

SONDERDRUCK aus:

Umweltmeteorologie

Workshop des Fachbereichs II
am 6. und 7. November 1996 in Darmstadt

BAND 25
SCHRIFTENREIHE, 1998



Kommission
Reinhaltung der Luft (KRdL)
im VDI und DIN

Lokale Kaltluft

W. Kuttler, Essen

1. Einleitung

Lokale Kaltluft stellt einen Planungsfaktor dar, der die atmosphärische Umwelt von Menschen, Tieren und Pflanzen sowohl positiv als auch negativ beeinflussen kann. Bei Entscheidungsprozessen im Rahmen der räumlichen Gesamtplanung fällt der Kenntnis der lokalen Kaltluftverhältnisse daher eine dominierende Rolle zu. So lassen sich einerseits positive bioklimatische und lufthygienische Effekte in Siedlungsgebieten durch die Zufuhr von Kaltluft über Luftleitbahnen erzielen, wenn dadurch die städtische Überwärmung vermindert und die Luftqualität verbessert werden.

Andererseits können Täler, Mulden und Beckenlandschaften zu einer Ansammlung von Kaltluft führen, wodurch der Luftaustausch behindert und die Nebel- sowie die winterliche Frostgefahr erhöht werden. Kaltluftakkumulation kann bei Vorhandensein von Emissionsquellen zu einer Verschlechterung der Immissionssituation führen. Auch werden landwirtschaftliche Anbauprodukte durch Frost geschädigt. Letztgenannter Aspekt fällt der Agrarmeteorologie zu und wird hier - mit Hinweis auf die Literatur (z. B. /1/) - nicht behandelt.

Um die Entstehungsbedingungen, Dynamik und Auswirkungen lokaler Kaltluft unter Berücksichtigung einer möglichst objektiven Gütebeurteilung stärker als bisher in die räumliche Planung einbeziehen zu können, beschloß der Fachbereich II "Umweltmeteorologie" des VDI DIN im Jahre 1994, die Erarbeitung einer Richtlinie "Lokale Kaltluft" (VDI 3787, Blatt 5) in Auftrag zu geben. Mit der Festlegung des Namens dieser Richtlinie wird eine Behandlung großräumig entstehender bzw. wirksam werdender Kaltluft, z. B. durch Advektion, ausgeschlossen. Der eingesetzten interdisziplinär tätigen Arbeitsgruppe gehören Meteorologen, Klimatologen, Planer und Ingenieure verschiedener Teildisziplinen an. Das geplante Arbeitsprogramm ist in der vorläufigen Gliederung des Richtlinien textes (Tab. 1) enthalten. Nachfolgend wird der gegenwärtige Sachstand der Bearbeitung dieser Richtlinie dargestellt.

Tab. 1: Vorläufige Gliederung der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5 "LOKALE KALTLUFT"

