

Thermik



beeinflusst durch
Erdboden und Bewuchs



Welche
Auswirkung hat
die Bodenfeuchte
auf die Entstehung
der Thermik?

TEXT UND BILDER: DETLEF MÜLLER,
CHRISTOPH KOTTMEIER

Bereits im Theorieunterricht zum Erwerb der Segelfluglizenz wird der Strahlungs- und Energiehaushalt der Atmosphäre behandelt. Dort haben wir gelernt, dass ein wesentlicher Teil der Strahlungsenergie der Sonne durch Absorption an der Erdoberfläche in Wärme umgewandelt wird. Wieviel Sonnenenergie an der Erdoberfläche ankommt, hängt von der Reflexion und Absorption in der Atmosphäre ab. Will man die Umwandlung der Strahlungsenergie an der Erdoberfläche in andere Energieformen bestimmen, so sind die Reflexion der Strahlung sowie der Einfallswinkel der Einstrahlung zu berücksichtigen. Es hängt ja von der Tages- und der Jahreszeit ab, wie steil

oder flach die Strahlung auftritt. Schlussendlich beschreibt die Strahlungsbilanz Q (die verfügbare Strahlungsenergie pro qm) die für die Umwandlung in andere Energieformen verfügbare Energie.

Wo der Boden durch die Strahlung erwärmt wird, gibt die Erdoberfläche die Wärme durch Wärmeleitung zum Teil an tiefere Bodenschichten (Boden-Wärmestrom B) und zum Teil an die direkt darüber liegende Luft (Strom fühlbarer Wärme H) ab. Diese Erwärmung der Luft wird bereits in geringer Höhe durch den turbulenten Strom fühlbarer Wärme (weiter H genannt) abgelöst. H nimmt mit der Höhe ab, wobei die Erwärmung der höheren Luftschichten dadurch erfolgt,

dass in jeder Höhenschicht ein Teil der durch H übertragenen Wärme verbleibt. Für den Wärmetransport verantwortlich ist die Konvektion, also die „Thermik“, mit ihren Auf- und Abwinden.

Am Erdboden tritt in Verbindung mit Verdunstung zusätzlich der Strom latenter Energie E auf. Auch dieser Transport von Wasserdampf ist turbulent und wird durch die Auf- und Abwinde getragen. Er ändert die Temperatur der Luft aber nur, wenn es (v. a. in Wolken) zur Verflüssigung des Wasserdampfes kommt (**Bild 1**).

Die Energieumsetzungsvorgänge an der Erdoberfläche beschreibt die Energiebilanzgleichung in der Form:

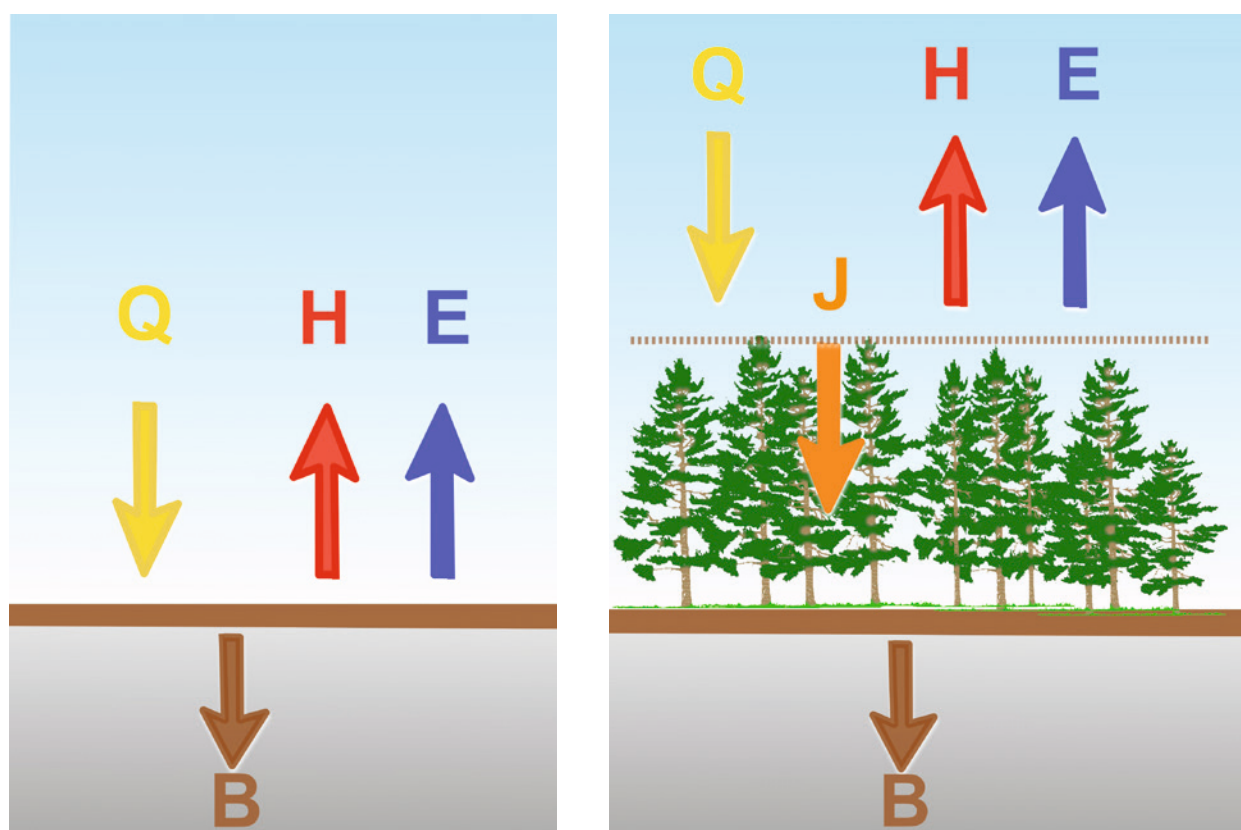


Bild 1 Terme der Energiebilanz an der Erdoberfläche: An Strahlungstagen heben sich am Erdboden (**links**) die Energieflüsse (Strahlungsbilanz Q , zur Erdoberfläche gerichtet) sowie der Bodenwärmestrom B , der Strom fühlbarer Wärme H und der Strom latenter Wärme E (alle von der Erdoberfläche weg gerichtet) gegenseitig auf. Bei Bewuchs (**rechts**) sind zusätzlich die Energieumsätze im Pflanzenbestand J zu berücksichtigen

$Q - B - E - H = 0$ oder $Q = B + E + H$
d. h., dass die Energieflüsse Strahlungsbilanz (Q tagsüber zur Erdoberfläche gerichtet) sowie der Bodenwärmestrom B, der Strom fühlbarer Wärme H und der Strom latenter Wärme E (tagsüber alle von der Erdoberfläche weg gerichtet) sich gegenseitig aufheben. Q gibt an, wieviel Energie zur Umwandlung in B, E und H zur Verfügung steht. Ihre Aufteilung kann zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort variieren. Bei Bewuchs sind zusätzlich die Energieumsätze im Pflanzenbestand (J) zu berücksichtigen. Jetzt ist die Bewuchsoberkante die Erdoberfläche. Die Energieumsätze im Pflanzenbestand sind tagsüber ebenfalls von der Bezugsebene weggerichtet.

Für die Thermikentwicklung ist wichtig, dass sich die Erdoberfläche – und damit die oberflächennahe Luft – besonders stark erwärmt. Damit erfährt bodennahe Luft Auftrieb und setzt Aufwinde in Gang. Was wir also für einen möglichst großen Strom fühlbarer Wärme benötigen, ist eine möglich hohe Einstrahlung; die Bodenoberfläche sollte lokal möglich steil und direkt (wenig Wolken) beschienen werden und dunkel sein (geringe Strahlungsreflexion). Ein kleiner Strom latenter Wärme (trockene Oberfläche) mit wenig Verdunstung ist von Vorteil für großes H. Auch ein geringer Bodenwärmestrom B (trockene Böden) begünstigt ein großes H.

Bild 2 zeigt den Tagesverlauf der Energiebilanzkomponenten an einem Strahlungstag über Wüstenboden und über einer feuchten Wiese. Größenordnungsmäßig verteilen sich die Komponenten zur Mittagszeit wie in **Tabelle 1**.

Über vegetationslosen Böden (Wüste) dominiert der Fluss fühlbarer Wärme H über den der latenten Wärme E. Über Vegetation mit ausreichender Bodendurchfeuchtung dominiert der Fluss latenter Wärme über den der fühlbaren Wärme.

