

Simulation der regionalen und bodennahen lokalen Kaltluftabflüsse und Massenströme in Thüringen auf der Grundlage der TK 25

Projektbericht

ambimet

Gesellschaft für Umweltmeteorologie GbR, München

Prof. Dr. Günter Groß - Dr. Jutta Graf - Dr. habil. Dietrich Heimann

Auftraggeber

Thüringer Landesanstalt für Umwelt, Jena

Projektzeitraum

September 2000 - November 2000

ambimet

Gesellschaft für Umweltmeteorologie GbR

Postanschrift:

Adelbertweg 6
D-82131 Gauting

Telefon: 089-89340578
Telefax: 089-89340579
eMail: ambimet@t-online.de

Simulation der regionalen und bodennahen lokalen Kaltluftabflüsse und Massenströme in Thüringen auf der Grundlage der TK 25

Projektbericht

ambimet

Gesellschaft für Umweltmeteorologie GbR, München

Prof. Dr. Günter Groß - Dr. Jutta Graf - Dr. habil. Dietrich Heimann

Auftraggeber

Thüringer Landesanstalt für Umwelt, Jena

Projektzeitraum

September 2000 - November 2000

ambimet

Gesellschaft für Umweltmeteorologie GbR

Postanschrift:

Adelbertweg 6
D-82131 Gauting

Telefon: 089-89340578
Telefax: 089-89340579
eMail: ambimet@t-online.de

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	3
2. Lokale und regionale Windsysteme in Thüringen	3
3. Die Modelle.....	5
3.1. Das Regionalwind-Modell.....	5
3.2. Das Kaltluft-Modell.....	6
4. Die Vorgehensweise	8
5. Beispielhafte Ergebnisse.....	11
6. Abbildungen.....	14

1. Einleitung

Unter ungünstigen lokalklimatischen Bedingungen können die Wirkungen verschiedener meteorologischer Größen Mensch und Natur belasten. In den Nachtstunden bilden sich in orografisch strukturiertem Gelände Kaltluftabflüsse aus, die eine besondere Planungsrelevanz besitzen:

- Wetterlagen, bei denen sich nächtliche Kaltluftabflüsse ausbilden können, sind gekennzeichnet durch eine geringe großräumige Windgeschwindigkeit und wolkenlosen Himmel. Dabei können sich Inversionen ausbilden, die den Luftaustausch zwischen der bodennahen Atmosphäre und den darüberliegenden Luftschichten stark reduzieren. Die durch bodennahe Quellen (Hausbrand, Verkehr, Industrie) freigesetzten Luftschadstoffe verbleiben längere Zeit vor Ort und führen somit zu einer relativ hohen Schadstoffkonzentration. Nächtliche Kaltluftabflüsse können aus der unbelasteten Umgebung Frischluft herantransportieren und zu einer deutlichen Verbesserung der lufthygienischen Situation führen.
- Fließt die Kaltluft auf dem Weg von der Entstehung hin zu den Siedlungen über Gebiete mit starken Emissionen (z.B. landwirtschaftliche Intensivtierhaltung, Mülldeponien, Industrie, stark befahrene Straßen), so wird sie mit Luftschadstoffen belastet und führt zu einer Verschlechterung der lufthygienischen Situation.
- In ungünstigen Geländelagen sammelt sich die abfließende Kaltluft und bildet Kaltluftseen. In diesen Gebieten ist mit einer Erhöhung der Frost- und der Nebelhäufigkeit zu rechnen, d.h. mit Gefahren für den Verkehr und für empfindliche landwirtschaftliche Kulturen.

Neben den Kaltluftabflüssen bilden sich gleichzeitig noch weitere lokale und regionale thermisch bedingte Windsysteme aus, die in komplexe Wechselwirkungen miteinander treten. Da das daraus resultierende nächtliche Windfeld für jede Landschaft mit ihren individuellen orografischen Strukturen anders aussieht, lassen sich experimentell gefundene Erkenntnisse nicht ohne weiteres auf andere Landschaftsteile übertragen. Weiterhin lassen sich Kaltluftströme in Qualität und Quantität nur punktuell vermessen und es gestaltet sich außerordentlich schwierig, die dabei gewonnenen Erkenntnisse in die Fläche zu übertragen. Dies gelingt erst durch die Anwendung eines meteorologischen Kaltluftmodells.

2. Lokale und regionale Windsysteme in Thüringen

Wind, der irgendwo in Thüringen beobachtet wird (siehe auch: Regionale und lokale Windsysteme in Thüringen, Schriftenreihe der Thüringer Landesanstalt für Umwelt, Nr. 36, 1998), hat in rund 80 % der Fälle seine Ursachen weit außerhalb des Landes, d.h. er ist *allochthon* bzw. *fremdbürtig*. Er strömt im Uhrzeigersinn um Hochdruckgebiete und im Gegenuhrzeigersinn um Tiefdruckgebiete, wobei die Druckzentren ein- bis zweitausend Kilometer voneinander entfernt sein können. Der Wind, der unmittelbar mit der jeweiligen Lage der Hoch- und Tiefdruckgebiete zusammenhängt, wird *großräumiger Wind* oder auch *synoptischer Wind* genannt. Das großräumige Klima (Westwindzone der gemäßigten Breiten) bestimmt die Häufigkeiten der Geschwindigkeit und Richtung des großräumigen Windes. In Mitteleuropa herrschen daher Winde aus westlichen Richtungen vor.

Die regionale Topografie, in Thüringen vor allem der Thüringer Wald und der Harz, kann aber unter Umständen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Strömung ausüben. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn die vertikale Temperaturschichtung stabil (schwache Temperaturabnahme mit der Höhe oder sogar Temperaturzunahme bzw. Inversion) und die großräumige Strömung nicht allzu stark ist. Der großräumige Wind wird in diesen Fällen regional modifiziert. Dies äußert sich insbesondere in der Umströmung von Gebirgen und der Leitwirkung entlang gestreckter Höhenzüge. Es kommt

daher zu regionalen Unterschieden in der Häufigkeit bestimmter Windrichtungen und der mittleren Windgeschwindigkeit.

Befindet sich Thüringen im oder nahe des Zentrums eines Hochdruckgebiets, so ist die großräumige Strömung sehr schwach. Da bei einer solchen Lage oft wolkenarmes Wetter herrscht, kommt es in hügligen und bergigen Gebieten zur Ausbildung thermisch angeregter, tagesperiodischer Windsysteme. Diese haben ihre Ursache dort, wo sie entstehen, sie sind also *autochthon*, d.h. *eigenbürtig*. Wetterlagen, die das Entstehen autochthoner Windsysteme begünstigen, nennt man *autochthone Wetterlagen*. Sie kommen in Thüringen im Mittel an rund 10 bis 20 % der Tage im Jahr vor.

Nach Sonnenuntergang kühlt sich die Luft in den bodennahen Schichten infolge der Ausstrahlung stärker ab als darüber. An Hängen kommt dadurch kühlere und somit schwerere Luft neben wärmerer und somit leichter Luft zu liegen. Die horizontalen Temperaturunterschiede verursachen eine hangabwärts gerichtete Strömung, die *lokalen Kaltluftabflüsse*. Die Kaltluft strömt die Hänge herab, sammelt sich in den Tälern und fließt langsam talabwärts. Die Strömung erreicht eine vertikale Mächtigkeit von 10 bis 30 m.

Im weiteren Verlauf der Nacht wird eine zunehmend mächtigere Luftschicht von der Abkühlung erfasst und es entsteht der *regionale Gebirgswind*, eine thermische Ausgleichströmung zwischen den Mittelgebirgen und dem vorgelagerten Flachland (Abbildung 1). Der Gebirgswind entwickelt sich bis Mitternacht und dauert bis zum frühen Vormittag an. Er kann bis zu über 100 km weit ins Flachland ausgreifen und erfasst eine Schicht von 100 bis 500 m Mächtigkeit.

In Bodennähe wird der regionale Gebirgswind meist nur an exponierten Lagen (Kuppen) oder im Bereich weiter Ebenen beobachtet. Im übrigen Gelände überlagert er die lokalen Kaltluftströmungen, sodass hier ein von der Regionalströmung modifizierter Lokalwind beobachtet wird. Dort, wo die lokalen Strömungen auf Grund der örtlichen Gefällrichtung in die gleiche Richtung weisen wie der regionale Gebirgswind, werden sie verstärkt. Umgekehrt können sie abgeschwächt oder sogar völlig unterdrückt werden, wenn ihre Richtung auf Grund der Geländeneigung dem regionalen Gebirgswind entgegengesetzt ist.

Nach Sonnenaufgang bilden sich die lokalen und regionalen Windsysteme in analoger Weise aber mit umgekehrter Richtung. Die Luft in Hangnähe erwärmt sich stärker als die Luft in gleicher Höhe in größerer Entfernung zum Hang. Dies führt dazu, dass die Luft den Hang hinaufströmt. Im Lauf des Tages entsteht erneut eine regionale Gebirgsströmung, die nun vom Flachland zum Gebirge weht, die lokalen Hangaufwinde überlagert und entsprechend modifiziert und bis in die frühen Nachtstunden andauert.

