

**Ingenieurbüro Lohmeyer
GmbH & Co. KG**

**Immissionsschutz, Klima,
Aerodynamik, Umweltsoftware**

Mohrenstraße 14, D-01445 Radebeul

Telefon: +49 (0) 351 / 8 39 14 - 0

E-Mail: info.dd@lohmeyer.de

URL: www.lohmeyer.de

**FACHINFORMATIONSSYSTEM
METEOKART GIS,
MODUL KALTLUFT FÜR
TEILGEBIET „OSTERZGEBIRGE“**

- FACHBERICHT -

Auftraggeber: Sächsisches Landesamt
für Umwelt und Geologie
Zur Wetterwarte 11
01109 Dresden

Dipl.-Met. A. Moldenhauer
Dipl.-Ing. H. Lorentz

Dr.-Ing. T. Flassak

November 2004
Projekt 70062-03-10
Berichtsumfang 31 Seiten

INHALTSVERZEICHNIS

1	VERANLASSUNG UND UNTERSUCHUNGSRAHMEN.....	3
2	EINGANGSDATEN	4
2.1	Lage des Untersuchungsgebietes	4
2.2	Eingangsdaten Kaltluftrechnung.....	5
3	KALTLUFTBILDUNG UND AUSWIRKUNGEN	8
3.1	Allgemeines.....	8
3.2	Ursachen für Kaltluftbildung und -abfluss	9
3.3	Kaltluftentstehung über verschiedenen Oberflächen	10
3.4	Einfluss von Flächennutzungsänderungen auf Kaltluft.....	13
3.5	Einfluss von künstlichen Hindernissen und Bewuchs	14
3.6	Bestimmung von Kaltluftströmungen.....	15
4	KALTLUFTSIMULATIONEN.....	18
4.1	Qualitätssicherung.....	18
4.1.1	Vergleich mit Messdaten Dresden-Rochwitz	18
4.1.2	Vergleich mit Kaltluftrechnungen in Chemnitz	21
4.1.3	Fazit.....	23
4.2	Ergebnis Kaltluftrechnung	23
5	AUSBLICK	25
6	LITERATUR	26
	ANHANG A1: BESCHREIBUNG DES KALTLUFTABFLUSSMODELLS KALM.....	28
	ANHANG A2: ERGEBNIS KALTLUFTRECHNUNG AUS LOHMEYER (2000)	
	(KARTE: „KALTLUFTSITUATION NACH 3 STUNDEN“).....	30

Hinweise:

Die Tabellen und Abbildungen sind kapitelweise durchnummeriert.

Literaturstellen sind im Text durch Name und Jahreszahl zitiert. Im Kapitel Literatur findet sich dann die genaue Angabe der Literaturstelle.

Es werden Dezimalpunkte (= wissenschaftliche Darstellung) verwendet, keine Dezimalkommas. Eine Abtrennung von Tausendern erfolgt durch Leerzeichen.

ERLÄUTERUNG VON FACHAUSDRÜCKEN

Temperaturgradient und Inversionen

Die Lufttemperatur nimmt im zeitlichen Mittel mit zunehmender Höhe ab. Im Jahresmittel beträgt diese höhenbedingte Temperaturabnahme durchschnittlich 0.65 K pro 100 m Höhenstufe. Im Sommer und Frühjahr erhöht sich der Betrag der Temperaturabnahme, während er sich im Herbst und im Winter erniedrigt. Unter besonderen meteorologischen Bedingungen kann aber auch eine Temperaturzunahme mit zunehmender Höhenlage beobachtet werden. Hierbei spricht man von Inversionswetterlagen.

Luftschichtungszustände

Wird ein Luftpaket aus seiner Ruhelage heraus vertikal verschoben, so ändert sich dessen Temperatur. Ist nun der Temperaturverlauf der ruhend gedachten Umgebung so beschaffen, dass das Luftquantum durch positive oder negative Auftriebskräfte wieder in seine Ausgangsposition zurückgetrieben wird, so nennen wir die Temperaturschichtung **stabil**. Genügt umgekehrt eine kleine Verschiebung aus der Ruhelage zur endgültigen Entfernung des Luftpaketes, so liegt entsprechend eine **labile** Schichtung vor. Zwischen beiden Möglichkeiten liegt die thermisch **neutrale** Schichtung, bei der das vertikal verschobenen Luftpaket in jeder Position in einem indifferenten Gleichgewicht ist, d. h. keine Auftriebskräfte auftreten.

Dieses Stabilitätsverhalten übt einen grundlegenden Einfluss auf den vertikalen Austausch von Luftbeimengungen - und damit auch auf die Luftqualität - aus. Eine stabile Schichtung wird im Vergleich zum neutralen Fall diesen Austausch behindern, im Extrem unterbinden, sodass bei Vorhandensein von bodennahen Schadstoffquellen, wie z. B. eine Bundesstraße, hohe Schadstoffkonzentrationen auftreten können; thermische Labilität wird dagegen zu einer mehr oder minder starken Durchmischung eines Luftkörpers und damit zu einer Intensivierung des Vertikalaustausches mit daraus resultierenden niedrigeren Schadstoffkonzentrationen im Nahbereich einer Straße führen.

Kaltluftstaugebiete und Kaltluftsammlbereiche

Geländemulden, Senken und Täler wirken als nächtliche Kaltluftsammlgebiete. Die dort in windschwachen wolkenarmen Strahlungs Nächten von den Kaltlufteinzugsgebieten der Hänge und Höhen zusammenfließende Kaltluft lässt niedrigere nächtliche Temperaturminima entstehen, die am Tage - insbesondere im Sommer - durch die täkertypischen Übergangstemperaturen im statistischen Mittel wieder ausgeglichen werden. Extrem niedrige nächtliche Temperaturminima ergeben sich, wenn eingeflossene Kaltluft an Strömungshin-

demnächst zu einem stagnierenden Kaltluftsee aufgestaut wird. Es sind dies auch jene spät- und frühfrostgefährdenden Bereiche, in welchen frostempfindliche Sonderkulturen häufiger als im Umland geschädigt werden können.

Emission / Immission

Als Emission bezeichnet man die von einem Fahrzeug oder anderen Emittenten ausgestoßene Luftschadstoffmenge in Gramm Schadstoff pro Stunde. Die in die Atmosphäre emittierten Schadstoffe werden vom Wind verfrachtet und führen im umgebenden Gelände zu Luftschadstoffkonzentrationen, den so genannten Immissionen. Diese Immissionen stellen Luftverunreinigungen dar, die sich auf Menschen, Tiere, Pflanzen und andere Schutzgüter überwiegend nachteilig auswirken. Die Maßeinheit der Immissionen am Untersuchungspunkt ist μg (oder mg) Schadstoff pro m^3 Luft.

1 VERANLASSUNG UND UNTERSUCHUNGSRAHMEN

Für die Arbeit der Immissionsschutzbehörden in Sachsen sowie zur späteren Übernahme ins IMMIKART sollen die sich bei autochthonen Wetterlagen einstellenden Kaltluftsysteme zunächst im Osterzgebirge mit dem Kaltluftmodell KALM flächendeckend berechnet werden. Die berechneten Kaltluftdaten (Strömungsfelder und Schichtdicken) sollen unter dem geografischen Informationssystem ArcGIS tabellarisch und grafisch dargestellt werden können. Das zu erarbeitende Programmsystem soll helfen, die oft komplizierte Immissionssituation im Rahmen von Genehmigungsplanungen genauer zu beurteilen. Das Osterzgebirge ist als Testgebiet zu betrachten. Zukünftig ist eine Ausdehnung auf ganz Sachsen angedacht.

2 EINGANGSDATEN

2.1 Lage des Untersuchungsgebietes

Das zu betrachtende Untersuchungsgebiet ist in **Abb. 2.1** dargestellt und blau hinterlegt. Es handelt sich um den Bereich des Osterzgebirges. Das dargestellte Untersuchungsgebiet entspricht demjenigen Gebiet, welches vom Auftraggeber vorgegeben wurde, reduziert um die Bereiche außerhalb Sachsens. Diese Reduktion war notwendig, da die Datengrundlagen zur Kaltluftberechnung auf tschechischem Gebiet nur in einer sehr groben Auflösung vorliegen und dementsprechend die dortige Aussagesicherheit für eine feine horizontale Auflösung nicht gewährleistet ist.

