

meteo

ATMOSPHERÄRISCH KONVEKTIVE GRENZSCHICHT

LA COUCHE CONVECTIVE ATMOSPHERIQUE LIMITE

- Abb. 1. Schema der konvektiven Grenzschicht (2). Boden (1). Obere Troposphäre (3).
Figure 1. Schéma de la couche convective (2). Sol (1). Troposphère supérieure (3).
- Abb. 2. Thermodynamik der Luft in der Praxis.
Figure 2. Thermodynamique pratique de l'air.
- Abb. 3. Der etwas undeutliche, gut sichtbare Dunst markiert die Obergrenze der kG.
Figure 3. Sommet de la CC dessinée par la limite floue mais bien visible de sa brume.

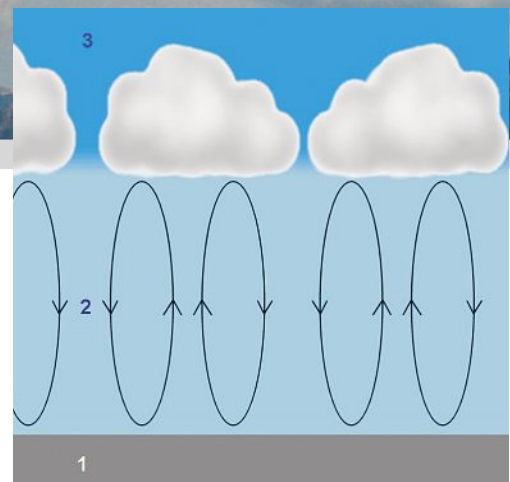


Abb. 1 Fig. 1

Die atmosphärisch konvektive Grenzschicht, nachfolgend als kG bezeichnet, auch trockenadiabatische Mischungsschicht genannt, ist die untere Schicht der Troposphäre und steht an sonnigen Tagen in Kontakt mit dem Boden (Abb. 1). Sie wird unmittelbar vom Boden beeinflusst, der von der Sonne aufgeheizt wird; vor allem wegen der Konvektion mit ihren gewaltigen vertikalen und horizontalen Luftbewegungen und Turbulenzen (daher der Begriff «Mischung»). Entsprechend wichtig ist sie für uns Piloten. Konvektion ist der Fachbegriff für «Thermik».

La couche convective limite atmosphérique, ci-après désignée par CC, appelée parfois aussi la couche adiabatique sèche de mélange est la basse couche troposphérique au contact du sol durant une journée ensoleillée (fig. 1). Elle est donc directement influencée par cette surface chauffée par le soleil, en particulier grâce aux phénomènes convectifs (d'où le terme «convective») qui entraînent d'importants brassages d'air verticaux et horizontaux et des turbulences (d'où le terme «mélange»). En principe, nous ne planons que dans cette CC. C'est pourquoi elle est importante pour nous. La convection est le nom scientifique du thermique.



Jean Oberson



Wenn ein ungesättigtes Luftpaket in der Atmosphäre aufsteigt (wobei der Druck abnimmt) oder sinkt (wobei der Druck zunimmt), z.B. zwischen 2000 m (ca. 800 hPa) und 3000 m (ca. 700 hPa), dann dehnt es sich aus bzw. zieht sich zusammen. Dies hat eine Ab- respekti-

Lorsqu'un volume d'air non saturé d'humidité monte (diminution de pression) ou descend (augmentation de pression) dans l'atmosphère, par exemple entre 2000 m (env. 800 hPa) et 3000 m (env. 700 hPa), il se dilate respectivement se contracte. Ceci entraîne une diminution,

