

Lee-Wellenwolken

Abkürzungen

DALR – Trockene adiabatische Temperaturabnahme:- Eine gerade Linie mit einer Steigung von $-9,8\text{ °C pro km Höhe}$.

SALR – Gesättigte adiabatische Temperaturabnahme:- Eine Kurve mit einer Steigung, die immer steiler ist als die DALR und sich asymptotisch annähert, wenn die Luft sehr kalt wird.

ELR – Umwelt-Schichtungsgradient:- Die Veränderung der Atmosphäre-Temperatur mit der Höhe.

LCL – Erhebungs-Kondensationshöhe:- Die Höhe, in der sich Wolken bilden, wenn feuchte Luft ansteigt.

SA – Standardatmosphäre:- Eine gerade Linie mit einer Temperaturabnahme von $-6,5\text{ °C pro km}$ von 0 bis 11 km.

Einleitung

Wellenwolken können sehr trügerisch sein und sind oft nicht das, was sie zu sein scheinen. Um dieses Problem zu lösen, habe ich einige einfache Modelle erstellt, die helfen könnten, sie zu erklären.

Wie jedoch bereits von Joerg zitiert: „Alle Modelle sind falsch, aber einige sind nützlich“ George E.P. Box (1979),

Die Standardatmosphäre (SA)

Das grundlegendste Modell der Atmosphäre ist die SA, die in einem Stueve-Diagramm eine gerade Linie darstellt, die von 15 °C auf Meereshöhe bis zur Tropopause in 11 km Höhe mit einer Neigung von $-6,5\text{ °C pro km}$ verläuft, wie in Abb. 1 dargestellt. Für die SA gibt es eine Höhe, in der ihre ELR tangential zu einer benachbarten SALR-Kurve verläuft. Unterhalb dieser Höhe ist die SA bedingt stabil und wirkt als konvektive Schicht. Oberhalb dieser konvektiven Schicht ist die SA absolut stabil. Im Winter wird die SA nach links verschoben und die konvektive Schicht wird flacher. Im Sommer wird sie nach rechts verschoben und die konvektive Schicht wird viel tiefer. Folglich können sich im Winter stabile Wellenwolken auf viel niedrigeren Ebenen bilden als im Sommer. In meinem Modell mit drei Atmosphären und einer ELR von $-6,5\text{ °C pro km}$ können sich stabile Wellenwolken nur oberhalb der Höhe bilden, auf der die Temperatur unter -10 °C liegt. In diesen Modellen beträgt die Tiefe der Konvektionsschicht im Winter 1.800 m, im Frühjahr und Herbst 3.500 m und im Sommer 5.000 m, wie in Abb. 1 dargestellt.

Atmosphärische Stabilität und Feuchtigkeit

Damit Lee-Wellen auftreten können, muss die dynamische Stabilität der Atmosphäre, die durch den Scorer-Parameter bestimmt wird, nach oben hin abnehmen. Diese Voraussetzung wird durch das Vorhandensein einer stabilen Schicht, wie z. B. einer Inversion oder einer isothermen Schicht, oder durch eine positive vertikale Windscherung erfüllt. Direkt über einer Inversion befindet sich eine stark konvektive Schicht mit einer Temperaturabnahme, die viel geringer ist als die der SA ELR. Diese beiden Schichten sehen aus wie eine umgekehrte Nase, die sich über die SA ELR legt.

Stabile Schichten wie Inversionen oder isotherme Schichten wirken wie ein Deckel auf die Konvektion. Da feuchte Luft leichter ist als trockene Luft, steigt sie tendenziell auf, bis sie die Basis einer stabilen Schicht erreicht, und bildet direkt unter dieser Schicht einen Feuchtigkeitsspitzenwert, wo normalerweise Wellenwolken auftreten. Wenn Lee-Wellen diese feuchte Luft über ihre LCL anheben, bildet sich eine Wolke. Die Luft, die sich am windzugewandten Rand einer Wellenwolke

kondensiert, strömt dann entlang einer Stromlinie über deren Spitze, bevor sie an ihrem windabgewandten Rand verdunstet. Folglich haben Wellenwolken einen linsenförmigen Querschnitt und werden offiziell als Alto-Cumulus-Lenticularis klassifiziert. Hochgelegene Wellenwolken sind glatt mit einem elliptischen Umriss und haben ebenfalls einen linsenförmigen Querschnitt.