Kapitelgliederung	Erläuterungen
O. VORWORT	Zielgruppen, Begründung für den Entwurf der Richtlinie
1. EINLEITUNG	Definition, rechtliche Grundlagen, Planungsrelevanz
2. VORAUSSETZUNG ZUR KALTLUFTBILDUNG	Wetterlage; Tages-, Jahresgang; Oberflächenbeschaffenheit, -form; Mindestgrößen der Flächen
3. KALTLUFTPRODUKTION	Bodenart, -typ; Kaltluftbildungspotential, Flächennutzungsänderungen
4. FLIESSBEDINGUNGEN FÜR KALTLUFT	Ebene, geneigte Flächen; Oberflächenbeschaffenheit; Eindringtiefe in bebautes/nicht bebautes Gebiet
5. MÖGLICHKEITEN ZUR BEEINFLUSSUNG DER KALTLUFTPRODUKTION UND DES KALTLUFTFLUSSES	Klimarelevante Ausgleichsflächen; Einfluß von Hindernissen (Dämme, Gebäude, Vegetationsstrukturen)
6. EMPFEHLUNGEN ZUM UNTERSUCHUNGSRAHMEN	Untersuchungsabhängige Maßnahmenwahl; Mindestanforderungen an die Methodik
7. AUSWIRKUNGEN VON KALTLUFT	Positive und negative Auswirkungen
- LUFTHYGIENISCHE AUSWIRKUNGEN	Bezug zwischen Kaltluft und Luftqualität; Einfluß auf die Ausbreitung von Kfz-Emissionen; Quellhöhereinfluß; Kenngrößen zur Beurteilung; Berücksichtigung von Gerüchen und Lärm
- BIOMETEOROLOGISCHE AUSWIRKUNGEN	Human-biometeorologische Wirkungen; Auswirkungen auf Pflanzen
- TECHNISCHE AUSWIRKUNGEN	Straßenplanung (Nebel, Glättehäufigkeit, Gebäudeisolierung, Klimatisierung etc.); Transport spurenstoffbehafteten Nebels
8. PLANUNGSRELEVANZ	Bewertungskriterien; Beispiele zu Flächengrößen, Reichweiten, Eindringtiefe, Aufgleitprozesse an Rauigkeitssprüngen
ANHANG	
A1 DEFINITIONEN	Meteorologische Begriffsbestimmungen zur Regionalplanung unter dem Aspekt Kaltluft
A2 METHODEN	Analogieschlüsse; Geländemessungen; physikalische und numerische Modelle

2. Anforderungen an eine Richtlinie "Lokale Kaltluft"

Mit der zu bearbeitenden Richtlinie wird angestrebt, die Berücksichtigung des Themas Kaltluft in der Landschaftsrahmenplanung und Landschaftsplanung fachgerecht zu fördern. Dadurch soll auch eine formalrechtliche Qualität für die Zielsetzung

gen zum Thema Kaltluft nach den Landesplanungsgesetzen der Länder, dem Baugesetzbuch, den Naturschutzgesetzen des Bundes und der Länder sowie dem UVP-Gesetz erreicht werden.

Die Notwendigkeit, den Planungsfaktor Kaltluft in der Raumplanung zu berücksichtigen, resultiert daraus, daß die Nutzung von Freiräumen häufig in deutlicher Wechselwirkung mit der Kaltluftentstehung, dem Kaltluftabfluß und dem Kaltluftwirkungsgebiet stehen. Das gilt insbesondere auch für die Abschätzung des klimaökologischen Wertes von lokaler Kaltluft, der sich bei der Sanierung und Umnutzung bereits bestehender Baugebiete ändern kann. Eine wichtige Rolle spielt in diesem Zusammenhang die klimaökologische Ausgleichsleistung, die sich zwischen einem Ausgleichsraum und seinem Wirkungsraum entwickelt /2/, /3/. Bezogen auf den Aspekt der Kaltluftwirksamkeit müssen daher die meteorologischen Zustände und Prozesse, die die lokalen Kaltluftverhältnisse charakterisieren sowie deren Auswirkungen für die Anwendung in den verschiedenen Planungsebenen hinreichend bekannt und zumindest in ihren Größenordnungen quantifizierbar sein. Bisher liegen entsprechende Angaben darüber noch nicht vor.

Die Arbeit an dieser Richtlinie verfolgt deshalb auch das Ziel, den aktuellen Kenntnisstand über wichtige Teilaspekte des Phänomens Kaltluft zusammenzustellen, systematisch zu ordnen und in einer der räumlichen Planung zugänglichen Sprache zu beschreiben. Bestehende Wissens- und Darstellungsdefizite sollen dadurch beseitigt und Untersuchungs- sowie mögliche Bewertungsmethoden aufgezeigt und empfohlen werden.

