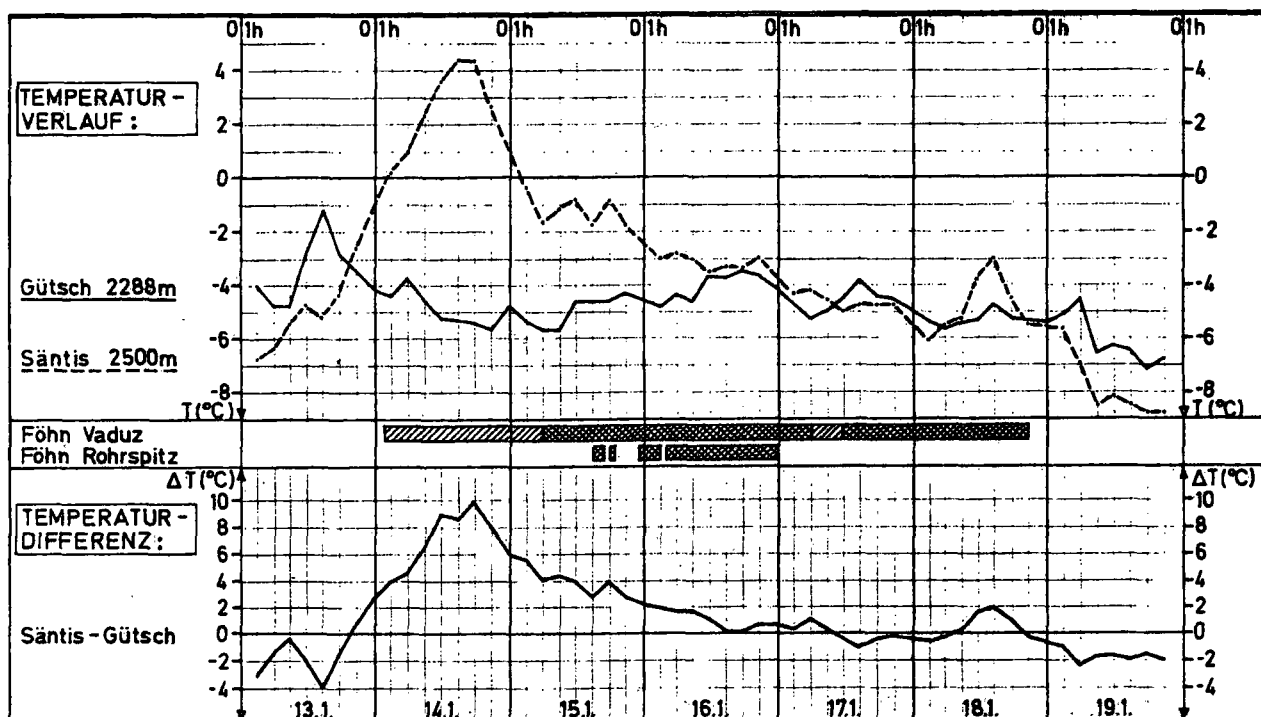


Abb. 7.3 Temperaturvergleich Säntis (2500 m/M) und Gütsch (2288 m/M). Die Voralpen-Gipfelstation Säntis liegt etwa 70 km nördlich der sich im Zentrum des Alpenkamms befindenen Hangstation Gütsch (südexponiert). Auf dem Säntis erfolgte im vorliegenden Fall vor dem Föhnvorstoss ins Mittelland hinaus eine vorübergehende starke Erwärmung.

mit denjenigen der Ostschweizer Gipfelstation Säntis (2500 m/M) verglichen werden. Aus Abb. 7.3 geht hervor, dass im Höhenbereich von 2300 bis 2500 m/M tatsächlich nördlich des Alpenkamms ein Temperaturüberschuss besteht. Während der Anfangsphase des Föhns (14. und 15.1.75) ist eine vorübergehende kräftige Erwärmung auf dem Säntis festzustellen;

auf dem Gütsch änderten dagegen die Temperaturen über die gesamte Föhnperiode nur wenig. Auch nach erfolgtem Föhndurchbruch in die Täler bleibt ein allerdings geringerer Temperaturüberschuss auf dem Säntis bestehen: Unter Berücksichtigung der Höhendifferenz der beiden Stationen war es auf dem Säntis vom 16.-18.1.75 noch 1 bis 4°C wärmer als auf dem Gütsch. Ob die starke Erwärmung auf dem Säntis zu Beginn des Föhns typisch für starke Föhnlagen ist, kann aufgrund dieses Einzelfalles nicht gesagt werden.

Zeitlicher Temperaturvergleich im östlichen Bodenseeraum

Nachfolgend sei der Temperaturverlauf vor, während und nach der Föhnlage vom 13.-18.1.1975 dargestellt. Betrachtet werden die Temperaturen zu den klimatologischen Beobachtungsterminen von 07, 13 und 19 Uhr. Tatsächlich erfolgten die Messungen an den synoptischen Stationen und an den Hauptstationen des klimatologischen Netzes 15 Minuten vor, an den übrigen Stationen 30 Minuten nach der Sollzeit, was hier aber vernachlässigt werden kann.

Beim Vergleich der Temperaturen vor und nach dem Föhn (Abb. 7.4) zeigt sich bei den Talstationen die bereits früher erwähnte Erwärmung, welche allerdings im Bodenseeraum mit 6-8 Grad stärker ist als ausserhalb der Föhngebiete. Klar heben sich auch bei dieser zeitlichen Darstellung

