

**Auftraggeber:** Hessisches Ministerium für Wirtschaft,  
Verkehr und Landesentwicklung  
Kaiser-Friedrich-Ring 75  
65185 Wiesbaden

# **Modellgestützte Klimaanalyse und –bewertung für die Regionalplanung in Hessen Grundlagen am Bsp. Marburg**

**Forschungsvorhaben „klamis“:  
Klimaanpassung in Mittel- und Südhessen**

**Projekt-Nr.:** 12-09-04-S  
**Umfang:** 44 Seiten  
**Datum:** 27.04.2013  
**Bearbeiter:** **Dipl.-Met. Dr. Jost Nielinger**  
(Anerkannter Beratender Meteorologe DMG e.V.)  
**Dipl.-Met. Werner-Jürgen Kost, FRMetS, CMet**  
(Anerkannter Beratender Meteorologe DMG e.V.  
Fellow of The Royal Meteorological Society (UK))  
**Dipl.-Met. Dr. Markus Hasel**

**IMA - Immissionen · Meteorologie · Akustik**  
**Richter & Röckle GmbH & Co. KG**  
**Niederlassung Stuttgart**  
**Hauptstraße 54**  
**D-70839 Gerlingen**  
**Tel. 07156 / 4389 15**  
**Fax: 07156 / 5026 18**  
**E-Mail: [nielinger@ima-umwelt.de](mailto:nielinger@ima-umwelt.de)**  
**Internet: [ima-umwelt.de](http://ima-umwelt.de)**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Situation .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Forschungsfragen .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Bearbeitung im Grundlagen-Projekt .....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Phänomenologische Grundlagen.....</b>	<b>5</b>
4.1	Kaltluftströmungen.....	5
4.2	Flurwinde .....	10
4.3	Strömungssysteme sind dreidimensional .....	11
4.4	Strömungen kennen keine Grenzen.....	13
4.5	Anthropogener Wärmestrom .....	13
4.6	Kaltluftströmungen und Lufthygienische Aspekte .....	14
<b>5</b>	<b>Kaltluftströmungs-Simulation mit FITNAH.....</b>	<b>16</b>
5.1	Das prognostische Simulationsmodell FITNAH .....	16
5.2	Das Rechengebiet von FITNAH für das Beispiel Marburg .....	16
5.3	Landnutzung .....	18
5.4	Meteorologische Situation und Anfangszustand .....	19
<b>6</b>	<b>Ergebnisse für das Stadtgebiet .....</b>	<b>21</b>
<b>7</b>	<b>Erste Analysen zu regionalplanerischen Kategorien .....</b>	<b>28</b>
7.1	Anforderungen der Regionalplanung.....	28
7.2	Erste Analyse-Ansätze zu regionalplanerischen Verwendung.....	30
7.2.1	Bodentemperaturen .....	30
7.2.2	Volumenströme.....	34
7.2.3	Kaltluftproduktion .....	38
7.2.4	Rückwärtstrajektorien .....	40
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick nach dem Grundlagen-Projekt.....</b>	<b>43</b>

## Literatur

## 1 Situation

Klima und Luftqualität sind wesentliche, schützenswerte Umweltfaktoren, die als solche auf allen Planungsebenen in die räumliche Gesamtplanung einbezogen werden müssen.

Derzeit verfügbare Informationen zu Klimaänderungen liegen - wegen der i.a. global rechnenden Klimamodelle – in räumlichen Auflösungen vor, die als Grundlage für planerisches Handeln noch zu wenig differenziert sind. Auch die bereits vorgenommenen Regionalisierungsschritte (z.B. Modell REMO) sind mit einer Maschenweite von 10 km nicht ausreichend. Mit dem Abstand der Berechnungspunkte von 10 km können minimal topographische Strukturen von 20 km „gesehen“ werden und in der Berechnung „wirken“. Umgekehrt können auch die Resultate nicht genauer sein.

Die zukünftig herrschenden Temperaturverhältnisse sind ein wesentlicher Aspekt der derzeitigen Aktivitäten zur Analyse des Klimas, dessen Bewertung, der Vorhersage eines geänderten Klimas und ggf. der Anpassung an geänderte Klimabedingungen. Dabei sind sommerliche Hitzetage wegen ihres gesundheitlichen Gefährdungspotentials für anfällige Kreise der Bevölkerung von besonderem Interesse. Wichtige Ausgleichsfaktoren für die im Tagesverlauf auftretenden hohen Temperaturen sind in von Überhitzung belasteten (urbanen Ballungs-) Räumen die nächtliche Abkühlung und der Zustrom kühler Luft durch Kaltluft- und Flurwindssysteme.

Kaltluft- und Flurwindssysteme treten in der Regel räumlich hoch differenziert auf, da die Kaltluftbildung landnutzungsabhängig ist und die Kaltluftströmungen geländeformabhängig sind. Aus diesem Grund müssen Informationen zu diesen wichtigen Ausgleichs- und Belüftungssystemen für die (regional-)planerischen Fragestellungen in einer deutlich höheren Auflösung als bisher zur Verfügung stehen. Erst bei einer räumlichen Differenzierung von weniger als z.B. 500 m können fundierte und sinnhafte Aussagen bzw. planerische Einstufungen, Abgrenzungen und Festlegungen zu Klima und Luftqualität im regionalen Scale getroffen werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „klamis“ (Klimaanpassung in Mittel- und Südhessen) fand im März 2012 ein Workshop statt, in dem von verschiedenen Fachleuten die Möglichkeiten zur geeigneten hoch auflösenden Modellierung dieser Strömungssysteme vorgestellt und diskutiert wurden. Als der für die Fragestellungen der Regionalplanung am besten geeignete Ansatz erwies sich die Verwendung eines so genannten mesoskaligen prognostischen Strömungsmodells wie z.B. FITNAH.

