

Statistische Untersuchungen über den Föhn im Reusstal und Versuch einer objektiven Föhnprognose für die Station Altdorf

Von

RICHARD WIDMER

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	332
1. Einleitung	333
1.1. Problemstellung	333
1.2. Bisherige Arbeiten	333
2. Das Untersuchungsgebiet und das verwendete Material	333
3. Statistische Methoden	334
3.1. Allgemeines	334
3.2. Das Prüfen von Durchschnitten	334
3.3. Regression und Korrelation	335
3.4. Das Trennverfahren	335
4. Die Föhnstatistik von Altdorf	337
4.1. Die Föhnkriterien	337
4.2. Die jahreszeitliche und tageszeitliche Häufigkeitsverteilung	337
5. Die Druckdifferenz Locarno-Zürich	340
6. Vergleichende Betrachtung von Südwindlagen mit und ohne Föhnwirkungen in Altdorf	340
7. Die Geschwindigkeit der Föhnströmung in Altdorf	342
8. Die Strömungsverhältnisse im Luv	343
9. Die Klassifikation der Föhnlagen	345
9.1. Begründung der Klassifikation	345
9.2. Die verschiedenen Föhnlagen	345
9.3. Das Untersuchungsschema	346
9.4. Die NW-Lagen	347
9.4.1. Föhnpausen bei NW-Lagen	349
9.5. Die NS-Lagen	350
9.6. Die SW-Lagen	351
9.7. Die SS-Lagen	352
9.8. Die F-Lagen	353
9.9. Zusammenfassung	354
9.9.1. Deutung der formalen Ergebnisse	354

10. Starke Südströmungen im oberen Reusstal mit und ohne Föhnwirkungen in Altdorf . . .	357
11. Beobachtungen im Reusstal	358
12. Die wichtigsten Föhntheorien	358
13. Diskussion der Föhntheorien.	360
14. Die Vorhersage des Beginns einer Föhnlage	361
14.1. Die Eignung der beiden Grössen Δp Locarno-Zürich und ΔH Gütsch-Payerne .	361
14.2. Die Föhnprognose für die nächsten 12—36 Std.	363
15. Die Prognose des Föhnzusammenbruches auf statistischer Basis	371
16. Folgerungen und offene Fragen	373
17. Die verwendeten Abkürzungen	374
18. Literaturverzeichnis	374

Vorwort

Obwohl Föhnerscheinungen seit rund 100 Jahren Objekte intensiver Forschung sind und die ihnen gewidmete Literatur einen bedeutenden Umfang angenommen hat, ist die Unberechenbarkeit des Föhns beinahe sprichwörtlich geworden. Das Aufsuchen objektiver Kriterien, die einen Föhnneinbruch bzw. Föhnzusammenbruch erkennen lassen, ist deshalb eine wissenschaftlich äusserst interessante Aufgabe von grosser praktischer Bedeutung. Die Gelegenheit, diese Untersuchungen durchzuführen, ergab sich, als mich Herr PD. Dr. M. SCHÜEPP mit einem Teil der Aufgaben betraute, die in einem vom Schweizerischen Nationalfonds finanzierten Föhnforschungsprojekt vorgesehen waren. Die statistischen Arbeiten sind zur vorliegenden Publikation verarbeitet worden. Für die mir gebotene Möglichkeit und für die überaus grosse Hilfsbereitschaft bei der Lösung vieler Probleme danke ich Herrn PD. Dr. SCHÜEPP herzlich. Massgebend am Zustandekommen des erwähnten Forschungsprojektes war auch Herr Prof. Dr. H. BOESCH, Direktor des Geographischen Institutes der Universität Zürich, beteiligt. Für seine Bemühungen und sein Interesse an der Arbeit danke ich ihm sehr. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. STEINER vom Geographischen Institut der Universität Zürich für seine Einführung in die Behandlung statistischer Probleme mit Computermethoden und seine grosse Hilfe beim Erstellen der Programme.

Dank schulde ich folgenden Herren an der Meteorologischen Zentralanstalt in Zürich:

Herrn Direktor R. SCHNEIDER für die Erlaubnis, 2 Jahre an der MZA arbeiten und Archive und Bibliothek benützen zu können.

Herrn Dr. GENSLER und Herrn Dr. COURVOISIER für die mir in verschiedenen Diskussionen gewährten wertvollen Hinweise.

Herrn W. KUHN für die Angaben aus der Literatur und das grosse Interesse, mit der er die Arbeit verfolgte.

Auch allen übrigen Personen an der MZA danke ich für ihre Hilfsbereitschaft herzlich.

Besten Dank spreche ich auch der Schulpflege der Stadt Aarau und der Erziehungsdirektion des Kt. Aargau für den mir gewährten zweijährigen Urlaub vom Schuldienst aus.

1. Einleitung

1.1. Problemstellung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den meteorologischen Problemen des Föhns. Die thermodynamische Föhntheorie von J. VON HANN¹ gibt eine befriedigende Erklärung für die Wärme und Trockenheit dieses Fallwindes. Dagegen ist die Frage nach den Ursachen, die das Hinuntersteigen der warmen und leichten Föhnströmung in die oft mit Kaltluft erfüllten Täler ermöglichen, bis jetzt wissenschaftlich nicht einwandfrei beantwortet worden. Dass die theoretischen und statistischen Untersuchungen namhafter Meteorologen zu ganz verschiedenen Theorien führten, zeigt, dass es sich beim Föhn um eine äusserst komplexe Erscheinung handelt. Die Vermutung liegt nahe, dass bei der Föhnentstehung verschiedene Ursachenfaktoren zusammenwirken, die in den Theorien isoliert bewertet worden sind. Die vorliegende Arbeit stellt einen Versuch dar, diese Faktoren und ihr Zusammenwirken zu ergründen. Der Arbeit liegt eine vergleichende Betrachtungsweise zu Grunde, und von statistischen Methoden wird ausgiebig Gebrauch gemacht.

1.2. Bisherige Arbeiten

Die Föhnliteratur hat einen solchen Umfang angenommen, dass sie schon verschiedentlich zu historischen Betrachtungen Anlass bot. Da es nicht sinnvoll ist, bereits geleistete Arbeit zu wiederholen, soll ein Hinweis auf entsprechende Publikationen genügen. Einen Überblick über die Geschichte der Föhntheorie finden wir bei WALTHER (1938), DAMMANN (1952) und FREY (1953). Eine ausführliche Bibliographie enthält die Arbeit von UNDT (1958). Mit dem Föhn im Reusstal befasste sich FREY (1945) in seiner Dissertation. Arbeiten, die im Zusammenhang mit den Föhntheorien von Interesse sind, werden später ausführlich besprochen.

2. Das Untersuchungsgebiet und das verwendete Material

Als Untersuchungsgebiet wurde die Achse Mailand–Gotthard–Reusstal gewählt. Im Lee des Gotthardmassivs, im N-S verlaufenden Reusstal, sind Föhnerscheinungen besonders ausgeprägt, und das Netz der Beobachtungsstationen ist dichter als in andern Föhntälern der Schweiz. Für die Untersuchung wurde folgendes Material verwendet:

- a) Die Originaltabellen der MZA (Daten der Stationen des klimatologischen Netzes).
- b) Die technischen Bulletins der MZA (Daten der Stationen des synoptischen Netzes, Sondenaufstiege von Payerne).

¹ Nach der Föhntheorie von HANN steigt die Luft auf der Alpensüdseite bis zum Kondensationsniveau trockenadiabatisch auf. Das weitere Aufsteigen erfolgt unter Kondensation feuchtadiabatisch, ebenso das Absteigen bis zum Ende der Föhnmauer. Die Luft sinkt weiter trockenadiabatisch bis ins Niveau der Täler auf der Alpennordseite, wobei eine beträchtliche Temperaturzunahme resultiert. Infolge der adiabatischen Erwärmung erreicht die relative Feuchtigkeit einen sehr geringen Wert.

- c) Die Wetterberichte der MZA (Orientierung über Bodendruck und Höhenströmung).
- d) Die täglichen Berichte des Deutschen Wetterdienstes (00 GMT Meldungen weiterer europäischer Sondenstationen, 12 GMT Meldungen von München).
- e) Fernschreibermeldungen im Original (12 GMT Meldungen der Sondenstation Mailand).
- f) Die Registrierungen (Wind, Temperatur, relative Feuchtigkeit) der Stationen Gütsch ob Andermatt, Göschenen, Gurnellen und Altdorf).

3. Statistische Methoden

3.1. Allgemeines

In den bisherigen Arbeiten begnügten sich die Autoren meist mit der Angabe von Mittelwerten und Häufigkeiten. Es ist selbstverständlich, dass bei einer vergleichenden Betrachtungsweise, wie sie in der vorliegenden Untersuchung recht häufig angewendet wird, die statistische Auswertung weiter getrieben werden muss. Es sind vor allem 2 Gründe, die heute eine bedeutend intensivere statistische Bearbeitung der gewonnenen Daten ermöglichen.

- a) Neben den bekannten statistischen Prüfverfahren und der Regressions- und Korrelationsrechnung stehen uns heute weitere interessante Verfahren zur Verfügung. In dieser Arbeit findet die von R. A. FISHER entwickelte «discriminatory analysis» Verwendung.
- b) Dank der elektronischen Datenverarbeitung fällt heute die mühsame und fehleranfällige Arbeit auf gewöhnlichen Rechenmaschinen weg.

Eine Analyse, die früher wochenlange Rechenarbeit erforderte, kann heute auf dem Computer in einigen Minuten oder Stunden ausgerechnet werden. Allerdings kann das Aufstellen und Testen eines grösseren Programms einige Monate in Anspruch nehmen. Der damit verbundene Aufwand lohnt sich aber, wenn ein Programm mehrmals verwendet werden kann.

Alle statistischen Ausrechnungen wurden auf dem IBM 1620 der Universität Zürich durchgeführt. Einfache Programme wurden selber in Fortran erstellt. Das Programm für die «discriminatory analysis» verdanke ich Herrn Prof. Dr. STEINER vom Geographischen Institut, und für die Mehrfachkorrelation verwendete ich das Programm des Rechenzentrums der Universität Zürich.

3.2. Das Prüfen von Durchschnitten²

Zur Beurteilung, ob der Unterschied zweier Durchschnitte wesentlich oder zufällig verschieden ist, verwenden wir, vorausgesetzt, dass die Einzelwerte normal verteilt sind und die Streuung der beiden Stichproben nicht wesentlich verschieden ist, die

² Auf eine Kopierung mathematischer Formeln, die in jedem Lehrbuch der Statistik nachgesehen werden können, wird verzichtet.

t-Verteilung. Als signifikant bezeichnet man den Unterschied zweier Durchschnitte dann, wenn die Wahrscheinlichkeit für eine irrtümliche Annahme einer wesentlichen Differenz unter einer angenommenen Grenze liegt. Ein Stern (*) bedeutet im folgenden, dass diese Wahrscheinlichkeit zwischen 0,05 und 0,01, 2 Sterne (**), dass sie zwischen 0,01 und 0,001 und 3 Sterne (***), dass sie unter 0,001 liegt.

3.3. Regression und Korrelation²

Zur Beurteilung stochastischer Abhängigkeiten verwenden wir die Regressions- und Korrelationsrechnung. Das Bestimmtheitsmass B gibt an, welcher Anteil der Streuung der abhängigen Variablen sich aus der Veränderung einer oder mehrerer unabhängiger Variablen erklären lässt. Die Quadratwurzel aus dem Bestimmtheitsmass ergibt den Korrelationskoeffizienten r, der Werte zwischen -1 und +1 annehmen kann. Der mehrfache Korrelationskoeffizient R ist im Gegensatz zu r immer positiv. Die berechneten einfachen Korrelationskoeffizienten wurden mittels der t-Verteilung auf ihre Verschiedenheit von 0 getestet und entsprechend mit Sternchen gekennzeichnet.

$r=0,65^{***}$ bedeutet zum Beispiel, dass die Wahrscheinlichkeit für eine irrtümliche Annahme einer nicht zufälligen Korrelation kleiner als 0,001 ist. Im Programm der Mehrfachkorrelation werden die Regressionskoeffizienten auf ihre Signifikanz getestet. Falls die abhängige Variable in einer nominalen Skala (0,1) dargestellt ist, muss zur Berechnung des einfachen Korrelationskoeffizienten folgende Formel verwendet werden (siehe z. B. WALKER und LEV (1953)):

$$r = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_0}{s_x} \sqrt{\frac{N_1 N_0}{N(N-1)}}$$

\bar{x}_0 = Mittelwert der x-Werte mit $y=0$,

\bar{x}_1 = Mittelwert der x-Werte mit $y=1$,

N_0 = Zahl der Fälle mit $y=0$,

N_1 = Zahl der Fälle mit $y=1$,

$N = N_0 + N_1$,

s_x = Standardabweichung von x.

3.4. Das Trennverfahren («discriminatory analysis»)³

Beim Vergleich von 2 Gruppen kann oft eine ganze Anzahl messbarer Grössen kennzeichnend sein. Nach einem Verfahren von R. A. FISHER ist es möglich, die verschiedenen Elemente so zu einer Gesamtgrösse zu vereinigen, dass die beiden Gruppen möglichst gut getrennt werden.

Eine lineare Trennformel lautet:

$$X = b_1 x_1 + b_2 x_2 \dots + b_n x_n. \quad (I)$$

Das Trennverfahren besteht nun darin, die Werte b_1 bis b_n so zu bestimmen, dass

³ Eine ausgezeichnete Darstellung des Trennverfahrens finden wir bei LINDER (1960).

die berechneten X-Werte die beiden Gruppen möglichst gut trennen. A und B seien die Indizes der beiden Gruppen. Für die Unterschiede der Durchschnitte erhalten wir:

$$\begin{aligned} d_1 &= \bar{x}_{1A} - \bar{x}_{1B}, \\ d_2 &= \bar{x}_{2A} - \bar{x}_{2B}, \\ &\vdots \\ &\vdots \\ d_n &= \bar{x}_{nA} - \bar{x}_{nB} \end{aligned} \quad (\text{II})$$

und für die Differenz der Mittelwerte der neuen Grösse:

$$d_X = \bar{X}_A - \bar{X}_B = b_1 d_1 + b_2 d_2 \dots + b_n d_n. \quad (\text{III})$$

Die b-Werte sind so zu bestimmen, dass d_X möglichst gross wird, gleichzeitig soll aber die Summe der Quadrate der Abweichungen ein Minimum werden, d. h. der Ausdruck

$$T = \sum (X_A - \bar{X}_A)^2 + \sum (X_B - \bar{X}_B)^2 \quad (\text{IV})$$

soll möglichst klein werden. Zusammengefasst lautet die Forderung:

$$d_X^2/T \text{ soll möglichst gross werden.}$$

Wir setzen die Ableitungen dieses Ausdrucks nach b_1 bis b_n gleich 0 und erhalten nach verschiedenen Umformungen folgendes System von n Gleichungen mit n Unbekannten:

$$\begin{aligned} d_1 &= b_1 S_{11} + b_2 S_{12} \dots + b_n S_{1n}, \\ d_2 &= b_1 S_{21} + b_2 S_{22} \dots + b_n S_{2n}, \\ &\vdots \\ &\vdots \\ d_n &= b_1 S_{n1} + b_2 S_{n2} \dots + b_n S_{nn}. \end{aligned} \quad (\text{V})$$

Es bedeuten:

$$\begin{aligned} S_{11} &= \sum (x_{1A} - \bar{x}_{1A})^2 + \sum (x_{1B} - \bar{x}_{1B})^2, \\ S_{12} &= \sum (x_{1A} - \bar{x}_{1A})(x_{2A} - \bar{x}_{2A}) + \sum (x_{1B} - \bar{x}_{1B})(x_{2B} - \bar{x}_{2B}), \\ &\vdots \\ S_{nn} &= \sum (x_{nA} - \bar{x}_{nA})^2 + \sum (x_{nB} - \bar{x}_{nB})^2. \end{aligned} \quad (\text{VI})$$

Die andern Ausdrücke sind durch Gleichung (I) und (II) bereits definiert worden. In Matrixalgebra schreibt sich obiges Gleichungssystem wie folgt:

$$\underline{D} = \underline{S} \underline{B}. \quad (\text{VII})$$

D ist ein Spaltenvektor mit den d_i -Werten, B ein solcher mit den b_j -Werten und S eine quadratische Matrix mit den S_{ij} -Werten. Die gesuchte B-Matrix erhalten wir durch Multiplikation der D- mit der invertierten S-Matrix:

$$\underline{B} = \underline{S}^{-1} \underline{D}. \quad (\text{VIII})$$

Wir setzen die erhaltenen b-Werte in Gleichung (I) ein, und die berechneten X-Werte ergeben eine optimale Trennung der beiden Gruppen A und B. Mittels der von

LINDER (1960) angegebenen Formeln kann beurteilt werden, ob eine erhaltene Trennung als wesentlich oder zufällig zu betrachten ist. Weiter kann getestet werden, ob das Einbeziehen weiterer Elemente zu einer wesentlichen Verbesserung der Aufteilung führt.