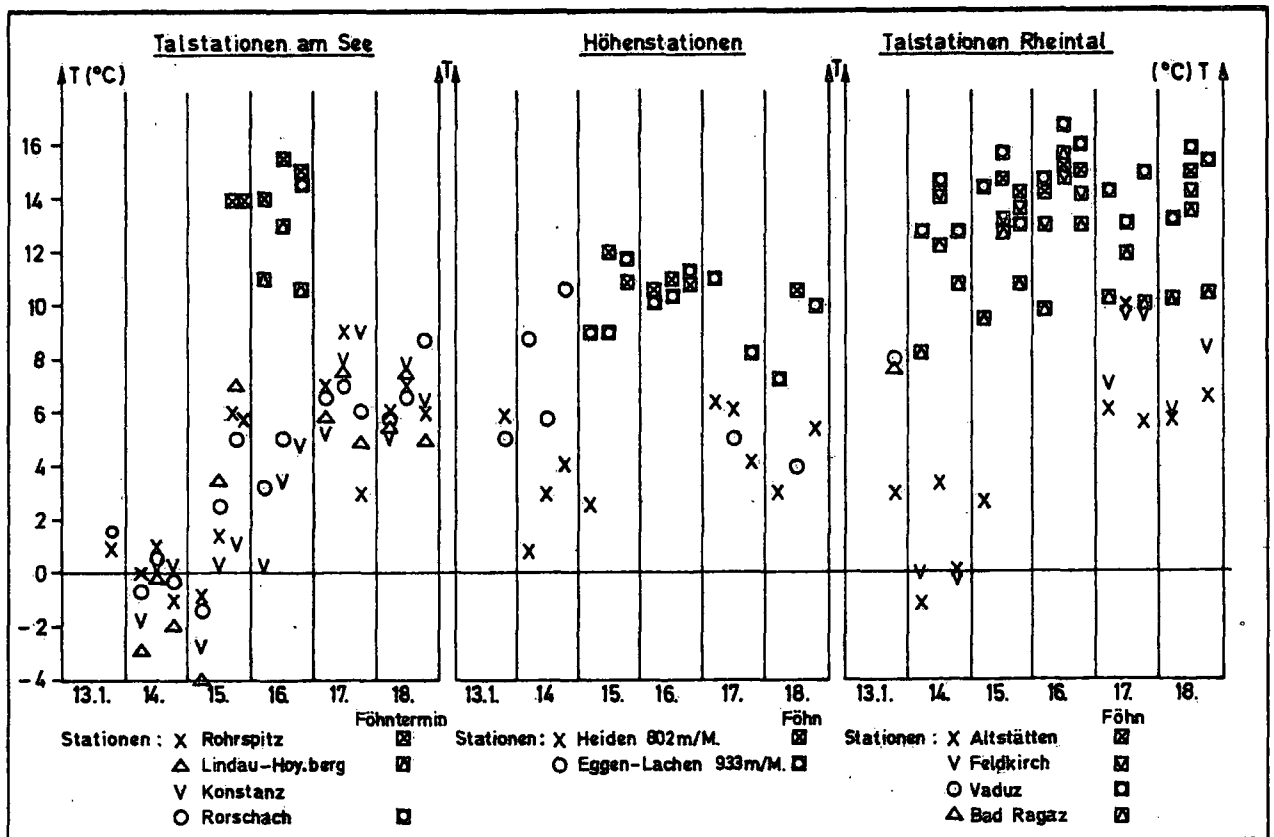


Abb. 7.4 Temperaturen im östlichen Bodenseeraum und im Rheintal bis Bad Ragaz zu den klimatologischen Beobachtungsterminen 07, 13 und 19 Uhr. Sie sind nicht auf eine gemeinsame Höhe reduziert. Alle Talstationen liegen zwischen 400 und 510 Metern über Meer.

die starken Temperaturunterschiede zwischen der nördlichen Kaltluft und dem von Süden anströmenden Föhn ab. Bei den Talstationen am See (Abb. 7.4 links) weisen die Stationen am Südufer des Bodensees beim Föhnvorstoss vom 15./16.1.1975 Temperaturen von 14-16°C auf. Nördlich des Sees auf dem Hoyerberg bei Lindau (55 m über dem Seespiegel gelegen) war es 1-3 Grad kälter: Die stark kanalisierte Föhnströmung vermischt sich offenbar beim Ausfächern über dem Bodensee bereits etwas mit der angrenzenden Kaltluft.

Im Rheintal (Abb. 7.4 rechts) oberhalb des Sees, durch welches die Hauptföhnströmung in den Bodenseeraum vorstösst, herrscht wesentlich länger Föhn (14.-18.1.1975). Die höchsten Temperaturen weist hier Vaduz auf, während in Bad Ragaz die Vermischung mit der bodennahen kalten Bergwindluft eine mittlere Abkühlung von 2-3 Grad bewirkt. Die übrigen Stationen melden mit meist 14-16°C ähnliche Temperaturen, wie sie am See zu beobachten waren.

Heiden und Eggen-Lachen, die beiden eigentlichen Höhenstationen in Seenähe, liegen deutlich länger in der Föhnströmung als die Stationen am See und im Rheintal nördlich von Feldkirch (Abb. 7.4 Mitte). Als Folge ihrer Höhenlage profitieren sie einerseits weniger von der Föhn-erwärmung, andererseits befinden sie sich in der föhnefreien Zeit meist über der eigentlichen Kaltluft der Niederungen. Der Unterschied Föhn/Nichtföhn fällt daher mit nur 5-7 Grad wesentlich geringer aus als bei den Talstationen. Zeitweilige Durchmischungsvorgänge können diese Differenz noch zusätzlich vermindern, so dass hier häufig keine eindeutige Abgrenzung des Föhns möglich ist.

Gesamthaft zeigt sich in der betrachteten Region ein beträchtlicher föhnbedingter Wärmegewinn, welcher wenigstens teilweise noch über die eigentliche Föhndurchbruchphase hinaus wirksam sein kann.

Vergleich der mittleren Föhntemperaturen im Rheintal

Durch Mittelung der klimatologischen Beobachtungstermine mit Föhn wurde im vorliegenden Einzelfall die These der nach Norden ansteigenden Föhntemperaturen überprüft. Wie der Tabelle 7.1 zu entnehmen ist, sind die auf 400 m/Meer reduzierten Temperaturen im Rheintal nördlich von Sargans auch in diesem Einzelfall deutlich höher als in Bad Ragaz und Chur. Abgesehen von der Station Rohrspitz, wo sich eine etwas niedrigere Mitteltemperatur bei Föhn ergibt, sind innerhalb dieses Talabschnittes im betrachteten Zeitraum keine signifikanten Unterschiede feststellbar. Die Abweichungen, selbst diejenigen von Rohrspitz, können messbedingt sein. Erst ein umfassenderer Vergleich über eine längere Periode wird darüber eine gesicherte Aussage liefern können.