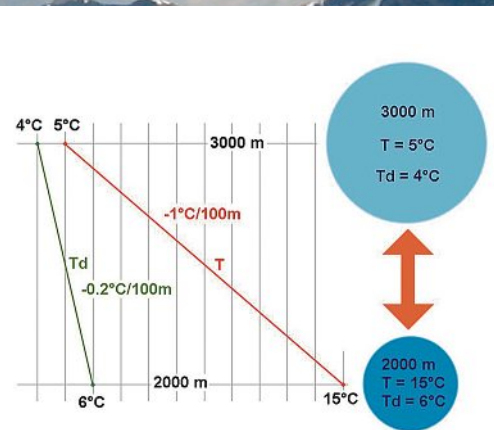


Abb. 2 Fig. 2



Abb. 3 Fig. 3

ve Zunahme der Temperatur T um $1^\circ\text{C}/100\text{ m}$ zur Folge. Auch die Luftfeuchtigkeit nimmt in Form des Taupunkts T_d ab bzw. zu, jedoch wesentlich weniger, um etwa $0,2^\circ\text{C}/100\text{ m}$. Es sei hier wieder einmal darauf hingewiesen, dass T_d der Temperatur entspricht, welche die Luft erreichen muss, damit eine Kondensation stattfinden kann. T_d und T können gleich sein (Sättigung), T_d kann aber auch kleiner, aber nie grösser als T sein. Je weiter T_d auf einer bestimmten Höhe von T entfernt ist, umso trockener ist die Luft, und umgekehrt.

Ein konkretes Beispiel (Abb. 2): Auf 3000 m hat das Luftpaket ein grosses Volumen, ist kalt und feucht ($T = 5^\circ\text{C}$, $T_d = 4^\circ\text{C}$). Auf 2000 m ist das Luftpaket kleiner, es ist warm und trocken ($T = 15^\circ\text{C}$, $T_d = 6^\circ\text{C}$). Wenn dieses Luftpaket ein wenig weiter über 3000 m steigt, dann ist es gesättigt ($T = T_d = \text{ca. } 3,7^\circ\text{C}$). Es bildet sich eine kleine Wolke, in der sehr viele Wassertröpfchen schweben.

Im Sommer 2006 sammelte ich während 50 Tagen Webcam-Bilder und Radiosonden-Daten vom Himmel über Madrid (12 Uhr UTC). Dank der Analyse dieser Dokumente war ich nun in der Lage, dieses kG-Konzept pragmatisch zu verfeinern.

respectivement une augmentation, de température T de ce volume de $1^\circ\text{C}/100\text{ m}$. L'humidité de cet air, sous forme de température de point de rosée (T_d), diminue, respectivement augmente aussi, mais plus discrètement puisque le taux est de $0,2^\circ\text{C}$ par 100 m. Rappelons que T_d est la température à laquelle il faut abaisser un volume d'air pour qu'il y ait condensation en eau liquide. T_d peut être égale (saturation) ou plus petite que T mais jamais plus grande. Plus T_d est éloignée de T à une altitude donnée, plus l'air est sec et vice-versa.

Concrètement, dans l'exemple de la figure 2, ce volume d'air est grand, froid et humide avec $T = 5^\circ\text{C}$ et $T_d = 4^\circ\text{C}$ à 3000 m et est petit, chaud et sec avec $T = 15^\circ\text{C}$ et $T_d = 6^\circ\text{C}$ à 2000 m. Si l'air continue un peu à monter au-dessus de 3000 m, il devient saturé d'humidité ($T = T_d = \text{env. } 3,7^\circ\text{C}$) et un petit nuage, contenant de très nombreuses fines gouttelettes d'eau en suspension, se forme.

En été 2006, j'ai pu rassembler des images webcam du ciel et les radiosondages de Madrid vers 12 heures UTC pour 50 jours environ. L'examen de ces documents m'a permis d'affiner de façon pragmatique le concept de CC.

