

## Land-See-Wind am Bodensee

von Richard Werner und Michael Riffler

### Zu den Autoren

Dr. Richard Werner, geboren 1950, Studium der Meteorologie und Physik. Studienassistent am Institut für Meteorologie und Geophysik an der Universität Wien, Mitarbeiter am Umweltinstitut des Landes Vorarlberg – Abteilung Luftreinhaltung, Mitglied der Geschäftsleitung ARGE Naturwissenschaften Vorarlberg, Autor mehrerer Veröffentlichungen über Vorarlberg aus klimatologischer und lufthygienischer Sicht.

Michael Riffler, geboren 1977, Studium Meteorologie in Innsbruck, Prognostiker im Alpinwetterdienst, Auslandsstudium «Scripps Institution of Oceanography» in San Diego, Mitarbeiter bei Meteomedia, Diplomarbeit über Wellenstrukturen in der Jetstream-Region in der oberen Troposphäre.

### Abstract

The subject of this study is the wind situation by the Lake of Constance, especially diurnal variations of the wind direction and speed. A land and sea breeze circulation can be detected by differentiating two weather regimes in terms of the range between morning and afternoon temperatures. In summer 2000 two-thirds of the cases show the described circulation. This flow pattern is also part of a valley-wind-characteristic on the north side of the Alpine Rhine-Valley.

Key words: wind directions, wind distribution, sea breeze, local circulations, Lake of Constance, Land-See-Wind, Vorarlberg, Austria

### Zusammenfassung

Die Windverhältnisse am Bodenseeufer werden anhand mittlerer Tagesgänge von Windrichtung und Windgeschwindigkeit untersucht. Dabei wurde die Zirkulation des Land-See-Windes erfolgreich nach Wetterlagentypen getrennt. Aus dem Sommer 2000 können in rund zwei Drittel der Tage die periodischen Muster bestimmt werden. Diese Zirkulation ist auch Teil der Tal-Bergwinde, die sich im nördlich Alpenrheintal auffinden lassen.

### Einleitung

In der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, ob am Bodensee eine Land-See-Wind-Zirkulation beobachtet werden kann. Diese lokale, geschlossene Zirku-

**VORARLBERGER  
NATURSCHAU  
16  
SEITE 153–166  
Dornbirn 2005**



lation entsteht tagsüber durch die strahlungsbedingte, ungleiche Erwärmung bzw. nächtliche Auskühlung von Land- und Seeoberfläche. Dabei weht tagsüber der Wind vom See zum Land und nachts umgekehrt.

Zur Untersuchung wurden die Daten der Station Rohrspitz über den Zeitraum von April bis September 2000 betrachtet. Die Basis der Untersuchung bilden Registrierungen der Temperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit, sowie die relative Feuchte.

## Räumliche Überlegungen

Land-See-Winde sind am gesamten Bodenseeufer vorhanden. Sie bilden sich besonders deutlich aus, wenn die Hochdruckwetterlagen und die Wetterlagen mit schwachen Druckunterschieden im Skalenbereich über 250 km vorherrschen. Bei diesen Wetterlagen hat die Sonneneinstrahlung untertags und die langwellige Ausstrahlung der Erd- und Wasseroberflächen nächtens eine entscheidende Rolle. Die physikalische Eigenschaft «Wärmekapazität» ist hierbei von Bedeutung; dabei kommt es also auf das Speichern der Wärme an. Die Medien Erdboden und Wasserflächen haben hier grosse Unterschiede in der Temperatur. Aus diesen Unterschieden entsteht binnen 24 Stunden eine Zirkulation an den Küsten, die Seewind und Landwind zu bestimmten Tageszeiten mit sich bringt.

Die früheren Klimatologen nannten sie auch periodische Winde, da sie regelmässig zwei Mal täglich über mehrere Stunden zwei deutliche Windrichtungssektoren vorfanden. Die Richtungsänderungen spielen ja für die Segelschiffe eine wichtige Rolle. Dazu kommt auch die Beeinflussung der Richtung des Wellenschlages, welcher uns entweder klares Wasser zum Schwimmen bringt oder Äste, Baumstämme und Staubpartikel die Wasseroberfläche bedecken und uns «schmutziges» Wasser vorspiegeln. Im Osten Österreichs wurde am Neusiedlersee diese Zirkulation durch LOTTERANER (2001) an allen Ufern studiert und die Divergenz im Bereich der Seemitte theoretisch mittels Vektorrechnungen hergeleitet.

Die Land-See-Winde sind auch dann vorhanden, wenn ein Hügel an den See grenzt, wie dies in der Bregenzer Bucht zwischen Bregenz und Lochau der Fall ist. Dann kommt es allerdings derart zur Überlagerung von Windsystemen, dass nächtens bei klarem Himmel der kalte Hangabwind zum See strömt und anfangs 20 bis 50 m dicke Schichten liefert. Nach einer klaren Nacht liegt dann über dem See ein Kaltluftkörper mit rund 500 m Mächtigkeit. Wenn der See die ersten Sonnenstrahlen empfangen hat, bringt er nach etwa 30 Minuten den Seewind ins Spiel, der sich mit Pulsationen gegen das Ufer kämpft und dann die untere Hangzone (rund 200 m Höhe) zu Eigen macht. Wahrscheinlich strömt er dann über dieser Unterschicht wieder im sogenannten Gegenstrom auf den See zurück, wobei sich eine walzenartige Strömungszelle bildet, die eine Längserstreckung von mehreren Kilometern erreichen kann. Bei Sonnenaufgang auf den Westhängen des Pfänderstockes beginnt dann der Hangaufwind mitzuwirken und er nimmt einen Teilstrom des Seewindes auf und führt ihn in die Gipfelregion des Pfänderstockes.

Auch an der Westflanke des Alpenrheintales von Altstätten bis St. Margarethen gibt es in klaren Nächten die Kaltluftschichten mit dem ausgebildeten Kaltluftkörper im Talbereich. Am Uferand kommt es zu einem Landwind, der einen Überlagerungsbereich durch den Hangabwind aufweist. Bei Sonnenaufgang steuert dann die warme Hangzone nahe den oberen Gipfelfluren um Oberegg und Heiden den Hangaufwind an, der nachfolgend mit der Wirkung der Sonneneinstrahlung den Seewind mitnimmt. Auch hier wird sich eine Überlagerung von Hangzirkulation und Seezirkulation ausbilden. Die Erforschung dieser Gruppierung erfordert vertikale Profile an mehreren Stellen um die horizontalen und vertikalen Erstreckungen zu ermitteln, die heutzutage mit Hilfe von Modellflugzeugen möglich sind. Ein entsprechendes Forschungsprojekt soll in den nächsten Jahren hauptsächlich im Sommer abgewickelt werden.

