

Prof.Dr.rer.nat. Axel Zenger
Fachhochschule Mainz
Umweltschutz im Bauwesen
Holzstraße 36
55116 Mainz

Analyse und Bewertung von Kaltluftabflüssen

Zusammenfassung

Kaltluftabflüsse sind lokale Windsysteme, die in klaren Nächten bei windschwachen Wetterlagen auftreten. Sie haben eine große lufthygienische und klimatische Relevanz, da Kaltluftströme bei austauschschwachen Wetterlagen zu einer Belüftung von thermisch und lufthygienisch belasteten Stadtgebieten beitragen können. Aufgrund der thermisch stabilen vertikalen Schichtung ist die Vermischung innerhalb eines Kaltluftabflusses nur gering. In das Strömungssystem eingebrachte Emissionen werden daher relativ unverdünnt transportiert und können zu einer Schadstoff- oder Geruchsbelastung auch in entfernt gelegenen Siedlungsgebieten beitragen. Um Kaltluftabflüsse in der Planung zu berücksichtigen können numerische Modelle eingesetzt werden. Viele der derzeit in der Praxis angewendete Verfahren liefern realitätsnahe Ergebnisse. Hierbei ist es von großem Vorteil, daß die berechneten Ergebnisse durch Messungen an ausgewählten Punkten anhand des Ist-Zustands leicht überprüft und verifiziert werden können.

An ausgewählten Beispielen werden die Einsatzmöglichkeit des Kaltluftabflußmodells NDFM¹ dargestellt. Es zeigt sich, daß die Auswirkungen einer baulichen Maßnahme schon im Vorfeld detailliert abgeschätzt werden können.

Phänomenologie

In wolkenarmen, windschwachen Nächten bildet sich durch die thermische Ausstrahlung in Bodennähe kühle Luft. Diese fließt in gegliedertem Gelände hangabwärts², da kalte Luft wegen der größeren Dichte in Richtung der tiefer gelegenen Stellen des Geländes strömt. Die Intensität, d.h. die Mächtigkeit und Geschwindigkeit dieses "Kaltluftstroms" hängt dabei im wesentlichen von der Größe und Art des Einzugsgebietes, der Hangneigung, der aerodynamischen Rauigkeit und der Weite vorhandener Täler ab. Während in räumlich eng begrenzten Hangbereichen ohne größere Einzugsgebiete Schichtdicken im Meterbereich und Abflußgeschwindigkeiten von etwa 0,1 bis 1 m/s auftreten (King, 1973), werden in ausgedehnten Talsystemen Geschwindigkeiten von bis zu einigen m/s und Schichtdicken von vielen Dekametern beobachtet. Kaltluftströmungen setzten etwa zur Zeit des Sonnenuntergangs ein und dauern bei guten Bedingungen die ganze Nacht an.

Kaltluftabflüsse treten in unseren Breiten relativ häufig auf. Zwischen Juli und Oktober z.B. werden in Süddeutschland mancherorts in ca. 20% bis 40%, im restlichen Jahr in etwa 10% bis 20% der Nächte Kaltluftabflüsse beobachtet (Held, 1984).

Klimatische und lufthygienische Relevanz

Kaltluftabflüsse können siedlungsklimatisch und lufthygienisch sehr relevant sein. Aber auch im Hinblick auf den Wärmebedarf eines geplanten Siedlungsgebietes oder die mögliche Frostgefährdung von Straßen oder empfindlichen Pflanzungen spielt die Beurteilung von Kaltluftabflüssen eine große Rolle. Man unterscheidet

- *siedlungsklimatische Aspekte*
Liegt ein Siedlungsgebiet im Einflußbereich eines Kaltluftabflusses, so wird es durch diesen in

¹ NDFM : Nocturnal Drainage Flow Model

² je nach aerodynamischer Rauigkeit bei Hangneigungen größer etwa 2 Grad

windschwachen (Nacht-) Zeiten belüftet (Abb.1). Dies ist meist mit einer Zufuhr von „unbelasteter“ Frischluft verbunden, da sich die Kaltluftzugsareale im Allgemeinen eher in Reinluftgebieten befinden. Im Sommer geht mit der Verbesserung der lufthygienischen Situation auch ein klimatischer Ausgleich einher, da Kaltluftabflüsse zu einer Temperaturabsenkung und damit zu einer Verminderung des Schwüleempfindens beitragen.

