

„Die Bedeutung des Windes für das Fliegen und Ballonfahren“
Teil 4
Wetterkunde von Dr. Manfred Reiber

In der Ausbildung zum Piloten habe ich Meteorologie nur gelernt, weil ich die Prüfung bestehen wollte. Seitdem ich fahre, weiß ich wie wichtig das Wetter ist. Jetzt möchte ich wirklich alles vom Wetter wissen und verstehen.

Wunsch eines Ballonfahrers

7. Lokale Windsysteme und der Einfluss der Oberflächengestalt der Erde (Orografie) auf das Windfeld

Wir wissen nun, wie das großräumige Windfeld entsteht und wir wissen aus Theorie und Praxis, dass es immer existiert. Aus der Erfahrung wissen wir aber auch, dass es oft so stark nach Richtung und Geschwindigkeit modifiziert wird, dass man es kaum wieder erkennt. Dies ist besonders dann der Fall, wenn der Wind schwach ist. Bei schwachem Gradientwind gewinnen die lokalen Effekte, wie z. B. das Abfließen von Kaltluft, Land- Seewind u. a. an Bedeutung. Sie werden dominant. Aber auch bei starkem Wind hat die Orografie Einfluss auf den Wind. So z. B. bei Geländeverengungen (Düsenwirkung), Eckeneffekten und bei Stau- bzw. Leewirkungen an Gebirgen. Deshalb wollen wir uns schon den ersten Merksatz gut einprägen:

„Je schwächer das großräumige Windfeld ist, um so stärker wird es durch lokale Besonderheiten (Berge, Täler, Seen, Bodenbeschaffenheit, Bewuchs usw.) beeinflusst und abgeändert. Verantwortlich dafür sind thermisch bedingte Windsysteme, wie Land- und Seewind, Berg- und Talwind, Wald- und Flurwind u.ä. Düsenwirkungen, Eckeneffekte, in Tälern und Schluchten geführte Winde, Stau- und Leewirkungen gewinnen eher bei stärkerem Wind an Bedeutung“.

Welche Hauptfaktoren modifizieren das großräumige Windfeld im besonderen Maße? Im Wesentlichen sind es drei:

- Die Rauigkeit der Erdoberfläche
- Die Gestalt des Geländes
- Die thermischen Eigenschaften des Bodens bzw. der Geländeform

Wir werden die Wirkung dieser Faktoren im wesentlichen separat besprechen, man sollte sich jedoch immer im klaren darüber sein, dass sie genau genommen immer im Komplex auf das großräumige Windfeld einwirken und das großräumige Windfeld auf sie zurückwirkt. In der Regel ist aber einer dieser Faktoren oder das großräumige Windfeld selbst so dominant, dass die jeweils anderen Einflüsse vernachlässigbar klein werden und eine Windvorhersage gut möglich ist. Nur während eines Dominanzwechsels ist eine genaue Windprognose kaum möglich, z. B. wenn der Bergwind in den Talwind wechselt, oder der Landwind in den Seewind übergeht, oder pulsationsartiges Abfließen von einem steilen Hang einsetzt usw.

7.1 Die Wirkung der Rauigkeit der Erdoberfläche auf den Wind

Je rauer die Erdoberfläche ist, umso stärker ist die Reibung. Besonders raue Oberflächen, wie Berge oder Gebirge, verringern die Windgeschwindigkeit stärker, als glatte Flächen, wie Meere, Seen oder flaches Land. Schon über größeren Seen ist deshalb die Windgeschwindigkeit deutlich größer, als über Land. Infolge der Reibung wird der Wind auch von der Isobarenrichtung abgelenkt, und zwar immer zum tiefen Druck hin (oder vom hohen Druck weg). Wir wissen auch schon, dass die Ablenkung über glatten Flächen geringer, als über rauhen ist. Welche Merkregel können wir aus diesem plausiblen Zusammenhang ableiten?