Dieser, für ganz Thüringen spezifische regionale Gebirgswind wurde bereits 1953 von H.G.Koch (Koch H.G.: Wetterheimatkunde von Thüringen. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, 1953.) in seiner „Wetterheimatkunde von Thüringen“ beschrieben und mit Messungen belegt (Abbildung 2). Da es sich bei den lokalen Kaltluftabflüssen und bei dem Regionalwind um zwei, von der räumlichen Skala her stark unterschiedliche Windsysteme handelt, gibt es große Unterschiede hinsichtlich der Strömungscharakteristik. In der Tabelle 1 sind typische Größenordnungen hierfür angegeben.

	Lokalwind	Regionalwind
Windgeschwindigkeit	1 – 2 m s ⁻¹	3 – 6 m s ⁻¹
Vertikale Mächtigkeit	10 – 30 m	100 – 500 m
Reichweite	100 – 1000 m	20 – 100 km

Tabelle 1: Strömungscharakteristiken von Lokalwind und Regionalwind.

Während sich die lokalen Kaltluftabflüsse sehr schnell bei einer Abkühlung der bodennahen Luftschicht ausbilden, entwickelt sich das größerskalige Regionalwindssystem mit einer deutlichen zeitlichen Verzögerung. Dafür bleibt dieses aber bei geänderten bodennahen Temperaturverhältnissen auf

Grund der Trägheit noch längere Zeit erhalten. Die zeitliche Entwicklung von Lokalwind und Regionalwind ist schematisch in der Abbildung 3 gezeigt.

Der Wechsel vom Tag- auf das Nachtregime des Regionalwindes ist in der Zeit von etwa 19 bis 23 Uhr mit relativ geringen Windgeschwindigkeiten verbunden. Dies ist die Zeit, in der sich die lokalen Kaltluftabflüsse in idealer Weise ausbilden können. In den Stunden danach sind die Lokalwinde zwar noch vorhanden, werden aber in weiten Landesteilen von Thüringen von der kräftigen Regionalströmung bis zur Unkenntlichkeit überdeckt.

3. Die Modelle

Die Berechnung von Regionalwind und lokalen Kaltluftabflüssen in Thüringen erfolgt mit zwei verschiedenen meteorologischen Modellen: dem Regionalwindmodell REWIH3D und dem Kaltluftmodell LORESI.

3.1. Das Regionalwind-Modell

Das Modell REWIH3D ist eine Weiterentwicklung des in der VDI Richtlinie 3783, Blatt 6 beschriebenen Modells REWIMET. REWIH3D geht bezüglich seiner Konzeption aber weit über den Standard von REWIMET hinaus und erfüllt gleichwohl die Richtlinie.

Das physikalische Grundgerüst des hydrostatisch approximierten Modells besteht aus den Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und innere Energie sowie Bilanzgleichungen für Feuchtekomponenten und Luftschadstoffe. Das Modell REWIH3D enthält optional Parametrisierungen für die Strahlungsflüsse (kurz- und langwellige Strahlung), die Bodenwärmebilanz, Wolken- und Niederschlagsprozesse und hochreichende Konvektion (Gewitter).

Das Modell arbeitet mit einem dreidimensionalen Gitter, auf dem die Gleichungen mit Hilfe von Differenzenverfahren numerisch gelöst werden. Die räumliche Maschenweite beträgt in beiden horizontalen Raumrichtungen typischerweise 2,...,5 km. Die vertikale Gitterweite ist nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre sind die Rechenschichten weniger mächtig, um die atmosphärische Grenzschicht besser zu erfassen. So liegen die Obergrenzen der untersten Modellschichten typischerweise in Höhen von 20, 50, 100, 150, 200, 300, 400 und 500 m.

Zur numerischen Simulation der regionalen Gebirgswinde in Thüringen wurde ein $220 \times 200 \text{ km}^2$ großes Gebiet definiert, das den gesamten Freistaat Thüringen und alle für Thüringen relevanten Gebirge der Umgebung umfasst, d.h. den Thüringer Wald, das Schiefergebirge, den Frankenwald, das westliche Erzgebirge, die Rhön und den Harz. Die Maschenweite, mit der das Modellgebiet in ein Rechengitter unterteilt wird, wurde mit 4 km so gewählt, dass die Grobgestalt der Mittelgebirge wiedergegeben wird. Enge Täler können mit dieser Maschenweite nicht mehr aufgelöst werden, das Saaletal ist in seinen Umrissen aber noch erkennbar. Die Auflösung von 4 km reicht aus, um die regionalen Modifikationen des großräumigen Windes infolge der über- bzw. Umströmung der Mittelgebirge simulieren zu können. Auch die Simulation des regionalen Gebirgswindes ist mit dieser Maschenweite möglich. Lokale Windsysteme können dagegen nicht simuliert werden, da das Rechengitter bei einer räumlichen Auflösung von 4 km die lokalen, feingliedrigen Geländestrukturen nicht mehr erfasst. Vielmehr erscheinen die Gebirge im Modell wie eine Landschaft mit stark geglättetem Relief. Außer der Geländehöhe wird im Modell noch die Landnutzung unter Vorgabe des Flächenanteils von fünf Landnutzungsklassen (in jeder Modellmasche werden die Landnutzungsanteile von Freiflächen, Wald, offener Bebauung, geschlossener Bebauung und Wasser mit einer Genauigkeit von 10 % spezifiziert) in jeder Modellmasche berücksichtigt.

Mit dem Modell REWIH3D wurden im Auftrag der Thüringer Landesanstalt für Umwelt die Regionalströmung über Thüringen bereits berechnet und die Ergebnisse hierzu veröffentlicht (Regionalkli-

masimulationen für das Gebiet des Freistaates Thüringen einschließlich der Einflussgebiete der umliegenden Bundesländer, Thüringer Landesanstalt für Umwelt, Jena, 1997.).

3.2. Das Kaltluft-Modell

Die Berechnung der lokalen Kaltluftströme erfolgt mit dem neu entwickelten Modell LORESI. Die physikalischen Grundgleichungen des Modells LORESI (*Lokalwind - Regionalwind - Simulationsmodell*) basiert auf den so genannten Flachwassergleichungen. Diese erhält man durch vertikale Integration der Modellgleichungen unter Hinzunahme der Bedingung einer konstanten Luftdichte. Die Modellgleichungen sind die Bewegungsgleichungen, die Kontinuitätsgleichung und der 1. Hauptsatz der Thermodynamik. Der konzeptionelle Aufbau des Modells und die schematische Illustration zu den Modellvariablen ist in der Abbildung 4 dargestellt.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - g \frac{\partial(h+H)}{\partial x} \frac{T'}{T_0} - c |u| u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - g \frac{\partial(h+H)}{\partial y} \frac{T'}{T_0} - c |v| v \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{\partial(hu)}{\partial x} - \frac{\partial(hv)}{\partial y} + Q \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - A \quad (4)$$

In den obigen Gleichungen bedeuten:

Variable	Bedeutung	Einheit
u	West-Ost-Komponente der Geschwindigkeit	m s^{-1}
v	Süd-Nord-Komponente der Geschwindigkeit	m s^{-1}
h	Vertikale Mächtigkeit des Kaltluftabflusses	m
H	Höhe der Orografie	m
T'	Temperaturdefizit der abfließenden Kaltluft	K
g	Erdbeschleunigung	$= 9,81 \text{ m s}^{-2}$
c	Reibungskoeffizient	m^{-1}
T_0	Referenztemperatur	$= 280 \text{ K}$
Q	Kaltluftproduktionsrate	m s^{-1}
A	Abkühlungsrate	K s^{-1}
t	Zeit	s
x	West-Ost-Koordinate	m
y	Süd-Nord-Koordinate	m

Die Kaltluftabflüsse werden auf der räumlichen Skala von topografischen Karten TK25 bei einer räumlichen Auflösung von 100 m berechnet. Mit dieser Auflösung wurden von der Thüringer Landesanstalt für Umwelt die Höhendaten und die Biotop- und Nutzungskartierungen (CIR-Interpretation - Grundlage TK 10) zur Verfügung gestellt. Bei der Klassifizierung wird zwischen den elf folgenden Typen unterschieden:

Nutzungs-Typ Nr.	Bezeichnung
1	I18-Biotop
2	Gewässer
3	Wald, Gehölze
4	Grünland
5	Freizeit / Erholung
6	Staudenflur, Moor, Heide
7	Gartenbau
8	Ackerland
9	Ver- und Entsorgung
10	Wohnbebauung
11	Industrie, Gewerbe, Verkehr

Diese werden zu den vier Hauptnutzungstypen Stadt, Wald, Wasser und Freiland zusammengefasst, für die Q , A und c vorgegeben werden. Die Spezifizierung dieser Größen erfolgt anhand von Simulationsergebnissen für ausgewählte Teilgebiete von Thüringen, die mit dem physikalisch umfangreicheren Modell FITNAH (z.B. Untersuchungen zur Luftreinhaltungsplanung, Teil Klima, Simulationen meteorologischer Felder für das Gebiet Nordhausen, Gera, Jena usw., Thüringer Landesanstalt für Umwelt, Jena, 1997-2000) erzielt wurden. Für die vier Hauptlandnutzungen werden die Zahlenwerte aus Tabelle 2 verwendet.