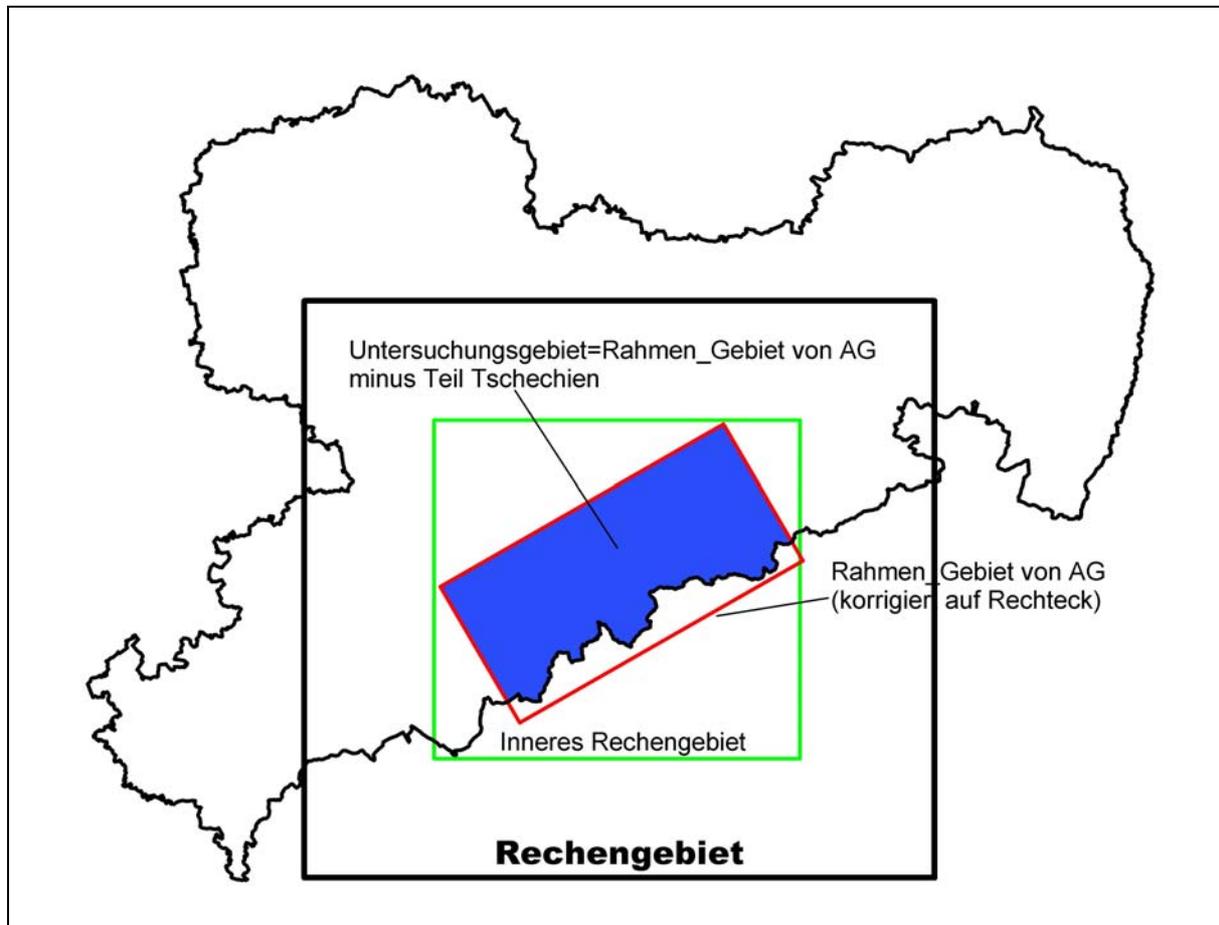


Abb. 2.1: Definition Untersuchungsgebiet und Rechengebiete

2.2 Eingangsdaten Kaltluftrechnung

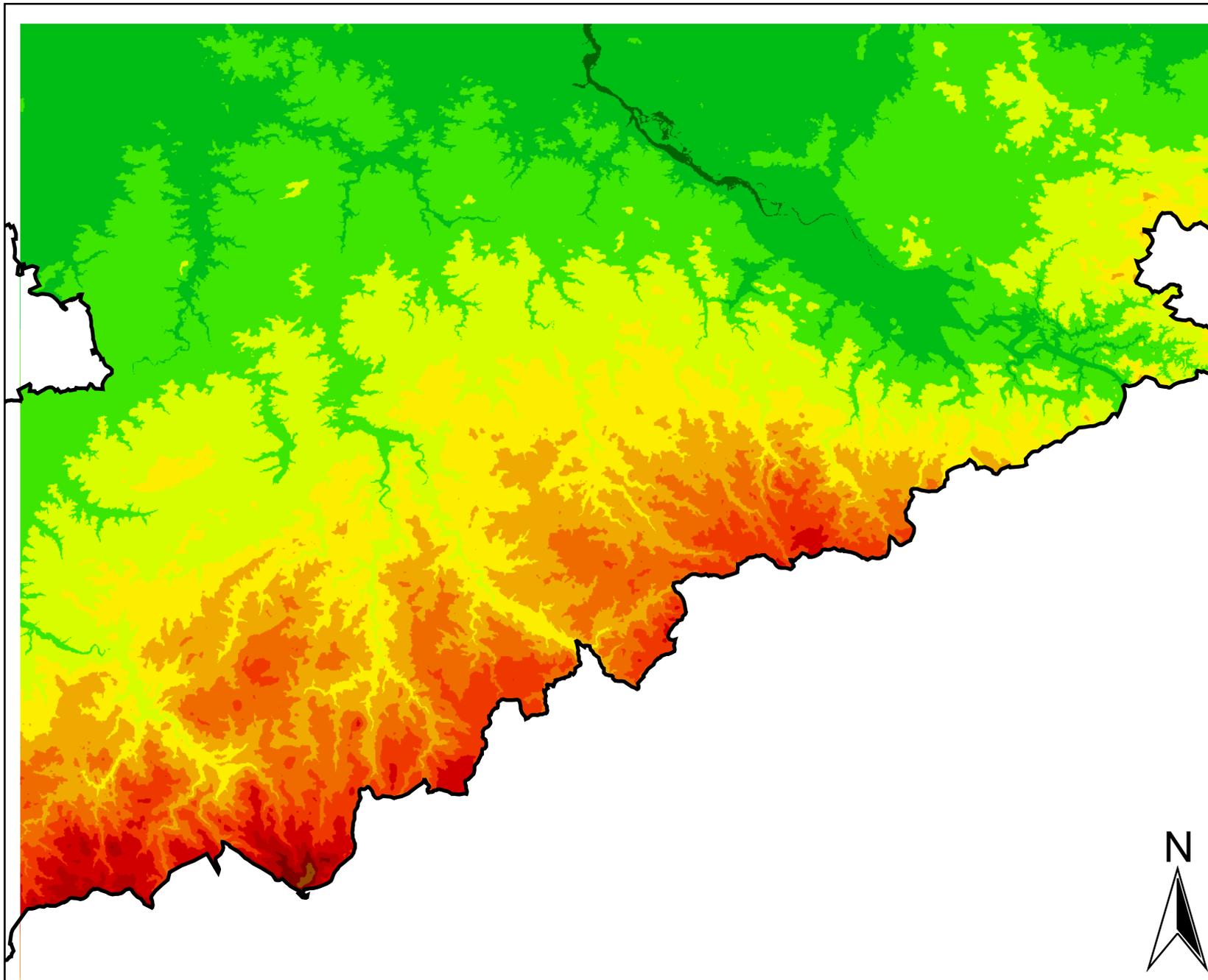
Für die Kaltluftrechnung mit dem Kaltluftabflussmodell KALM werden Informationen zur Orographie und zur Landnutzung für das gesamte Einzugsgebiet der Kaltluft benötigt. Die Daten zum Relief entstammen für den Bereich Sachsens vom Auftraggeber und entsprechen den ATKIS-DGM-25-Daten des Sächsischen Landesvermessungsamtes. Außerhalb Sachsens lagen keine Angaben vor. Deshalb wurden diese Daten aus der Datenbank GTOPO30 (EROS Data Center, 2000) entnommen. Die horizontale Auflösung dieser Daten ist jedoch mit ca. 1 km x 1 km relativ grob. Für die Aussagegüte der Kaltluftabflüsse in Sachsen ist dies nicht relevant, da sich die Grenze zwischen Sachsen und Tschechien ohnehin im Wesentlichen auf dem Gebirgskamm und somit auf einer Wasser- und damit auch Kaltluftabflussscheide befindet.

Auch die Landnutzungsdaten wurden nur für den sächsischen Bereich zur Verfügung gestellt. Deshalb wurde diese über die Sachsendgrenze hinaus anhand von vorliegenden topografischen Karten ergänzt, wobei jedoch nur größere Rauigkeitshindernisse (Waldflächen) aufgenommen wurden. Außerhalb der nachdigitalisierten Waldflächen wurde im tschechischen Gebiet Freiland angesetzt. Der damit verbundene Fehler bei den Kaltluftrechnungen ist jedoch sehr gering, da sich eventuelle Strömungshindernisse nur bis in eine Entfernung von ca. 10-mal Hindernishöhe auf das Windfeld auswirken.

Für das gesamte Einzugsgebiet der Kaltluft ($\hat{=}$ schwarz gekennzeichnetes Rechengebiet in **Abb. 2.1**) wurden diese Informationen in einem ca. 130 km x 120 km großen Rechengebiet in einer Auflösung von 50 m x 50 m aufbereitet. In dieses äußere Rechengebiet, welches zur Vermeidung von Randeffekten relativ groß gewählt wurde, wurde ein rechteckiges inneres Untersuchungsgebiet von ca. 75 km x 70 km Ausdehnung mit der gleichen Auflösung von 50 m x 50 m eingebettet (inneres Kaltluftrechengebiet). Dieses innere Rechengebiet schließt das hier zu betrachtende Untersuchungsgebiet vollständig ein.

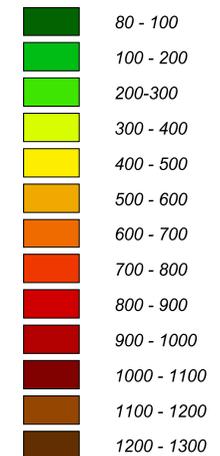
Die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Angaben zur Landnutzung (ATKIS-DLM-Daten) wurden in die Landnutzungsklassen des Kaltluftmodells KALM überführt. Das für die KALM-Rechnung aufbereitete digitale Höhenmodell sowie Landnutzungsmodell ist für die in Sachsen liegenden Bereiche des Kaltluftrechengebietes in **Abb. 2.2** und **2.3** dargestellt.

Für das Untersuchungsgebiet erfolgte eine visuelle Prüfung der Daten. Auffälligkeiten konnten nicht festgestellt werden.



Relief Osterzgebirge

Höhe über NN in m



 Landesgrenze Sachsen

Bearbeitung:  Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG
Mohrenstraße 14, 01445 Radebeul
Telefon 0351/ 83914-0