Dieses Modell zeichnet sich durch eine sehr hochwertige numerisch-physikalische Berechnungsmethode aus. Zum Betrieb müssen lediglich die Geländehöhe, die Landnutzung und der Anfangszustand der Atmosphäre vorgegeben werden. Es kommt insbesondere ohne Nutzer-Vorgaben aus, die bereits Teile des zu untersuchenden Phänomens vorprägen würden (wie beispielsweise eine Kaltluftproduktionsrate in einfacheren Modellansätzen). Zudem rechnet es vollwertig dreidimensional, so dass die Analyse der Ergebnisse auch eine vertikale Differenzierung erlaubt. Dies ist für Strömungsanalysen in urbanen Ballungsräumen von großer Bedeutung, da dort ein Großteil der Luftzufuhr im Überdach-Niveau stattfindet bzw. stattfinden muss.

## 2 Forschungsfragen

Im Rahmen des Vorhabens „klamis“ waren insbesondere die folgenden Fragestellungen wichtig:

- a) Stellenwert der Themen Klima und Lufthygiene in den Stufen und Maßstabsbereichen der räumlichen Gesamtplanung.
- b) Allgemeinverständliche phänomenologische Grundlagen von Klimagrößen und Klimafunktionen unter Berücksichtigung (regional-) planerischer Begrifflichkeiten und Differenzierungsmöglichkeiten.
- c) Durchführung, Auswertung und Dokumentation von geeigneten Modellrechnungen zur exemplarischen Bearbeitung der Fragestellungen des Forschungsvorhabens in einer oder mehreren Modellregionen mit
- d) anschließender Analyse der klimaökologischen Situation und daraus abgeleitet
- e) die Formulierung von Planungshinweisen und Vorschlägen zur Umsetzung in der Regionalplanung.

Aus Planer-Sicht kommen folgende, auf die Abgrenzung von Gebieten abzielende Fragen hinzu:

- 1) (a) Wo liegen besonders bioklimatisch/lufthygienisch kritische Gebiete,  
(b) auch unter Berücksichtigung eines Klimawandels?
- 2) Anhand welcher Schwellenwerte können regional und lokal bedeutsame Kaltluftabflussleitbahnen differenziert werden?
- 3) Wie können lufthygienische Daten bei der Beurteilung der Qualität dieser Leitbahnen berücksichtigt werden?
- 4) Wie können räumliche Wirkungszusammenhänge zwischen bioklimatisch/lufthygienisch belasteten Räumen und den zugehörigen Ausgleichsräumen ermittelt werden?

### 3 Bearbeitung im Grundlagen-Projekt

Im Rahmen der beauftragten Grundlagenuntersuchung am Beispiel Marburg konnten aus Budget- und Zeitgründen nicht alle der in Kapitel 2 genannten Fragestellungen umfassend und in der nötigen Tiefe untersucht werden. Dennoch wurde angestrebt, möglichst viele der Fragen zumindest anzudiskutieren und an geeigneten Stellen auch bereits zu vertiefen.

Die Fragestellung zu a) wurde auf einem gemeinsamen Workshop besprochen. Die wesentlichen Punkte sind im Abschnitt 7.1 zusammengefasst.

Für die Fragestellung zu b) soll das nachfolgende Kapitel 4 eine erste Grundlage bieten.

Die Fragestellung zu c) wurde am Beispiel Marburg bearbeitet. Die Ergebnisse sind im Kapitel 5 dokumentiert.

Die Fragestellungen d) und e) sowie die Fragen 1) bis 4) wurden im Rahmen der Workshops interdisziplinär diskutiert. Es hat sich gezeigt, dass zwischen den hochwertigen Simulationsergebnissen und den Anforderungen und Kategorien der Regionalplanung eine breite Lücke klafft, die durch spezielle Auswertungs- und Analysemethoden geschlossen werden müsste. Entscheidend ist dabei die Kombination „Zielgröße – Skala“. Einen exemplarischen Einblick in die dazu möglichen Vorgehensweisen und Methoden liefert der Abschnitt 7.2.

Ein für die Regionalplanung optimiertes Sortiment an Analysemethoden gibt es jedoch (noch) nicht – ihre Entwicklung wäre Aufgabe eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens.

Die Fragestellung 3b konnte aus Zeit- und Budget-Gründen im Rahmen dieser Untersuchung nicht bearbeitet werden.

## 4 Phänomenologische Grundlagen

### 4.1 Kaltluftströmungen

Als Kaltluftströmung wird in der Umweltmeteorologie im vorliegenden Zusammenhang bodennah gebildete Kaltluft verstanden, die sich in Bewegung gesetzt hat.

Zu beachten ist, dass sich der Begriff „Kaltluft“ dabei nicht auf absolut kalte Luft bezieht, sondern es sich um relativ kalte Luft handelt, eine „Luftmenge, die gegenüber durchschnittlichen Verhältnissen der Unterlage oder ihrer Umgebung eine niedrigere Temperatur aufweist“ (/7/).