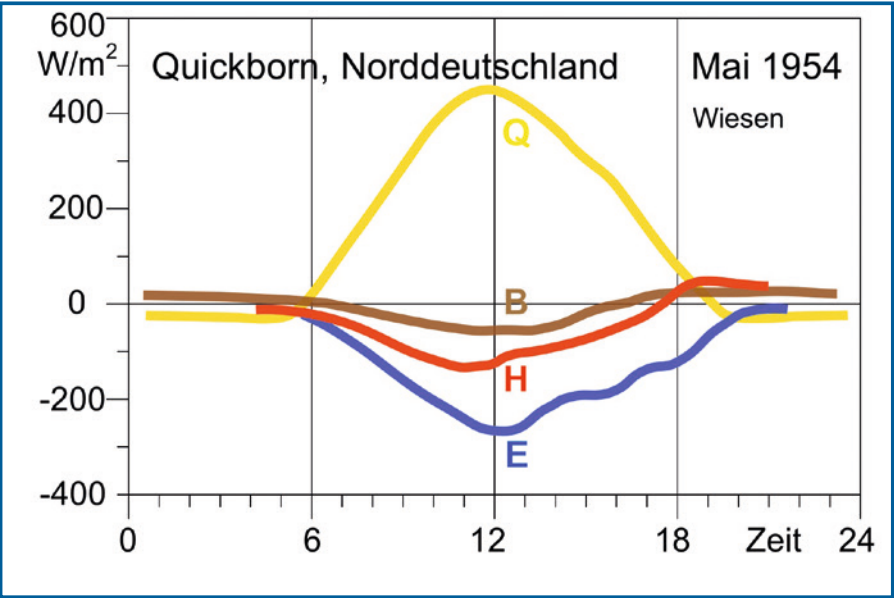
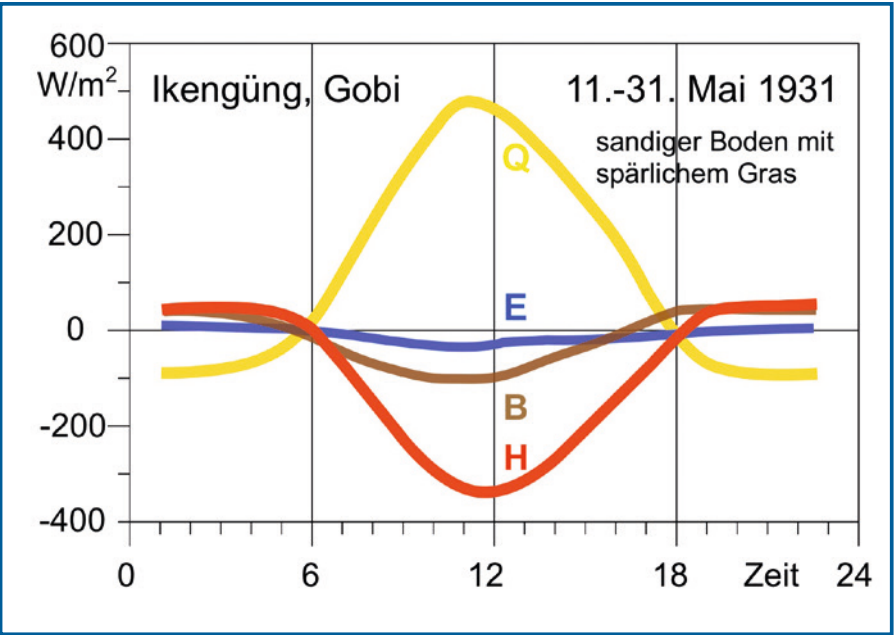


Bild 2 Tagesgang der Komponenten der Energiebilanz an Strahlungstagen: oben Wüstenboden mit tagsüber sehr kleinem E (Strom latenter Wärme) und großen H (Strom fühlbarer Wärme), darunter feuchte Wiese mit größerem E (Strom latenter Wärme) als H (Strom fühlbarer Wärme)

	Trockene Fläche	Feuchte Wiese
Strahlungsbilanz (Q)	500 W/m^2	500 W/m^2
Bodenwärmestrom (B)	100 W/m^2	50 W/m^2
Strom latenter Wärme (E)	0 W/m^2 (sehr klein)	350 W/m^2
Strom fühlbarer Wärme (H)	400 W/m^2	100 W/m^2

Tabelle 1 Typische Energiebilanzwerte trockener und feuchter Böden (gleiche Quelle wie Bild 2)

Material	Bedingungen	Dichte (kg/m ³) * 10 ³	Wärmekapazität (J/m ³ K)*10 ⁶	Wärmeleitfähigkeit W/mK
Luft	20°C, still	0,0012	0,0012	0.025
Wasser	20°C, still	1,0	4,18	0,57
Sandiger Boden (40% Porenvolumen)	frisch	1,6	1,28	0,30
	gesättigt	2,0	2,96	2,20
Lehm (40% Porenvolumen)	trocken	1,6	1,42	0,25
	gesättigt	2,0	3,10	1,58
Torf (80% Porenvolumen)	trocken	0,3	0,58	0,06
	gesättigt	1,1	4,02	0,50
Stein	massiv	2,7	2,02	2,90

Tabelle 2: Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit verschiedener Böden sowie von Wasser und Luft (gleiche Quelle wie Bild 2)

Besonders zwei Faktoren bestimmen den Bodenwärmestrom: die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmekapazität beschreibt die Energie, die man einem Körper der Masse m zuführen muss, um dessen Temperatur um 1K zu erhöhen. Die Wärmeleitfähigkeit ist das Maß für die Fähigkeit eines Stoffes, die Wärme zu leiten. Betrachtet man die entsprechenden Werte in **Tabelle 2**, so erkennt man, dass die unterschiedliche Körnung die bestimmende Größe für den Wassergehalt, aber auch der Wasserspeicherefähigkeit der Böden ist. Je feinkörniger ein Boden ist (hoher Tonanteil und entsprechend geringer Sandanteil), desto feiner sind die Poren und um so besser haftet das Wasser an den Wänden. Und das ist wichtig: Je höher der Wassergehalt, desto größer ist der Bodenwärmestrom. Und je feinkörniger der Boden, desto länger speichert er Wasser, und um so größer ist

auch das Verdunstungspotenzial!