Auftraggeber:
LfUG Sachsen

Windstatistik und Kaltluft Osterzgebirge

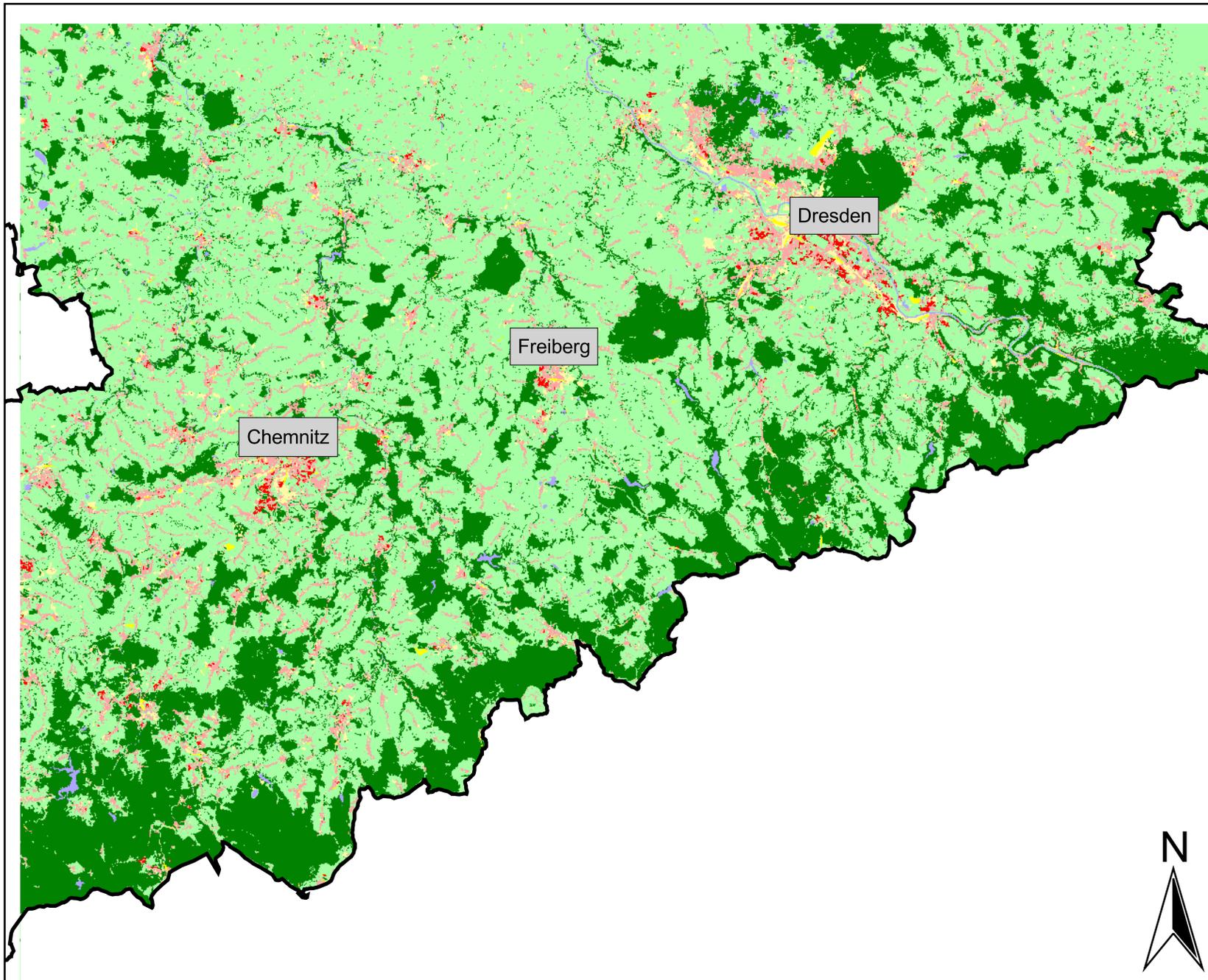
METEOKART

	Datum	Zeichen
gezeichnet	27.10.04	DS
geprüft	27.10.04	MOL
Projekt	70062; 70100	

10 0 10 Kilometer




Abb. 2.2



Landnutzung Osterzgebirge

- Lockere Bebauung*
- Wald*
- Freiland*
- Dichte Bebauung*
- Wasser*
- Verkehrsflächen*
- Gewerbe*
- Landesgrenze Sachsen*

Bearbeitung: **Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG**
 Mohrenstraße 14, 01445 Radebeul
 Telefon 0351/ 83914-0

Auftraggeber:
LfUG Sachsen

Windstatistik und Kaltluft Osterzgebirge

METEOKART

	Datum	Zeichen
gezeichnet	27.10.04	DS
geprüft	27.10.04	MOL
Projekt	70062; 70100	

10 0 10 Kilometer



Abb. 2.3

3 KALTLUFTBILDUNG UND AUSWIRKUNGEN

3.1 Allgemeines

Unter bestimmten meteorologischen Bedingungen können sich nachts über geneigtem Gelände so genannte Kaltluftabflüsse bilden; dabei fließt in Bodennähe (bzw. bei Wald über dem Kronenraum) gebildete kalte Luft hangabwärts. Die Dicke solcher Kaltluftschichten liegt meist zwischen 1 m und 50 m, in so genannten Kaltluftseen, in denen sich die Kaltluft staut, kann die Schicht auf über 100 m anwachsen. Die typische Fließgeschwindigkeit der Kaltluft liegt in der Größenordnung von 1 m/s bis 3 m/s. Die folgenden beiden meteorologischen Bedingungen müssen für die Ausbildung von Kaltluftabflüssen erfüllt sein:

- i) wolkenarme Nächte: durch die aufgrund fehlender Wolken reduzierte Gegenstrahlung der Atmosphäre kann die Erdoberfläche kräftig auskühlen
- ii) großräumig windschwache Situation: dadurch kann sich die Tendenz der Kaltluft, an geneigten Flächen abzufließen, gegenüber dem Umgebungswind durchsetzen.

Die Produktionsrate von Kaltluft hängt stark vom Untergrund ab: Freilandflächen weisen beispielsweise hohe Kaltluftproduktion auf, während sich bebaute Gebiete bezüglich der Kaltluftproduktion neutral bis kontraproduktiv (städtische Wärmeinsel) verhalten.

Unter Umweltgesichtspunkten hat Kaltluft eine doppelte Bedeutung: zum einen kann Kaltluft nachts für Belüftung und damit Abkühlung thermisch belasteter Siedlungsgebiete sorgen. Zum anderen sorgt Kaltluft, die aus Reinluftgebieten kommt, für die nächtliche Belüftung schadstoffbelasteter Siedlungsräume. Kaltluft kann aber auch auf ihrem Weg Luftbeimengungen (Autoabgase, Geruchsstoffe, Radon aus Haldenexhalation etc.) aufnehmen und transportieren. Nimmt sie zu viele Schadstoffe auf, kann ihr Zufluss von Schaden sein. Vom Standpunkt der Umweltbewertung und -Planung her ist es daher von großer Bedeutung, eventuelle Kaltluftabflüsse in einem Gebiet qualitativ und auch quantitativ bestimmen zu können. Als Hilfsmittel können z. B. Kaltluftabflussmessungen aber auch Kaltluftabflussmodelle eingesetzt werden. Innerhalb der vorliegenden Studie wird die Modellierung eingesetzt. In den folgenden Abschnitten werden zuvor die Ursachen für Kaltluftbildung und -abfluss einschließlich Einflussgrößen aufgezeigt und diskutiert. Dabei beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen in wesentlichen Teilen auf den Vorentwurf der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5 (2002) und die Auswertung weiterer vorliegender Literatur zur Problematik.

3.2 Ursachen für Kaltluftbildung und -abfluss

Die nächtliche Strahlungsbilanz setzt sich aus der Ausstrahlung der Erdoberfläche und der atmosphärischen Gegenstrahlung zusammen, wobei die Gegenstrahlung zum Erdboden gerichtet ist. Hierdurch reduziert sie den Betrag der Strahlungsbilanz. Während die Ausstrahlung von einer definierten Oberfläche ausgeht, empfängt die Erdoberfläche atmosphärische Gegenstrahlung aus verschiedenen Schichten der bodennahen Atmosphäre. Ihre Intensität hängt dabei von der Konzentration und Temperatur der Gase ab, die langwellige Strahlung emittieren. Bei einer wolkenfreien Atmosphäre geht der entscheidende Anteil an der Gegenstrahlung vom Wasserdampf (62 %) sowie vom CO₂ der Atmosphäre (22 %) aus. Der verbleibende Anteil von 14 % verteilt sich auf die Spurengase Methan (2.5 %), Stickstoffdioxid (4 %) und Ozon (7 %) (Kondratyev et al., 1984). Untersuchungen belegen, dass aufgrund der vertikalen Wasserdampfdiffusion der Atmosphäre für mittlere geografische Breiten bei wolkenlosem Himmel rund 70 % der Gegenstrahlung aus bodennahen Luftschichten unterhalb von 150 m über Grund stammen (Swinbank, 1963). Durch anhaltende, auch im Verlauf der Nacht in ihrer Intensität abnehmende Abkühlung, kann sich eine mehrere Dekameter dicke Kaltluftschicht bilden. In einer solchen stabilen Schichtung (im Extremfall eine Temperaturinversion) ist, bei schwachem Wind, der *turbulente Austausch* weitgehend unterdrückt. Bei auffrischendem Wind kann dagegen turbulenter Austausch die Temperaturinversion zusammenbrechen lassen („break-down of stability“) und die bodennahe Kaltluft mit der darüber liegenden Warmluft durchmischen. Dieses führt zu einem kurzfristigen bodennahen Temperaturanstieg und zu einer Reduktion der weiteren Temperaturabnahme.

Zusammenfassend lassen sich somit zwei grundlegende meteorologische Voraussetzungen nennen, von denen die Intensität der Kaltluftentstehung abhängt: Wolkenlosigkeit während einer windschwachen Hochdruckwetterlage sowie geringer Wasserdampfgehalt der Atmosphäre.

Die Kaltluftströmung (oder auch Kaltluftabfluss) wird als Verlagerung von kalten (dichten) Luftmassen in wärmerer (weniger dichter) Umgebungsluft von folgenden wesentlichen Größen beeinflusst:

- eine der Geländeneigung folgende Abtriebskomponente, die von der Schwerebeschleunigung und der Dichtedifferenz zur umgebenden Luft bestimmt wird;
- der Druckdifferenz zwischen stromauf und stromab gelegenen Stirnflächen;

- der Reibung der Erdoberfläche;
- der Wirkung der Luftmassen oberhalb der Kaltluftschicht;
- den Reibungskräften an den Seitenflächen der Kaltluftschicht.

Folgende wesentliche Wechselwirkungen zwischen Kaltluftströmung und Topografie bzw. Landnutzung sind bekannt:

- von der Landnutzung abhängige Kaltluftproduktion
- Advektion (Transport der Kaltluft mit der Strömung)
- Reibung zwischen Erdoberfläche und Luft: diese Reibung variiert mit der Landnutzung (Freiland: niedrige Reibung, Siedlung: hohe Reibung)
- Beschleunigung oder Abbremsen der Strömung durch Änderung der Geländehöhe und/oder der Kaltluftschichtdicke
- Beschleunigung oder Abbremsen bzw. Umleiten der Strömung durch Bebauung bzw. Bewuchs als Hindernis.

Dies soll im Weiteren erläutert werden.

3.3 Kaltluftentstehung über verschiedenen Oberflächen

Die Kaltluftentstehung über einer natürlichen Oberfläche wird - abgesehen von den bereits genannten Einflussgrößen - durch die thermischen Stoffeigenschaften (besonders Wärmeleitfähigkeitskoeffizient und Wärmekapazitätsdichte¹) des entsprechenden Substrates sowie durch eventuell vorhandene Oberflächenbedeckungen bestimmt, die in der Regel aus pflanzlichem Bewuchs, Laubstreu oder Schnee bestehen. Der Einfluss der Vegetation ist abhängig von ihrem Flächenanteil an der Gesamtfläche sowie von der Art des Bestandsaufbaus (z. B. Wiesen-, Kraut-, Strauch- oder Baumvegetation). Die Auswirkungen von Laubstreu und Schnee auf die Kaltluftentstehung werden von deren Zusammensetzung, Schichtdicke und Alter bestimmt. Die bodenphysikalischen Eigenschaften werden über Art und Zustand des Substrates festgelegt. Bestimmende Faktoren sind hierbei in erster Linie die Dichte, der Luft- und Wassergehalt sowie das Porenvolumen, daneben Bodenfarbe, -struktur

¹ Produkt aus spezifischer Wärmekapazität und Dichte

und -zusammensetzung. Exposition und Geländeneigung üben einen weiteren Einfluss auf die Kaltluftentstehung aus. Die genannten Größen bestimmen den Grad der Strahlungsabsorption und damit die Oberflächentemperatur sowie die Höhe des Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten und die Stärke der Wärmekapazitätsdichte. Eine große Amplitude des Tagesganges der Bodentemperatur ist in der Regel ein Indiz für eine starke Kaltluftentstehung in den Abend- und Nachtstunden. Darüber hinaus bestimmt die Dauer der nächtlichen Ausstrahlung, die in den mittleren Breiten im Sommer 9 bis 10 Stunden, im Winter 15 bis 17 Stunden erreichen kann, die Kaltluftentstehung. Böden mit hoher Dichte leiten die Wärme besser und sind schlechtere Kaltluftproduzenten als solche mit geringerer Dichte und Wärmeleitfähigkeit. Bodendichteunterschiede können sowohl auf Korngrößendifferenzen beruhen als auch durch unterschiedlichen Gehalt abgestorbenen Pflanzenmaterials (Humusanteil) verursacht sein. Mit wachsender Korngröße nimmt in der Regel der Porenraum zu, so dass bei trockenem Boden und mithin hohem Luftanteil die Wärmeleitung gering und die Kaltluftentstehung groß ist.

