

P. WINKLER, M. LUGAUER, O. REITEBUCH

5 Alpines Pumpen

Alpine Pumping

Zusammenfassung

„Alpines Pumpen“ ist ein regionales Zirkulationsphänomen, das sich tagsüber zwischen Gebirge und Vorland bei hoher Sonneneinstrahlung und schwachen Druckgradienten ausbildet. Die Luft im Alpenraum erwärmt sich tagsüber rascher als im Vorland, es bildet sich ein Hitzetief und die bodennahe Luft wird konvektiv nach oben verfrachtet. Aus dem Alpenvorland strömt Luft in einer Einströmschicht zu den Alpen und ersetzt die dort konvektiv gehobene Luft. Luftbeimengungen in der Einströmschicht gelangen so vom Alpenvorland in die freie Troposphäre bis über die Alpengipfel. Semivolatile Luftbeimengungen rekondensieren bei den niedrigen Temperaturen in den Hochalpen und reichern sich dort an. Für dieses häufige Transportphänomen, das durch intensiveren Vertikalaustausch über dem Hochgebirge ausgelöst wird, wurde die Bezeichnung „Alpines Pumpen“ gewählt. Es wird in diesem Beitrag näher beschrieben.

Abstract

„Alpine Pumping“ designates a regional circulation pattern which is generated during day time between a mountain range and its foreland in conditions of high solar radiation and weak synoptic pressure gradients. The air above the Alps is heated quicker during the day than above the foreland. A heat low is generated and near-surface air gets convectively transported to higher levels. Air constituents can therefore be transported from the inflow boundary layer above the foreland right into the free troposphere high above the summits. Semi-volatile pollutants may re-condense at the low temperatures there and get enriched. This frequent transport phenomenon, which is induced by the more intense vertical exchange above high mountains, was termed „Alpine pumping“ and is described in this contribution.

1 Einleitung

Die tageszeitliche Entwicklung der Strömungen zwischen Gebirgsregionen und dem Umland ist vergleichbar zur Land-Seewind-Zirkulation. Während bei letzterer die thermischen Unterschiede aufgrund der unterschiedlichen Wärmekapazitäten von Land und Wasser entstehen, treten in Hochgebirgsräumen andere Effekte auf:

1. im Vergleich zur vorgelagerten Ebene hat die zu erwärmende Luftsäule in den Gebirgstälern ein geringeres Volumen und erwärmt sich bei gleicher Energiezufuhr durch Sonnenstrahlung rascher (STEINACKER 1984);
2. die geneigten, zur Sonne exponierten Hänge erwärmen sich und die angrenzende Luft rascher wegen des günstigeren Einfallswinkels;
3. der geringere Luftdruck in höher gelegenen Regionen bewirkt ebenfalls eine raschere Erwärmung der darüber befindlichen Luft, da bei gleicher Energiezufuhr eine geringere Masse erwärmt werden muss (hochgelegene Heizfläche);
4. in der Nacht kühlt sich die Luft im Alpenraum rascher ab, es bildet sich ein Kältehoch, welches einen nächtlichen Abfluss von Luft ins Umland bewirkt.

Die in Abb. 5-1 gezeigten Geländeschnitte veranschaulichen die Unterschiede zwischen Alpen und Vorland. Übersichten zu klassischen und neueren Arbeiten geben WHITEMAN (2000) und EGGER (1990) zur Theorie thermischer Störungen.

Thermisch angetriebene Zirkulationen beschränken sich also nicht nur auf Hangzirkulationen, sondern bewirken regionale Zirkulationsphänomene. Globale Zirkulationsmodelle, die den Vertikalaustausch parameterisieren, unterschätzen wegen der großen Gitterabstände Phänomene wie das Alpine Pumpen und die damit einhergehenden Transporte. Hochauflösende Modelle geben die Phänomene besser wieder (GANTNER et al. 2003). Der Transport von Luftbeimengungen aus urbanen Regionen im Alpenvorland führt zu einer Zusatzbelastung für die empfindlichen alpinen Ökosysteme. Im Rahmen der VOTALP (Vertical Ozone Transports in the Alps)-Studie wurde die Ozonbelastung auf der Alpensüdseite durch Luftmassen aus der Po-Ebene untersucht (PREVOT et al. 2000, WOTAWA et al. 2000).

Untersuchungen zur räumlichen Verteilung der Konvektionsbewölkung (KÄSTNER und KRIEBEL 2001, KÄSTNER et al. 2004) und der Blitzhäufigkeit (FINKE und HAUF 1996) weisen den Alpennordrand als besonders gewitterträchtig aus – auch im Vergleich mit dem inneralpinen Raum. Es ist naheliegend, dass dem Alpines Pumpen bei der Entwicklung konvektiver Zellen eine Schlüsselrolle zukommt. Eine bessere Beurteilung bedarf jedoch Kenntnisse über folgende Zusammenhänge:

- Häufigkeit des Alpines Pumpens und jahreszeitliche Verteilung,
- Kenntnis der Antriebe des Alpines Pumpens in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung,

- mittlere Ausformung des Bodenwindfeldes in der Einströmschicht in Abhängigkeit von der Großwetterlage (Höhenströmung),
- tageszeitliche Entwicklung und Erstreckung vom Alpenrand und Entwicklung der Bewölkung,
- Abschätzung von Massenströmen und den damit verbundenen Spurenstofftransporten.

Es ist unmittelbar einleuchtend, dass das Phänomen des Alpines Pumpens zahlreiche Modifikationen je nach Wetterlage erfährt, wobei weitere meteorologische Parameter wie atmosphärische Stabilität, Jahresgang der Bodentemperatur, Schneebedeckung in höheren Lagen und synoptischer Druckgradient hineinspielen. Die thermischen Antriebskräfte zwischen Alpen und Alpenvorland konkurrieren und überlagern sich mit diesen anderen Antriebskräften, was infolge der komplexen Wechselwirkungen zu vielfältigen Detailausprägungen führt.