Vor allem im Sommer sind die Temperaturgegensätze zwischen Tag und Nacht und Land und See am grössten und daher lassen sich die Land-See-Winde besser entdecken und nachweisen. Das Alpenrheintal hat eine Uferzone von Altenrhein bis Bregenz (Mehrerau), die rund 14 km lang ist. Die geschwungene Uferlinie ist deutlich länger, doch die physikalischen Strukturen des Windes sind auch in der zweiten Näherung noch von der Walzenstruktur der kleinen Zirkulation geprägt. Während in früheren Jahren der Land-See-Wind am Bodensee in der Zone um Friedrichshafen schon beschrieben wurde, gab es am Südostufer keine derartigen Auswertungen. Zuletzt wurde von WAGNER (2003) eine Studie über die Sturmverhältnisse angestellt, in der auch 8 Messstationen über einen Monat auf dem See verankert waren. Die Sonderstation S10 befand sich zu diesem Zweck rund 5 km nordwestlich des Rohrspitzes und die Windrose zeigt vier Sektoren, wovon einer dem Südostwind zuzuschreiben ist.

Da sich der Windmesser Rohrspitz deutlich im Naturschutzgebiet befand und vorrangig den Föhnstudien diene wurde er im März 1993 an den Rohspitz Hafen versetzt. Die Modernisierung führte zu einer Messung, die die Bestimmung von Halbstundenmittelwerten erlaubte. Ein ganzer Tag umfasst somit 48 Halbstundenmittelwerte (HMWs) und wenn die Höhenströmung weitgehend von der Bodenschicht getrennt ist, wie dies beim «Schönwetter» (Hochdruckwetterlagen und gradientschwache Wetterlage) der Fall ist, treten die lokal-klimatischen Phänomene und Prozesse in den Vordergrund. Es kommt im Uferbereich daher zum Land-See-Wind.

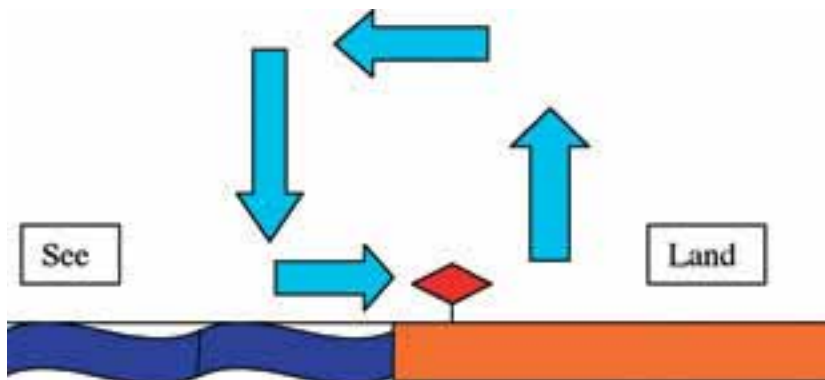
Die Landwinde haben südliche Richtungen, die Seewinde haben nördliche Richtungen. Östliche Winde sind am Rohrspitz bei der Bisenlage vorhanden, wenn ein Hoch über Fennoskandien (Finnland und Skandinavien) an seinem Südrand die kühle Kontinentalluft über mehr als 2000 km transportiert. Vor allem bei Kaltfronten beginnt der starke Wind sein Unwesen aus dem Nordwestsektor zu treiben und es kommt dann auch zu Schäden an Booten, wenn die Eigner die Sturmwarnung nicht ernst genug nehmen. Allerdings sind auch Abenteuerer unter uns, für die dann die Wellenkämme und der böige Wind erst ein lebenswertes Stündchen mit sich bringt. Die stürmischen Winde (20 m/s und mehr als Stundenmittel) werden in 1500 m Höhe im Sommer in nur 0,9% der Stunden vorkommen, wie dies von KOCH und WERNER (2000, Klima von Vorarl-

berg, *Kapitel 8*) dort in *Tabelle 8.7.1* ermittelt wurden. Somit ist im Sommer mit rund 20 Stunden Sturm über die Monate Juni bis August zu rechnen.

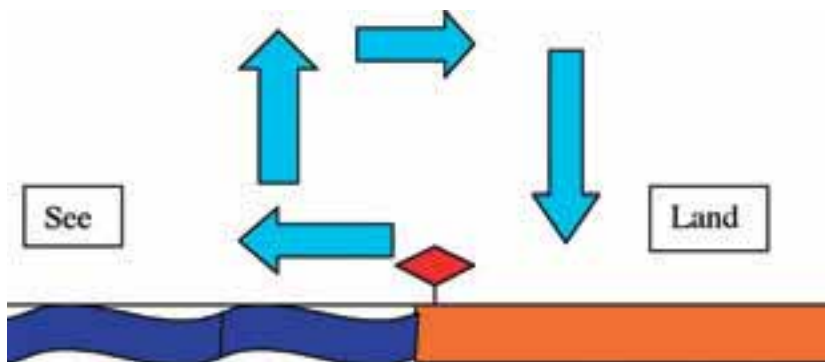
Generell wird also die Walze eher geringe Geschwindigkeiten aufweisen, wobei uns derzeit nur Daten aus dem unteren Bereich der Walze zur Verfügung stehen. Weitere Anhaltspunkte zum Land-See-Wind finden sich aus den Messdaten des Sporthafen auf dem Seezeichen 75 vor der Bregenzer Bucht.

Folgendes Schema kann aus der einschlägigen Fachliteratur (z.B. WHITEMAN 2000) abgeleitet werden:

Untertags



Nächtens



Die schematische Darstellung zeigt auf, dass die Bestätigung der Erstreckung in vertikaler Richtung noch offen ist und diese wird wahrscheinlich mit Modellflugzeugen, Pilotballonen und Fesselballonen zu bestimmen sein.