Die physischen Eigenschaften der kG hängen von ihrer internen Luftmischung ab:

1. Die Luft der kG ist dunstig und aus einer bestimmten Höhe normalerweise sichtbar (Abb. 3). Dieser Dunst entsteht aus der Vermischung der Luft mit Staub- und Schmutzpartikeln.
 2. In der kG liegen die Gradienten der Werte T und Td bei ca 1°C/100 m resp. 0,2°C/100 m. Logisch, da die Luft darin ständig auf- und absteigt. In der Praxis heisst das, dass der Gradient an einem besonders sonnigen Tag in Bodennähe und mehr oder weniger hoch über dem Boden oft überadiabatisch ist, also weit über 1°C/100 m. Das ist die einzige Konstellation, bei der man im Emmagramm überadiabatische Werte findet (Abb. 4).
 3. Die kG kann sich je nach allgemeiner Wetterlage über einige Meter oder mehrere hundert Meter ausdehnen. Wenn die Luftmasse einen starken Temperaturunterschied zwischen der unteren und der oberen Schicht der Troposphäre aufweist, ist die kG umso breiter – und umgekehrt.
 4. Wenn die Topographie einigermaßen homogen und eben ist, ist auch die kG homogen. T und Td sowie ihre Ausdehnung variieren kaum von einem Ort zum anderen auf gleicher Höhe. In Bodennähe herrschen allerdings grössere Temperaturunterschiede. Auch die Windgeschwindigkeit und -richtung bleiben in der gesamten kG eher homogen. In den Bergen sind die Winde eher wechselhaft mit lokalen, anabatischen Strömungen, die sich den verschiedenen Charakteren der Hänge und Täler anpassen.
 5. Die kG verändert sich im Laufe des Tages. Am Morgen ist sie nicht besonders breit. Sie erreicht ihre maximale Ausdehnung am Nachmittag nach starker Sonneneinstrahlung (Abb. 5).
 6. Die trockene Konvektion – diejenige, die wir ausnutzen – befindet sich ausschliesslich in der kG. Solche Konvektionen können sich manchmal weiter nach oben ausdehnen, allerdings nur in grossen aufblühenden Kumuli.
 7. Am oberen Ende der kG beobachtet man in der Regel eine Inversion. In Wirklichkeit gibt es diese nicht unbedingt; die Temperaturkurve zieht sich weiter nach oben mit einem Temperaturgradient knapp unter 1°C/100 m.
- Leider wird in vielen Segelflug- und Hänggleiterbüchern von

Les propriétés physiques de la CC découlent du fort brassage d'air dans celle-ci:

1. L'air de la CC est brumeux avec une limite supérieure en général visible lorsque l'on se trouve à une certaine altitude (fig. 3). Cette brume provient du mélange de l'air avec les poussières et la pollution provenant du sol.
2. Les gradients de T et Td dans la CC sont proches de respectivement 1°C/100 m et 0,2°C/100 m. C'est logique, puisque l'air y monte et descend sans arrêt. En pratique, près du sol et sur quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, on trouve très souvent un gradient suradiabatique, c'est-à-dire très nettement supérieur à 1°C/100 m, lors de journées bien ensoleillées. C'est à cette seule et unique occasion que l'on rencontre le suradiabatsisme dans les émagrammes (fig. 4).
3. L'épaisseur de la CC varie de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres selon la situation météo générale. Si la masse d'air présente un fort contraste de température entre la basse et la haute troposphère, la CC a plus de chance d'être épaisse et vice-versa.
4. Dans une topographie assez homogène et peu accidentée, la CC est elle-même homogène, c'est-à-dire que ses T et ses Td, à altitude égale, et son épaisseur varient très peu d'un endroit à l'autre et à un instant donné. Au sol, il y a par contre plus de contraste de température. Les vents sont aussi souvent relativement homogènes (semblables) en vitesse et en direction dans toute l'épaisseur de la CC. En montagne, les vents sont plus variables, avec des brises anabatiques locales qui s'adaptent aux configurations des pentes et des vallées.
5. La CC évolue durant la journée. Le matin, elle n'est pas très épaisse. L'après-midi, après un fort réchauffement solaire, elle atteint son épaisseur maximale (fig. 5).
6. C'est seulement dans la CC que l'on trouve des convections sèches et ce sont celles-ci que nous utilisons. Plus haut, les convections peuvent parfois continuer mais uniquement dans de gros cumulus bourgeonnants.
7. Classiquement, on décrit une inversion de température au sommet de la CC. En réalité, elle n'est pas toujours présente, la courbe de température continuant plus haut avec un gradient de température plus faible que 1°C/100 m.

