

H. VOLKERT

8

Fortschritt durch Feldkampagnen – von ALPEX über PYREX zu MAP

Progress by help of field campaigns – from ALPEX via PYREX to MAP

Zusammenfassung

Große Feldkampagnen nutzen die reale Atmosphäre als natürliches Labor, in dem eine Vielzahl gleichzeitig ablaufender Prozesse möglichst umfassend vermessen werden. Strömungsformen und Wetterereignisse über den Alpen wurden 1982 im Rahmen von ALPEX detailliert untersucht, die Überströmung der Pyrenäen 1990 während PYREX. Die neueste Generation von Messmethoden und Simulationsmodellen kam während und nach der Feldphase von MAP im Herbst 1999 zum Einsatz. Dieser Beitrag stellt typische Ergebnisse vor und versucht die allgemeinere Frage zu beleuchten, wie derartige Unternehmungen zum Fortschritt in der Atmosphärenphysik und zur Verbesserung der täglichen Wettervorhersage beitragen.

Abstract

Large field campaigns use the real atmosphere as natural laboratory to quantify the multitude of simultaneous processes as well as possible. Flow patterns and weather events around the Alps were studied in 1982 during the conduct of ALPEX, the flow across the Pyrenees in 1990 during PYREX. The latest generation of measuring techniques and simulations systems was applied during and after the special observing period of MAP in the autumn of 1999. This contribution presents exemplary results and addresses the question how and to what extent such undertakings contribute to progress in atmospheric science and the improvement of the day-to-day weather prediction.

1 Einleitung

Die moderne Meteorologie betrachtet sich als eine Physik der Atmosphäre. Da sich die zahlreichen dort gleichzeitig ablaufenden Prozesse nicht im Labor nachstellen und isoliert untersuchen lassen, wird immer wieder versucht, die reale Atmosphäre zeitlich und räumlich dichter zu vermessen als es routinemäßig möglich ist. Die Atmosphärenphysiker begeben sich ins Freie und führen Feldkampagnen durch, die in den letzten Jahrzehnten sehr umfangreich wurden und lange Vorbereitung erforderten.

Schon BERGERON (1928) zeigte in seiner umfangreichen Monographie zur dreidimensionalen Wetteranalyse die starke Beeinflussung, die die mitteleuropäischen Gebirgsstöcke als Ganzes auf atmosphärische Störungen ausüben können. So werden bei Westwetterlagen Kaltfronten am Boden an den Pyrenäen, den Alpen und den weiter östlich liegenden Gebirgen zurückgehalten, während sie zwischen den Gebirgen zügig nach Südosten vorstoßen. (Abb. 8-1).

Dieser Beitrag streift zuerst die Gebirgskampagnen ALPEX und PYREX und zeigt dann ausführlicher Arbeitsweise und Ergebnisse zu MAP. Einige grundsätzliche Erwägungen schließen ihn ab.

2 Die Kampagnen ALPEX und PYREX

Das **Alpine Experiment** (ALPEX) war das letzte in einer Reihe internationaler Feldkampagnen im Rahmen des *Global Atmospheric Research Programme*. Innerhalb einer allgemeinen Beobachtungsperiode über ein Jahr wurden März und April 1982 als besonderer Messzeitraum definiert, innerhalb dessen zwölf Intensivphasen ausgerufen wurden, die sich über 35 Tage erstreckten. Die Lage der Alpen zwischen 5° und 16° E

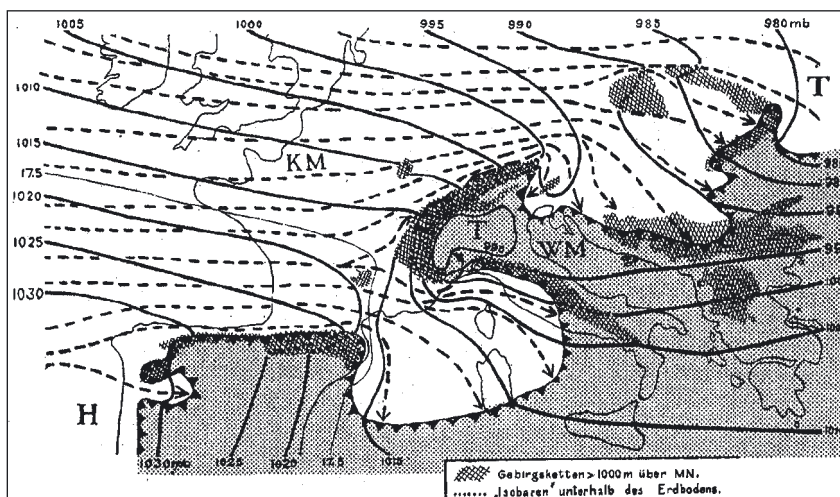


Abb. 8-1: Störungen durch mitteleuropäische Gebirge im Bodendruck- und Strömungsfeld sowie auf eine lange Kaltfront bei Westwetterlage (BERGERON 1928, S. 27).

sowie 44° und 48° N mit dem gekrümmten, etwa 1000 km langen Hauptkamm von San Remo bis kurz vor Wien und dem komplizierten Nebeneinander von Gebirgsstöcken und langen Tälern macht eine detaillierte Satellitenaufnahme ohne Wolken plastisch anschaulich (Abb. 8-2).