Lee-Wellen neigen dazu, sich an linearen topografischen Merkmalen wie Bergrücken oder Tälern auszurichten, sodass die damit verbundenen Wolken die Form von länglichen, parallel zu diesen Merkmalen verlaufenden Seitenwindwolkenbändern annehmen. Diese Wolkenbänder bilden sich unterhalb einer Inversion, wo die Luftfeuchtigkeit tendenziell stark ansteigt. Wolkenbänder in niedrigerer Höhe haben in der Regel kumuliforme Oberflächen, wie in den Fotos 1 und 2 zu sehen, während Wolkenbänder in höherer Höhe glatte Oberflächen haben können, wie in Foto 3 zu sehen.

Unmittelbar über einer Inversion befindet sich eine stark konvektive Schicht mit einer Temperaturabnahme, die der der DALR nahekommt. Wenn in dieser Schicht Kondensation auftritt, können konvektive Wolken in Form von winzigen Castellanus- oder Pseudocumulo-Nimbus-Wolken aus einer Wellenwolkenbank herauswachsen, wie in den Fotos 4, 5 und 6 zu sehen ist. Es kann mehrere Inversionen geben, typischerweise in niedrigen (Cumulus), mittleren (Alto cumulus) und hohen (Cirrocumulus) Höhen.

Durchdringung der Inversion

Das Anheben der Atmosphäre durch Wellen beeinflusst die Stabilität der Konvektionsschicht unterhalb einer Inversion. Trockene Luft kühlt beim Aufsteigen mit einer Geschwindigkeit von $9,8\text{ }^{\circ}\text{C pro km}$ (DALR) ab. Dies verändert die Umwelt-Temperaturgradient innerhalb der Wellen. Ist die Luft bewölkt, kühlt sie beim Aufsteigen mit der SALR ab, die in der Konvektionsschicht geringer ist als die SA-Temperaturgradienten von $-6,5\text{ }^{\circ}\text{C pro km}$. Wenn die Wellenamplitude mit der Höhe unterhalb einer Inversion zunimmt, wird die ELR weiter destabilisiert. Diese Schwankung der Wellenamplitude verringert die Wirksamkeit einer Inversion gegen das Eindringen von Wolken, wie in den Abbildungen 2 bis 7 dargestellt. Beispiele für das Eindringen von Wolken in eine Inversion sind auf den Fotos 7, 8 und 9 zu sehen.

Welleninterferenzmuster

In komplexer Topografie, wo die für die Welle verantwortlichen Bergrücken und Täler unterschiedliche Ausrichtungen haben, erzeugt die Interferenz zwischen Wellenfronten mit unterschiedlichen Winkelausrichtungen deutliche Tick-Muster in Wellenwolkenbalken. Wenn zwei um 45 Grad ausgerichtete Kämme gleichermaßen wirksam bei der Erzeugung von Wellen sind, entstehen Wellenbalken wie Sprossen einer Leiter, wobei benachbarte Sprossen um eine halbe Wellenlänge versetzt sind, wie in Abb. 8 dargestellt. Dieser Effekt ist auf Foto 10 zu sehen, das in der Nähe von Coburg aufgenommen wurde.

Wenn zwei Kämme nicht gleichermaßen wirksam sind, haben die Wolkenbalken eine mäandernde Form, wie in Abb. 9. Wenn die Wolkenbasis geringfügig angehoben wird, nehmen die Wolken eine kissenförmige Gestalt an, wie in Abb. 10 und in den Fotos 11 und 12. Wenn die Wolkenbasis ausreichend angehoben wird, wie in Abb. 11, bilden sich nur Wolken mit elliptischem Umriss. Die gewundenen Umrisse zeigen das ursprüngliche Niveau der Luftströmung. Fast alle glatten Wolken mit elliptischem Umriss entstehen durch Welleninterferenz und treten nur in großen Höhen auf, wo die Atmosphäre völlig stabil ist.