Die Südwinde im Alpenrheintal kommen aus dem Sektor 135 bis 225 Grad, während die Nordwinde aus dem Sektor 315 bis 45 Grad stammen, wobei üblicher Weise der Nordwind mit 360 Grad bezeichnet wird. Diese Zahlenangaben erlaubt es der Darstellung der ÖNORM zu folgen und führt zu weniger nachrich-

tentechnischen Problemen. Ausserdem haben sich die Wetterforscher auf die Angabe von Null Grad geeinigt, wenn die Windgeschwindigkeit unter 0,6 m/s liegt (das entspricht 1,8 km/h). Die Segler nennen eine derartige Situation auch Windstille oder Calme. Keinen Wind kann man in der bodennahen Grundschicht jedenfalls als sehr rar (Wahrscheinlichkeit unter 1 Promille) erwarten; das entspricht rund 9 Stunden innerhalb eines gesamten Jahres.

Die Seewinde sind daher untertags auch im Nebel oder unter einer Hochnebeldecke vorhanden, während in der Nacht bei Sternenhimmel oder unter der Hochnebeldecke die Landwinde auftreten. Diese Zirkulation wird allerdings immer dann aufgelöst, wenn vom Alpenkörper eine Druckwelle ausgeht oder gegen ihn gerichtet ist, wie dies in der Forschung im Bereich der mesoskaligen Prozesse schon mehrfach nachgewiesen wurde. Daher sind auch diese Land-See-Winde mit statistischen Verfahren fassbar, während im Einzelfall manche Tage nur zeitweise – ein Drittel der Zeit – dem Schema entsprechen und manche Nächte überhaupt dem massiven Kaltluftstrom des Rheintales mit seiner Länge von 120 km (zurück bis zum Beginn der Vorderrheins im Bereich des Alpenhauptkammes) unterliegen.

## **Bearbeitungsmethode**

Die Land-See-Wind-Zirkulation ist – wie oben erwähnt – ein Phänomen, das in grossem Masse von der Einstrahlung abhängig. Somit kann an Tagen mit schlechtem Wetter (starke Bewölkung oder auch viel Wind) keine Zirkulation entstehen. Weiters wird bei Strömungslagen und Tiefdrucksystemen die Windrichtung am Boden von den Höhenwinden dominiert mit einer gewissen Abhängigkeit von der Orographie.

Um eine Aussage über die Land-See-Wind-Zirkulation machen zu können, müssen die Daten deshalb zuerst getrennt werden. Insgesamt stehen die Daten von 183 Tagen zur Verfügung. Die Daten werden in zwei Kategorien eingeteilt: in Schönwettertage und Tage mit «gemischtem» Wetter (Mixedwetter). Da keine Strahlungsdaten zur Verfügung stehen, muss die Einteilung nach anderen Kriterien stattfinden. In erster Linie wird der Tagesgang der Temperatur als Trennung zwischen Schön- und Mixedwetter herangezogen. Dabei wird die Temperaturdifferenz zwischen dem Maximum am Nachmittag (13 – 18 Uhr) und dem Minimum am Morgen (5 – 11 Uhr) gebildet und der Wert von 6°C als Grenze herangezogen. Tage, die sich knapp unterhalb bzw. oberhalb dieser Grenze befinden, werden nochmals anhand von Windrichtung und relativer Feuchte ermittelt und so eine sensitive Kontrolle erzielt. Daraus entstehen zwei Datenkollektive mit 127 «Schönwettertagen» und 56 sogenannten Mixedwettertagen.

Die weitere Auswertung der Meteo-Daten erfolgt anhand statistischer Kriterien wie Mittelwert, Median, Standardabweichung sowie Häufigkeitsverteilungen.

## Die mittleren Tagesgänge und Windrosen der beiden Wetterkategorien

### Windrichtung

Die ausgewerteten Daten zur Windrichtung liegen in den *Abbildungen 1 bis 8* vor. In *Abbildung 1* wird die Windrichtung an Schönwettertagen dargestellt. Der Tagesgang des Medians (DDm) ist deutlich erkennbar und weist einen relativ glatten Verlauf auf. In der zweiten Nachthälfte kommt der Wind aus 150° und dreht am Morgen auf ungefähr 290°. Am Abend stellt sich nach einer längeren Übergangsperiode wieder Wind aus 150° ein. Die Standardabweichung liegt zwischen 50 und 90 Grad. Der Mittelwert der Windrichtung (MITT) weicht nur wenig vom Median ab.

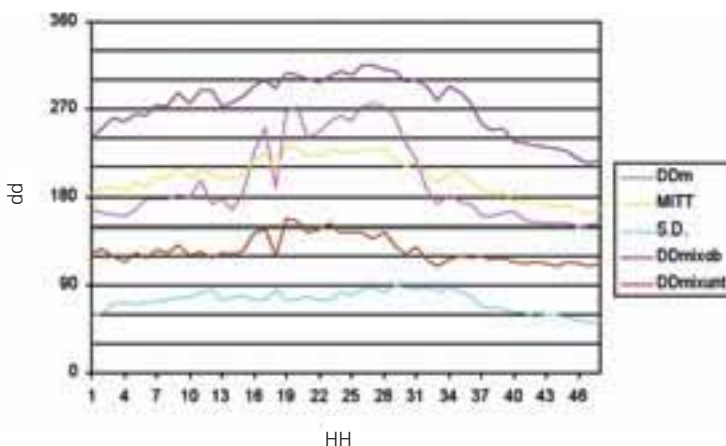
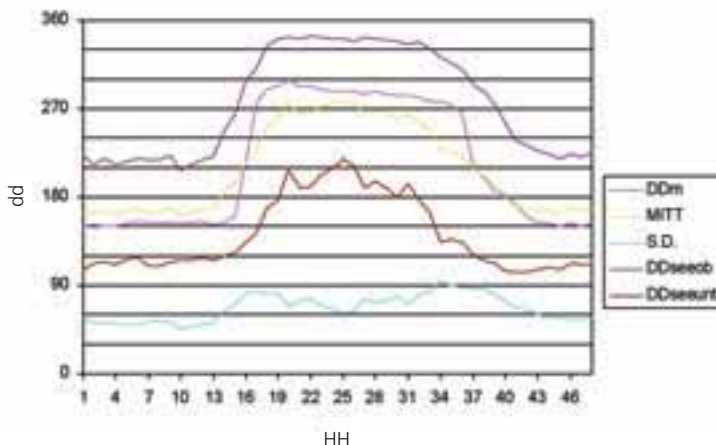
An Tagen mit Mixedwetter (*Abb. 2*) ist der Tagesgang sehr unruhig und deutlich schwächer ausgeprägt. In der Nacht kommt der Wind annähernd aus Süden, am Vormittag sind grössere Sprünge zwischen Süd und West zu beobachten. Am Nachmittag ist ein Richtungswechsel von West auf Süd vorhanden