Die Bildung bodennaher Kaltluft wird durch die Abkühlung der Erdoberfläche aufgrund einer negativen Energiebilanz verursacht. Der Energieverlust sorgt zunächst für eine Abkühlung der Oberfläche und infolgedessen für die Abkühlung der darüber befindlichen Luftmasse. Besonders günstig für solche Abkühlungsprozesse sind:

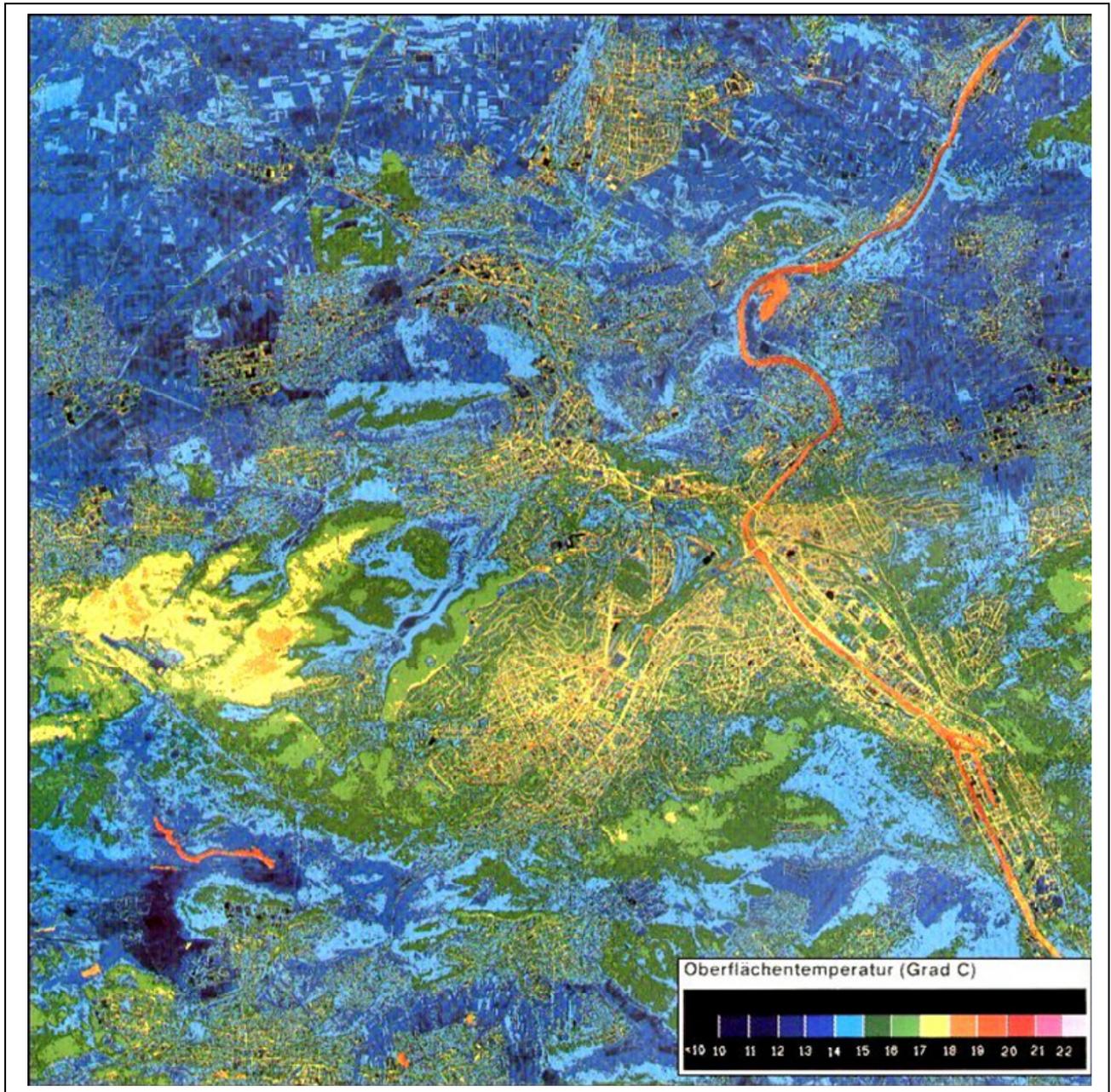
- Nachtstunden (wegen des Fehlens der solaren Einstrahlung).
- Geringer Wolkenbedeckungsgrad (wegen des Fehlens der atmosphärischen langwelligen Gegenstrahlung von Wolken und der ungehinderten langwelligen Ausstrahlung der Oberfläche).
- Hochdruckwetterlagen (wegen der überregional geringen Windgeschwindigkeiten und damit einer höheren Verweilzeit eines Luftpakets über der kaltluftproduzierenden Oberfläche sowie wegen der geringeren bodennahen Turbulenz und daher einer geringeren vertikalen Durchmischung bodennaher Luftschichten).

Die beschriebenen Bedingungen werden auch als „autochthone Wetterlage“ bezeichnet, die Nächte, in denen sich Kaltluftströmungen ausbilden, auch als „Strahlungsnächte“.

Die höchsten Kaltluftproduktionsraten weisen unversiegelte Freiflächen auf. Bebautes Gebiet hat i.a. ein reduziertes Kaltluftbildungsvermögen, dichte Bebauung und industriell genutzte Flächen können je nach anthropogener Wärmefreisetzung (s. Abschnitt 4.4) als -relativ - warme Zonen wirken (Abb. 4-1).