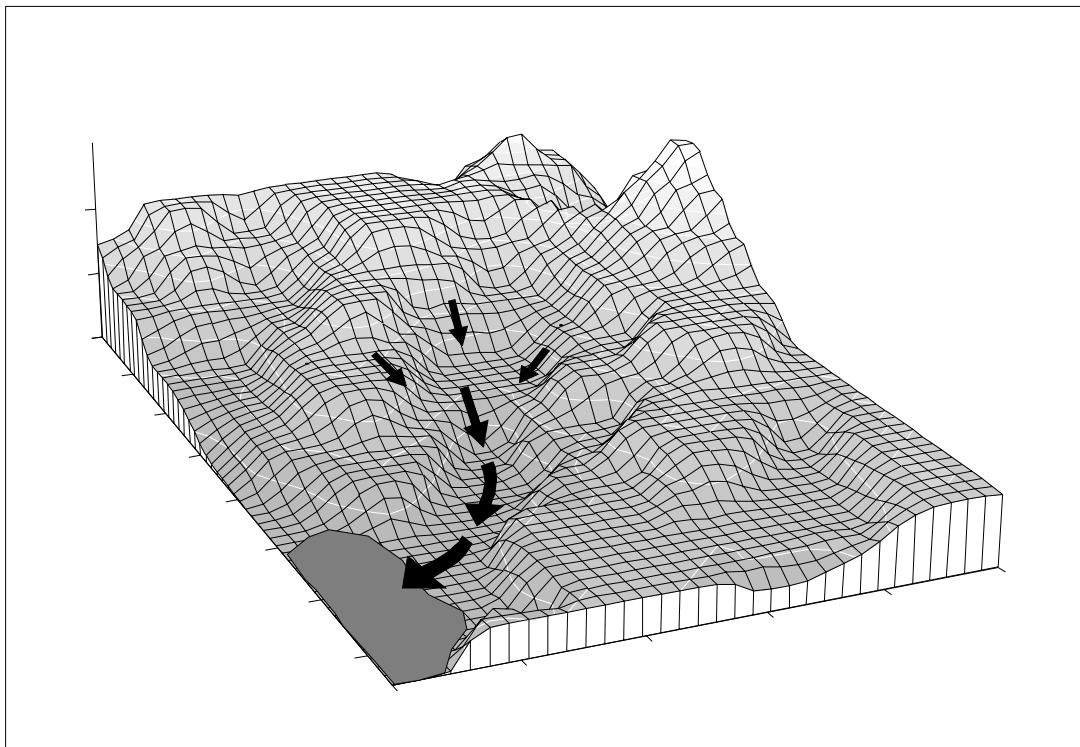


Abb.1 : Kaltluftabflüsse sind siedlungsklimatisch relevant, wenn sie kühle und relativ unbelastete Luft aus dem Umland bis in die Siedlungsgebiete führen.

- *lufthygienische Aspekte*

Überstreicht der Kaltluftabfluß eine Geruchs- bzw. Schadstoffquelle wie z.B. eine Deponie, ein Kompostwerk bzw. eine Fabrik oder eine stark befahrene Straße, so wird die Ausbreitung der dort freigesetzten Emissionen wesentlich beeinflusst. Die Luftmassen eines Kaltluftabflusses sind vertikal thermisch stabil geschichtet. Als eine Folge davon ist die turbulente Durchmischung stark herabgesetzt. Zusammen mit der Kanalisierung der Strömung kommt es hierdurch längs des Ausbreitungspfades zu einer, im Vergleich zu „normalen“ meteorologischen Bedingungen nur sehr geringen Verdünnung. Hohe Immissionskonzentrationen können dann über große Distanzen beobachtet werden und führen gegebenenfalls zu einer Geruchsbelästigung oder Schadstoffbelastung auch im Bereich weit entfernter Siedlungsgebiete (siehe z.B. Zenger et al., 1994).

- *siedlungsökologische und verkehrstechnische Aspekte*

Im Bereich des Kaltluftabflusses sind die Temperaturen gegenüber dem Umland deutlich herabgesetzt. Staut sich die Kaltluft vor Hindernissen, so bildet sich ein „Kaltluftsee“ in dem besonders niedrige Temperaturen auftreten können. Durchquert eine Straße einen Kaltluftabfluß oder Kaltluftsee, so ist mit einer lokal begrenzten, erhöhten Frostgefährdung im betroffenen Areal zu rechnen. Bei sensiblen landwirtschaftlichen Pflanzungen, wie z.B. beim Weinanbau oder der Pflanzenaufzucht können aufgrund der erhöhten Frostgefährdung im Bereich des Kaltluftabflusses Ernteeinbußen auftreten. Liegt ein Siedlungsgebiet in einem Kaltluftsee, so ist mit einem erhöhten Energiebedarf zur Wärmeversorgung zu rechnen.

Die oben genannten Beispiele verdeutlichen, daß in einer Vielzahl von Planungsbereichen eine detaillierte Kenntnis der Kaltluftabflüsse und ihrer möglichen Modifikation durch vorgesehene Baumaßnahmen erforderlich ist.

Analyse von Kaltluftabflüssen

Zur Analyse von Kaltluftabflüssen werden *Freilandmessungen* und *numerische Modellierungen* eingesetzt. Analytische Modelle (z.B. Defant, 1933, Prandtl, 1942 u.ä.) haben meist einen stark eingeschränkten Anwendungsbereich und können nur schwierig auf die vorhandene Topographie übertragen werden.

Durch *Freilandmessungen* kann eine punktuelle Analyse der bestehenden Kaltluftabflüsse (im Ist-Zustand) erfolgen. Eingesetzt werden hierbei je nach Fragestellung

- bodennahe Rauchversuche zur Visualisierung der Strömung
- Ballonaufstiege oder SODAR-Messungen zur Ermittlung des vertikalen Geschwindigkeits- und Temperaturprofils
- Tracergasuntersuchungen zur Bestimmung der Verdünnung innerhalb des Abflusses

In der Abb. 2 ist als Beispiel das während eines Ballonaufstieges in einem Tal gemessene vertikale Temperaturprofil zu zwei verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Deutlich erkennt man, wie sich schon 2 Stunden nach Sonnenuntergang eine bodennahe Kaltluftschicht ausbildet, in der die Temperatur mit der Höhe zunimmt³. 4 Stunden nach Sonnenuntergang hat die Kaltluft eine große vertikale Mächtigkeit erreicht. Die Temperaturabnahme mit der Höhe reicht bis etwa 50 m.