**Abb. 1:** Land-Seewind als mittlerer Tagesgang der Windrichtungen je Halbstunde bei Schönwetter.

**Abb. 2:** Mittlerer Tagesgang der Windrichtungen je Halbstunde bei Mixedwetter.

**Legende:**

dd – Windrichtung,  
 HH – Halbstunde,  
 12 – 06:00 MEZ,  
 24 – 12:00 MEZ,  
 36 – 18:00 MEZ,  
 48 – 24:00 MEZ,  
 DDm – Median der Windrichtung,  
 MITT – Mittelwert der Windrichtung,  
 S.D. – Standardabweichung der Windrichtung,  
 DDseeob – obere Streubreite um den Mittelwert (Mitt+S.D.) der Windrichtung für die Seewindzirkulation,  
 DDseeunt – untere Streubreite um den Mittelwert (MITT-S.D.) der Windrichtung für die Seewindzirkulation.



und erst in den Abendstunden verläuft die Kurve ähnlich wie an Schönwettertagen nur mit einer zeitlichen Verfrühung. Die Standardabweichung liegt zwischen 60 und 90 Grad. Der Mittelwert der Windrichtung weicht deutlich vom Median ab und zeigt nur einen schwachen Tagesgang. Ähnliches gilt für die oberen und unteren Streuungsschranken.

Ein Vergleich der Standardabweichung (Unter- und Obergrenzen) in *Abbildung 3* zeigt deutliche Unterschiede zwischen den beiden Wettersituationen. Während an Schönwettertagen die Standardabweichung einen klar erkennbaren Tagesgang zeigt, kann dies bei Mixedwetter nicht festgestellt werden. In der Nacht beträgt der Unterschied der Obergrenzen rund 60°, dasselbe gilt für die Untergrenzen zu Mittag. Am Abend ist der Verlauf der Obergrenzen und Untergrenzen annähernd identisch. *Abbildung 4* zeigt nochmals den Median beider Gruppen getrennt, wodurch ein direkter Vergleich der Windrichtung möglich ist. Wie bereits zuvor erwähnt, ist der glatte Verlauf an schönen Tagen im Kontrast zur unruhigen Situation an Mixedwettertagen zu beobachten. Die südlichen Richtungen treten bei Mixedwetter ab 16 Uhr (HH=32) ein, während dies bei Schönwetter erst um 20 Uhr (HH=40) der Fall ist.

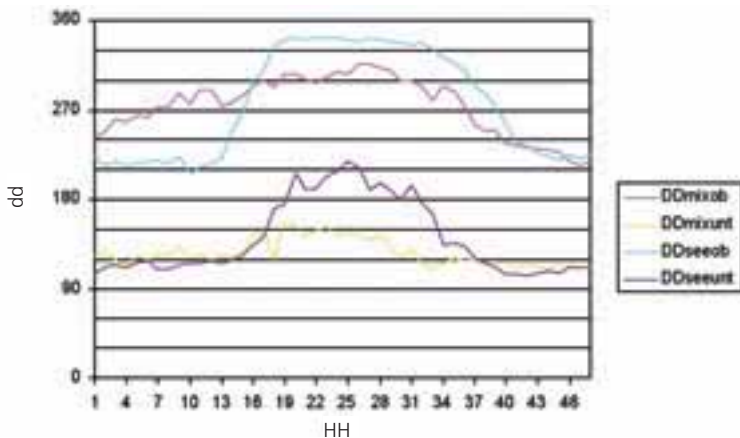


Abb. 3 : Vergleich der oberen Streubereiche im Laufe des Tages bei Schön- und Mixedwetter und Vergleich der unteren Streubereiche im Laufe des Tages bei Schön- und Mixedwetter.

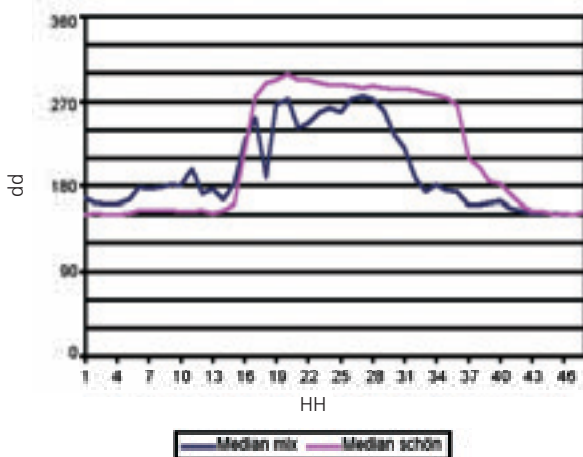


Abb. 4: Vergleich der Mediane der Windrichtung im mittleren Tagesgang bei Mixedwetter und bei Schönwetter im Sommer 2000 an der Station Rohrsitz; dd – Windrichtungen, HH – Halbstunden im Tagesgang.

Für die *Abbildungen 5* und *6* wurde die Windrichtung über jeweils drei Stunden gemittelt, in acht Klassen der Haupt- und Nebenwindrichtungen eingeteilt und der prozentuelle Anteil der Windrichtung aufgetragen.

In den Nachtstunden von 22 bis 6 Uhr dominiert bei Schönwetter die SE-Komponente. Gegen Morgen wird dieser Anteil von W und NW zunehmend zurückgedrängt und ab Mittag weht der Wind zu fast 80% der Fälle aus W und NW. Erst am Abend beginnt sich wieder der Süd- und Südostwind aufzubauen.