In der Regel sind die Böden in unseren Kulturlandschaften natürlich nicht „nackt“, sondern mit Pflanzen bewachsen, die eher die Bodenoberflächentemperatur reduzieren und deren Oberfläche dann die Erdoberfläche darstellt. Aber auch hier spielt die Bodenfeuchte eine wichtige Rolle: Der Strom latenter Wärme wird durch den Bewuchs und den Bodenwassergehalt

bestimmt. Zum einen wird die Transpiration der Pflanzen wesentlich durch das Wasserangebot in den obersten Bodenschichten bestimmt, zum anderen führt eine höhere Bodenfeuchte zu einem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität, also des Bodenwärmestroms.

So zeigten detaillierte Modellrechnungen für sieben Wettersituationen des COPS-Projekts (Convective and

Bewuchs	Transpirationsleistung
Immergrüne Koniferen	1400-1700 $\mu\text{mol H}_2\text{O}/(\text{m}^2\text{s})$
Wiesen	3000-4500 $\mu\text{mol H}_2\text{O}/(\text{m}^2\text{s})$

Tabelle 3: Transpirationsleistungen verschiedenen Bewuchses

Die zusätzliche Verdunstung bei Bewuchs modifiziert also über die Bodenfeuchte die Aufteilung der der Erdoberfläche zugeführten Energie auf den Strom fühlbarer und latenter Wärme. **Tabelle 3** zeigt die Transpirationsleistung von immergrünen Koni-

Betrachten wir unseren Kulturraum, so ist in der Regel der Bewuchs gut an die Wasserversorgung des Bodens angepasst: Auf eher gut durchfeuchteten Böden bzw. Böden mit hoher Wasserspeicherfähigkeit sind auch Pflanzen mit einem hohen Wasserverbrauch und hoher Evapotranspiration zu finden! Entsprechend gilt die Regel zur Verdunstung umformuliert weiterhin: Je höher die Bodenfeuchte, desto geringer ist die Erwärmung der bodennahen Luft!

Fassen wir die Überlegungen zur Strahlungs- und Energiebilanz zusammen:

- je mehr Strahlungsenergie einer Fläche zukommt und dort verbleibt (Sommerhalbjahr, wenig Wolkenabschirmung, steiler Einfall der Bestrahlung, geringe Rückstrahlung)
- je geringer die Evapotranspiration (die Transpiration der Pflanzen und Evaporation des Bodens) ist.

Auf Basis dieser Überlegungen zur Bodenfeuchte haben wir vor 40 Jahren unsere Thermikkarte für Norddeutschland entwickelt (www.imk-tro.kit.edu/5291.php). Die regional vorherrschenden



**Flugzeugräder
Bremshydraulik
Flugzeugreifen/-schläuche
Sicherheitskupplungen
Schleppseileinziehwinden
Start-/Schleppausrüstung**

Böden bedingen auch typische Unterschiede der Bodenwassergehalte, besonders ab einem bis zwei Tagen nach Regenfällen. Die Vegetation oder Anbaupflanzen sind an unterschiedliche Böden angepasst, und verändern das generelle Bild nicht. Die sandigen Böden fördern starke Erwärmung der Oberfläche, und lehmige Böden, natürlich auch Gewässer und Flussauen, lassen nur schwächere Erwärmung zu. Die Bodenart bewirkt somit eine höhere oder geringere Erwärmung der bodennahen Luft und damit wiederum früher oder später einsetzende Thermik und ansteigende Cumuluswolken-Untergrenze.

Doch diese Überlegungen taugen nicht nur für großräumige Betrachtungen zur Thermikqualität von Regionen, sondern auch für Detailüberlegungen zu Orten mit größerem Aufwindpotenzial. Wir benötigen an windschwachen Tagen ausreichend große Flächen, die sich – im Vergleich zur Umgebung – stärker erwärmen können.

In der Ebene zeichnen sich diese in der Regel trockeneren Flächen durch eine höhere Helligkeit aus, was allerdings auch eine reduzierte Strahlungsbilanz kennzeichnet (größere Rückstrahlung, es wird mehr Strahlung reflektiert). Das gilt genauso für Vegetationsbestände: „In vollem Saft“ stehende Pflanzen mit ausgeprägter Evapotranspiration wirken eher dunkelgrün, ausgetrocknetes Getreide oder Buschwerk eher beige. Ein ausgetrockneter Pflanzenbestand reduziert die Evapotranspiration und den Bodenwärmestrom, was oftmals eine geringere Strahlungsbilanz kompensiert. Das Ergebnis sind z. B. hohe Temperaturen in reifem Kornbestand. Etwas schwieriger wird das bei Wäldern, die immerhin ein Drittel Deutschlands bedecken. Hier bildet der Bestand (die Baumkronen oder das Buschwerk) die „Erdoberfläche“. In der Regel finden wir in unserer Kulturlandschaft Wald dort,