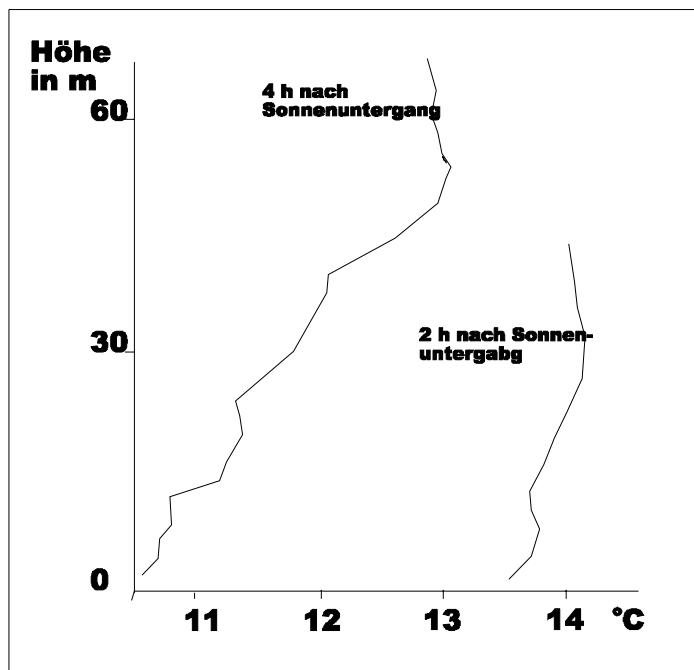


Abb.2 : Temperaturprofil zu zwei Zeitpunkten des Kaltluftabflusses

Numerische Analysen eines Kaltluftabflusses werden durchgeführt um

- über die punktuell ermittelten Ergebnisse hinaus auch eine flächenhafte Information des Kaltluftregimes zu bekommen
- die Auswirkungen einer geplanten Baumaßnahme auf den Abfluß vorherzusagen
- die Ausbreitungsbedingungen während Kaltluft-Wetterlagen zu analysieren (Immissionsprognose).

Numerische Modellierung von Kaltluftabflüssen

Bei den Kaltluftabflüssen handelt es sich um ein zeitlich variables, dynamisches Strömungssystem. Die Strömung wird im wesentlichen durch die Druckgradienten-, die Reibungs- und die Trägheitskraft bestimmt. Eine genaue Modellierung des Abflusses ist nur mit einem prognostischen numerischen

³ In einer neutral oder gar labil geschichteten Atmosphäre nimmt die Temperatur mit der Höhe ab.

Modell möglich, das die Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und innerer Energie löst. Derzeit werden einige, zum Teil recht unterschiedliche Modelle zur Simulation des Kaltluftabflusses eingesetzt von denen nachfolgend einige ausgewählte⁴ Vertreter vorgestellt werden sollen.

- Das Modell **KLAM** des deutschen Wetterdienst (Gerth, 1986) erfaßt die Dynamik des Kaltluftabflusses nur über die lokale Geländeneigung. Die strömungsdynamischen Grundgleichungen werden nicht gelöst. Geht ein Kaltluftabfluß z.B. von einem Hang in ebenes Gelände über, so prognostiziert KALM, daß die Geschwindigkeit in der Ebene augenblicklich Null wird. Naturmessungen belegen, daß dies ein sehr unrealistisches Ergebnis ist. Der deutsche Wetterdienst entwickelt das Modell derzeit weiter. Die zukünftige Version wird auf einer Lösung der Flachwassergleichungen (analog zu KALM, NDFM,s.u.) beruhen (Gerth, 1997).
- **FITHNAH** (Groß, 1985) ist ein dreidimensionales nichthydrostatisches numerisches Modell, daß neben den Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und innerer Energie auch noch die Bilanzgleichungen für Feuchte schließt. Die Diffusionskoeffizienten werden explizit aus der turbulenten kinetischen Energie berechnet. Gute Übereinstimmungen mit Naturmessungen sind dokumentiert.
- **KALM** (Schädler und Lohmeyer, 1994) basiert auf einer vertikal integrierten Form der strömungsdynamischen Grundgleichungen, den sogenannten Flachwassergleichungen. Ortsspezifische Reibungskoeffizienten und Kaltluftproduktionsraten können vorgegeben werden. Ausgewählte Modellrechnungen und Vergleiche mit Naturmessungen belegen die Leistungsfähigkeit des Modells, das durch seine einfache physikalische Beschreibung auch auf PC's läuft.

Nachfolgend wird das Modell NDFM vorgestellt, dem ebenfalls die „Flachwassergleichungen“ zugrunde liegen.

Grundlagen des Modells NDFM

Das Modell NDFM basiert auf der vertikal integrierten Form der strömungsdynamischen Grundgleichungen, den sogenannten Flachwassergleichungen (siehe z.B. Pedlosky, 1987).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \text{gradu} = -g' \cdot \text{grad}H - c_d \cdot u \cdot |u| \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + (u \cdot h) = Q \quad (2)$$

Hierbei ist \mathbf{u} ist der horizontale Geschwindigkeitsvektor, Q die Produktionsrate an Kaltluft, H die Absoluthöhe der Kaltluftobergrenze, h die Schichtdicke des Abflusses und c_d der Reibungs- bzw. Dragkoeffizient. Der Dragkoeffizient kann in NDFM wahlweise zeitlich konstant (wie z.B. bei dem Programm KALM) in Abhängigkeit der Kaltluftschichtdicke variabel angesetzt werden.