Abb. 4. Struktur der kG: (1) Überadiabatische Schicht. (2) Adiabatischer Gradient (1°C/100 m). (3) Inversion, nicht immer vorhanden. (4) Gradient über der kG (zwischen 0,5 und 0,8°C/100 m). (5) Td Kurve (0,2°C/100 m). (6) Am oberen Ende der kG beträgt T-Td im Idealfall 2 bis 5°C. (7) Beispiel einer Td Kurve über der kG.

Figure 4. Structure de la CC: (1) couche suradiabatique. (2) Gradient adiabatique (1°C/100 m). (3) Inversion, pas toujours présente. (4) Gradient entre 0,5 et 0,8 °C/100 m au-dessus de la CC. (5) Courbe de Td (0,2°C/100 m) dans la CC. (6) Au sommet de la CC, T-Td = 2-5°C dans le cas idéal. (7) Exemple de courbe de Td au-dessus de la CC.

Abb. 5. Entwicklung der Kurven T und Td in der kG im Verlaufe des Tages, links am Morgen, rechts am Nachmittag.

Figure 5. Evolution des courbes T et Td dans la CC en cours de journée du matin à gauche à l'après-midi à droite.

Abb. 6. Das Modell, das zu oft dargestellt wird und der Realität nicht entspricht: Veränderung der Temperatur in (rote Kurve) und um (blaue Kurve) die Thermik je nach Höhe.

Figure 6. Modèle trop souvent représenté et non conforme à la réalité de la variation de température dans (rouge) et autour (bleu) du thermique en fonction de l'altitude.

Abb. 7. Eine realistische Darstellung der kG. T und Td in der Konvektion (rot) und in der umgebenden Luft (blau).

Figure 7. Une représentation plus réaliste de la CC. T et Td dans la convection (rouge) et dans l'air ambiant (bleu).

Abb. 8. Veränderung der kG über stark heterogenem Boden.

Figure 8. Variation de la CC sur un terrain très hétérogène.