Mittlere vertikale Temperaturgradienten im Föhn

Abschliessend sollen noch einige Bemerkungen zu den beobachteten vertikalen Temperaturgradienten in der Föhnströmung gemacht werden. In die Berechnung miteinbezogen wurden nur Temperaturpaare, welche von Terminen stammen, zu denen an beiden betroffenen Stationen eindeutig Föhn herrschte. Leider fielen die Messungen des Pfänders während dieses Föhnfalles aus, sodass er nicht in die Temperaturuntersuchungen miteinbezogen werden konnte.

Station	Höhe/Meer [m]	Föhntermine Anzahl n Föhnfall 026 (14.-18.1.75)	Temp.Mittel effektiv [°C]	Temp.Mittel reduziert auf 400 m/Meer ¹⁾ [°C]
Lindau-Hoyerberg	453	3	12.2	12.7
Rohrspitz	398	4	14.6	14.6
St.Gallen	670	3	12.5	15.2
Altstätten	473	6	14.6	15.3
Feldkirch	439	7	13.8	14.2
Vaduz	457	14	14.5	15.1
Bad Ragaz	508	15	11.2	12.3
Chur	582	15	9.3	11.1
Eggen/Lachen	933	10	9.8	15.2
Heiden	802	6	10.9	14.9

¹⁾ Temperaturgradient 1°/100 m

Tab. 7.1 Vergleich der mittleren Föhntemperaturen im Rheintal vom Bodensee bis Chur.

In Tabelle 7.2 sind die aus einer jeweils unterschiedlichen Anzahl Föhnterminen n errechneten Temperaturgradienten zusammengestellt. Betrachtet man vorerst den Höhenbereich der drei Bergstationen Säntis (2500 m/M), Gütsch (2288 m/M) und Weissfluhjoch (2667 m/M), so wird einerseits die föhnbedingte Erwärmung im leeseitigen Alpenvorland bestätigt: Auf dem etwa 200 m höher als die Station Gütsch gelegenen Säntis ist es im Mittel über 2° C wärmer. Auch der über trockenadiabatische Gradient Säntis-Weissfluhjoch weist auf diese Temperaturentwicklung über der Ostschweiz hin. Die beinahe gleichen Temperaturen Gütsch - Weissfluhjoch (Höhendifferenz knapp 400 m) sind offenbar die Folge einer auf Alpenkammhöhe W-E gerichteten horizontalen Temperaturzunahme gleicher Grössenordnung.

Zwischen Gipfelhöhe und Talgrund zeigt der Vergleich Altdorf - Gütsch mit einem Gradienten von 1° C/100 m die in der absteigenden Föhnströmung theoretisch erwartete trockenadiabatische Erwärmung erstaunlich genau. Dagegen lässt der Vergleich Vaduz - Gütsch vermuten (Temperaturzunahme 1,05° C/100 m), dass die Vaduz berührende Föhnluft aus grösserer Höhe oder aus einer östlicheren und damit etwas wärmeren Alpenkammregion stammt.

Die Temperaturgradienten Talstationen des Bodenseeraumes und des Rheintals-Säntis betragen infolge der erhöhten Säntistemperaturen nur etwa 0.8 Grad. Dies erstaunt nicht, da die Föhnluft im östlichen Bodenseeraum nicht oder nur in beschränkter Masse den Säntisgipfel berührt, sondern zum grössten Teil schon südlich dieses Massivs den Talgrund des Rheintals erreicht hat.

Die starken Unterschiede der Gradienten in den Vergleichen der Talstationen mit den beiden auf mittlerer Höhe liegenden Stationen Eggen/Lachen (933 m/M) und Heiden (802 m/M) lassen sich teilweise auf

Stationspaar	Anzahl Beobachtungstermine mit Föhn an beiden Stationen	Vertikaler Temperaturgradient
	n	[°C/100 m]
Gütsch - Säntis	15	-1.2
Säntis - Weissfluhjoch	16	+1.2
Gütsch - Weissfluhjoch	16	-0.1
Altdorf - Gütsch	13	+1.0
Bad Ragaz - Gütsch	15	+0.9
Vaduz - Gütsch	14	+1.05
Bad Ragaz - Säntis	15	+0.7
Vaduz - Säntis	14	+0.8
Rohrspitz - Säntis	4	+0.8
Eggen/Lachen - Säntis	10	+0.8
Heiden - Säntis	6	+0.9
Heiden - Eggen/Lachen	4	+0.4
Vaduz - Eggen/Lachen	10	+1.05
Altstätten - Eggen/Lachen	5	+0.9
Rohrspitz - Eggen/Lachen	4	+0.7
Altstätten - Heiden	5	+1.1
Rohrspitz - Heiden	4	+0.95
St.Gallen - Heiden	3	+1.3
Rorschach - Heiden	1	+0.8
Lindau/Hoyerberg - Heiden	3	+0.3

Tab. 7.2 Mittlere vertikale Temperaturgradienten in der Föhnströmung während des Föhnfalles Nr. 026 (14.-18.1.1975).
(Bei Temperaturabnahme mit der Höhe ist der Temperaturgradient positiv).

Ähnliche Art erklären. Entweder befindet sich die betrachtete Talstation auf einer aus grösserer Höhe stammenden Stromlinie, wodurch der Gradient erhöht wird, oder die Luft ist infolge Vermischung mit Kaltluft so wenig erwärmt, dass nicht einmal ein feuchtadiabatischer Gradient errechnet wird (Lindau/Hoyerberg - Heiden nur 0.3°C/100 m). Infolge der nur noch 400 bis 500 m betragenden Höhendifferenz (Heiden - Eggen/Lachen sogar nur 130 m) sowie der geringen Anzahl Fälle können sich hier auch eventuelle Messfehler so stark auswirken, dass eine exakte Interpretation einzelner Gradienten problematisch wird.