⁴ Die Auswahl beruht auf dem „Bekanntheitsgrad“ und hat nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

Je höher die Kaltluftschicht mit der Zeit anwächst, desto geringer wird dann der Reibungsterm. Dies wird mit dem funktionelle Zusammenhang

$$c_d \approx \left(\kappa / \ln (z_r / z_o) \right)$$

(siehe z.B. Roedel 1992) beschrieben. κ ist die von Karman-Konstante, z_o die Rauigkeitslänge und z_r die Referenzhöhe der Kaltluftschicht. g' in Gleichung (1) ist die reduzierte Gravitationskonstante, die für die Beschleunigung wirksam ist. Sie ergibt sich zu $g' = \Delta T / T_o$ wobei T_o die Umgebungstemperatur außerhalb des Abflusses und ΔT die mittlere (Schichtmittel) Temperaturdifferenz zur Umgebung darstellt. Die Gleichungen werden auf einem diskreten Rechengitter mit Hilfe einer finiten Differenzenmethode⁵ gelöst. Ortsspezifische Besonderheiten der Landnutzung werden über eine variable Vorgabe der Produktionsraten und Rauigkeiten z.B. entsprechend der Kategorien *Wald*, *Freiland* und *Bebauung* individuell berücksichtigt. Hierbei werden Literaturdaten entsprechend der Tabelle 1 zugrunde gelegt.

Kategorie	Einheit	Freiland	Wald	Bebauung
Kaltluftproduktionsrate Q	m ³ /(m ² *h)	8-14	4-8	0
Rauhigkeitslänge z _o	m	0,01-0,1	0,5-2	1-5

Tabelle 1: Bandbreite der Eingangsparameter

Die Bandbreite der in der Tabelle 1 aufgeführten Werte ist an die Variation der bei Naturmessungen gefundenen Ergebnisse angelehnt. Hierbei muß jedoch erwähnt werden, daß die Streuung der in der Literatur aufgeführten Ergebnisse die hier angegebene Variationen teilweise noch übersteigt.

Vorgehen

Das Modell NDFM kann für alle Strömungen angewendet werden, die durch das Abfließen kalter Luft über geneigtem Gelände oder durch die Kanalisierung des Kaltluftstroms in Tälern angetrieben sind. Aber auch das Vordringen der Kaltluft in ebenem Gelände, die Ausbildung von Kaltluftseen in Mulden und das Überströmen von Hindernissen können durch die verwendeten Gleichungen realitätsnah modelliert werden. Die Vorgehensweise soll anhand der Abb. 3 erläutert werden. In einem ersten Schritt wird die Topographie des zu untersuchenden Geländes aufgenommen (Abb. 3 oben). Falls auf kein digitales Geländemodell zurückgegriffen werden kann müssen die Höhenlinien digitalisiert werden. Danach werden die Areale mit den jeweiligen Kaltluftproduktionsraten und aerodynamischen Rauigkeiten festgelegt und digitalisiert. Mit Hilfe dieser Eingangsdaten berechnet das Modell NDFM das Geschwindigkeitsfeld des Kaltluftabflusses sowie die räumliche Verteilung der Schichtdicke als Funktion der Zeit (Abb. 3 unten). Durch die Multiplikation der Geschwindigkeit mit der Schichtdicke kann der (klimatologisch relevante) Volumenstrom des Abflusses ermittelt werden.

⁵ explizite Methode, d.h. Vorwärtsdifferenzen in der Zeit; zentrierte Differenzen im Raum. Lösung auf einem äquidistanten „staggered grid“. Behandlung der Advektion wahlweise mit Upstream-Verfahren bzw. mit Korrektur der num. Diffusion (siehe z.B. Kinzelbach, 1992).

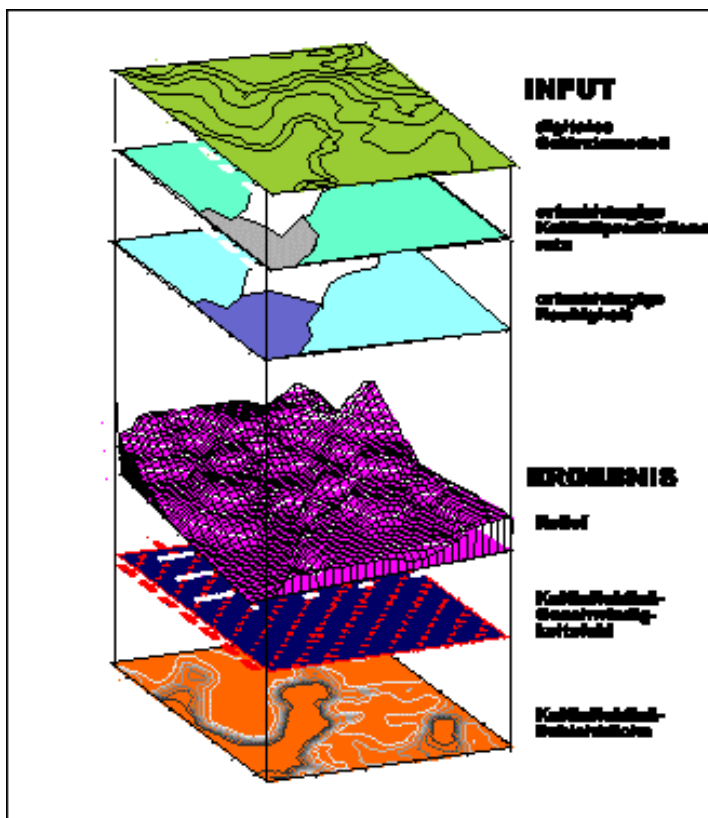


Abb.3: Vorgehen bei der numerischen Analyse eines Kaltluftabflusses mit dem Model NDFM