4. Die Föhnstatistik von Altdorf

Seit 1955 wird in der MZA eine Föhnstatistik geführt. Als Grundlage werden die Registrierungen von Altdorf verwendet (Windstreifen, Thermo- und Hygrogramme). Die Auswertung basiert auf der 3-Kriteriencharakteristik: Wind aus südl. Richtung, plötzlicher Temperaturanstieg und entsprechender Abfall der relativen Feuchtigkeit. Föhndurchbruch und Föhnende können in Altdorf recht genau festgelegt werden, da die Änderung der beiden Elemente Temperatur und relative Feuchtigkeit sprunghaft erfolgt. Der Föhnstatistik können folgende Angaben entnommen werden:

- a) Beginn und Ende einer Föhnperiode.
- b) Dauer.
- c) Windweg in Seemeilen (total und getrennt nach verschiedenen Richtungen).
- d) Mittlerer Windweg pro Std. jeder Föhnperiode und im Jahresmittel.
- e) Die Jahressumme von b und c.

Die Angaben unter c, d und e sind erst seit 1958 in der Statistik enthalten. Anstelle des mittleren Windweges pro Std. enthielten die Jahrgänge 1955—1957 eine Angabe über die Intensität (schwach, mittel oder stark). Dank dieser nun über 10 Jahre geführten Zusammenstellung ist es möglich, alle und nicht nur die auf Terminbeobachtungen fallenden Föhnperioden zu erfassen.

4.1. Die Föhnkriterien

Es stellt sich die Frage, ob die in der Föhnstatistik verwendeten Kriterien genügen. Die Beantwortung dieser Frage hängt natürlich wesentlich von der Definition des Föhns ab. Wenn wir unter Föhn einen warmen und trockenen Fallwind verstehen, der vom Kamm der Alpen in die Täler hinabweht, genügen die in der Föhnstatistik berücksichtigten Punkte nicht. Wirbelbildungen bei Nordstau, lokale Gewitterherde usw. können, ohne dass in der Höhe ein Wind mit südlicher Komponente herrscht, auf den Registrierungen einen Föhn vortäuschen. Um solche lokale Winde mit föhnigem Charakter auszuschliessen, muss gefordert werden, dass die Winde im oberen Reusstal in der Höhe aus südlicher Richtung wehen.

Diesem Punkt wurde dadurch Rechnung getragen, dass nur Föhnfälle in vergleichende Untersuchungen miteinbezogen wurden, bei denen auf dem Gütsch ob Andermatt (2284 m ü. M.) der Wind aus dem Sektor 130° — 210° wehte.

4.2. Die jahreszeitliche und tageszeitliche Häufigkeitsverteilung

Die Föhnfälle der Periode 1955—1964 verteilen sich recht regelmässig auf alle 4 Jahreszeiten.

Tabelle 1

Jahreszeit	Zahl der Föhnfälle	Mittlere Dauer	Mittl. Geschw.
	Periode 1955—1964	Periode 1955—1964	in Knoten/Periode 1958—1964
Frühling	143	13 Std. 28 Min.	19,2
Sommer	120	5 Std. 10 Min.	14,4
Herbst	121	10 Std. 48 Min.	21,1
Winter	140	9 Std. 43 Min.	22,0

Diese Zahlen stehen mit den bisherigen Annahmen etwas im Widerspruch. Besonders merkwürdig erscheinen auf den ersten Blick die vielen Föhnfälle im Sommer, galt doch diese Jahreszeit bis jetzt als föhnmarm. Die bisherigen Statistiken wurden auf Grund von Terminbeobachtungen aufgestellt. Die kurzfristigen Föhne, die im Sommer recht häufig auftreten, fallen meistens zwischen die Termine. Sie wurden deshalb zum grossen Teil nicht erfasst.

Der Tagesgang der Föhnhäufigkeit getrennt nach Jahreszeiten für die Periode 1955 bis 1964 (siehe Fig. 1)

Die Termine 00.30, 01.30 usw. bis 23.30 mit Föhn wurden, nach Jahreszeiten getrennt, summiert. Die Kurve wurde durch Mittelbildung über 2 Termine geglättet. Eine Auszählung auf Grund der Terminbeobachtungen (07.30, 13.30 und 21.30) führt zu folgender Reihenfolge mit abnehmender Föhnhäufigkeit: Frühling (225), Winter (166), Herbst (157), Sommer (66). Eine von FREY (1957) durchgeführte Aus-

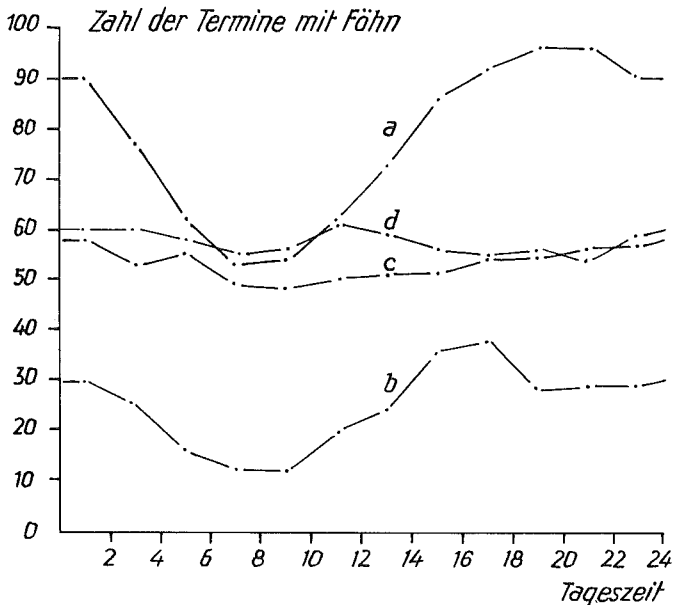


Fig. 1. Die tageszeitliche Häufigkeit getrennt nach Jahreszeiten (Periode 1955—1964).
 a = Frühling, b = Sommer, c = Herbst, d = Winter.

zählung nach den 3 Terminbeobachtungen führte zur gleichen Reihenfolge. Die Darstellung zeigt, dass die Föhnhäufigkeit im Frühling und Sommer einen Tagesgang aufweist, der im Herbst und Winter fehlt. Nach Untersuchungen von BOUËT (1961) ist dieser Tagesgang im Wallis noch viel ausgeprägter.

Der Tagesgang der Föhneinsätze für die Periode 1955—1964 (siehe Fig. 2)

Ein deutlicher Tagesgang ist nur im Frühling und Sommer festzustellen, im Herbst ist er noch etwas angedeutet, im Winter ist er noch etwas angedeutet. Wegen der etwas geringen Zahl der Fälle in der untersuchten Periode wurde der Tagesgang noch anhand einer 30jährigen Periode nachgeprüft. Allerdings standen für diese Untersuchung nur die 3 täglichen Terminbeobachtungen zur Verfügung. Die vielen kurzfristigen Föhne, die zwischen den Terminen lagen, konnten dabei nicht berücksichtigt werden. Als Ergebnis erhalten wir in den beiden untersuchten Jahreszeiten ein deutliches Minimum des Föhnbeginns in der Nacht. Im Frühling liegen nur 17,3%, im Sommer nur 11,4% aller Föhneinsätze zwischen 21.30 und 07.30.

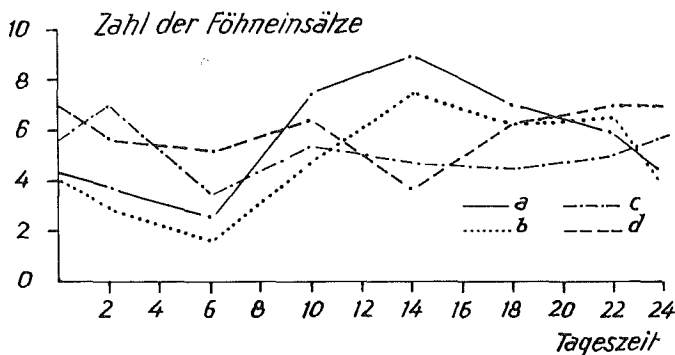


Fig. 2. Die tageszeitliche Abhängigkeit der Föhneinsätze (Periode 1955—1964).
a = Frühling, b = Sommer, c = Herbst, d = Winter.

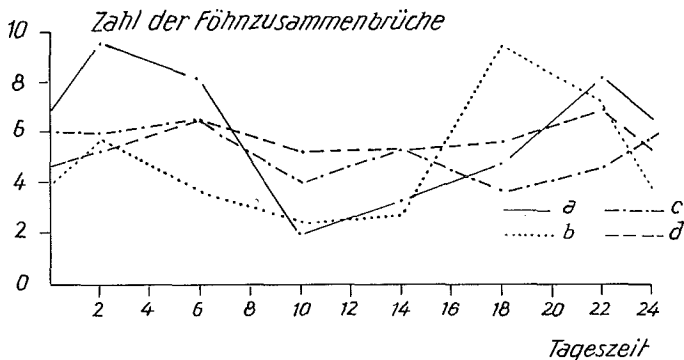


Fig. 3. Die tageszeitliche Abhängigkeit der Föhnzusammenbrüche (Periode 1955—1964).
a = Frühling, b = Sommer, c = Herbst, d = Winter.

Der Tagesgang der Föhnzusammenbrüche für die Periode 1955—1964 (siehe Fig. 3)

Ein ausgeprägter Tagesgang ist wiederum nur im Frühling und Sommer zu erkennen. Im Frühling liegt das Maximum in der Nacht, im Sommer bereits am späten Nachmittag.

5. Die Druckdifferenz Locarno-Zürich

Formal gilt der Druckgradient zwischen Alpen Süd- und Alpennordseite (Südtau) als notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für Föhn. Als Bezugspunkte eignen sich die beiden Stationen Locarno-Magadino und Zürich-Kloten, die in ihren 8 täglichen Terminbeobachtungen auch den Druck, auf Meereshöhe reduziert, angeben. Für alle Föhnfälle der Periode 1955—1964 wurde die Druckdifferenz bei Föhnbeginn, bei Föhnzusammenbruch und der maximale Wert während der Föhnlage bestimmt. Die Mittelwerte sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Die Zahlen geben den Südtau in Zehntelsmillibar an.

Tabelle 2

Jahreszeit	$\Delta \bar{p}$ bei Föhnbeginn	$\Delta \bar{p}$ beim Föhnende	$\Delta \bar{p}$ max. während der Föhnlage
Frühling	52	51	71
Sommer	39	35	48
Herbst	54	56	72
Winter	65	64	81

In allen Jahreszeiten sind die Druckunterschiede bei Föhnbeginn und Föhnzusammenbruch im Mittel nicht wesentlich voneinander verschieden. In 48% aller Fälle ist die Druckdifferenz beim Föhnzusammenbruch gleich oder grösser als bei Föhnbeginn. Diese Zusammenstellung zeigt deutlich, dass für prognostische Betrachtungen ausser dem Druckgradienten noch andere Faktoren berücksichtigt werden müssen.

6. Vergleichende Betrachtung von Südwindlagen mit und ohne Föhnwirkungen in Altdorf

Problemstellung

Lange nicht jeder Südwind auf dem Alpenkamm wirkt im Reusstal als Föhn. Eine Auswertung der Windstreifen für das Jahr 1963 gibt folgendes Bild:

Wenn wir die Zahl der Stunden mit Südwind auf dem Gütsch gleich 100% setzen, steigen 28,5% bis Göschenen und 14,1% bis Altdorf ab. Der Südwind in der Höhe bildet den Normalfall, der Föhn in Altdorf die Ausnahme. Damit sich aus dem Südwind in der Höhe ein Föhn entwickeln kann, müssen bestimmte Bedingungen erfüllt sein, die aufzuspüren Aufgabe der folgenden Untersuchungen ist.

Unterschiede während der Föhnlage

In der folgenden Analyse wurden 80 Südwindlagen bearbeitet. Gruppe A umfasste 40 Fälle mit Föhn, Gruppe B 40 Fälle ohne Föhn in Altdorf. In allen 80 Fällen

wehte der Wind auf dem Gütisch ob Andermatt aus südlicher Richtung (130—210°). Es sollte untersucht werden, welche Elemente sich ausser der Druckdifferenz Locarno-Zürich im Mittel wesentlich zwischen den beiden Gruppen unterscheiden. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 3

Variable	Mittel Gruppe A	Mittel Gruppe B	Signifikanz der Differenz
1 WR in 700 mb über Mailand	185	206	
2 WS in 700 mb über Mailand	25,7	16,3	***
3 WR in 500 mb über Mailand	193	224	*
4 WS in 500 mb über Mailand	38,5	29,7	*
5 VT Stationshöhe —850 mb über Payerne	0,18	0,50	**
6 VT Stationshöhe —850 mb über Mailand	0,54	0,52	
7 VT 850—700 mb über Payerne	0,59	0,56	
8 VT 850—700 mb über Mailand	0,46	0,51	
9 Δ PT Gotthard-Rigi	-30	3	***
10 Δ H Jungfrauoch-Payerne im 700 mb Niveau	13	14	
11 Δ H Gütisch-Payerne im 850 mb Niveau	29	5	***
12 Δ p Altdorf-Hallau ⁴	-5	-2	

Diskussion

Windrichtung und Windstärke im Luv (WR, WS)

Bei Föhn ist die Windgeschwindigkeit über Mailand im Mittel wesentlich grösser als bei nichtabsteigender Südströmung. In der Windrichtung ist im 500 mb Niveau ein knapp gesicherter Unterschied vorhanden.

Die Stabilität (VT)

Über Payerne ist bei Föhn der vertikale Temperaturgradient in der untersten Schicht wesentlich geringer als bei nicht absteigender Südströmung. Die grosse Stabilität ist auf Inversionen an der Grenze zwischen der Bodenkaltluft und der wärmeren Strömung aus südlicher Richtung zurückzuführen. Über Mailand besteht in dieser Beziehung kein Unterschied zwischen den beiden Gruppen.

Die Differenz der potentiellen Temperatur Gotthard-Rigi (Δ PT)

Als sehr wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen den beiden Gruppen erweist sich das isobare Temperaturgefälle Gotthard-Rigi. Bei Föhn macht sich auch in der Höhe ein bedeutendes Absinken bemerkbar. Die Luft, die über den Rigi strömt, hat den Gotthard nicht in Passhöhe, sondern im Mittel einige hundert Meter darüber passiert.

Topographie und Bodendruck im Lee (Δ H, Δ p)

Die Druckverteilung ist am Boden in beiden Gruppen sehr flach. Im Mittel ist der Druck in Altdorf sogar etwas geringer als im nur 1,2 m tiefer gelegenen Hallau.

⁴ Um Druckreduktionen zu vermeiden wurde Hallau (449,5 m ü. M.) als Vergleichsstation zu Altdorf (450,7 m ü. M.) gewählt.

Eine signifikante Differenz finden wir hingegen beim Höhenunterschied ΔH der 850 mb Druckfläche zwischen Gütsch-Payerne. Beim ΔH Jungfrauoch-Payerne im 700 mb Niveau besteht hingegen kein wesentlicher Unterschied mehr zwischen den beiden Gruppen.

Schlussfolgerung

Ausser der Druckdifferenz Locarno-Zürich unterscheiden sich eine ganze Reihe von Faktoren wesentlich zwischen den beiden Gruppen. Eine physikalische Deutung der erhaltenen Ergebnisse wäre aber verfrüht, da die Differenzen sowohl als Ursache wie auch als Wirkung der absteigenden Föhnströmung angesehen werden können. Hingegen stellt sich die Frage, ob bereits vor einem Föhndurchbruch ins Tal wesentliche Änderungen meteorologischer Elemente festzustellen sind. Dieses Problem wird in 9.4. bis 9.8. untersucht.

7. Die Geschwindigkeit der Föhnströmung in Altdorf

Problemstellung

Es soll untersucht werden, von welchen Faktoren die Geschwindigkeit der bis nach Altdorf durchgebrochenen Föhnströmung abhängt.

Analyse Nr. 1

Aus den Windstreifen von Altdorf wurde die mittlere Windstärke zwischen 12.30 und 13.30 Uhr bestimmt und die Abhängigkeit von verschiedenen Variablen untersucht. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 4

Variable	Korrelationskoeffizient r	Signifikanz
1 WS Gütsch	0,12	
2 ΔH Gütsch-Payerne im 850 mb Niveau	0,61	***
3 Δp Locarno-Zürich	0,33	**
4 WS in 850 mb über Mailand	-0,05	
5 WS in 700 mb über Mailand	0,15	
6 WS in 500 mb über Mailand	0,19	

Die Geschwindigkeit der Föhnströmung in Altdorf ist weder mit der Windgeschwindigkeit im Luv noch mit derjenigen auf dem Gütsch korreliert. Die einzige bedeutende Korrelation besteht mit dem ΔH Gütsch-Payerne im 850 mb Niveau.