In Ufernähe großer Seen (in Deutschland besonders auch an der Küste von Nord- und Ostsee) herrscht bei einer Windrichtung von der See zum Land stärkerer Bodenwind als in Uferferne. Der Wind „bringt“ praktisch seine höhere Geschwindigkeit, die er über der glatten Wasseroberfläche hat, mit und wird erst landeinwärts durch die zunehmende Reibung abgebremst. Der Küstenstreifen mit stärkerer Windgeschwindigkeit kann an der Nord- und Ostseeküste einige Kilometer (max. etwa 30 bis 50 km) landeinwärts reichen, an größeren Seen sind es nur wenige Kilometer (je nach Größe des Sees, der Beschaffenheit und Bebauung der Ufer, etwa 1 bis max. 10 km). Bei auflandigem Wind kommt es an der Küste zu einem Massenzufluss (Konvergenz) mit aufwärtsgerichteter Vertikalbewegung und möglicher Wolken- oder sogar Schauerbildung. Diese Konvergenzzone wird auch als „Küstenkonvergenz“ bezeichnet. Bei ablandigem Wind kommt es seewärts zu einem Massenabfluss (Divergenz), zu abwärtsgerichteter Vertikalbewegung und zur Rückentwicklung von Bewölkung. So dass bei ablandigem Wind häufig seewärts in Küstennähe ein Streifen mit geringer Bewölkung zu beobachten ist (z. B. über den Ostfriesischen Inseln).

7.2 Die Wirkung der Geländegestalt (Orografie) auf den Wind

Berge, Gebirgs- und Flusstäler, Mulden, Becken, Querschnittsverengungen im Gelände usw. können das Windfeld erheblich verändern. Bei Flügen bzw. Ballonfahrten im low level sollte man diese Deformationen des Windfeldes vorausschauend in Betracht ziehen. Wollen wir uns einige Beispiele im Detail betrachten:

➤ *Das Überströmen von Hindernissen*

Stehen dem Wind räumlich ausgedehnte Hindernisse im Weg, dann werden sie überströmt. Dabei wird auf der Luvseite die Luftmasse angehoben, es entsteht eine aufwärtsgerichtete Windkomponente, und die Windgeschwindigkeit nimmt bis zur Gipfelhöhe zu. Auf der Leeseite strömt die Luft wieder nach unten, es entsteht eine abwärtsgerichtete Windkomponente. Bei Windgeschwindigkeiten unter 10 kt ist dabei in der Regel nur leichte Turbulenz zu erwarten. Steigt die Windgeschwindigkeit jedoch über 10 kt an, kann schon mit mäßiger über 20 kt auch mit starker Turbulenz gerechnet werden. Die Turbulenz ist um so stärker, je größer die Windgeschwindigkeit wird. Die Stärke der Turbulenz hängt aber auch von der Form des Hindernisses ab. Die Abbildung 1 zeigt in schematischer Darstellung die Überströmung verschiedener Hindernisformen.