Landnutzung	Q in $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$	A_0 in K h^{-1}	c in m^{-1}
Freiland	10 ... 20	1,6	0,001
Wald	5 ... 40	0,8	0,01
Stadt	0	1,0	0,01
Wasser	0	0,0	0,0001

Tabelle 2 : Landnutzungsabhängige Kaltluftproduktionsraten Q , Abkühlungsraten A_0 und Reibungskoeffizienten c .

Für Freiland und für Wald werden Werte für den ebenen Fall spezifiziert (niedriger Wert), der in Abhängigkeit von der Steilheit des Geländes größer wird (höherer Wert). Für die Abkühlungsrate A wird der gut beobachtbare Wert in Bodennähe A_0 vorgegeben. Da die Abkühlung am Oberrand der Kaltluftschicht verschwindet, kann A für die gesamte Schicht als arithmetisches Mittel zwischen dem Bodenwert und dem Wert am Oberrand angenommen werden.

Die obigen nichtlinearen Gleichungen werden in Differenzgleichungen überführt und auf einem numerischen Gitter mit den Maschenweiten Δx und Δy (hier 100 m) gelöst. Als Ergebnis liefert LORESI die räumliche Verteilung und die zeitliche Entwicklung der über die abfließende Kaltluftschicht vertikal gemittelten meteorologischen Variablen Geschwindigkeit und Temperatur.

4. Die Vorgehensweise

Bei der Bestimmung der nächtlichen Windverhältnisse in Thüringen müssen zwei prinzipiell unterschiedliche Strömungsregimes betrachtet werden:

- die Kaltluftabflüsse,
- die Kaltluftabflüsse unter der Einwirkung des Regionalwindes.

Diese Zweiteilung ergibt sich aus der Wirksamkeit der beiden thermisch bedingten Windsysteme zu unterschiedlichen Zeiten (siehe Abbildung 3). Zu Beginn der Nacht zwischen Sonnenuntergang und etwa 22 Uhr, weht der Thüringer Regionalwind zwar noch zum Gebirge hin, wird dabei aber immer schwächer, bis er vollständig zum Erliegen kommt. Dies sind gleichzeitig die Stunden, in denen sich die nächtlichen Kaltluftabflüsse besonders gut ausbilden. So findet man die Situation vor, dass etwa von Sonnenuntergang bis 22 Uhr die lokalen Kaltluftabflüsse das bodennahe Windfeld dominieren.

Nach 22 Uhr schlägt der Thüringer Regionalwind auf das Nachtregime um und weht in der Folgezeit unter Zunahme der Geschwindigkeit bis nach Sonnenaufgang des Folgetages vom Gebirge weg. Für die nördlich des Thüringer Waldes gelegenen Landesteile bedeutet dies einen Regionalwind aus südlichen Richtungen. Im Bereich des Harzes entwickelt sich ein eigenes Regionalwindssystem, welches mit demjenigen des Thüringer Waldes im Thüringer Becken zusammentrifft. Während der gesamten Nachtstunden bilden sich nach wie vor die lokalen Kaltluftabflüsse aus, die sich aber nur in wenigen Geländeteilen von Thüringen gegen die mächtige Regionalströmung durchsetzen können. In der zweiten Nachthälfte dominiert somit der Thüringer Regionalwind zusammen mit den Kaltluftströmen das bodennahe Windfeld.

Die thermisch bedingten Lokalwinde und der Regionalwind bilden sich in idealer Weise bei einer verschwindenden großräumigen Strömung aus. Eine solche Wetterlage wurde bei den hier durchgeführten Untersuchungen zu Grunde gelegt. Bei einem überlagerten synoptischen Wind wird die Bedeutung von Lokal- und Regionalwind auf die Durchlüftungsverhältnisse eines Gebietes geringer sein. Die hier gezeigten Resultate repräsentieren somit die maximalen Effekte, die durch Lokalwind und Regionalwind hervorgerufen werden können.

Auf Grund der Zweiteilung der nächtlichen Windverhältnisse in Thüringen bei autochthonen Wetterlagen werden die für beide Zeiten charakteristischen Luftströmungen mit den oben beschriebenen Modellen bestimmt und dargestellt.

Die Rechnungen für die Kaltluftabflüsse werden nach Sonnenuntergang gestartet und bis 22 Uhr durchgeführt. In dieser Zeit haben sich die Kaltluftabflüsse in idealer Weise ausgebildet. Mit diesen Kaltluftströmen werden Luftmassen verfrachtet, die zu einer Durchlüftung der Geländeteile führen und somit beispielsweise die lufthygienische Situation verbessern kann. Um die Wirksamkeit und die Bedeutung der lokalen Kaltluftabflüsse auch gegenüber dem Thüringer Regionalwind bestimmen zu können, wird als Maßzahl die Kaltluftvolumenstromdichte *KVD* eingeführt.

„Unter der Kaltluftvolumenstromdichte wird diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 verstanden, die in jeder Sekunde durch einen 1 m breiten Streifen zwischen der Erdoberfläche und einer oberen Grenze (hier die Mächtigkeit der Kaltluftschicht) fließt. Die Einheit ist $m^3 s^{-1} m^{-1}$.“

Soll die Gesamtmenge an abfließender Kaltluft durch einen beliebigen Querschnitt bestimmt werden (z.B. an einem Talausgang oder an einem Hangfuß), so muss die Kaltluftvolumenstromdichte über die Länge des Querschnittes aufsummiert werden. Beispiele hierfür werden später gegeben.

Auch durch den Thüringer Regionalwind wird insbesondere in der zweiten Nachthälfte durch einen fest vorgegeben Querschnitt nächtlich gebildete kalte Luft verfrachtet. Durch Vergleich der durch beide Windsysteme bedingten Kaltluftvolumenstromdichten kann die Wirksamkeit der lokalen Kalt-

luftabflüsse gegenüber dem überlagerten Regionalwind bestimmt werden. Da der Thüringer Regionalwind eine ausgeprägte tageszeitliche Variation aufweist, wird für diesen Vergleich ein Mittel der Windverhältnisse für die zweite Nachthälfte gebildet und die Kaltluftvolumenstromdichte für eine Schicht von 50 m Mächtigkeit berechnet.

Als Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen und Auswertungen werden flächendeckend für ganz Thüringen in einem 100 m Raster dargestellt:

- Betrag in m s^{-1} und Richtung in Grad der lokalen nächtlichen Kaltluftabflüsse,
- die durch die Kaltluftabflüsse bedingte Kaltluftvolumenstromdichte in $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$,
- das Verhältnis V der Kaltluftvolumenstromdichten KVD .

$$V = \frac{KVD_{\text{Thüringer Regionalwind}}}{KVD_{\text{lokale Kaltluftabflüsse}}} \quad (5)$$

Auf Grund des Betrages von V kann die Bedeutung der lokalen Kaltluftabflüsse gegenüber der Wirksamkeit des Thüringer Regionalwindes abgeschätzt werden.

V	lokale Kaltluftströme	Regionalwind
0 ... 1	dominierend	unbedeutend
1 ... 2	bedeutend	geringe Bedeutung
2 ... 6	geringe Bedeutung	bedeutend
größer 6	unbedeutend	dominierend

Zur Bewertung der Relevanz der Kaltluftvolumenstromdichte können die folgenden Arbeiten herangezogen werden:

- **Arbeit Nr. 1**
Kreß, R., H. Mai, W. Reuter, D. Roth, V. Schulz, G. Werner, 1979: Regionale Luftaustauschprozesse und ihre Bedeutung für die räumliche Planung. Schriftenreihe Raumordnung des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Nr. 06.032.
- **Arbeit Nr. 2**
VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1, 1997: Umweltmeteorologie, Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. VDI Düsseldorf.

In beiden Arbeiten wird für den Kaltluftvolumenstrom der Begriff *Massenstrom* verwendet.