Analyse Nr. 2

In der vorhergehenden Untersuchung erhielten wir für die Variable Nr. 2 eine Korrelation von 0,61. Dazu gehört ein Bestimmtheitsmass von 0,37, d. h. von der Streuung der Föhngeschwindigkeit in Altdorf werden 37% durch diesen Faktor erklärt. Es soll untersucht werden, ob durch die Verhältnisse im Lee nicht ein grösserer Anteil der Streuung erklärt werden kann, wenn verschiedene Höhen- bzw. Druckstufen berücksichtigt werden. Um dies zu prüfen, berechnen wir die einfachen und

den mehrfachen Korrelationskoeffizienten zwischen der Geschwindigkeit der Föhnströmung in Altdorf und den folgenden Variablen:

- 1 Δ H Gütsch-Payerne im 850 mb Niveau
- 2 Δ p Göschenen-Chaumont
- 3 Δ p Gurtellen-Romont
- 4 Δ p Altdorf-Payerne

Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 5

Nr. der Variablen	r	Signifikanz
1	0,61	***
2	0,62	***
3	0,47	***
4	0,02	

Wir stellen fest, dass die Korrelation mit der Höhe zunimmt. Die Druckverhältnisse in Bodennähe zwischen Reusstal und Mittelland beeinflussen die Geschwindigkeit der Föhnströmung in Altdorf überhaupt nicht. Im Mittel der 74 Fälle besitzt Altdorf bei Reduktion auf gleiche Meereshöhe einen um 1,4 mm Hg niedrigeren Druck als Payerne. Zwischen Gurtellen und Romont besteht hingegen bereits ein ausgeprägtes Druckgefälle gegen das Mittelland zu. Die Berechnung des mehrfachen Korrelationskoeffizienten erwies sich nicht als sinnvoll, R liegt mit 0,65 nur wenig über dem grössten einfachen Korrelationskoeffizienten, und alle Regressionskoeffizienten sind nicht gesichert.

Analyse Nr. 3

Die bisher durchgeführten Analysen ergeben keine besonders engen Abhängigkeiten. Es wurde deshalb nach grösseren Korrelationen gesucht. Eine solche wurde in der Abhängigkeit der Föhnströmungsgeschwindigkeit in Altdorf vom Δ H Gütsch-Chasseron gefunden. Auf Grund von 45 Fällen berechnet sich zwischen der mittleren Geschwindigkeit der Föhnströmung in Altdorf (12.30—13.30 h) und dem Δ H Gütsch-Chasseron um 13.00 h ein Korrelationskoeffizient von 0,78***, was einem Bestimmtheitsmass von 0,61 entspricht⁵.

8. Die Strömungsverhältnisse im Luv

Es ist bekannt, dass die Föhnströmung auf der Alpensüdseite nicht dem Geländeprofil folgt. Bei Föhn in Altdorf wehen im Tessin häufig Winde mit nördlicher Komponente. Theoretisch wäre das Problem so zu lösen, dass in entsprechenden Sondenaufstiegen von Mailand und aus dem Alpengebiet die Isoplethen der pseudo-

⁵ Bei Verwendung verschiedener Termine wird die Korrelation geringer. Der verschiedene Tagesgang der Temperatur auf beiden Stationen wirkt sich auf das Gefälle der Flächen gleichen Druckes aus.

potentiellen Temperatur gezeichnet würden. Eine Konstruktion ist aber nur dann sinnvoll, wenn die beiden Sondenaufstiege zeitlich und in der Strömungsrichtung einander entsprechen. Leider waren bei den mir zur Verfügung stehenden Militäraufstiegen diese beiden Bedingungen nur selten erfüllt. Nur in 2 Fällen konnten die Stromlinien konstruiert werden, was natürlich eine statistische Auswertung ausschliesst. Es wurde deshalb versucht, wenigstens die Stromlinie zwischen der Station Gotthard und der Sonde von Mailand in einer grösseren Zahl von Fällen zu konstruieren. Es wurden Lagen ausgewählt, bei denen angenommen werden konnte, dass die Luft im Gotthardgebiet wirklich aus der Gegend von Mailand stamme. (Mittlere Windrichtung zwischen 850 und 700 mb über Mailand $160^\circ \mp 40^\circ$.) Zur Vereinfachung der Konstruktion wurden nur Fälle betrachtet, bei denen die Luft über Mailand bereits gesättigt war. Wir tragen den Sondenaufstieg von Mailand und die Station Gotthard auf Adiabatenpapier ein und bestimmen durch Konstruktion die Hubhöhe. Im Durchschnitt der 22 Fälle beträgt der Hub 728 m; die Luft, die die Alpen in Gotthardhöhe überquert, liegt über Mailand also bereits ca. 1370 m ü. M.

Die erhaltenen Hubhöhen wurden noch in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und der Stabilität im Luv untersucht.

1. Zwischen dem Hub und der mittleren Windstärke in der Schicht 850—700 mb über Mailand berechnet sich ein Korrelationskoeffizient von 0,62**. Im Mittel vergrössert sich der Hub um 287 m, wenn die Windgeschwindigkeit um 10 Knoten zunimmt.
2. Zwischen dem Hub und dem vertikalen Temperaturgradienten in der Schicht 850—750 mb beträgt der Korrelationskoeffizient 0,64**. Im Mittel vergrössert sich der Hub um 144 m, wenn der vertikale Temperaturgradient um $\frac{1}{10}^\circ$ pro 100 m zunimmt.

Die Frage, in welcher Weise der Hub gleichzeitig von der mittleren Windstärke und der Stabilität abhängt, kann mittels einer Mehrfachkorrelationsrechnung gelöst werden. Es ergibt sich folgende Regressionsgleichung:

$$x_1 = -211,4 + 21,5 x_2 + 11,1 x_3.$$

x_1 = Hub in geopotentiellen Metern.

x_2 = Mittlere Windstärke in der Schicht 850—700 mb in Knoten.

x_3 = Vertikaler Temperaturgradient in der Schicht 850—750 mb über Mailand in Hundertstelgraden pro 100 m.

Alle Regressionskoeffizienten erwiesen sich als signifikant. Der mehrfache Korrelationskoeffizient R beträgt 0,775 und die mehrfache Bestimmtheit (= R im Quadrat) 0,601. Es lassen sich also rund 60% der Varianz der Hubhöhen aus den Unterschieden in der Windstärke und der Stabilität erklären.

Die unter 1. gefundene Korrelation zwischen Hubhöhe und Windgeschwindigkeit sollte sich in der Niederschlagsverteilung im Luv bemerkbar machen. Bei grosser Windgeschwindigkeit verlaufen die Stromlinien steil, das Kondensationsniveau wird bald erreicht, die Niederschläge fallen schon weit südlich der Alpen. Bei schwachen Winden sollten die Niederschläge hauptsächlich in der Nähe oder erst über den Alpen fallen. Um diese Hypothese zu prüfen, ist das Verhältnis der Niederschläge in Lugano

zu den Niederschlägen auf dem Gotthard in Abhängigkeit von der Windstärke (mittlere Windstärke in der Schicht 850—700 mb über Mailand) zu untersuchen. Dieses Verhältnis sollte mit zunehmender Windstärke grösser werden. Auf Grund von 32 Fällen berechnete sich der Korrelationskoeffizient zu 0,471**. Die Korrelation ist gesichert, aber nicht besonders eng. Das bedeutet, dass ausser der Windstärke noch andere Faktoren das Kondensationsniveau bestimmen; es sind dies besonders die Stabilitäts- und Feuchtigkeitsverhältnisse.

9. Die Klassifikation der Föhnlagen

9.1. Begründung der Klassifikation

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, ob bereits vor einem Föhndurchbruch ins Tal wesentliche Änderungen meteorologischer Elemente festzustellen sind. Eine Reihe von Analysen, die hier nicht detailliert aufgeführt werden, zeigten, dass noch weitere Variable zu berücksichtigen sind. Weiter stellte sich heraus, dass bei der einen Stichprobe der Unterschied einer bestimmten Variablen im Durchschnitt zwischen einer Gruppe a (führte in Altdorf innert einer bestimmten Frist zu Föhn) und einer Gruppe b (ohne Föhnwirkungen in Altdorf), sich als signifikant erwies, bei der andern aber nicht mehr. Das bedeutet, dass die beiden Stichproben nicht der gleichen Population entstammen. Es lag deshalb auf der Hand, die Föhnlagen nach synoptischen Gesichtspunkten zu klassifizieren. Eine Aufteilung nur nach den Boden-druckverhältnissen zeigte in den anschliessend durchgeführten Analysen keine befriedigenden Resultate. Unter Berücksichtigung der Höhenströmung (500 mb) ergab sich folgendes Klassifikationsschema:

9.2. Die verschiedenen Föhnklassen

Voraussetzung: Südwind auf dem Gütisch ob Andermatt (WR 130°—210°).

- N Tief im Norden bis Westen der Alpenkette (nördlich der Linie Pyrenäen, Südostrand Zentralmassiv, 45° n. Br., Westalpen, Alpenhauptkamm).
- NW Höhenwinde aus dem Sektor West (Windrichtung im 500 mb Niveau über den Alpen > 240°⁶).
- NWa Föhn in Altdorf innert einer bestimmten Frist.
- NWb Kein Föhn in Altdorf innert 24 Std.
- NS Höhenwinde aus dem Sektor Süd (Windrichtung in 500 mb über den Alpen ≤ 240°).
- NSa Föhn in Altdorf innert einer bestimmten Frist.
- NSb Kein Föhn in Altdorf innert 24 Std.
- S Tief auf der Bodenwetterkarte im westlichen Mittelmeer (T zwischen der spanischen Atlantikküste und Italien, südlich der unter N angegebenen Grenze).

⁶ Zur Bestimmung der Windrichtung über den Alpen im 500 mb Niveau wurden die Windrichtungen der Sondenstationen Payerne und Mailand gemittelt.

- SW Höhenwinde aus dem Sektor West.
 SWa Föhn in Altdorf innert einer bestimmten Frist.
 SWb Kein Föhn in Altdorf innert 24 Std.
 SS Höhenwinde aus dem Sektor Süd.
 SSa Föhn in Altdorf innert einer bestimmten Frist.
 SSb Kein Föhn in Altdorf innert 24 Std.
- F Flache Druckverteilung am Boden. Die Verbindungsstrecke Zürich–Brest und Zürich–Strasse von Dover schneidet höchstens je eine Isobare auf der Bodenwetterkarte⁷. und im westlichen Mittelmeer befindet sich kein Tiefdruckgebiet.
- FS Höhenströmung aus dem Sektor Süd (z. B. durch ein Höhentief verursacht). Die Windgeschwindigkeit im 700 mb Niveau über Mailand ist grösser als 15 Knoten.
- FSa Föhn in Altdorf innert einer bestimmten Frist.
 FSb Kein Föhn in Altdorf innert 24 Std.
- FL Flache Druckverteilung am Boden und in der Höhe. Thermisch labile Schichtung über dem Mittelland (es muss mit thermischen oder Frontgewittern gerechnet werden).
- FLa Föhn in Altdorf innert einer bestimmten Frist.
 FLb Kein Föhn in Altdorf am gleichen Tag.

Es ist selbstverständlich, dass eine Föhnlage verschiedene Föhnklassen durchlaufen kann. In ganz seltenen Fällen kann eine auf die Alpensüdseite beschränkte Gewittertätigkeit im Reusstal einen Föhn auslösen. In der Periode 1955–1964 wurden nur 3 solche Fälle festgestellt, was eine statistische Auswertung ausschliesst. Für diese Einzelfälle wurde auch keine spezielle Föhnklasse geschaffen. Alle übrigen Föhnlagen liessen sich in das dargelegte Schema einordnen.

9.3. Das Untersuchungsschema

Im Laufe der Untersuchungen zeigte es sich, dass die FS- und SS-Lagen sich nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Es blieben die Föhnlagen der Klassen NW, NS, SW, SS und FL, die nach dem folgenden Schema untersucht wurden. Je eine Gruppe a (führte in Altdorf innert einer bestimmten Frist zu Föhn) wurde mit einer Gruppe b (führte innert wenigstens 24 Std. zu keinem Föhn in Altdorf) verglichen. In jeder Föhnklasse wurden die folgenden Variablen in die Untersuchung miteinbezogen:

- 1 Δ PT Gotthard-Rigi
- 2 WR in 700 mb über Mailand
- 3 WS in 700 mb über Mailand
- 4 WR in 500 mb über Mailand
- 5 WS in 500 mb über Mailand
- 6 Δ T Altdorf-Gütsch

⁷ Zur Beurteilung wurde die Bodenwetterkarte (Isobarenabstand 5 mb) der Wetterberichte der MZA konsultiert.

- 7 ΔT Gütsch-Jungfraujoch
- 8 WR auf dem Gütsch
- 9 WS auf dem Gütsch
- 10 Δp Locarno-Zürich
- 11 ΔT in 850 mb zwischen Mailand und München
- 12 ΔT in 700 mb zwischen Mailand und München
- 13 ΔH Gütsch-Payerne in 850 mb⁸
- 14 ΔH Gütsch-Chasseron in 850 mb⁸

Analyse Nr. 1

Innerhalb beider Gruppen wurden für jede Variable die Mittelwerte und der entsprechende t- und F-Wert berechnet. Als Ergebnis sind bei gewissen Variablen gesicherte Differenzen der Mittelwerte zu erwarten.

Analyse Nr. 2

Auf Grund der Ergebnisse von Analyse Nr. 1 wurden die beiden Gruppen mittels des Trennverfahrens optimal getrennt. Dabei wurden nicht unbedingt alle n-Variablen mit signifikanten Differenzen in die Analyse miteinbezogen. Ihre Zahl wurde soweit verringert, als die Güte der Trennung keine Einbusse erlitt. Als Ergebnis erhielten wir eine Trennformel und eine Angabe der Erfolgsrate, also eine Antwort auf die Frage, ob, aber nicht, warum die Südströmung ins Tal absteigt.

Analyse Nr. 3

Unter Berücksichtigung von je 5 Fällen jeder Föhnklasse wurden aus den Meldungen der Sondenstationen rund um den Alpenkamm Mittelwerte für das 850, 700 und 500 mb Niveau berechnet. Es wurden folgende Elemente berücksichtigt:

1. Temperatur.
2. Taupunkt.
3. Absolute Topographie, d. h. Höhenlage der Flächen gleichen Druckes.
4. Wind.

Die Ergebnisse wurden in Karten dargestellt. Sie geben einen Anhaltspunkt über die Höhenerstreckung der Lee- und Luveffekte. Zur Abklärung bestimmter Punkte wurden bei einzelnen Föhnklassen noch weitere Analysen durchgeführt.

9.4. Die NW-Lagen

Nach Definition besitzen die NW-Lagen eine Höhenströmung (500 mb) ohne alpenüberquerende Komponente. Warmluftadvektion und Reibung können in den

⁸ Nr. 13 und 14 sagen etwa dasselbe aus. Für den praktischen Gebrauch ist Nr. 14, das täglich mehrmals bestimmt werden kann, besser geeignet. Um 00 GMT (= 01 h MEZ) steht aber nur Nr. 13 zur Verfügung. Die Station Gütsch weist einen bedeutenden Tagesgang der Temperatur auf, der in der freien Atmosphäre fehlt. Beim Vergleich mit der Höhenlage der 850 mb Fläche, der sogenannten absoluten Topographie über Payerne, wurden die 12 GMT-Werte auf Grund der beiden benachbarten 00 GMT-Temperaturen reduziert, beim Vergleich mit dem Chasseron dagegen nicht.

tiefer gelegenen Schichten eine bedeutende Südkomponente erzeugen, was auf der Alpennordseite zu Föhn führen kann.

Analyse Nr. 1

12 NWA-Lagen (Föhn innert 0—6 Std.) wurden mit 21 NWB-Lagen verglichen. Bei den folgenden Variablen ergaben sich signifikante Unterschiede der Mittelwerte:

Tabelle 6

Variable	Mittel NWA	Mittel NWB	Signifikanz
1 Δ PT Gotthard-Rigi	-21	25	***
7 Δ T Gütsch-Jungfrauoch	49	82	***
9 WS auf dem Gütsch	17	10	*
10 Δ p Locarno-Zürich	53	19	***
13 Δ H Gütsch-Payerne im 850 mb Niveau	22	5	***
14 Δ H Gütsch-Chasseron im 850 mb Niveau	26	12	***

Analyse Nr. 2

Die beiden Gruppen wurden auf Grund der 4 Variablen, die sich zwischen den beiden Gruppen als signifikant (***) erwiesen haben, getrennt. Die Analyse führte zu folgender Trennformel:

$$Y = -0,212 x_1 - 0,125 x_7 + 0,342 x_{10} - 0,005 x_{14}.$$

Da nur wenige 00-GMT-Fälle in den beiden Gruppen enthalten waren, wurde anstelle von Nr. 13 Nr. 14 in der Analyse berücksichtigt.

$$Y > 3,58 \quad \text{Föhn in Altdorf innert 0—6 Std.}$$

$$Y < 3,58 \quad \text{Kein Föhn in Altdorf innert 24 Std.}$$

Erfolgsrate (Prozentsatz der richtigen Zuordnung): 91 %.