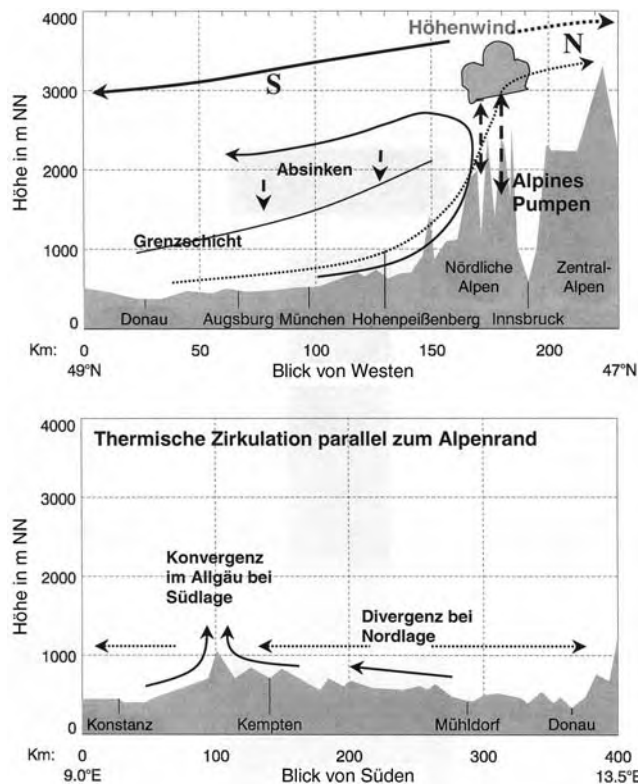


Abb. 5-1: Schematische Darstellung der Strömung bei Alpinem Pumpen im Alpenvorland für zwei Großwetterlagen im 500 hPa Niveau: Südlagen (durchgezogene Linien) und Nordlagen (gepunktete Linien). Nord-Süd-Schnitt (oben) etwa auf der Linie Garmisch - Augsburg und Ost-West-Schnitt (unten) parallel zum Alpenrand; man beachte die großräumigen Neigungen im Vorland. Man beachte die unterschiedliche Überhöhung beider Schnitte.

Abb. 5-2: Mittlere horizontale Druckgradienten (a) Innsbruck – München (97 km), (b) Garmisch–München (80 km), für drei Strahlungsklassen (Tagessummen der Globalstrahlung, Gebietsmittel).

2 Untersuchungsgebiet und Datenmaterial

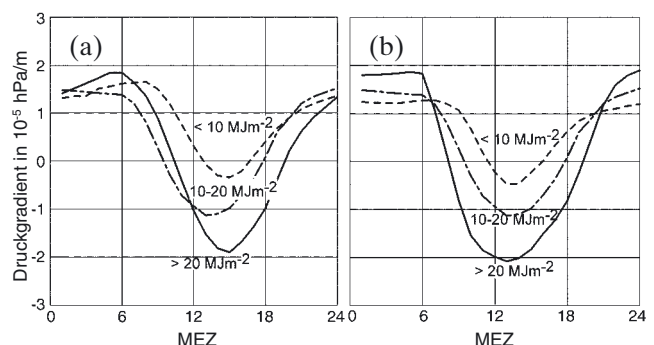
Untersuchungen liegen für das Gebiet zwischen Donau und Nordalpen und in Ost-West-Richtung vom Bodensee bis Passau vor (LUGAUER und WINKLER 2002, 2005). Dieses Gebiet (Abb. 5-1) weist neben dem allmählichen Geländeanstieg von der Donau zum Alpenrand auch Neigungen in Ost-Westrichtung auf mit einem Höhenmaximum im Allgäu, welches die europäische Wasserscheide zwischen Rhein und Donau bildet. Das der Untersuchung zugrunde liegende Datenmaterial umfasst den Zeitraum 1996–2000.

Als wichtige Voraussetzung wurde nachgewiesen, dass bei Wetterlagen mit Alpinem Pumpen das Strahlungsfeld großräumig weitgehend homogen ist, abgesehen von der verstärkten Konvektionsbewölkung über den Alpen. In diesem Gebiet ist außer im Winter der Wolkenbedeckungsgrad um 10–20 % höher als im Vorland.

Eine jahreszeitliche Analyse der Häufigkeit der Strahlungsklassen ergab, dass in der Zeit April bis August Tagessummen mit einer Einstrahlung von mehr als 20 MJ/m² etwa konstant häufig an 42 % der Tage auftreten. Wettersituationen mit geringerer Einstrahlung (10–20 MJ/m²) kommen von Februar bis Oktober vor mit einer mittleren Häufigkeit von 45 %. Die Voraussetzung für das Entstehen von Alpinem Pumpen im Gebiet von Oberbayern für April - August ist also an 42 % der Tage sehr günstig und im Zeitraum März bis Oktober an weiteren 45 % der Tage noch günstig. Das Phänomen Alpines Pumpen tritt demnach relativ häufig auf.

2.1 Tagesgänge der horizontalen Druckgradienten

Nach WHITEMAN (1990) sind die horizontalen Druckgradienten ausschlaggebend für die Ausprägung des oberflächennahen Windfeldes. NICKUS und VERGEINER (1984) zeigten für sonnige Tage, dass, abgesehen vom Winter, zu allen Jahreszeiten eine regelmäßige tägliche Umkehr des Druckgradienten München – Innsbruck auftritt. Legt man die Tagessumme der eingestrahelten Sonnenenergie als Antrieb zugrunde, dann ergeben sich die in Abb. 5-2 dargestellten täglichen Druckvariationen (normiert auf NN) für die Stationspaare Innsbruck–München (97 km) und Garmisch–München (80 km).



Nachts ist der Druck in den Alpen höher als im Vorland, tagsüber dagegen niedriger und zwar für alle Strahlungsklassen. Tagsüber nimmt der Druckgradient mit steigender Strahlungsenergie zu. Bemerkenswert ist, dass am Nachmittag sich über den Nordalpentälern ein schwaches bodennahes Hitzetief entwickelt, selbst unter Bedingungen mit geringer Strahlung ($<10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$), was Winterbedingungen entspricht. In Garmisch wird das Druckminimum etwa 2 Stunden früher erreicht als in Innsbruck. Der Grund dürfte auf den Volumeneffekt (STEINACKER 1984) zurückzuführen sein, da im Loisachtal ein geringeres Volumen zu erwärmen ist als im breiteren Inntal. Am Nachmittag besteht zwischen München und Garmisch ein deutlich höherer Druckgradient als zwischen Garmisch und Innsbruck. Der Druckgradient zwischen Alpenvorland und den Nordalpen ist also größer als der Druckgradient in den Alpen, was bedeutet, dass die Luft tags zu den Alpen strömt, aber innerhalb der Alpen selbst nur schwache, druckbedingte Strömungen zu finden sind.

2.2 Analyse des Windfeldes bei Alpinem Pumpen

Die mittlere thermisch induzierte Strömung im Alpenvorland wurde für 340 Tage des Zeitraumes 1996–2000 anhand stündlicher Werte des Windes ausgewertet, und zwar für Tage mit hoher Einstrahlung ($>20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$). In Abb. 5-3 ist die mittlere skalare Windgeschwindigkeit und mittlere N-S-Komponente im Tagesgang für