3. Begriffsdefinition, grundsätzliche Probleme

Definitionsgemäß soll unter dem Begriff lokale (= autochthone) Kaltluft dasjenige Luftvolumen verstanden werden, das aufgrund des Energieumsatzes am Ort seines Entstehens eine niedrigere Temperatur aufweist als an der Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion. Die Kaltlufttemperatur wird hier mit dem Begriff Untertemperatur bezeichnet. Es handelt sich um eine relative und nicht um eine absolute Angabe. Kaltluft entsteht hauptsächlich bei negativer Strahlungsbilanz der Oberfläche während windschwacher wolkenloser Nächte. Die Kaltluftproduktivität wird angege-

ben in Volumen kalter Luft pro Fläche und Zeit /4/. Problematisch ist, daß bisher weder für die Höhe der Untertemperatur noch für die Größe des die Kaltluft charakterisierenden Volumens Schwellenwerte existieren, die erreicht bzw. überschritten werden müssen, um von Kaltluft sprechen zu können. Das Phänomen Kaltluft entzieht sich somit einer genauen Definition, durch die seine Quantität und Qualität exakt festgelegt werden können. Kaltluft kann deshalb sowohl durch die erreichte Untertemperatur als auch durch die Größe des abgekühlten Luftvolumens charakterisiert werden. Konventionsgemäß wird die Kaltluftproduktivität meist nach der Größe des untertemperierten Luftvolumens beurteilt.

4. Einflußgrößen der Kaltluftproduktivität

Eine Kaltluftproduktion erfolgt an einer natürlichen Oberfläche unter der Voraussetzung hierfür optimaler meteorologischer Randbedingungen, d. h. bei Advektions- und Wolkenarmut. Darüber hinaus wird die Kaltluftproduktivität durch die Wärmekapazität und den Energietransport des Bodens sowie durch eventuell vorhandene Oberflächenbedeckungen bestimmt. Letztere bestehen in der Regel aus pflanzlichem Bewuchs, Laubstreu oder Schnee.

Die Einflüsse der Vegetation sind abhängig von deren Bedeckungsanteil an der Gesamtfläche sowie von der Bestandsart (z. B. Wiesen-, Kraut-, Strauch- oder Baumvegetation), der -dichte und des -aufbaus. Die Auswirkungen von Laubstreu und Schnee auf die Kaltluftentstehung werden von deren Zusammensetzung, Schichtdicke und Albedo bestimmt. Bodenart und -typ legen die physikalischen Eigenschaften des Untergrundes fest. Hier sind in erster Linie das Porenvolumen und die Lagerungsdichte sowie die Permeabilität, daneben auch die Bodenfarbe, -struktur und -zusammensetzung zu nennen. Exposition und Geländeneigung üben einen weiteren Einfluß auf die Kaltluftproduktivität aus. Die genannten Größen legen den Grad der Strahlungsabsorption und damit die Oberflächentemperatur sowie Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität fest. Auch die Größe der Amplitude des Bodentemperaturganges sowie die Dauer der nächtlichen Ausstrahlung in den mittleren Breiten (Sommer, 9 - 10 Stunden; Winter, 19 - 20 Stunden) bestimmen die Kaltluftproduktivität. Böden mit hoher Dichte leiten die Wärme besser und sind im allgemeinen schlechtere Kaltluftproduzenten als solche mit niedrigerer Dichte und geringerer Wärmeleitfähigkeit.

Unterschiedliche Bodendichten können durch Korngrößendifferenzen verursacht sein, aber auch auf der Einmischung abgestorbenen Pflanzenmaterials (Humus) beruhen. Mit wachsender Korngröße nimmt das Porenvolumen normalerweise zu, so daß z. B. bei trockenem Boden und hohem Luftanteil die Wärmeleitung schlecht und die Kaltluftproduktion gut ist. Eine Erhöhung des Bodenwassergehaltes setzt die Wärmeleitung herauf (Tab. 2). Feuchter Sand erreicht z. B. einen 7fach höheren Wert als trockener Sand. Die Kaltluftmächtigkeit und die Geschwindigkeit des Kaltluftflusses hängen im wesentlichen von der Fläche des Einzugsgebietes und der Geländeneigung ab.