In Wäldern bleibt die Luft aufgrund der Verschattung im Bestand tagsüber relativ kühl. Wälder können daher speziell am Abend und zu Beginn der Nacht durchaus nennenswerte Beiträge zu Kaltluftströmungen leisten, vorausgesetzt natürlich, dass die Umgebungsluft außerhalb des Bestandes noch höhere Temperaturen aufweist. Während der Nacht kühlt die Luft im Bestand sehr viel weniger ab als über freier Flur, was auf die langwellige Strahlung der Pflanzenbestandteile, die Minderung der Ausstrahlung des Erdbodens in die freie Atmosphäre und den gebremsten Luftaustausch zurückzuführen ist. Später in der Nacht können Wälder daher häufig als relativ warme Zonen (im Vergleich zur Umgebung) identifiziert werden (Abb. 4-1).

Wasser kann sehr viel Wärme speichern, daher ist die Abkühlung von Wasseroberflächen im Verlauf einer Strahlungsnacht äußerst gering. Die Wasseroberflächentemperatur ändert sich gegenüber den Tageswerten kaum. Aus diesem Grund sind Wasseroberflächen später in der Nacht mit am wärmsten, Flussläufe z.B. bilden sich in Thermal-Aufnahmen vom Flugzeug aus sehr markant mit hohen Temperaturen ab (Abb. 4-1)



**Abb. 4-1:** Oberflächentemperaturen gegen Ende einer Strahlungsnacht am Beispiel Stuttgart.  
Aus: <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de>

Eine *Kaltluftströmung* entsteht dann, wenn sich bodennah gebildete Kaltluft in Bewegung setzt. Dies geschieht vornehmlich an geneigten Hängen, da die Kaltluft eine höhere Dichte besitzt („schwerer ist“) als wärmere Luft in gleicher Höhe über dem Talraum und sich daher geländefolgend in Bewegung setzt. Dieses Stadium wird auch als Kaltluftabfluss bezeichnet.

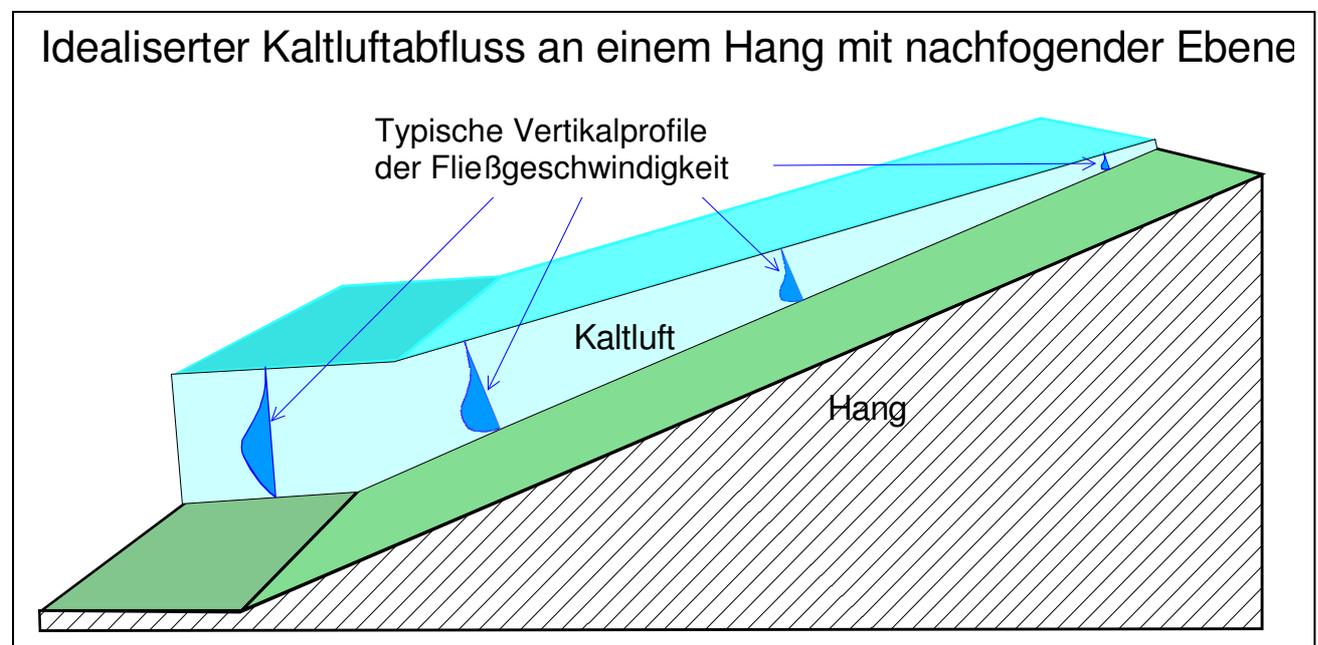
Die Intensität dieses Prozesses ist von der Hangneigung, dem Dichteunterschied sowie von Bewuchs und Bebauung abhängig. Die hangparallel wirkende Reibungskraft bremst die abfließende

Luft. Die beschriebenen Vorgänge sind bei flachen Hängen mit wenig Höhenunterschied oft instationär, d.h. es kommt vielfach zu "pulsierenden" Kaltluftabflüssen.

Zu Beginn der Nacht sind die lokalen Kaltluftabflüssen meist am intensivsten, da die Abkühlungsrate über freien Flächen am höchsten ist. Später in der Nacht flacht die Abkühlungskurve ab, und es wird lokal weniger schnell Kaltluft gebildet.

Da an einem ausreichend langen geneigten Hang von oben kommend immer mehr Kaltluft in den Abfluss mit einbezogen wird, ist die vertikale Mächtigkeit der Kaltluft im oberen Bereich eines Hanges geringer als am Hangfuß (Abb. 4-2).