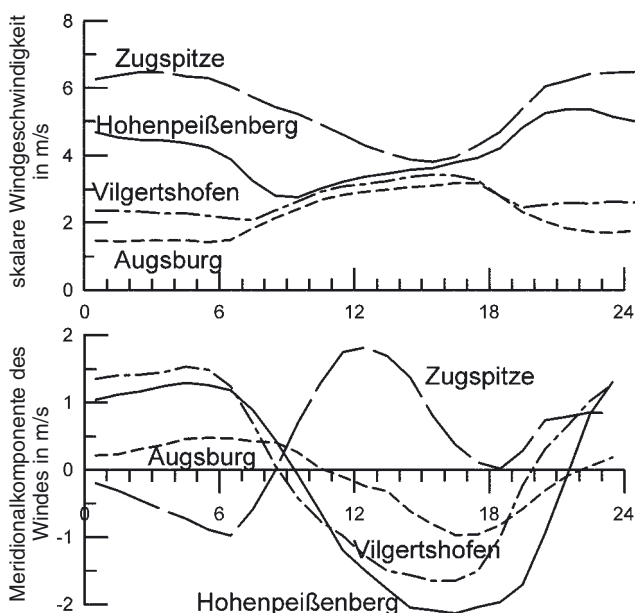


Abb. 5-3: Mittlere Tagesgänge der Windgeschwindigkeit und der meridionalen Windkomponente für die 4 Stationen Augsburg (82 km nördlich vom Alpenrand), Vilgertshofen (30 km), Hohenpeißenberg (13 km) und Zugspitze (32 km südlich von einer als nördlicher Alpenrand gedachten Linie). Mittel über 340 Tage des Zeitraumes 1996–2000 mit einer Tagessumme der Globalstrahlung $\geq 20 \text{ MJ/m}^2$.

die Stationen Augsburg, Vilgertshofen, Hohenpeißenberg und Zugspitze dargestellt, die ungefähr auf einer Nord-Süd-Linie senkrecht zum Alpenrand liegen. Der Hohenpeißenberg überragt als Inselberg das umgebende Hügelland um 300–400 m, die Zugspitze mit 2960 m liegt oberhalb der Einströmsschicht.

An den Flachlandstationen Augsburg und Vilgertshofen ist nachts die skalare Windgeschwindigkeit gering, da beide unter der Bodeninversion liegen. Die Bergstationen Hohenpeißenberg (977 m) und Zugspitze (2960 m) weisen nachts höhere Windgeschwindigkeiten auf als tags, da sie über der Bodeninversion liegen und reibungsentkoppelt sind. Ab etwa 9 Uhr MEZ gleichen sich die Windgeschwindigkeiten von Hohenpeißenberg, Vilgertshofen und Augsburg bis 18 Uhr MEZ weitgehend an, da nun alle 3 Stationen in der konvektiv gemischten Einströmsschicht des Alpines Pumpens liegen. Mit dem Aufbrechen der Bodeninversion und dem Einsetzen stärkeren Vertikalaustausches beginnt an der Zugspitze die Windgeschwindigkeit abzunehmen, um am Nachmittag zur Zeit der stärksten Entwicklung des Impulsaustausches ein Minimum zu erreichen.

Für Tage mit geringerer Strahlung ($10\text{--}20 \text{ MJ/m}^2$ und $<10 \text{ MJ/m}^2$) ist der Tagesgang der Windgeschwindigkeit weniger ausgeprägt als bei hoher Einstrahlung, besonders an den höheren Stationen Hohenpeißenberg und Zugspitze, wo die Windgeschwindigkeit ganztägig höher bleibt. An diesen Tagen ist der vertikale Impulsaustausch schwächer ausgebildet.

An der Zugspitze ist die dominante Windrichtung West, an den tiefen Stationen der Einströmsschicht nimmt die Nordkomponente mit wachsendem Abstand vom Alpenrand ab. Mit zunehmender Einstrahlung, d. h. Verstärkung des inneralpinen Hitzetiefs weitet sich die Einströmsschicht weiter nach Norden aus. Oberhalb der Einströmsschicht mit einer Nordkomponente tritt an der Zugspitze eine Südkomponente auf, die sich dem synoptischen Wind aufprägt. Die thermische Zirkulation mit einer bodennahen Einströmsschicht und einer kompensierenden Gegenströmung in der Höhe ist daran gut erkennbar.

Es sei angemerkt, dass die Rückströmung in der Höhe keine geschlossene Zirkulationslinie bedeutet, sondern dass die Luft wegen der hohen zonalen Windkomponente im und oberhalb des Gipfelniveaus wegen der dort höheren Windgeschwindigkeit in Hauptwindrichtung weggeführt wird.

2.3 Mittleres Strömungsfeld in der Einströmsschicht

Abb. 5-4 zeigt mittlere Windvektoren in der bodennahen Schicht an Tagen mit ausgeprägtem Alpinem Pumpen. Dabei wurde für die Einströmphase von 8–20 MEZ gemittelt und für die Ausströmphase von 20–8 MEZ. Die Stationen 20, 23, 29 und 35 liegen auf

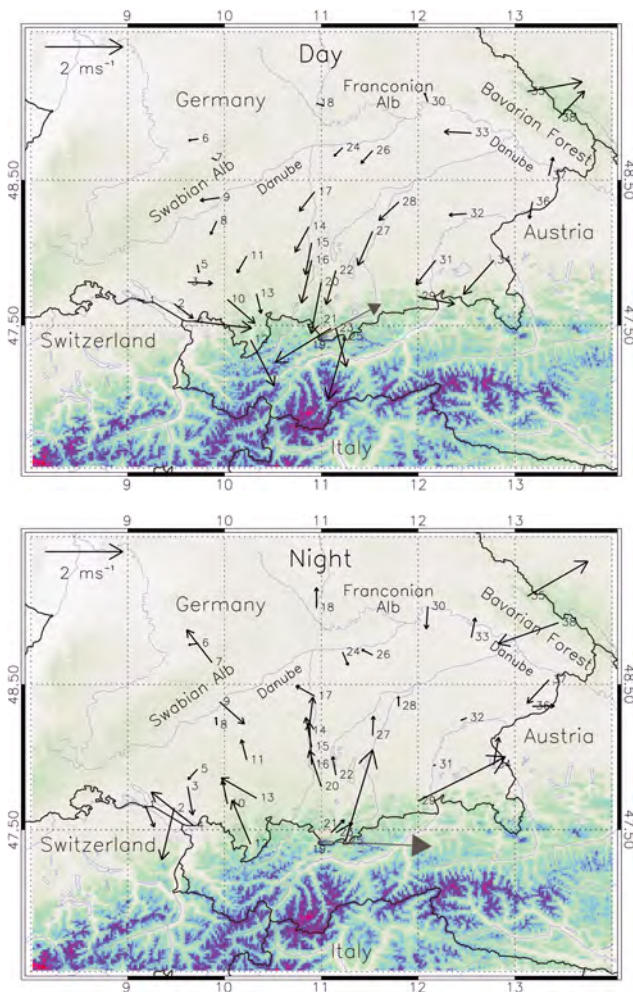


Abb. 5-4: Mittleres Windfeld an Tagen mit Alpinem Pumpen (340 Fälle). Oben: Windvektor für die Einströmphase 8–20 MEZ; unten: mittlere Windvektoren für die Ausströmphase von 20–8 MEZ. Der Wind an der Zugspitze ist durch ein ausgefülltes Dreieck hervorgehoben.

Bergen, die aber im Tagesverlauf noch von der nach oben wachsenden Einströmphase erfasst werden.