In der Arbeit Nr.1 wird folgende Definition für einen klimaökologisch relevanten Hangabwind bzw. Kaltluftabfluss gegeben (S. 39):

„Unter Hangabwinden bzw. Kaltluftabflüssen versteht man den klein- bis mittlräumigen nächtlichen Kaltluftabfluss von Hängen bzw. aus kleineren Tälern. Von klimaökologischer Relevanz sind Hangabwinde dann, wenn der erzeugte Massenstrom mindestens $10.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ beträgt.“

Die VDI-Richtlinie 3787 greift diesen Wert von $10.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ auf und definiert die Stärke der Kaltluftabflüsse als

- **stark** bei einem Massenstrom von $10.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ und mehr,
- **mittel** bei einem Massenstrom zwischen 1.000 und $10.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$,
- **schwach** bei einem Massenstrom von weniger als $1.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Die räumliche Zuordnung der sich ausbildenden Kaltluftabflüsse erfolgt zu den entsprechenden Kaltluft-einzugsgebieten.

In der Arbeit Nr.2 wird folgende Definition für das Kaltluft-einzugsgebiet gegeben (S. 38):

„Das Kaltluft-einzugsgebiet wird von Flächen gespeist, über denen auf Grund der nächtlichen Energiebilanz eine stärkere Abkühlung der Luft erzielt wird (Kaltluftentstehungsgebiete). Der Kaltluftabfluss lässt die Kaltluftmassen aus dem zugehörigen Kaltluft-einzugsgebiet heraus wirksam werden.“

Basierend auf Beobachtungen sind in der Arbeit Nr.1 die Kaltluftvolumenströme (Massenströme) aus verschiedenen Tälern tabellarisch zusammengestellt. Die Hauptergebnisse sind in der Tabelle 3 zusammengefasst:

Tal	Höhe der Strömung in m	Kaltluft-einzugsgebiet (Talgröße in km)	Massenstrom M in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	Luftaustauschrate LA in h^{-1}
Dreisamtal	500	65,4 (266)	$1,65 \times 10^6$	0,18 (0,04)
Dischmatal	800	35	$2,25 \times 10^6$	0,29
Carbon-River Fallen	1000	55	$3,10 \times 10^6$	0,20
Melbtal	20	0,7 (3,4)	$2,50 \times 10^3$	0,64 (0,13)
Taunus LO	50	6,7	$12,5 \times 10^3$	0,13
Taunus HO	50	7,8	18×10^3	0,17
Taunus NH	50	0,9	20×10^3	1,60
Taunus KR	50	3,6	5×10^3	0,10
Taunus ND	5ß	7,1	10×10^3	0,10
Taunus KÖ	50	0,8	$3,25 \times 10^3$	0,29
Taunus AH	50	2,1	$8,75 \times 10^3$	0,30
Hangabwind	50	3,0	1×10^4	0,24
Bergwind	(500)	23,0	1×10^6	0,31

Tabelle 3: Kaltluftspezifische Kenngrößen für verschiedene Täler (aus Arbeit Nr. 1).

Aus den in der Arbeit Nr.1 aufgelisteten Kennzahlen kann die Luftaustauschrate LA für ein Kaltluft-einzugsgebiet abgeschätzt werden. Sie gibt an, wie häufig das gesamte Luftvolumen des Einzugsgebietes erneuert wird. Diese Größe ist ebenfalls in Tabelle 3 aufgenommen. Bis auf wenige Ausnahmen variiert LA für alle betrachteten Täler zwischen 0,1 und 0,3 h^{-1} . Als Mittel ergibt sich bei Vernachlässigung des kleinsten und des größten Wertes etwa $A = 0,2 \text{ h}^{-1}$. Auch für die in der Arbeit Nr.1 geforderten *Mindestmassenströme* und *Mindesteinzugsgebiete* für die Kaltluftproduktion für Hangabwinde und Bergwinde berechnen sich Werte für A von 0,2 ... 0,3 h^{-1} . Das bedeutet, dass klimaökologisch relevante nächtliche thermische Windsysteme in der Lage sein müssen, die Luft in einem Kaltluft-einzugsgebiet alle 3 bis 5 Stunden vollständig auszutauschen.

Anhand der Auswertung der räumlichen Verteilung der Kaltluftvolumenstromdichte (Massenstrom) kann die Beurteilung der Relevanz der Hangwinde und der Bergwinde erfolgen. Diese Abschätzung gilt nur für das Gesamt-Kaltluft-einzugsgebiet.

Für eine lokale Differenzierung kann die Stärke der Kaltluftabflüsse selbst herangezogen werden. Ein klimaökologisch relevanter Kaltluftabfluss ist mit einem Mindestvolumenstrom von $10.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ verbunden, was bei einer durchströmten Fläche von 200 m Breite und 50 m Höhe einer mittleren Windgeschwindigkeit von 1 m s^{-1} entspricht (Zahlenbeispiel aus Arbeit Nr.1). Berücksichtigt man zusätzlich die Unterscheidung der Stärke der Kaltluftabflüsse aus der VDI-Richtlinie 3787, so ergeben sich folgende Abschätzungen für die Windgeschwindigkeiten.

Kaltluftabfluss	Volumenstrom	mittlere Windgeschwindigkeit
stark	mehr als 10.000 m ³ s ⁻¹	größer 2 m s ⁻¹
mittel	1.000 ... 10.000 m ³ s ⁻¹	0,5 ... 2 m s ⁻¹
stark	weniger als 10.000 m ³ s ⁻¹	kleiner 0,5 m s ⁻¹

5. Beispielhafte Ergebnisse

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen und der anderen Auswertungen liegen kartenweise entsprechend dem Blattschnitt der topographischen Karten TK25 blattweise für ganz Thüringen vor. Beispielhaft werden die Darstellungen für das **Blatt 5135 (Jena Süd)** gezeigt.

In der Abbildung 5 ist die Geländehöhe und die Steilheit der Orografie gezeigt. Die Landschaft mit ihren Höhen und Tälern ist orografisch stark strukturiert mit sehr steilen Hängen. Die Neigung im Leutratal und den Abhängen zum Saaletal beträgt teilweise mehr als 1:5.

Die starke Struktur und die Steilheit des Geländes bedingen in den Nachtstunden relativ kräftige Kaltluftabflüsse. Insbesondere in und am Ausgang des Leutratales werden Windgeschwindigkeiten der thermisch bedingten Strömungssysteme von mehr als 2,5 m s⁻¹ erreicht (Abbildung 6). Im Südwestsektor des Blattes 5235 sind die Kaltluftabflüsse generell kräftiger als in dem stärker bewaldeten Südostsektor.

Die Strömungslinien (Abbildung 7) sind eine alternative Darstellung für das berechnete Windfeld. Anhand dieser Präsentation kann insbesondere das Zusammenfließen der Kaltluftabflüsse von den Hängen in die tiefergelegenen Talbereiche und das Ausfließen aus den Seitentälern in das Saaletal erkannt werden.

Die räumliche Darstellung der Kaltluftvolumenstromdichte in einem 100 m Raster (Abbildung 8) zeigt in den Seitentälern und an den steilen Hängen hohe Beträge, während in weiten Teilen des Saaletales und auf den höhergelegenen Geländeteilen niedrigere Werte berechnet werden. Diese Kenngröße wird insbesondere zur Beurteilung der Relevanz der Hangwinde herangezogen.

Durch Vergleich der Volumenstromdichten für die Hangwinde und die Kaltluftabflüsse auf der einen Seite und für den Thüringer Regionalwind auf der anderen Seite kann die Bedeutung und die Wichtigkeit der lokalen Windsysteme gegenüber dem überlagerten Regionalwind abgeschätzt werden. Für diesen Vergleich wird entsprechend einem Vorschlag in Arbeit Nr.1 der Volumenstrom in einer 50 m Luftsäule berechnet. „Eine Höhe von 50 m ist erforderlich, um bebauten Gebiet zu überströmen und in dies eindringen zu können“ (aus Arbeit Nr.1, S. 39). Die Ergebnisse dieses Vergleichs werden in der Abbildung 9 gezeigt. Bei Werten kleiner 1 dominieren die lokalen Windsysteme gegenüber dem Regionalwind. Dies ist insbesondere im und am Ausgang des Leutratales, sowie lokal an den steilen Abhängen zum Saaletal hin gegeben. Im Saaletal selbst und auf den höher gelegenen Geländeteilen ist die Bedeutung der lokalen Kaltluftabflüsse sehr gering, da in diesen Gebieten der kräftige Regionalwind dominiert. In weiten Teilen der hier betrachteten TK25 berechnet sich ein Verhältnis von 2 ... 6, was die große Bedeutung der Thüringer Regionalströmung unterstreicht.

Die vorliegenden Darstellungen und Zahlenwerte können hinsichtlich verschiedenster Fragestellungen in ganz unterschiedlichen Raumeinheiten ausgewertet werden. Nachfolgend sind einige Beispiele gegeben.

Gibt es lokal bedeutsame Kaltluftströme ?

Anhand der Darstellungen und der Zahlenwerte kann die lokale Stärke der Kaltluftabflüsse ermittelt werden. Es ist eine Unterscheidung in stark, mittel und schwach möglich.

