

R. STEINACKER

# 1 Alpiner Föhn – eine neue Strophe zu einem alten Lied

## Alpine foehn – a new verse to an old song

### Zusammenfassung

Nach einer kurzen historischen Darstellung der Föhnforschung werden aktuelle Ergebnisse der Untersuchung dieses Phänomens, die im Zuge der Arbeiten von FORM (FOehn study in the Rhine valley during MAP) entstanden, diskutiert. Zum Abschluss werden der heutige Kenntnisstand zusammengefasst und noch offene Probleme erläutert.

### Abstract

A brief historical resume on foehn related research is followed by a presentation of recent findings concerning this phenomenon, which resulted from studies within project FORM (FOehn study in the Rhine valley during MAP). Finally the current state of our knowledge is summarised and still open problem are discussed.

## 1 Einleitung

Die Föhnforschung gehört zu den traditionsreichsten Themen der alpinen Meteorologie. Dieses Phänomen bewirkt in manchen Gebieten der Alpen erhebliche Auswirkungen auf das Leben der Bevölkerung: Neben positiven Auswirkungen wie der Ermöglichung des Anbaus von wärmeliebenden Pflanzen bis in höhere Tallagen der Nordalpen in Folge der Erhöhung der Mitteltemperatur durch den Föhn („Türkenröster“ = Maisröster, s. FLIRI 1975) gibt es auch negative Auswirkungen: Durch die hohen Windgeschwindigkeiten und die Trockenheit der Luft steigt bei Föhn die Gefahr von Bränden stark an, was in der Vergangenheit wiederholt zu Brandkatastrophen geführt hat, indem ganze Dörfer und große Waldflächen ein Raub der Flammen wurden (STIEGER und ZIMMERMANN 1983). Auch die direkten Windeinwirkungen können gelegentlich zu großen Waldschäden führen, was besonders im Zusammenhang mit Schutzwäldern eine Bedrohung für den alpinen Lebensraum darstellt. Die physiologischen und psychologischen Auswirkungen des Föhns sind ein weiteres Kapitel, das breites Interesse und die sprichwörtlichen Reaktionen in der von Föhn beeinflussten Bevölkerung hervorruft (RICHTNER 1983, LECHNER et al. 1981). In jüngerer Zeit hat der Föhn auch in anderen Wirtschaftszweigen eine gewisse Bedeutung erlangt, wie z. B. in der Luftfahrt, wo die Turbulenz der Föhnströmung und das Auftreten von extremen Windscherungen immer wieder kritische Situationen hervorruft.

Durch die grundlegenden frühen Erkenntnisse der Föhnforschung war dieses meteorologische Phänomen in weiten Zügen schon vor Jahrzehnten physikalisch erklärt. In kaum einem meteorologischen Lehrbuch fehlt eine Darstellung des Föhns als klassisches Beispiel für einen thermodynamischen Prozess in der At-

mosphäre. Dadurch bedingt gilt die Föhnforschung heute als nicht mehr prioritär. Um die noch offenen Aspekte dieses Phänomens – z. B. das kleinräumige Strömungsverhalten, dessen Verständnis essentiell für die lokale Föhnvorhersage ist, die Skaleninteraktion, die ausgeprägten Wellenregimes einschließlich Wellenbrechen bei Föhn, u. a. m. – weiter mit materieller Unterstützung wissenschaftlich bearbeiten zu können, wird heute vielfach auf moderne neudeutsche Termini wie „gap-flow“, „trans-Alpine flow“, „downslope windstorms“ usw. ausgewichen.

Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über die historischen Ergebnisse der Föhnforschung („das alte Lied“) gegeben, in Abschnitt 3 werden ausgewählte Ergebnisse aus der Föhnforschung im Rahmen von MAP diskutiert und im abschließenden Abschnitt wird eine Synthese („neue Strophe“) versucht und in einem Ausblick wird auf die in Zukunft noch zu klärenden Fragen eingegangen.

## 2 Überblick über historische Ergebnisse der Föhnforschung

Von Anbeginn der wissenschaftlichen Föhnforschung stand die Frage nach dem Ursprung der „Wärme“ bei Föhn im Vordergrund (eine ausführliche Diskussion darüber findet sich bei KUTZBACH 1979), weil beim Föhn nördlich der Alpen (Südföhn) besonders im Winterhalbjahr oft ungewöhnlich hohe Temperaturen auftreten. Zuerst waren advektive Prozesse als Ursache angenommen worden – Wild, der führende Schweizer Meteorologe dieser Zeit, vermutete den Ursprung der Föhnluft in der Sahara, gestützt durch den Geologen Escher von der Linth. Letzterer stellte in seiner Eiszeittheorie die Advektion von Saharaluft ins Zentrum, die zu Beginn und während der Eiszeit durch die hö-

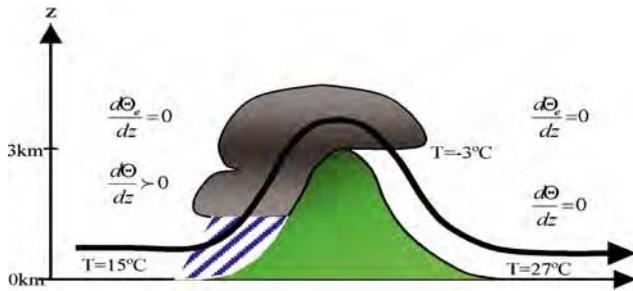


Abb. 1-1: Klassisches Bild der thermodynamischen Föhntheorie nach HANN, mit beispielhaften Temperaturwerten unter Annahme von feucht- und trocken-isentroper Bewegung (HANN I, „Schweizer Föhnstypus“).

here Feuchte wesentlich mehr Niederschläge zu den Alpen bringen sollte und damit ein Anwachsen der Gletscher erklären konnte. Dove, der damalige führende deutsche Meteorologe, vermutete den Ursprung der Föhnluft hingegen in Westindien (Karibik), weil dies in sein Konzept der Zwei-Strömungstheorie der Zyklo- nen passte. Kurz darauf publizierte HANN (1866) seine „thermodynamische Theorie“ des Föhns. Interessanterweise gelang ihm die endgültige Überzeugung seiner wissenschaftlichen Kontrahenten erst durch den Nachweis von Föhn in Grönland, wo eine Advektion von subtropischer Warmluft als Erklärung ausgeschlossen werden konnte. Das klassische Bild (Föhn- typus I oder Schweizer Föhnstypus) eines Berges mit luvseitigem Aufsteigen, Kondensation und Ausregnen und leeseitigem trockenem Absteigen findet sich seither in den meisten meteorologischen Lehrbüchern (Abb. 1-1). In diesen und den folgenden Abbildungen bedeuten  $\Theta$ : potentielle Temperatur,  $\Theta_e$ : äquivalentpotentielle Temperatur.

HANN, der die Beobachtungsdaten bei Föhn sehr sorgfältig auf beiden Seiten der Alpen betrachtete, entdeckte natürlich sehr bald, dass Südföhn auch ohne gleichzeitigen Niederschlag im Luv auftreten kann. Während bei Föhn in den Schweizer Alpen Niederschlag im Luv typisch ist, fällt bei Südföhn über den österreichischen Ostalpen zu weniger als 50 % der Fälle Niederschlag (SEIBERT 1990). Diesen zweiten Typus Föhn (Österreicherischer Föhnstypus, s. Abb. 1-2), der vor allem in jüngeren Lehrbüchern nur selten aufscheint, obwohl das

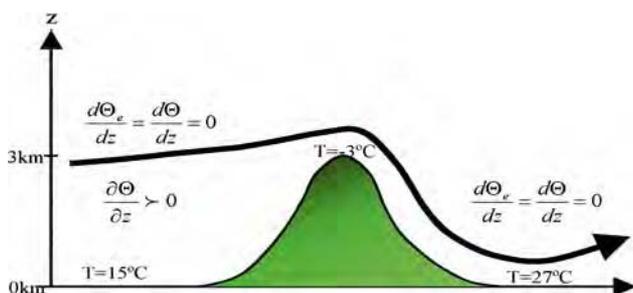


Abb. 1-2: Alternatives Bild der thermodynamischen Föhntheorie nach HANN mit beispielhaften Temperaturwerten unter Annahme von trocken-isentroper Bewegung (HANN II, „Österreichischer Föhnstypus“).