Auf Grund der Variablen, die dem synoptischen Netz entnommen werden können, erhalten wir folgende Trennformel:

$$Y = -0,188 x_7 - 0,522 x_9 + 0,500 x_{10} + 0,180 x_{14}.$$

Anstelle von x_1 , das aus Meldungen des klimatologischen Netzes berechnet werden muss, wurde Nr. 9 in die Analyse miteinbezogen.

$$Y > 1,90: \quad \text{Föhn innert 0—6 Std.}$$

$$Y < 1,90: \quad \text{Kein Föhn innert 24 Std.}$$

Die Erfolgsrate wird bei dieser Trennung kleiner, 6 von 33 Fällen wurden falsch klassifiziert, die Erfolgsrate beträgt also nur noch 82 %.

Analyse Nr. 3

Die durch die erzwungene Hebung im Luv verursachte Abkühlung ist im 850 mb Niveau deutlich ausgeprägt, in 700 mb noch leicht angedeutet und im 500 mb Niveau ganz verschwunden. Auch in der absoluten Topographie verschwindet der orographische Einfluss bereits im 700 mb Niveau.

Analyse Nr. 4: Die Bewölkungsverteilung im Profil Lugano-Zürich

Den NWa-Lagen fehlt im Mittel ein deutlich ausgebildetes Föhnfenster im unteren Reusstal. Die mittlere Bewölkung (in Zehnteln aus 20 Fällen) beträgt in Lugano 9,5, auf dem Gotthard 9,8, in Altdorf 7,8 und in Zürich 8,4.

Analyse Nr. 5: Temperaturänderungen der Station Gütsch und Jungfrauoch vor dem Föhndurchbruch

Im Mittel von 8 Fällen ist der geringe Temperaturgradient zwischen den beiden Bergstationen auf die Erwärmung der Station Jungfrauoch zurückzuführen. Es gibt aber auch vereinzelt Fälle, bei denen die geringe Temperaturdifferenz durch eine starke Abkühlung der Station Gütsch verursacht wird.

9.4.1. Föhnpausen bei NW-Lagen

Problemstellung

Bei NW-Lagen treten recht häufig Föhnpausen auf (Föhnpause = Föhnunterbruch von weniger als 24 Std.). Es soll untersucht werden, welche Elemente sich in der Föhnpause wesentlich verändert haben.

Vorgehen

Es wurden folgende 2 Gruppen miteinander verglichen:

Gruppe a: 15 NW-Fälle bei Föhn in Altdorf.

Gruppe b: 15 NW-Fälle bei Föhnpause in Altdorf.

Folgende Variablen wurden miteinander verglichen:

- 1 Δ PT Gotthard-Rigi.
- 2 Das Druckgefälle Gotthard-Rigi (der Druck der Station Rigi-Kulm wurde unter Berücksichtigung der wahren Mitteltemperatur auf die Höhe des Gotthards reduziert).
- 3 Δ T Gütsch-Jungfrauoch.
- 4 WS auf dem Gütsch.
- 5 Δ p Locarno-Zürich.
- 6 Δ H Gütsch-Chasseron im 850 mb Niveau.
- 7 Die Windgeschwindigkeit in Gurtellen (in der halben Beaufortskala).

Ergebnis

Tabelle 7

Nr. der Variablen	Mittel Gruppe a	Mittel Gruppe b	Signifikanz
1	-36	-36	
2	32	21	*
3	44	58	
4	28	17	***
5	96	57	***
6	48	24	***
7	2,2	1,5	

Während der Föhnpause bleibt das Temperaturgefälle zwischen Rigi und Gottard unverändert, und die Abnahme des lokalen Druckgefälles ist nur knapp gesichert. Mit den 3 Variablen (4, 5 und 6), die sich zwischen den beiden Gruppen als sehr signifikant erwiesen, wurde noch eine diskriminante Analyse durchgeführt. 27 von 30 Fällen wurden richtig klassifiziert. In der untersuchten Stichprobe ist die Entstehung von Föhnpausen zu 90% auf die Veränderung dieser 3 Variablen zurückzuführen.

9.5. Die NS-Lagen

Die NS-Lagen weisen eine alpenüberquerende Strömung grösserer Mächtigkeit auf, muss doch nach Definition im 500 mb Niveau noch wenigstens eine alpen-tangente Strömungsrichtung vorhanden sein.

Analyse Nr. 1

Verglichen wurden 12 NSa-Lagen (Föhn in Altdorf innert 0—10 Std.) mit 11 NSb-Lagen. Folgende Variablen ergaben signifikante Unterschiede der Mittelwerte:

Tabelle 8

Variable	Mittel NSa	Mittel NSb	Signifikanz
1 Δ PT Gotthard-Rigi	-22	-1	**
4 WR in 500 mb über Mailand	218	236	*
9 WS auf dem Gütsch	23	12	***
10 Δ p Locarno-Zürich	45	12	***
11 Δ T Mailand-München im 850 mb Niveau	-40	10	***
12 Δ T Mailand-München im 700 mb Niveau	-15	12	**
13 Δ H Gütsch-Payerne im 850 mb Niveau	24	4	***

Analyse Nr. 2

Auf Grund der Variablen Nr. 1, 9, 10, 11, 12 und 13 erhalten wir folgende Trennformel:

$$Y = 0,265 x_1 + 1,19 x_9 + 0,467 x_{10} - 0,074 x_{11} - 0,190 x_{12} + 0,524 x_{13}.$$

$Y > 39,9$: Föhn in Altdorf innert 0—10 Std.

$Y < 39,9$: Kein Föhn in Altdorf innert 24 Std.

Alle 23 Fälle wurden richtig klassifiziert; die Erfolgsrate beträgt also 100%. Wenn die Trennung nur auf Grund der Variablen mit sehr signifikanten (***) Unterschieden der Mittelwerte vorgenommen wird, wird die Trennung schlechter.

Analyse Nr. 3

Die orographisch bedingten Auswirkungen auf Temperatur und absolute Topographie sind im 700 mb Niveau noch deutlich sichtbar; sie verschwinden erst im 500 mb Niveau; die Föhnströmung ist also bedeutend mächtiger als bei den NW-Lagen.

Analyse Nr. 4: Die Bewölkungsverteilung im Profil Lugano-Zürich

Im unteren Reusstal ist das Föhnfenster deutlich ausgeprägt. Die Bewölkung wird durch die absinkende Föhnströmung z. T. aufgelöst. Im Mittel von 20 Fällen beträgt die Bewölkung in Lugano 9,6, auf dem Gotthard 10,0, in Altdorf 5,2 und in Zürich 7,4.

Analyse Nr. 5: Unterschiede zwischen NW- und SS-Lagen

Um abzuklären, ob es zwischen den NWA- und den NSa-Lagen ausser in der Richtung der Höhenströmung noch weitere Unterschiede gibt, wurden die je 12 Fälle beider Klassen miteinander verglichen. Signifikante Unterschiede ergaben sich beim Temperaturgefälle zwischen München und Mailand im 850 und 700 mb Niveau; bei den NSa-Lagen ist dieses Gefälle bedeutend grösser. Lokal (zwischen Rigi und Gotthard) ist das isobare Temperaturgefälle zwischen beiden Gruppen nicht wesentlich verschieden.

9.6. Die SW-Lagen

Föhnlagen mit dem Tief auf der Bodenkarte im westlichen Mittelmeer und einer westlichen Höhenströmung sind nicht häufig.

Analyse Nr. 1

Verglichen wurden 11 SWa-Lagen (Föhn in Altdorf innert 0—10 Std.) mit 12 SWb-Lagen.

Signifikante Unterschiede der Mittelwerte ergaben sich bei den folgenden Variablen:

Tabelle 9

Variable	Mittel SWa	Mittel SWb	Signifikanz
1 Δ PT Gotthard-Rigi	-14	31	**
2 WR in 700 mb über Mailand	222	242	*
10 Δ p Locarno-Zürich	30	2	**
11 Δ T Mailand-München im 850 mb Niveau	-10	25	**
12 Δ T Mailand-München im 700 mb Niveau	-2	25	*
13 Δ H Gütsch-Payerne im 850 mb Niveau	14	5	*

Analyse Nr. 2

Die Trennformel wurde mit allen Variablen, die signifikante Unterschiede der Mittelwerte ergaben, berechnet. Wir erhalten folgende Formel:

$$Y = -0,368 x_1 - 6,28 x_2 - 0,036 x_{10} - 0,136 x_{11} + 0,084 x_{12} + 0,329 x_{13}.$$

$$Y > -146: \text{ Föhn in Altdorf innert 0—10 Std.}$$

$$Y < -146: \text{ Kein Föhn in Altdorf innert 24 Std.}$$

Von 23 Fällen wurden 22 richtig klassifiziert. Die Erfolgsrate beträgt also 96%. Bei Berücksichtigung von weniger Variablen wird die Trennung schlechter.

Analyse Nr. 3

In der absoluten Topographie ist ein Stauereffekt nur im 850 mb Niveau deutlich erkennbar. In der Temperaturverteilung ist noch im 700 mb Niveau über der Poebene eine deutliche Kälteinsel festzustellen. Die Isothermenkarte für das 500 mb Niveau zeigt eine bedeutende Warmluftadvektion von Westen her an. Das grossräumig ausgebildete Temperaturgefälle zwischen Alpennord- und Alpensüdseite ist advektiv und nicht orographisch bedingt.

9.7. SS-Föhnlagen

Bei den SS-Lagen wehen die Höhenwinde aus dem Sektor Süd, und das Bodentieft liegt im westlichen Mittelmeer.

Analyse Nr. 1

Verglichen wurden 12 SSa-Lagen (Föhn innert 0—10 Std.) mit 19 SSb-Lagen. Bei den folgenden Variablen ergaben sich signifikante Differenzen der Mittelwerte:

Tabelle 10

Variable	Mittel SSa	Mittel SSb	Signifikanz
1 Δ PT Gotthard-Rigi	-17	8	*
2 WR in 700 mb über Mailand	190	140	***
4 WR in 500 mb über Mailand	219	166	***
6 Δ T Altdorf-Gütsch	109	63	***
9 WS auf dem Gütsch	23	14	**
10 Δ p Locarno-Zürich	50	-1	***
13 Δ H Gütsch-Payerne im 850 mb Niveau	19	9	**

Analyse Nr. 2

Ohne die Erfolgsrate des Trennverfahrens zu verringern, konnte die Zahl der Variablen bis auf 2 reduziert werden. Wir erhalten dann folgende Trennformel:

$$Y = 1,94 x_4 + 0,406 x_{10}.$$

$Y > 47,2$: Föhn in Altdorf innert 0—10 Std.

$Y < 47,2$: Kein Föhn in Altdorf innert 24 Std.

30 von 31 Fällen wurden richtig klassifiziert, was einer Erfolgsrate von 97% entspricht.

Analyse Nr. 3

Die Verhältnisse entsprechen den NS-Lagen. Die Wirkung der Orographie auf Temperatur und absolute Topographie ist im 700 mb Niveau noch deutlich nachweisbar, tritt aber im 500 mb Niveau im weitmaschigen Sondennetz nicht mehr in Erscheinung.

Analyse Nr. 4

Zwischen der Windrichtung im 500 mb Niveau über Mailand und der Temperaturdifferenz Altdorf-Gütsch besteht eine enge Korrelation ($r = 0,765^{***}$). Einer starken

Ostkomponente in der Windrichtung über Mailand entspricht eine bedeutende Bisenströmung über dem Mittelland. Diese kalte Luftschicht führt zu einer geringen Temperaturdifferenz Altdorf-Gütsch. Zwischen dieser Temperaturdifferenz und dem Druckunterschied Locarno-Zürich besteht ebenfalls eine gesicherte Korrelation ($r=0,620^{***}$). Trotz Südströmung in der Höhe verursacht diese Kaltluftschicht oft noch leichten Nordstau zwischen Locarno und Zürich.

9.8. F-Lagen

In Abschnitt 9.7. wurde gezeigt, dass bei den SS-Lagen die Strömungs- und thermischen Verhältnisse als wesentlich zu betrachten sind; das Vorhandensein oder Fehlen eines Bodentiefs im westlichen Mittelmeer ist irrelevant. Aus diesem Grunde dürfen die FS-Lagen nicht als selbständige Klasse betrachtet werden, sondern sie sind den SS-Lagen zuzuordnen.

Die FL-Lagen

Die FLa-Lagen sind meist nur wenige Stunden dauernde sommerliche Labilitätsföhne. Besonders häufig treten sie vor einem Kaltfrontdurchgang auf.

Analyse Nr. 1

Verglichen wurden 11 FLa-Lagen (Föhn zwischen 13.30 und 18.00) und 13 FLb-Lagen (kein Föhn am gleichen Tag). In allen 24 Fällen wurden die 13.00 h und 13.30 h Terminbeobachtungen verwendet. Bei den folgenden Variablen ergaben sich signifikante Unterschiede der Mittelwerte:

Tabelle 11

Variable	Mittel FLa	Mittel FLb	Signifikanz
1 Δ PT Gotthard-Rigi	-22	23	***
6 Δ T Altdorf-Gütsch	147	102	***
9 WS auf dem Gütsch	17	9	***
10 Δ p Locarno-Zürich	42	10	***
13 Δ H Gütsch-Payerne im 850 mb Niveau	7	-1	*

Analyse Nr. 2

Bei Berücksichtigung aller 5 Variablen mit signifikanten Unterschieden der Mittelwerte erhalten wir die folgende Trennformel:

$$Y = -0,356 x_1 + 0,419 x_6 + 0,872 x_9 + 0,398 x_{10} + 1,540 x_{13} .$$

$Y > 77,8$: Föhn in Altdorf am gleichen Nachmittag.

$Y < 77,8$: Kein Föhn in Altdorf bis 24 h des betreffenden Tages.

Erfolgsrate 96%.

Eine nur wenig geringere Erfolgsrate (92%) erhalten wir bei Verwendung der beiden Variablen Nr. 9 und Nr. 10.

$$Y = 1,36 x_9 + 0,516 x_{10}.$$

$Y > 30,7$: Föhn in Altdorf am gleichen Nachmittag.

$Y < 30,7$: Kein Föhn in Altdorf bis 24 h des betreffenden Tages.

Analyse Nr. 3

Wie bei den geringen Windgeschwindigkeiten im Luv zu erwarten war, ist in der absoluten Topographie nicht einmal im 850 mb Niveau ein orographischer Effekt feststellbar. Das isobare Temperaturgefälle Voralpen-Alpen ist nicht auf Hebung-abkühlung, sondern auf das Überfließen einer a priori kälteren Luftmasse aus der Poebene zu erklären.

9.9. Zusammenfassung

Tabelle 12

Variable	Signifikanz der Unterschiede der Mittelwerte zwischen Gruppe a (führte zu Föhn) und Gruppe b (führte nicht zu Föhn)				
	NW	NS	SW	SS	FL
1 Δ PT Gotthard-Rigi	***	**	**	*	***
2 WR in 700 mb über Mailand			*	***	
3 WS in 700 mb über Mailand					
4 WR in 500 mb über Mailand		*		***	
5 WS in 500 mb über Mailand					
6 Δ T Altdorf-Gütsch				***	***
7 Δ T Gütsch-Jungfrauoch	***				
8 WR auf dem Gütsch					
9 WS auf dem Gütsch	*	***		**	***
10 Δ p Locarno-Zürich	***	***	**	***	***
11 Δ T im 850 mb Niveau zwischen München und Mailand		***	**	(1)	
12 Δ T im 700 mb Niveau zwischen München und Mailand		**	*	(1)	
13 Δ H Gütsch-Payerne im 850 mb Niveau	***	***	*	**	*

Ausser der Druckdifferenz Locarno-Zürich (Nr. 10) ergeben noch die Variablen Nr. 1 und Nr. 13 in allen Föhnklassen signifikante Unterschiede. Diese Variablen hätten sich auch ohne eine Aufteilung in verschiedene Föhnklassen herauskristallisiert. Daneben gibt es aber eine Reihe von Faktoren, die spezifisch für bestimmte Föhnklassen sind; diese konnten nur dank einer Klassifikation nach synoptischen Gesichtspunkten statistisch klar erfasst werden. (1) Im 850 und 700 mb Niveau besteht zwischen München und Mailand ein statistisch gesichertes Temperaturgefälle, das sich aber zwischen den beiden Gruppen nicht als signifikant erwies.

9.9.1. Deutung der formalen Ergebnisse

Die Druckdifferenz Locarno-Zürich als notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für Föhn zu betrachten, mag formal richtig sein; physikalisch kommt

aber diese Differenz durch das Zusammenwirken verschiedener Faktoren zustande. Als wichtigste haben sich nach den bisherigen Analysen herausgestellt:

1. Das isobare Temperaturgefälle zwischen der Alpennord- und Alpensüdseite bzw. zwischen Voralpen und Alpen.
2. Das topographische Gefälle der Fläche gleichen Luftdrucks von den Alpen zum Mittelland im 850 mb Niveau.
3. Die Stabilität im Föhntal.

In allen 5 Föhnklassen tritt nur dann Talföhn auf, wenn zwischen Voralpen und Alpen ein isobares Temperaturgefälle besteht. Diese Grösse stellt die notwendige Bedingung dar. Die hinreichenden Kriterien ergeben sich aus den unter 2 und 3 erwähnten Variablen.