Gibt es klimaökologisch relevante Hangabwinde bzw. Kaltluftabflüsse ?

Zur Beurteilung dieser Frage müssen mehrere Schritte hintereinander abgearbeitet werden:

- Abgrenzung des Kaltlufteinzugsgebietes, Berechnung der Fläche;
- Aufsummieren der Kaltluftvolumenstromdichte entlang des Abflussquerschnittes;
- Vergleich des berechneten abfließenden Kaltluftvolumens mit den Werten aus Arbeit Nr.1 und Nr.2.

Eine diesbezügliche Auswertung ist exemplarisch für zwei Gebiete vorgenommen worden (Abbildung 10).

- Fläche 1, Leutratal ($9,6 \text{ km}^2$)
- Fläche 2, Hang, Lobeda-Ost ($3,1 \text{ km}^2$).

Die Bestimmung des gesamten Kaltluftvolumenstroms KV , beispielsweise aus dem Leutratal heraus, geschieht über die Aufsummierung der Volumenstromdichten am Talausgang. Führt man dies bei $RW = 4470900 \text{ m}$ und $HW = 5636600 \dots 5637700 \text{ m}$ durch, so erhält man einen Wert für KV von $39.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Dieses ausfließende Luftvolumen führt im Leutratal zu einem Luftaustausch. Die Luftwechselrate LV kann bestimmt werden, indem der Kaltluftvolumenstrom durch das Kaltluftvolumen im Leutratal (Gesamtfläche $\times 50 \text{ m}$ Mächtigkeit) dividiert wird. Durch Multiplikation mit 3.600 s h^{-1} erhält man die Luftwechselrate LV pro Stunde. Die mittlere Windgeschwindigkeit U am Ausgang des Leutralats erhält man durch Aufsummieren der Einzelgeschwindigkeiten am Talausgang, dividiert durch die Anzahl der aufsummierten Werte.

Bestimmt man den Kaltluftvolumenstrom KV , die Luftwechselrate LA und die mittlere Windgeschwindigkeit U , so erhält man für die ausgewählten Gebiete die in der Tabelle 4 zusammengestellten Werte.

Fläche	KV in $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	LA in h^{-1}	U in m s^{-1}
1	39.900	0,29	1,8
2	42.300	0,98	1,3

Tabelle 4: Kennzahlen für die Kaltluftströme für verschiedene Gebiete im Raum Jena.

Die Kaltluftvolumenströme auf beiden Flächen erfüllen die Kriterien eines klimaökologisch relevanten Strömungssystems. Mit dem physikalisch umfangreicheren Modell FITNAH wurden bereits früher die Windverhältnisse im Raum Jena berechnet (Untersuchungen zum Luftreinhalteplan, Teil Klima, Simulation meteorologischer Felder für das Gebiet Jena und Umland, Thüringer Landesanstalt für Umwelt, Jena, 1998). Der dabei berechnete Kaltluftvolumenstrom aus dem Leutratal von etwa $50.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ stimmt recht gut mit dem hier gefundenen Wert überein.

Der Kaltluftvolumenstrom alleine ist allerdings keine ausreichende Kenngröße für Luftaustausch und Klimarelevanz (siehe auch: Kaltluft und Windfeld-Berechnung für Stuttgart, Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, 1996). Für eine umfassende Beurteilung muss vielmehr auch die Größe des durchlüfteten Gebietes mit berücksichtigt werden. Dies soll ein einfaches Zahlenbeispiel belegen.

Bei einer Hanglänge von 1000 m soll eine 50 m mächtige Schicht Kaltluft abfließen. Bei einer Hangbreite von 10.000 m und einer Kaltluftvolumenstromdichte von $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ein Gesamtvolumenstrom von $10.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Der gleichen Wert wird auch bei einer Hangbreite von 100 m und einer Kaltluftvolumenstromdichte von $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ erreicht. In beiden Fällen handelt es sich per Definition um einen klimarelevanten Kaltluftabfluss.

Bei dem 10.000 m breiten Hang stellt sich im gewählten Zahlenbeispiel eine mittlere Geschwindigkeit des Kaltluftabflusses von $0,02 \text{ m s}^{-1}$ ein, während die Windgeschwindigkeit bei dem 100 m breiten Hang $2,0 \text{ m s}^{-1}$ erreicht. Sicherlich darf im erstgenannten Fall nicht von einem relevanten Kaltluftabfluss gesprochen werden. Zieht man noch die Größe des durchlüfteten Gebietes in Betracht, so ergibt sich eine Luftaustauschrate von $0,07 \text{ h}^{-1}$ für den 10.000 m breiten Hang bzw. von $7,2 \text{ h}^{-1}$ für den kürzeren Hang. Neben dem Kaltluftvolumenstrom und der Windgeschwindigkeit kann die Luftaustauschrate als dritte Größe zur Beurteilung der Klimarelevanz von Kaltluftabflüssen herangezogen werden.

Als Beurteilungs-Kennzahlen können festgelegt werden:

- Kaltluftvolumenstrom: $10.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$,
- Windgeschwindigkeit der Kaltluftabflüsse: größer $0,5 \text{ m s}^{-1}$,
- Luftaustauschrate: größer $0,1 \text{ h}^{-1}$.

Wenn die für ein ausgewähltes Gebiet berechneten Zahlenwerte für den Kaltluftvolumenstrom, für die Windgeschwindigkeit und für die Luftaustauschrate diesen Anforderungen sehr nahe kommen oder diese erfüllen, kann von einem klimarelevanten Kaltluftabfluss gesprochen werden.

Sind die lokalen Kaltluftströme in der zweiten Nachthälfte von Bedeutung ?

Besonders in der zweiten Nachthälfte bestimmt der Thüringer Regionalwind die Strömungsverhältnisse in vielen Landesteilen. Anhand der Darstellungen zu dem Verhältnis der Volumenströme kann abgelesen werden, für welche Gebiete die lokalen Kaltluftabflüsse überhaupt eine Bedeutung hinsichtlich der Durchlüftungsverhältnisse haben.

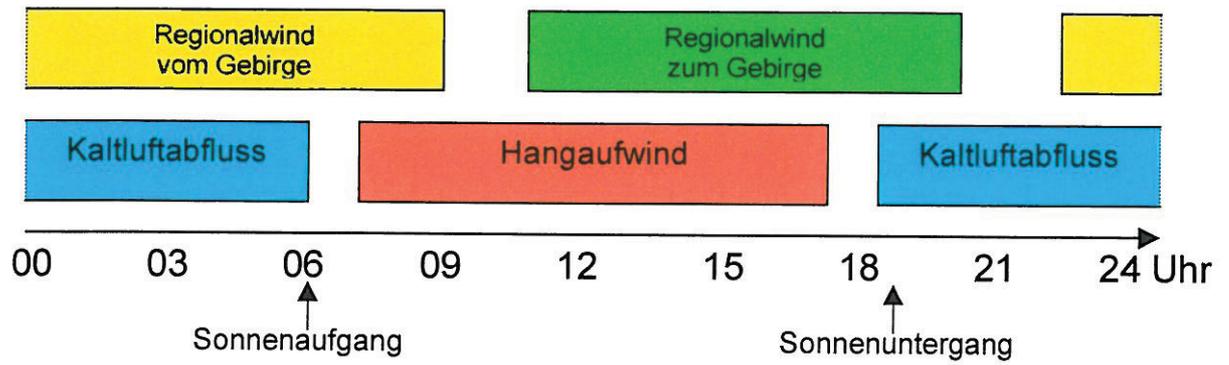


Abbildung 3: Schematische Darstellung zum Einsetzen und zur Andauer von Lokalwind (Kaltluftabfluss und Hangaufwind) und Regionalwind.

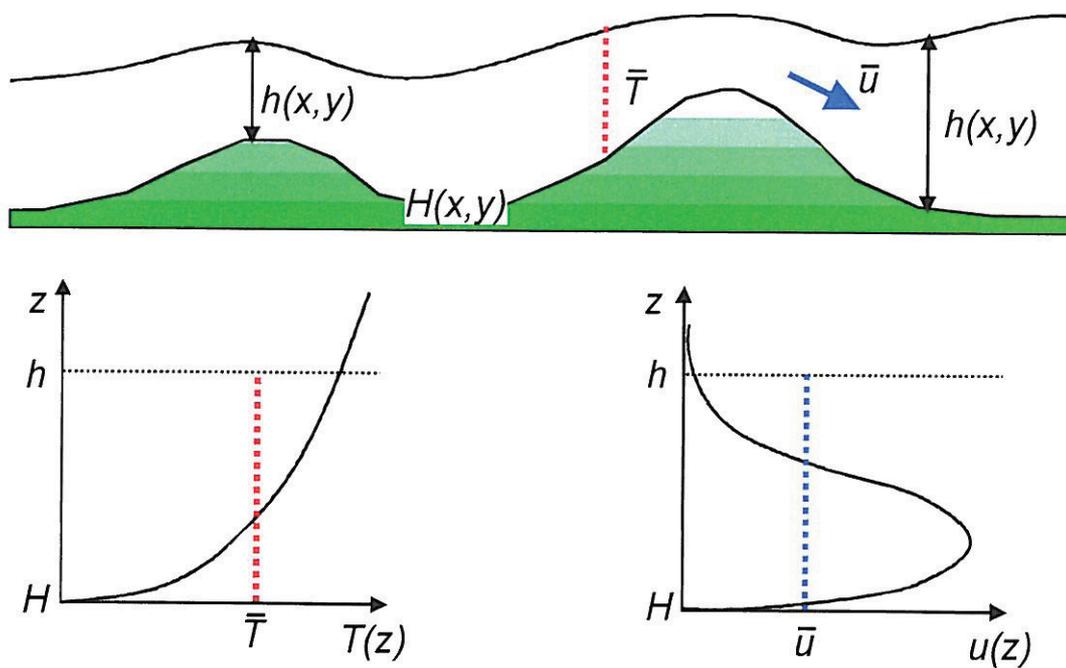


Abbildung 4: Konzeptioneller Aufbau des Modells LORESI.