Quarz	8,80
Granit	4,60
Sand; feucht, 40 % Porenvolumen	2,20
Sand; trocken, 40 % Porenvolumen	0,30
Lehmboden; feucht, 40 % Porenvolumen	1,60
Lehmboden; trocken, 40 % Porenvolumen	0,25
Humus	1,30
Moorboden; feucht	0,80
Moorboden; trocken	0,06
Wasser; 4° C, ruhig	0,60
Torfboden; feucht, 80 % Porenvolumen	0,50
Torfboden; trocken, 80 % Porenvolumen	0,06
Luft; 10° C, ruhig	0,02

Schwachgeneigte Hänge oder Täler führen zu geringen Kaltluftmächtigkeiten (zwischen 1 m und 4 m nach 14/, 17/); größere Täler und stärker geneigte Hänge lassen wesentlich höhere Schichtdicken entstehen. Die stärksten Kaltluftabflüsse aus Tälern mit den tiefsten Untertemperaturen lassen sich am häufigsten im Sommer und den Übergangsjahreszeiten nachweisen. Im Winter sind aufgrund der geringeren Einstrahlung, trotz größerer Nachtlänge, Kaltluftabflüsse seltener. Strömende Kaltluft erreicht mittlere Geschwindigkeiten von bis zu $1 m s^{-1}$, in seltenen Fällen bis zu $2 m s^{-1}$ 18/.

5. Kaltluftproduktivität verschiedener Oberflächen

Die Angabe der durchschnittlichen Kaltluftproduktivität verschiedener, nicht bewachsener Oberflächen ist außerordentlich schwierig, da Kaltluft bestimmende Größen des Untergrundes wie Porosität, Permeabilität und Wassergehalt insbesondere in den

oberen Bodenschichten witterungsbedingt innerhalb kurzer Zeit schwanken können. Eine Klassifizierung der Kaltluftherzeugung in qualitativer Hinsicht nahm LESSMANN /9/ für verschiedene Boden- und Bedeckungsarten vor. Er kam zu folgender Reihung: Unbewachsener Boden, Brachfeld, Hackfrüchte, Getreide, trockene Wiese, feuchte Wiese, Schonung, Niederwald, trockenes Moor. Exemplarische Angaben zur Kaltluftproduktivität finden sich in Tab. 3. Als schlechteste Kaltluftlieferanten gelten gut wärmeleitende Böden wie Felsböden, ruhiges, seichtes Wasser und Mineralböden. Im allgemeinen nimmt die Kaltluftbildung mit dem Humus- und Wassergehalt der Böden zu. Feuchte Substrate verfügen zwar im Vergleich zu trockenen über eine größere Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität und müßten demnach schlechtere Kaltluftproduzenten sein.

Tab. 3: Kaltluftproduktionsraten ¹⁾ für verschiedene Landnutzungstypen (zusammengestellt aus /14/)

Lokalität	Produktionsrate [m ³ m ⁻² h ⁻¹]	Landnutzung	Geländeneigung	Quelle ²⁾
Beierbachtal	32	--	15°	HAUF und WITTE 1985
Rohrackeratal	15	gemischt	1:4	KOST 1982
Eifeltäler	12	kurzgehaltene Weide	--	KING 1973
Pfinztal	6	Talsole z. T. bebaut	15 - 20 %	HELDT 1984

¹⁾ Die Angaben der Kaltluftproduktionsraten beruhen sowohl auf Messungen als auch auf numerischer Simulation.