Einfaches Beispiel und Vergleich mit analytischem Ergebnis

In einem ersten Beispiel soll die Methode und die Leistungsfähigkeit des Modells anhand eines analytisch überprüfbaren Falls (Schädler und Lohmeyer, 1994) demonstriert werden. Ein geneigter Hang geht in einem Abstand von 1.5 km in eine waagerechte Ebene über (Abb.4).

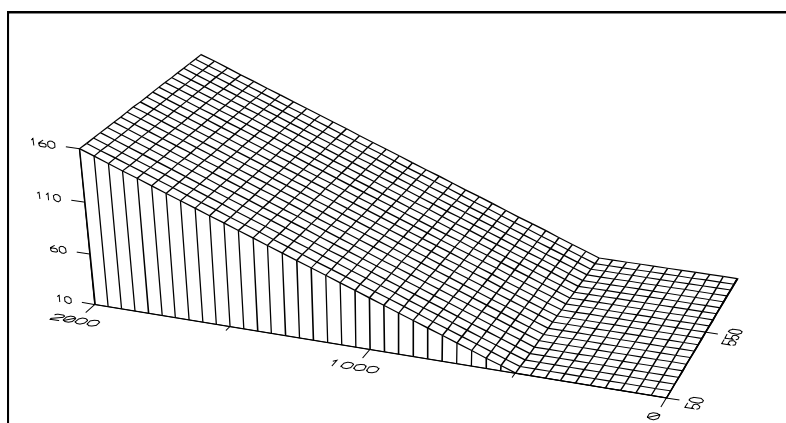


Abb.4 : Topographie des Analysegebietes für das die analytische Vergleichrechnung durchgeführt wurde.

Die analytische Lösung der Bewegungsgleichungen ergibt für den gewählten Fall, daß die Kaltluft vor dem Übergangsbereich zur Ebene parallel zur Geländeneigung mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s abfließt. Im Übergangsbereich zwischen der geneigten Fläche und der Ebene reduziert sich die Geschwindigkeit, ein Aufstauen der Kaltluft und seitliches Ausweichen der Strömung wird erwartet. Das Ergebnis der numerischen Strömungsmodellierung ist in der Abb. 5 dargestellt. Der Vergleich des analytischen Ergebnisses mit der numerischen Berechnung zeigt eine gute Übereinstimmung.

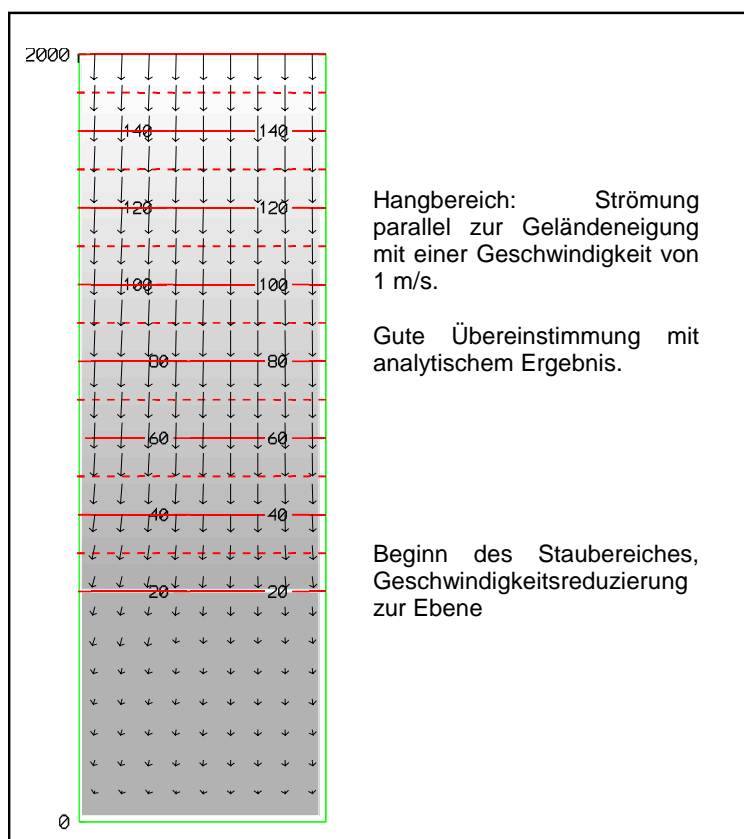


Abb.5: Geschwindigkeitsfeld des Kaltluftabflusses .Die Pfeillänge ist proportional zur Geschwindigkeit des Abflusses

Vergleich mit Naturmessungen

In der Literatur sind nur wenige Kaltluft-Untersuchungskampagnen mit einer größeren Anzahl räumlich weit verteilter Meßstationen dokumentiert. Im nachfolgenden Fall werden Messungen des Kaltluftregimes im Rohrackertal östlich von Stuttgart (Kost, 1982) herangezogen, um die Ergebnisse des Modells NDFM zu überprüfen.