**Eine Zusammenfassung der Überlegungen kann für windschwache Tage also lauten:
Im Flachland suche Thermik über abgetrockneten Flächen (abseits von Flussniederungen und Feuchtgebieten) ohne oder mit abgetrockneter Vegetation oder Kiefernwäldern, bei schwachem Wind an Abreißkanten auf der windabgewandten Seite.
Im Hügelland suche an den Abreißkanten von Sonnenhängen oder über bewaldeten Sonnenhängen.**

wo sich der Ackerbau nicht lohnt. Das kann an der Orographie liegen (steile Hänge, Geländekanten), aber auch an der Wasserversorgung (Auen in Flussniederungen oder auf moorigem Untergrund auf der einen Seite, Kiefernwälder bei sandigem Untergrund auf der anderen).

Während sich über Feuchtflächen auch über dem Wald durch eine hohe Evapotranspiration niedrigere Temperaturen ergeben, sieht das bei trockenem Untergrund in Baumwipfelhöhe anders aus. Hier haben Vergleichsmessungen bei Freiburg über einer Rasenfläche und im/über einem Kiefernwald bei vergleichbarem Untergrund gezeigt, dass einerseits die mittägliche Verdunstung/der Strom latenter Wärme sowie der Bestands- und Bodenwärmestrom keine großen Differenzen zeigten,

andererseits aber sehr wohl der Strom fühlbarer Wärme.

So war der Spitzenwert des Stroms fühlbarer Wärme über dem Kiefernwald beinahe doppelt so groß wie der über dem Rasen. Entsprechend lagen die Mittagstemperaturen am Oberrand der Baumkrone über denen über Rasen. Der wesentliche Faktor für die größere Erwärmung war der höhere Wert Strahlungsbilanz (15 %), der aus der geringeren Rückstrahlung der Kiefernwaldoberfläche (0,11 gegenüber 0,22, also Faktor 2) resultiert.

Die verringerte Evapotranspiration des Kiefernwaldes gegenüber einer Graslandfläche wurden auch bei Messungen in Norddeutschland beobachtet. Das Verhältnis des fühlbaren zum latenten Wärmestrom, auch „Bowen-Verhältnis“ genannt, betrug 0,2, der Strom fühlbarer Wärme war also fünfmal so groß wie der der latenten Wärme. Bei einer Wiese beträgt das Verhältnis eher 1,0. Hier führte man dieses auf eine reduzierte Transpirationseigenschaft der Kiefern zurück.

Unter Windeinfluss bilden Wälder (wie auch Flüsse) ggf. auch Abreißkanten für erwärmte Luftpakete. Wälder können also selbst Thermikquellen sein, aber unter Windeinfluss auch die Waldkanten!

Orographische Strukturen beeinflussen die bodennahe Erwärmung der Luft in zwei Richtungen: Erstens erhöht sich an sonnenexponierten Flächen die direkte Solarstrahlung und zweitens reduziert sich der Bodenwassergehalt durch Abfluss. Zudem kann die erwärmte Luft den Hang „hinaufkriechen“ und trifft so unweigerlich auf eine Abreißkante!

Um diese Ableitungen zu verifizieren, kann auf eigene Erfahrungen im Segelflug zurückgegriffen werden, oder aber man nutzt die „Thermal Information Map“ (www.thermalmap.info/thermalmap.php) von Tim und Richard