Eine umfassendere Untersuchung der vertikalen Temperaturgradienten scheint nur für wenige Stationspaare sinnvoll. Dabei sind Vergleiche zwischen Tal- und Bergstationen nach erfolgtem Föhndurchbruch prognostisch kaum verwendbar. Es bleibt jedoch an einem grösseren Datenmaterial abzuklären, ob aus den Temperaturunterschieden Gütsch - Säntis oder anderer Kombinationen von Höhenmesswerten der Temperatur eine Föhndurchbruchstendenz abgeleitet werden kann.

8. Aerologische Aufstiege

Die Bodenmessungen während der Vorphase und während der Föhnabläufe wurden ergänzt durch aerologische Aufstiege vom oberen Rheintal aus. Sie wurden so angelegt, dass sowohl Aufstieg als auch Abstieg der Wettersonden empfangen und wenn möglich optisch verfolgt werden konnten. Eine aerologische Sonde nach GRAW und ein Fallschirm wurden von 2 Ballonen hochgetragen, 1 Ballon in vorgegebener Höhe abgetrennt, so dass das Gespann beim Auf- und Abstieg etwa dieselbe Geschwindigkeit aufwies. Für die Aufstiegs Gipfel wurden niedrige Höhen zwischen 3 und 6 km gewählt, damit der Abstieg der Sonde möglichst noch innerhalb des Gebirges erfolgte. Abbildung 8.1 veranschaulicht die verschiedenen Start- und Landeorte.

Beim Föhnfall 026 sind insgesamt 8 Ballonaufstiege innerhalb von 3 Tagen gestartet worden, von denen 6 auswertbar waren (vgl. Tabelle 8.1) und 2 wegen frühzeitigem Platzen der Ballone nur Höhen von 1 km erreichten. Die Ursache dafür, sowie für den Ausfall der Feuchtemessung war die ausserordentliche mechanische Beanspruchung des Ballongespans vor und beim Start bei den starken und böigen Bodenwinden.

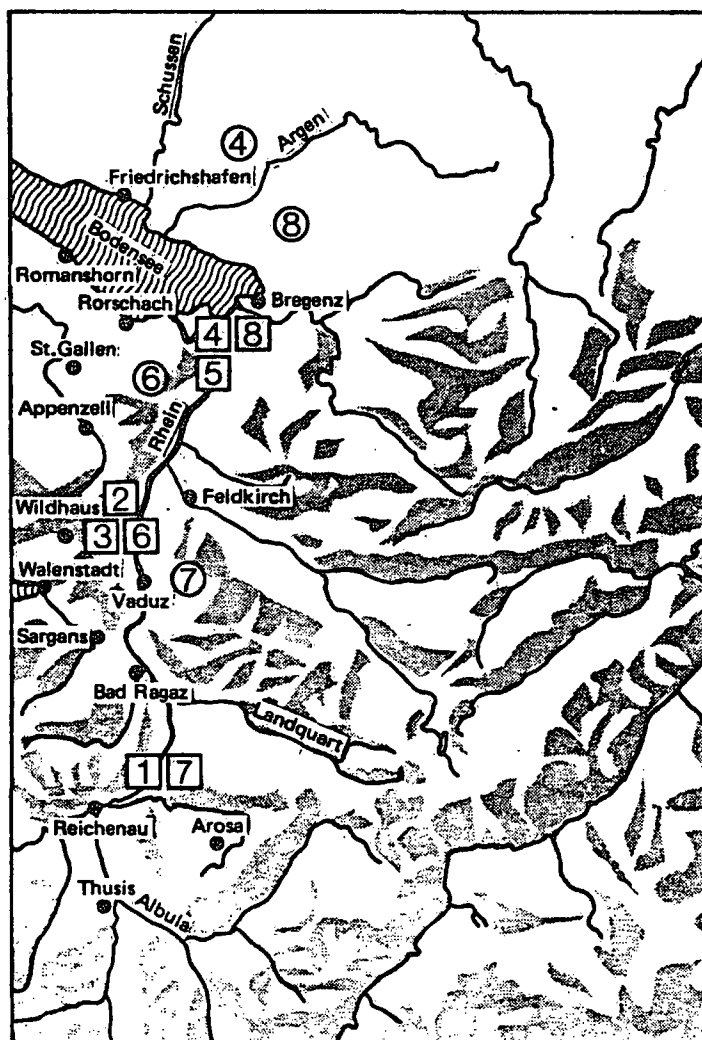


Abb. 8.1 Start- und Landeorte der acht aerologischen Aufstiege Nr. 026-1 bis 026-8.

□ Startort, ○ Landeort, sofern bekannt

Nr.	Startort Datum Uhrzeit	Gipfel- höhe (km)	Beob. Höhe (km)	markante Temp.diff.		Höhe markanter Temp.inver- sionen (km)	Aufstieg				Abstieg				
				t = t _{Auf} - t _{Ab} h (km)	Δt (°C)		Aufwind		Abwind		Aufwind		Abwind		
							v (m/s)	h (km)	v (m/s)	h (km)	v (m/s)	h (km)	v (m/s)	h (km)	
026-1	Chur 15.1.75 1155	2,7	2,7	1,8	-2	Abstieg 1,8				2 ±0,5	0,5-0,8				
026-3	Buchs 15.1.75 1404	5,8	3,8			Aufstieg 2,3	0,6-1,4 ±0,3 5,0±0,6	1,5-2,9 3 -4,3	1,0±0,4 2,0±0,5	0,8-1,3 4,5-5,5					
026-4	Lustenau 15.1.75 1728	4,0	2,3	2,3	+4		5,0±1,4	3,5-4,0	2,8±0,8	3,3-3,6					
026-6	Buchs 15.1.75 1111	3,0	3,0	2,8	-3,5	Aufstieg 2,8 Abstieg 2,6	7 ±4	0,4-0,8	1,4-0,8 1,6±0,8	0,8-1,3 2,6-3,0	0,6±0,2	3 -2,2	1 ±0,4	2,2-1,3	
026-7	Chur 16.1.75 1318	4,6	3,3	3,5	-6	Aufstieg 3,3-3,6 km isotherm; 3,6 km Inversion			1,4±0,2	1,8-2,7	1,8±1 1,4±0,8	2,8-2,3 1,4-1,3	4,5±1	4,1-3,2	
026-8	Lustenau 16.1.75 1604	3,6	3,5	1,8	-2,5	Aufstieg 1,7 km Abstieg 1,8 km			1 ±0,3	0,5-1,5			0,8±0,3	3,2-2,0	