Die Bildung und Entwicklung von Zyklonen im Golf von Genua bei Nordwestanströmung war ein Schwerpunkt der Untersuchungen. Dazu kamen Messung und Modellierung von Föhn- und Borasituationen und Versuche den Strömungswiderstand der Alpen als Ganzes zu bestimmen. Einzelheiten sind in WMO (1986) ausführlich dargelegt und in den *promet*-Ausgaben ALPEX I und II (Hefte Nr. 3/4, 1991 und Nr. 1, 1992) auch in deutscher Sprache zugänglich.

Inspiziert durch ALPEX begannen Forschungsgruppen der Wetterdienste in Frankreich und Spanien 1987 mit der Planung einer internationalen Messkampagne über den Pyrenäen, dem ziemlich linienförmig angeordneten Hochgebirge zwischen den beiden Ländern (Abb. 8-3). Die wesentliche Aufgabe bestand in der experimentellen Bestimmung der Impulsbilanz über einem Gebirge als Ganzem, die sich für eine zuverlässige Berechnung der Strömungsvorgänge in Wettervorhersage- und Klimamodellen als sehr wesentlich erwiesen hatte (vgl. EGGER und HOINKA; Kapitel 7 in diesem Heft). Dazu kam die Untersuchung der atmosphärischen Grenzschicht am Gebirgsfuß und die sich dort häufig ausbildenden regionalen Windsysteme wie Tramontana und Autan in Frankreich sowie Cierzo in Spanien.

Die Kampagne PYREX fand im Oktober und November 1990 statt und umfasste zehn Intensivphasen, die sich zusammen über 15 Tage erstreckten. Ihre systematische Nachrechnung mit verschiedenen mesoskaligen Wettervorhersagemodellen gehörte zu den weiteren Zielen des Projekts. Ein großangelegtes Vergleichsrechnen mit 15 verschiedenen, teilweise operationellen Modellen ergab klare Indizien für systematische Modellfehler, wie die durchwegs zu kleine Bremswirkung der diskretisierten Modellorographie auf die Modell-



Abb. 8-2: Komplexe Struktur der Alpen mit verschneiten Massiven und schneefreien Tälern am 02.02.2002; Satellitenbild vom MODIS-Sensor in Wetterkartenprojektion; geographisches Gradnetz schwach punktiert.

atmosphäre und die damit einhergehende Überschätzung von Wellenamplituden bei Gebirgsüberströmung (GEORGELIN et al. 2000). Details zur Durchführung von PYREX mit einer zusammenfassenden Wertung der Kampagne und der Datenauswertung geben BOUGEAULT et al. (1997).

3 MAP-Feldphase und typische Ergebnisse

Im Herbst 1994 organisierten Schweizer Wissenschaftler aus Wetterdienst und Universität eine Bestandsaufnahme zu Kenntnissen und Wissenslücken beim Alpenwetter und den es steuernden Prozessen. Besonderes Augenmerk schenkte man dem unteren Teil der Mesoskala, die Erscheinungen mit 2 bis 200 km Ausdehnung enthält, wie Föhnstürme, große Gewitterzellen oder Starkregengebiete. Man kam überein, das Mesoscale Alpine Programme (MAP) durchzuführen. Es baute auf den Erfahrungen von ALPEX und PYREX auf und sollte eine neue große Feldkampagne enthalten. Wesentlich war dabei die enge Verzahnung der experimentellen Möglichkeiten mit realitätsnahen und auch idealisierten Modellrechnungen, die letztlich auf die Verbesserung der regionalen Wettervorhersage zielten. Der organisatorische Kern lag von Beginn an in Zürich mit dem Programme Office bei MeteoSchweiz und dem MAP Data Centre an der ETH. Dort sind auch die 20 Ausgaben des *newsletter* abrufbar (<http://www.map.meteoswiss.ch/map-doc/newsletter.htm>), die den Ablauf von Planungsphase (1995–1998), Feldphase (1999; mit *special observing period* [SOP] von September bis November) und Auswertephase (2000–2005) begleiten.

Das umfangreiche Spektrum an relevanten Aspekten wurde in acht Teilprojekte einsortiert: P1 – Mechanismen bei orographischem Niederschlag; P2 – Obertroposphärische Anomalien; P3 – Hydrologische Messungen zur Überschwemmungsvorhersage; P4 – Strömung durch Pässe; P5 – Föhn im Hochrheintal; P6 – Dreidimensionale Gebirgswellen; P7 – Niedertroposphärische Windscherungszonen (*PV banners*); P8 – Grenzschichtstruktur über steilem Gelände. Die Teilprojekte P4–P8 betreffen im Wesentlichen Wettersituationen



Abb. 8-3: Die Pyrenäen als einigermaßen linienförmige Barriere zwischen Frankreich und Spanien; Satellitenbild (12.02.2004; MODIS) mit frischem Schnee als Kontrastmittel.