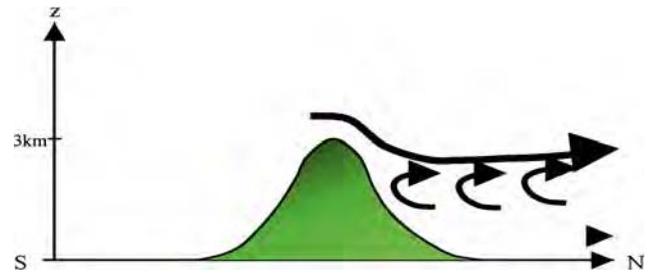


Abb. 1-3: Schematische Darstellung der turbulenten Erosion im Lee eines Gebirges (Aspirationstheorie nach STREIFF-BECKER (1931)).

Wissen darüber seit weit über hundert Jahren vorliegt, kann man durch quantitative Auswertung von langzeiti- gen Datenreihen als verantwortlich für den wesent- lichen Anteil der Föhnerwärmung ansehen. Tatsächlich ist in vielen Fällen eine Mischung beider Typen vorhan- den, die Haupterwärmung ist dem Mechanismus II zu- zuschreiben, bei vorhandenem Niederschlag liefert Me- chanismus I einen kleinen zusätzlichen Beitrag.

Gehörte um 1900 die Kenntnis von der thermodyna- mischen Natur des Föhnprozesses zum meteorologi- schen Allgemeinwissen, so stellte sich nunmehr die Frage, warum die warme Luft denn überhaupt die lee- seitigen Hänge bis in die Täler absteigt, obwohl sich doch stabil geschichtete Luft einem vertikalen Aus- tausch widersetzt. Die meisten Arbeiten zu dieser Fra- gestellung stammen aus der ersten Hälfte des vergan- genen Jahrhunderts:

- Vertikale Aspirationstheorie nach STREIFF-BE- CKER (1931). Hierbei wird angenommen, dass eine Höhenströmung, die über eine potentiell kältere Luft streicht, diese allmählich durch turbulente Erosion entfernt, wodurch die wärmere Höhenluft sukzessive nach unten vordringt (Abb. 1-3). Die grundsätzliche Idee dazu findet sich bereits um 1870 bei WILD.
- Horizontale Aspirationstheorie („passive Ersatz- strömung“) nach von FICKER (1931). Hier wird ein Absaugen der bodennahen Luft durch die Annähe- rung eines Tiefs angenommen, wodurch sich sukzes-

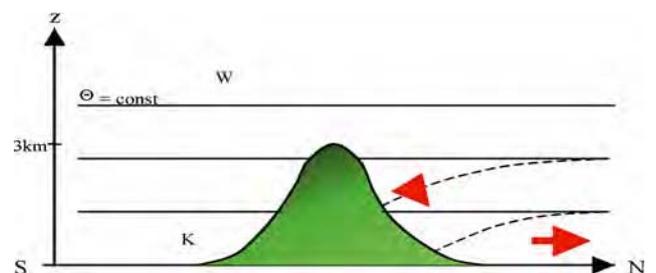


Abb. 1-4: Schematische Darstellung des Absaugens von bodennaher Luft durch die Annäherung eines Tiefs (Aspirationstheorie nach v. Ficker). Die durchgezogenen Linien repräsentieren Isentropen vor, die strichlierten nach der Wirkung der Aspiration (Pfeile). W: Warmluft, K: Kaltluft.

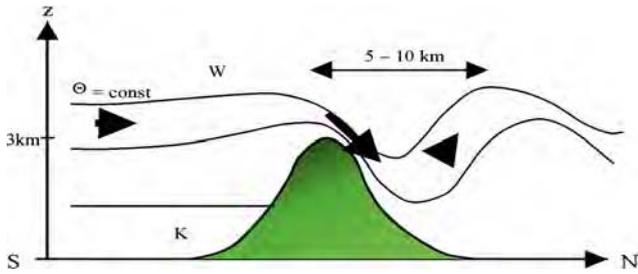


Abb. 1-5: Schematische Darstellung von Leewellen beim Überströmen eines Gebirges. Die durchgezogenen Linien repräsentieren Isentropen.

sive die potentiell warme Höhenluft bis zum Boden durchsetzt (Abb. 1-4). Durch ein nach Norden weisendes Druckgefälle kommt bodennah eine von den Alpen weg gerichtete ageostrophische Strömung auf. Eine diesbezügliche Idee geht schon auf BILLWILLER um 1900 zurück.

- Leewellentheorie: Erstmals wurde ein Wellenansatz von LYRA 1940 und QUENEY 1948 angewandt, um eine Gebirgsüberströmung zu beschreiben. Das leeseitige Absinken kann als Reaktion einer erzwungenen Auslenkung von Luft aus dem Gleichgewichtszustand durch ein Hindernis erklärt werden (Abb.1-5). Somit wird dieser Vorgang auch als erzwungenes leeseitiges Absteigen bezeichnet.
- Wasserfalltheorie nach ROSSMANN 1950. Hier wird angenommen, dass die Luft in der Föhnmauer kälter ist (eine höhere Dichte aufweist) als die weiter leeseitige Luft und somit eine Abwärtsbeschleunigung erklärt (Abb. 1-6).
- Solenoidtheorie nach FREY 1944. Hierbei wird angenommen, dass sich im Gebirgsraum ein isobarisentropes Solenoidfeld aufbaut, das nach dem Zirkulationsgesetz eine beschleunigte Strömung in Gang setzt. In der gezeigten Abbildung wäre die Zirkulationsbeschleunigung allerdings genau gegenläufig zur Föhnströmung. FREY zeigt, dass der Temperaturgradient über den Alpen und im unmittelbaren Lee umgekehrt zur Abb. 1-7 auftritt, analog Abb. 1-5, was zum richtigen Vorzeichen der Zirkulationsbeschleunigung führt.

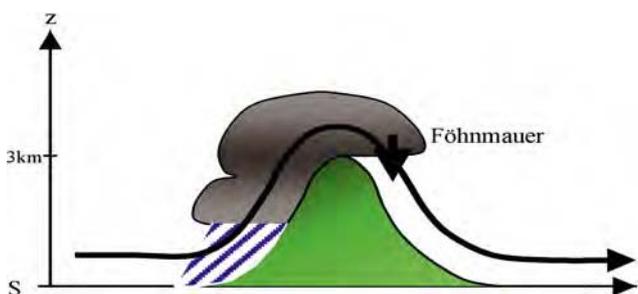


Abb. 1-6: Schematische Abbildung der Wasserfalltheorie nach ROSSMANN (1950).

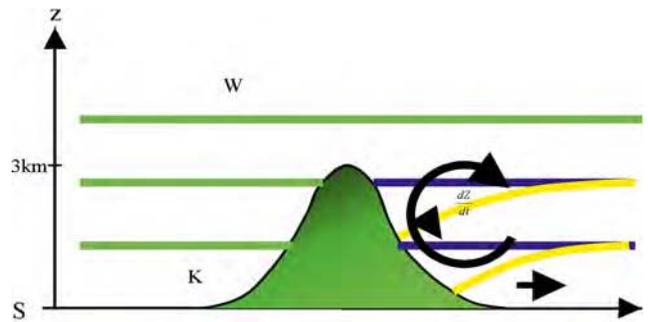


Abb. 1-7: Schematische Abbildung zur Solenoidtheorie.