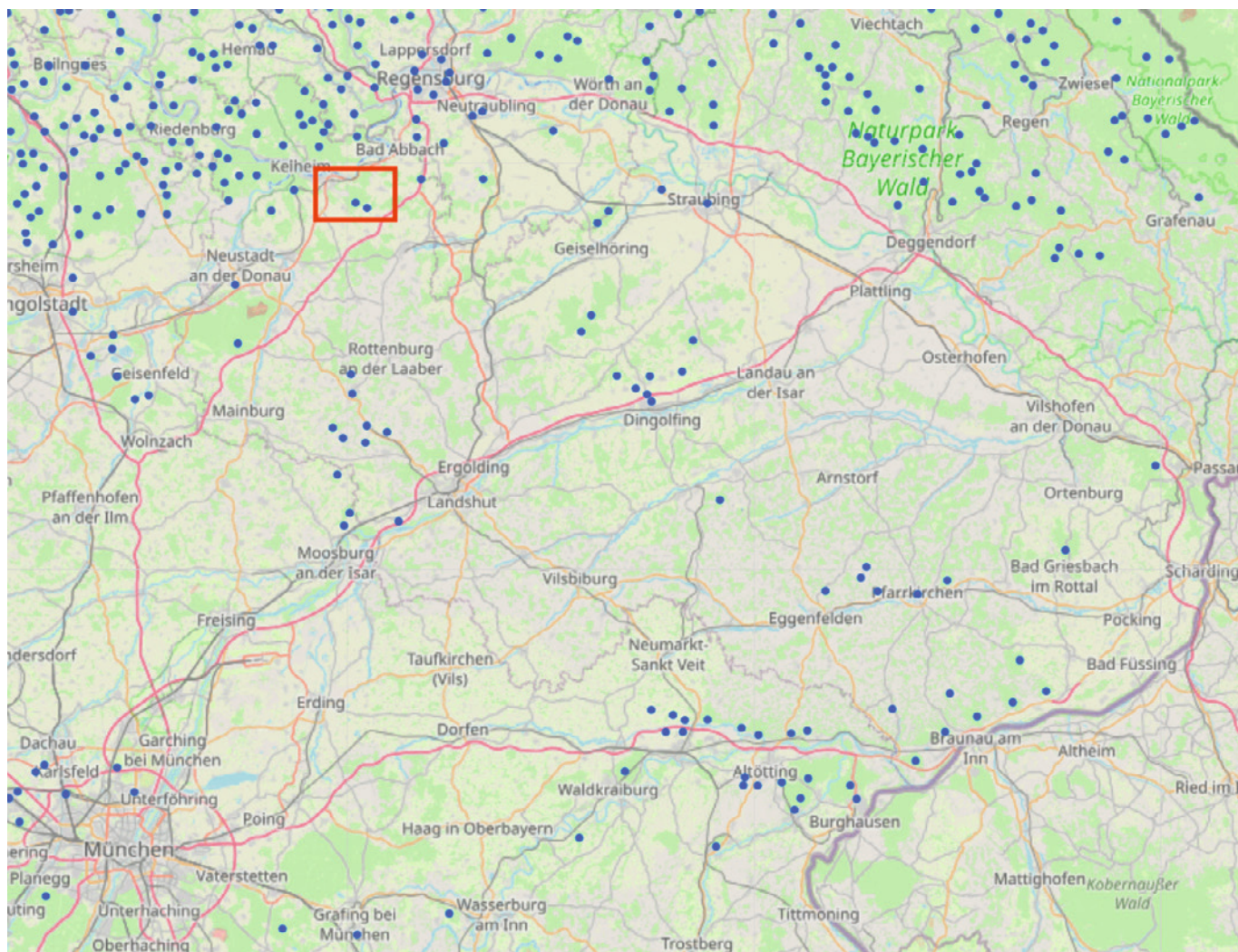


Bild 3: Hotspots nach der Thermal Information Map für das niederbayerische Hügelland auf Basis der OpenStreetMap

Stuhler. Die hier aus OGN- und IGC-Daten aus tausenden von Streckensegelflügen generierte Karte zeigt Orte mit gehäuftem Höhengewinn durch Thermikkreisen. Dabei wurde auf Basis des Windversatzes, der Neigung und der Höhe der potenzielle Auslösepunkt am Boden ermittelt und mit Hilfe eines Algorithmus Häufungsgebiete lokalisiert, gebündelt und gewichtet.

Ich habe mir Niederbayern mit angrenzender Umgebung herausgesucht, eine Region, in der ich jetzt fliegerisch zu

Hause bin (**Bild 3**).

Das niederbayerische Hügelland ist relativ homogen mit einem schweren, lehmigen Boden (Löß) auf einem Unterbau aus Meeres- und Süßwasserablagerungen, in das breitere Flusstäler (Urstromtäler) eingelagert sind. Aufgrund der Fruchtbarkeit des Bodens werden weite Flächen der Landschaft ackerbau-/landwirtschaftlich genutzt, und nur 1/5 der Oberfläche ist mit Wäldern bedeckt. Der Wasserabfluss nach Niederschlägen erfolgt eher überirdisch. Diese Region kann man nur als „thermisch schwach“ einstufen.

Im Norden grenzt die Fränkische Alb an, eine hügelige Hochebene mit tief eingeschnittenen Flusstälern wie das der Altmühl. Der Untergrund besteht im Wesentlichen aus karstigem Kalkstein und Dolomit mit einer geringmächtigen Verwitterungs-Lehm- und Tonauflage und Kalkstein-Bruchstückeinlagerungen. Bedingt durch den Kalksteinunterbau erfolgt die Entwässerung der Niederschläge unterirdisch durch dessen Klüfte und Spalten, was zu einer Wasserarmut auf der Alb führt. Entsprechend ist hier auch die landwirt-