²⁾ Die genannten Quellen sind in /14/ enthalten

Da aber der latente Wärmestrom über die Verdunstung tagsüber relativ hoch und auch nachts meist noch von der Oberfläche weggerichtet ist, sind sie eher zu den Kaltluftbildnern zu rechnen /10/. Bezüglich der Kaltluftproduktivität von Wäldern muß

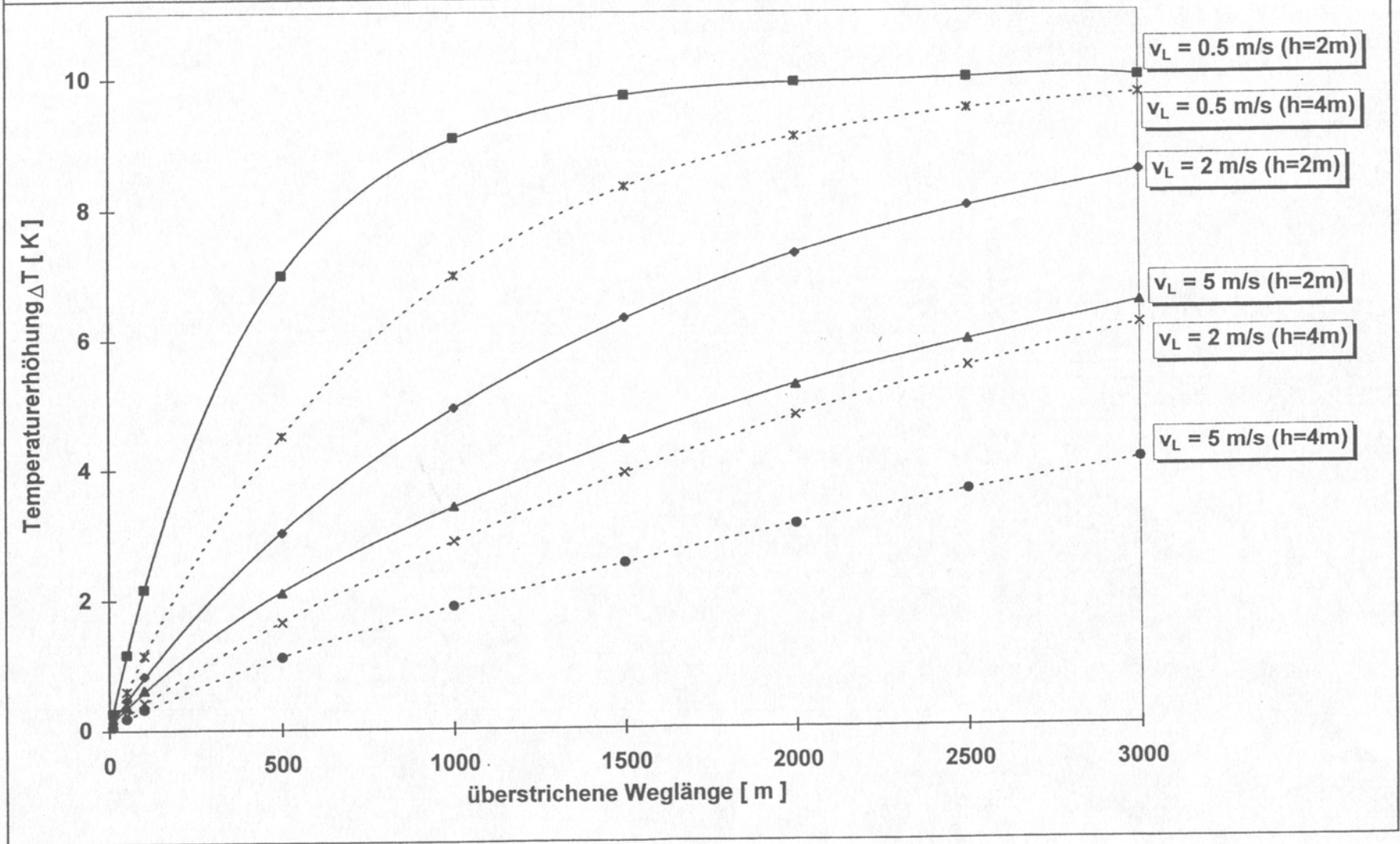
nach der topographischen Lage der Bestände unterschieden werden. Bei Wäldern in ebener Lage oder in Hohlformen sinkt die im Kronendach abgekühlte Luft in den Stammraum ab und stagniert dort. Die Kaltlufttemperatur ist wegen der bestandsklimatischen Verhältnisse im Vergleich zu einer Wiesenfläche in entsprechender Lage absolut höher. Bei Wäldern auf Kämmen oder an Hängen wird die in Bodennähe aus dem Stammraum abfließende Kaltluft durch warme Luft ersetzt, die aus der freien Atmosphäre stammt und von oben in den Bestand eindringt. Die Untertemperatur der sich abkühlenden Luft ist höher als diejenige des in ebener Lage stockenden Waldes /11/. Daher sind Täler, deren Hänge bewaldet sind, weniger frostgefährdet.