- Hydraulische Theorie des Föhns nach SCHWEIZER 1953. Analog einer flachen Wasserströmung über ein Wehr hat Schweizer die niedertroposphärische Föhnströmung in ihrem leeseitigen Verhalten als schießende Strömung mit der Möglichkeit eines hydraulischen Sprungs interpretiert (Abb. 1-8).

Die größer werdende Bedeutung der korrekten Repräsentation der Gebirge in numerischen Wetterprognosemodellen brachte es mit sich, dass während des internationalen meteorologischen Alpenen Experiments 1982 (s. *promet* 3-4/1991 und 1/1992) der alpine Föhn wieder als ein Forschungsschwerpunkt aufgegriffen wurde. Leider trat während der Feldphase von ALPEX kein einziger brauchbarer Föhnfall auf. Allerdings wurden kurz nach Ende der Feldphase mit beachtlichem Erfolg mehrere exemplarische Südföhnfälle mit zusätzlichem Instrumentarium untersucht. Dabei wurde klar, dass die alpine Föhnströmung nicht allein als Überströmung des Massivs sondern auch in Form einer „Durchströmung“ besteht. Zahlreiche Pässe im Alpenmassiv lassen die Höhe des Hauptkamms mit einer beträchtlichen feinskaligen Varianz erscheinen (Abb. 1-9).

Die rasante Entwicklung der numerischen Modellierung der Atmosphäre einerseits und die Verfügbarkeit von neuartigen in situ und Fernerkundungsmethoden zur dreidimensionalen Erfassung des hochaufgelösten Massen- und Windfeldes gaben der Föhnforschung im Rahmen von MAP erneut eine Chance zur Beantwortung einer Reihe noch offener Fragen:

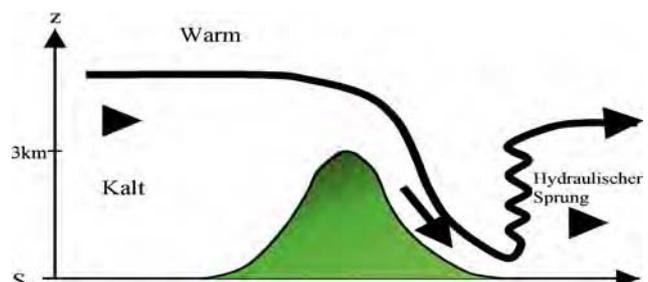


Abb. 1-8: Schematische Darstellung des Föhns als schießende hydraulische Strömung mit hydraulischem Sprung.

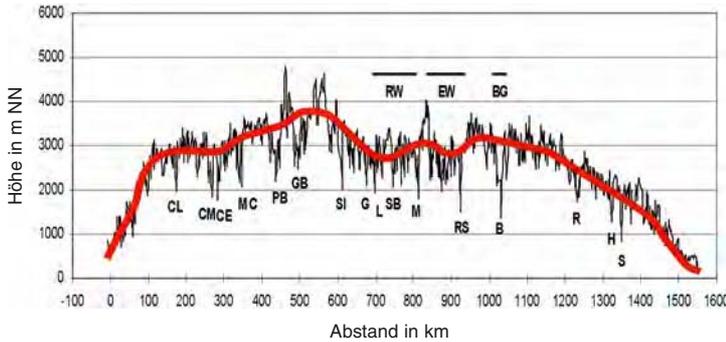


Abb. 1-9: Höhen-Profil längs des Alpenhauptkamms von den Seealpen (links) bis nach Wien (rechts). Die dicke Linie ist der tiefpassgefilterte Verlauf. Die Abkürzungen geben markante Pässe an: CL: Col de Larche, CM: Col de Montgenevre, CE: Col de l'Echelle, MC: Mont Cenis, PB: Kleiner St. Bernhard, GB: Großer St. Bernhard, SI: Simplon, G: St. Gotthard, L: Lukmanier, SB: San Berardino, M: Maloja, RS: Reschenpass, B: Brennerpass, R: Radstätter Tauern, H: Hoher Tauernpass, S: Schoberpass. Markante Eintiefungen sind das Rheintalfenster (RW), das Engadiner Fenster (EW) und die Brennersenke (BG).

- a) Welche Rolle spielt die turbulente Erosion der bodennahen Kaltluft beim Föhndurchbruch?
- b) Lässt sich die bodennahe Föhnströmung mit der hydraulischen Theorie (Flachwassergleichungen) hinreichend beschreiben?
- c) Was ist die Rolle der Passfurchen („gaps“) quer zum Alpenkamm?
- d) Was ist die Rolle der Strömung in den Seitentälern bei Föhn?
- e) Warum ist die bodennahe Föhnströmung so instationär, warum gibt es Föhnpausen?
- f) Wie organisiert sich die Föhnströmung bei signifikanten Änderungen der Talrichtung oder bei Talverzweigungen („flow splitting“)?
- g) Wie gut sind die heutigen operationellen numerischen Prognosemodelle bzw. experimentelle hoch auflösende Modelle in der Lage, das lokale Föhnverhalten zu prognostizieren?

Anhand von ausgewählten Ergebnissen soll im nächsten Abschnitt auf diese Fragen eingegangen werden.

nicht zuletzt Flugzeugmessungen erlaubten die Gewinnung eines Datensatzes, der sowohl qualitativ als auch quantitativ noch nie auch nur annähernd für die Föhnforschung zur Verfügung stand.

Um die Rolle der turbulenten Erosion (*Frage a*) zu untersuchen, wurden im Bereich des Kaltluftsees im nördlichen breiten Alpenrheintal südlich vom Bodensee neben den Radiosonden und Fesselballonen ein RASS-System betrieben, Flugzeugprofile mit einem Motorsegler durchgeführt sowie numerische Modellrechnungen mit ultra hoher Auflösung erstellt. Abb. 1-10 zeigt einen Vergleich eines Föhndurchbruchs, beobachtet mittels RASS und dem Ergebnis der Simulation mit dem MESO-NH Modell mit 625 m horizontaler Auflösung. Der Vergleich zeigt eine außerordentlich gute Übereinstimmung beim Föhndurchbruch und selbst für die kurze Föhnpause. Allerdings ist dieses Ergebnis nur dadurch so perfekt, weil der Kaltluftsee in der Anfangsbedingung bei der Modellierung realistisch vorhanden ist, was bei Verwen-

### 3 Ausgewählte Ergebnisse der Föhnstudien im Rheintal während MAP

Die Fragestellungen zum gap-flow wurden hauptsächlich im Bereich Wipptal-Innsbruck durchgeführt, da dort die topographischen Gegebenheiten hinreichend einfach gestaltet sind. Im Rheintal wurden – bedingt durch die komplexe Topographie – zahlreiche zusätzliche Messplattformen installiert. Neben einem Boden-Meso-Netz operierten bis zu 9 zusätzliche Radiosondenstationen mit zum Teil dreistündigen Messintervallen. Mehrere SODAR und Windprofilieranlagen sowie im Bereich des „Flow-splittings“ bei Sargans ein Doppler-LIDAR, Fesselsonden, Szintillometermessungen, ein vertikal gerichtetes Raman LIDAR, mobile Messplattformen und