Blatt 5135 - Jena S

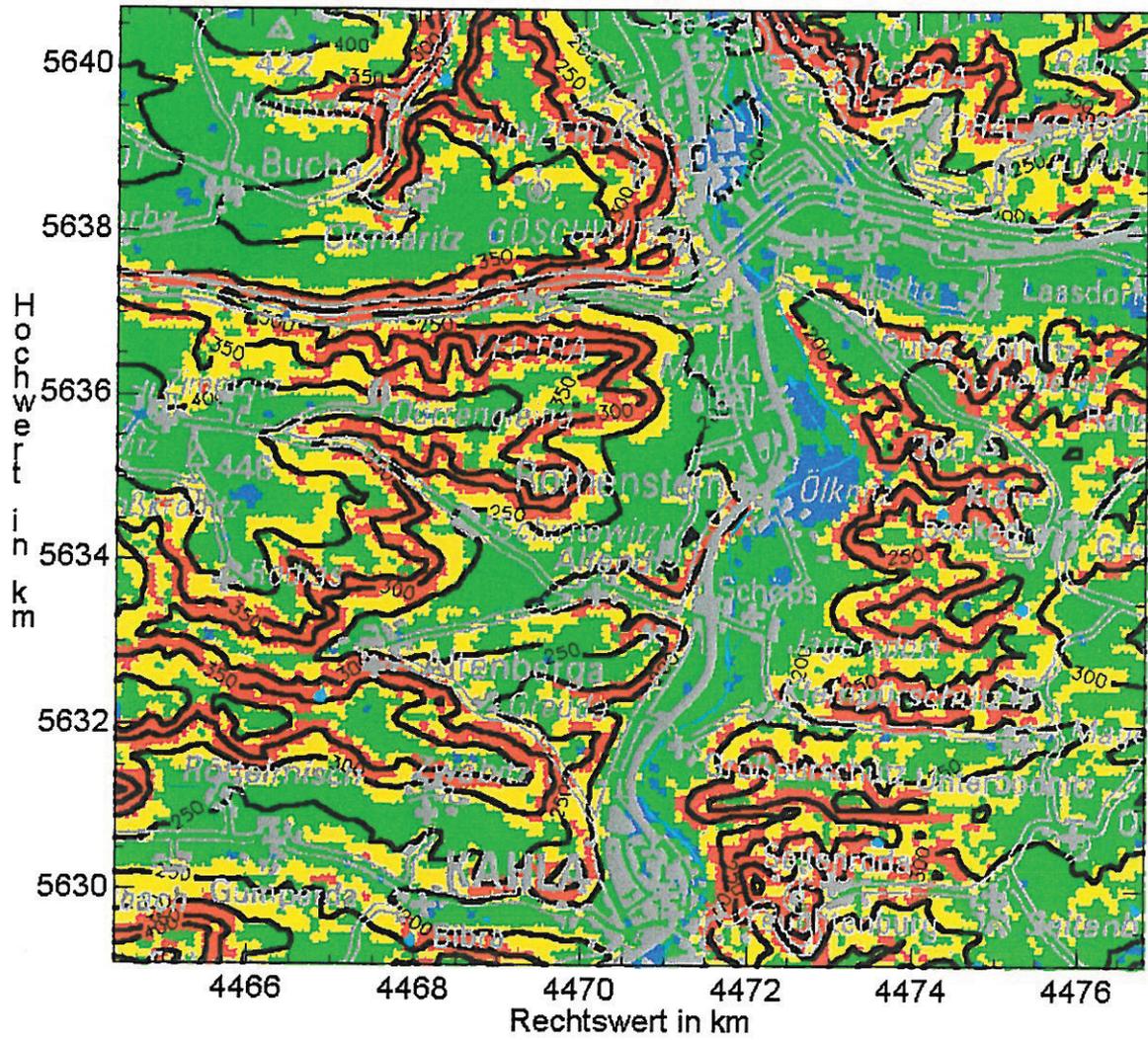


Abbildung 5: Geländehöhe und Geländeneigung (TK25, Blatt 5135 Jena Süd).

Blatt 5135 - Jena S

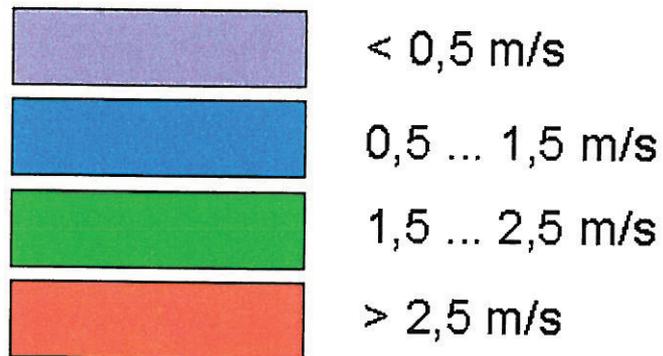
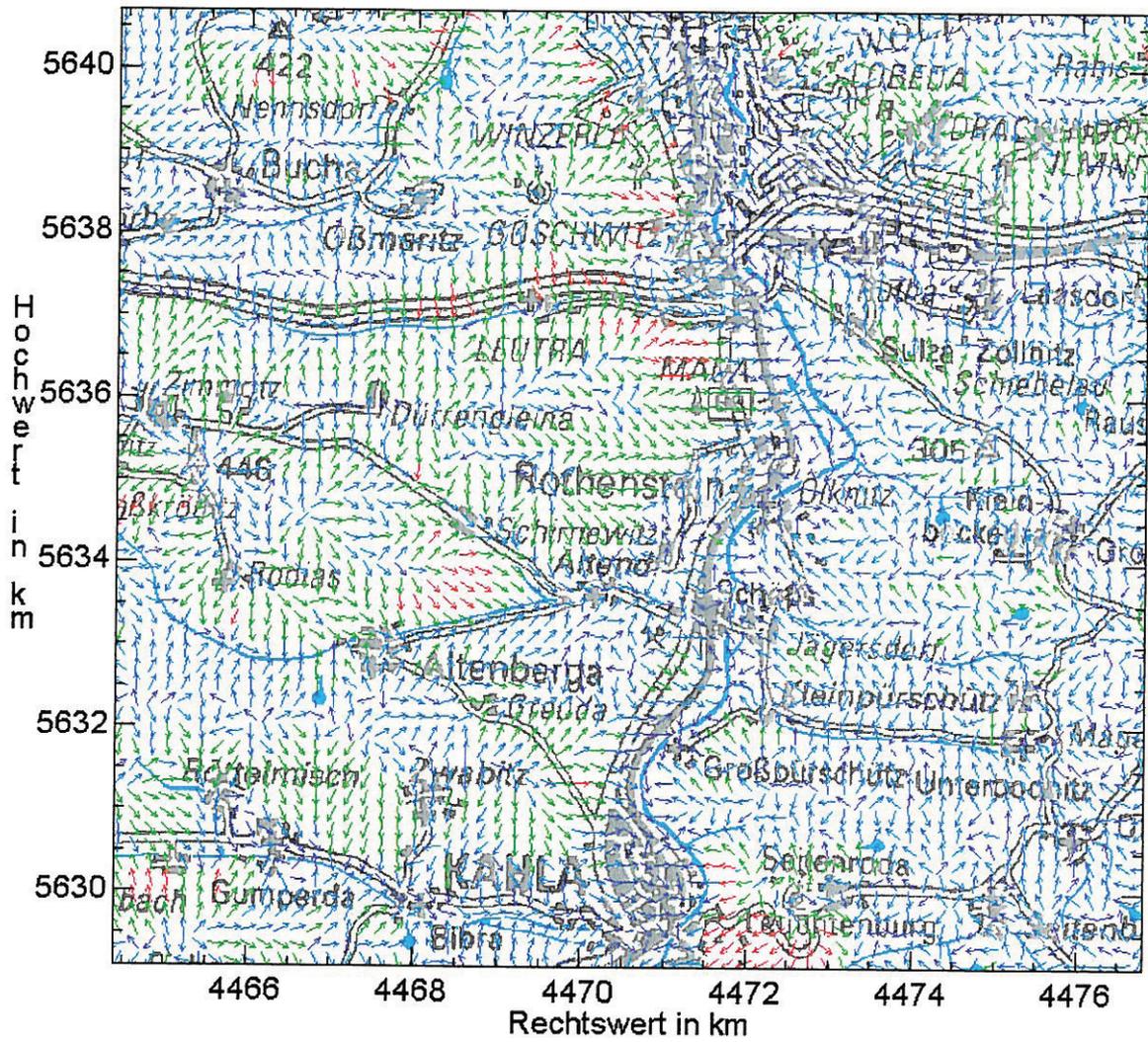


Abbildung 6: Pfeildarstellung der lokalen Kaltluftströme (TK25, Blatt 5135 Jena Süd).