Nr.	Startort Datum	Windrichtung		mittl. Windgeschwindigkeit		maximale Windgeschwindigkeit		Aufstieg Verlauf der pot. Temp.		Abstieg Verlauf der pot. Temp.	
		h < 2 km	h > 2 km	h < 2 km	h > 2 km	v (km/h)	h (km)	h < 2 km	h > 2 km	h < 2 km	h > 2 km
026-1	Chur 15.1.75	190°	190°	50 km/h	45 km/h	75	1,0	stabil	stabil	1,3-1,5 km labil sonst stabil	indifferent bis stabil
026-3	Buchs 15.1.75	185°	240°	75 km/h	75 km/h	105	1,2 und 3,8	stabil	über- wiegend stabil		
026-4	Lustenau 15.1.75	180°-190°	170°	50 km/h nach oben abnehmend	35 km/h	75	0,5-1,0	stabil	bis 3,5 km stabil bis 4,0 km labil	stabil	2-3 km indifferent über 3 km stabil
026-6	Buchs 16.1.75	180°	220°-230°	50 km/h	40 km/h	85	1,2	stabil	stabil	bis 1,6 km indifferent, darüber stabil	stabil
026-7	Chur 16.1.75	185°	200°	15-65 km/h kontinuier- lich zu- nehmend	60 km/h	113	2,1	stabil	stabil	stabil	stabil
026-8	Lustenau 16.1.75	185°	230°	65 km/h	45 km/h	90	1,0	stabil	indif- ferent	stabil	stabil

Tab. 8.1 Markante Ergebnisse der aerologischen Aufstiege (alle Höhenangaben über NN).

Die Ergebnisse dieser Ballonaufstiege unterscheiden sich ganz wesentlich von den Aufstiegen bei normalem Wetter im Flachland. Vom Astronomischen Institut in Ravensburg wurden früher sehr zahlreiche Ballonaufstiege mit Wettersonden durchgeführt, wobei ebenfalls auch der Abstieg aufgenommen und ausgewertet wurde. Bei diesen Aufstiegen waren fast ausnahmslos Auf- und Abstieg in guter Uebereinstimmung, ausserdem waren die Aufstiegs- und Abstiegs-geschwindigkeiten ohne Besonderheiten, also ziemlich konstant während der Flüge.

Im deutlichen Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse der aerologischen Aufstiege vom Rheintal aus bei Föhn:

1. Auf- und Abstieg zeigen bemerkenswerte Unterschiede im Temperaturverlauf. Es kommen Temperaturunterschiede in gleichen Höhen bis zu 6°C vor.
2. Fast bei allen Aufstiegen wurden Temperaturinversionen gefunden; sie liegen häufig bei Auf- und Abstieg, d.h. also bei Horizontalentfernungen von einigen Kilometern, in unterschiedlichen Höhen oder erscheinen nur beim Auf- oder Abstieg.
3. Sowohl beim Aufstieg als auch beim Abstieg kommen erhebliche Abweichungen von der mittleren Auf- bzw. Abstiegs-geschwindigkeit vor; dies bedeutet, dass das Ballongespann in ein Aufwind- oder Abwindgebiet gelangt. Bei den 6 Aufstiegen kamen Aufwind- bzw. Abwindgeschwindigkeiten bis zu 7 m/s vor. Dieses Ergebnis passt gut in das Bild einer Leewellenströmung hinter dem Gebirge, ebenso wie auch die unter Punkt 1 und Punkt 2 genannten Ergebnisse.
4. Soweit die Ballongespanne optisch verfolgt werden konnten, waren auch die horizontalen Luftbewegungen nach Richtung und Geschwindigkeit auswertbar. Wie zu erwarten waren die Windrichtungen in den niedrigen Höhen unter 2 km nur wenig von 180° verschieden und die Windgeschwindigkeiten meist 50 bis 75 km/h.

Bemerkenswert ist, dass auch die höchsten Geschwindigkeiten in dieser unteren Schicht auftreten, einmal 105 km/h in 1,2 km Höhe und 113 km/h in 2,1 km Höhe.

In den Höhen über 2 km waren die Windrichtungen zeitweise auch um 180° , häufig aber wichen sie davon ab und hatten Werte bis 240° ; es herrschten also Süd- bis Südwestwinde. Meist waren die Windgeschwindigkeiten in Höhen über 2 km geringer als unter 2 km Höhe.

5. Nicht unerwähnt bleiben darf, dass gelegentlich bei anderen Terminen am Boden böiger Nordwind herrschte, welcher aber nur bis in geringe Höhen von 50 oder 100 m reichte. Darüber wehte dann starker Südwind.
6. Für alle aerologischen Aufstiege wurde auch der Verlauf der potentiellen Temperatur aufgezeichnet und die Temperaturschichtung auf Stabilität untersucht. Es ergab sich, dass in den meisten Fällen die Temperaturschichtung stabil war und nur selten und während kleiner Abschnitte labil oder indifferent. Dieser Befund ist deshalb bemerkenswert, weil die Leewellentheorien von einer Schwingung der Luftmassen bei stabiler Schichtung ausgehen.