Das Windfeld im gesamten Alpenvorland ist im Mittel durch eine nordöstliche Strömung gekennzeichnet, wobei die Nordkomponente mit zunehmender Nähe zum Alpenrand größer wird. Die Mittelgebirge nördlich der Donau entwickeln eigene, schwächer ausgebildete lokale Windsysteme. Die tagsüber im Alpenvorland vorherrschende Nordostkomponente entsteht aus der Überlagerung der Druckgradienten, die aus den Wärmetiefs der Nordalpen und über dem Allgäu entstehen. So zeigen Stationen westlich der Linie Memmingen-Kempten eine Nordwestkomponente, d. h. über dem Allgäu entsteht tags eine Konvergenz, entlang der die Luft aufsteigen muss. Damit findet auch die häufigere Entstehung von Gewittern im Allgäu eine Erklärung, wie sie anhand von Blitzstatistiken von FINKE und HAUFF (1996) dokumentiert wurden. Die schwachen Geländeneigungen im Alpenvorland sind also ausreichend zur Bildung solcher lokaler Konvergenzen.

In der Nacht fließt die in den Alpen sich bildende Kaltluft aus. Die Strömung ist schwächer als am Tag und komplexer, da Kaltluftbildung überall stattfindet, der Kaltluftabfluss der lokalen Geländeneigung folgt und sich auch örtlich Kaltluftseen in Senken oder an Strömungsbarrieren bilden. Trotzdem ist die Strömung zur Donau hin klar erkennbar, wo sich die Kaltluft letztlich sammelt.

Das Windfeld weist in den Talöffnungen des Alpennordrandes wie Isartal, Loisachtal oder dem Oberstdorfer Taleinschnitt hohe Werte auf, da die Talrichtung eine Windführung vorgibt und sich besonders am Tag durch den Bernoulli-Effekt eine zusätzliche Beschleunigung ergibt.

Die Bedeutung der schwachen Hangneigungen im Vorland wird wiederum im Allgäu deutlich, in dessen Westen die Luft nachts zum Bodensee drainiert. Der Bodensee selbst entwickelt in Ufernähe vom Land-See-Wind geprägte Zirkulationsmuster.

3 Modifikation der bodennahen Strömung durch die großräumige Höhenwetterlage

Wie eingangs erwähnt, spielen andere Luftmasseneigenschaften wie Stabilität und Wasserdampfgehalt (Wolkenbildung) eine Rolle bei der Ausprägung des Alpines Pumpens. Aus Norden großräumig anströmende Luft dürfte z. B. eine vergleichsweise höhere Stabilität der Schichtung als Luftmassen bei anderen Wetterlagen aufweisen, damit hohe Einstrahlungssummen erreicht werden können. Manchmal können auch Luv- und Leeeffekte entstehen, die bei hinreichend starken synoptischen Druckgradienten zu geschlossener Staubewölkung oder zu Föhn (HOINKA 1980) führen.

Zwischen großräumiger Wetterlage und thermisch getriebenen Phänomenen wie dem Alpinen Pumpen treten immer Überlagerungen und Wechselwirkungen auf. Zur Veranschaulichung derartiger Wechselwirkungen wurden mit Hilfe der Schweizer Alpenwetterstatistik (SCHÜEPP 1979, METEOSCHWEIZ 1985) Situationen der Klassen Nord und Süd ausgewählt und mittlere Bodenwindfelder dargestellt (Abb. 5-5).

Nordwind in 500 hPa: Die Nordlage prägt sich auch dem bodennahen Windfeld auf. Bemerkenswert ist, dass sich sogar eine divergente Strömung ausbildet, bei der westlich von 11,5° E die Strömung eine einheitliche NE-Komponente trägt; östlich dieser Linie entsteht eine NW-Komponente, d. h. infolge einer Strömungsdivergenz werden die Alpen in Bodennähe westlich bzw. östlich umströmt.

Südwind in 500 hPa: Das bodennahe Windfeld ist schwächer ausgebildet als bei der Nordlage, da die südliche Grundströmung von der thermisch induzierten

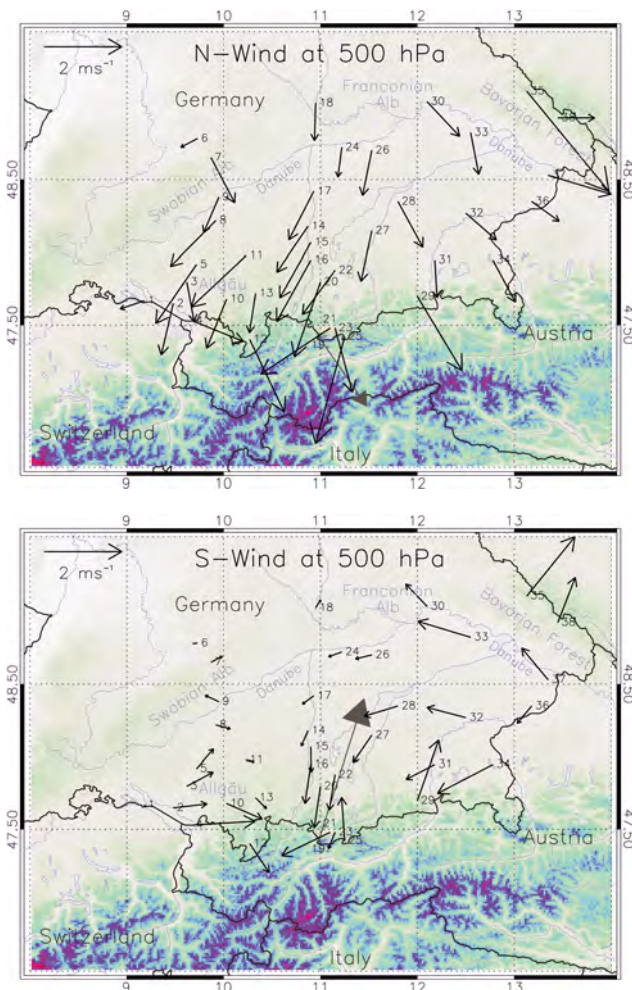


Abb. 5-5: Mittleres Bodenwindfeld bei Alpinem Pumpen für die Einströmphase 8–20 MEZ für Bedingungen mit hoher Einstrahlung $\geq 20 \text{ MJ/m}^2$. Oben: Nordlage in 500 hPa-Niveau über den Alpen (Mittel über 61 Tage). Unten: Süd (Mittel über 86 Tage). Die Stationsnummern sind mit Abb. 5-4 identisch.