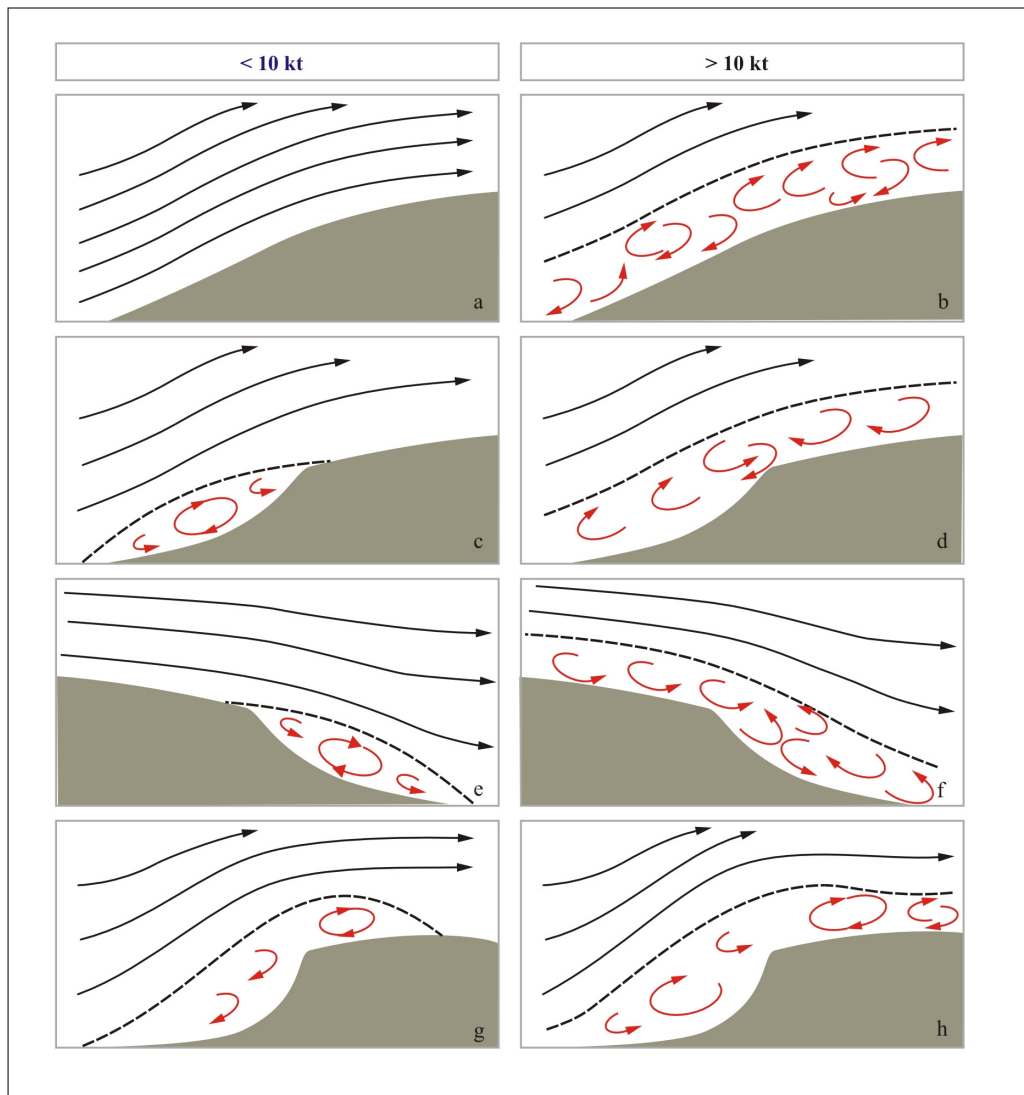


Abbildung 1: Strömungsverhältnisse bzw. Turbulenz an Hindernissen verschiedener Form in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

- a) kaum verwirbelte Strömung am gleichmäßig ansteigenden Hang
- b) in Hangnähe auch im Luv Turbulenz, die einige Dekameter hochreichen kann
- c) steil ansteigende Hänge bilden schon bei geringen Windgeschwindigkeiten in Hangnähe Wirbel
- d) bei höheren Windgeschwindigkeiten stärkere Verwirbelung im Luv, die über die Hangkante hinaus geht
- e) bei schwachem Wind leichte Leewirbel und abwärtsgerichtete Windkomponente
- f) bei stärkerem Wind mäßige bis starke Leeturbulenz, die schon vor der Hangkante beginnt, dazu abwärtsgerichtete Windkomponente
- g) schon bei schwachem Wind kann sich auf einem Plateau, das über einen steilen Hang angeströmt wird eine Bodenwindkomponente ausbilden, die der oberen Strömung entgegengesetzt ist (Windscherung)
- h) wie bei g) aber es ist mit starker Windscherung und starker Turbulenz zu rechnen, Hindernisse dieser Art sollten in größerer Höhe überfahren werden. Als Regel gilt:

(Mindesthöhe in Metern = freie Strömung in km/h mal 10)

Besonders hingewiesen sei z. B. auf die Abbildung 1 h. Hier bilden sich in Gipfelhöhe bei höheren Windgeschwindigkeiten (größer 10 kt) Wirbel mit einer horizontalen Achse, die quer

zur Windrichtung liegt. Im oberen Teil dieses Wirbels weht der Wind beschleunigt in Richtung des großräumigen Windfeldes, in Bodennähe jedoch genau in entgegengesetzter Richtung aber relativ schwach. Zusätzlich entsteht am vorderen Rand des Wirbels eine aufwärtsgerichtete, wenn auch turbulente Wundkomponente, die für zusätzliches Steigen sorgt, am hinteren Rand eine turbulent abwärtsgerichtete Komponente, die für zusätzliches Sinken sorgt. Im Resultat dieser extremen Richtungs- und Geschwindigkeitsscherung können bei Geschwindigkeiten etwa ab 15 bis 20 kt äußerst gefährliche Turbulenzen entstehen, vor allem dann, wenn in diesem Gebiet gelandet werden soll.

Strömungsbesonderheiten an und um Hindernissen sind naturgemäß stark durch die Form des Hindernisses geprägt. Die Abbildung 2 zeigt Strömungsbesonderheiten an einem bizarr geformten Hindernis.