Bei den NW-, NS-, SW- und SS-Lagen ist ein wesentliches Gefälle der absoluten Topographie hinreichend. Doch ist auch bei einem geringen Gefälle ein Föhndurchbruch möglich, aber nur dann, wenn die Schichtung im Reusstal beinahe indifferent ist (FLa-Lagen). Dass die Stabilität im Föhntal bei den SS- und FL-Lagen einen wesentlichen Faktor darstellt, geht auch aus dem Tagesgang der Föhnhäufigkeit hervor. Die FL-Föhne sind typisch für den Sommer, die SS-Föhne für den Frühling. Aus den Fig. 4 und 5 geht deutlich hervor, dass im Frühling und Sommer der ausgeprägte Tagesgang bei Ausschaltung der F- und SS-Föhnlagen wesentlich geringer ist, bzw. verschwindet.

Auf die Variablen, die sich bei einzelnen Föhnklassen als signifikant erwiesen haben, sei im folgenden noch kurz eingegangen.

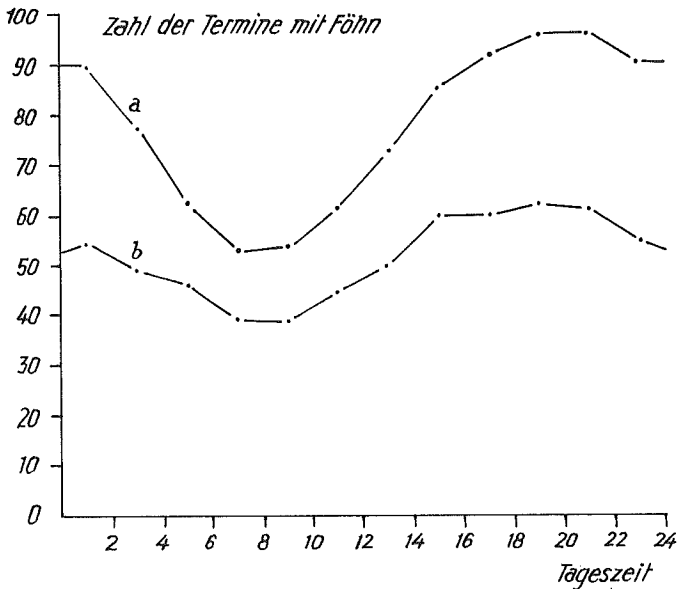


Fig. 4. Die tageszeitliche Häufigkeit im Frühling mit und ohne Berücksichtigung der F- und SS-Lagen (Periode 1955—1964); a = alle Föhnlagen, b = ohne Föhnlagen der Klassen F und SS.

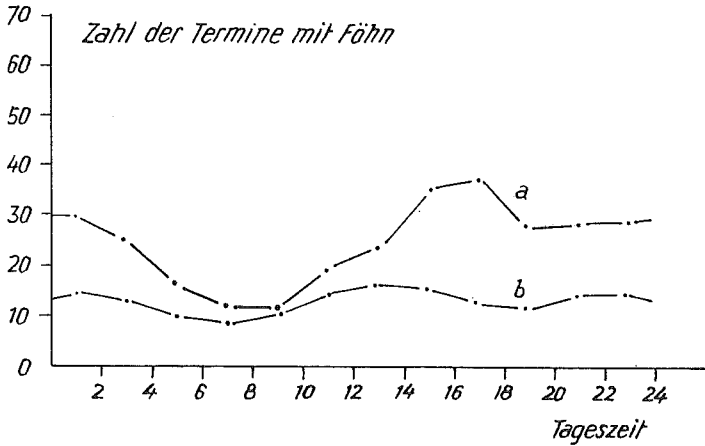


Fig. 5. Die tageszeitliche Häufigkeit im Sommer mit und ohne Berücksichtigung der F- und SS-Lagen (Periode 1955—1964); a = alle Föhnlagen, b = ohne Föhnlagen der Klassen F und SS.

1. Die Windrichtung im 700 und 500 mb Niveau über Mailand (SS-Lagen)

Eine Strömungsrichtung im 500 mb Niveau von weniger als 200° führte in keinem der untersuchten Fälle zu Föhn in Altdorf. Infolge der Winddrehung (Warmluftadvektion und Reibung) weist der Wind über dem Reusstal eine zu grosse Ostkomponente auf, und über dem Mittelland weht die Bise. Die Zusammenhänge zwischen Windrichtung, Stabilität im Reusstal und Druckdifferenz Locarno-Zürich sind im Abschnitt 9.7., Analyse Nr. 4, untersucht worden.

2. Die Temperaturdifferenz Gütsch-Jungfraujoch (NW-Lagen)

Im Abschnitt 9.4., Analyse Nr. 5, wurde gezeigt, dass die geringe Temperaturdifferenz Gütsch-Jungfraujoch meist durch eine Erwärmung auf der Station Joch verursacht wird, während die Temperatur auf dem Gütsch sich wenig verändert oder sogar sinkt. Diese Erscheinung lässt sich folgendermassen deuten. Das sich nähernde Tief führt im Alpengebiet in den unteren Schichten zu einer Winddrehung mit alpenüberquerender Komponente. Eine Luftschicht geringer Mächtigkeit wird zum Überqueren der Alpen gezwungen und verhindert eine Erwärmung in Passhöhe der Alpen oder führt sogar zu einer Abkühlung.

3. Die Windstärke auf dem Gütsch

Diese Variable erweist sich bei den NS-, SS- und FL-Lagen als signifikant.

a) NS- und SS-Lagen

Da zwischen der Windgeschwindigkeit im Luv (Sonde von Mailand) und derjenigen auf dem Gütsch keine Korrelation besteht, ist anzunehmen, dass die Energie dieser Strömung aus dem Lee stammt. Interessant ist, dass bei den Klassen mit relativ seichter alpenüberquerender Strömung (NW- und SW-Lagen) sich die Windgeschwindigkeit auf dem Gütsch als wenig signifikant erwies, bei den beiden Föhnklassen mit einer bedeutend mächtigeren südlichen Höhenströmung sich aber als

wesentlich herausstellte. Diese Tatsache lässt sich dadurch erklären, dass bei südlicher Höhenströmung der Wind auf dem Gütsch als repräsentativ für die allgemeine Druckverteilung anzusehen ist, während dies bei westlicher Höhenströmung nicht der Fall ist. Der Südwind ist dann eine vorwiegend durch den Reibungseffekt der Alpen erzeugte und deshalb begrenzte Strömung geringer vertikaler Erstreckung.

b) FL-Lagen

Wie in 9.8. gezeigt wurde, ist das isobare Temperaturgefälle Voralpen-Alpen auf das Überfließen einer kälteren Luftmasse aus der Poebene zu erklären. Zur Einleitung einer solchen Strömung muss im Alpenraum eine gewisse Windgeschwindigkeit überschritten werden.

10. Starke Südströmungen im oberen Reusstal mit und ohne Föhnwirkungen in Altdorf

Problemstellung

Bei der Auswertung der Windstreifen der Stationen im Reusstal zeigte es sich, dass im oberen Reusstal (Göschenen, Gurtellen) häufig eine bedeutende Südströmung herrscht, die aber die Talsohle in Altdorf nicht erreicht. Es kann vorkommen, dass die Südströmung in Göschenen ein Stundenmittel von 45 km erreicht, ohne dass die Strömung bis Altdorf absteigt. Diese Erscheinung tritt vor allem bei westlicher Höhenströmung auf; wie lässt sie sich erklären?

Analyse Nr. 1

Das weitere Absteigen könnte durch eine relativ seichte stabile Kaltluftschicht, die z. B. trotz Warmfrontdurchgang in den Alpentälern bei dieser Strömungslage erhalten blieb, verhindert werden. Um zu prüfen, ob eine solche Kaltluftschicht das Absteigen verhindern kann, wurden Lagen ausgewählt, die folgende Bedingungen erfüllten:

1. Südwind in Göschenen (Windstärke ≥ 2 in der halben Beaufortskala).
2. Kein Föhn in Gurtellen und Altdorf.
3. Westliche Höhenströmung (Strömung in 500 mb $> 240^\circ$).
4. Südwind auf dem Gütsch während der nächsten 15 Std.

Es konnten 27 solche Fälle eruiert werden. 13 Fälle führten innert 0—12 Std. in Altdorf zu Föhn, während die andern 14 ohne Föhnwirkungen in Altdorf blieben. Die Korrelation zwischen Föhn/nicht Föhn und der Temperaturdifferenz Altdorf-Gurtellen ergab nur einen Koeffizienten von 0,37. Hingegen ergab sich eine wesentliche Abhängigkeit zwischen dem Föhndurchbruch in Altdorf und dem maximalen Δp Locarno-Zürich während der Südwindperiode; hier beträgt der Korrelationskoeffizient 0,73. Es gibt aber vereinzelt Fälle, bei denen trotz sehr starkem Südstau in Altdorf kein Föhn herrscht.

Analyse Nr. 2

Wir sahen, dass das weitere Absteigen der Föhnströmung ins Tal wesentlich vom maximalen Δp Locarno-Zürich während der Föhnperiode abhängt. Es stellt sich

die Frage, ob der Stauereffekt oder das Druckgefälle Alpen-Mittelland als wesentlich zu betrachten ist. Um das zu prüfen, wurden aus den Monaten November 1965 bis Februar 1966 22 Fälle mit Südwind auf dem Gütsch und in Göschenen mit einer Höhenströmung (500 mb) $> 240^\circ$ herausgesucht. In 12 Fällen wehte der Föhn in Altdorf, in 10 Fällen dagegen nicht. Die Korrelation Föhn/nicht Föhn mit dem ΔH Gütsch-Payerne im 850 mb Niveau ergab den hohen Wert von $r=0,87$. Wir sehen, dass sowohl das weitere Absteigen wie auch die Geschwindigkeit der durchgebrochenen Föhnströmung wesentlich vom topographischen Gefälle Alpen-Mittelland im 850 mb Niveau abhängt. Die kanalisierte Strömung kann nur dann die Talbiegung bei Amsteg überwinden und sich bis Altdorf durchsetzen, wenn ein wesentliches nach NW gerichtetes topographisches Gefälle im 850 mb Niveau besteht.

11. Beobachtungen im Reusstal

Bei Fahrten von Zürich nach Altdorf bei Föhn konnten mit grosser Regelmässigkeit folgende 3 Zonen festgestellt werden:

1. Stagnierende Kaltluft.
2. «Mischungszone», die Temperatur liegt zwischen der Kaltluft und der warmen Föhnströmung; es wehen nördliche Winde.
3. Warme Föhnströmung aus südlicher Richtung.

Die Auswertung der 4 im Gebiet der Armeemagazine in Altdorf durchgeführten Pilotballon-Doppelvisierungen gibt ein recht einheitliches Bild der Föhnströmung. Eine kanalisierte, in Richtung und Stärke einheitliche Strömung reicht bis 2000—2600 m über Grund, dann drehen die Winde von SSE auf SW.

12. Die wichtigsten Föhntheorien

a) Die Theorie von H. v. Ficker (1943)

1. Vorstadium

In den Tälern lagert ein Kaltluftsee, darüber liegt, durch eine Inversion getrennt, antizyklonale Warmluft. Infolge der sich nähernden Depression fliesst die Kaltluft aus den Tälern ab.

2. Das Antizyklonalstadium

Beidseits der Alpen herrscht schönes Wetter, die Wirkung der Depression verstärkt sich, die Kaltluft fliesst intensiv aus den Tälern ab. Als Ersatz strömt antizyklonale Warmluft nach. Sobald die Kaltluftgrenze unter einen Beobachtungsort sinkt, tritt der typische Temperatur- und Feuchtigkeitssprung auf; der Föhn hat eingesetzt.

3. Das stationäre Stadium

Auf der Luvseite steigt die Luft auf, es treten Bewölkungszunahme und Niederschläge auf. Die warme Luft sinkt ab, weil die aus den Tälern weggesaugte Luft nur

aus der Höhe ersetzt werden kann. Die Föhnlage wird dadurch beendet, dass sich Kaltluft von Westen her keilförmig unter die warme Föhnströmung schiebt.

b) Die Theorie von Streiff-Becker (1942)

Die Theorie FICKERS stimmt mit den Beobachtungen nicht völlig überein. Nach der Ansicht von STREIFF-BECKER kann der machtvolle Durchbruch des Föhns in die Täler nicht allein durch das Abfließen der Kaltluft erklärt werden. Nach seiner Theorie soll die südliche Höhenströmung im Lee durch Injektorwirkung einen luftverdünnten Raum erzeugen, in den die Höhenluft infolge ihrer eigenen Schwere einbreche. Dieser Saugeffekt kann aber physikalisch kaum für das Einbrechen der Föhnluft bis in die Talmulde verantwortlich gemacht werden.

c) Die Theorie von Schweitzer (1953)

SCHWEITZER arbeitet mit der Analogie zwischen den Gesetzen der Gasdynamik und den Strömungsgesetzen von Flüssigkeiten. Unter dem Einfluss eines Tiefs, das nördlich der Alpen vorbeizieht, wird zwischen dem Gebirgsrelief und einer darüber liegenden Inversion Luft aus dem Reservoir südlich der Alpen abgesaugt. Dort, wo durch die Gebirgsoberfläche und die darüber liegende Inversion Düsen gebildet werden, ist zuerst mit dem Erreichen der maximalen Fördermenge zu rechnen; die Geschwindigkeit wird kritisch. Die Inversion wird ins Lee herabgezogen, und unter ihr wird die Geschwindigkeit überkritisch, d. h. schießend, wobei auch die Kaltluft am Boden in die Strömung miteinbezogen wird. Störungen, verursacht durch Berg- rücken und Einschnitte können nur noch talabwärts wandern und verursachen die Stoss- und Richtungslosigkeit der Föhnströmung.

d) Die Theorie von Rossmann (1950)

ROSSMANN findet die Energiequelle für das Ausräumen der Kaltluft im feucht- labilen Absinken der Wolkenluft innerhalb der Föhnmauer. Er weist theoretisch nach, dass schon bei anfänglich kleiner Temperaturdifferenz zwischen Föhnmauer und ihrer Umgebung sich nach kurzer Zeit bedeutende Absinkgeschwindigkeiten ergeben. Da eine Föhnmauer sich oft erst in einem späteren Stadium der Föhnent- wicklung bildet oder sogar ausbleibt, reicht das feuchtlabile Absinken nach ROSS- MANN als physikalische Erklärung allein nicht aus.

e) Die Theorie von Hoinkes (1950)

HOINKES beschreibt eine gut ausgebildete Südföhnlage bei anfänglich hohem Druck im Norden und tiefem Druck im Süden auf der Bodenwetterkarte. Die Süd- strömung hatte ihre Ursache in einem auf der 500 mb Karte gut ausgebildeten Höhen- tief. Ein Abfließen der Kaltluft aus den Tälern vor dem Durchbruch des Föhns war bei dieser Druckverteilung nicht möglich. Für das Tiefergreifen des Föhns macht HOINKES die Einstrahlung verantwortlich. Der Föhn kann sich seiner Ansicht nach erst durchsetzen, wenn die dazu notwendige Arbeit verschwindend klein geworden ist, d. h., wenn der Temperaturgradient entlang den Hängen gegen den trocken- adiabatischen Wert strebt. HOINKES begründet seine Theorie mit der Föhnstatistik.

Im Frühling, der Jahreszeit grosser Föhnanfälligkeit, soll in den Tälern von Innsbruck der Temperaturgradient den grössten Wert annehmen.

f) Die Theorie von Frey (1945)

Auf Grund umfangreicher Untersuchungen erhielt FREY folgendes Bild der Föhnentwicklung: Bei noch bestehender Stauage setzt in der Höhe durch antizyklonales Absinken Erwärmung ein. Die Höhen des nördlichen Alpenvorlandes erhalten die potentiell wärmere Luft aus grosser Höhe, so dass die Temperaturerhöhung hier grösser ist als über dem Alpenkamm. Die sich nähernde Depression führt allmählich zur Ausbildung einer Föhnlage. Von den Alpen bis zum nördlichen Alpenvorland besteht ein Dichtegefälle. Die Flächen gleichen spezifischen Volumens, die Isosteren, schneiden sich mit den Isobaren. Es entsteht ein sogenanntes baroklines Solenoidfeld, das eine Zirkulation zur Folge hat. Dieses Feld ist nach FREY die Energiequelle, die das Ausräumen der Bodenkaltluft bewirkt. KUHN (1947) macht FREY auf 2 Ungenauigkeiten aufmerksam. Die erste haftet der Zeichnung der isosteren und isobaren Flächen am nördlichen Alpenrand an. KUHN weist nach, dass die Isosteren im Vergleich zu den Isobaren talwärts ansteigen, sobald Warmluft über Kaltluft aufgleitet. Es entsteht damit eine Zirkulation von gegensinniger Drehbeschleunigung. Dadurch wird aber das weitere Vordringen des Föhns in die Täler verhindert, wenn die Obergrenze der Kaltluft talauswärts ansteigt. Nicht überzeugend findet KUHN die Erklärung über den Aufbau des baroklinen Feldes; allein durch Absinken könne auch in der Umgebung eines Gebirges kein baroklines Feld aufgebaut werden. Voraussetzung sei ein Druckgefälle, welches die Luft quer zu den Alpen in Bewegung setzt. Wenn diese Strömung einmal im Gang ist, kann sich erst ein baroklines Feld aufbauen.