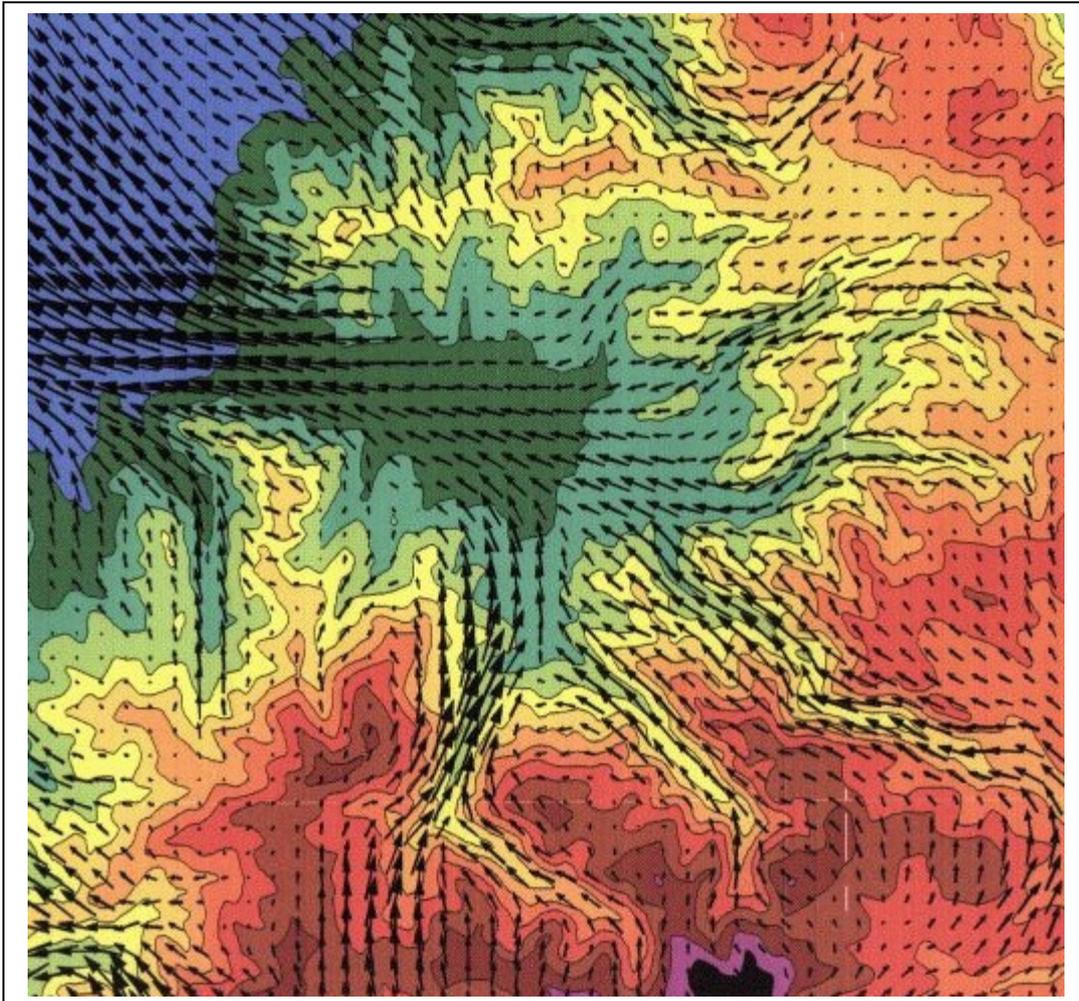
Aufgrund ihres Bewegungsimpulses bleibt die Kaltluft nicht einfach am Hangfuß „stehen“, wenn sich dort ebenes Gelände anschließt, sondern kann sich aufgrund ihrer Dynamik noch etwas in die Ebene vorschieben (Abb. 4-2). Dabei verliert sie allerdings fortwährend an Impuls, so dass sie nach einer bestimmten Distanz zum stagnieren kommt („liegen bleibt“).



**Abb. 4-2:** Idealisertes Schema eines Kaltluftabflusses an einem Hang mit nachfolgender Ebene.

Mehrere solcher hanggebunden Kaltluftabflüsse schließen sich im orographisch gegliedertem Gelände oft zusammen und bilden ein Kaltluftströmungs-System. Aufgrund der Beiträge vieler kaltluftproduzierender Flächen und Hänge können solche Systeme eine z.T. bedeutende vertikale Mächtigkeit erlangen, die es u.U. sogar gestattet, dass einzelne, niedrige Geländestrukturen vollständig überströmt werden. In von Höhenzügen begrenzten Haupttälern können sich so trotz geringer Neigung der Talsohle eindeutig identifizierbare Kaltluftströmungen einstellen. Tritt ein Kaltluftströmungssystem indes in die Ebene hinaus, so verteilt sich die Kaltluft breitflächig, der Impuls nimmt ab und die Reichweite ist begrenzt (Abb. 4-3).

Diese Systeme bleiben relativ stabil, d.h. sie ändern sich zeitlich nur unwesentlich, man spricht auch von „stationären“ Strömungen. Eine Auswertung später in der Nacht bietet folglich ein Bild des in großen Teilen der Nacht maßgeblichen Belüftungssystems.



**Abb. 4-3:** Kaltluftströmungssysteme in flachen Talsohlen und in der Ebene am Beispiel Freiburg: Schwarzwaldhöhen (unterer und rechter Bildbereich), Tal bei Ebnet und Stadtgebiet von Freiburg (Mitte) und Rheintal (links oben).