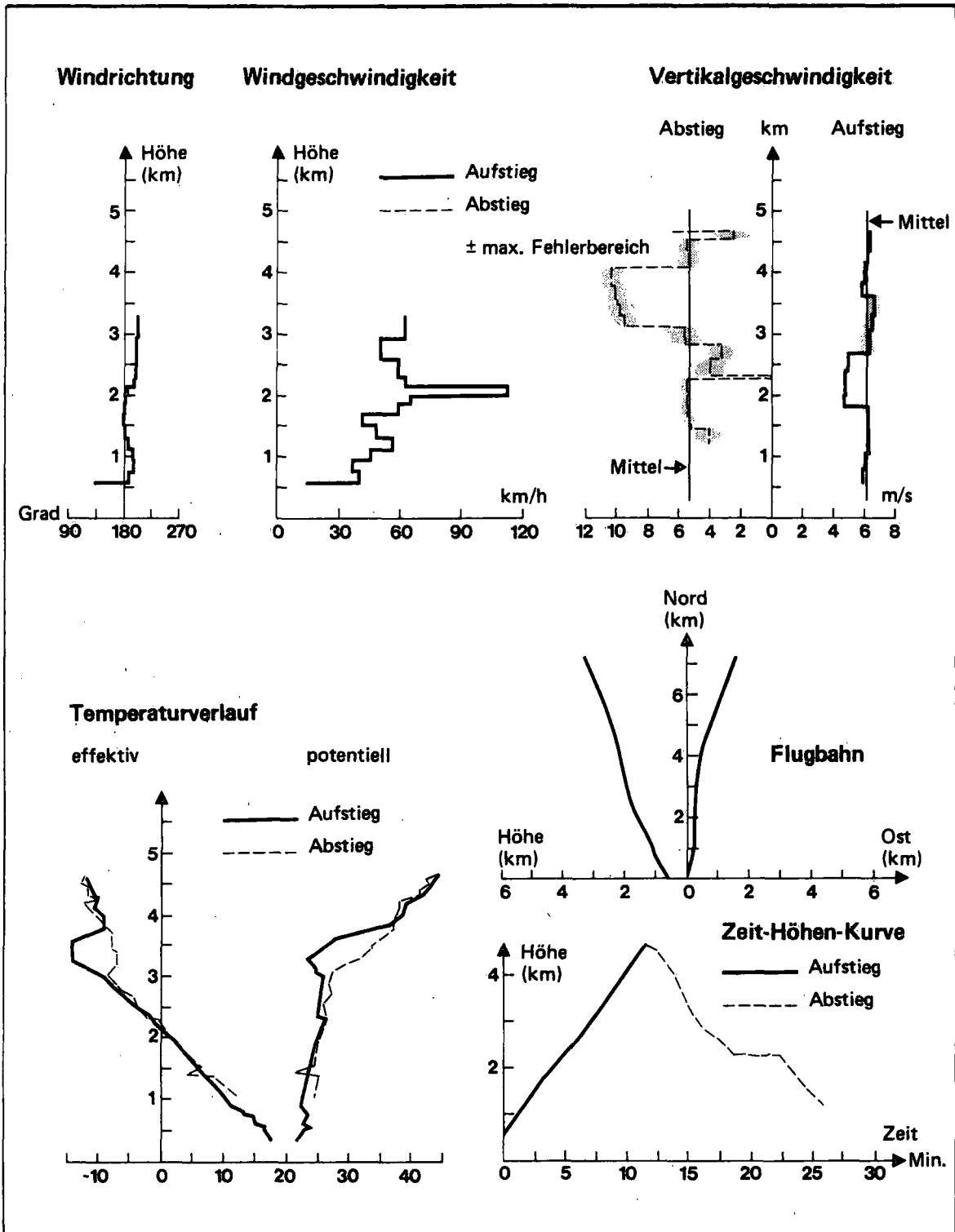


Abb. 8.2 Aerologischer Aufstieg Nr. 026-7 vom 16.1.75, 13.18 Uhr, Startort Chur

Die Ergebnisse der aerologischen Aufstiege im oberen Rheintal sind insgesamt bemerkenswert, weil regelmässig erhebliche Abweichungen vom normalen Verlauf der Grössen Temperatur und Windgeschwindigkeit mit starken vertikalen Komponenten auftraten. Diese Abweichungen, welche erstmalig über dem Rheintal erfasst worden sind, waren aber nach den durch Filmaufnahmen von Schmidt (Lindau) sichtbar gemachten Strömungsverläufen zu erwarten. Diese Zeitrafferfilme veranschaulichen anhand der Wolkenbilder das wellenförmige Strömungsfeld. In ihm erkennt man die Aufwindgebiete an der Bildung stationärer Wolkengebilde (lenticularis) und die Abwindgebiete an der Auflösung dieser Wolken, also an ihrem leeseitigen Ende.

Dieses Strömungsfeld 3-dimensional zu erfassen, war natürlich nicht durch gelegentliche aerologische Einzelaufstiege möglich. Diese können nur als Stichproben aufgefasst werden, welche immerhin interessante Daten aus dem Föhngebiet geliefert haben. Eine Zusammenstellung der markantesten Ergebnisse bietet die vorstehende Tabelle 8.1. Einen Eindruck von den aerologischen Verhältnissen vermittelt Abbildung 8.2 mit dem als Beispiel ausgewählten Aufstieg Nr. 026-7 vom 16.1.75; 13.18 Uhr mit Startort bei Chur.

9. Föhn und Sferics

Für einen 4-monatigen Zeitabschnitt vom November 1974 bis Februar 1975 wurden die in Weissenau/Ravensburg und bei Lindau am Bodensee registrierten Sferics mit den Föhnfällen im schweizerischen und österreichischen Rheintal in Verbindung gebracht. Nur bei Betrachtung mehrerer Föhnfälle können überhaupt Aussagen über Beziehungen zwischen Föhn und Sferics gemacht werden. Es sollte deshalb in einem ersten Versuch durch die Auswertung der Sfericsraten während 4 Monaten die Behauptung anderer Autoren (KOENIG [1975] und RANSCHT / FROEMSDORFF [1972]) erhärtet oder widerlegt werden, dass ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Föhn und Sferics bestehen würde. Wir glauben nicht an einen solchen, sehen jedoch eine indirekte Verbindung zwischen beiden Phänomenen über die grossräumige Wetterlage.