Strömung kompensiert bzw. überkompensiert werden muss. Die Zugspitze und Bergstationen wie Wank oder Wendelstein weisen bereits eine starke Südwindkomponente auf, da sie noch überwiegend von der synoptischen Strömung in der Höhe erfasst werden. Im Allgäu bildet sich bei der Südlage eine deutliche Konvergenzlinie aus. Bei diesen Wetterlagen treten Gewitter häufiger auf, da der Feuchtigkeitsgehalt der Luft höher ist als bei Nordlagen. FINKE und HAUFF (1996) zeigten, dass sich im Allgäu ein Häufigkeitsmaximum in der Blitzaktivität befindet. Schwache Geländeneigungen (wie in Abb. 5-1 in O-W-Richtung) regen bei bestimmten Bedingungen Sekundärzirkulationen an, die sich der Hauptzirkulation des Alpinen Pumpens überlagern.

4 Alpines Pumpen und Konvektionsbewölkung

Hohe Einstrahlung, die Alpines Pumpen auslöst, führt zur Bildung von Konvektionsbewölkung. Alpines Pumpen bewirkt aber kompensierendes Absinken im

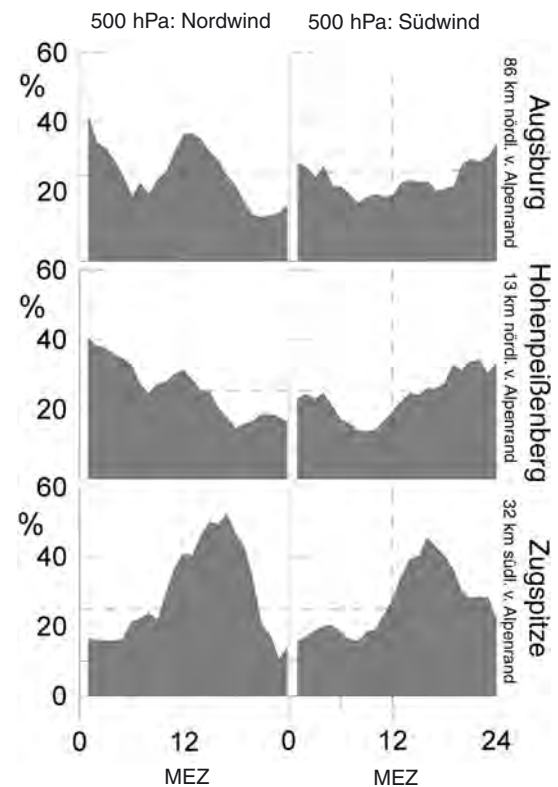


Abb. 5-6: Mittlere Tagesgänge der Quellbewölkung (Bedeckungsgrad in % bis 2000 m ü. G.) an Tagen mit Alpinem Pumpen (hohen Tagessumme der Einstrahlung) der Stationen Augsburg, Hohenpeißenberg und Zugspitze. Linke Säule: Nordlagen in 500 hPa (61 Fälle); rechte Säule: Südlagen in 500 hPa (86 Fälle).

Vorland und die Windströmung schert auch Konvektionsblasen ab, wodurch die Organisation größerer Wolkenkomplexe behindert wird.

Eine Analyse der tiefen Bewölkung (bis etwa 2000 m über Grund) für Augsburg, Hohenpeißenberg und Zugspitze an Tagen mit hoher Einstrahlung ergibt die in Abb. 5-6 dargestellten Tagesgänge. Die Stationen liegen wieder auf einer Nord-Südlinie, wobei Augsburg etwa am Nordrand und Hohenpeißenberg im Zentrum der Einströmschicht liegt und die Zugspitze in der Hauptkonvektionszone.

Unabhängig von der Großwetterlage ist an der Zugspitze ein klarer Tagesgang der Bewölkung mit einem ausgeprägten Nachmittagsmaximum (16–17 MEZ) festzustellen, wie für Strahlungstage zu erwarten ist. Zu dieser Zeit hat sich die tiefe Bewölkung gegenüber dem Vormittag verdoppelt bis verdreifacht. Die beiden anderen Stationen weisen keinen so deutlichen Tagesgang auf. Mit beginnendem Einströmen muss gleichzeitig Absinken einsetzen, was die Wolkenbildung in Vorland hemmt. Am Nachmittag ist das Absinken am stärksten, wenn die Konvektionsanregung am größten ist. Bei den Südlagen kommt ein gewisser Leeeffekt oder ein geringer Föhnwind hinzu, da die Luft nach dem Überströmen der Alpen ebenfalls absinken muss. Die Unterdrückung der Konvektionswolken scheint

am Hohenpeißenberg ausgeprägter als in Augsburg, da Hohenpeißenberg im Zentrum der Einströmung liegt und das kompensierende Absinken hier stärker sein muss als am Nordrand der Einströmung. Dieses Zusammenspiel erklärt das häufige Auftreten des oft weiß-blauen Himmels in Oberbayern.

5 Fallstudie zum Alpines Pumpen am 8.7.2002

Für eine Abschätzung der mit Alpinem Pumpen verbundenen Massenflüsse wurden Daten eines Feldexperimentes ausgewertet, in dem Sondierungen, Fernmessverfahren, luftchemische Messungen sowie Flugzeuge eingesetzt waren. An dem Tag herrschte eine Hochdrucklage mit schwachem Wind am Boden und Südwind in der Höhe. Um 00 UTC lag ein Höhenhochkeil über dem Untersuchungsgebiet, doch hatte sich um 12 UTC zwischen dem Hochkeil und dem Trog im Westen eine SW-Strömung mit massiver Warmluftadvektion entwickelt. Alpines Pumpen konnte sich gut ausbilden.

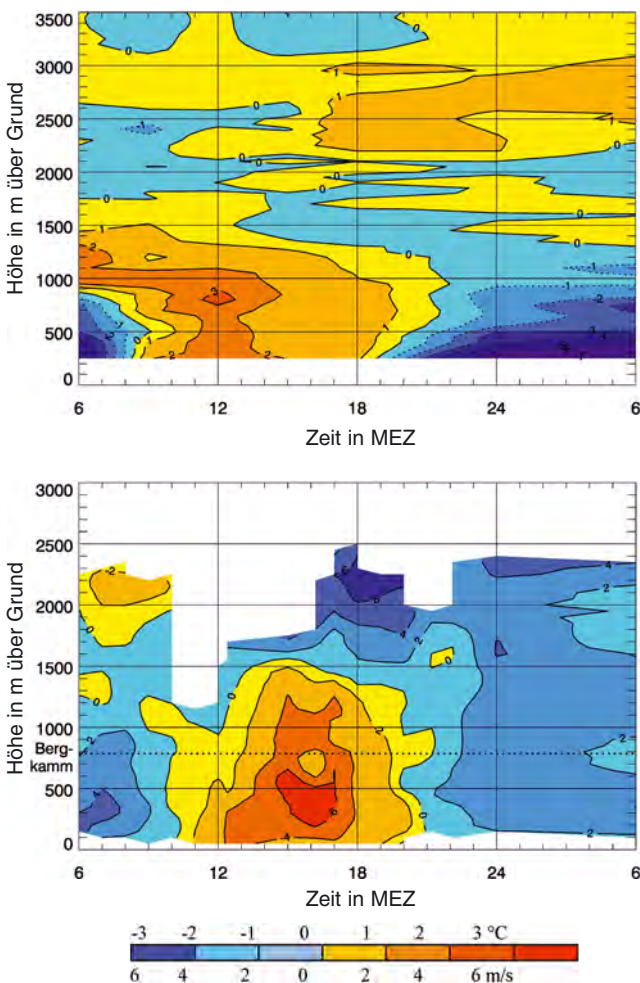


Abb. 5-7: Oben: Tagesgang der Temperaturdifferenz Isartal-Oberschleißheim: die zweigeschichtete Temperaturstruktur bei Alpinem Pumpen ist gut zu erkennen. Unten: Tageszeitliche und vertikale Entwicklung des Talwindsystems im Isartal: Talaufwind in roter und Talabwind in blauer Tönung, Einströmphase von 10–21 MEZ.