Blatt 5135 - Jena S

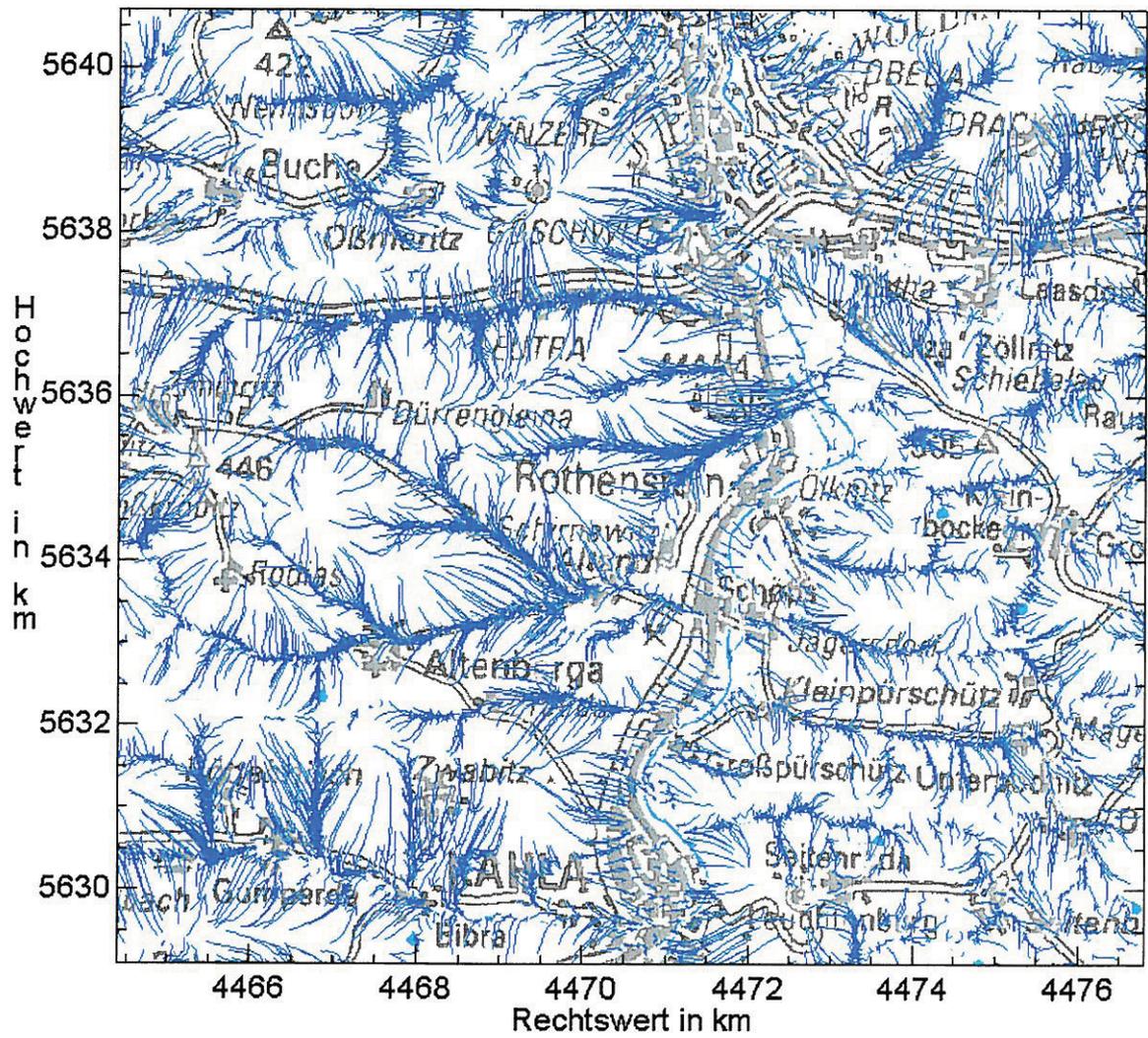


Abbildung 7: Darstellung der lokalen Kaltluftströme mittels Strömungslinien (TK25, Blatt 5135 Jena Süd).

Blatt 5135 - Jena S

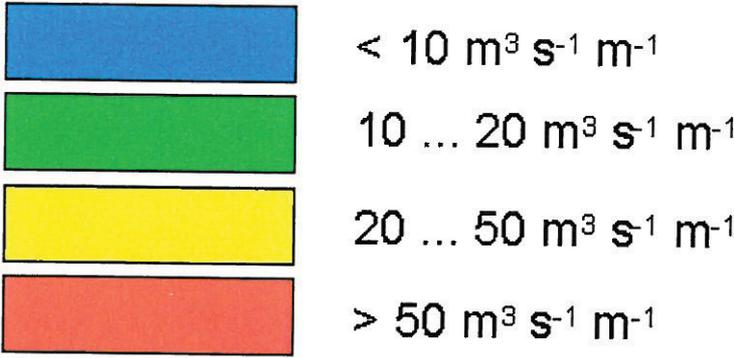
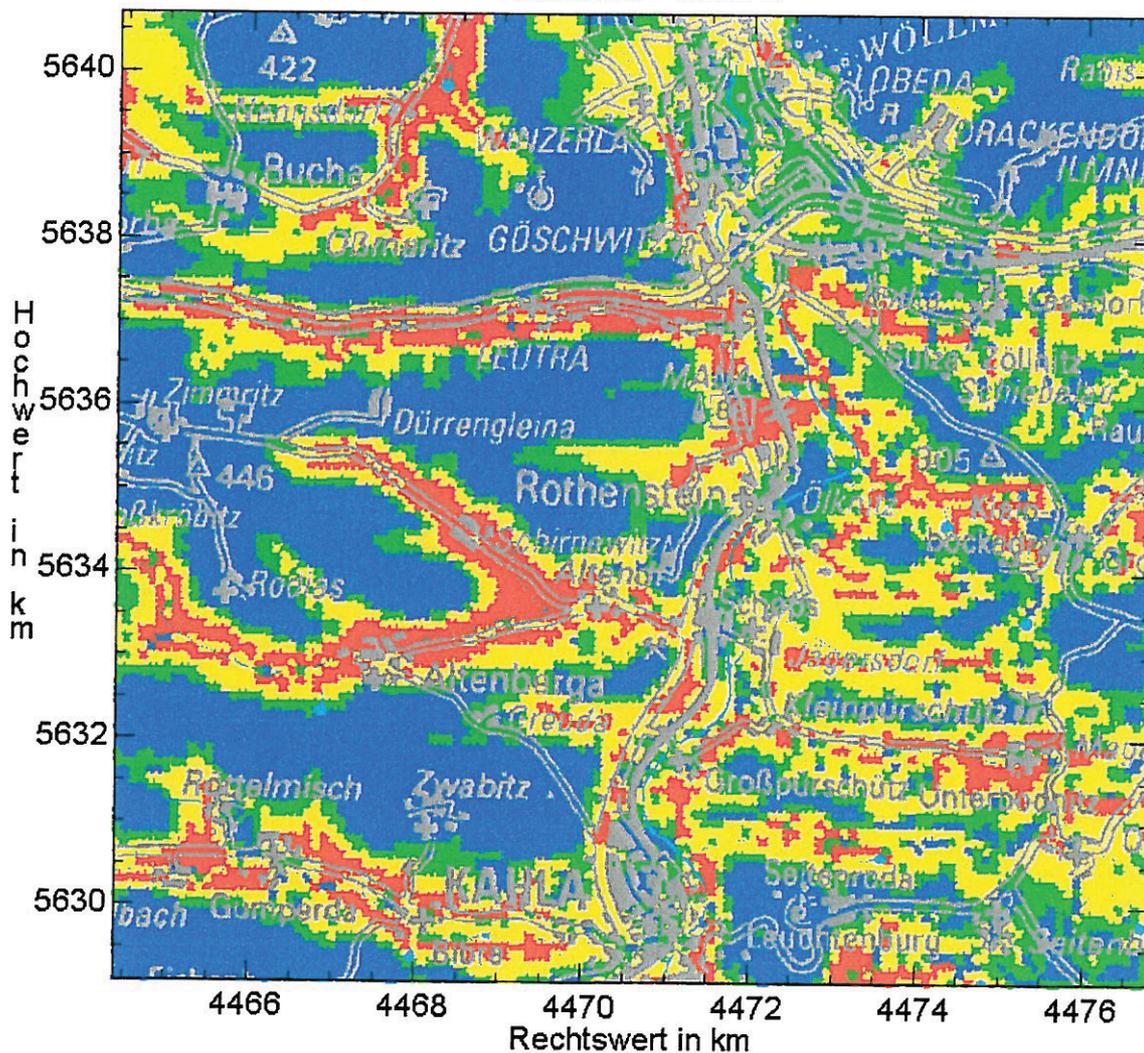


Abbildung 8: Räumliche Verteilung der Volumenstromdichte (TK25, Blatt 5135 Jena Süd).