Der Antrieb von Kaltluftströmungen ist die Druckdifferenz aufgrund von Temperaturdifferenzen, nicht die absolute Temperatur der Luft. Es spielt für die Dynamik und die Struktur der Strömung eine eher untergeordnete Rolle, ob sich ein Unterschied von 10°C zwischen +30°C und +20°C oder zwischen +5°C und -5°C einstellt. Aus diesem Grund können sich Kaltluftabflüsse und Kaltluftströmungssysteme unter den o.g. Bedingungen das gesamte Jahr über in ähnlicher Struktur mit nur leicht variierenden Intensitäten ausbilden.

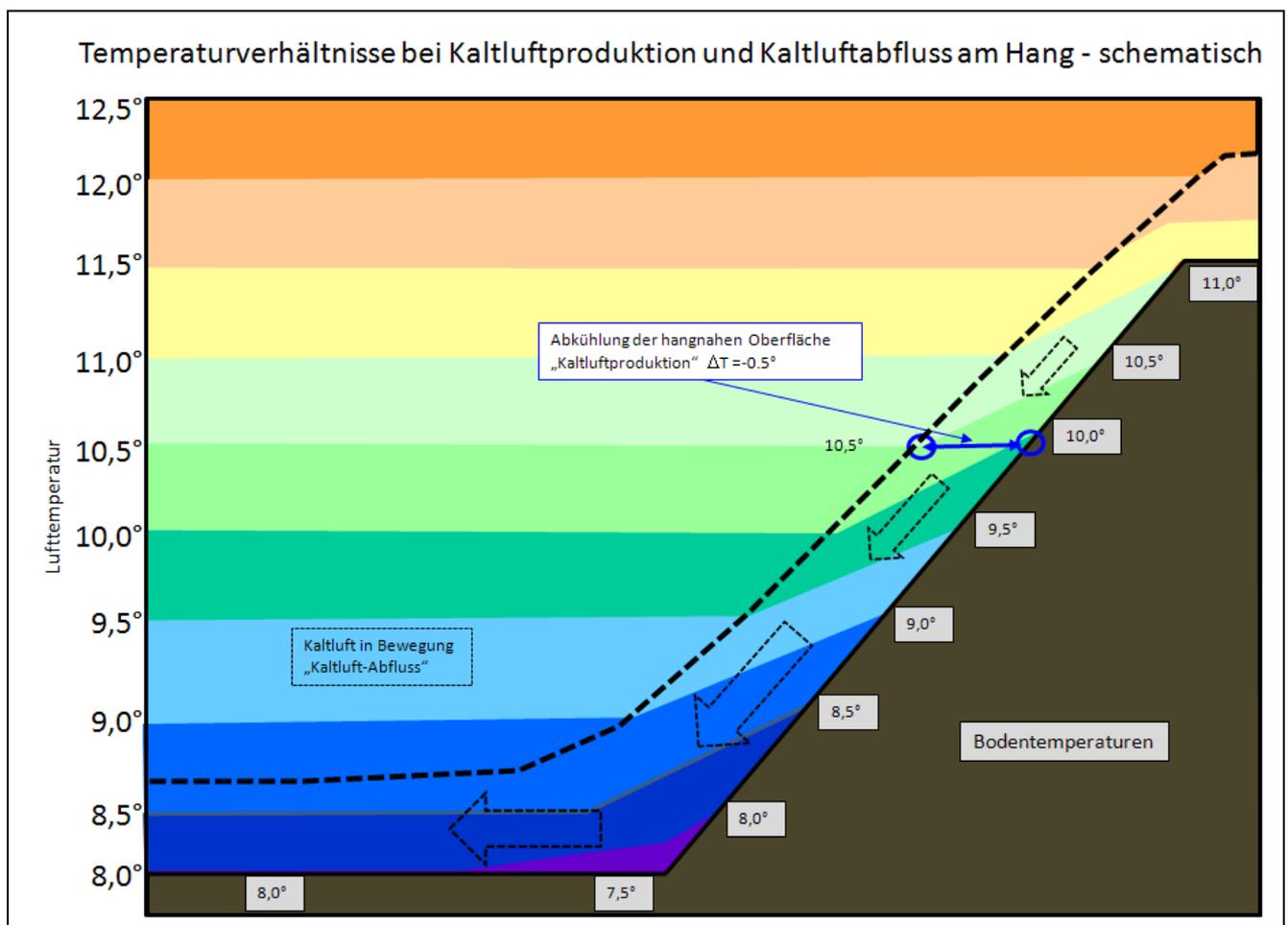
Die an einem Hang gebildete Kaltluft weist nicht grundsätzlich und zu jeder Zeit die niedrigsten bodennahen Temperaturen im Untersuchungsgebiet auf. Der Fall, dass an einem Hang produzierte und abfließende Kaltluft höhere Bodentemperaturen aufweist als in einer benachbarten Tallage ist nicht selten. Dieser Umstand erschwert die automatische Identifizierung und Abgrenzung von Kaltluftproduktionsgebieten aus den Modellergebnissen erheblich.

Am deutlichsten wird dieses Phänomen, wenn man eine bereits ausgebildete Inversions-Situation (Temperaturzunahme mit der Höhe) betrachtet (Skizze Abb. 4-4).

In der Umgebungsluft eines Hanges steigt die Temperatur mit zunehmender Höhe an. Der Boden am Hang selbst kühlt ab, schematisch in Abb. 4-4 um durchgängig -0,5 K, was dazu führt,

dass die Linien gleicher Temperatur einen „Knick“ nach oben beschreiben. Der Antrieb der Kaltluftströmungen erfolgt durch den Temperatur- bzw. Dichte-Unterschied zur Umgebungsluft – im Vergleich zu einem Luftpaket in gleicher Höhe über dem Tal ist das Luftpaket über dem Hangboden kälter, besitzt eine höhere Dichte, ist deshalb schwerer und setzt sich abwärts und hangfolgend in Bewegung. Dieser Mechanismus kann im Schema der Abbildung über die gesamte Länge des Hanges einsetzen. Der Hang ist in diesem Zustand eine Kaltluftproduktionsfläche.