13. Diskussion der Föhntheorien

Nach den formalen Ergebnissen der statistischen Auswertungen und den Beobachtungen im Reusstal ergibt sich folgendes Bild:

1. Durch die grossräumige Druckverteilung im Alpenraum wird eine mehr oder weniger mächtige Schicht zum Überqueren der Alpen gezwungen. Diese Strömung erzeugt allein oder zusammen mit antizyklonalem Absinken oder Warmluftadvektion, die sich auf der Nordseite der Alpen schneller durchsetzen kann, das von FREY untersuchte barokline Feld⁹.

2. Dieses Solenoidfeld weist nach KUHN (1947) eine Drehbeschleunigung auf, welche die oberen Luftmassen vom Gebirge weg, die unteren gegen das Gebirge zu beschleunigt. Diese Tatsache erklärt das lange Liegenbleiben von Kaltluft im Tal. Für eine kräftige Föhnströmung bildet sie aber kein unüberwindbares Hindernis. Der Wirbel im Bereich der talauswärts ansteigenden Kaltluft führt zu einer bedeu-

⁹ FREY (1950) ist der Ansicht, dass allein durch asymmetrisches Absinken im Antizyklonalstadium ein dynamisch wirksames Solenoidfeld entstehen könne, was von KUHN (1947) bezweifelt wird. Zur Erhaltung eines solchen Feldes ist auf alle Fälle ein ständiger Zufluss kalter Luft in der Höhe nötig, was eine alpenüberquerende Strömung voraussetzt.

tenden Durchmischung von stagnierender Kaltluft und Föhnluft. Die daraus resultierende Mischluft weist vor allem im föhnnahen Bereich keine besonders grosse Stabilität mehr auf. Der Föhn dringt nur dann weit ins Mittelland vor, wenn das isobare Temperaturgefälle horizontal und vertikal eine bedeutende Erstreckung aufweist (NS- und SS-Lagen).

3. Dieses Solenoidfeld kann aber nur zu Föhn im Tal führen, wenn ein bedeutendes Gefälle der 850 mb Fläche zwischen Alpen und Mittelland besteht. Dieses Gefälle muss nicht unbedingt durch ein im Norden der Alpen vorbeiziehendes Tief erzeugt werden. Es genügt, dass die durch die erzwungene Hebung abgekühlte Luft im Norden der Alpen ein baroklines Feld erzeugt, dadurch zum Absteigen gezwungen wird und sich erwärmt. Diese Erwärmung führt erst zu einem Gefälle der isobaren Flächen Alpen-Mittelland im 850 mb Niveau (z. B. SS-Lagen). Auf diese sekundäre Entstehung eines Gefälles Alpen-Mittelland hat HOINKES hingewiesen. Alle Föhntheorien, die zur Erklärung des Absteigens der Föhnströmung ein Gefälle der Topographie bzw. des Druckes voraussetzen, besitzen deshalb keine allgemeine Gültigkeit (FICKER, SCHWEITZER).

4. Bei einzelnen Föhnklassen spielt der Temperaturgradient im Föhntal eine bedeutende Rolle. Bei den FLA-Lagen mit ihrer geringen Stabilität genügt ein geringes topographisches Gefälle für einen Föhndurchbruch. Bei den SSB-Lagen verhindert die grosse Stabilität ein Tiefergreifen der Föhnströmung und damit die Ausbildung eines bedeutenden Gefälles Alpen-Mittelland. Im Gegensatz zu HOINKES sind wir aber der Ansicht, dass die Stabilitätsverhältnisse in diesen Fällen wohl einen Föhndurchbruch verhindern, ihn aber nicht erzeugen können, da auch vor einem Föhndurchbruch der adiabatische Wert bei weitem nicht erreicht wird.

5. Wie KÜTTNER (1956) und REINHARDT (1963) für die Sierra Nevada (USA) bzw. für den Raum Innsbruck zeigen konnten, lässt sich das Auftreten von Rotoren strömungsmechanisch durch den Übergang von laminar in turbulent einleuchtend erklären. Im Reusstal konnte das Auftreten von Rotoren nicht festgestellt werden.

14. Die Vorhersage des Beginns einer Föhnlage

14.1. Die Eignung der beiden Grössen Δp Locarno-Zürich (Δp_{L-Z}) und ΔH Gütsch-Payerne (ΔH_{G-P})

Aus den bisherigen Untersuchungen geht hervor, dass ein Föhneinbruch mit recht guter Erfolgsrate einige Stunden vorher erkannt werden kann. In der Praxis stehen meist nur die Meldungen der synoptischen Stationen rechtzeitig zur Verfügung. Die Entscheidung, ob in den nächsten Stunden mit Talföhn zu rechnen ist oder nicht, wird hauptsächlich auf Grund der aus den Drucktendenzen zu erwartenden Druckdifferenz zwischen der Alpensüd- und Alpennordseite getroffen. Im folgenden wird untersucht, mit welcher Erfolgsrate dies möglich ist, wenn die jahreszeitlichen Unterschiede berücksichtigt werden. Das gleiche wird auch für das topographische Gefälle Alpen-Mittelland im 850 mb Niveau durchgeführt. Schliesslich soll die Klassifikation auf Grund der optimalen linearen Kombination beider Ele-

mente vorgenommen werden. Es wird sich zeigen, ob dadurch eine wesentliche Verbesserung erreicht wird.

Für jede Jahreszeit wurden je 100 Fälle mit Südwind auf dem Gütsch ($WS \geq 10$ Knoten) herausgesucht und die beiden Werte Δp Locarno-Zürich und ΔH Gütsch-Payerne im 850 mb Niveau bestimmt. Es wurden ausschliesslich 00 GMT-Fälle ausgewählt. Diese je 100 Fälle wurden in die beiden Gruppen a (mit Föhnwirkungen in Altdorf) und b (ohne Föhnwirkungen in Altdorf)¹⁰ aufgeteilt.

In jeder Gruppe wurden für beide Elemente die Durchschnitte berechnet und die Grenze in der Mitte der beiden Durchschnitte festgelegt. Streng genommen dürfen wir dies nur tun, wenn die Streuung der beiden Gruppen nicht wesentlich verschieden ist. Die durchgeführten F-Tests zeigten, dass bei Annahme einer Sicherheitsschwelle von 0,01 diese Bedingung in 5 Fällen gut, in 3 Fällen ganz knapp nicht erfüllt ist. Mit dem Trennverfahren wurden die beiden Elemente optimal linear kombiniert und entsprechend klassifiziert. Um festzustellen, wie stark die beiden Elemente voneinander abhängig sind, wurden noch der Korrelationskoeffizient r und das Bestimmtheitsmass B berechnet.

Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 13

Jahreszeit	Grenzen			Fehlklassifikationen ¹² auf Grund von			Abhängigkeit	
	ΔH_{G-P}	Δp_{L-Z}	Y^{11}	ΔH_{G-P}	Δp_{L-Z}	Y^{11}	r	B
Frühling	22,2	48,1	49,8	16	18	11	0,69***	0,47
Sommer	13,5	28,2	47,1	25	23	15	0,46***	0,21
Herbst	24,8	49,4	82,2	10	10	9	0,68***	0,47
Winter	26,5	60,9	116,7	18	11	5	0,39***	0,15

Die b-Koeffizienten haben folgende Werte:

	b_1	b_2
Frühling	0,893	0,625
Sommer	1,196	1,098
Herbst	1,584	0,870
Winter	1,740	1,160

Die durchgeführten Tests ergaben für alle 4 Jahreszeiten folgende Resultate:

1. Die erhaltenen Trennungen auf Grund der oben angeführten Formeln sind gesichert.
2. Die Trennung auf Grund der beiden Elemente Δp_{L-Z} und ΔH_{G-P} zusammen ist wesentlich besser, als wenn nur Δp_{L-Z} allein verwendet wird.

¹⁰ In Gruppe b wurden nur Fälle berücksichtigt, die nicht unmittelbar in der Nähe eines Föhn-einsatzes oder Föhnzusammenbruches lagen. Als Grenze wurden 3 Std. gewählt.

¹¹ $Y = b_1 \Delta H_{G-P} + b_2 \Delta p_{L-Z}$.

¹² Da in jeder Jahreszeit 100 Fälle berücksichtigt wurden, geben die aufgeführten Zahlen auch gleichzeitig die Prozentsätze an.

Es zeigt sich also, dass die Entscheidung Föhn oder nicht Föhn mit wesentlich grösserem Erfolg auf Grund der beiden Elemente getroffen wird. Allerdings steht das Δ H Gütsch-Payerne im 850 mb Niveau täglich nur zweimal zur Verfügung. Mit Absicht wurden in den durchgeführten Untersuchungen nur die 00 GMT-Termine verwendet. Die 12 GMT-Temperaturwerte vom Gütsch werden durch die Südexposition dieser Station verfälscht, und die Stationstemperatur geht ja in die Berechnung der Höhe der 850 mb Fläche ein. Wir können die Ergebnisse des Trennverfahrens auch als mehrfache Bestimmtheit deuten. Ob Föhn herrscht oder nicht, ist im Frühling zu 89 %, im Sommer zu 85 %, im Herbst zu 91 % und im Winter zu 95 % durch die Variation dieser beiden Elemente erklärt. Wir sehen, dass der Prozentsatz im Frühling und Sommer am geringsten ist. In diesen Jahreszeiten haben noch andere Faktoren einen entscheidenden Einfluss, was ja auch daraus hervorgeht, dass in beiden Jahreszeiten die Föhnhäufigkeit einen Tagesgang aufweist, der im Herbst und Winter fehlt.

14.2. Die Föhnprognose für die nächsten 12—36 Std.

Problemstellung

In die statistischen Formeln des Abschnittes 9. gehen Elemente ein, deren Änderung sich erst einige Stunden vor dem Föhndurchbruch ins Tal bemerkbar machen. In der Praxis wäre aber eine Prognose, die bis zum nächsten Tag gültig ist, wertvoll. Durch eine systematische Untersuchung lässt sich abklären, ob bereits zu diesem Zeitpunkt wesentliche Änderungen in den meteorologischen Feldern zwischen einer Gruppe a (Föhn in den nächsten 12—36 Std.) und einer Gruppe b (ohne Föhnwirkungen in den nächsten 36 Std.) bestehen. Die Untersuchung wurde auf Lagen mit einer Strömungsrichtung gegen die Alpen $\leq 240^\circ$ beschränkt, und als Föhnstation wurde wiederum Altdorf gewählt. Falls solche Unterschiede eruiert werden könnten, liesse sich mit der diskriminanten Analyse eine prognostisch anwendbare Trennformel berechnen.

Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet wird durch die beiden Parallelkreise 60° n. Br. und 35° n. Br. (bei der 24-std.-Druckänderung und der rel. Topographie 500/1000 mb 60° n. Br. und 40° n. Br.) und die beiden Meridiane 30° w. L. und 30° ö. L. begrenzt.

Untersuchte Felder

1. Absolute Topographie 500 mb.
2. Relative Topographie 500/1000 mb.
3. 24-std. Änderung der rel. Topographie 500/1000 mb.
4. Bodendruck.
5. 24-std. Bodendruckänderung.

Vorgehen

Jedes Feld wurde durch ein Gitternetz dargestellt, das durch Interpolation auf die Parallelkreis/Meridian Schnittpunkte (jeweils von 5° zu 5°) gewonnen wurde. Je

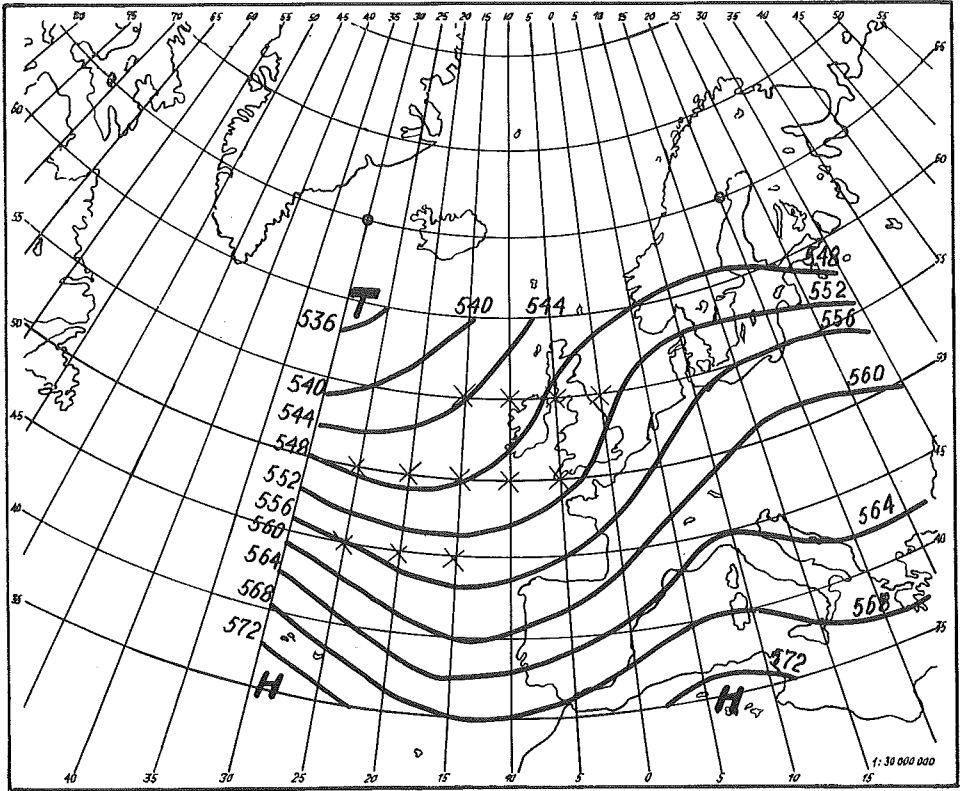


Fig. 6. Absolute Topographie 500 mb (= Höhenlage der 500 mb Fläche in geopotentiellen Dekametern). Gruppe a: Föhn in Altdorf innert 12–36 Std. Mittelwertskarte (15 Fälle) mit signifikanten Punkten (×).

15 Fälle der Gruppe a wurden mit 15 Fällen der Gruppe b punktweise miteinander verglichen (Mittelwerte, t- und F-Tests). Die untersuchten Fälle sind in beiden Gruppen gleichmässig auf die 4 Jahreszeiten verteilt.

Ergebnisse

1. Absolute Topographie 500 mb (siehe Fig. 6 und 7)

Die Mittelwertskarte der zu Föhn führenden Lagen weist westlich der Linie Irland-Portugal einen deutlich ausgeprägten Trog auf. In 40° n. Br. liegt die Trogachse auf 13° w. L. Im Mittelmeerraum ist auf 10° ö. L. ein Höhenhochkeil angedeutet. Bei den nicht zu Föhn führenden Lagen besteht kein Zusammenhang zwischen dem Höhentief über Frankreich, das die SW-Strömung im Alpengebiet erzeugt, und dem im NW erkennbaren Trog.

2. Die relative Topographie 500/1000 mb (= Schichtdicke zwischen der 1000 mb und der 500 mb Fläche)

Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen.

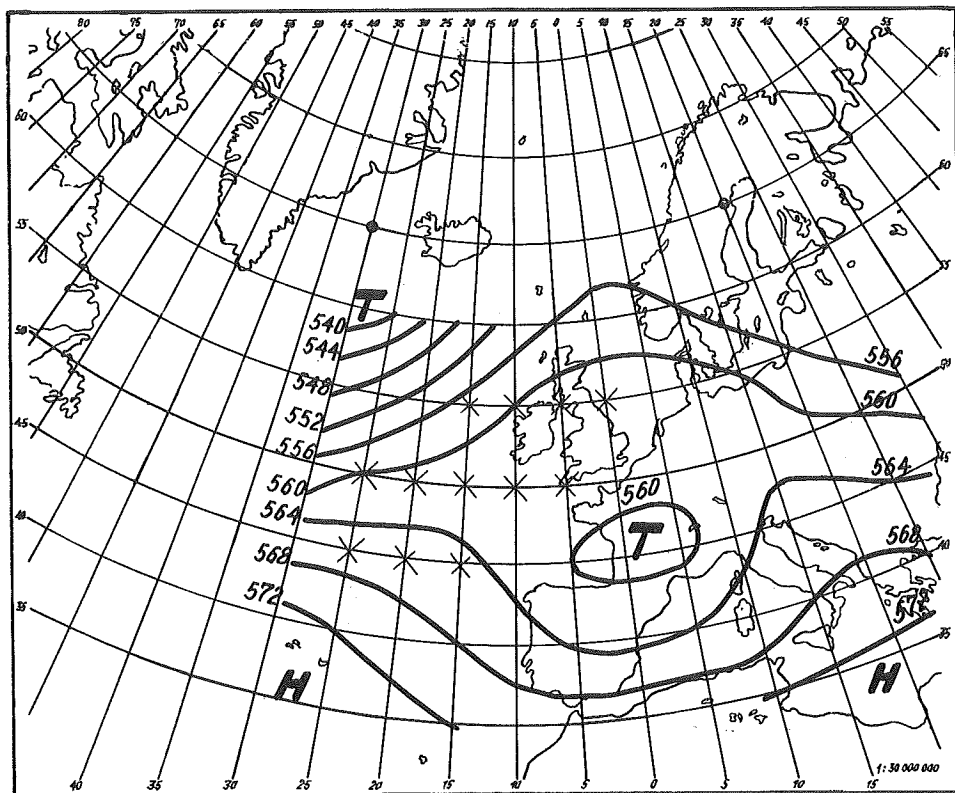


Fig. 7. Absolute Topographie 500 mb (= Höhenlage der 500 mb Fläche in geopotentiellen Dekametern). Gruppe b: Kein Föhn in Aldorf in den nächsten 36 Std. Mittelwertskarte (15 Fälle) mit signifikanten Punkten (×).