Durch Veränderung der Bodenoberfläche kann die lokale Kaltluftproduktivität herauf- oder herabgesetzt werden. Eine Umwandlung ehemals landwirtschaftlich genutzter Flächen in Baum- bzw. Waldbestände führt zu einer geringeren Kaltluftbildung. Auch ist bei einem Wechsel von Grün- zu Ackerland davon auszugehen, daß die Kaltluftproduktivität abnimmt. Denn durch die Bodenverdichtung wird die Wärmeleitung erhöht, was zu einer Verminderung der Kaltluftproduktivität führt.

Urbane Gebiete und große Wasserflächen können die Entstehung von Kaltluft verhindern bzw. bereits vorhandene beseitigen. Im Falle von Siedlungsgebieten erfolgt die Aufzehrung durch die "städtische Wärmeinsel" /12/. Auch ausreichend große und warme Wasserflächen wirken klimatisch verändernd auf ihre Umgebung /13/. Insbesondere können sie darüberstreichende Kaltluft erwärmen, was für den Frostschutz landwirtschaftlicher Anbauprodukte wichtig sein kann /10/.

Je nach der Überströmungslänge der Wasserfläche, der Temperaturdifferenz zwischen überstreichender Kaltluft und wärmerem Wasser sowie der Strömungsgeschwindigkeit der Luft über der Wasseroberfläche lassen sich die für verschiedene Vorgaben berechneten Beispiele aus Abb. 1 entnehmen. Beträgt z. B. die überstrichene Weglänge eines Wasserkörpers 1000 m und die Temperaturdifferenz zwischen Wasser und Luft anfangs 10 K, so resultiert für eine 2 m mächtige Kaltluftschicht, die sich mit $0,5 \text{ m s}^{-1}$ über eine Wasserfläche bewegt, nach 1000 m eine Temperaturerhöhung von etwa 9 K.

Abb. 1: Beispiel einer Temperaturerhöhung einer über ein wärmeres Gewässer ($\Delta T = 10 \text{ K}$) strömenden Luftschicht für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten (v_L) (nach /15/)



Bei 10fach höherer Transportgeschwindigkeit wird die Kaltluft nur um etwa 5 K erwärmt. Unter Zugrundelegung größerer Schichtdicken (z. B. 4 m) fallen die Temperaturerhöhungen natürlich kleiner aus.

Zur Bestimmung der Produktivität und Dynamik von Kaltluft über einer Oberfläche lassen sich Geländemessungen und Modellrechnungen einsetzen. Geländemessungen sind von der gerätetechnischen Seite her als aufwendig anzusehen, da Punkt- und Flächenerhebungen mit der Aufnahme von horizontalen und vertikalen Profilen unterhalb und oberhalb der Bodenoberfläche für verschiedene meteorologische Größen durchzuführen sind. Die möglichst genaue Bestimmung der Bodenfeuchte spielt dabei eine maßgebliche Rolle. In geneigtem Gelände ist der Kaltluftabfluß zu erfassen. Für dessen Nachweis bietet sich der Einsatz von Raucherzeugern, insbesondere jedoch von Tracern (z. B. Schwefelhexafluorid (SF_6)) /16/, /17/ an.