Abb. 5-7 zeigt im oberen Teil den Tagesgang der Temperaturdifferenz zwischen Isartal und Oberschleißheim als Funktion der Höhe, abgeleitet aus Radiosondierungen. Unterhalb von 100 bis 1300 m über Grund ist das Isartal während der Einströmphase wärmer als die weit vom Alpenrand entfernte Station Oberschleißheim. Oberhalb dieser Grenze ist es nachts über den Alpen wärmer als im Vorland, tagsüber dagegen etwas kühler. Man erkennt außerdem, dass die Erwärmung morgens unmittelbar am Talboden einsetzt und dann rasch vertikal fortschreitet. Am Abend beginnt die Auskühlung am Talboden ebenfalls früher als in der Höhe.

Im unteren Teil von Abb. 5-7 ist die vertikale Windverteilung an der Messstation Isartal aufgetragen. Man erkennt das Anwachsen der Einströmung mit der Höhe und das Maximum der Nordkomponente am späten Nachmittag. Das Windmaximum ist in einigen 100 m Höhe zu finden. Das Umschlagen der Meridionalkomponente erfolgt am Vormittag um 10 Uhr MEZ und am Abend um 20–21 Uhr MEZ.

Aus dem Vergleich beider Teilbilder ist weiter ersichtlich, dass die Windrichtung im Isartal am Vormittag zu diesem Zeitpunkt von Süd auf Nord wechselt, kurz nachdem (etwa eine Stunde) die Temperaturdifferenz Isartal - Oberschleißheim das Vorzeichen gewechselt hat. Es sind demnach keine sehr großen Temperaturdifferenzen erforderlich, um in den größeren Talöffnungen des Alpenrandes das Einströmen zu bewirken.

Eine wichtige Frage ist, in welchem Gebiet die Luft der Einströmung konvektiv nach oben gemischt wird: Umfasst dieses Gebiet den ganzen Raum bis zum Alpenhauptkamm oder nur die Nordalpenkette bis zum Inntal? Obwohl diese Frage nur durch Messungen nicht gut beantwortet werden kann, sprechen viele Argumente für das Inntal als Südgrenze, zumindest für die Situation des 8.7.2002:

- die Nordflanke des Inntales wird von der Sonneneinstrahlung sehr gut erwärmt und erzeugt daher starken Vertikalaustausch;
- die inneralpinen Druckgradienten sind schwach gegenüber dem Gradienten im Vorland;
- Horizontalschnitte der LM-Simulation (BRAUN 2003, persönliche Mitteilung) zeigen, dass die Hauptkonvektionszone nur die Nordalpen umfasst.

Südlich vom Inntal bis zum Alpenhauptkamm dürfte sich ein zweites, aber schwächeres thermisches Zirkulationsmuster ausbilden, das vom Zirkulationsmuster des Alpines Pumpens getrennt ist.

Die große horizontale Erstreckung des Alpines Pumpens wird deutlich an einem 200 km langen Ost-West Schnitt des Horizontalwindes bis 6 km Höhe vom Bodensee bis zum Chiemsee südlich des Hohenpeißenberg parallel zum Alpenrand (Abb. 5-8). Die Messungen wurden am frühen Nachmittag des 8.7.2002 mit ei-

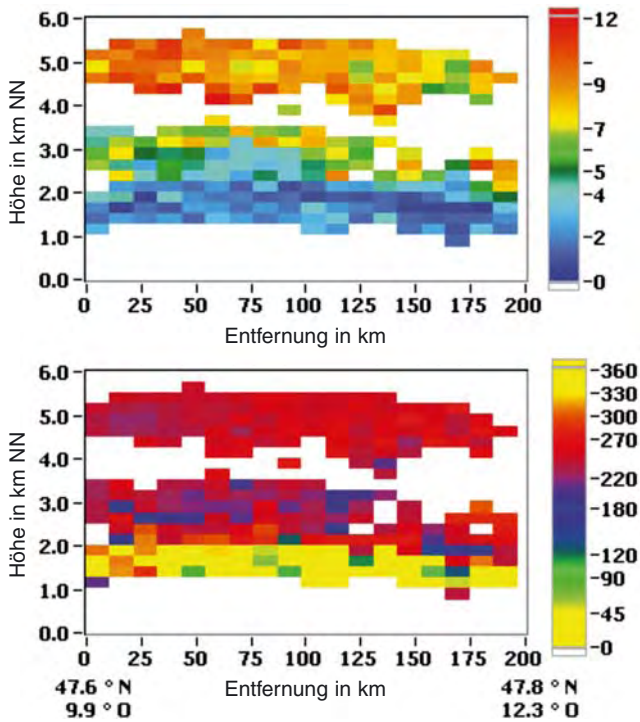


Abb. 5-8: West-Ost-Schnitt parallel zum Alpenrand vom Bodensee bis Chiemsee mit Messungen der horizontalen Windgeschwindigkeit (oben) und -richtung (unten) mit einem flugzeuggetragenen Doppler-Lidar am 8.7.2002, 13:10–13:27 MEZ.

nem neuartigen Doppler-LIDAR (**L**ight **D**etection and **R**anging, ein optisches Laser-Fernerkundungsinstrument) an Bord des Forschungsflugzeuges DLR Falcon 20 vorgenommen (REITEBUCH et al. 2003a, 2003b, 2004). Die Windgeschwindigkeit entlang dieses Schnittes weist nur sehr geringe Werte bis 4 m/s (Abb. 5-8 oben, blaue Farbkodierung) mit einer deutlichen Nordkomponente (Abb. 5-8 unten, gelbe Farbkodierung) in einer Schicht bis etwa 2 km NN auf. Insbesondere in der Windrichtung ist eine Einström-Schicht von etwa 1 km vertikaler Mächtigkeit über Grund mit einer nördlichen Windkomponente und darüber liegendem südwestlichem Wind deutlich zu erkennen. Die Höhe dieser Schicht nimmt zum Osten im Bereich des Inntals und Chiemsees leicht ab. Die Abnahme der vertikalen Mächtigkeit mit größerer Entfernung zu den Alpen in Nord-Süd-Richtung konnte an anderen Tagen mit flugzeuggetragenen Doppler-Lidar Messungen gezeigt werden (WEISSMANN et al. 2005). Eine Abschätzung des Massenflusses aus diesen Messungen ergab, dass innerhalb eines Tages das komplette Luftvolumen der Ansaugschicht bis aus einer Entfernung von 100 km zu den Alpen transportiert wird.