Blatt 5135 - Jena S

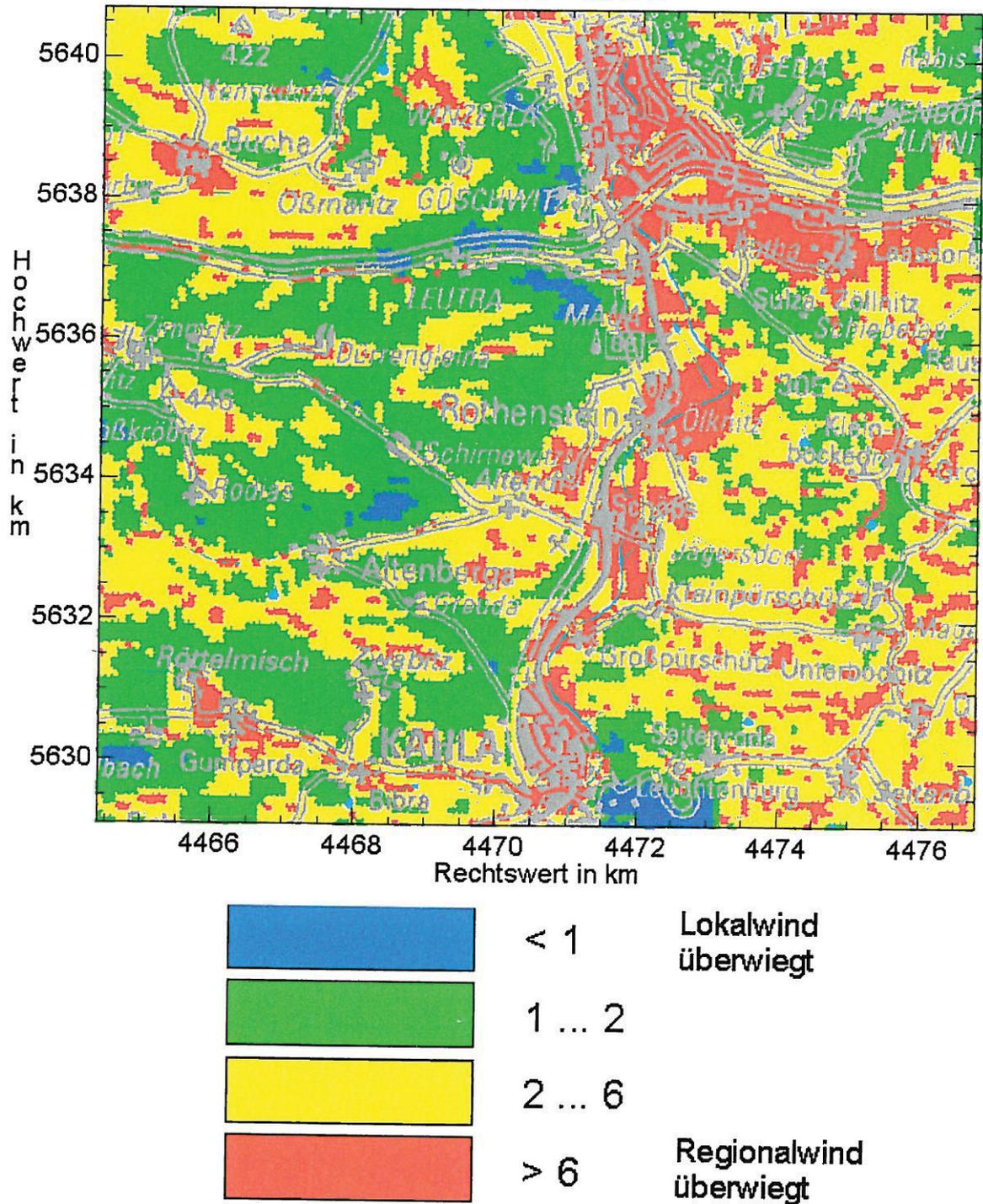


Abbildung 9: Räumliche Verteilung des Verhältnisses der Volumenstromdichte von Thüringer Regionalströmung zum lokalen Kaltluftabfluss (TK25, Blatt 5135 Jena Süd).

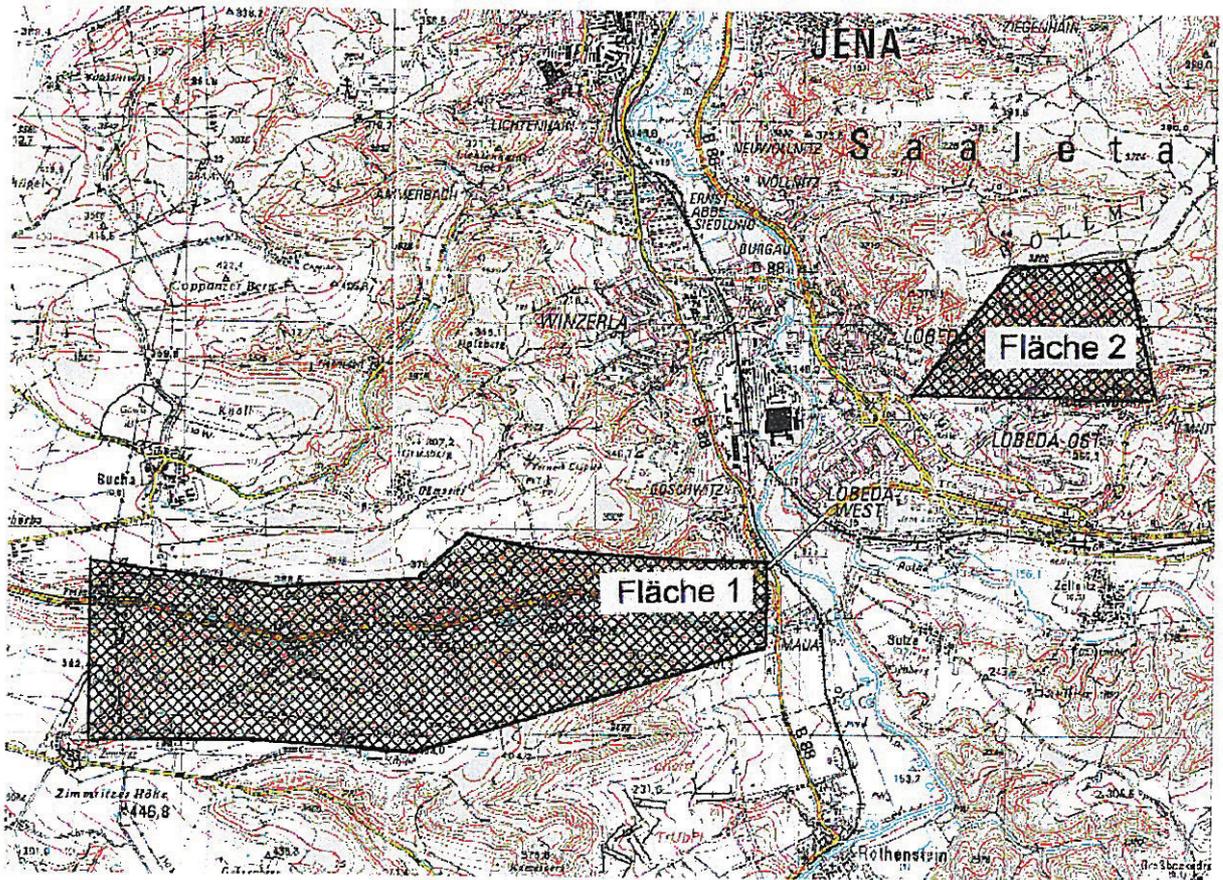


Abbildung 10: Lage der ausgesuchten Flächen im Raum Jena (siehe Text)