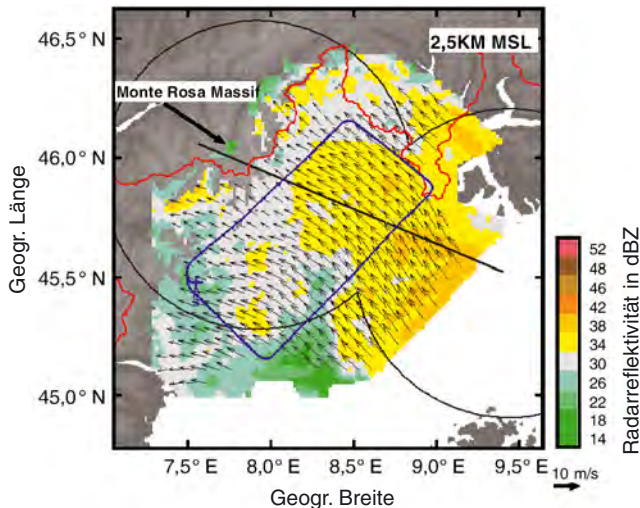


Abb. 8-4: Windvektoren und Radarreflektivität im 2,5 km Höhe aus flugzeuggetragenen Dual-Doppler-Messungen am 21.10.1999, 0917–0954 UTC über dem Lago Maggiore-Gebiet; jeder 4. Vektor ist dargestellt; blaue Linie: Flugzeugkurs; rote Linie: Grenze Italien-Schweiz; grau unterlegt: Topographie über 500 m in 1000 m-Intervallen dunkler werdend [aus BOUSQUET und SMULL in BOUGEAULT et al. (2003; S. 395)].

ohne Regen (*dry MAP*); sie erweitern Messungen bei ALPEX und PYREX. Die Untersuchung von starkem Niederschlag und möglichen Überflutungen (*wet MAP*) wurde durch die südalpinen Überschwemmungen im Herbst der Jahre 1991, 1992 und 1994 nachhaltig motiviert. Aus allen Projekten erwähnen wir im Folgenden einige Befunde, die der Fülle von bislang über 160 Artikeln in begutachteten Fachzeitschriften (VOLKERT 2005) entnommen sind.

3.1 Orographischer Niederschlag

Die klimatologischen Niederschlagsmaxima im Herbst liegen auf der Alpensüdseite (vgl. FREI und SCHMIDLI; Kapitel 9 in diesem Heft). Im Bereich des Lago Maggiore wurden zwei Wetterradare installiert, die über die Dopplerverschiebung den Wind in Regengebieten und über polarimetrische Messungen die Art des Niederschlags zu bestimmen gestatten. Der Einsatz eines flugzeuggetragenen Radars ergänzte die experimentelle Ausstattung. Die Struktur der Strömung von Südosten gegen des Gebirge unterhalb der Kammhöhe lässt sich damit erfassen (Abb. 8-4), ebenso wie das Eindringen in die Täler in niedrigeren Niveaus.

Während neun der insgesamt 18 Intensivmessperioden wurden innerhalb des Alpenraums Niederschlagsereignisse genauer untersucht (BOUGEAULT et al. 2001) und anschließend mit hochauflösenden Modellen nachgerechnet. Zu diesen neu entwickelten Forschungsinstrumenten zählt das nichthydrostatische Simulationssystem Meso-NH, dessen Entwicklung in Frankreich von mehreren Institutionen seit 1995 betrieben wird. Abb. 8-5 zeigt die berechnete Intensität

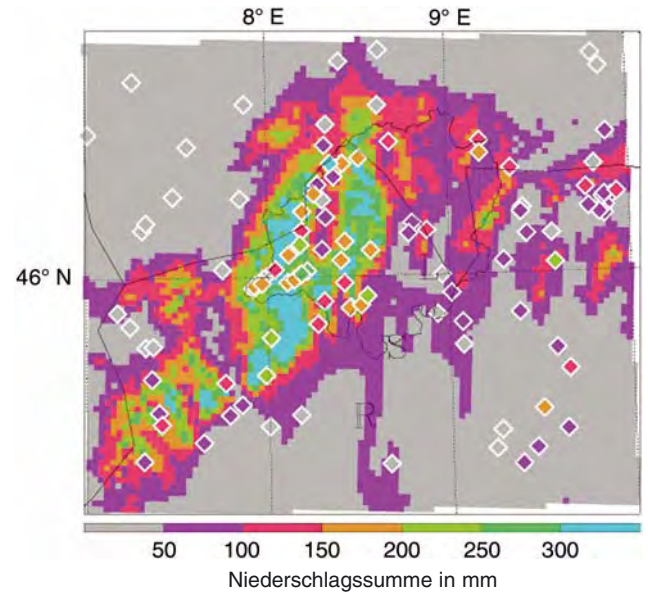


Abb. 8-5: 27-std. Niederschlagsmenge während MAP IOP-2b. Modellrechnung mit Meso-NH in 2 km x 2 km-Gitter und Messung an Regenmessern (Rauten) sind mit den gleichen 50 mm-Farbabstufungen dargestellt; Landesgrenzen zwischen F, I, CH schematisch; detaillierte Linie: Einzugsgebiet des Toce; L: Radar Monte Lema; R, S: Forschungsradare Ronsard und S-Pol. Bild: E. Richard, Toulouse.

und die räumliche Ausdehnung des heftigen Regens während Messperiode IOP-2b (über 200 mm in 27 h) und gleichzeitig den farbkodierten Vergleich mit Messungen an routinemäßigen Regenmessern.