Das Porenvolumen eines Bodens kann sowohl durch Feuchtigkeitsänderungen als auch durch landwirtschaftliche Bearbeitung (Bodenverdichtung bzw. Bodenlockerung) beeinflusst werden. Während unbearbeitete und verdichtete Böden Porenvolumina von nur 30 % aufweisen können, erreichen frisch gepflügte Böden rund 60 %. Eine derartige Verdoppelung des Porenvolumens führt zu einer Abnahme der Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten auf etwa 1/5 des Ausgangswertes (Berényi, 1967), wodurch die Kaltluftentstehung zunehmen kann.

Eine Veränderung des Bodenwassergehaltes hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die thermischen Verhältnisse des Substrates. Dies wird in **Tab. 3.1** zeigt.

Da Porosität, Permeabilität und Bodenwassergehalt gerade in den oberen Bodenschichten innerhalb kurzer Zeit erheblich schwanken können, ist die Angabe von Mittelwerten der Kaltluftentstehung mit großen Unsicherheiten behaftet. Aus den in **Tab. 3.1** zusammengestellten Werten der Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten kann indirekt auf die Kaltluftentstehung der entsprechenden Oberflächen geschlossen werden. Feuchte Substrate verfügen zwar im Vergleich zu trockenen Substraten über größere Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten und Wärmekapazitätsdichten und müssten demnach schlechtere Kaltluftproduzenten sein. Da aber der latente turbulente Wärmefluss über die Verdunstung tagsüber relativ hoch und auch nachts meist noch von der Oberfläche weggerichtet ist, sind feuchte Böden auch zu den Kaltluftbildnern zu rechnen (Baumgartner, 1963).

Komponenten	Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten [W m ⁻¹ K ⁻¹]
Quarz	8.80
Granit	4.60
Sand: feucht, 40 % Porenvolumen Sand: trocken, 40 % Porenvolumen	2.20 0.30
Lehmboden: feucht, 40 % Porenvolumen Lehmboden: trocken, 40 % Porenvolumen	1.60 0.25
Humus	1.30
Moorboden: feucht Moorboden: trocken	0.80 0.06
Wasser; 4 °C, ruhig	0.60
Torfboden: feucht, 40 % Porenvolumen Torfboden: trocken, 40 % Porenvolumen	0.50 0.06
Luft: 10 °C, ruhig	0.02

Tab. 3.1: Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten [W m⁻¹ K⁻¹] verschiedener Komponenten (entnommen aus VDI 3787 Blatt 5, 2002)

Hinsichtlich der Kaltluftentstehung von Wäldern muss nach deren topografischer Lage unterschieden werden. Bei Beständen, die in einer Ebene liegen, sinkt die im Kronendach abgekühlte Luft in den Stammraum ab und stagniert dort, oder aber sie fließt mit sehr geringer Geschwindigkeit im unteren Stammraumbereich als „Waldwind“ aus dem Bestand heraus (Geiger, 1961). Die Lufttemperatur nimmt in diesen Fällen zwar niedrige Werte an, ist jedoch im Vergleich zur Kaltluft über einer Wiesenfläche in entsprechender Lage absolut gesehen höher. Bei Wäldern in Kamm- oder Hanglage wird die in Bodennähe aus dem Stammraum mit höherer Geschwindigkeit als im vorgenannten Fall ausfließende Kaltluft durch warme Luft ersetzt, die von oben in den Bestand eindringt. Die im Stammraum bodennah austretende Luft ist hierbei in der Regel jedoch nicht so kalt wie diejenige eines in ebener Lage stockenden Waldes (Goßmann, 1988). Daher sind Täler, deren Hänge bewaldet sind, weniger frostgefährdet. Der spärlichen Literatur zu diesem Thema können im Allgemeinen meist nur Hinweise auf die qualitative Wirkung verschiedener Böden oder Bewuchsarten hinsichtlich der

Kaltluftproduktion entnommen werden. Eine Zusammenstellung häufig zitiertes mittlerer Kaltluftentstehungsraten enthält **Tab. 3.2**.

Lokalität	Volumenstrom [m ³ · s ⁻¹]	Einzugsgebiet [km ²]	Kaltluftproduktionsrate [m ³ · m ⁻² · h ⁻¹]	Flächennutzung	Geländeneigung	Quelle (siehe Hartenstein, 2000)
Beierbachtal	23 000		32	gemischt, un bebaut		Hauf & Witte, 1985
Rohrbachtal			15	gemischt, un bebaut		Kost, 1982, zit. in KRdL 1993
Würzenbachtal	38 000	9.8	13.7	gemischt, un bebaut		Vogt, 1990
Dreisamtal			13 11 16	gemischt, entwaldet Ackerland		Gross, 1989 (modelliert)
Eifeltäler			12	Wiese	Hangneig. 5° bis 9° Sohlenneig. 2° bis 8°	King, 1973
Michelbachtal	30 000	11.2	9.6		Hangneig. 13° Sohlenneig. 2°	Hartenstein, 2000
Pfintztal		235	6		9° bis 11°	Heldt, 1984
Kronsberg			4 bis 33			Herberger et al., 1993

Tab. 3.2: „Kaltluftproduktionsraten“ verschiedener Täler (entnommen aus VDI 3787 Blatt 5)

Der Wärmeinhalt von Kaltluft kann besonders stark durch urbane Gebiete und größere Wasserflächen beeinflusst, das heißt, in der Regel aufgezehrt, werden. Im Falle einer bebauten Fläche erfolgt eine Temperaturerhöhung durch die städtische Überwärmung. Das liegt daran, dass von städtischen Oberflächen durch die langwellige Ausstrahlung sowie den turbulenten sensiblen und latenten Wärmefluss unter Einbezug des anthropogenen Wärmeintrags Energieflüsse erreicht werden, die in Abhängigkeit von der Bevölkerungsdichte Werte zwischen 5 W m⁻² und 120 W m⁻² erreichen können. Auch ausreichend große Wasserflächen können Kaltluft erwärmen.

3.4 Einfluss von Flächennutzungsänderungen auf Kaltluft

Jede Veränderung der Oberfläche im Untersuchungsgebiet beeinflusst auf Grund der genannten Einflussgrößen die Kaltluftentstehung und den Kaltluftabfluss: Es verändern sich die Kaltluftproduktionsraten, die Reibungen und die Verdrängungshöhen.

Nachfolgend soll exemplarisch dargelegt werden, welche Veränderungen auftreten, wenn z. B. landwirtschaftliche Nutzflächen in Wald und Grünland in Ackerland umgewandelt werden. Da über landwirtschaftlichen Nutzflächen die Kaltluftentstehung wegen der stärkeren Absenkung der Temperatur im Allgemeinen intensiver ist als über Waldgebieten, kann bei Umwandlung der genannten Flächen in Waldgebiete ein ausgeglichenerer Tagesgang der Temperatur erwartet werden. Für ebene Wiesenflächen gibt King (1973) Produktionsraten von etwa $12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ an, was zu einem theoretischen Mächtigkeitzuwachs der Kaltluft von 12 m h^{-1} führt. Kaltluftschichtdicken über Freilandflächen würden erfahrungsgemäß pro Ausstrahlungsnacht 20 m bis 80 m Mächtigkeit erreichen. Hingegen mindern Waldgebiete die „absoluten“ Kaltlufttemperaturen. Bei der Umwandlung landwirtschaftlicher Nutzflächen in Waldgebiete ist somit davon auszugehen, dass zwar weiterhin Kaltluft gebildet wird, diese jedoch nicht die für eine unbewaldete Fläche repräsentativen niedrigen Untertemperaturen aufweist. Wird Grünland in Ackerland umgewandelt, so ist in der Regel davon auszugehen, dass die neuen Flächen zuerst einmal „ackerfähig“ gemacht werden müssen, das heißt, der Boden wegen des Einsatzes von schwerem landwirtschaftlichen Gerät verdichtet wird. Hieraus würde eine Verringerung der Kaltluftproduktivität resultieren. Da aber eine Feldbestellung im allgemeinen saisonal erfolgt und sich deshalb Bodenverdichtung und -auflockerung sowie der Besatz mit Vegetation im Jahresverlauf abwechseln, unterliegt auch die Kaltluftproduktivität einem Jahresgang.

3.5 Einfluss von künstlichen Hindernissen und Bewuchs

Einzelne Hindernisse wie **Gebäude** oder **Dämme** werden über- und umströmt, wenn es nicht zu einem Kaltluftstau kommt. Einzelne Dämme können in Tälern einen markanten Kaltluftstau auslösen. Dieses betrifft sowohl Hindernisse, die quer zur Talsohle verlaufen als auch solche, die hangparallel orientiert sind. Die luvseitige horizontale Erstreckung des Kaltluftstaus hängt u. a. vom Gefälle der Talsohle bzw. des Hanges ab und kann das 10fache der Dammhöhe betragen (grober Orientierungswert). Leeseits des Dammes wird die Geschwindigkeit der dammüberströmenden Kaltluft durch den Damm selbst reduziert. In einer Entfernung vom 30fachen der Dammhöhe beträgt die Geschwindigkeitsreduktion immer noch ca. 10 %. Nach den Beobachtungen von King (1973) gleitet die nachfolgende Kaltluft über die im Staubereich des Dammes liegende bodennahe Kaltluft hinweg, sodass sich die Erstreckung des dammbedingten Kaltluftsees nicht mehr ändert. Nach den Beobachtungen von King (1973) kann die Ausbildung von Kaltluftstaus vor Dämmen durch Durchlässe von mindestens

10 m Breite wirksam unterbunden werden. Bei breiten Tälern ist es wirksamer, mehrere schmalere Durchlässe von etwa 10 m Breite statt eines breiten Durchlasses vorzusehen.