Bei Föhn werden durch die aktive Hebung feuchter Luft südlich der Alpen Niederschläge verursacht. Diese können je nach der Stabilität der Luftmassen mit oder ohne Gewitter auftreten. Wenn unsere Sfericszähler auf die Signale der Entladungen in diesen Gewittern ansprechen, dann werden bei Föhn die Sfericsraten ansteigen. Liegen diese Gewitter jedoch infolge der gerade eingestellten Empfindlichkeit ausserhalb der Reichweite dieser Zähler, dann resultieren geringe Sfericsraten. Dieselben niedrigen Sfericsraten kann es bei Stauniederschlägen ohne Gewitter geben. Es hängt also von der Grosswetterlage und von Standort und Messbereich der Zähler ab, ob sie grössere oder kleinere Sfericsraten bei Föhn registrieren. Es besteht deshalb auf ganz natürliche Weise ein Zusammenhang über die Wetterlage, jedoch nicht ein unmittelbarer Zusammenhang mit dem Föhn. Auch kann dieser Zusammenhang nicht eindeutig sein.

Dieses Verhalten kann aus den Sfericsraten im November 1974 bis Februar 1975 herausgelesen werden (siehe Abb. 9.1). Vor und während des Föhns 024, Mitte November 1974, gehen die Sfericsraten verschiedener Zähler deutlich von höheren auf niedrige Werte zurück. Umgekehrt ist es beim

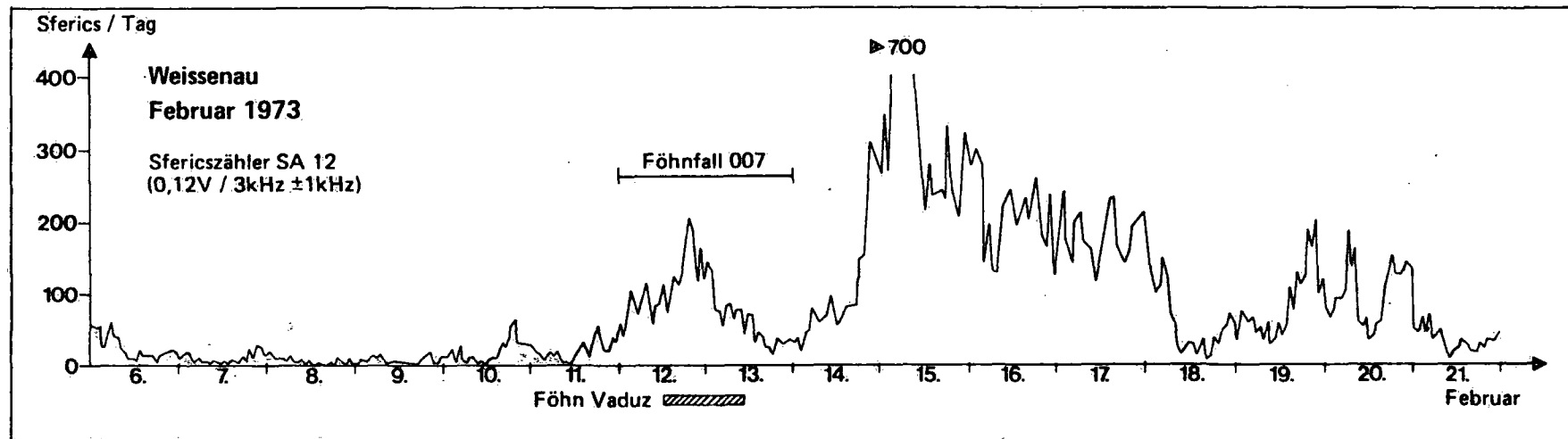
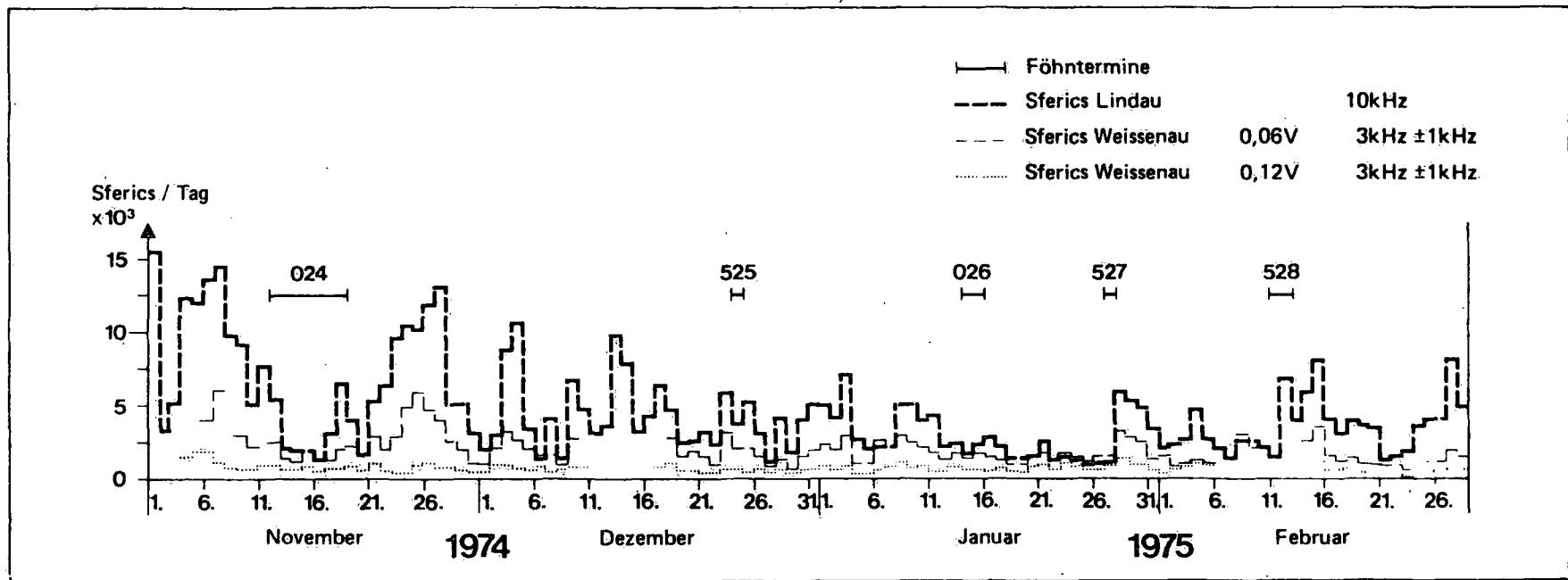


Abb. 9.1 Oben : Zeitlicher Verlauf der in Weissenau/Ravensburg und in Lindau/Hoyerberg im Zeitabschnitt November 1974 bis Februar 1975 registrierten Atmosferics und Föhnfälle im Bodenseeraum.
 Unten : Zeitlicher Verlauf der in Weissenau vom 6.-21. Februar 1973 registrierten Atmosferics und Föhnfall 007.