Das Rohrackertal erstreckt sich von West nach Ost und mündet bei etwa 800 m. Die Seitentäler sind im Mittel 1,5 km lang und ca. 300 m breit. Der Höhenunterschied zwischen dem Taloberrand und dem Talausgang beträgt 220 m. In dem Tal befinden sich neben unbebauten Regionen Areale mit Wohnbebauung, Gartenanlagen, Weinbergen und bewaldeten Gebieten. Im Bereich des Talausgangs liegt der Ort Hedelfingen. Hier beginnt ein dicht bebautes Industriegebiet. Eine Höhenliniendarstellung des Untersuchungsgebietes sowie eine Reliefdarstellung der Orographie findet sich in der Abb. 6. Die meteorologische Meßkampagne fand zwischen Ende Juni und Anfang Juli 1981 statt (Kost, 1982). Aus den meteorologischen Messungen zeigte Kost (1982), daß im Rohrackertal ein lokales Windsystem vorhanden ist, das nachts durch Kaltluftströmungen in Richtung des Neckartals geprägt wird. Aus der Fläche des Einzugsgebietes und dem Abfluß am Talausgang ermittelte Kost (1982) eine mittlere Kaltluftproduktionsrate zwischen 13 und $14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Ballonaufstiege an der Station x (siehe Abb. 6) während einer typischen Strahlungsnacht ergaben, daß der Kaltluftabfluß hier im Mittel eine Schichtdicke von etwa 60 - 70 m und eine vertikal integrierte Abflußgeschwindigkeit von ca. 1 - 2 m/s

aufweist. Ausgehend von der Topographie des Talsystems und einer Kaltluftproduktionsrate von $13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ für nicht bebautes Areal wurde mit dem Modell NDFM das Kaltluftregime in einem $7 \text{ km} \times 6 \text{ km}$ großen Gebiet an 4331 Gitterpunkten mit einer Zeitauflösung von 5 s berechnet. Als Ergebnis sind in der Abb.6 exemplarisch die an 5 verschiedenen Meßpunkten während der Nachtstunden beobachteten (grau unterlegt) und die berechneten Windrichtungsverteilungen dargestellt. Es zeigt sich, daß die nächtliche Windrichtungsverteilung durch das Modell recht gut wiedergegeben wird. Die Berechnung ergab weiterhin, daß die mit dem Modell ermittelte Kaltluft-Schichtdicke im steady state (nach ca. 4 h) im wesentlichen durch die Mächtigkeit des Kaltluftstroms im Neckartal bestimmt wird. An der Station x ergab sich die Schichtdicke zu etwa 50 -60 m, die vertikal gemittelte Geschwindigkeit variierte zwischen 1 und 2 m/s. Dies kann jedoch nicht als gute oder schlechte Übereinstimmung mit den Messungen interpretiert werden, da der Kaltluftabfluß des Neckartals bei dem gewählten Modellausschnitt nicht korrekt behandelt wurde. Der Kaltluftabfluß des Neckartals könnte durch die Vorgabe der Schichtdicke und Geschwindigkeit am nördlichen Einströmrand des Modellgebietes berücksichtigt werden, hierzu müßten jedoch Profilmessungen im Neckartal vorliegen.