3.2 Obertroposphärische Anomalien

Die synoptische Erfahrung, dass starke Niederschläge besonders an der Vorderseite von aus (Nord-)Westen in Richtung die Alpen ziehenden Trögen im Höhenruckfeld auftreten, und der neuere Befund, dass in diesen Bereichen die Tropopause stark abgesenkt ist, legte die detaillierte Vermessung des bandartigen Eindringens stratosphärischer Luft in die obere Troposphäre nahe. Einzelheiten im Feuchtefeld und seinen Gradienten sowie Bänder mit erhöhten Werten der potentiellen Vorticity (*PV streamer*) sollten dokumentiert werden. Als neuartige Beobachtungssysteme standen ein nach unten schauendes, in ein Flugzeug montiertes DIAL-Gerät bereit in Kombination mit Fallsonden zur konventionellen Messung von Druck, Temperatur, Feuchte und Horizontalwind (über die Verdriftung der Sonde während des Falls).

Ein Querschnitt entlang des 45. Breitengrads von Bordeaux über die Westalpen bis Venedig am Nachmittag des 6. November 1999 ist Abb. 8-6 dargestellt. Die gemessenen geringen Feuchten zwischen 5 und 200 ppmv (unteres Bild), für höhere Werte ist der Laser bei den gewählten Laserwellenlängen nicht energiereich genug, treten auch in einer mesoskaligen Episodensimulation auf, wenn auch weniger ausgeprägt.

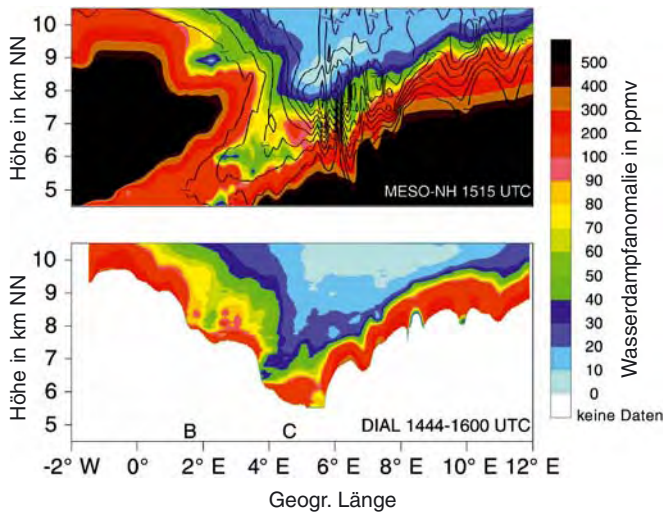


Abb. 8-6: Querschnitt durch eine Zone deutlicher reduzierter Wasserdampferte im Bereich einer stratosphärischen Intrusion am 06.11.1999. Simulation mit Meso-NH (oben), Messung mit flugzeuggetragenem Laser unten; Farbstufen in Volumenanteilen pro Million (ppmv). Schwarze Isolinien für stratosphärische Werte der potentiellen Vorticity [aus HOINKA et al. in BOUGEAULT et al. (2003; S. 618)].

3.3 Hydrologische Messungen

Interdisziplinäre Pionierleistungen erbrachte MAP-SOP bei der Kombination von Niederschlags erfassung, gemessen oder vorausgerechnet, und nachgeschalteter Wasserstandsvorhersage für das mittelgroße Einzugsgebiet des südalpinen Flusses Toce oberhalb des Pegels Candoglia (1532 km²). Diese gekoppelten Rechnungen wurden echtzeitnah durchgeführt.

Abb. 8-7 fasst die Ergebnisse für die 60-stündige Periode vom 19.–21. September 1999 zusammen, in deren ersten Hälfte es anhaltend geregnet hat. Die Wasserstands berechnung mit vorausgerechneten Regendaten zeigt den beobachteten klaren Anstieg des Abflusses, jedoch etwas überschätzt und um 6 Stunden verfrüht gegenüber dem beobachteten Wert. Systematische Tests mit verschiedenen Atmosphären- und Flussmodellen erhärteten die Machbarkeit derartiger gekoppelter atmosphärisch-hydrologischer Vorhersagen, besonders jedoch für größere Flusseinzugsbereiche. Bis zu einer routinemäßigen Anwendung ist es jedoch noch ein längerer Weg.