Würde man allerdings in einer Aufsicht die Bodentemperaturen betrachten, träten als „besonders kalt“ lediglich der Hangfuß und der Talgrund in Erscheinung. Insbesondere die oberen Teile des Hanges, die einen wesentlichen Anteil an der Bildung von Kaltluft und am Kaltluftabfluss haben, wären in einer Aufsicht wärmer. Dies ist der Grund, warum sich Kaltluftproduktionsflächen oft nicht automatisch im bodennahen Temperaturfeld identifizieren und abgrenzen lassen. Der obere, wärmere Bereich wird auch gelegentlich als „warme Hangzone“ bezeichnet, da dort z.B. die Frostgefährdung und die Nebelwahrscheinlichkeit geringer sind als auf dem Talgrund.



**Abb. 4-4:** Temperaturen an einem Kaltluft produzierenden Hang. Erläuterung siehe Text

*(Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass der Kaltluftabfluss im Schema Abb. 4-4 nur dann aufrecht erhalten bleibt, wenn die mit dem Absinken verbundene adiabatische Erwärmung durch weitere Abkühlung oder Vermischung mit kälterer Luft so kompensiert wird, dass ein negativer Temperaturunterschied zur Umgebungsluft über dem Talraum erhalten bleibt.)*

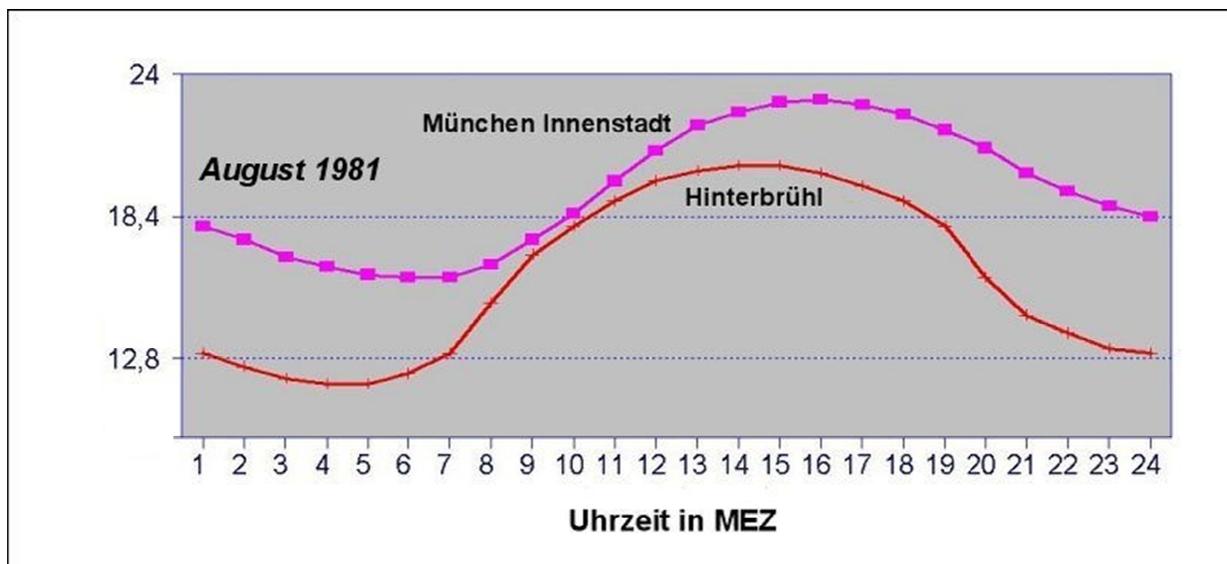
## 4.2 Flurwinde

Auch in der Ebene bildet sich unter den im Abschnitt 4.1 beschriebenen Bedingungen bodennahe Kaltluft. Wegen des Fehlens einer Geländeneigung wäre sie ohne andere Antriebsmechanismen ortsfest, würde allenfalls ein wenig hin- und her verfrachtet. Solche Zustände werden jedoch nur kurzzeitig beobachtet, oft herrscht auch in der Ebene eine signifikante Kaltluftströmungsrichtung vor.

Ursache für Kaltluftströmungen in der Ebene können 4 Mechanismen sein:

- Ein in die Ebene hinein ragendes Kaltluftströmungssystem (s. Abschnitt 4.1).
- Ein übergeordnetes Regionalwindssystem, das sich ebenfalls bevorzugt bei autochthonen Wetterlagen ausbilden kann.
- Das „Mitnehmen durch“ oder das „von oben Durchgreifen“ einer übergeordneten Strömung aufgrund der geringen Schichtdicke der bodennahen Kaltluft.
- Der Antrieb durch horizontale Temperaturunterschiede (*Flurwind*).

Zur Ausbildung eines Flurwindes bedarf es einer größeren, zusammenhängenden Zone mit höheren Temperaturen als im Umland. Dies können größere Siedlungsgebiete, Städte oder auch größere, zusammenhängende Industrieareale sein. Aufgrund geringerer Strömungsgeschwindigkeiten und wegen der Wärmeabgabe aufgeheizter Flächen kommt es zu einer Verlangsamung der nächtlichen Abkühlung (Abb. 4-5). Im Laufe der Nacht bildet sich im Vergleich zum Umland bodennah eine relativ warme Zone aus, die deshalb auch als „Wärmeinsel“ bezeichnet wird.