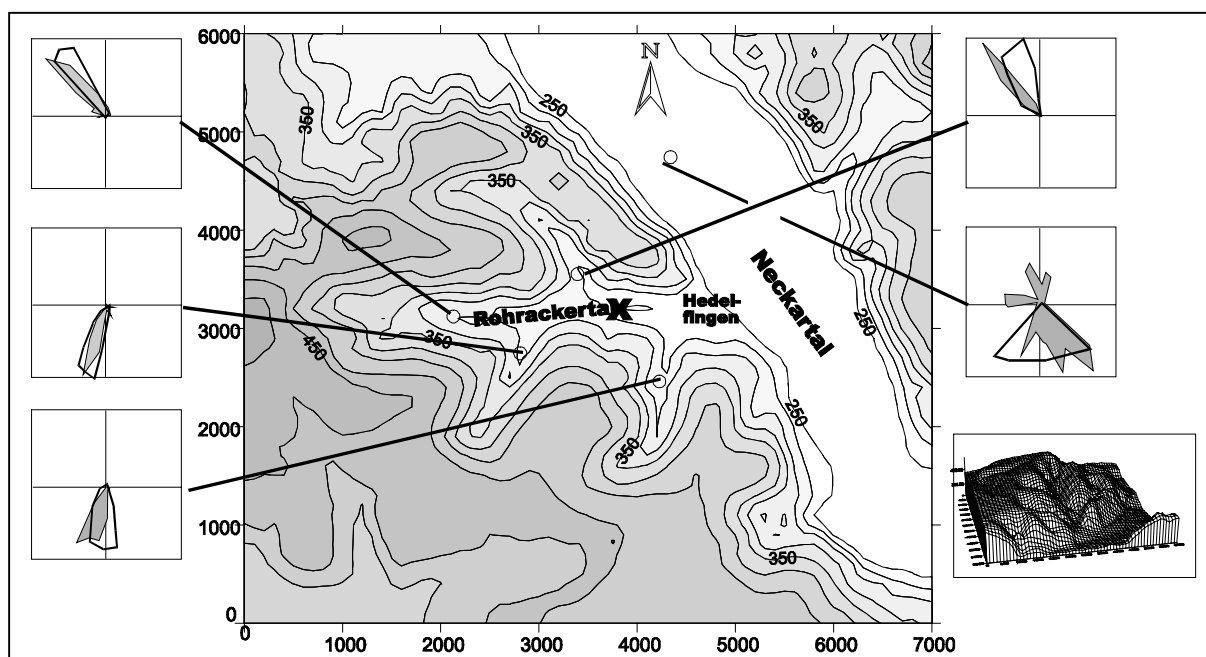


Abb.6: . Topographie und Relief des Untersuchungsgebietes sowie Lage der Untersuchungspunkte. Die grau unterlegten Windrosen stellen Meßergebnisse (Nachtstunden), die weißen die Ergebnisse der Modellrechnung dar.

Das Ergebnis zeigt, daß lokale Kaltluftströmungen mit Hilfe des Modells NDFM plausibel wiedergegeben werden können, daß zur exakten Beschreibung gekoppelter Windsysteme wie hier des Rohracker- und Neckartals jedoch aufwendigere Simulationen oder genauere Messungen erforderlich sind.

Fallbeispiel aus der Planung

Das nachfolgende Beispiel behandelt das Kaltluftregime im Bereich einer Deponie, von der aus in den Nachtstunden geruchsbeladene Luft in Richtung eines Siedlungsgebietes verfrachtet werden kann. Die Abb. 7 (unterer Teil der Abbildung) verdeutlicht die orographische Gliederung des Geländes und die Lage der Deponie. Die Analyse des Kaltluftregimes mit dem Modell NDFM ergibt, daß es im Untersuchungsgebiet drei relevante, in der Abbildung 6 mit A, B, C bezeichnete Kaltluftströme⁶ gibt, von denen zwei Ablüsse geruchsbeladene Luft bis in die angrenzende Siedlungsgebiete I und II transportieren können. Eine detaillierte Untersuchung mittels Trajektorienberechnung zeigt, daß die

⁶ dargestellt ist in der Abbildung der Volumenstrom des Kaltluftabflusses, d.h. das Produkt aus Geschwindigkeit und Schichtdicke.

auf der Deponie freigesetzten Geruchsstoffe im Ist-Zustand vor allem über den Kaltluftabfluß A abfließen.

Betrachtet werden soll nun der Planfall, in welchem ein Fabrikgebäude seitlich der Deponie errichtet wird (Abb.8). Es stellt sich die Frage, welchen Einfluß die geplante Baumaßnahme auf den bestehenden Kaltluftabfluß und damit auf die Geruchstoffausbreitung hat. Um dies zu analysieren wurde das Kaltluftabfluß- Geschwindigkeitsfeld sowohl mit als auch ohne das geplante Gebäude berechnet. Die Ergebnisse sind in der Abb. 9.a und 9.b dargestellt. Aufgetragen sind die Geschwindigkeitsvektoren des Kaltluftabflusses im Nahbereich des Standorts (Umrahmung in Abb. 8). Wie man aus der Abb. 9a erkennt, fließt ein Großteil der im Ist-Zustand auf der Deponie abgekühlten Luft in Richtung des Kaltluftstroms A . Nach Errichtung des geplanten Gebäudes ändert sich das Strömungssystem (Abb. 9.b). Das Einzugsgebiet des Kaltluftabflusses B erfaßt nun größere Teile der Deponie. Das heißt, das sich die Geruchsfracht des Abflusses A verringert, die des Kaltluftstroms B hingegen zunimmt. Eine Entlastung der Ortschaft I wäre die Folge. Durch eine Ausbreitungsrechnung kann ermittelt werden, ob es durch die neuen Ausbreitungsbedingungen im Bereich der Ortschaft II zu einer Überschreitung der Geruchsschwelle kommen kann.