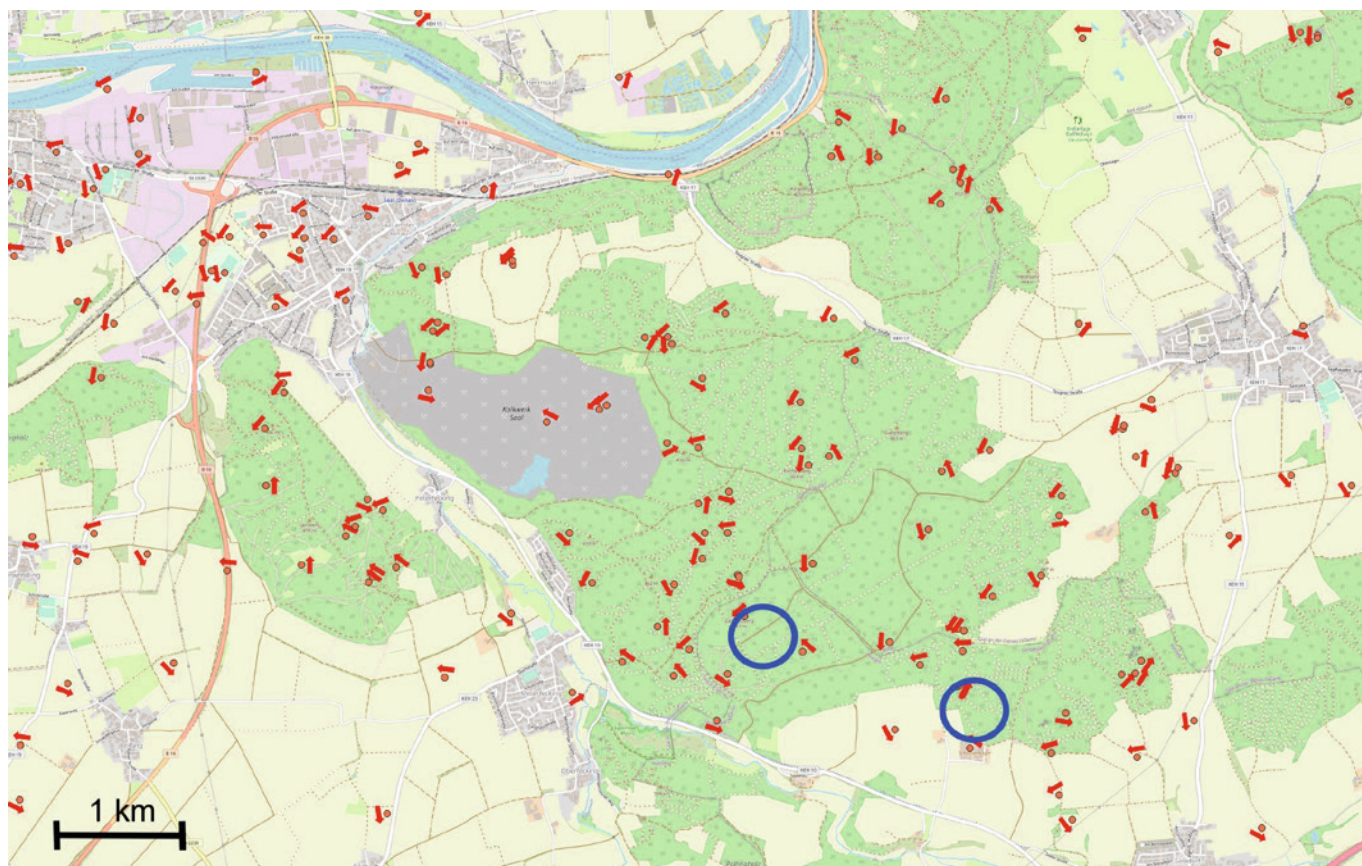


Bild 4: Berechnete Auslösepunkte von besseren Aufwinden an windschwachen Tagen bei Saal an der Donau (Thermal Information Map)

schaftliche Nutzung begrenzt und der Waldanteil größer. Diese Region ist eher „thermisch gut“.

Schon der erste Blick auf die Karte (**Bild 3**) zeigt zweierlei:

- Es gibt viel mehr Hotspots über der Alb als über dem niederbayerischen Hügelland
- Die Hotspots stehen – mit sehr wenigen Ausnahmen – über den eher ausgedehnten Waldflächen.

Der Mangel an Hotspots über dem niederbayerischen Hügelland ist wohl überwiegend der Tatsache geschuldet, dass die Region thermisch schwach ist und so von den Segelfliegern eher gemieden wird. Häufungen sind – verständlicherweise – hier eher in der Nähe von Flugplätzen mit Segelflugbetrieb zu finden.

Die Detailbetrachtung der Hotspots über dem niederbayerischen Hügelland zeigt, dass sich diese entweder an den Nordflanken der Täler über Wald befinden (bewaldete Sonnenhänge z. T. am nördlichen Talrand des Inns und der Isar), über ausgedehnten Waldflächen oder im Talbereich an Geländestufen befinden. Über der Alb findet man die Hotspots über den ausgedehnten Waldflächen. Und das eben nicht nur an den windzugewandten Seiten des Waldes (Abreißkante)!

Exemplarisch habe ich ein Waldgebiet ost-südöstlich von Kehlheim herausgegriffen (**Bild 4 und rote Markierung in Bild 3**). Freundlicherweise hat Tim Stuhler mir hier einen Ausschnitt mit

den Daten generiert, der die mutmaßlichen Auslösepunkte von Aufwinden bei schwachem Wind (kleine 20 km/h), mit mindestens 1,5 m/s Steigen, ausreichender vertikaler Erstreckung und nicht zu hohem Thermikeinstieg zeigt. Damit reduziert sich zwar einerseits die Anzahl der dargestellten Aufwinde, andererseits macht dieses erst eine Detailbetrachtung bezüglich einzelner Aufwindquellen möglich: Die Gesamtmenge aller erfassten Aufwinde zeigt ein dicht an dicht der Quellen!