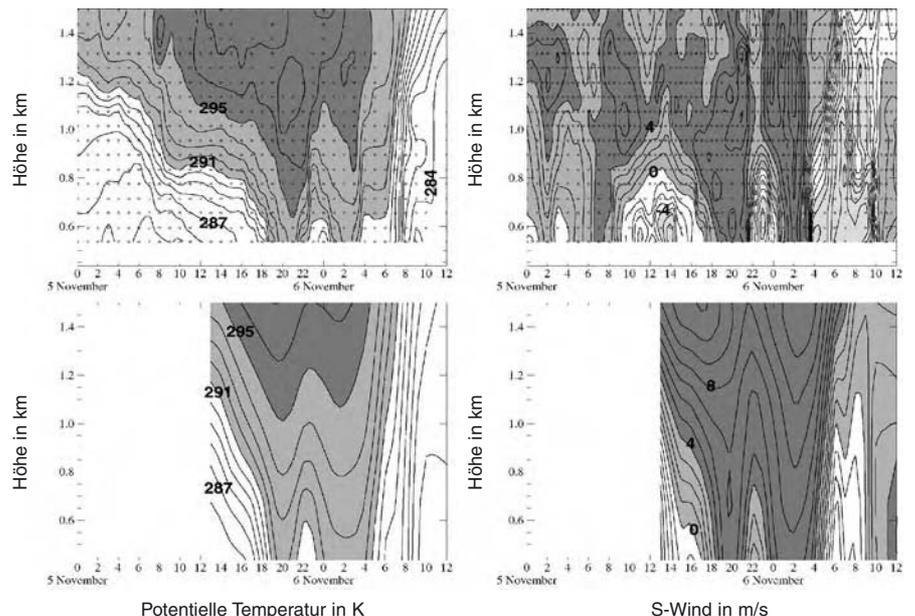


Abb. 1-10: Vergleich von Messungen (oben) mit Ergebnissen des Simulationsmodells MESO-NH (unten) für die potentielle Temperatur (links) und die Südwind-Komponente (rechts) vom 5. November 1999 00 UTC bis 6. November 12 UTC. Dargestellt sind die Bereiche zwischen Boden und 1500 m über Grund (nach VOGT und JAUBERT 2004).

dung allein des konventionellen Beobachtungsnetzes unmöglich gewesen wäre.

Bei diesem und anderen Fällen zeigt sich sehr deutlich, dass zwar die turbulente Erosion effektiv ist, jedoch advektive Prozesse im Kaltluftsee dominieren. Somit ist es äußerst wichtig, die Dynamik der leeseitigen Kaltluftseen mit in die Betrachtung einzubeziehen.

Die *Frage b*) wurde schwerpunktmäßig im Wipptal untersucht (vgl. MAYR und GOHM; Kapitel 2 in diesem Heft). Auch im Rheintal zeigt sich typischerweise eine signifikante thermische Schichtung, die zwischen der Strömung im Tal und der Strömung in der darüber befindlichen unteren Troposphäre unterscheiden lässt. Der Beginn einer Föhnepisode zeichnet sich durch eine relativ flache im Tal kanalisierte Strömung (seichter Föhn) aus, die erst später in der Höhe eine Korrespondenz findet. Speziell der seichte Föhn lässt sich in den Grundzügen mit der hydraulischen Theorie hinreichend genau beschreiben. Selbst das unterschiedliche Verhalten bezüglich der Massenaufteilung beim „flow-splitting“ scheint durch diesen Ansatz erklärbar. (DROBINSKI et al. 2001).

Passfurchen (*Frage c*) erlauben der relativ kühlen luvseitigen Luft bei Föhn ein Durchströmen in Richtung Lee. Da das Rheintal zahlreiche Passübergänge aufweist, führt dies durch die beständige bodennahe Kaltluftadvektion zu relativ niedrigen (potentiellen) Temperaturen im oberen Alpenrheintal. Außerdem prägen die einzelnen Passübergänge die sehr spezifische räumliche Verteilung der Föhnstriche.

Neben den Seitentälern vom Alpenhauptkamm in Richtung Haupttal, die als Lieferanten für luvseitige Luft dienen, wurde beim Subprogramm FORM auch ein weit leeseitig gelegenes Seitental näher untersucht (*Frage d*). Das Brandner Tal in Vorarlberg ist eines der bekanntesten Föhntäler mit der Besonderheit, dass der lang gezogene Hauptort Brand vom Föhn sehr unterschiedlich betroffen ist. Während der Südteil (Innerbrand) bei Südföhn üblicherweise von heftigem Wind betroffen ist, ist im wenige km nördlich gelegenen Ortsteil Ausserbrand davon nichts zu spüren. Die Untersuchung des Verlaufes des horizontalen Druckgradienten längs der Talsohle erbrachte bei Föhn praktisch immer ein ausgeprägtes Minimum bei Innerbrand (Abb. 1-11). Eine vergleichende Modellsimulation mit MESO-NH zeigt genau an dieser Stelle eine ausgeprägte Leewelle, mit der eine entsprechende Störung im Druck- und Windfeld einhergeht. Der Föhnsturm in Innerbrand läuft weiter nördlich gegen das Druckgefälle an, wodurch sich auf kurze Distanz eine drastische Abbremsung der Luft ergibt.

Die starke zeitliche Variabilität der Föhnströmung im Rheintal (*Frage e*) kann dadurch erklärt werden, dass die Strömung im Tal mit ihrem hydraulischen Charakter sensitiv auf geringfügige Veränderung der Stabi-

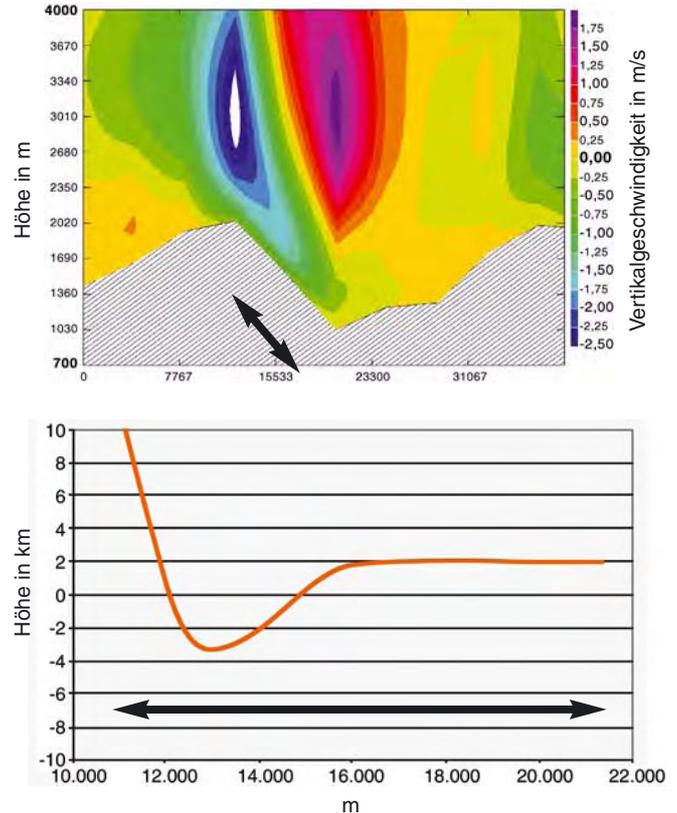


Abb. 1-11: Markante Leewelle im N-S Profil über dem Vorarlberger Brandnertal nach einer Modellsimulation mit dem MESO-NH Modell. Gezeigt ist das Vertikalbewegungsfeld in m/s (oben, rechte Skala). Auf der Abszisse ist die Distanz in m vom südlichsten Punkt des Ausschnitts, auf der Ordinate ist die Höhe in m über dem Meer angegeben. Die rote Kurve (unten) zeigt den horizontalen Druckverlauf längs der von Süden nach Norden abfallenden Talsohle ausgedrückt als relative geopotentielle Höhe einer Druckfläche bezogen auf einen Referenzpunkt. Dieser Druckverlauf wurde durch die stückweise Zusammensetzung von auf die jeweils mittlere Höhe der Talsohle reduzierten Druckdifferenzen zweier Nachbarstationen erzeugt (nach STEINACKER et al. 2003).

lität/Geschwindigkeit mit einer Verschiebung von Wellen/hydraulischen Sprüngen reagiert. Die vielfachen Richtungsänderungen des Rheintals führen weiter zu raschen Änderungen der Dicke der relativ kühlen (seichten) Föhnluft, die über die Passenken ins Rheintal gelangt ist. Schließlich führt das obere Wellenregime zu einer Modulation des bodennahen Druckfeldes mit entsprechender Auswirkung auf das Windfeld.