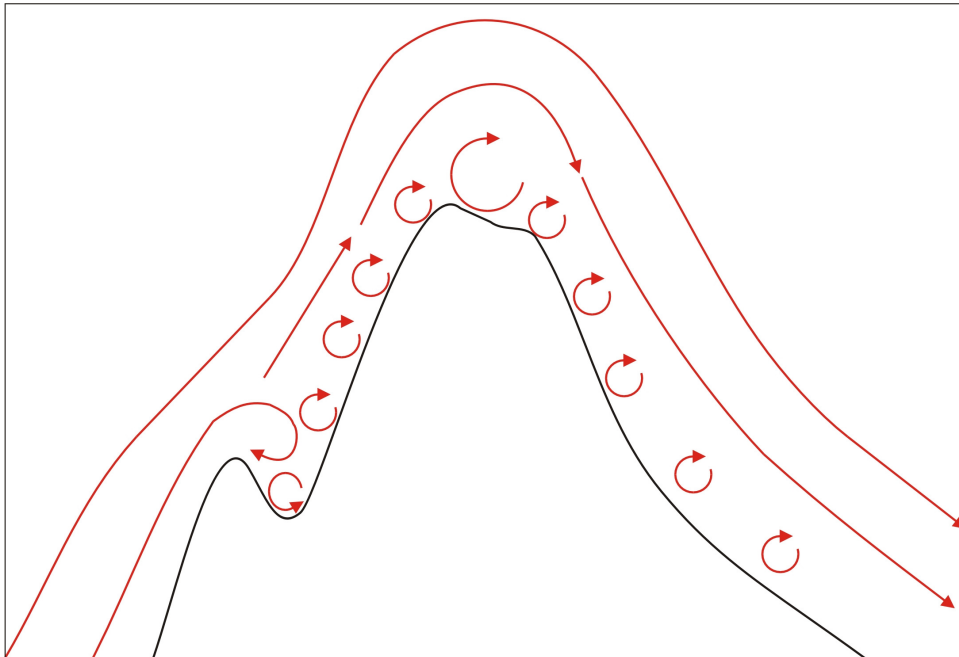


Abbildung 2: Strömungsdeformation an einem bizarr geformten Hindernis (hier ist besonders die schon im Luv einsetzende Turbulenz zu beachten).

Die Abbildung 3 zeigt die Wirkung der orografisch bedingten Strömung auf eine Ballonfahrt. Sie wirkt auf ein Flugzeug, Drachen oder Gleitschirm natürlich in gleicher Weise, aber Ballone reagieren noch sensibler auf die Strömung, deshalb dieses Beispiel.

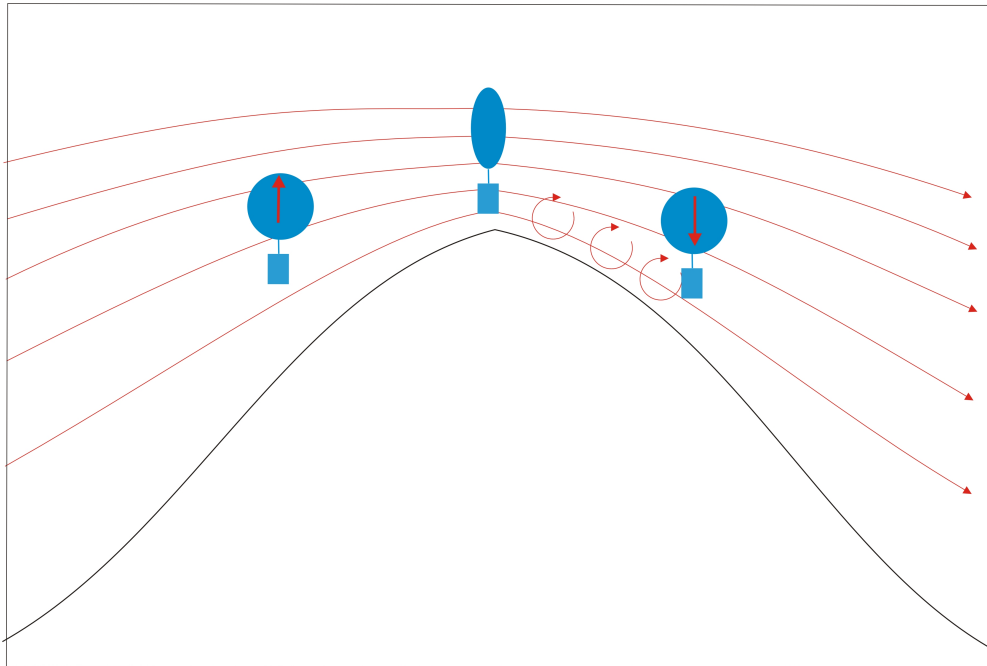


Abbildung 3: Einfluss der Strömung auf eine Ballonfahrt während der Überquerung eines Berges (Charakteristisch ist: das zusätzliche Steigen im Luv; die Zunahme der Fahrt über dem Gipfel mit ggf. einer Verformung des Ballons; abwärtsgerichtete Vertikalbewegung und Turbulenz im Lee)

Welche Schlussfolgerungen sollten vor allem Ballonfahrer daraus ableiten?