Der strömungshemmende Einfluss von Bebauung richtet sich nach deren Flächenausdehnung, Gebäudeanordnung sowie -höhe. Gruppen von Einzelgebäuden und kleinere Siedlungen werden von Kaltluftabflüssen mit einem Volumenstrom ab etwa 10 000 m³/s durch-, um- oder überströmt. Bei größeren Orten und/oder dichterem Bebauung wird die Kaltluft durch die vergrößerte Rauigkeit abgebremst und erwärmt. Die Strecke, ab der die in die Bebauung einfließende Kaltluft keine merkliche Untertemperatur mehr gegenüber der Luft außerhalb der Kaltluft hat, wird als maximale Eindringtiefe bezeichnet. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebauten Gebiet hängt somit wesentlich von der Bebauungsausdehnung und -dichte, der anthropogenen Wärmefreisetzung sowie der advektierten Kaltluftmenge ab. Die Eindringtiefe bewegt sich typischerweise in einem Bereich zwischen 100 m und 1 000 m. Kleinere Siedlungen haben nur einen geringen Einfluss auf stark ausgeprägte Kaltluftströmungen, sowohl was das Fließverhalten als auch die Erwärmung anbelangt. Bei größeren Siedlungsgebieten dagegen wird die Kaltluft sowohl dynamisch als auch thermisch großflächig beeinflusst und kann sogar am Rauigkeitssprung auf die Stadthindernisschicht aufgleiten (Kuttler, 1996).

Büsche und **Baumgruppen** modifizieren die Strömungscharakteristika. Bei ihrer Durchströmung wird die dynamische Turbulenz erhöht, wodurch sich der Volumenstrom im bodennächsten Niveau vermindert und horizontale oder vertikale Verlagerungen des Strömungsmaximums erfolgen können. Die leeseitige Reichweite dieser Störungen ist abhängig von Strömungsmächtigkeit, Geschwindigkeit und Turbulenzgrad sowie von der Größe und Form der Hindernisse. Hindernisse wie Waldränder und Hecken können auch die Richtung des Kaltluftabflusses beeinflussen.

3.6 Bestimmung von Kaltluftströmungen

Für die Untersuchung über Kaltluftentstehung und -fluss sowie deren Auswirkungen sind folgende Untersuchungsverfahren möglich (VDI 3787 Blatt 5):

- Auswertung von Karten (Topografie und Landnutzung) und Literatur
- Modelluntersuchungen (numerische oder physikalische Modelle)
- Messungen im Untersuchungsraum.

Welche dieser Verfahren zur Anwendung kommen soll, ist von der entsprechenden Fragestellung abhängig. Im vorliegenden Projekt kamen Kaltluftabflussberechnungen mit dem Modell KALM zur Anwendung.

Das Kaltluftmodell KALM (Schädler, 1994) verwendet die so genannten Flachwassergleichungen, eine vereinfachte (vertikal integrierte) Form der Grundgleichungen der Strömungsmechanik. Durch diese Vereinfachung ist es möglich, das Modell mit relativ geringem Rechenzeit- und Speicherbedarf auch auf Personal Computern zu betreiben. Die Bezeichnung „Flachwassergleichungen“ hat sich eingebürgert; die Gleichungen eignen sich jedoch genauso zur Beschreibung der Strömung jedes relativ zur Umgebung schweren Fluids, z. B. von Wasser oder von kalter Luft.

Vorausgesetzt wird die in den vorhergehenden Abschnitten genannte für Kaltluftabflüsse optimale Situation, das heißt eine klare und windstille Nacht. Das Modell berechnet die zeitliche Entwicklung der Kaltluftströmung, ausgehend vom Ruhezustand (keine Strömung) bei gegebener zeitlich konstanter Kaltluftproduktionsrate. Diese, ebenso wie die Reibungskoeffizienten, werden über die Art der Landnutzung gesteuert. Zurzeit werden 8 Landnutzungsclassen berücksichtigt: dichte Bebauung, lockere Bebauung, Gewerbegebiet, Wald, Freiland, Wasser, Gleisanlagen und Verkehrsflächen (Straßen, Parkplätze). Für die Kaltluftproduktionsraten, Reibungskoeffizienten und Nullpunktverschiebungen sind Standardwerte vorgesehen, welche aber bei Bedarf geändert werden können. Die Kaltluftproduktionsrate von Wald wird in Abhängigkeit von der lokalen Hangneigung entsprechend Messergebnissen von Kost (1982) und Vogt (1997) variiert. Die landnutzungsabhängigen Modellparameter sind in **Tab. 3.3** zusammengestellt. Weiterhin benötigt das Modell die Topografie in digitalisierter Form. Die Skala des Modells ist beliebig, die Auflösung liegt zwischen etwa 10 m und 200 m.

Berechnet wird die Dicke der Kaltluftschicht sowie die beiden horizontalen Geschwindigkeitskomponenten (West-Ost und Süd-Nord), gemittelt über die Dicke der Kaltluftschicht. Aus diesen Größen kann dann auch der Kaltluftvolumenstrom berechnet werden.

Das Lösungsverfahren ist ein Differenzenverfahren mit variabler Gitterpunktzahl und Gitterweite, das heißt Topografie und Landnutzung müssen an den einzelnen Gitterpunkten digitalisiert vorliegen; es wird ein versetztes Gitter verwendet. Um großskalige Einflüsse (z. B. Flusstäler) bei gleichzeitiger hoher Auflösung im interessierenden Gebiet zu berücksichtigen, kann das Modell auf einem geschachtelten Gitter („Nesting“) betrieben werden.

Land- nutzung	Kaltluftproduktion [m ³ /(m ² · h)]	Untertemperatur [K]	Verschiebungslänge [m]	Rauigkeitslänge [m]
Lockere Bebauung	0	4	2	0.5
Wald	1 – 50 (abhängig von der Hangneigung)	8	5	0.5
Freiland	15	10	0	0.05
Dichte Bebau- ung	-1	2	5	1
Wasserfläche	0	4	0	0.001
Verkehrs- gelände	3	6	1	0.05
Gewerbe- gebiet	0	4	5	0.5

Tab. 3.3: Landnutzungsabhängige Modellparameter (Standardeinstellungen)

Falls keine Kaltluftseebildung auftritt, wird die Rechnung nach etwa 1 h simulierter Zeit stationär, das heißt die berechneten Werte ändern sich dann nicht mehr signifikant. Im Allgemeinen Fall ist es sinnvoll, etwa 3 h bis 6 h zu simulieren; dies entspricht den Verhältnissen in der Natur.

Zur Weiterverarbeitung der Modellergebnisse werden im Rahmen des Fachinformationssystems METEOKART GIS Postprozessoren u. a. zur grafischen Darstellung der berechneten Felder, zur Berechnung und Darstellung von Kaltluftvolumenströmen, zur Visualisierung der Strömung durch Vorwärts- und Rückwärtstrajektorien und zur Darstellung der Rechenwerte an ausgewählten Punkten zur Verfügung.

Durch Kopplung der von KALM berechneten Windfelder mit Eulerschen oder Lagrangeschen Ausbreitungsmodellen, wie z. B. LASAT, kann die Schadstoffausbreitung in Kaltluftabflüssen berechnet und z. B. in Immissionsstatistiken eingearbeitet werden.

Die Ergebnisse der Kaltluftabflussberechnungen werden in Kapitel 4 prinzipiell erläutert. Sie sind mit dem Programmsystem METEOKART GIS digital für das gesamte Untersuchungsgebiet abrufbar.

4 KALTLUFTSIMULATIONEN

4.1 Qualitätssicherung

Das Kaltluftabflussmodell KALM wurde seit seiner Entwicklung mehrfach im Rahmen von klimatologischen Untersuchungen mit Messdaten verglichen.

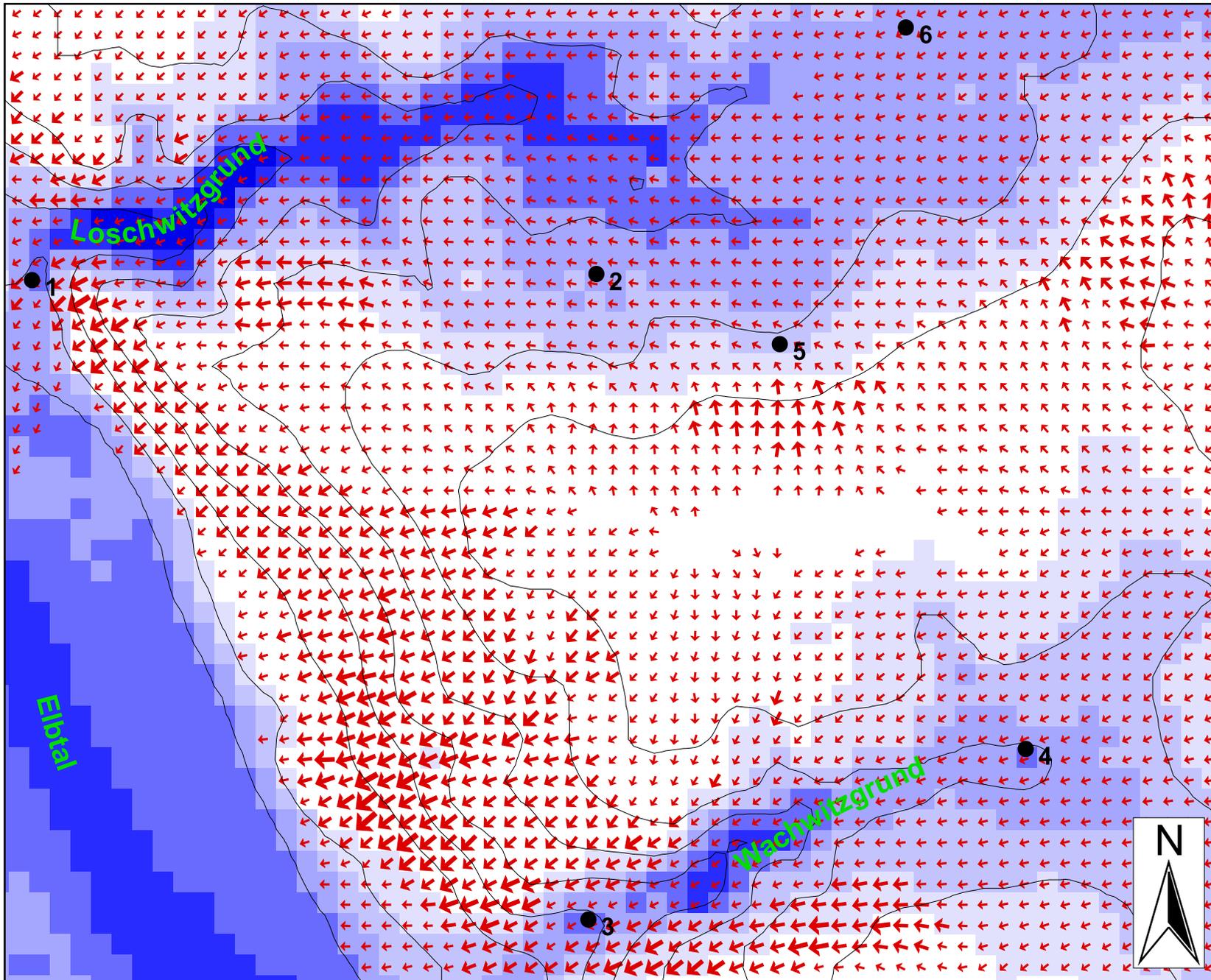
Im zu betrachtenden Untersuchungsgebiet liegen keine veröffentlichten Messungen zur Kaltluftfrichtung- und -geschwindigkeit vor. Es gibt jedoch Messdaten des DWD aus dem Jahr 1994 (Lohmeyer, 1995 bzw. DWD, 1995) für den Bereich Dresden-Rochwitz. Die damaligen Messungen liegen ca. 3 km nördlich des hier betrachteten inneren Rechengebietes, aber gleichzeitig mindestens 20 km vom Rand des Gesamt-Rechengebietes weg. Deshalb erscheint es fachlich vertretbar, die Messdaten zu einer ersten Validierung der Kaltluftrechnungen heranzuziehen (siehe Abschnitt 4.1.1).