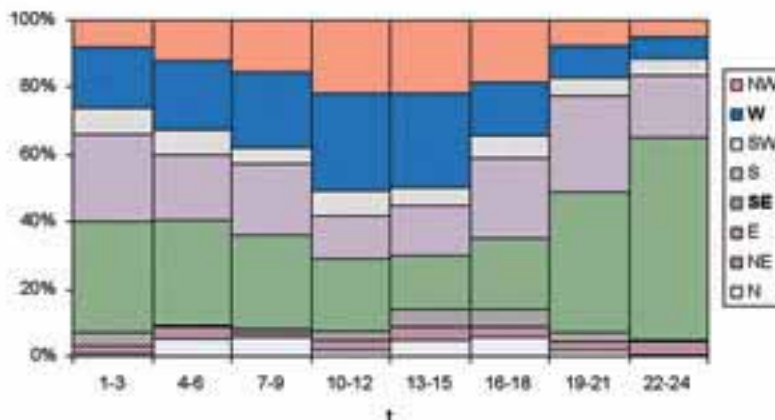
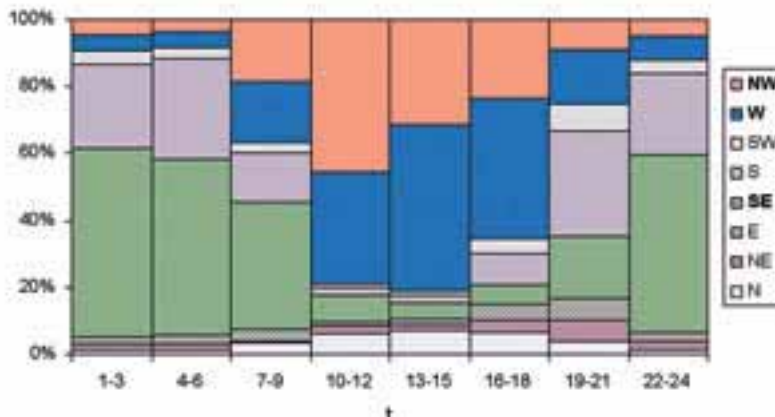
*Abbildung 6* zeigt ein ganz anderes Bild für Mixedwetter. In der ersten Nachthälfte weht der Wind zu über 80% aus S und SE. Dieser Anteil lässt in der zweiten Nachthälfte nach, macht aber bis zum Mittag noch immer fast die Hälfte der Fälle aus. Tagsüber ist die Strömung aus W vorherrschend, mit 30% Anteil aber nur geringfügig höher als die restlichen dominanten Klassen S und NW.

Im Vergleich zu den Schönwettertagen zeigt sich an Mixedtagen kein so einheitliches Bild, die Windrichtungen streuen deutlicher von einem Dreistundenfenster zum nächsten.

Abb. 5: Verteilung der 8 Windrichtungssektoren bei «Schönwetter» im Sommer 2000.

Abb. 6: Verteilung der 8 Windrichtungssektoren bei «Mixedwetter» im Sommer 2000.

Legende:  
 NW – Nordwestwind,  
 W – Westwind,  
 SW – Südwestwind,  
 S – Südwind,  
 SE – Südostwind,  
 E – Ostwind,  
 NE – Nordostwind,  
 N – Nordwind,  
 t – Zeitfenster mit 3 stündiger Dauer mit Angaben in MEZ für den mittleren Tagesgang.



Eine andere Art der Darstellung (Polarkoordinatendiagramm) wird in den *Abbildungen 7a bis 8b* verwendet. Dabei sind Windrosen mit den vier Haupt- und Nebenwindrichtungen, sowie die prozentuelle Richtungshäufigkeit dargestellt. Es wird für beide Wettersituationen das Dreistundenmittel von vier bis sechs Uhr und 13 bis 15 Uhr aufgetragen. Auf den ersten Blick erkennt man, dass bei Schönwetter am Morgen die Richtungen S und SE, am Nachmittag W und NW dominieren. An Tagen mit Mixedwetter gibt es keine so dominierenden Strömungssituationen, mit Ausnahme des Südostwindes am Morgen.

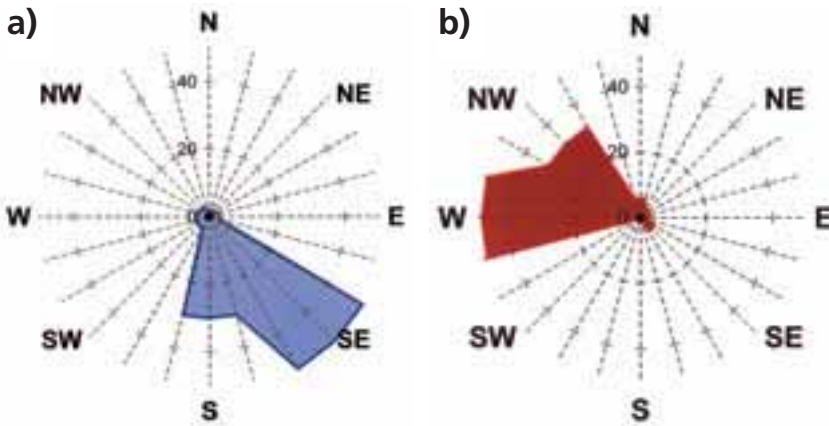


Abb. 7: Relative Häufigkeit (%) der acht Windrichtungen am Rohspitz im Sommer 2000 bei Schönwetter, a) von 4 bis 6 Uhr morgens, b) von 13 bis 15 Uhr mittags