Bei labiler Schichtung können leicht hochreichende Quellwolken entstehen, die Tagessumme der Einstrahlung ist dann geringer. Bei genügend hohem Grad der Labilität entwickeln sich auch Schauer oder Gewitter. Das Auslösen kann dabei durch schwache Konvergenzen erfolgen, wie sie sich am Alpennordrand oder über

dem Allgäu ausbilden. Eine derartige labile Situation war am Folgetag, den 9.7.2002 gegeben, bei der sich am Ausgang des Loisachtals ein kräftiges Gewitter bildete.

6 Transporte von Luftbeimengungen am 8.7.2002

Zur Abschätzung von Spurenstofftransporten dient ein Boxmodell (Abb. 5-9). Schicht 1 repräsentiert dabei den mittleren Massenfluss, wie er sich aus den Messungen an verschiedenen Punkten im Alpenvorland ergab. Der in Abb. 5-9 angegebene Fluss stellt den Mittelwert für die gesamte Dauer der Einströmphase dar, also für den Zeitraum 12–20 Uhr MEZ. Dieses Volumen wird konvektiv in die Box 2 (Mischungsbox) zugemischt, deren südliche Begrenzung im Inntal und deren Nordrand an den Beginn der Alpen gelegt wurde, wo die Berggipfel eine Höhe von ~1800 m überschreiten. Die Obergrenze von Box 2 konnte anhand von Flugzeugmessungen festgelegt werden. Der nordwärts gerichtete Massenstrom in der Höhe ergab sich aus den Windmessungen an der Zugspitze und von Flugzeugen aus. Über dem Wetterstein- bzw. dem Karwendelmassiv ist der Massenfluss wegen der Überströmung am höchsten und nimmt nach Norden hin wegen des Absinkens ab. Verschiedene Abschätzungen haben ergeben, dass das Volumen der Einströmschicht am Tag komplett ersetzt wird.

Vergleicht man die mit dem Boxmodell berechneten Konzentrationen mit vom Flugzeug gemessenen Werten, so ergibt sich gute Übereinstimmung anhand von Benzol- und Toluoldaten. Die Messungen in der Mischungszone bestätigten die berechneten Werte gut, das Boxmodell erweist sich daher als brauchbarer Ansatz.

Vom Hochgebirge gibt es eine Reihe von Berichten über eine Zunahme der Schadstoffbelastung von Seen

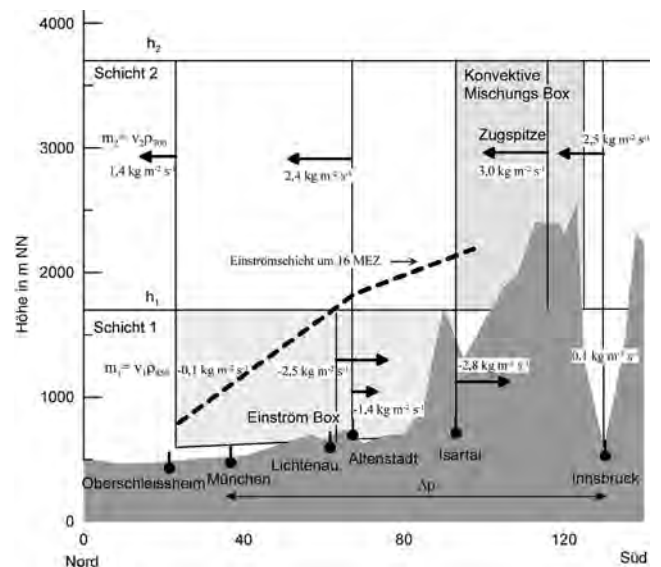


Abb. 5-9: Boxmodell zur Abschätzung der Massenströme und konvektiven Mischungsvorgänge. Ausführliche Erklärung siehe Text.

und Böden mit Zunahme der Höhe. Dabei handelt es sich um semivolatile Substanzen wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) oder persistente organische Schadstoffe (POP's; WEISS 2002) oder Quecksilber. Von diesen Substanzen nimmt man an, dass sie in Gebieten mit niedriger Temperatur stärker kondensieren und sich anreichern, wofür die Voraussetzungen in polaren Breiten oder in den Hochalpen bestehen. So wurde in kalten Alpenseen eine hundertfache Anreicherung von PCB-180 gegenüber warmen Seen nachgewiesen (GRIMALD et al. 2001). Auch Fichtennadeln oder Waldböden zeigen eine Höhenzunahme vieler Schadstoffe. Ähnliche Beobachtungen zur Höhenzunahme liegen auch aus Kanada vor (BLAIS et al. 1998; BANIC et al. 2003).

Alpines Pumpen ist als einer der Prozesse zu verstehen, die den Stoffeintrag in die Hochlagen von Gebirgen erheblich verstärken. Während für viele Substanzen Alpines Pumpen nur einen verstärkten Vertikaltransport bedeutet, kondensieren und akkumulieren sich semivolatile Substanzen über diesen Mechanismus in den Hochlagen.

7 Schlussfolgerungen

An Tagen mit hoher Einstrahlung entwickelt sich eine thermisch angetriebene Zirkulation zwischen Alpen und Alpenvorland. Das Phänomen tritt von April bis August an 42 % der Tage in ausgeprägter Form und an weiteren 45 % der Tage von März bis Oktober in mäßiger Ausprägung auf. Die angesaugte Luft wird über den Nordalpen (zwischen Alpenrand und Inntal) konvektiv nach oben gemischt und von der synoptischen Strömung der freien Troposphäre weiter verfrachtet. Alpines Pumpen erfasst auch Gebiete wie die hochindustrialisierte Po-Ebene, deren Emissionen somit ebenfalls verstärkt in die freie Troposphäre gelangen. Globale Chemie-Transport-Modelle, die eine Gitterweite von etwa 300 km haben, unterschätzen diese Verstärkung des Vertikalaustausches durch Gebirgsräume, weshalb die globalen Budgets von Spurenstoffen immer noch unbefriedigend sind (SCHULZ und BEY 2004).

Die mit Alpinem Pumpen entstehenden Druckgradienten sind im Prinzip geeignet, die numerischen Wetterprognosemodelle zu verbessern. In diesen Modellen ist die Orographie stark geglättet, Erwärmungseffekte auf das in alpinen Tälern reduzierte Luftvolumen werden damit zwangsläufig unterschätzt. Dies wirkt sich auch auf Flüsse von Impuls, Feuchte und Wärme und somit auf den Vertikalaustausch aus, mit entsprechenden Folgen in der Wolkenbildung und für die Strahlungsumsetzung in der Atmosphäre. Diesbezügliche Parameterisierungen im Modell können mittels der hier bestimmten Druckgradienten so modifiziert werden, dass eine bessere Übereinstimmung mit den beobachteten Gradienten erreicht wird.