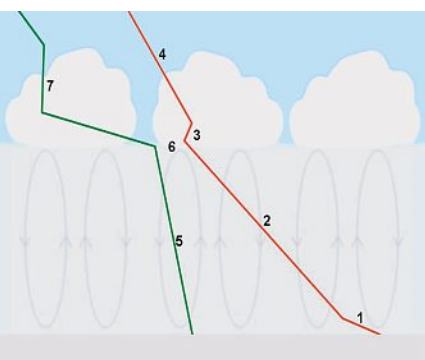


Abb. 4 Fig. 4

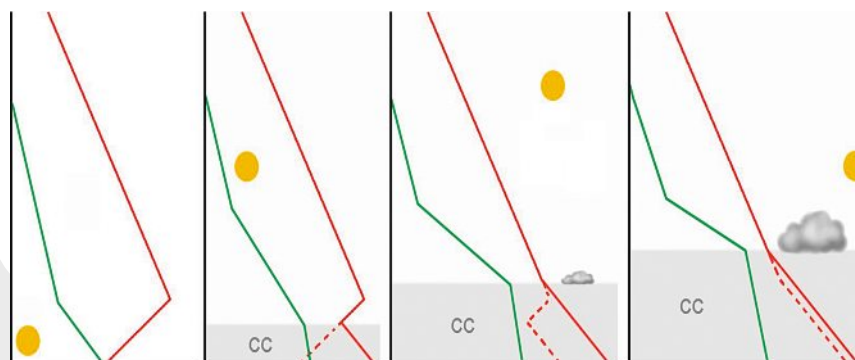


Abb. 5 Fig. 5

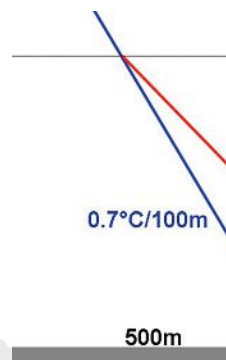


Abb. 6 Fig. 6

einem adiabatischen Gradienten ($1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) im Zusammenhang mit Thermik und von einem Gradienten von ca. $0,5$ bis $0,8^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ in der Umgebungsluft gesprochen (Abb. 6), ohne dass die kG auch nur erwähnt wird. Diese Sichtweise entspricht nicht der Realität. Abbildung 7 zeigt, wie es in Wirklichkeit im Zusammenhang mit der kG aussieht. Bemerkenswert ist, dass der Unterschied zwischen T und der Thermikluft nicht so prägnant ist wie im Modell der Abbildung 6, was auch mehrere Studien und Experimente bestätigen.

Damit sich ein günstiger Himmel mit schönen und hohen Kumuli bildet, muss der Temperaturunterschied zwischen T und Td am Boden 12 bis 20°C , am oberen Ende der kG 3 bis 5°C betragen; darüber muss die Luft sehr trocken sein. Die Kurven der Abbildung 4 sind ein ideales Beispiel dafür. Ist die kG trockener, entfernt sich die grüne Kurve (Td) noch weiter nach links von der roten Kurve (T); dann bleiben die Konvektionen kumulustfrei. Ist die kG jedoch zu feucht, ist mit einer Überentwicklung von Kumuli und tiefen Stratokumuli zu rechnen. Ist die Luft über der kG zu feucht, dann sind vertikale Überentwicklungen mit möglichen Gewittern oder hohe Wolkenfelder zu erwarten.

Ist der Boden ungleichmässig, wie dies in der Schweiz mit den Bergen und Seen der Fall ist, variiert die Höhe der kG stark (Abb. 8). Über dem Relief ist die kG am oberen Ende sehr hoch und feucht – daher die vielen Kumuli, weil die Umgebungsluft dort zusammenläuft. Weil sich die unteren Schichten schlechter aufwärmen lassen, wenn sie ausgedehnt und feucht sind (Seen, Moore) und weil die Luft darüber einsinkt, ist die kG dort dünn und eher frisch, mit einer Inversion am oberen Ende. Die kG erscheint dann dunstig, träge und ohne Kumuli. Dieser Fall wird auf Englisch mit «blue hole» bezeichnet; gemeint ist ein zum Thermikfliegen ungünstiges Gebiet.

Stabilität und Labilität sind zwei sehr genaue thermodynamische Begriffe, auf die ich hier nicht eingehe. Wenn die Piloten die Darstellung der kG einmal richtig begriffen haben, bekommen sie eine vage, praktische, aber unrealistische Idee darüber, was die kG eigentlich ist. So müsste man anstelle von einem stabilen Tag von einem Tag mit kleiner kG sprechen, an dem es nur schwache Konvektionen ohne Kumuli gibt – von denen die geschickten Vögel aber trotzdem profitieren; was aufzeigt, dass eine gewisse Labilität vorhanden ist. Es sollte auch nicht mehr von einem labilen Tag die Rede sein: Der Tag weist eine breite kG und optimale Feuchtigkeit auf, was die Bildung von dicken und schönen Kumuli und von starken und breiten Konvektionen begünstigt, die uns erfreuen oder manchmal auch beunruhigen.

Il est regrettable que dans de nombreux manuels de vol à voile et de vol libre, on parle de gradient adiabatique ($1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) dans les thermiques et d'un gradient d'env. $0,5$ à $0,8^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ dans l'air ambiant (fig. 6), sans évoquer la CC. Cette façon de voir les choses ne colle définitivement pas à la réalité. La figure 7 montre une représentation très probablement plus proche de la vérité et compatible avec la notion de CC. Remarquons que les différences de T entre l'air du thermique et l'air ambiant ne sont pas aussi marquées que sur le modèle de la figure 6 mais ce fait est confirmé par plusieurs études et expériences.