3.4 Föhn und Strömung durch Pässe

Der alpine Föhn kann auf eine sehr lange Forschungsgeschichte zurückblicken; trotzdem wird er häufig nach einem allzu vereinfachten Schema erklärt, das einmal die Alpen als einheitlichen Gebirgsblock betrachtet und weiterhin Strömungsformen voraussetzt, die im Luv, über dem Kamm und im Lee stets nahe der Erdoberfläche liegen. Während MAP-SOP richtete sich das besondere Interesse einmal auf das komplexe

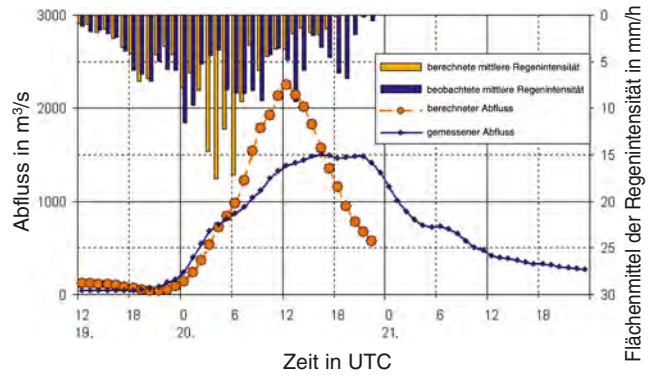


Abb. 8-7: Flächenmittel der Regenintensität (Säulen von oben; rechte Achse) und Abfluss (Punkte; linke Achse) jeweils gemessen (orange) und berechnet (blau) für eine 60 h-Periode im Einzugsbereich des Toce oberhalb von Candoglia [aus RANZI et al. in BOUGEAULT et al. (2003; S. 664)].

Hochrheintal zwischen Chur und dem Bodensee (vgl. STEINACKER; Kapitel 1 in diesem Heft) und zum anderen auf kleinräumige Ausgleichsströmungen durch die Brennerlücke im Alpenhauptkamm und durch das Wipptal hinunter nach Innsbruck (*gap flow*; vgl. MAYR und GOHM; Kapitel 2 in diesem Heft).

Wie in den anderen MAP-Projekten gelang eine enge Kopplung zwischen einer Vielzahl von Messträgern und hochaufgelösten, realitätsnahen Simulationen mit einer horizontalen Maschenweite bis zum einem Kilometer.

Längs eines Querschnitts von Innsbruck nach Verona und zurück kam bei MAP-SOP erstmals die Flugzeugversion eines rotierenden Aerosol-Lidars zum Einsatz, das es erlaubt, vertikale Profile des Horizontalwindes abzuleiten. Abb. 8-8 zeigt für die Schwachwindlage vom 11. Oktober 1999 eine systematische Zunahme des Windes einmal mit der Höhe und andererseits von Süd nach Nord. Ein Vergleich mit einer Simulation mit passender horizontaler (10 km) und vertikaler Auflösung (250 m) bestätigt auch das lokale Windmaximum in Bodennähe bei Bozen. Eine verbesserte Version des Geräts kam knapp 3 Jahre später während der Kampagne VERTIKATOR auch nördlich der Alpen zum Einsatz (vgl. WINKLER et al.; Kapitel 5 in diesem Heft, S. 40).

3.5 Dreidimensionale Gebirgswellen

Wie DÖRNBRACK et al. (Kapitel 3 in diesem Heft) darlegen, erzeugt eine hinreichend kräftige Strömung über ein Gebirge in der meist stabil geschichteten Atmosphäre darüber und im Lee die regelmäßige Abfolge von Auf- und Abwindzonen, die etwa Segelflieger beim Wellenflug ausnutzen und die in starker Ausprägung eine Gefährdung für den Flugverkehr darstellen können. Die Dokumentation des mehrstündigen Lebenszyklus solcher Gebirgswellen bis hin zu ihrem Brechen mit starker turbulenter Vermischung gehörte auch zu den Zielen für die MAP-SOP.

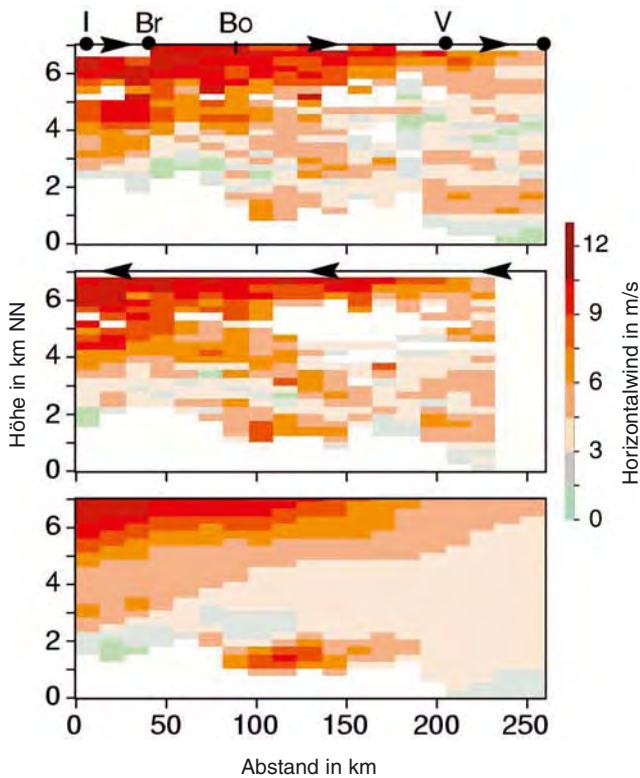


Abb. 8-8: Querschnitt des Horizontalwinds zwischen Innsbruck (I) und Verona (V) am 11.10.1999 um 14 UTC: gemessen mit einem nach unten blickenden, von einem Flugzeug getragenen Doppler-Lidar (oben: Hinflug; Mitte: Rückflug) und berechnet (Meso-NH Modell) [aus REITEBUCH et al. in BOUGEAULT et al. (2003; S. 721)].