Mit dem Alpinen Pumpen werden Luftbeimengungen aus bodennahen Emissionsgebieten in den Alpenraum verfrachtet. Insbesondere semivolatile, toxische Substanzen können bei niedrigen Temperaturen in den Hochlagen wieder kondensieren und tragen hier zur Belastung des Ökosystems bei. Solche Substanzen akkumulieren sich in den Hochlagen und bewirken daher oft eine Zunahme der Belastung mit zunehmender Höhe.

Literatur

- BANIC, C. M., S. T. BEAUCHAMP, R. J. TORDON, W. H. SCHROEDER, A. STEFFEN, K. A. ANLAUF, H. K. T. WONG, 2003: Vertical distribution of gaseous elemental mercury in Canada. *J. Geophys. Res.* **108**, 61-613.
- BLAIS, J. M., D. W. SCHINGLER, D. C. G. MUIR, D. B. DONALD, B. ROSENBERG, 1998: Accumulation of persistent organochlorines in mountains of western Canada. *Nature* **395**, 585-588.
- EGGER, J., 1990: Thermally forced flows: theory. In: BLUMEN, W. (Hrsg.): Atmospheric processes over complex terrain. *Meteorol. Monographs* **23**, 43-58.
- FINKE, U., T. HAUF, 1996: The characteristics of lightning occurrence in southern Germany. *Beitr. Phys. Atmos.* **69**, 361-374.
- GANTNER, L., M. HORNSTEINER, J. EGGER, G. HARTJENSTEIN, 2003: The diurnal circulation of Zugspitzplatt: Observations and modelling. *Meteorol. Z., N. F.* **12**, 95-102.
- GRIMALD, J. O., P. FERNANDEZ, L. BERDIE, R. VILANOVA, J. CATALAN, R. PSENNER, R. HOFER, P. G. APPLEBY, B. O. ROSSELAND, L. LIEN, J. C. MASSABUAU, R. W. BATTARBEE, 2001: Selective trapping of organochloric compounds in mountain lakes of temperate areas. *Envir. Sci. Technol.* **35**, 2690-2697.
- HOINKA, K. P., 1980: Synoptic-scale atmospheric features and Föhn. *Beitr. Phys. Atmos.* **53**, 485-507.
- KÄSTNER, M., K. T. KRIEBEL, 2001: Alpine cloud climatology using long-term NOAA-AVHRR satellite data. *Theor. Appl. Climatol.* **68**, 175-195.
- KÄSTNER, M., P. BISSOLLI, K. HÖPPNER, 2004: Comparison of a satellite based Alpine cloud climatology with observations of synoptic stations. *Meteorol. Z., N. F.* **13**, 233-243.
- LUGAUER, M., P. WINKLER, 2002: Alpines Pumpen – Thermische Zirkulation zwischen Alpen und bayerischem Alpenvorland. *DWD-FE-Arbeitsergeb.* Nr. **72**, Selbstverlag des DWD, Offenbach/Main, 39 S.
- LUGAUER, M., P. WINKLER, 2005: Thermal circulation in South Bavaria – climatology and synoptic aspects. *Meteorol. Z., N. F.* **14**, 15-30.
- METEOSCHWEIZ, 1985: Alpenwetterstatistik – Witterungskalender – Beschreibung der einzelnen Parameter. Selbstverlag Meteoschweiz, Zürich, 26 S.
- NICKUS, U., I. VERGEINER, 1984: The thermal structure of the Inn valley atmosphere. *Arch. Meteorol. Geophys. Biokl.* **A33**, 199-215.
- PREVOT, A., S. H. J. DOMMEN, M. BÄUMLE, M. FURGER, 2000: Diurnal variations of volatile organic compounds and local circulation systems in an Alpine valley. *Atmos. Environ.* **34**, 1413-1423.

- REITEBUCH, O., A. DABAS, P. DELVILLE, P. DROBINSKI, L. GANTNER, 2003a: Characterization of Alpine pumping by airborne Doppler lidar and numerical simulations. *Int. Conf. Alp. Meteorol., Brig 2003, Publications of MeteoSwiss* No. **66**, 134-137; online unter <http://www.map.meteoswiss.ch/map-doc/icam2003/396.pdf>
- REITEBUCH, O., H. VOLKERT, C. WERNER, A. DABAS, P. DELVILLE, P. DROBINSKI, P. H. FLAMANT, E. RICHARD, 2003b: Determination of airflow across the Alpine ridge by a combination of airborne Doppler lidar, routine radiosounding and numerical simulations. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* **129**, 715-727.
- REITEBUCH, O., A. DABAS, P. DELVILLE, P. DROBINSKI, L. GANTNER, S. RAHM, M. WEISSMANN, 2004: The Alpine mountain-plain circulation „Alpine pumping“: Airborne Doppler Lidar Observations at 2 μ m and 10.6 μ m and MM5 simulations. Reviewed and Revised Papers at 22th Int. Laser Radar Conference, *ESA spec. Publ.* **561**, 747-750.
- SCHÜEPP, M., 1979: Witterungsklimatologie, - Klimatologie der Schweiz, Band 3. – Beiheft zu den *Annal. der Schweizer Meteorol. Anstalt* (Jahrgang 1978), 93 S.
- SCHULZ, M. G., I. BEY, 2004: Numerical modelling of long-range pollution transport. In: The handbook of environmental chemistry, 4, Part G. *Springer-Verlag*, Heidelberg und Berlin, 197-223.
- STEINACKER, R., 1984: Area – height distribution of a valley and its relation to the valley wind. *Beitr. Phys. Atmos.* **57**, 64-71.
- WHITEMAN, C. D., 1990: Observation of thermally developed wind systems in mountainous terrain. In: BLUMEN, W. (Hrsg.): Atmospheric processes over complex terrain. *Meteorological Monographs* **23**, 5-42.
- WHITEMAN, C. D., 2000: Mountain Meteorology. *Oxford University Press*, New York, 376 S.
- WEISS, P., 2002: Organische Schadstoffe an entlegenen Waldstandorten Sloweniens und Kärntens. Selbstverlag Umweltbundesamt, Wien, 121 S., ISBN 3-85457-616-1.
- WEISSMANN, M., F. J. BRAUN, L. GANTNER, G. MAYR, S. RAHM, O. REITEBUCH, 2005: The Alpine mountain-plain circulation: Airborne Doppler lidar measurements and numerical simulations. *Mon. Wea. Rev.* **133**, 3095-3109.
- WOTAWA, G., H. KRÖGER, A. STOHL, 2000: Transport of ozone towards the Alps – results from trajectory analyses and photochemical model studies. *Atmos. Environ.* **34**, 1367-1377.