Im Luv eines Hindernisses wird der Ballon durch die aufwärtsgerichtete Windkomponente gehoben, er erfährt somit ein zusätzliches (dynamisches) Steigen. In Gipfelhöhe nimmt der Wind zu, die aufwärtsgerichtete Windkomponente fehlt aber jetzt. Der zusätzliche Auftrieb ist plötzlich verschwunden. Der Ballon gerät ins Sinken. Wenn der Wind in Gipfelhöhe so stark wird, dass extra noch die Hülle verformt wird, geht weiterer Auftrieb verloren. Der Ballon sinkt noch schneller! Die Fahrt geht weiter und der Ballon gelangt in die abwärtsgerichtete Leeströmung, die zusätzlich auch noch häufig turbulent ist. Das Sinken verstärkt sich deutlich weiter. Dieses Dilemma kann man nur vermeiden, wenn man das Hindernis in großer Höhe überfährt, oder im Luv, also dort, wo der Ballon durch die aufwärtsgerichtete Windkomponente dynamisch bedingt steigt, bereits mit dem Heizen beginnt, um dem Sinken im Lee vorzubeugen (siehe Abbildung 3). Aber auch Drachen-, Gleitschirm- und Segelflieger, UL-Piloten, Piloten von Hubschraubern und Motorflugzeugen sollten diese Effekte unbedingt beachten.

Eine gute Abschätzung der strömungsbedingten Vertikalgeschwindigkeit erhält man mit Hilfe folgender Formel:

$$w = u * \tan \alpha$$

w aufwärtsgerichtete (im Luv) bzw. abwärtsgerichtete Windkomponente (im Lee)
u horizontale Windgeschwindigkeit
tan α Tangens des Neigungswinkels des Hanges

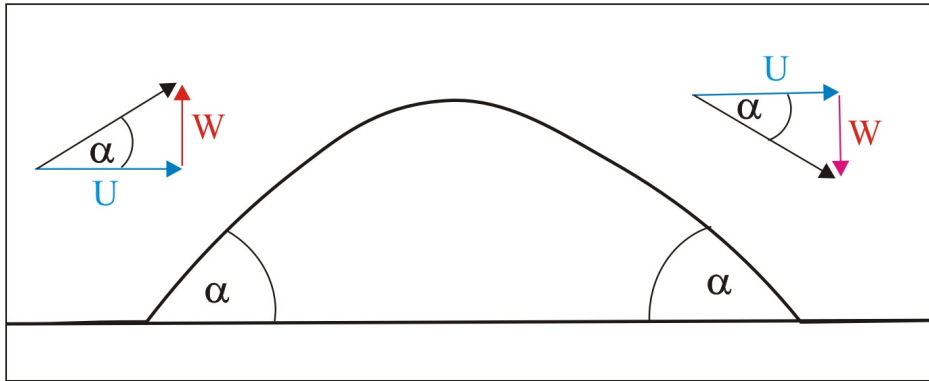


Abbildung 4: Zur Entstehung der auf- bzw. abwärtsgerichteten Windkomponenten im Luv bzw. im Lee eines Berges

Zwei Beispiele sollen die rechnerische Abschätzung erläutern:

1. Die Luvseite eines Berges wird mit 15 kt angeströmt, der Neigungswinkel α des Hanges beträgt 10° . Wie groß ist die zu erwartende aufwärtsgerichtete Windkomponente?

$$W = 15 \text{ kt} * \tan 10^\circ$$

$$W = 15 \text{ kt} * 0,1763 = 2,64 \text{ kt}$$

Im Luv ist mit einer dynamisch bedingten, aufwärtsgerichteten Windkomponente von fast 3 kt zu rechnen.

2. Auf der Leesite eines Berges herrscht eine Windgeschwindigkeit von 10 kt, der Neigungswinkel des Hanges ist 20° . Wie groß ist die abwärtsgerichtete Windkomponente?

$$W = 10 \text{ kt} * \tan 20^\circ$$

$$W = 10 \text{ kt} * 0,3639 = 3,64 \text{ kt}$$

Die dynamisch bedingte, abwärtsgerichtete Windkomponente im Lee beträgt fast 4 kt.