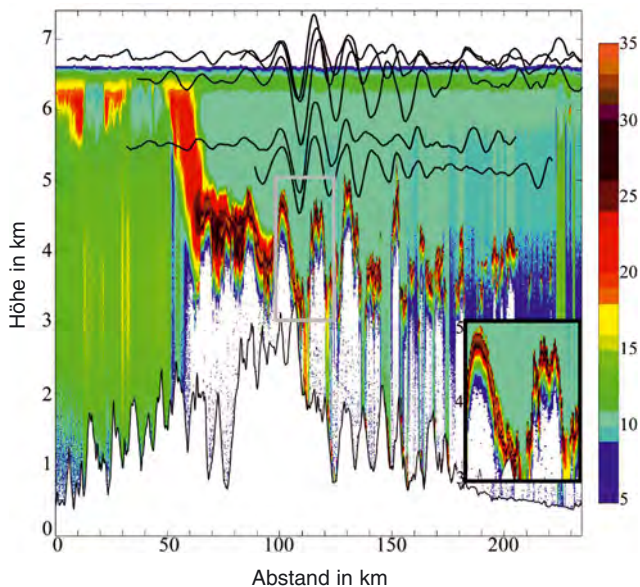


Abb. 8-9: Süd-Nord-Schnitt der atmosphärischen Rückstreuung über dem Großglockner am 20.09.1999, 1330–1400 UTC (in Farbe) und Stromlinien aus Flugtraversen in 4 Höhen (schwarze Linien). Der Kasten in der Mitte ist rechts unten vergrößert dargestellt [aus DOYLE und SMITH in BOUGEAULT et al. (2003; S. 806)].

Sieben Wellen-Situationen verteilt zwischen West-, Zentral- und Ostalpen wurden mit bis zu drei Forschungsflugzeugen vermessen, die meist koordiniert in unterschiedlichen, doch für mehrere Traversen festgehaltenen Flugniveaus längs der Hauptwindrichtung hin- und herpendelten (S1.1 in GRISOGONO et al., 2005).

Die Situation im Lee des Mont Blanc am 2. November 1999 ist auf der Titelseite dargestellt. Abb. 8-9 zeigt in 33-facher Überhöhung die Überströmung der Hohen Tauern von Süden (links). Die stärkste Welle liegt in Strömungsrichtung direkt hinter dem Hauptkamm; sie ist in allen Flugtraversen, die nacheinander erfolgten wurden, enthalten; dies belegt die Stationarität des Welleneignisses. In der Umgebung des Großglockner hindern teilweise Wolken das Durchdringen der gepulsten Lidarenergie bis zum Boden. Die sehr regelmäßigen Wellenmuster bilden sich im kohärenten Band der hohen Aerosolrückstreuung ab (Bereich schwarz bis rot). Begleitende Simulationen mit genesteten Modellen mit Maschenweiten bis unter einen Kilometer erleichtern die Interpretation der Situation zum besseren Verständnis des Zusammenspiels von Grenzschichteffekten am Boden und Wellenausbreitung darüber.

3.6 Niedertroposphärische Windscherungszonen

Während der Planung von MAP fielen in zahlreichen detaillierten Simulationen ausgeprägte Bänder ins Auge, die von Gebirgsstöcken aus stromab liegen und an deren Grenzen der Horizontalwind auf kurze Strecke in Stärke und Richtung stark variiert. Es blieb unklar, inwieweit solche Windscherungszonen, die sehr unterschiedliche Werte der potentiellen Vorticity (PV) aufweisen – daher der englische Name *PV banner* – in der realen Atmosphäre auftreten.

Während fünf Intensivmessphasen wurden die Nachlaufströmungen von Teilen der Alpen mit mehreren Flugzeugen vermessen; je nach Strömungslage über dem Ligurischen Meer südlich von Nizza (Westalpen), über der Poebene (Zentralalpen bei Strömung von Norden), über dem deutschen Alpenvorland (Zentralalpen bei Strömung von Süden) und über der Adria (dinarische Alpen bei Strömung von Nordosten). Die Auswertung der Daten in Flugniveau, meist unterhalb der Kammhöhe, und von Fallsonden ergab eine Hierarchie von primären und sekundären Bannern, die sich durch Vergleich mit hochaufgelösten Simulationen auf größere Gebirgsstöcke beziehungsweise markante Einzelgipfel zurückführen lassen. Auf diese Weise fanden umfangreiche theoretische Vorarbeiten zur Entstehung und Umverteilung der potentiellen Vorticity, einer strömungsdynamischen Erhaltungsgröße, ihre experimentelle Bestätigung.