3. Die 24-std. Änderung der rel. Topographie 500/1000 mb (siehe Fig. 8 und 9)

Die zu Föhn führenden Lagen zeigen im Mittel eine bedeutende Erwärmung (Steiggebiet) im Mittelmeerraum (zwischen Italien und Spanien). Die Fälle von Gruppe b führen über Westeuropa und der Iberischen Halbinsel zu einer starken Abkühlung (Fallgebiet).

4. Der Bodendruck (siehe Fig. 10 und 11)

Für die Gruppe a erhalten wir im Mittel einen deutlich ausgeprägten Tiefdrucktrog westlich der europäischen Küste, bei Gruppe b ist die Druckverteilung in diesem Gebiet recht flach.

5. Die 24-std. Druckänderung

Es konnten keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Gruppen festgestellt werden.

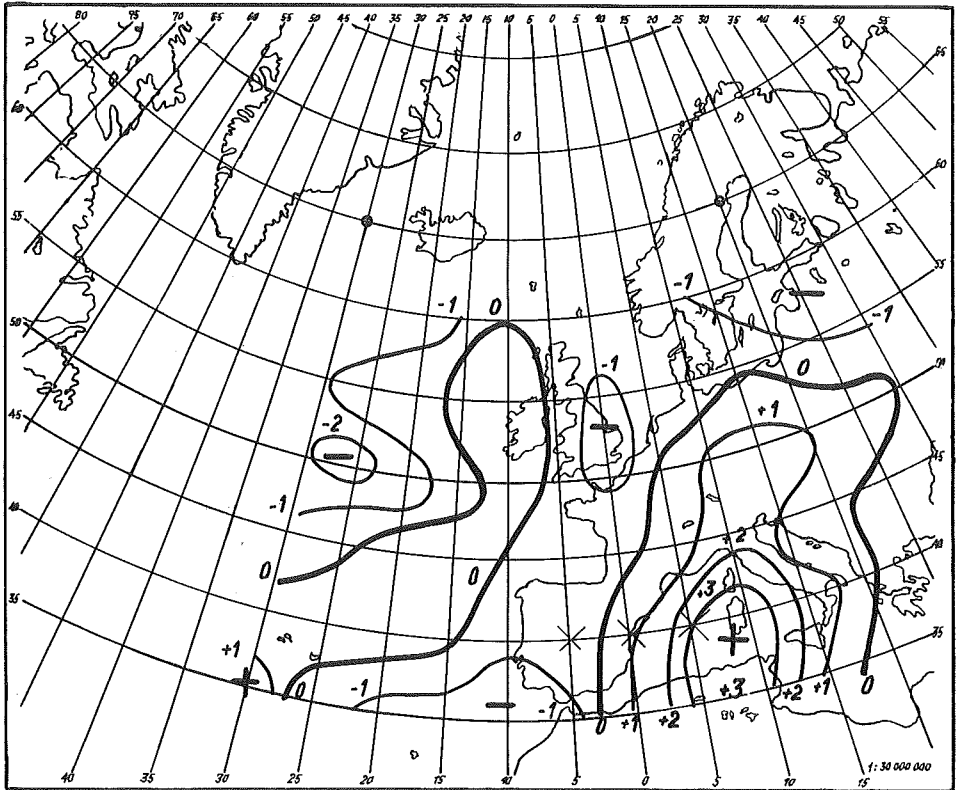


Fig. 8. 24-std. Änderung der rel. Topographie 500/1000 mb (= 24-std. Änderung der Schichtdicke zwischen den beiden Druckflächen in geopotentiellen Dekametern). Gruppe a: Föhn in Altdorf innert 12–36 Std. Mittelwertskarte (15 Fälle) mit signifikanten Punkten (×).

Das Trennverfahren

Auf Grund der in den 3 Feldern erhaltenen signifikanten Unterschiede wurde das Trennverfahren durchgeführt. Beim Bodendruck und der absoluten Topographie wurden nicht die absoluten Werte im signifikanten Bereich berücksichtigt, sondern es wurde die Differenz zwischen dem Bereich mit möglichst grossen und demjenigen mit möglichst kleinen t-Werten gebildet und für die Berechnung der Trennformel verwendet (Ausschaltung der grossen jahreszeitlichen Unterschiede). Folgende Werte wurden für die Berechnung der Trennformel verwendet:

1. Absolute Topographie 500 mb (in geopotentiellen Dekametern)

$$x_1 = (50^\circ \text{ n. Br. / } 15^\circ \text{ ö. L.} + 50^\circ \text{ n. Br. / } 20^\circ \text{ ö. L.} + 50^\circ \text{ n. Br. / } 25^\circ \text{ ö. L.}) - (50^\circ \text{ n. Br. / } 10^\circ \text{ w. L.} + 50^\circ \text{ n. Br. / } 15^\circ \text{ w. L.} + 50^\circ \text{ n. Br. / } 20^\circ \text{ w. L.})$$

2. Bodendruck (in mb)

$$x_2 = (50^\circ \text{ n. Br. / } 20^\circ \text{ ö. L.} + 50^\circ \text{ n. Br. / } 25^\circ \text{ ö. L.} + 50^\circ \text{ n. Br. / } 30^\circ \text{ ö. L.} + 45^\circ \text{ n. Br. / } 20^\circ \text{ ö. L.} + 45^\circ \text{ n. Br. / } 25^\circ \text{ ö. L.} + 45^\circ \text{ n. Br. / } 30^\circ \text{ ö. L.}) - (50^\circ \text{ n. Br. / } 10^\circ \text{ w. L.} + 50^\circ \text{ n. Br. / } 15^\circ \text{ w. L.} + 50^\circ \text{ n. Br. / } 20^\circ \text{ w. L.})$$

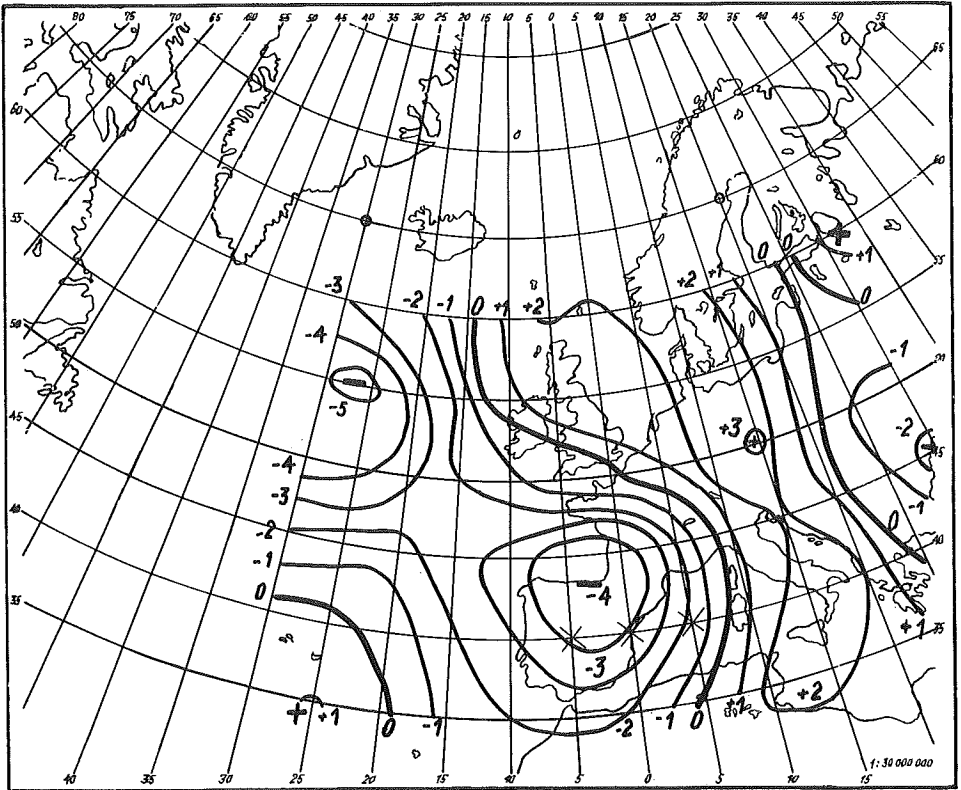


Fig. 9. 24-std. Änderung der rel. Topographie 500/1000 mb (= 24-std. Änderung der Schichtdicke zwischen den beiden Druckflächen in geopotentiellen Dekametern). Gruppe b: Kein Föhn in Aldorf in den nächsten 36 Std. Mittelwertskarte (15 Fälle) mit signifikanten Punkten (x).

n. Br. / 15° w. L. + 50° n. Br. / 20° w. L. + 45° n. Br. / 10° w. L. + 45° n. Br. / 15° w. L. + 45° n. Br. / 20° w. L.).

3. 24-std. Änderung der rel. Topographie 500/1000 mb (in geopotentiellen Dekametern)

$$x_3 = 40^\circ \text{ n. Br.} / 5^\circ \text{ w. L.} + 40^\circ \text{ n. Br.} / 0^\circ \text{ L.} + 40^\circ \text{ n. Br.} / 5^\circ \text{ ö. L.}$$

Zur Berechnung der Trennformel wurde das Material auf 50 Fälle erweitert (Gruppe a 20 Fälle, Gruppe b 30 Fälle). Für x_1 bis x_3 ergaben sich die folgenden Mittel- und t-Werte:

Tabelle 14

	Mittel		t-Wert
x_1	41,7	1,2	3,167**
x_2	75,3	16,9	3,252**
x_3	2,4	-6,2	2,456*

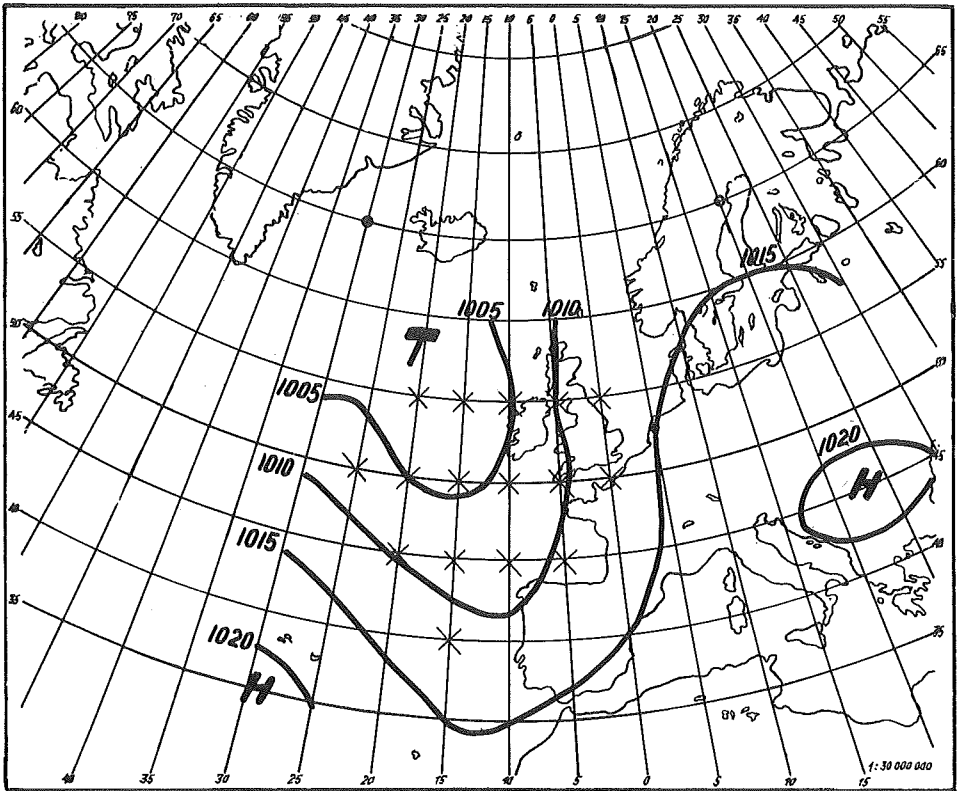


Fig. 10. Bodendruck in mb. Gruppe a: Föhn in Altdorf innert 12–36 Std. Mittelwertskarte (15 Fälle) mit signifikanten Punkten (×).

Die Rechnung führte zu folgender Trennformel:

$$Y = 0,178 x_1 + 0,598 x_2 + 0,184 x_3. \quad (1)$$

$Y > 11,15$ Föhn innert 12–36 Std. in Altdorf.

$Y < 11,15$ Kein Föhn in den nächsten 36 Std. in Altdorf.

Erfolgsrate $38/50 = 76\%$.

Eine Durchsicht der falsch klassifizierten Fälle zeigt, dass durch die obige Trennformel folgende Punkte nicht berücksichtigt werden:

1. Kaltlufttropfen können, ohne dass über dem östlichen Atlantik ein Trog besteht, zu Föhn führen.
2. Der Vorstoss eines Hochs am Boden aus SW führt zu einer Verflachung des Bodendruckes über Westeuropa.
3. Der Trog hat den Kontinent bereits erreicht (Achse Grossbritannien-Spanien), wandert aber bis zum nächsten Tag nicht weiter, sondern verstärkt sich durch Ausweitung nach Süden.

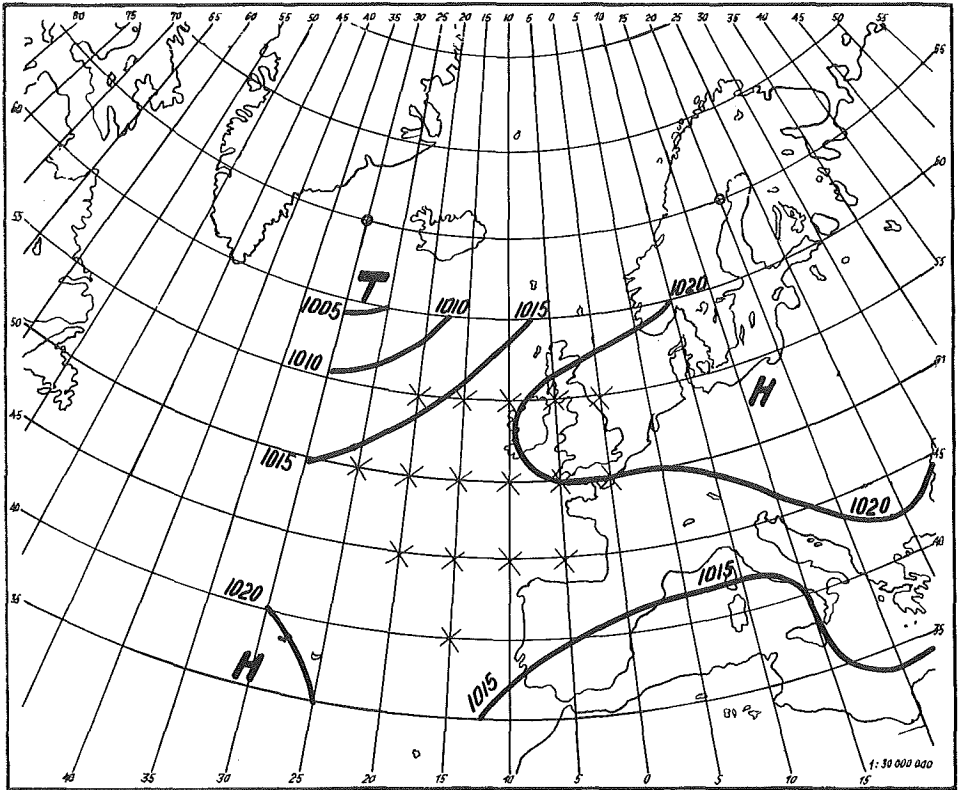


Fig. 11. Bodendruck in mb. Gruppe b: Kein Föhn in Altdorf in den nächsten 36 Std. Mittelwertskarte (15 Fälle) mit signifikanten Punkten (×).

4. Das Bodentief wandert rasch ins westliche Mittelmeer (Korsika, Sardinien). Eine Föhnphase tritt höchstens noch im Rheintal auf, über Mittel- und Westeuropa wird die Bodendruckverteilung flach.