Durch das im Rheintal während MAP installierte Mesonetz konnte das komplexe Druckfeld analysiert (Abb. 1-12) und mit Modellsimulationen verglichen werden (Abb. 1-13). Das Druckbild bei Föhn (Abb. 1-12) spiegelt grob die Dickenverteilung der relativ kühlen (seichten) Föhnluft wieder. Dem Vorderreintal folgend nimmt der Druck (die Dicke) bis Chur ab, um vor dem Knick des Tales nach West ein sekundäres Druckpolster (D) aufzuweisen. Dieses Druck-

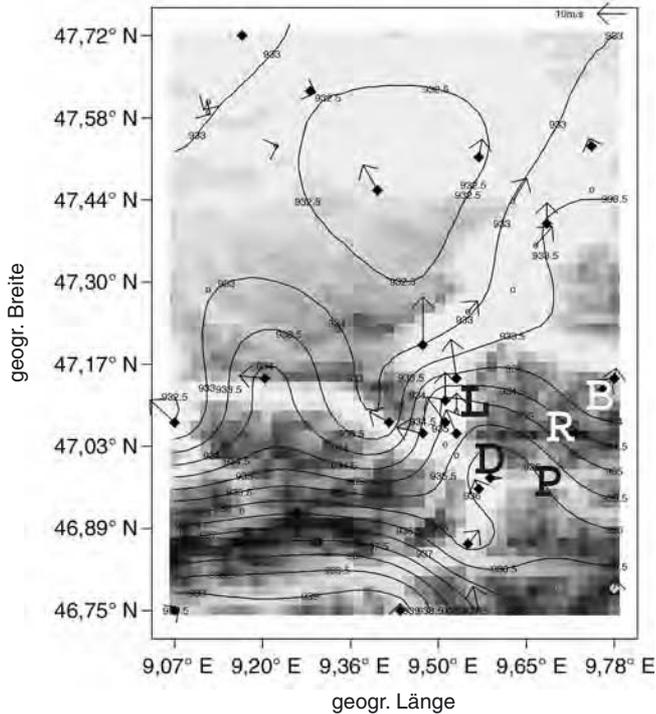


Abb. 1-12: Druckfeld in 550 m NN am 24. 10. 1999, 13 UTC, Isobaren im 0,5 hPa Abstand und Windpfeile. Das Raster der untergelegten Topographie entspricht dem Analyseraster von etwa 2 km. Die Schattierung gibt die mittlere Höhe der Gitterzellen an. Die hellste Graustufe entspricht einer Höhe von unter 600 m, die dunkelste von über 2600 m (nach CHIMANI 2002).

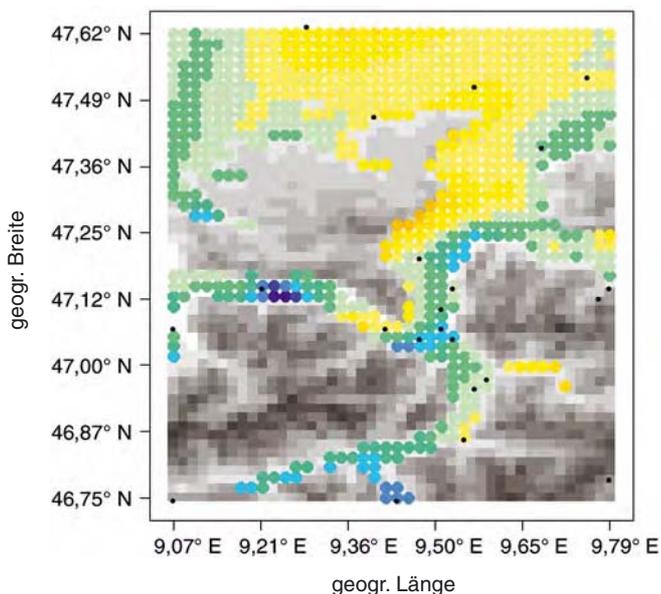


Abb. 1-13: Differenz zwischen analysiertem Druck in 550 m NN und simuliertem Druck mittels MM5-Modell am 24.10.1999 um 13 UTC. Die Farbabstufung wechselt in 0,5 hPa-Stufen (gelb: Modell 1-2 hPa höher als Beobachtung, grün-blau: Modell 1-2 hPa tiefer als Beobachtung; nach ZÄNGL et al. 2004).

polster, das auch vom Innsbrucker Föhn bekannt ist (VERGEINER et al. 1982) ist notwendig, um die Strömung nach Westen umzulenken (*Frage f*). Er ist übrigens auch verantwortlich dafür, dass der Föhn im Prätigau (P) nicht in Erscheinung tritt. Des Weiteren dürfte dieses Druckpolster auch die Überströmung des Rätikons (R) mit der sekundären Föhnwelle im Brandner Tal (B) begünstigen. Der Vergleich mit einer hochauflösenden Simulation mit dem MM5-Modell (ZÄNGL et al. 2004) zeigt, dass das Druckfeld insgesamt recht gut getroffen wird. In Details, wie einem quer zum Tal liegendem Druckgefälle im Rheintal bei Liechtenstein (L), das auch eine erhebliche Querkomponente der Föhnströmung in diesem Gebiet bewirkt (Abb. 1-13), sind jedoch Unterschiede feststellbar.

Bei der Beurteilung der Qualität der heute operationellen mesoskaligen Prognosemodelle (*Frage g*) ist zu berücksichtigen, dass selbst die horizontale Auflösung von knapp 10 km bei weitem nicht ausreicht, alle Details und lokalen Eigenheiten des Föhns zu wiederzuspiegeln. Erst ab einer Maschenweite von rund 1 km ist die Topographie hinreichend aufgelöst, um realistische Details zu zeigen. Die Erhöhung der räumlichen Auflösung ist jedoch nicht das einzige Kriterium, um die lokale Föhnprognose in Zukunft erfolgreich modellbasiert in den Griff zu bekommen. Das Ergebnis ist in hohem Maß abhängig von der Qualität der Anfangsbedingung, vor allem der richtigen Inkorporation der leeseitigen Kaltluftseen. Des Weiteren ist die korrekte Wiedergabe des komplexen instationären dreidimensionalen oberen Wellenregimes mit der Möglichkeit von brechenden Wellen und seine Auswirkung auf die bodennahe Föhnströmung essentiell. In der Skala der Wellenbewegung bei Föhn ist auch die adäquate Auswertung von Daten sehr wichtig. Werden z. B. Radiosondierungen konventionell als Vertikalprofil interpretiert, so kann sich das Bild deutlich von dem unterscheiden, welches sich unter Berücksichtigung der Ballondrift ergibt (Abb.1-14).

#### 4 Synthese und Ausblick

Betrachtet man die vielen frühen Beiträge zur Föhntheorie, die in Abschnitt 2 dargestellt sind, so kann man im Lichte des heutigen Wissens eine Wertung versuchen. Die turbulente Erosion der bodennahen Kaltluft ist ein durchaus relevanter Prozess beim Durchbruch des Föhns, tritt allerdings gegenüber advektiven Prozessen im Kaltluftsee in den Hintergrund. Die horizontale Aspirationstheorie ist in vielen Fällen für den Aufbau eines Temperatur- und damit auch Druckgefälles zwischen beiden Seiten des Gebirges verantwortlich. Allerdings kann auch ein inverser Prozess, nämlich das Aufstauen von luvseitiger Luft für eben denselben Effekt verantwortlich sein. Die Leewellentheorie ist für die bodennahe Föhnströmung nur in Ausnahmefällen als Erklärung zutreffend. Hier muss ein Gebirgszug in passender Ausdehnung vorhanden sein,