Werden numerische oder physikalische Modelle verwendet, sollte sichergestellt sein, daß diese die Thermo- und Strömungsdynamik von Kaltluftvolumina in realistischer Weise simulieren. Dabei hängt die Genauigkeit der Modellergebnisse natürlich in hohem Maße von den Eingabedaten zur Geländestruktur, der Landnutzung sowie den bodenphysikalischen Parametern ab.

Ein Überblick über die verschiedenen numerischen Modelltypen und entsprechende Anwendungsbeispiele findet sich bei /18/ bis /20/. Über die Probleme und Ergebnisse, die sich aus der Anwendung eines Windkanalmodells zur Bestimmung der Kaltluftdynamik ergeben, berichten /21/.

6. Offene Fragen, Forschungsbedarf

Die bisherigen Arbeiten an dieser Richtlinie haben gezeigt, daß es noch viele nicht gelöste Probleme bei der Behandlung des Aspektes "Lokale Kaltluft" gibt. Offene Fragen bestehen insbesondere im Bereich der Kaltluftproduktivität, des Kaltluftabflusses und der Bewertung des Phänomens Kaltluft.

Kaltluftproduktivität: Nach wie vor mangelt es an exakten Angaben über die vom Flächennutzungstyp abhängige Kaltluftbildung, und zwar sowohl hinsichtlich der sich einstellenden Untertemperaturen der Kaltluft als auch bezüglich des jeweils produzierten Kaltluftvolumens. Von planerischer Seite werden zu Recht konkrete Angaben zur notwendigen Größe von Kaltlufteinzugsgebieten erwartet, über die bisher leider

nur wenige exemplarische Arbeiten vorliegen. Hierzu zählt insbesondere das vielfach noch unzureichende Wissen über die Kaltluftproduktion unterschiedlicher Waldtypen. Ebenso ist nach wie vor unklar, welche Größe innerstädtische Grünflächen aufweisen müssen, um belüftungsrelevant Kaltluft zu produzieren und wie groß deren bioklimaverbessernde Wirkung auf das umliegende bebaute Gebiet ist.

Kaltluftabfluß: Für die Kaltluftdynamik ist neben der Größe des Einzugsgebietes insbesondere die Struktur und Gestaltung der Kaltlufttransportbahnen ein wichtiger Faktor. Über Ergebnisse von Untersuchungen über die Länge und Mindestbreite von Belüftungsschneisen berichten /22/. Wenig untersucht ist in diesem Zusammenhang auch die Frage nach der Eindringtiefe von Umlandkaltluft in bebautes Gebiet. Erste Resultate aus Messungen liegen hierfür vor /17/. Auch sollte die Wirkung von Hindernissen auf die Kaltluftausbreitung bekannt sein.

Bewertung des Phänomens Kaltluft: Eine objektive Bewertung der lufthygienischen und bioklimatischen Wirksamkeit von lokaler Kaltluft ist für die Abschätzung ihrer Planungsbedeutsamkeit notwendig. Hierbei ist zu klären, ob es sich bei der transportierten Kaltluft um Frischluft oder um mit Emissionen vorbelastete Luft handelt. Ferner sind Fragen nach der Häufigkeit und Intensität von Kaltlufttransporten für eine planerische Bewertung wichtig.

Die genannten Probleme konnten hier nicht erschöpfend behandelt werden. Aufgabe der Richtlinienarbeit wird es deshalb auch sein, Wissenslücken, deren Schließung weiterer Forschung bedarf, aufzuzeigen.