Des Weiteren wurden die Kaltluftrechnungen im Bereich Chemnitz mit Daten aus dem Klimagutachten Chemnitz verglichen (Lohmeyer, 2000, Abschnitt 4.1.2). Chemnitz liegt zwar außerhalb des Untersuchungsgebietes Osterzgebirge, jedoch zu ca. 50 % innerhalb des inneren Rechengebietes, sodass auch hier belastbare Ergebnisse angegeben werden können.

Des Weiteren erfolgte eine visuelle Kontrolle aller Rechenergebnisse im Bereich des betrachteten Untersuchungsgebietes. Dabei wurden die von KALM errechneten Kaltluftwindfelder über die topografischen Karten (TK10) gelegt und geprüft, ob Schichtdicken, Richtung, Strömungsgeschwindigkeit sowie Volumenstromdichten plausibel sind.

4.1.1 Vergleich mit Messdaten Dresden-Rochwitz

In einem ersten Testlauf wurden die in **Tab. 3.3** angegebenen Rechenparameter angesetzt. Die Ergebnisse wurden mit den DWD-Messdaten in Dresden-Rochwitz verglichen, wobei von den dortigen ca. 20 Messstellen 6 ausgewählt wurden, die sich z. T. in Bereichen mit großen Kaltluftvolumenstrom (Talbereiche, Punkte 1 bis 4 in **Abb. 4.1**) sowie in stärker exponierten Lagen (Punkte 5 und 6 in **Abb. 4.1**) befinden. Ein Vergleich mit den herangezogenen Messdaten des DWD zeigt, dass die Kaltluftgeschwindigkeiten mit den Standardeinstellungen des KALM in der Tendenz niedriger als die Messwerte lagen. Aus diesem Grund wurde ein weiterer Rechenlauf durchgeführt, in dem im Vergleich zu den Standardwerten die

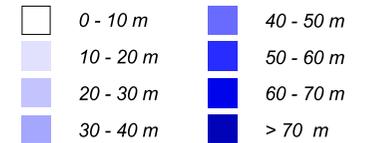


Qualitätssicherung Kaltluftrechnung

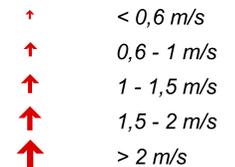
- Bereich Dresden Rochwitz -

3h nach Beginn Kaltluftsimulation

Kaltluftschichtdicke [m]



Kaltluftgeschwindigkeit [m/s]



1 DWD-Messpunkte Kaltluft

Bearbeitung: Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG
Mohrenstraße 14, 01445 Radebeul
Telefon 0351/ 83914-0

Auftraggeber: LfUG Sachsen

Kaltluft Osterzgebirge

METEOKART

	Datum	Zeichen
gezeichnet	27.10.04	DS
geprüft	27.10.04	MOL
Projekt	70062	



Abb. 4.1

Rauigkeitsparameter (z_0) um Faktor 5 verringert wurden. Alle anderen Parameter wurden nicht geändert. Die Ergebnisse dieser Rechnung sind in **Abb. 4.1** dargestellt.

Bezüglich Windrichtung erfolgt ein Vergleich in **Tab. 4.1**.

Station	Kaltlufttrichtung (Messung DWD, entnommen aus Lohmeyer, 1995) [°]	Kaltlufttrichtung (KALM) [°]
1 Grundstraße	30	45
2 Neurochwitz	150	100
3 Wachwitzgrund	70	60
4 Wachwitzgrund - Anfang	40	70
5 Rodelweg	160	130
6 Loschwitzgrund - Anfang	70	65

Tab. 4.1: Vergleich gemessener mit berechneter Kaltluftgeschwindigkeit ca. 3 Stunden nach Beginn des Kaltluftabflusses

Die Messungen geben überwiegend eine talparallele Kaltluftwindrichtung wieder. Die Rechenergebnisse stimmen für die Punkte 1, 3 und 6 sehr gut und für die Punkte 2, 4 und 5 weniger gut mit den Messdaten überein. Die Abweichung zwischen Messung und Rechnung ist jedoch nicht größer als 50° , sodass aufgrund der Unsicherheiten in den Messungen von einer guten Übereinstimmung auszugehen ist.

In **Tab. 4.2** werden die Rechenergebnisse bezüglich Windgeschwindigkeit an o. g. Punkten miteinander verglichen.

Station	$\bar{v} \pm \Delta\bar{v}$ (Messung DWD, entnommen aus Lohmeyer, 1995) [m/s]	\bar{v} (KALM mit angepassten Parametern) [m/s]
1 Grundstraße	0.8 ± 0.6	0.6
2 Neurochwitz	0.5 ± 0.4	0.3
3 Wachwitzgrund	1.1 ± 0.5	0.5
4 Wachwitzgrund - Anfang	0.2 ± 0.2	0.2
5 Rodelweg	0.7 ± 0.4	0.3
6 Loschwitzgrund - Anfang	0.5 ± 0.4	0.2

Tab. 4.2: Vergleich mittlerer gemessener mit berechneter Kaltluftgeschwindigkeit

Die Mittelwerte der Messwerte sind an allen betrachteten Punkten größer oder gleich den Rechenwerten. Die Schwankungsbreite der Messdaten ist jedoch relativ hoch. Bis auf Punkt 3 liegen alle Rechenwerte in den Schwankungsbreiten der Messdaten, am Punkt 3 wird die untere Messschwelle nur knapp unterschritten.

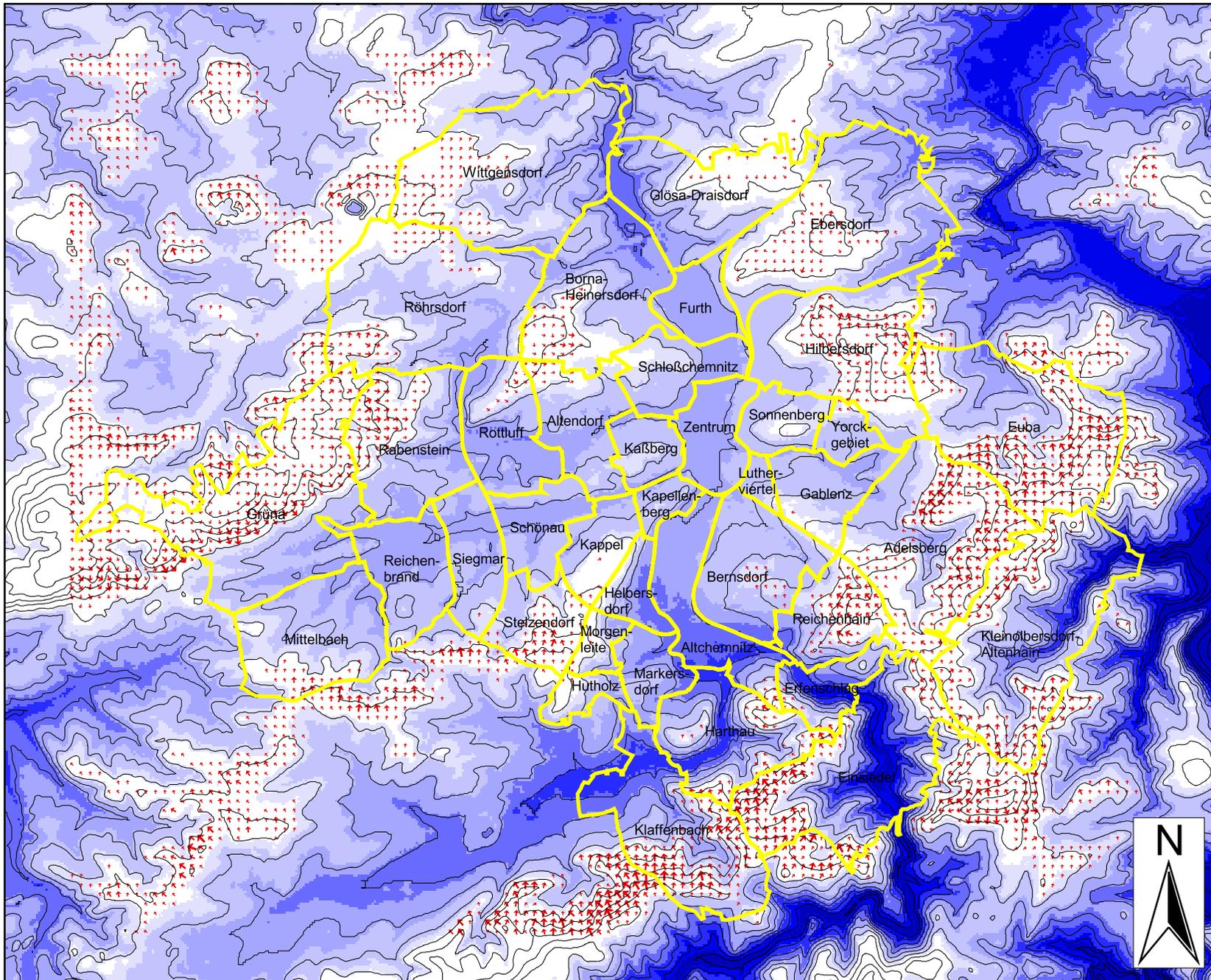
Unter Berücksichtigung der großen Schwankungsbreite der Messdaten ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung als gut zu bezeichnen, wobei die Rechenergebnisse eher zu kleineren Kaltluftgeschwindigkeiten hin tendieren. Dies wirkt sich jedoch bei Ausbreitungsrechnungen konservativ auf die Ergebnisse aus, sodass diese Ergebnisse so verwendet wurden.