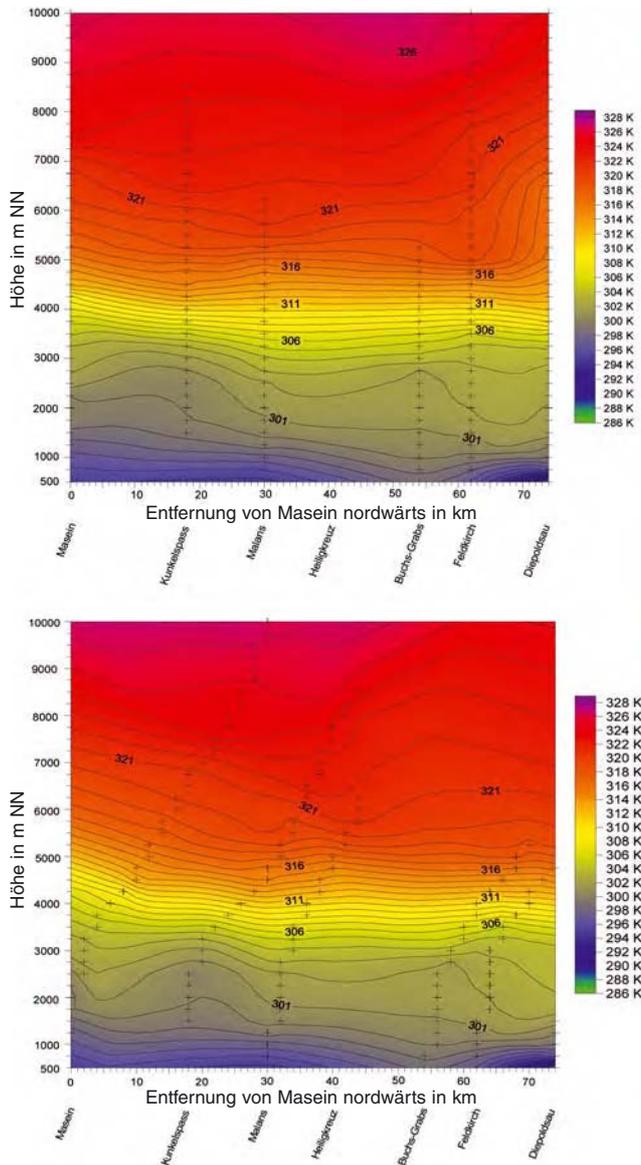


Abb. 1-14: Vergleich einer Querschnittsanalyse der potentiellen Temperatur im Rheintal bei Föhn ohne (oben) und mit (unten) Berücksichtigung der Ballondrift (nach TSCHANNETT 2003).

wie dies z. B. im Brandnertal der Fall ist. Hingegen ist in den alpinen Föhntälern die hydraulische Theorie meist gut in der Lage, die Wesenszüge der Föhnströmung zu beschreiben. Die Wasserfalltheorie mag gelegentlich ganz lokal bei zyklonalem Föhn mit Übergreifen des Niederschlags ins Lee einen Zusatzeffekt ausmachen, als isolierte Föhntheorie ist sie aber sicher nicht zutreffend. Schließlich ist zur Solenoidtheorie zu bemerken, dass dieser Ansatz, der sich bei thermisch direkt getriebenen Zirkulationen wie dem Talwind als Erklärung sehr bewährt, bei dynamischen Windsystemen zu keiner kausalen Erklärung führt. Ist das Solenoidfeld Ursache oder Folge der Föhnströmung?

Abschließend stellt sich die Frage, ob denn überhaupt neue und wesentliche Erkenntnisse durch die Föhnforschung im Rahmen von MAP erzielt wurden. Dies

kann in zweierlei Hinsicht bejaht werden: erstens konnte eindeutig gezeigt werden, dass der Föhn in all seiner räumlich-zeitlichen Komplexität mit hinreichend auflösenden Modellen erfolgreich prognostiziert werden kann, allerdings nur unter Berücksichtigung der im vorigem Abschnitt erläuterten Voraussetzungen. Zweitens konnte durch die dreidimensionale Erfassung des Massen- und Windfeldes sowohl im Wipp- als auch im Rheintal die hydraulische Natur des Föhns in den unteren Schichten (seichter Föhn) klar belegt werden. Hydraulisch kann sich aber nur ein vergleichsweise dichteres Fluid (kältere Luft) verhalten, das leeseitig oder jenseits einer Engstelle der Schwere folgend nach unten strebt. Somit ist die Definition von Föhn als „warmer leeseitiger Wind“ oder gar „warmer Fallwind“ falsch oder zumindest irreführend. Meteorologisch korrekt handelt es sich beim Föhn um nichts anderes als eine Bora, die eine vorher vorhandene, noch kältere Luft (Kaltluftsee) im Tal ersetzt, also streng genommen um eine „maskierte Bora“ (Abb. 1-15). Diese kann natürlich auch wie die klassische Bora, wo die Adria die Bildung eines Kaltluftsees verhindert, vom Wellenregime in den oberen Luftschichten moduliert werden bzw. mit diesem in Wechselwirkung treten. Auch wenn die alpine Bevölkerung wohl kaum – oder lediglich zu Karnevalszeiten – bereit sein dürfte, den Föhn in Hinkunft als „maskierte Bora“ zu benennen, so sollte zumindest in der meteorologischen Fachliteratur eine korrekte Darstellung dieses faszinierenden dynamisch-thermodynamischen Prozesses geboten werden.

Bietet die Föhnforschung auch in Zukunft noch ein wissenschaftliches Betätigungsfeld? Beträchtliche Wissenslücken bestehen einerseits in der Kenntnis der kleinräumigen Föhnverteilung im Alpenraum. Bisher fokussieren die relevanten Arbeiten lediglich auf wenige ausgewählte Föhntäler, eine flächendeckende Kenntnis dieses klimarelevanten Phänomens steht noch aus. Dasselbe gilt für die Erforschung von Föhn/Boraerscheinungen in anderen Gebirgszügen der Welt. Ein weiteres großes Betätigungsfeld gilt den Wellenerscheinungen im Zusammenhang mit Föhn. Die von Segelfliegern geschätzten laminaren Wellen und von der Zivilluftfahrt gefürchteten Rotoren und brechenden Wellen mit schwerer Turbulenz sind bisher

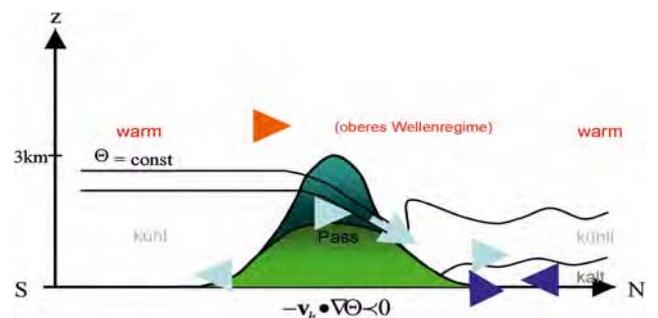


Abb. 1-15: Schematisches Bild einer Föhnströmung in einem von Pässen durchsetzten Gebirge.

weder diagnostisch noch prognostisch hinreichend erfasst. Vielleicht bleibt dies noch längere Zeit eine der Nischen, wo sich die Natur nur schwer in die Karten blicken lässt.

### Danksagung

Für die finanzielle Unterstützung von FORM sei an dieser Stelle den nationalen und internationalen Förderinstitutionen gedankt, in Österreich dem Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung im Rahmen des Projekts P-12488-TEC. Ferner sei allen Mitgliedern der FORM Working Group aus der Schweiz, Frankreich, Deutschland und Österreich für die langjährige fruchtbringende wissenschaftliche Kooperation gedankt.