3.7 Grenzschicht in steilem Gelände

Ein nahezu gerader Abschnitt des tiefen Tals nördlich von Bellinzona mit ziemlich gleichförmigen Hängen, die so genannte Tessiner Riviera, wurde mit mehreren Transekten von Bodeninstrumenten bestückt und bei Strahlungswetterlagen mit einem Motorsegler systematisch in Längs und Querrichtung erflogen.

Die Datenanalyse legte eine Modifikation der üblichen Skalierungsmethoden nahe, mit deren Hilfe die Höhenprofile verschiedener Größen an unterschiedlichen Positionen im Tal vergleichbar gemacht werden können. Auch in diesem Teilprojekt erwiesen sich sehr hochaufgelöste Simulationen, die als realitätsnahe Large-Eddy-Rechnungen zu bezeichnen sind, als nützlich und notwendig für eine konsistente Interpretation der verschiedenen Messungen.

4 Fortschritt durch Feldkampagnen

Der momentane Stand der Ernte aus dem Mesoscale Alpine Programme ist in den Übersichtsartikeln (S1.1, S1.2, S4.1, S4.2, S5.1, S8.1, S8.2, S9.1, S14.1, S14.2, S15.1) des auch online verfügbaren Tagungsbands der ICAM-MAP Konferenz im Mai 2005 enthalten (GRISOSONO et al. 2005). Hier wird nun versucht, einige allgemeine Befunde zum Beitrag von Feldkampagnen zum Fortschritt in der Meteorologie aufzuzeigen.

Die vorhergehende Abschnitte verdeutlichen die Fülle von Einzelbefunden, die während einer großen

Feldkampagne im natürlichen Labor der Atmosphäre in der Umgebung eines Hochgebirges gewonnen werden können. In Europa erwies sich die Folge ALPEX-PYREX-MAP als besonders fruchtbar, auch weil an ihr teilweise dieselben Institutionen und Personen beteiligt waren. LEMONE (2003) zeichnet nach 30-jähriger allgemeiner Kampagnenerfahrung und mit reichlich Selbstironie den typischen Ablauf derartiger Messunternehmungen mit einer umfangreichen Planungsphase, der vergleichsweise kurzen Durchführung und einer oft nicht ausreichend koordinierten Auswertephase. ALPEX dient als Beispiel für den Widerstreit zwischen den Interessen Einzelner und einem erhofften gemeinsamen Vorgehen (Abb. 8-10). Zusammenfassende Darstellungen in einigem Abstand nach Feldkampagnen können dieses Dilemma lindern. Für PYREX liegt eine Veröffentlichung vor, die den Stand der Forschung sechs Jahre nach der Feldphase darlegt (BOUGEAULT et al. 1997). Für MAP wurde eine umfangreiche Dokumentation der Feldphase als Sonderheft im *Quarterly Journal* der *Royal Meteorological Society* erstellt (BOUGEAULT et al. 2003); VOLKERT (2005) gibt eine erste Zusammenstellung dessen, was unter Kollegen locker als *MAP harvest* bezeichnet und derzeit abgeschlossen wird. Wenn wir uns in einigen Jahren daran gewöhnt haben werden, Wetterberichte zu bekommen, die für Regionen der Alpen drei Tage im Voraus etwa Vormittag und Nachmittag deutlich unterscheiden können oder die verlässliche Warnungen vor Starkregen geben, dann haben die skizzierten Feldkampagnen dabei ihren Anteil.

An anderer Stelle in diesem Heft sind weitere Feldexperimente erwähnt. KOTTMEIER und FIEDLER (Kapitel 4) und WINKLER et al. (Kapitel 5) erläutern Ergebnisse der international organisierten Kampagnen ESCOMPTE (2001) und VERTIKATOR (2002), die neben anderen Fragen den orographisch modifizierten Transport von Luftbeimengungen untersuchen. Aber auch weniger umfangreiche Experimente bringen oft wichtige Erkenntnisse wie der Segelfluggewettbewerb 1937 am Riesengebirge (vgl. DÖRNBRACK et al.; Kapitel 3) oder die meteorologischen Expeditionen eines Universitätsinstituts nach Nepal und Bolivien (vgl. EGGER; Kapitel 6).

Zusammenfassend macht ein langer Blick über ein Jahrhundert Atmosphärenforschung folgende Punkte deutlich, die leider nicht ausreichend im allgemeinen Bewusstsein verankert scheinen:

- 1) die chaotisch erscheinenden, durch Gebirge massiv gestörten hydro-thermodynamischen Strömungen enthalten ein gerüttelt Maß an Vorhersagbarkeit;
- 2) langer Atem und ein fernes Ziel, wie die Sterne nach denen man navigieren kann, ohne sie erreichen zu wollen, erleichtern die Arbeit (BJERKNES 1938);