Pour qu'un ciel favorable, autrement dit avec de jolis et hauts cumulus, se développe, il faut des différences entre T et Td de 12 – 20°C au sol, de 3 – 5°C au sommet de la CC puis il faut que l'air soit très sec au-dessus. Les courbes de la figure 4 sont un exemple idéal. Si la CC est plus sèche, c'est-à-dire que la courbe verte (Td) est encore plus éloignée à gauche de la courbe rouge (T), les convections seront sans cumulus. Si, au contraire, la CC est trop humide, un surdéveloppement de cumulus et stratocumulus bas est à craindre. Si l'air est trop humide au-dessus de la CC, on peut s'attendre à des surdéveloppements verticaux avec éventuels orages ou aux passages de nuages élevés.

Sur un terrain hétérogène, avec des montagnes et des lacs comme en Suisse, l'altitude du sommet de la CC varie fortement (fig. 8). Sur le relief, la CC est haute et humide à son sommet, d'où les nombreux cumulus, car l'air environnant y converge. Parce que le réchauffement des basses couches est moins efficace sur de larges surfaces humides (marais, lac) et en raison de l'affaissement d'air au-dessus, la CC y est mince et relativement fraîche avec une inversion à son sommet. La CC apparaît alors brumeuse, sans cumulus et inerte. Dans ce cas, les pilotes anglo-saxons parlent de «blue hole» pour signifier que la région n'est pas propice au vol thermique.

Stabilité et instabilité sont une notion thermodynamique très précise, que je ne traiterai pas ici. Les pilotes ont une définition floue, pratique mais en fait non réaliste, une fois la représentation de la CC bien comprise. Ainsi, à la place d'une journée stable, on devrait parler d'une journée avec une mince couche convective, entraînant de faibles convections sans cumulus, que certains oiseaux habiles utilisent pourtant bien, ce qui prouve qu'un certain degré d'instabilité y existe. A la place d'une journée «instable», on devrait dire, journée avec épaisse couche convective et humidité optimale pour la formation de gros et beaux cumulus et de fortes et larges convections qui nous mettent plus à l'aise ou peuvent même nous faire peur.

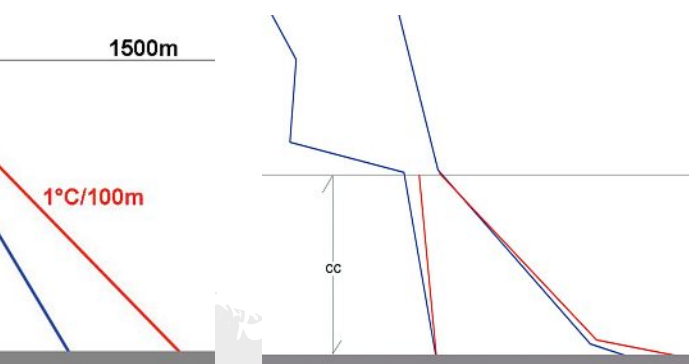


Abb. 7 Fig. 7

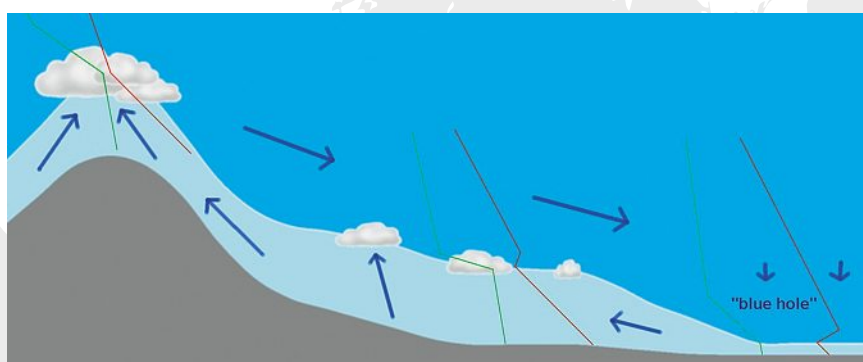


Abb. 8 Fig. 8