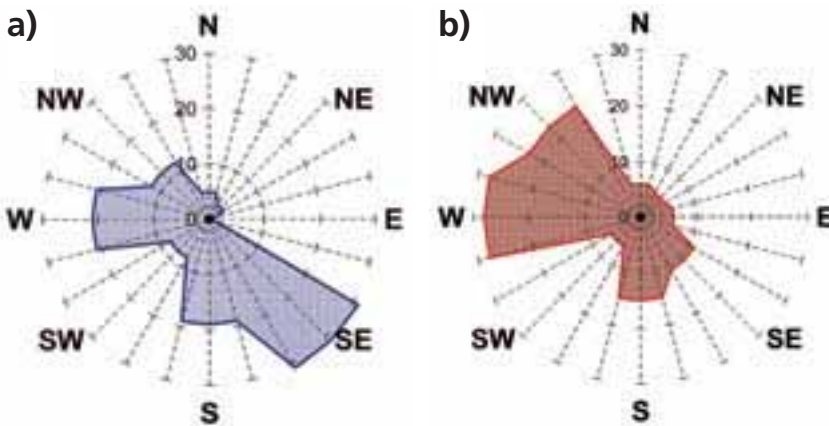
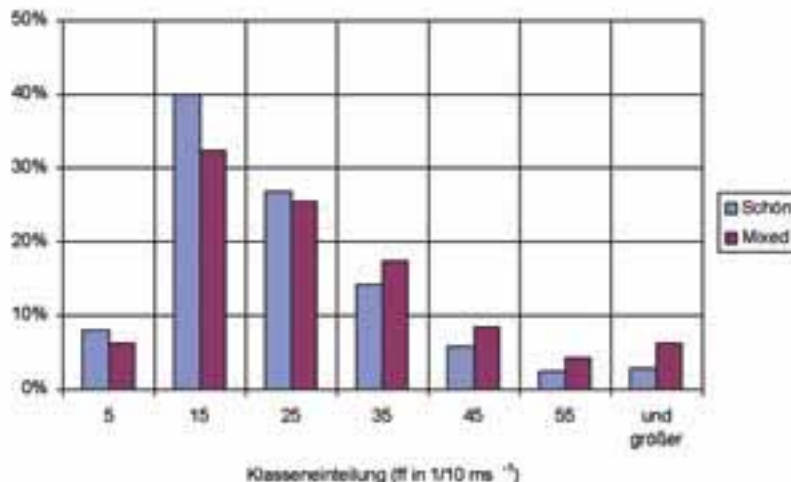


Abb. 8: Relative Häufigkeit (%) der acht Windrichtungen am Rohspitz im Sommer 2000 bei Mixedwetter, a) von 4 bis 6 Uhr morgens, b) von 13 bis 15 Uhr mittags

## Windgeschwindigkeit

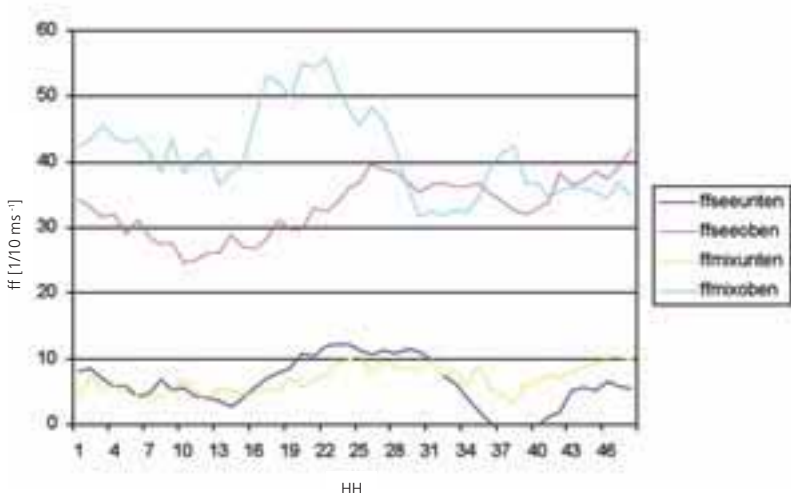
In den *Abbildungen 9 bis 12* sind Diagramme zur Windgeschwindigkeit dargestellt. Die *Abbildung 9* zeigt die Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeit. Man sieht, dass an Mixedtagen die Häufigkeiten mit höheren Geschwindigkeiten grösser ist, als dies bei schönem Wetter der Fall ist. So ist zum Beispiel die Anzahl der Fälle mit Windgeschwindigkeiten grösser als  $5,5 \text{ ms}^{-1}$  an Mixedtagen mehr als doppelt so gross.

**Abb. 9:** Relative Häufigkeit (%) der Windgeschwindigkeit am Rohrspitz im Sommer 2000 bei Schönwetter und Mixedwetter,  $ff$  – Windgeschwindigkeit in Zehntel  $\text{ms}^{-1}$ .

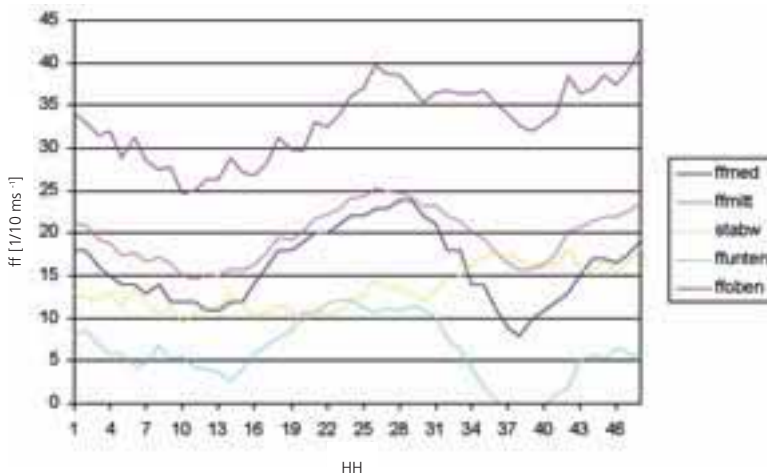


Ein Vergleich der Standardabweichung (*Abb. 10*) zeigt im Falle von schönem Wetter einen fast parallelen Verlauf zwischen Unter- und Obergrenze ( $ff_{\text{seeunten}}$  und  $ff_{\text{seeoben}}$ ), während bei Mixedwetter stärkere Schwankungen auftreten und der untere Bereich kein Minimum gegen 19 Uhr (d.e. HH=38) aufweist.