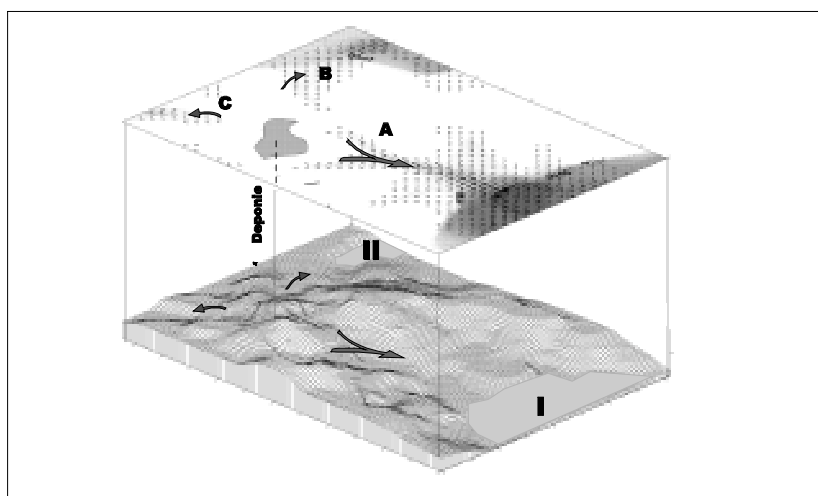


Abb 7: Relief und Kaltluftabfluß-Volumenströme im Untersuchungsareal

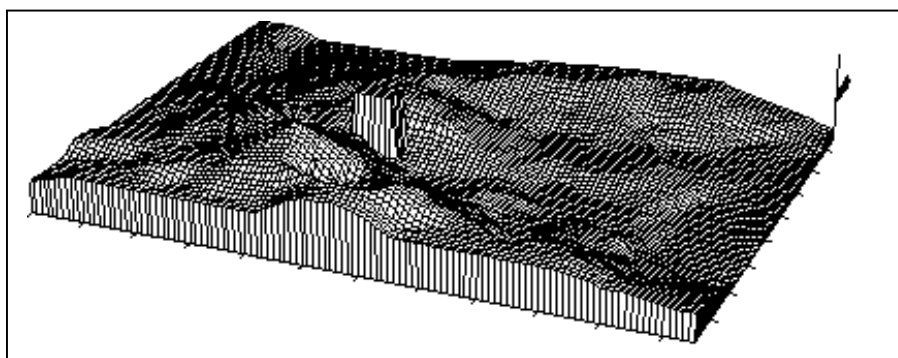


Abb.8: Lage und Größe des Gebäudes im Planzustand

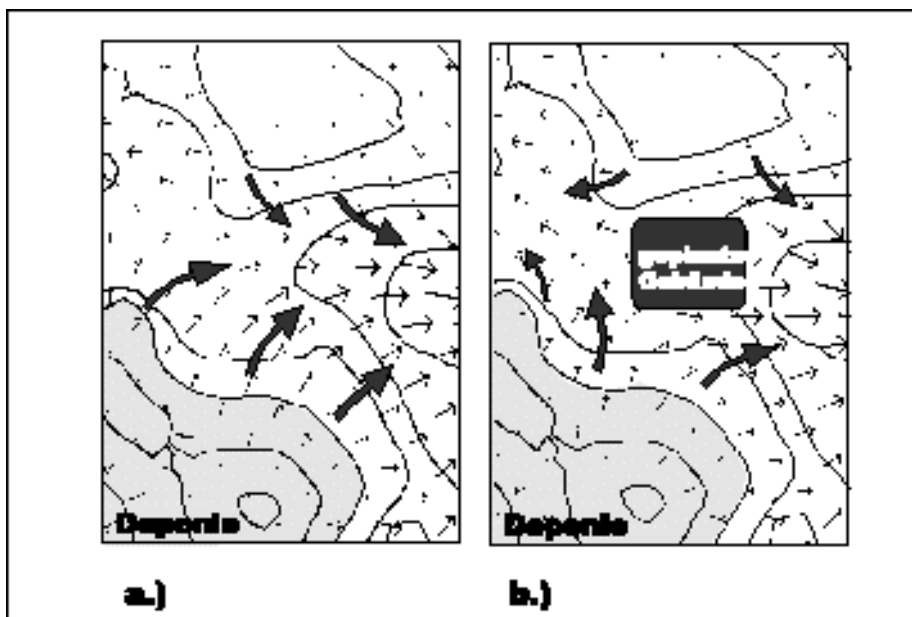


Abb. 9: Kaltluftabflußregime (Geschwindigkeitsvektoren) im Ist-(a) und Planzustand (b)

Literatur:

- Defant, A., 1933: Der Abfluß schwerer Luftmassen auf geneigtem Boden nebst einigen Bemerkungen zur Theorie stationärer Luftströme. - Sitz.Ber.Pr.Akad. 18, 624-635.
- King,E., 1973: Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftabflusses und der Frostgefährdung durch Straßenneubauten. Berichte des deutschen Wetterdienstes Nr.130, Band 17.
- Kost, J., 1982: Experimentelle Untersuchung zur Ausbreitung von Luftverunreinigungen in einem Talsystem. Diplomarbeit, Meteorologisches Institut der Universität Karlsruhe.
- Gerth ,W.P., 1986: Klimatische Wechselwirkungen in der Raumplanung bei Nutzungsänderungen. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr.171. Offenbach.
- Gerth, W.P., 1997: Telefonische Mitteilung Januar 1997.
- Groß,G., 1985: Numerische Simulation nächtlicher Kaltluftabflüsse und Tiefsttemperaturen in einem Moselseitental. Meteorol,Rdsch.38. Dezember 1985.
- Held,K., 1984: Räumliche und zeitliche Struktur von Kaltluftabflüssen am Rheintalrand bei Karlsruhe. Diplomarbeit am meteorologischen Institut der Universität Karlsruhe.
- Kinzelbach,W., 1992: Numerische Methoden zur Modellierung des Transportes von Schadstoffen im Grundwasser. Oldenburg-Verlag, München
- Pedlosky, J., 1987: Geophysical Fluid Dynamics. Springer -Verlag New York.
- Prandtl, L., 1942: Strömungslehre.- Vieweg und Sohn, Braunschweig.
- Roedel,W., 1992: Physik unserer Umwelt - Die Atmosphäre. Springer Verlag Heidelberg.
- Schädler, G., A.Lohmeyer, 1994: Simulation of nocturnal drainage flows on personal computers. Meteorol.Zeitschrift, N.F.3, Juni 1994.
- Zenger,A., A.Rühling, W.Bächlin und A.Lohmeyer, 1994: Tracergasuntersuchungen zur naturgetreuen Simulation von atmosphärischen Transport und Mischungsvorgängen im Rahmen von Umweltverträglichkeitsuntersuchungen. Staub- Reinhaltung der Luft. Februar 1994