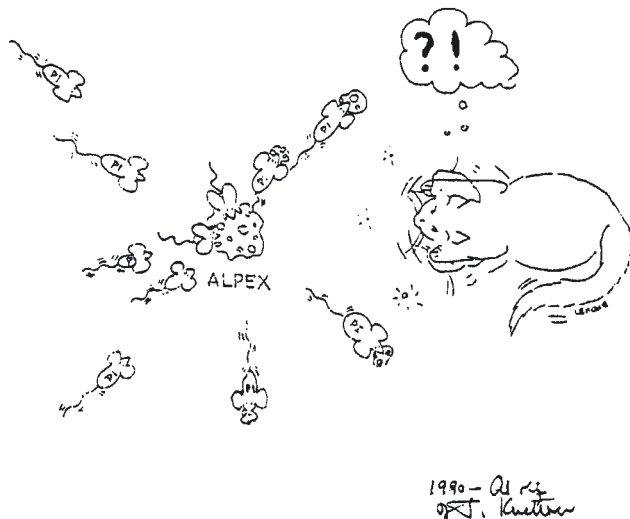


Abb. 8-10: Nach der ALPEX-Feldphase: der Programmkoordinator wird irre bei dem Versuch, die *principal investigators* davon abzuhalten, Datenhäppchen zur persönlichen Verwendung zu erbeuten [aus LEMONE (2003); nach einer Anregung von Joachim Kuettner].

- 3) Feldkampagnen sind ein wichtiger Baustein für die Gewinnung von Eichdatensätzen zur Erprobung verbesserter Generationen von Vorhersagemodellen (vgl. MAJEWSKI und RITTER; Kapitel 10, S. 69);
- 4) der Einsatz neuartiger Messverfahren bringt regelmäßig vereinigenden Schwung in Kampagnen;
- 5) der Fortschritt geschieht meist allmählich und nur selten durch eine überraschende Entdeckung (vgl. DAHLSTRÖM 1981);
- 6) ohne enge Verzahnung mit Modellrechnungen bei Planung und Auswertung bleiben Feldmessungen nur Stückwerk; und
- 7) die Wirkung von partnerschaftlicher Zusammenarbeit und ausreichend Humor (LEMONE 2003) ist auch im ernstesten Wissenschaftsbetrieb kaum zu überschätzen.

Literatur

- BERGERON, T., 1928: Über die dreidimensional verknüpfende Wetteranalyse. Erster Teil: Prinzipielle Einführung in das Problem der Luftmassen- und Frontenbildung. *Geof. Publ.* **5**, no. 6, 111 S.
- BJERKNES, V., 1938: Leipzig-Bergen. Festvortrag zur 25-Jahrfeier des Geophysikalischen Instituts der Universität Leipzig. *Zeitschrift für Geophysik* **14**, Heft 3/4, 49-62.
- BOUGEAULT, P., B. BENECH, P. BESSEMOULIN, B. CARRISSIMO, A. JANSÁ CLAR, J. PELON, M. PETITDIDIER, E. RICHARD, 1997: PYREX: A summary of findings. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **78**, 637-650.
- BOUGEAULT, P., P. BINDER, A. BUZZI, R. DIRKS, R. HOUZE, J. KUETTNER, R.B. SMITH, R. STEINACKER, H. VOLKERT, 2001: The MAP special observing period. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **82**, 433-462.
- BOUGEAULT, P., R.A. HOUZE, R. ROTUNNO, H. VOLKERT (Hrsg.), 2003: Sonderheft mit 25 Arbeiten zum Mesoscale Alpine Programme. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* **129**, 341-895; Inhaltsverzeichnis online unter <http://www.ingentaconnect.com/content/0035-9009>
- DAHLSTRÖM, B., 1981: Insight into the nature of precipitation – Some achievements by T. Bergeron in retrospect. *Pure Appl. Geophys.* **119** (Bergeron Memor. Vol.), 548-557 (plus 3 Karten).
- GEORGELIN, M., P. BOUGEAULT und 24 Koautoren, 2000: The second COMPARE exercise: A model intercomparison using a case of typical mesoscale orographic flow, the PYREX IOP 3. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* **126**, 991-1029.
- GRISOGONO, B., H. VOLKERT, B. IVANCAN-PICEK, A. BAJIC (Hrsg.), 2005: Proceedings of the 28th International Conference on Alpine Meteorology and the annual MAP meeting. *Croat. Meteorol. J.* **40**, Zagreb, ISSN 1330-0083, 721 S.; online unter: <http://meteo.hr/ICAM2005/proceedings.html>
- LEMONE, M. A., 2003: What we have learned about field programs. In: W.K. Tao (ed.), Cloud Systems, Hurricanes, and the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). *Meteorol. Monogr.* **29**, no. 51, Amer. Meteorol. Soc., ISBN 1-878220-54-3, 25-35.
- VOLKERT, H., 2005: The Mesoscale Alpine Programme (MAP): A multi-faceted success story. *Croat. Meteorol. J.* **40**, Zagreb, ISSN 1330-0083, 226-230; online verfügbar unter <http://meteo.hr/ICAM2005/pdf/session-15/S15-01.pdf>
- WMO, 1986: Scientific results of the Alpine Experiment (ALPEX). Genf, WMO Technical Document No. 108 (2 volumes), 710 S.