4.1.2 Vergleich mit Kaltluftrechnungen in Chemnitz

Die berechneten Kaltluftwindfelder und -schichtdicken für den Bereich Chemnitz sind beispielhaft für ca. 3 Stunden nach Sonnenuntergang in **Abb. 4.2** dargestellt. Ein Vergleich mit Lohmeyer (2000; siehe entsprechenden Auszug im Anhang A2) zeigt eine gute Übereinstimmung. Ein Großteil des Stadtgebietes befindet sich im Einflussbereich von Kaltluftseen. Aufgrund der relativ großen Höhenunterschiede und der ausgedehnten Frei- und Vegetationsflächen im Umland finden teilweise auch in bebauten Bereichen Kaltluftzuflüsse statt. Dieses Ergebnis wird von Lohmeyer (2000) bestätigt.

Auch die Relationen der Kaltluftgeschwindigkeiten stimmen gut überein. So werden wie bei Lohmeyer (2000) die größten Kaltluftgeschwindigkeiten mit ca. 1.5 - 2 m/s im Bereich Klaffenbach beobachtet, am gegenüberliegenden Hang bei Grüna treten mit ca. 1 m/s etwas geringere Kaltluftgeschwindigkeiten auf.

Kleinere Abweichungen treten im Bereich Harthau und Euba im Osten der Stadt auf (bei der hier durchgeführten Berechnung tendenziell etwas niedrigere Kaltluftgeschwindigkeiten). Insgesamt ist jedoch von einer guten Übereinstimmung auszugehen.

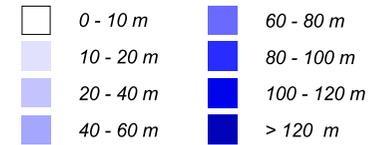


Qualitätssicherung Kaltluftrechnung

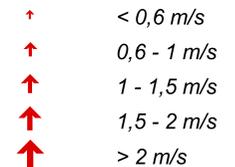
- Bereich Chemnitz -

3h nach Beginn Kaltluftsimulation

Kaltluftschichtdicke [m]



Kaltluftgeschwindigkeit [m/s]



Stadtteile Chemnitz

Bearbeitung: Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG
Mohrenstraße 14, 01445 Radebeul
Telefon 0351/ 83914-0

Auftraggeber: LfUG Sachsen

Kaltluft Osterzgebirge

METEOKART

	Datum	Zeichen
gezeichnet	27.10.04	DS
geprüft	27.10.04	MOL
Projekt	70062	

2000 0 2000 Meter



Abb. 4.2

4.1.3 Fazit

Der Vergleich mit vorliegenden Messungen und Kaltluftrechnungen zeigt nach Anpassung der Rechenparameter für die Rauigkeit (z_0) eine bessere Übereinstimmung als mit den Standardeinstellungen. Tendenziell werden insbesondere in ausgedehnten Kaltluftseen allerdings auch nach der Anpassung niedrigere Kaltluftgeschwindigkeiten berechnet als in den verfügbaren Messdaten beobachtet. Allerdings weisen diese Messdaten selbst sehr hohe Unsicherheiten auf. Da diese niedrigen Kaltluftgeschwindigkeiten jedoch bei nachgeschalteten Ausbreitungsrechnungen eher ein konservatives Herangehen darstellt, wurden die Rechenwerte ins METEOKART ohne weitere Anpassungen übernommen.

4.2 Ergebnis Kaltluftrechnung

Die Ergebnisse der Kaltluftrechnung können für das zu betrachtende Untersuchungsgebiet flächendeckend mit dem Fachinformationssystem METEOKART GIS dargestellt werden. Folgende Informationen werden im System vorgehalten:

- Flächendeckende Kaltluftgeschwindigkeitsfelder bodennah (0 - 2 m über Grund)
- Flächendeckende Informationen über die Kaltluftschichtdicken
- Flächendeckende Kaltluftvolumenstromdichten bodennah (0 - 15 m über Grund)

jeweils wahlweise für 60 min, 120 min, 180 min und 240 min nach Beginn des Kaltluftabflusses. Zur Handhabung des Systems siehe Lohmeyer (2004). Die Kaltluftschichtdicken werden in einer Auflösung von 50 m*50 m vorgehalten, bei den anderen beiden Komponenten, die als Pfeile dargestellt werden, wird aus Gründen der Übersichtlichkeit nur jeder zweite Pfeil dargestellt (100 m* 100 m).

Unter Volumenstromdichte versteht man die Menge des Volumens, das innerhalb einer bestimmten Zeiteinheit durch eine bestimmte Fläche hindurchfließt. In diesem Fall handelt es sich um eine Fläche mit einer horizontalen Ausdehnung von einem Meter und einer Höhe von 15 m. Die vertikale Ausdehnung von 15 m wurde gewählt, um die bodennahen Kaltluftverhältnisse bis über die Bebauungshöhe hinaus zu erfassen.

Neben den flächenhaften Darstellungen können per Mausklick für ausgewählte Punkte (Auflösung von 50 m*50 m) Tabellen mit mittlerer Strömungsrichtung und -geschwindigkeit

($\hat{=}$ Mittelwert über die gesamte Kaltluftsäule) sowie Vertikalprofile der Strömungsgeschwindigkeit und der Volumenstromdichte abgerufen werden (näheres siehe Lohmeyer, 2004).

Darüber hinaus können Trajektorienrechnungen durchgeführt werden. Hierbei unterscheidet man Vorwärts- und Rückwärtstrajektorien. Als Trajektorie (= Luftbahn) bezeichnet man den Weg, den ein Luftpaket in einer bestimmten Zeit zurücklegt. Die Trajektorie verbindet somit alle Orte, die das Luftpaket während seiner Bewegung einmal berührt hat. Durch die Berechnung von Vorwärtstrajektorien kann die weitere Verfrachtung von Luftbeimengungen verfolgt werden, Rückwärtstrajektorien ermöglichen es, Aussagen zur Herkunft von Schadstoffen treffen zu können.

Zur Bestimmung einer Vorwärtstrajektorie wird das entsprechende Kaltluftwindfeld als Grundlage genutzt. Für jeden Zeitschritt wird berechnet, in welcher Rechenbox sich das Luftpaket befindet. Innerhalb einer Box bewegt es sich entsprechend dortiger mittlerer berechneter Kaltluftgeschwindigkeit vorwärts bis es in eine neue Rechenbox gelangt.

Das Verfahren wird für einige Punkte rings um den angeklickten Bereich gestartet, sodass bei der Visualisierung im Programmsystem METEOKART GIS jeweils mehrere Vorwärtstrajektorien entstehen (siehe auch Lohmeyer, 2004). Für Rückwärtstrajektorien wird ebenso verfahren.

Die Berechnung der Rückwärtstrajektorien erfolgt stationär, wobei über die gesamte Simulationszeit das gleiche Kaltluftwindfeld als Grundlage genutzt wird. Für Vorwärtstrajektorien wird ein instationäres Verfahren angewendet, wobei die Kaltluftwindfelder entsprechend der gerade vorliegenden Simulationszeit herangezogen werden.

Hinweis: Rückwärtstrajektorien haben weniger Aussagekraft als Vorwärtstrajektorien, da fachlich korrekter Weise nicht eine Linie, sondern ein ganzer Einzugsbereich gekennzeichnet werden müsste. Sie stellen aber trotzdem ein praktikables Werkzeug zur Ursachenforschung von Luftschadstoffbelastungen dar. Der Problematik wird insofern zum Teil Rechnung getragen, dass je Mausklick auch bei Rückwärtstrajektorien mehrere Startpunkte gewählt werden.

Weiterführende Aussagen waren nicht Gegenstand des hier vorgelegten Projektes und würden weitreichenden zusätzlichen Untersuchungsbedarf bedeuten.

5 AUSBLICK

Das für das Testgebiet „Osterzgebirge“ durchgeführte Projekt hat aufgezeigt, dass Kaltluftrechnungen auch für größere Gebiet möglich sind und plausible Ergebnisse erzielt werden. Für die Zukunft könnte deshalb über eine Ausdehnung des Rechengebietes (z. B. in Richtung Westerbirge) nachgedacht werden. Dieses Folgegebiet sollte möglichst rechteckig und nach Norden ausgerichtet sein, da dies auch den Anwendungsvoraussetzungen des Kaltluftabflussmodells KALM entspricht.

Unabhängig von einer Erweiterung des Untersuchungsgebietes in andere topografisch gegliederte Regionen Sachsens könnte darüber nachgedacht werden, zusätzliche Module zu entwickeln, die die Arbeit der Genehmigungsbehörden weiterführend erleichtern können. Solche Module wären beispielsweise:

- Modul zum Aufzeigen der Relevanz von Kaltluftabflüssen
- Modul zur vereinfachten Ausbreitungsrechnung im Kaltluftabfluss

jeweils für beliebig wählbare Quellen.

6 LITERATUR

- Baumgartner, A. (1963): Einfluss des Geländes auf Lagerung und Bewegung der nächtlichen Kaltluft. In: Schnelle, F. (Hrsg.): Frostschutz im Pflanzenbau. Bd. 1. München, Basel, Wien: BLV Verlagsgesellschaft, 1963.
- Berényi, D. (1967): Mikroklimatologie. Mikroklima der bodennahen Atmosphäre. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1967.
- DWD (1995): Amtliches Gutachten zu den lokalklimatischen Auswirkungen eventueller Änderungen der Landnutzung durch Wohnbebauung im Gebiet Dresden-Bühlau, -Rockwitz, Gönnsdorf und Pappritz. Auftraggeber: Landeshauptstadt Dresden, Radebeul, 21.06.1995.
- EROS Data Center (2000): GTOPO30 [global digital elevation model (DEM)], U. S. Geological Survey's EROS Data Center in Sioux Falls, South Dakota.
- Geiger, R (1961): Das Klima der bodennahen Luftschicht. Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie. 4., neubearb. Aufl. Braunschweig: Vieweg und Sohn, 1961 (Die Wissenschaft. 78).
- Goßmann, H. (1988): Thermalbilder und Oberflächentemperaturen. In: Geomethodica, 12 (1987), S. 117-149, Basel.
- Hartenstein, M. (2000): Analyse eines Bergwindsystems im Nordschwarzwald (Michelbachtal bei Gaggenau) unter Berücksichtigung seiner stadtklimatisch-lufthygienischen Bedeutung. Karlsruher Schriften zur Geographie und Geoökologie, Band 11, Karlsruhe, 2000.
- King, E. (1973): Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefährdung durch Straßenbauten. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 130, Band 17. Offenbach, 1973.
- Kost, W.-J. (1982): Experimentelle Untersuchung zur Ausbreitung von Luftverunreinigungen in einem Talsystem. Diplomarbeit im Fach Meteorologie am Meteorologischen Institut der Universität Karlsruhe, August 1982.