### Literatur

- CHIMANI, B., 2002: Hochaufgelöste Analysen von Druck- und Temperaturfeldern während Föhn im Rheintal. Diplomarbeit, Univ. Wien, [http://www.univie.ac.at/IMG-Wien/dipldiss/dipl/DA\\_Chimani.pdf](http://www.univie.ac.at/IMG-Wien/dipldiss/dipl/DA_Chimani.pdf).
- DROBINSKI, P., A. M. DABAS, C. HAEBERLI, P. H. FLAMANT, 2001: On the small-scale dynamics of flow splitting in the Rhine valley during a shallow foehn event. *Boundary-Layer Meteorol.* **99**, 277-296.
- FICKER, H. v., 1931: Warum steigt der Föhn in die Täler herab? *Meteorol. Z.* **48**, 227-229.
- FLIRI, F., 1975: Das Klima der Alpen im Raume von Tirol. *Universitätsverlag Wagner*, Innsbruck, 454 S.
- FREY, K., 1944: Zur Entwicklung des Föhns. *Verh. Schweiz. Naturforsch. Ges. Sils*, S 90.
- HANN, J., 1866: Zur Frage über den Ursprung des Föhns. *Zeitschrift der österr. Gesell. für Meteorol.* **1**, 257-263.
- KUTZBACH, G., 1979: The thermal theory of cyclones: A history of meteorological thought in the nineteenth century, *Amer. Meteorol. Soc.*, Boston, 255 S.
- LECHNER, W., R. STEINACKER, R. OBERAIGNER, H. HAUFFE, 1981: Föhn und Geburt, *Gynäkol. Rdsch.* **21**, 177-178.
- LYRA, G., 1940: Über den Einfluß von Bodenerhebungen auf die Strömung einer stabil geschichteten Atmosphäre. *Beitr. Phys. fr. Atmos.* **26**, 197-206.
- QUENEY, P., 1948: The problem of the airflow over mountains: a summary of theoretical studies. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **29**, 16-26.
- RICHNER, H., 1983: Neuere Erkenntnisse über die physikalischen Ursachen der Föhnbeschwerden. Schweiz. Ges. f. Balneologie u. Bioklimatologie, in KUHN, M. (Hrsg.), 1989: Föhnstudien, *Wiss. Buchges. Darmstadt*, 484-496.
- ROSSMANN, F., 1950: Über das Absteigen des Föhns in die Täler. *Berichte des deutschen Wetterdienstes der US-Zone* **12**, S. 94-98.
- SCHWEIZER, H., 1953: Versuch einer Erklärung des Föhns als Luftströmung mit überkritischer Geschwindigkeit. *Arch. Meteorol. Geophys. Biokl.* **A5**, 350-371.
- SEIBERT, P., 1990: South foehn studies since the ALPEX experiment. *Meteorol. Atmos. Phys.* **43**, 91-103.
- STEINACKER, R., M. SPATZIERER, M. DORNINGER, C. HAEBERLI, 2003: Selected results of the FORMAT field experiments. *Österr. Beitr. Meteorol. Geophys.* **29**, 55-70.
- STIEGER, B, P. ZIMMERMANN, 1983: Föhnfieber. *Unionsverlag*, Zürich 156 S.
- STREIFF-BECKER, R., 1931: Zur Dynamik des Föhns. *Meteorol. Z.* **48**, 149-152.
- TSCHANNETT, S., 2003: Objektive hochaufgelöste Querschnittsanalyse. Diplomarbeit, Univ. Wien, [http://www.univie.ac.at/IMG-Wien/dipldiss/dipl/DA\\_Tschannett.pdf](http://www.univie.ac.at/IMG-Wien/dipldiss/dipl/DA_Tschannett.pdf).
- VERGEINER, I., R. STEINACKER, E. DREISEITL, 1982: Der Südföhn vom 4/5. Mai 1982: Feinanalysen von Druck und Wind im Inntal und Wipptal. GARP-ALPEX Publ. No. 7, in KUHN, M. (Hrsg.), 1989: Föhnstudien, *Wiss. Buchges. Darmstadt*, 52-74.
- VOGT, S, G. JAUBERT, 2004: Foehn in the Rhine valley as seen by a wind-profiler-RASS system and comparison with the non-hydrostatic model Meso-NH. *Meteorol. Z., N.F.* **13**, 165-174.
- ZÄNGL, G., B. CHIMANI, C. HÄBERLI, 2004: Numerical simulations of the foehn in the Rhine valley on 24 October 1999 (MAP IOP 10). *Mon. Wea. Rev.* **132**, 368-389.

G. J. MAYR, A. GOHM

## 2 Schnelle Strömungen durch Gebirgseinschnitte

### Fast flows through mountain gaps

#### Zusammenfassung

Gebirgseinschnitte ermöglichen Luft den direkten Weg von einer Seite eines Gebirges auf die andere. Häufig treten dabei hohe Windgeschwindigkeiten im Lee auf. Die Dynamik dieser kleinräumigen Strömungen wird mit einem einfachen Konzeptmodell erklärt und anhand von Messungen entlang der Brennersenke illustriert. Die synoptischen Voraussetzungen für das Auftreten solcher Winde und daraus resultierende Möglichkeiten der subjektiven und objektiven Vorhersage werden beschrieben.

#### Abstract

Instead of having to go around or over a mountain range, gaps and passes provide the direct route for air to flow from one side to the other. Frequently strong winds are observed downstream of these gaps. A conceptual model explains the dynamics of these small-scale gap flows. Measurements along the Brenner Pass in the central Alps exemplify a gap flow. The necessary larger-scale conditions for such gap winds to occur along with ensuing possibilities for forecasting them both subjectively and objectively are described.

### 1. Einleitung

Gebirgsketten sind selten glatte Rücken. Einschnitte unterschiedlicher Tiefen durchfurchen sie. Dadurch kann Luft von einer Seite auf die andere strömen, ohne den Umweg über den Gebirgskamm oder um das Gebirge herum nehmen zu müssen. Die Strömung wird dabei stark von den topographischen Details der Gebirgslücken beeinflusst. Es kann zu asymmetrischen Strömungen kommen, mit einer langsam fließenden relativ dickeren Schicht im Luv, die im Lee beschleunigt und dabei dünner wird. Vielerorts weisen diese Strömungen Charakteristika von Föhn auf, wobei wir hier den Föhn entsprechend der WMO-Definition (WMO 1992) als starken böigen Wind bezeichnen, der durch das Herabsteigen im Lee eines Gebirges erwärmt und relativ ausgetrocknet wird. Dadurch ändert sich der Wasserdampfgehalt nicht, aber durch die Temperaturerwärmung sinkt die relative Feuchte.

Als Beispiel für die Durchfurchung der Alpen dient ein Schnitt entlang des Hauptkamms zwischen Nord- und Südtirol (Abb. 2-1). Die Brennersenke besteht aus einem etwa 20 km breiten Einschnitt in etwa 2,1 km Meereshöhe und einem engeren und tieferen (bis 1,4 km Meereshöhe) Einschnitt, durch den nur weniger als 10 % an Masse strömt. Das Wipptal, eine berühmte Föhnregion nördlich des Brenners, macht im unteren Drittel eine Kurve um etwa 20° und endet im querverlaufenden Inntal am etwa 2,2 km hohen Gebirgszug der Nordkette (vgl. Abb. 2-4). Zusätzlich münden mehrere Seitentäler ein.

Auch andere bekannte alpine Föhngebiete wie das Reuss- und Rheintal liegen stromabwärts von Gebirgseinschnitten. Die Schneisen mit starker Bora am Fuß

der Dinarischen Alpen liegen ebenso stromabwärts eines Einschnitts (z. B. der Ort Senj im Lee des Vratnik Passes) wie die Orte mit starken Windstürmen am Ostabhang der Sierra Nevada, die in den 50er Jahren Schauplatz des Sierra Wave Projekts waren und wo jetzt wieder eine Feldmesskampagne durchgeführt wird (vgl. DÖRNBRACK et al.; Kapitel 3 in diesem Heft).