Eigentlich ist dieses im Flach- und Hügelland wenig verwunderlich: Hier ist nur ein Teil der Aufwindquellen stationär, dann beeinflussen strömungsdynamische Effekte, der Entstehungsort, die Lebensdauer und die

Wechselwirkung mit dem Umfeld die Struktur, Form und Lage eines Aufwindes (siehe hierzu unseren Teil 4 der Artikelreihe „Der thermische Aufwind – seine Struktur und sein Strömungsverhalten“).



Ich denke, jeder Segel-flieger kennt in seinem Flugplatzumfeld den einen oder anderen „Hausbart“, der dann doch nicht immer genau an der gleichen Stelle zu finden ist. Deshalb ist der Ansatz der Stuhlers, die kalkulierten Aufwindquellen zu bündeln, völlig in Ordnung!

Ein anderer Aspekt, der für einen kräftigeren Aufwind mit ausreichender vertikaler Erstreckung bei stationären Thermikquellen beachten werden muss, ist, dass die Quelle ein ausreichend großes Einzugsgebiet von erwärmter Luft in der bodennahen überadiabatischen Schicht besitzt: Das müssen in der Regel einige Quadratkilometer sein. Deshalb funktionieren kleinere Steinbrüche in der Regel als zuverlässige Thermikquelle nicht.

Zurück zu Bild 4: Interessant ist an diesem Gebiet, dass hier – neben dem Waldgebiet auf einer Kuppe – auch ein Steinbruch (auf der Westflanke des Waldes) und eine etwas größere Ortschaft (Saal an der Donau) zu finden ist. In der Hotspot-Karte sind zwei Kernpunkte eingezeichnet (in **Bild 4** mit einem blauen Kreis markiert). Diese liegen an südlich orientierten Waldflanken. Hierbei zeigen die einzelnen errechneten Auslösepunkte keine eindeutige Windrichtung (mit einem roten Pfeil dargestellt).

Der Großteil der einzelnen Auslösepunkte über dem Waldgebiet liegt nahe einzelner Hügelkuppen. Eigentlich nicht ganz unerwartet: Der Bewuchs über den Flanken mit einer relativ geringen Rückstrahlung erwärmt sich am stärksten, und die überadiabatische Schicht bricht nahe einem Grat auf.

Einige Auslösepunkte am Rand des Waldgebietes deuten auch auf eine Ablösung an der Waldkante hin. Hier wird wunderbar die These bestätigt: Fliege immer den Wäldern nach!

Obwohl er doch eine Ausdehnung von zwei Kilometern in Ost-West-Richtung aufweist, zeichnet sich der Steinbruch nicht unbedingt als bevorzugte Thermikquelle aus! Erwartungsgemäß sind die Auslösepunkte aber auch an den südlich orientierten Flanken des Steinbruchs zugeordnet.

Dem Ortsteil Obersaal sind auch einige Aufwindquellen zugeordnet – auch nachvollziehbar. Schwierig wird es allerdings die Ursachen der einzelnen Thermikquellen über den Feldern zu erklären, am Ende spielen hier viele lokale und temporäre Effekte eine Rolle, um die Aufwinde hier entstehen zu lassen.

Konvektion ist eben eine gewisse Ausprägung von Turbulenz – und Turbulenz zeichnet sich durch eine ungeordnete Strömung in der Atmo-

sphäre aus, die gekennzeichnet ist durch Wirbelbildung und -zerfall. Theoretische Kenntnisse zur „Konvektion“ sowie gewonnene Erfahrungen auf Segelflügen erhöhen allerdings die Wahrscheinlichkeit, einen einzelnen thermischen Aufwind zu finden! ♦

Literatur:

Jutta Rost: Vergleichende Analyse der Energiebilanz zweier Untersuchungsflächen der Landnutzungen „Grasland“ und „Wald“ in der südlichen Oberrheinebene, 2004

Christian Barthlott, Christian Hauck, Gerd Schädler, Norbert Kalthoff and Christoph Kottmeier: Soil moisture impacts on convective indices and precipitation over complex terrain, 2011

Heinz Zimmermann: Mikrometeorologie, Vorlesungsmitschrift (IMK-TRO/KIT) SS 2005, www.markusengelhardt.com/skripte/mikro.pdf

segelfliegen magazin

read our digital version also **in English!**
segelfliegen magazine as an e-paper subscription (PDF)
6 issues for only 59.00 €/year

You can choose **one** free gift for a year's subscription:



1 THERMAL-HAT
natural or navy

OR:



a 10 Euro GIFT
VOUCHER for
Uli's Segelflugbedarf

Subscribe
here ➔