7. Literatur

- /1/ Schnelle, F. (Hrsg.): Frostschutz im Pflanzenbau. Bd. 1 u. 2, München, Basel, Wien: BLV Verlagsgesellschaft, 1963.
- /2/ BMBau (= Schriftenreihe "Raumordnung" des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau) (Hrsg.): Regionale Luftaustauschprozesse und ihre Bedeutung für die räumliche Planung. Nr. 06.032. Forschungsprojekt BMBau RS VI-704102-76.08, Bonn, Bad Godesberg, 1978.
- /3/ BMBau (= Schriftenreihe "Raumordnung" des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau) (Hrsg.): Zuordnung und Mischung von bebauten und begrüntem Flächen. Nr. 03.044. Städtebauliche Forschung, Bonn, Bad Godesberg, 1976.

- /14/ King, E.: Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefährdung durch Straßenbauten. Ber. d. DWD, 130, Bd. 17, Offenbach/Main, 1973.
- /15/ Berényi, D.: Mikroklimatologie. Mikroklima der bodennahen Atmosphäre, Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1967.
- /16/ Scheffer, F., Schachtschabel, P.: Lehrbuch der Bodenkunde. 12. Neubearb. Aufl., Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1989.
- /17/ Hauf, T., Witte, N.: Fallstudie eines nächtlichen Windsystems. Meteorol. Rdschau, 38, 33-42, 1985.
- /18/ Defant, F.: Zur Theorie der Hangwinde nebst Bemerkungen zur Theorie der Berg- und Talwinde. Archiv Meteorol., Geophys., Bioklimatol., Serie A, 1, 421-450, 1949.
- /19/ Lessman, H.: Allgemeine meteorologische und klimatologische Grundlagen. Arbeiten DLG, 9, 10-20, 1950.
- /10/ Baumgartner, A.: 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.
- /11/ Gossmann, H.: Thermalbilder und Oberflächentemperaturen. Geomethodica. 12, 117-149, 1987.
- /12/ Kuttler, W.: Städtische Klimamodifikation. VDI Berichte 1330, 87-108, 1997.
- /13/ Kuttler, W.: Zum klimatischen Potential urbaner Gewässer.- In: Schuhmacher, H. und B. Thiesmeier (Hrsg.): Urbane Gewässer - mit Beiträgen zur Limnologie, Stadtökologie, Klimatologie, Wasserwirtschaft und Planung. Essen: Westarp Verlag, 378-394, 1991.
- /14/ Schirmer, H., Kuttler, W., Löbel, J., Weber, K. (Hrsg.): Lufthygiene und Klima. Ein Handbuch zur Stadt- und Regionalplanung. Düsseldorf: VDI Verlag, 1993.
- /15/ Ropertz, A.: pers. Mitteilung; FH Düsseldorf, Fb 4.
- /16/ Kleiser, Th., Grimm, B.: Traceruntersuchungen - Möglichkeit zur Quantifizierung von Schadstoffausbreitungsbedingungen. UVP-report 5-94, 275-277, 1994.
- /17/ Kuttler, W.: Aspekte der Angewandten Stadtklimatologie. Geowissenschaften 14, 6, 221-228, 1996.
- /18/ Gerth, W. P.: Klimatische Wechselwirkungen in der Raumplanung bei Nutzungsänderungen. Ber. d. DWD, 171, Offenbach/Main, 1986.

- /19/ Gross, G.: Numerical simulation of the nocturnal flow system in the Freiburg area for different topographies. Beitr. z. Phys. d. Atmos., 62, 1, 57-72, 1989.
- /20/ Schädler, G., Lohmeyer, A.: Simulation of nocturnal drainage flows on personal computers. Meteorol. Zeitschr. NF 3, 167-171, 1994
- /21/ Kuttler, W., Romberg, E.: The occurrence and effectiveness of country breezes by means of wind tunnel and in situ-measurements. Proc. 9th World Clean Air Congress, Montreal, Quebec, Kanada, Aug. 30 - Sept. 4, IU - 9 A.04 1-12, 1992.
- /22/ Matzarakis, A., Mayer, H.: Mapping of urban air paths for planning in Munich. Wiss. Ber. Inst. Meteorol. Klimaforsch. Univ. Karlsruhe 16, 13-22, 1992.