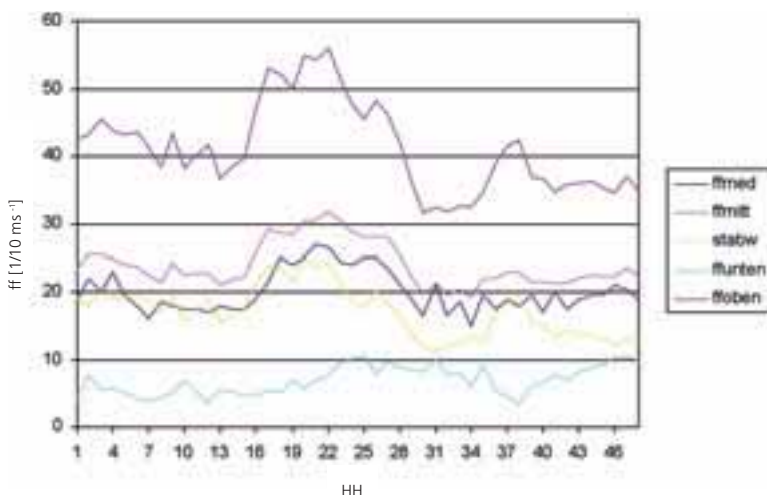
**Abb. 10:** Mittlerer Tagesgang der oberen und unteren Streubereiche der Windgeschwindigkeit bei Schönwetter und Mixedwetter,  $ff$  – Windgeschwindigkeit in Zehntel  $\text{ms}^{-1}$ , HH – Halbstunden im Tagesgang.



Die *Abbildungen 11* und *12* stellen den zeitlichen Verlauf der Windgeschwindigkeit dar. Die mittleren Maxima liegen zu Mittag bei  $2,5 \text{ ms}^{-1}$ . Der mittlere Tagesgang bei Schönwetter mit zwei Minima und Maxima ist gut erkennbar und zeigt einen glatten Verlauf. Daraus lässt sich auch die Drehung des Windes am Morgen und Abend erkennen, während das Bild für die Gruppe mit Mixedwetter wiederum unregelmässig erscheint. Die mittleren Maxima betragen bei Mixedwetter  $3,1 \text{ ms}^{-1}$ . Die Standardabweichung an schönen Tagen beträgt im Durchschnitt  $1,4 \text{ ms}^{-1}$  und schwankt nur wenig, während sie bei Mixedwetter in der Nacht und am Vormittag höhere Werte ( $2,0 \text{ ms}^{-1}$ ) aufweist als am Nachmittag (ca.  $1,2 \text{ ms}^{-1}$ ) und in der ersten Nachthälfte.



**Abb. 11:** Mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeit (ff) bei Schönwetter.



**Abb. 12:** Mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeit (ff) bei Mixedwetter.

**Legende:**  
 ffmed – Median der Windgeschwindigkeit,  
 ffmitt – Mittelwert der Windgeschwindigkeit,  
 stabw – Standardabweichung der Windgeschwindigkeit,  
 ffurten – unterer Streubereich der Windgeschwindigkeit,  
 ffoben – oberer Streubereich der Windgeschwindigkeit,  
 HH – Halbstunden im Tagesgang.

## Relative Feuchte

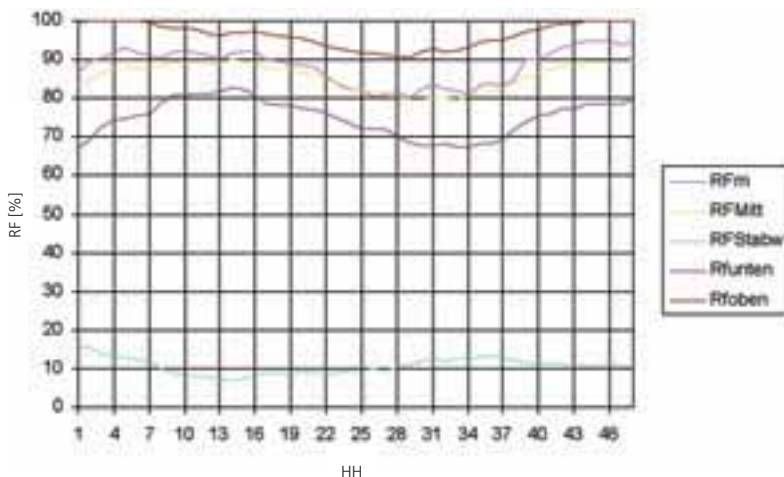
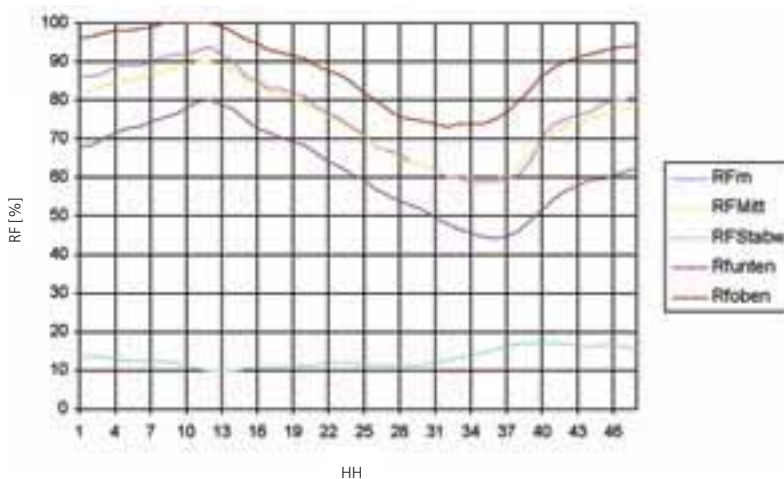
Die relative Feuchte bei Schönwetter (Abb. 13) spiegelt den Tagesgang der Temperatur in abgeschwächter Form wider. Mit dem Temperaturminimum zwischen fünf und sieben Uhr hängt eine Situation nahe der Sättigung (ev. Nebelbildung) zusammen. Mit dem Temperaturmaximum zwischen 17 und 18 Uhr kommt es zu einer Auftrocknung und einer relativen Feuchte von 60%. Die Standardabweichung schwankt zwischen 10 und 18% und hat einen schwachen Tagesgang.

Wiederum erkennbar ist der unregelmässigere Verlauf bei Mixedwetter mit deutlich geringerem Tagesgang. Die Standardabweichung nimmt für beide Gruppen ähnliche Werte an. In den Untersuchungen wurde die relative Feuchte vor allem zur Abgrenzung für unklare Fälle herangezogen.

Abb. 13: Mittlerer Tagesgang der relativen Feuchte bei Schönwetter.