Föhnfall 525, in dessen Verlauf bei den empfindlichen Zählern höhere Werte vor und nach dem Föhnfall registriert wurden. Beim Föhnfall 026 vom 13.-18. Januar 1975 sind die Sfericsraten 6 bis 3 Tage vorher etwas höher als während des Föhns. Sie gehen anschliessend auf kleinere Werte zurück. Beim Föhnfall 527 steigen die Sfericszahlen während des Föhns kräftig an, was durch Gewitter im Westen im Zusammenhang mit der heranziehenden Zyklone verursacht wird.

Auch die Registrierungen während eines anderen Zeitabschnitts in einem Wintermonat 1973 führten zu demselben unkorrelierten Verhalten der Atmosferics im Bezug zu Föhnterminen. Abb. 9.1 gibt die Sfericsraten vor und nach dem Föhnfall 007 wieder, nämlich vom 6. bis 21. Februar 1973. Das Anwachsen der Sfericsraten am 12.2. geht laut SFLOC-Meldungen des englischen Sfericspeilnetzes eindeutig auf Gewitter zwischen Mallorca im Westen und Malta, Griechenland zurück und das sehr viel stärkere Anwachsen am Abend des 14.2. und am 15.2.73 wird von Gewittern verursacht, welche in Frankreich von der Biskaya bis zum Zentralmassiv und der Camargue, ferner im Mittelmeer um Sardinien stattfanden.

Die mehrtägigen Variationen der Sfericsraten sind also für diese charakteristisch und spiegeln die Gewittertätigkeit in der weiten Umgebung, praktisch in und um Mitteleuropa, wieder. Aus den Sfericsregistrierungen lässt sich aber unschwer herauslesen, dass ähnliches Verhalten beliebig oft während Zeiten mit und ohne Föhn vorkommt. Es besteht daher kein Anlass, einen echten signifikanten Zusammenhang zwischen Föhn und Sfericsraten anzunehmen.

Literatur

- FREY, K. Beiträge zur Entwicklung des Föhns und Untersuchungen über Hochnebel.
Diss., 117 S., Olten 1945
- GUELLER, A. Der aussergewöhnliche Föhnsturm vom 13. Februar 1976 in der Ostschweiz.
Arbeitsbericht Nr. 69 der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, 16 S., Zürich 1977
- GUTERMANN, Th. Vergleichende Untersuchungen zur Föhnhäufigkeit im Rheintal zwischen Chur und Bodensee.
Veröffentlichung der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, Nr. 18, 68 S., Zürich 1970
- KOENIG, H. "Unsichtbare Umwelt",
Moos Verlag, München 1975
- MAYER, I. Leewellen hinter Gebirgen, Modelle und Berechnungen.
Met. Rdsch. 29, S. 97 - 109 und S. 161 - 180, 1976
- MUEHLEISEN, R. Föhn am Bodensee
Aus: KOSMOS 8/76, S. 348 - 352, Stuttgart 1976
- MUEHLEISEN, R. Wenn der Föhn kommt: Klare Sicht und Kopfweh.
Aus: Bild der Wissenschaft 8/1978, S. 36 - 45, Stuttgart 1978
- RANSCHT, R., FROEMSDORFF, W.R.
ZS f. angewandte Bäder- und Klimaheilkunde 19, S. 169 - 176, 1972
- VERGEINER, I. A numerical model of three-dimensional mountain-induced gravity wave flow.
Riv. It. di Geofisica 1, S. 15 - 31, 1975
- WAIBEL, K. Föhnhäufigkeit und Föhnwarnmöglichkeit im Bodenseegebiet.
GUTERMANN, Th. Arbeitsbericht Nr. 68 der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, 34 S., Zürich 1976

Dank

Den Besitzern der beiden privaten Windregistrierstationen Oberriet-Loseren (Nordostschweizerische Kraftwerke) und Widnau (Viscose AG) sei für die Ueberlassung der Messdaten bestens gedankt. Die zahlreichen Abbildungen wurden mehrheitlich von den Herren W. Hättenschwiler und U. Reichmuth ausgeführt, während Frau R. Spaar den Text ins Reine schrieb. Ihnen allen danken die Autoren herzlich für die sorgfältige Arbeit.

Anschriften der Autoren

Dr. Alfred Güller
Schweizerische Meteorologische Anstalt
Krähbühlstrasse 58
CH-8044 Zürich

Dr. Thomas Gutermann
Schweizerische Meteorologische Anstalt
Krähbühlstrasse 58
CH-8044 Zürich

Dipl. Met.
Karl Klar
Wetteramt Stuttgart
Alexanderstrasse 112
D-7000 Stuttgart

Prof. Dr.
Richard Mühleisen
Astronomisches Institut der
Universität Tübingen
Aussenstelle Weissenau
D-7980 Rasthalde/Ravensburg

Dipl. Met.
Wolfgang Pfisterer
Wetteramt Stuttgart
Alexanderstrasse 112
D-7000 Stuttgart

Ing. Walter Schmidt
Hoyerbergweg 40
D-8990 Lindau-Bodolz

Dipl. Met.
Karl Waibel
Mozartstrasse 5
D-7750 Konstanz