Wenn zwei gleich große Kämme im rechten Winkel zueinander angeordnet sind und der Wind in einem Winkel von 45 Grad darüber weht, dann erzeugen die Wellen ein Muster aus quadratischen

Wolken wie auf einem Schachbrett, wie in Abb. 12. Wenn die Wolkenbasis leicht angehoben ist, bleiben die Wolken quadratisch mit abgerundeten Ecken, wie in Abb. 13 und Foto 13. Wenn die Wolkenbasis jedoch viel höher ist, werden die Wolken kreisförmig, wie in Abb. 14. Über diesen Kreisen befindet sich eine kreisförmige Säule, die ohne Wolken nicht sichtbar ist. Bei ausreichend hoher Luftfeuchtigkeit können sich innerhalb dieser Säulen Wolken bilden, wie in Abb. 15 dargestellt. Je nachdem, ob die Luft in diesen Säulen bedingt oder absolut stabil ist, haben sie entweder eine kumuliforme oder eine glatte Oberfläche. Foto 14 zeigt eine große Säule zwischen zwei quadratischen Wolken, wie in Abb. 13. Normalerweise verlaufen die Säulen vertikal mit einer glatten Oberfläche, da die ELR eines feuchten Cumuluswolkenrests derjenigen einer SALR entspricht.

Hügel und Säulen

Konstruktive Welleninterferenz kann zu lokalen Erhöhungen der Wellenamplitude führen, die durch Wolkenhügel auf den Wellenbalken angezeigt werden, wie in Foto 15 zu sehen ist. Eine höhere Steiggeschwindigkeit ist wahrscheinlich direkt vor ihren steileren Vorderseiten zu finden. Säulen können obere und untere Wellenwolken miteinander verbinden, wie in den Fotos 16, 17 und 18 zu sehen ist. Wenn sich die Wolke dann von unten nach oben auflöst, hängt unter der Wolke eine kürzere Säule. Dies sind Wellenwolken, und die Luft, die durch sie hindurchströmt, steigt und fällt, während sie den Stromlinien der Welle folgt. Dies wird durch das Vorhandensein geteilter Säulen veranschaulicht, wie in Foto 20 zu sehen ist.

Lee-Wellenwolken in Stratusschichten

Lee-Wellen erzeugen Wellenbewegungen in zusammenhängenden Wolkenschichten. Wenn die vertikale Ausdehnung der Wellen geringer ist als die Dicke der Schicht, sind sie nur von oben sichtbar. Wenn ihre vertikale Ausdehnung jedoch die Wolkendicke überschreitet und die Schicht unterhalb der LCL einnimmt, bilden sich Lücken in den Wellentälern. Diese Lücken können sich unerwartet schließen, wenn entweder die Wellenamplitude abnimmt oder die Luftfeuchtigkeit zunimmt. Bei Welleninterferenz haben die Lücken eine elliptische Form, wie in Abb. 16 dargestellt.

Wenn die Oberseite einer Wolkenschicht durch Strahlung von oben gekühlt wird, kann negative Konvektion die Wolke in Zellen aufteilen, wie in den Fotos 21 und 22 zu sehen ist. Dieser Effekt tritt am ehesten auf, wenn sich Lee-Wellen innerhalb einer Schicht aus Stratocumulus-Wolken bilden.

Windscherung

Es gibt zwei Arten von Windscherung: die Variation der Windgeschwindigkeit mit der Höhe und die Variation der Windrichtung. Windscherung tritt in der Regel bei einer Inversion auf. Die höchsten Steigflüge finden normalerweise statt, wenn die vertikale Windscherung positiv bleibt und nur eine geringe oder gar keine Winkelscherung auftritt. Eine Ausnahme von dieser Regel tritt auf, wenn die Winkelscherung die Wirksamkeit der topografischen Barriere als Wellengenerator erhöht.

Wolkenwände und -bögen

Wenn die Luft ausreichend feucht ist, können sich auch im Raum zwischen Inversionen Wolken bilden. Dieser Bereich kann konvektiv oder stabil geschichtet sein. Eine große Menge feuchter Luft, die durch diesen Bereich strömt, kann dann eine vertikale Wolkenwand bilden. Ist die Luft nur bedingt stabil, entsteht eine kumuliforme Wolke, ist sie jedoch absolut stabil, ist die Wand glatt wie ein Eisberg.

Ein Bogen kann sich bilden, wenn eine negative vertikale Windscherung an der Basis einer Inversion einen Rotor vor der Wand erzeugt. Die Spitze des Rotors zieht die Wolke entlang eines gekrümmten Bogens nach vorne, sodass sich ein Bogen bildet, wie in Abb. 16 und in den Fotos 24 und 25 zu sehen ist.