Abb. 14: Mittlerer Tagesgang der relativen Feuchte (%) bei Mixedwetter.

Legende:  
 RFm – Median der relativen Feuchte,  
 RFMitt – Mittelwert der relativen Feuchte,  
 RFStabw – Standardabweichung der relativen Feuchte,  
 Rfunt – unterer Streubereich der relativen Feuchte,  
 Rfoben – oberer Streubereich der relativen Feuchte.  
 Abkürzungen:  
 RF[%] – Relative Feuchtigkeit in %,  
 HH – Halbstundenmittelwerte.



## Ergebnis

Aufgrund der Land-See-Wind-Theorie muss die Windrichtungsdifferenz zwischen Land- und Seewind  $180^\circ$  betragen. Für die hier berechneten Schönwettertage ergibt sich lediglich eine Differenz von ungefähr  $140^\circ$ . Nun stellt sich die Frage, ob aufgrund dieses Unterschiedes eine Land-See-Wind-Zirkulation ausgeschlossen werden kann.

Der Bodensee liegt in eine Reihe von Hügeln und kleineren Bergen eingebettet und ist von Nordwest nach Südost orientiert. Das nach Süden anschliessende Rheintal hat zuerst eine leicht südöstliche, ab Lustenau südwestliche Orientierung. Somit spielen orographische Effekte und damit verbundene Kanalisierungsvorgänge sicher eine massgebliche Rolle. Dies ist eine Erklärungsmöglichkeit für die Abweichungen in der Windrichtungsdifferenz.

Eine scharfe Trennung der Windrichtungen zu den beiden Zeitfenstern bei Schönwetter bestätigt das Vorliegen einer Land-See-Zirkulation im Gegensatz von grossen Schwankungen der Richtungen bei Mixedwetter.

## Diskussion

Da die Daten ausschliesslich von einer Station stammen, ist es schwierig eine sichere Aussage zu machen. Fakten die für eine solche Zirkulation sprechen sind zum Beispiel der früh einsetzende Seewind zwischen sieben und acht Uhr. Wenn es sich dabei um den Talaufwind handelt, setzt dieser schon sehr früh ein, denn man bedenke das grosse Einzugsgebiet des Rheintals wodurch ein Umstellen von Talab – zu Talaufwind sicher länger dauert. Letztlich wird das aber nur durch Einbeziehen weiterer Stationen im Uferbereich oder südlich der Grenze der Landsee-See-Windzelle in künftigen Untersuchungen zu klären sein. Auch andere Messverfahren wie Pilotballone und Modellflugzeuge mit Meteo-Sensoren an Bord können zur Abklärung beitragen.

## Zusammenschau

Die Analyse der Winddaten im Hinblick auf zwei Wettertypen konnte aufzeigen, dass bei Schönwetter die Windrichtungsschwankungen periodisch sind und den Charakter einer Land-See-Windsystems aufweisen. Bei Schlechtwetter sind diese Bedingungen mehrheitlich anders, da die jeweilige Höhenströmung über den Gradientwind auf die Grundschiene Einfluss nimmt. Als Auswahlkriterium wurde eine Temperaturdifferenz von mindestens  $6^\circ\text{C}$  zwischen dem morgendlichen Minimum und dem nachmittäglichen Maximum als hinreichende Bedingung ermittelt. An 127 Schönwettertagen lässt sich eine Land-See-Struktur nachweisen. Dies entspricht einer Wahrscheinlichkeit von 66% der Tage im Sommer 2000. Mixedwetter ohne massive Zirkulation liegt somit in einem Drittel der Zeit vor.

Die Erfassung der Zirkulation ist als plausibel einzustufen, da die Klassifikation der Wetterlagen der Klimaabteilung der ZAMG 96 Tage mit Schönwetter (Hochdrucklage und Gradientschwach) aufweisen und somit unbedeutende Abweichung zum Schönwettertyp vorliegt; dies insbesondere, da auch Halbtage schon eine entsprechende Zirkulation aufweisen können.

Die Mächtigkeit der lokalklimatischen Zirkulation soll mit einfachen Messgeräten bei Messfahrten im folgenden Sommerhalbjahr bezüglich der Breite und durch Vertikalaufstiege mittels Modellflugzeugen im Hinblick auf die vertikale Erstreckung grob durch deren Versatz – optische Ermittlung – weiter bestätigt werden.

## Literatur und Datenquelle

- AUER I. et al (2001): ÖKLIM (1.CD), in HAMMERL CH., LENHART W., STEINACKER R. und STEINHAUSER P. (Hg.): Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1851 – 2001, 150 Jahre Meteorologie und Geophysik in Österreich, Leykam Buchverlags-GmbH, ISBN3-7011-7437-7
- KOCH E. & WERNER R. (2001): Wind. – In: AUER I. & WERNER R.: Klima von Vorarlberg – eine anwendungsorientierte Klimatographie, Band II, Kapitel 8 Seite 277 bis 368, Hrsg: Amt der Vorarlberger Landesregierung – Umweltinstitut, Bregenz.
- LOTTERANER CH. (2001): Land- und Seewinde am Neusiedlersee, Diplomarbeit (Abt. f. Theoretische Meteorologie), Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Wien, unveröffentlicht.
- SCHÖNWIESE, C. D. (2000): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler, Gebrüder Borntraeger.
- SIMPSON, J. E., (1994): Sea breeze and local winds, Cambridge University Press.
- WAGNER S. (2003): Räumlich statistische Untersuchung der Windverhältnisse auf dem Bodensee auf der Grundlage an Land gemessenen Winde und des Windes in der freien Atmosphäre, Diplomarbeit (Umweltschutztechnik), Universität Stuttgart, Nov. 2003, unveröffentlicht.
- WHITEMAN, C. D. (2000): Mountain Meteorology – Fundamentals and Applications, Oxford University Press.

Datenextrakt aus UBIS 2.1., Halbstundenmittelwerte der Station Rohrspitz Hafen Zur Verfügung gestellt, Abt. Luftreinhaltung, Umweltinstitut des Land Vorarlbergs

## Anschrift der Autoren

Dr. Richard Werner  
Umweltinstitut des Landes Vorarlberg  
Montfortstrasse 4  
A-6901 Bregenz

Michael Riffler  
Höllweg 13  
A-6780 Bartholomäberg