Die durch die Geländeneigung hervorgerufene Vertikalbewegung wird aber auch durch die Stabilität der Schichtung beeinflusst. Dazu sollte man sich merken:

Bei stabiler Schichtung wird die Vertikalgeschwindigkeit in Luv und Lee gedämpft. Sie erreicht die berechneten Werte nicht ganz. Bei labiler Schichtung und Thermik wird die aufwärtsgerichtete Vertikalbewegung im Luv deutlich verstärkt, sie kann bis zum doppelten des berechneten Wertes zunehmen. Beim nächtlichen Abfließen von kalter Luft an den Hängen wird der Leewind verstärkt und nimmt meist einen pulsierenden, böigen Charakter an, während der aufwärtsgerichtete Luvwind abgeschwächt wird oder sogar ganz ganz verschwindet.

- *Das Überströmen von Hindernissen, wenn eine freie Inversion (Peplopause) kurz über der Gipfelhöhe liegt*

Inversionen sind bekanntlich Sperschichten. Liegt eine freie Inversion kurz oberhalb eines Berggipfels (bzw. eines Gebirges), dann entsteht zwischen der Inversion und dem Gipfel eine Querschnittsverengung, ähnlich einer „Düse“, wie sie bei Gelände-Verengung entsteht, die zu

extremer Windverstärkung, meist verbunden mit Scherung und Turbulenz, führen kann (siehe Abbildung 5).

Abbildung 5: Markante Windzunahme über dem Gipfel, wenn eine Temperaturinversion unmittelbar über Gipfelhöhe liegt

➤ *Das Überströmen kleiner Hindernisse*

Ähnlich wie bei der Überströmung von Bergen und Gebirgen entsteht auch an kleineren Hindernissen wie Baumreihen, Bauwerken etc. im Luv aufwärtsgerichtete und im Lee abwärtsgerichtete Vertikalbewegung, die bei höheren Windgeschwindigkeiten (ab etwa ≥ 10 kt) meist mit merklicher Turbulenz verbunden ist. Vor allem beim Start bzw. bei einer Landung im Lee können auch hier Gefahren lauern.

Bemerkenswert für die Praxis ist, dass das Windfeld im Lee auch kleiner Hindernisse bis in eine Entfernung, die etwa der 25-fachen Hindernishöhe entspricht, beeinflusst wird. Ein 20 m hoher Waldstreifen deformiert das Windfeld demzufolge bis in eine Entfernung von ca. 500 m. Das sollte bei Landungen im Lee nicht unterschätzt werden (siehe Abbildung 6 Leewirbel hinter einer Baumreihe)

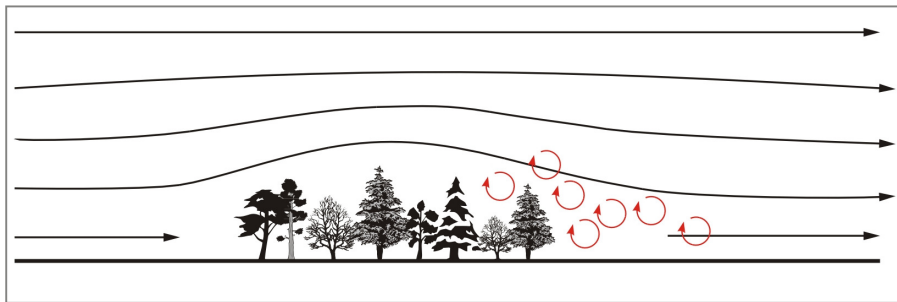


Abbildung 6: Leewirbel an kleinen Hindernissen, hier hinter einem Waldstreifen

Im nächsten Artikel werden wir uns mit dem Umströmen von Hindernissen, mit Windführung in Tälern und der Überströmung von querliegenden Tälern befassen.

Weiterführende Literatur: Dr. M. Reiber „Moderne Flugmeteorologie für Ballonfahrer und Flieger“.

Der Autor: Dr. Manfred Reiber hat Flugzeugbau und Meteorologie studiert. Er hat langjährige Erfahrungen auf allen Teilgebieten der Flugmeteorologie und Flugwettervorhersage. Er ist als Dozent, Wissenschaftsjournalist und Buchautor tätig und betreut auch Ballonmeetings, Segelflug- und Gleitschirmwettbewerbe. Sein neuestes Lehrbuch ist die „Moderne Flugmeteorologie für Ballonfahrer und Flieger“. Im Internet ist er unter www.DrMReiber.de zu finden.