Helmholtz-Instabilitätswolken

Helmholtz-Wellen entstehen durch Instabilität aufgrund von Windscherung. Wenn die aufsteigende kühlere Luft feucht ist, bildet sich unter den richtigen Bedingungen eine charakteristische Wolke (auch als Fluctus bekannt) im Scheitel jeder Welle. Diese Wellen können sich oben zu Wolkenrollen aufbrechen. Die Achsen der Wolkenrollen stehen senkrecht zur Windscherung. Die Windscherung entsteht, wenn stärkere Winde in der Höhe durch eine stabile Schicht, wie z. B. eine Temperaturinversion, von schwächeren Winden in der Tiefe getrennt werden. Die Wolken selbst treten typischerweise in Höhen über 5.000 m auf. Die Wellen in den Fotos 25 und 26 könnten Helmholtz-Wellen sein. Alternativ könnten sie durch Inversionsresonanz verursacht worden sein.

Stapel von Platten

Plattenwolken entstehen, wenn die Feuchtigkeit eine laminierte Struktur aufweist, wobei benachbarte Schichten zwischen hoher und niedriger Feuchtigkeit wechseln. Wenn die Schichten mit hoher Feuchtigkeit auf ihre LCL angehoben werden, können sich an heißen Stellen elliptische oder kreisförmige Wolken anstelle von Säulen bilden. Da diese Wolken durch die trockeneren Schichten dazwischen voneinander getrennt sind, sehen sie wie eine Reihe von Platten aus.

Das Feuchtigkeitsprofil wird durch Cumuluswolken in Windrichtung beeinflusst, die sich über Nacht in wolkenförmige Flecken feuchter Luft auflösen, bevor sie in Windrichtung der Berge als Wellenwolken in den Wellenkämmen wieder auftauchen. Die feuchten Flecken, die von Cumulus-Wolkenstraßen in Windrichtung hinterlassen werden, können durch starke positive vertikale Windscherung zu fast horizontalen, sehr dünnen Schichten mit abwechselnd hoher und niedriger Luftfeuchtigkeit gedehnt werden, wie in Abb. 17 aus „Clouds of the World“ von Prof. R.S. Scorer dargestellt.

Entlang der Bergkette an der Westküste Schottlands können sich sehr große, durch Wellen verursachte Cumuluswolken bilden, die man bei einem Flug in großer Höhe bei Aboyne nahe der Ostküste sehen kann. Wenn die Wolken über den zentralen Bergen am Ende des Tages abklingen, werden die zurückbleibenden feuchten Flecken vom Wind weggetragen. Diese Flecken werden durch vertikale Scherung zu einer Reihe von fast horizontalen Schichten mit abwechselnd hoher und niedriger Luftfeuchtigkeit verzerrt, wie in Abb. 17 dargestellt. Die Luft zwischen den Wolken ist stabil, sodass die Vermischung aufhört, wenn die Wolken verdunsten, und die Schichtungen erhalten bleiben.

Der Doppel-Stapel von Platten in Foto 26 stammt von Cumulonimbus-Wolken, die sich am Vortag in der Nähe der Westküste Schottlands gebildet hatten. Die Einschnürung in der Mitte dieser Wolke existiert weil die Wellen-Amplitude zwischen zwei Wellen-Systeme reduziert wird. Die Cumulelenticularis-Wolke darüber deutet darauf hin, dass der Umriß dieses Wolkenstapels deutlich elliptisch ist. Die Größen der Platten sind auf die Durchmesser den Cumulonimbus Wolken zurückzuführen, die die Schichtungen bilden. Die oberste Platte hat gewölbte Föhnfingern, was auf einen Rotor daneben hindeutet. Die Windrichtung wird auch durch diese Fingern angezeigt. Die winzigen, stacheligen Cumuluswolken unter diesem Plattenstapel sind rätselhaft.

Hexenhüte

Die Hexenhüte in Foto 28 haben die Form eines umgekehrten Kegels, da ihr Durchmesser mit zunehmender Wellenamplitude unterhalb einer Inversion nach oben hin größer wird. Die bauchige Form ist auf zusammenhängende Schichten mit unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit zurückzuführen. Sie werden in „Clouds of the World“ als ungewöhnlicher Plattenstapel beschrieben, sind aber, was die Luftbewegung betrifft, eine recht gewöhnliche Wellenwolke.

Hexenhüte entstehen, wenn die Schichten unterschiedliche Feuchtigkeit aufweisen, aber nicht durch trockenere Schichten voneinander getrennt sind. Sie haben eine umgekehrte Kegelform, da ihr Durchmesser mit zunehmender Wellenamplitude bis zu einer Inversion größer wird.