Es stellt sich die Frage, wie die dargelegten Punkte in der prognostischen Trennformel berücksichtigt werden können. Veränderungen der absoluten Topographie im 500 mb Niveau können den amerikanischen numerischen Vorhersagekarten entnommen werden. Für die Entwicklung in Bodennähe stehen vor allem extrapolierte Vorhersagekarten zur Verfügung. Diese Karten können, auch wenn sie den Alpeneffekt nicht oder nur ungenügend berücksichtigen, doch nützlich sein. Die unter 2 und 4 erwähnten Kriterien werden in einer extrapolierten Karte zum grossen Teil richtig erfasst. Für die Trennformel wurde dem 850 mb Niveau der Vorzug gegeben, da sich in den Kurzfristuntersuchungen der Gradient in diesem Niveau als wesentlich herausgestellt hatte.

Die Untersuchungen wurden so durchgeführt, dass die aktuellen Karten vom nächsten Tag (850 mb und 500 mb Niveau) und vom übernächsten Tag (500 mb

Niveau) auf Gradienten, die sich wesentlich zwischen den beiden Gruppen unterscheiden, getestet wurden. In der Praxis stehen Vorhersagekarten zur Verfügung, die mehr oder weniger von den aktuellen Karten abweichen werden. Eine Untersuchung auf Grund der Vorhersagekarten wäre wenig sinnvoll, da diese ständig verbessert werden; die erhaltenen Ergebnisse wären nach kurzer Zeit überholt. Folgende Grössen haben sich als wesentlich herausgestellt:

Tabelle 15

	Mittel		t-Wert
	Gruppe a	Gruppe b	
1. Absolute Topographie in 850 mb vom nächsten Tag 00 GMT (45° n. Br./10° ö. L. + 45° n. Br./15° ö. L.) — (45° n. Br./ 0° L. + 50° n. Br./0° L.)	18,3	5,4	7,314***
2. Absolute Topographie in 500 mb vom übernächsten Tag 00 GMT ¹³ (45° n. Br./15° ö. L. — 45° n. Br./5° ö. L.)	10,2	4,3	4,906***

Wenn ausser den aktuellen Karten noch die absolute Topographie in 500 mb vom übernächsten Tag berücksichtigt wird, erhalten wir folgende Trennformel:

$$Y = 0,183 x_1 + 0,648 x_2 + 0,273 x_3 + 8,26 x_4. \quad (2)$$

$Y > 74,91$ Föhn in Altdorf innert 12—36 Std.

$Y < 74,91$ Kein Föhn in Altdorf innert 36 Std.

x_1 = Absolute Topographie in 500 mb.

x_2 = 24-std. Änderung der rel. Topographie 500/1000 mb.

x_3 = Bodendruck.

x_4 = Absolute Topographie 500 mb in 48 Std.

Die Erfolgsrate beträgt unter der Annahme, dass die numerischen Vorhersagekarten richtig sind, 82%. Wenn wir zu den 4 verwendeten Grössen noch die absolute Topographie im 850 mb Niveau vom nächsten Tag dazunehmen, kann die Trennung wiederum verbessert werden. Die Trennformel wurde sowohl mit allen 5 Werten (3 aus aktuellen, 2 aus Vorhersagekarten) als auch unter Vernachlässigung des Bodendruckes, also mit 4 Werten, berechnet. Die Erfolgsrate bleibt gleich, und die Trennung wird dadurch nicht schlechter. Die Trennformel lautet:

$$Y = 0,045 x_1 + 0,440 x_2 + 6,20 x_3 + 5,91 x_4. \quad (3)$$

$Y > 116$ Föhn in Altdorf innert 12—36 Std.

$Y < 116$ Kein Föhn in Altdorf innert 36 Std.

x_1 = Absolute Topographie 500 mb.

x_2 = 24-std. Änderung der rel. Topographie 500/1000 mb.

x_3 = Absolute Topographie 850 mb in 24 Std.

x_4 = Absolute Topographie 500 mb in 48 Std.

¹³ Die gleiche Grösse für den nächsten Tag 00 GMT ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen.

Unter der Voraussetzung, dass die Vorhersagekarten richtig sind, beträgt die Erfolgsrate 88 %.

Statistische Tests

Es wurde untersucht, ob die Trennung signifikant ist oder nicht. Bei Annahme einer Sicherheitsgrenze von 0,01 sind die Ergebnisse aller 3 Analysen als wesentlich zu betrachten. Es wurde auch geprüft, ob die Berücksichtigung weiterer Variablen zu einer wesentlichen Verbesserung der Trennformel führt. Rein statistisch betrachtet ist die Formel (2) wesentlich besser als die Formel (1), und die Formel (3) gibt gegenüber (2) wiederum eine signifikante Verbesserung. Die Vernachlässigung des Bodendrucks bei (3) führte zu keiner Verschlechterung der Trennung. Es muss aber berücksichtigt werden, dass für die Benützung der Formeln (2) und (3) Vorhersagekarten benützt werden müssen, die nicht als 100 % richtig angesehen werden dürfen. Wenn auch die Formel, in die das 850 mb Niveau vom nächsten Tag eingeht, statistisch gesehen besser ist als die übrigen Formeln, ist es absolut möglich, dass sie in der Praxis momentan noch nicht die beste Trennung ergibt. Allerdings werden die in wachsender Zahl von den meteorologischen Diensten herausgegebenen Prognosekarten laufend verbessert, so dass es sicher sinnvoll ist, sie zu berücksichtigen.

15. Die Prognose des Föhnzusammenbruches auf statistischer Basis

Problemstellung

In Altdorf herrscht Föhn, und es soll entschieden werden, ob der Föhn bis 24 h des betreffenden Tages zusammenbricht oder nicht.

Die Gewinnung der für die Klassifikation wesentlichen Größen

Die für die Klassifikation wesentlichen Grössen wurden wie in 14.2. durch vergleichende Untersuchungen gewonnen. Sie erwiesen sich zwischen einer Gruppe a (Föhn in Altdorf dauert länger als bis um 24 h des betreffenden Tages) und einer Gruppe b (Föhnzusammenbruch in Altdorf bis um 24 h des betreffenden Tages) als statistisch wesentlich verschieden (Prüfung durch t- und F-Tests).

Folgende Variable ergaben signifikante Unterschiede:

Aktuelle Werte

24-std. Änderung der rel. Topographie 500/1000 mb

55° n. Br. / 10° w. L. + 55° n. Br. / 5° w. L. + 55° n. Br. / 0° L.

24-std. Änderung des Bodendrucks

50° n. Br. / 15° w. L. + 45° n. Br. / 15° w. L.

3-std. Änderung des Bodendrucks (03—06 GMT)

50° n. B. / 0° L. + 45° n. Br. / 0° L. + 40° n. Br. / 0° L.

*Prognostische Werte**Absolute Topographie 500 mb vom nächsten Tag 00 GMT*

Lage der Trogachse auf 45° n. Br. (westliche Länge +, östliche Länge —).

Absolute Topographie 850 mb vom nächsten Tag 00 GMT

(45° n. Br. / 10° ö. L. + 45° n. Br. / 15° ö. L.) — (45° n. Br. / 0° L. + 50° n. Br. / 0° L.)

Absolute Topographie 500 mb vom übernächsten Tag 00 GMT

45° n. Br. / 15° ö. L. — 45° n. Br. / 5° ö. L.

Die Trennformel

Zur Berechnung der Trennformel wurden 63 Fälle verwendet (Gruppe a 37 Fälle, Gruppe b 26 Fälle).

Die Trennformel auf Grund der Werte aus den aktuellen Karten

$$Y = 0,847 x_1 - 0,361 x_2 - 6,15 x_3. \quad (1)$$

$Y > 1,44$ Kein Föhnzusammenbruch in Altdorf bis 24 h des betreffenden Tages.

$Y < 1,44$ Föhnzusammenbruch in Altdorf bis 24 h des betreffenden Tages.

x_1 = 24-std. Änderung der rel. Topographie 500/1000 mb.

x_2 = 24-std. Änderung des Bodendruckes.

x_3 = 3-std. Änderung des Bodendruckes (03—06 GMT).

Erfolgsrate 81 %.

Trennformel auf Grund der aktuellen Karten und der absoluten Topographie im 500 mb Niveau vom nächsten und übernächsten Tag

$$Y = 2,79 x_1 + 1,73 x_2 + 0,821 x_3 - 0,016 x_4 - 4,81 x_5. \quad (2)$$

$Y > 21,60$ Kein Föhnzusammenbruch in Altdorf bis 24 h des betreffenden Tages.

$Y < 21,60$ Föhnzusammenbruch in Altdorf bis 24 h des betreffenden Tages.

x_1 = Lage der Trogachse auf 45° n. Br. (westliche Länge +, östliche Länge —) am nächsten Tag 00 GMT.

x_2 = Absolute Topographie 500 mb vom übernächsten Tag 00 GMT.

x_3 = 24-std. Änderung der rel. Topographie 500/1000 mb.

x_4 = 24-std. Änderung des Bodendruckes.

x_5 = 3-std. Änderung des Bodendruckes (03—06 GMT).

Erfolgsrate 83 % unter der Voraussetzung, dass die Vorhersagekarten richtig sind.

Trennformel auf Grund der aktuellen Karten, der absoluten Topographie vom nächsten (500 und 850 mb) und vom übernächsten Tag (500 mb)

$$Y = 2,21 x_1 + 0,893 x_2 + 1,87 x_3 + 0,676 x_4 + 0,081 x_5 - 3,10 x_6. \quad (3)$$

$Y > 42,2$ Kein Föhnzusammenbruch in Altdorf bis 24 h des betreffenden Tages.

$Y < 42,2$ Föhnzusammenbruch in Altdorf bis 24 h des betreffenden Tages.

x_1 = Lage der Trogachse auf 45° n. Br. (w. L. +, ö. L. -) am nächsten Tag
00 GMT.

x_2 = Absolute Topographie 500 mb vom übernächsten Tag.

x_3 = Absolute Topographie 850 mb vom nächsten Tag.

x_4 = 24-std. Änderung der rel. Topographie 500/1000 mb.

x_5 = 24-std. Änderung des Bodendruckes.

x_6 = 3-std. Änderung des Bodendruckes (03—06 GMT).

Erfolgsrate 87%, unter der Voraussetzung, dass die Vorhersagekarten richtig sind.

Statistische Tests

Bei Annahme einer Sicherheitsgrenze von 0,01 sind die Ergebnisse aller 3 Trennverfahren als signifikant zu betrachten. Rein statistisch ist Formel (2) wesentlich besser als (1). Die Formel (3) gibt nach den durchgeführten Analysen nochmals eine bessere Trennung, die statistisch aber nicht gesichert ist.

16. Folgerungen und offene Fragen

1. Als grössten Mangel empfanden wir im Laufe der Untersuchungen das Fehlen systematischer Messungen in der freien Atmosphäre im Alpengebiet. Dass bedeutende Inversionen vorhanden sind, ist nach 9.4. zu erwarten. Zur genauen Abklärung der Temperatur- und Strömungsverhältnisse sind aber regelmässig durchgeführte Sondenaufstiege nötig.

2. Prinzipiell stellt sich die Frage, ob die Anwendung statistischer Methoden in der Synoptik sinnvoll ist oder nicht. Die in 14.2. und 15. erhaltenen Erfolgsraten können von einem erfahrenen Meteorologen ohne weiteres erreicht werden. Viel wichtiger als die momentane Erfolgsrate sind die folgenden 3 Punkte:

- a) Die für die Prognose wichtige Entscheidung kann auf Grund objektiver Kriterien getroffen werden.
- b) Die Wahrscheinlichkeit, mit der das Ereignis eintreffen wird, ist bekannt.
- c) Die Formeln können laufend verbessert werden. Bei der Durchsicht der fehlklassierten Fälle kann es sich z. B. zeigen, dass noch weitere Elemente zu berücksichtigen sind. Die Formel kann neu berechnet und auf wesentliche Verbesserungen der Trennung getestet werden. Die in 14.2. und 15. angegebenen Trennformeln sind nicht als Endprodukte anzusehen, sondern als Basis für weitere Verbesserungen.

3. Die im Reusstal gewonnenen Erkenntnisse dürfen nicht ohne weiteres auf andere Föhntäler angewendet werden. Eine begonnene Untersuchung im Kt. Graubünden zeigt z. B., dass hier die thermischen Verhältnisse bei Föhn wesentlich anders sind. Nach den Untersuchungen von BOUËR (1961) ist der Tagesgang der Föhnhäufigkeit im Wallis viel ausgeprägter als im Reusstal und während allen 4 Jahreszeiten deutlich nachweisbar. Eine vergleichende Studie der Föhnerscheinungen in allen bedeutenden Föhntälern der Schweiz ist erst dann möglich, wenn erste Bear-

beitungen der einzelnen Täler vorliegen und Registrierungen (Wind, Temperatur, relative Feuchtigkeit) das Erstellen einer Föhnstatistik für das entsprechende Tal ermöglichen.

17. Die verwendeten Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung	Dimension
AT	Absolute Topographie = Höhenlage einer isobaren Fläche	Geopotentielle Dekameter
ΔH	Gefälle einer isobaren Fläche	Geopotentielle Meter
Δp	Druckdifferenz	Zehntelsmillibar
ΔPT	Differenz der potentiellen Temperatur ¹⁴	Zehntelsgrad Celsius
RT	Relative Topographie (Schichtdicke zwischen zwei isobaren Flächen)	Geopotentielle Dekameter
ΔT	Temperaturdifferenz	Zehntelsgrad Celsius
VT	Vertikaler Temperaturgradient	Grad Celsius/100 m
WR	Windrichtung	360er Teilung ¹⁵ (90° = E, 180° = S, 270° = W, 360° = N)
WS	Windstärke	Knoten

Differenzen sind folgendermassen zu bilden:

Wert der südlichen Station — Wert der nördlichen Station bei horizontalem Gefälle.

Wert der tiefer gelegenen Station — Wert der höher gelegenen Station bei vertikalem Gefälle.

Die angegebenen Dimensionen haben dort Gültigkeit, wo keine speziellen Angaben gemacht worden sind.

18. Literaturverzeichnis

- BOUËT, M. (1961): Le vent en Valais. Memoires de la Société vaudoise des Sciences naturelles 79, 293—300.
- DAMMANN, W. (1952): Der Föhn als Randproblem der atmosphärischen Dynamik. Geofisica pura e applicata 23, S. 162—173.
- FREY, K. (1945): Beiträge zur Entwicklung des Föhns und Untersuchungen über Hochnebel. Dissertation Basel, 119 S.
- (1950): Der Dimmerföhn vom 18. Dezember 1945. Verhandlungen der ersten internationalen Tagung für alpine Meteorologie, 16 S.
- (1953): Die Entwicklung des Süd- und Nordföhns. Archiv Met., Geophys., Biokl., A 5, S. 432—477.
- (1957): Zur Diagnose des Föhns. Meteorologische Rundschau 10 (6), S. 181—185.
- FICKER, H. v., DE RUDDER, B. (1943): Föhn und Föhnwirkungen. Leipzig, 112 S.
- HOINKES, H. (1950): Föhnentwicklung durch Höhentieftdruckgebiete. Archiv Met., Geophys., Biokl., A 2, S. 82—96.
- KUHN, W. (1947): Bemerkungen zu K. FREYS Föhntheorie. Experientia Vol. III/10, S. 423—424.
- KÜTTNER, J. (1956): The Rotor Flow in the Lee of Mountains Swiss Aero Revue 33/4, S. 208—215.

¹⁴ Die potentielle Temperatur ist diejenige Temperatur, die ein Luftteilchen mit den Zustandsgrößen Temperatur und Druck annimmt, wenn es adiabatisch auf den Druck 1000 mb gebracht wird.

¹⁵ In den Trennformeln ist die Windrichtung in der 36er Teilung einzusetzen.

- LINDER, A. (1960): Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure. 3. Auflage, Birkhäuser, Basel.
- REINHARDT, M. (1963): Einige Flugbeobachtungen zu den örtlichen Strömungsverhältnissen bei Südföhn im Raume Innsbruck. *Geofisica e met.* 11, S. 19—26.
- ROSSMANN, W. (1950): Über das Absteigen des Föhns in die Täler. *Ber. d. Dt. Wtdst. US-Zone* 12, S. 94—98.
- SCHÜEPP, M. (1941): Ein neues Gerät zur Auswertung der Doppelvisierungen von Pilotballonen. *Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt*, 7 S.
- STREIFF-BECKER, R. (1942): Neue Untersuchungen über den Schweizerföhn. *Denkschr. S.N.G.* Bd. 74, Abh. 4, 34 S.
- SCHWEITZER, H. (1953): Versuch einer Erklärung des Föhns als Luftströmung mit überkritischer Geschwindigkeit. *Archiv Met. Geophys., Biokl., A* 5, S. 350—371.
- UNDT, W. (1958): Meteorologie des Föhns. *Mediz.-Met. Hefte* 13, S. 106—111.
- WALKER, H. M., LEV, J. (1953): *Statistical Inference*, S. 262—264. The Point Biserial Coefficient of Correlation. Holt, Rinehart and Winston, New York.
- WALTHER, E. (1938): Der Schweizerföhn. *Neujahrsbl. N.G.Z.*, 40 S.