- Lohmeyer (1995): Modellierung der Kaltluftabflüsse und der Ausbreitung von Kfz-Emissionen im Kaltluftabfluss im Gebiet Augustushöhe, Wachwitzgrund und Loschwitzgrund. Ingenieurbüro Dr.-Ing. Achim Lohmeyer, Radebeul. Projekt 707, Mai 1995. Gutachten im Auftrag von: REAL-Beteiligungs-GmbH, Dresden.
- Lohmeyer (2000): Klimaökologische Bewertung des Flächennutzungsplanes der Stadt Chemnitz (Stand: 3/2000). Ingenieurbüro Dr.-Ing. Achim Lohmeyer, Radebeul. Projekt 2193, März 2000. Gutachten im Auftrag von: Stadt Chemnitz.
- Lohmeyer (2004): Handbuch zum Fachinformationssystem METEOKART GIS, Version 1.0, Oktober 2004. Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Radebeul. Projekt 70062-03-10, Oktober 2004. Handbuch im Auftrag von: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- Kuttler, W. (1996): Aspekte der Angewandten Stadtklimatologie. Geowissenschaften 14 (1996), S. 221/228.
- Schädler, G., Lohmeyer, A. (1994): Simulation of nocturnal drainage flows on personal computers. In: Meteorol. Zeitschrift, N.F. 3 167-171.
- Swinbank, W.C. (1963): Long-wave radiation from clear skies. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 89 (1963), pp. 339/348.
- VDI 3787 Blatt 5 (2002): Umweltmeteorologie Lokale Kaltluft. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL, Arbeitsgruppe Lokale Kaltluft, Ausschuss Klima, Vorentwurf Nr. 14 vom 15.02.2002.
- Vogt, J. (1997): Lokale Kaltluftabflüsse und ihre Relevanz für die räumliche Planung, Mikroskalige empirische Untersuchungen zur räumlichen und zeitlichen Struktur von thermisch induzierten Bergwinden im Mittelgebirge, ihrer Modifikation durch Bebauungen und ihre raumplanerische Bewertung. Habilitationsschrift eingereicht an der Geowissenschaftlichen Fakultät der Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Oktober 1997.

A N H A N G A 1:
BESCHREIBUNG DES KALTLUFTABFLUSSMODELLS KALM

A1 Beschreibung des Kaltluftabflussmodells KALM

Das Modell verwendet die sog. Flachwassergleichungen, eine vereinfachte (vertikal integrierte) Form der Grundgleichungen der Strömungsmechanik. Durch diese Vereinfachung ist es möglich, das Modell mit relativ geringem Rechenzeit- und Speicherbedarf auch auf Personal Computern zu betreiben.

Die Bezeichnung "Flachwassergleichungen" hat sich eingebürgert; die Gleichungen eignen sich jedoch genauso zur Beschreibung der Strömung jedes relativ zur Umgebung schweren Fluids, z.B. von Wasser oder von kalter Luft. Eine solche Strömung hat folgende Charakteristika:

- Abfluss über geneigtem Gelände entsprechend der Hangneigung
- Weiterbewegen der "Kaltluftfront" auch über ebenem Gelände
- Auffüllen von Becken (Kaltluftseen)
- Einfluss der Schichtdicke auf Strömungsrichtung und -geschwindigkeit (Druckgradienten).

Angetrieben wird die Strömung durch die auftriebskorrigierte Erdbeschleunigung. Innerhalb der Flachwassergleichungen werden folgende Einflüsse auf die Strömung berücksichtigt:

- Advektion (Transport der Kaltluft mit der Strömung)
- Reibung zwischen Erdoberfläche und Luft: diese Reibung variiert mit der Landnutzung (Freiland: niedrige Reibung, Siedlung: hohe Reibung)
- Beschleunigung oder Abbremsen der Strömung durch Änderung der Geländehöhe und/oder der Kaltluftschichtdicke
- von der Landnutzung abhängige Nullpunktverschiebung des Geländeniveaus zusätzlich zur topografischen Geländehöhe
- von der Landnutzung abhängige Kaltluftproduktion.

Das Lösungsverfahren ist ein Differenzenverfahren mit variabler Gitterpunktzahl und Gitterweite, d. h. Topografie und Landnutzung müssen an den einzelnen Gitterpunkten digitalisiert vorliegen; es wird ein versetztes Gitter verwendet. Um großskalige Einflüsse (z. B. Flusstäler) bei gleichzeitiger hoher Auflösung im interessierenden Gebiet zu berücksichtigen, kann das Modell auf einem geschachtelten Gitter ("Nesting") betrieben werden.

A N H A N G A2:
ERGEBNIS KALTLUFTRECHNUNG AUS LOHMEYER (2000)
(KARTE: „KALTLUFTSITUATION NACH 3 STUNDEN“)

KLIMAÖKOLOGISCHE
BEWERTUNG DES
FLÄCHENNUTZUNGSPLANES
DER STADT CHEMNITZ



Kaltluftsituation
nach 3 Stunden (entnommen
aus Lohmeyer, 2000)
Maßstab: 1 : 75.000



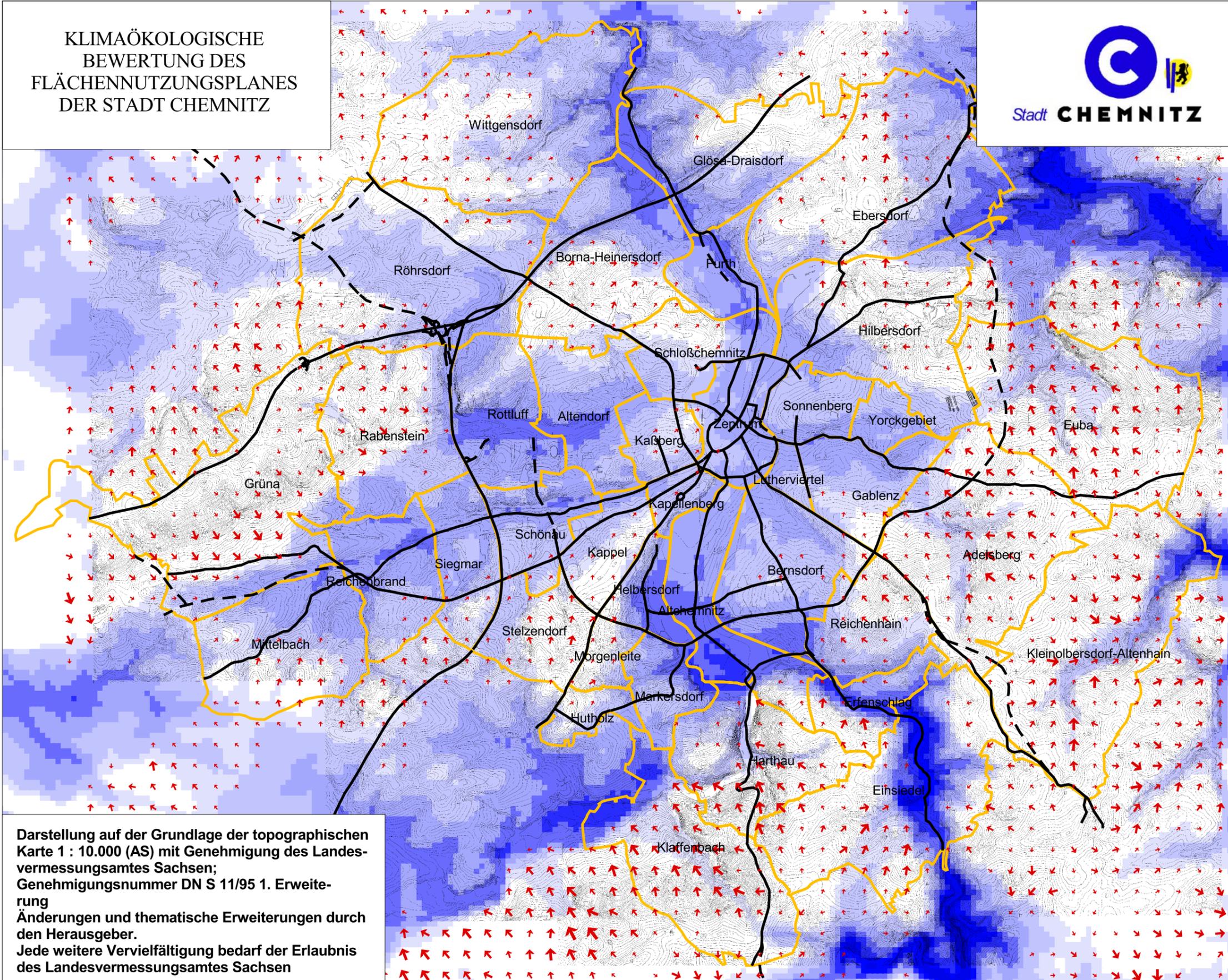
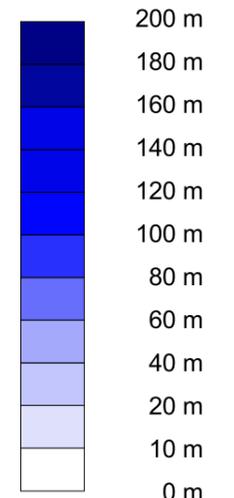
Abb. A2.1

- Stadtteil- bzw. Stadtgrenze
- Hauptstraßennetz
(DTV > ca. 15.000 KFZ/ 24h)
- Straßenplanungen bis zur
Phase der Linienbestimmung

Kaltluftgeschwindigkeit

- < 0,6 m/s
- 0,6 - 1 m/s
- 1 - 1,5 m/s
- 1,5 - 2 m/s
- > 2m/s

Kaltluftschichtdicke



Darstellung auf der Grundlage der topographischen Karte 1 : 10.000 (AS) mit Genehmigung des Landesvermessungsamtes Sachsen; Genehmigungsnummer DN S 11/95 1. Erweiterung Änderungen und thematische Erweiterungen durch den Herausgeber. Jede weitere Vervielfältigung bedarf der Erlaubnis des Landesvermessungsamtes Sachsen

Kaltluftgeschwindigkeiten und -schichtdicken 3 Stunden nach Sonnenuntergang in Chemnitz (stationärer Strömungszustand)

Bearbeiter: Ingenieurbüro
Dr.-Ing. Achim Lohmeyer
Karlsruhe und Dresden
Strömungsmechanik
Immissionsschutz
Windkanaluntersuchungen
Mühlenterr. 14, 01445 Radebeul
Telefon: 0351 8391-0

Bearbeitungsstand: März 2000

Herausgeber: Stadt Chemnitz - Stadtplanungsamt