Im Folgenden beschränken wir uns auf die meteorologisch interessanteren asymmetrischen Strömungen mit relativ hohen Windgeschwindigkeiten stromabwärts von Einschnitten. Diese Einschnitte können einen Kanal bilden, der nur seitliche Verengungen hat, dessen

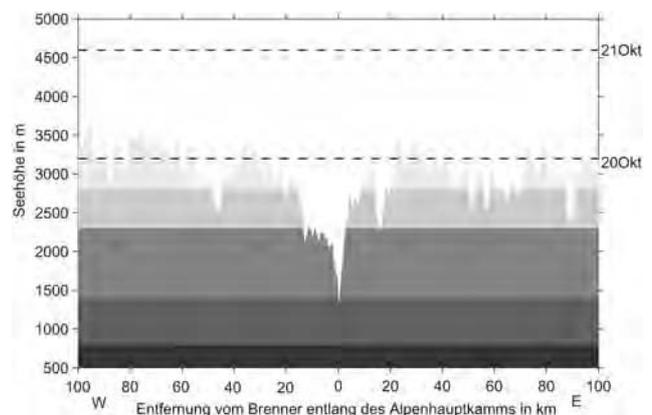


Abb. 2-1: Alpenhauptkamm zwischen Nord- und Südtirol mit den deutlich sichtbaren Einschnitten. Der tiefste ist die als Doppelseinschnitt ausgeformte Brennersenke. Zwei Beispiele aus der Feldmessphase des Mesoskaligen Alpinen Programms (MAP) zeigen die stromaufwärtige Obergrenze einer reinen Einschnittströmung (20. Oktober 1999) bzw. einen Fall, wo die Strömung durch die Einschnitte und über den Hauptkamm ging (21. Oktober 1999).

Boden also horizontal verläuft, einen gleichmäßig breiten Kanal, der in ein Gebirge eingeschnitten ist und daher von unten her eine vertikale Verengung erfährt, oder (der häufigste Fall) eine Kombination aus seitlicher und vertikaler Verengung mit einem Gebirgspass an der engsten und höchsten Stelle. Im Gegensatz zu den Strömungen über Hindernisse gibt es relativ wenige Untersuchungen zu Strömungen durch Gebirgseinschnitte. PAN und SMITH (1999) geben eine Zusammenfassung der Studien vor dem Mesoscale Alpine Programme (MAP), bei dem ein Schwerpunkt genau solche Strömungen durch Einschnitte waren (MAYR et al. 2004). Eines der beiden Föhngebiete, in dem intensiv gemessen und numerisch simuliert wurde, ist die Brennersenke in den Zentralalpen. Beispiele in diesem Artikel stammen aus diesen MAP-Untersuchungen.

## 2. Strömungsdetails

Strömt Luft auf ein Gebirge zu, hängt das Verhalten in erster Näherung von einer Kombination aus statischer Stabilität (ausgedrückt über die Brunt-Väisälä Frequenz  $N$ ), Gebirgshöhe  $H$  und Windgeschwindigkeit (quer zum Gebirge)  $U$  in der Form einer dimensionslosen Gebirgshöhe  $HN/U$  ab (z. B. SCHÄR 2002). Für niedrige Werte, d. h. niedrige Gebirge, geringe Stabilität und/oder hohe Windgeschwindigkeit wird die Luft über das Gebirge strömen, für hohe dimensionslose Gebirgshöhen um das Gebirge herum. Dabei können im Lee, stromabwärts der Gebirgsflanken, Wirbel mit vertikaler Achse entstehen. Ein Einschnitt hat eine niedrigere Höhe als der Gebirgskamm. Es wird also auch bei einer Situation, wo es für das Gebirge als Ganzes gesehen zu einer Umströmung kommt, durchaus möglich sein, dass die Luft über den Einschnitt und damit „durch“ das Gebirge fließt.

### 2.1 Hydraulisches Konzeptmodell

Konzeptmodelle für Gebirgsströmungen beruhen traditionell auf den linearisierten Strömungsgleichungen. Schwerewellen spielen dabei eine wichtige Rolle. Sie entstehen, wenn das Gebirge die Luft vertikal auslenkt. Ist die Atmosphäre stabil geschichtet, unterscheidet sich die Dichte des ausgelenkten Luftpakets von seiner neuen Umgebung und es wird zurück zur Ausgangshöhe gelenkt. Gleichzeitig mit dieser Vertikaloszillation transportiert der Umgebungswind das Luftpaket auch horizontal weiter.

Wegen der Seichtheit der Einschnittströmung und dem Auftreten von abrupten Übergangszonen („Sprünge“) bietet sich hingegen die Flachwasserapproximation („hydraulische Theorie“) zum konzeptionellen Verständnis an, siehe dazu auch Kapitel 1, Seite 5 sowie Abb. 1-8. An diesen Sprüngen geht die Geschwindigkeit abrupt und turbulent zurück und die Vertikalaus-

dehnung der Einschnittströmung nimmt zu. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der hydraulischen Theorie ist, dass die Horizontalausdehnung der Strömung viel größer als deren Vertikalausdehnung ist und dass jede Schicht von der darüber liegenden durch eine Stufe der potentiellen Temperatur (z. B. durch eine Inversion) getrennt ist.

Die hydraulische Theorie ist ein integraler, nichtlinearer Ansatz. Die Atmosphäre wird in der Vertikalen in jeweils homogene inkompressible Schichten (mit konstanter potentieller Temperatur) geteilt, die voneinander durch stabile Grenzflächen (Zunahme der potentiellen Temperatur) getrennt sind. Die Vereinfachung liegt also darin, dass über die Vertikale pro Schicht nur ein integraler Mittelwert genommen wird. Was im Gegensatz zum linearisierten Schwerewellenansatz beibehalten wird, sind die nichtlinearen Terme, die bei den Einschnittströmungen eine zentrale Rolle spielen. Auch die integrale Auswirkung der Turbulenz in den Sprüngen ist enthalten. Entlang der Grenzflächen zwischen den Schichten breiten sich interne Schwerewellen mit einer Phasengeschwindigkeit von

$$c = \sqrt{hg \frac{\Delta\Theta}{\Theta_0}} \quad (1)$$

in alle Richtungen aus. Je größer die Schichtdicke  $h$ , desto schneller die Welle; ebenso je stärker der potentielle Temperatursprung  $\Delta\theta$  am Oberrand der Schicht ( $g$  ist die Schwerebeschleunigung). Diese Schwerewellen werden hauptsächlich durch Unebenheiten im Gelände ausgelöst, die eine Verformung der Schicht bewirken. Ist die Phasengeschwindigkeit größer als die Strömungsgeschwindigkeit der Schicht („unterkritisch“), kann sich die Schwerewelle auch stromaufwärts ausbreiten und die Strömung von der weiter stromabwärts liegenden Störung „informieren“. Ist hingegen die Strömungsgeschwindigkeit größer als die Phasengeschwindigkeit („überkritisch“), kann sich keine Störungsinformation mehr stromaufwärts ausbreiten. Wird eine unterkritische Strömung überkritisch und somit schneller, so muss aus Massenerhaltungsgründen die Schicht dünner werden. Die Stelle, wo die Phasengeschwindigkeit gleich der Strömungsgeschwindigkeit ist, liegt im Gebirge meist an Rücken oder Pässen. Diese Stelle kontrolliert die Strömung, d. h. sie bestimmt die Menge an durchströmender Masse für eine gegebene Schichtdicke am Kontrollpunkt. Weiterhin kann gezeigt werden, dass die Strömung über dem Pass (Kontrollpunkt) nur etwa 2/3 so dick ist wie weiter stromaufwärts. Am Boden fällt der Druck zufolge der Schichtdickenverringering leicht.

Ein Beispiel für den Brennereinschnitt möge das illustrieren. Bei seichtem (Süd)Föhn findet man typischerweise eine Inversion auf der Alpensüdseite in Kammniveau: als Beispiel in der Höhe von 2700 m NN und mit einem potentiellen Temperaturunterschied über die Dicke der Inversion (= Grenzschicht) von 3 K. Am