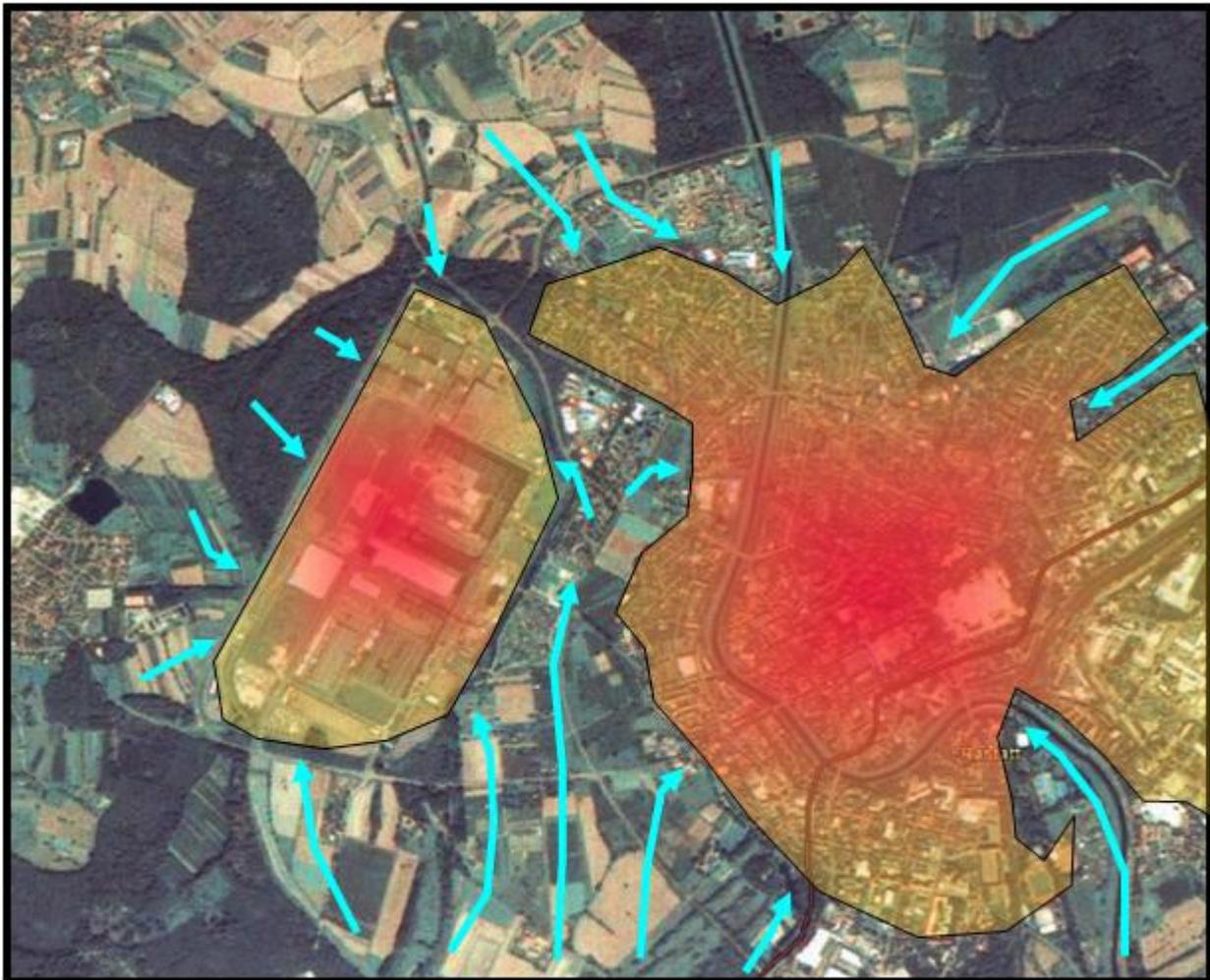
**Abb. 4-5:** Unterschiede im Temperaturverlauf zwischen Innenstadt und Umland am Beispiel von München.

Diese relativ wärmere Luft hebt sich mit geringer Geschwindigkeit an, was zur Folge hat, dass kühlere Luft aus der Umgebung nachströmt (Abb. 4-6). Dieses Nachströmen wird als Flurwind bezeichnet. Er bildet insbesondere für Großstädte einen wichtigen Belüftungsmechanismus.

Die bodennahe Eindringtiefe der Strömung in einen bebauten Bereich ist allerdings aufgrund der i.a. relativ schwachen Dynamik der Flurwinde und wegen der gebäudeinduzierten Bremswirkung begrenzt. Wenn die bodennahe Kaltluftschicht deutlich mächtiger ist als die Bebauungshöhe, so findet der größte Teil der Belüftung durch Flurwinde eher im Überdachniveau statt.

(Diese Belüftungsfunktion der Flurwinde macht deutlich, weshalb der Begriff „Wärmeinsel“ u.U. irreführend sein kann – es handelt sich dabei nicht zwingend um einen abgeschotteten „Insel“-Bereich, der sich immer weiter und unabhängig von seiner Umgebung aufheizt, sondern der zunächst erforderlich ist, um ein Flurwindssystem anzutreiben, dass seinerseits mit seinem Transport kühlerer Luft in die wärmere Zone hinein für eine Belüftung und eine Temperatur-Angleichung sorgt.)

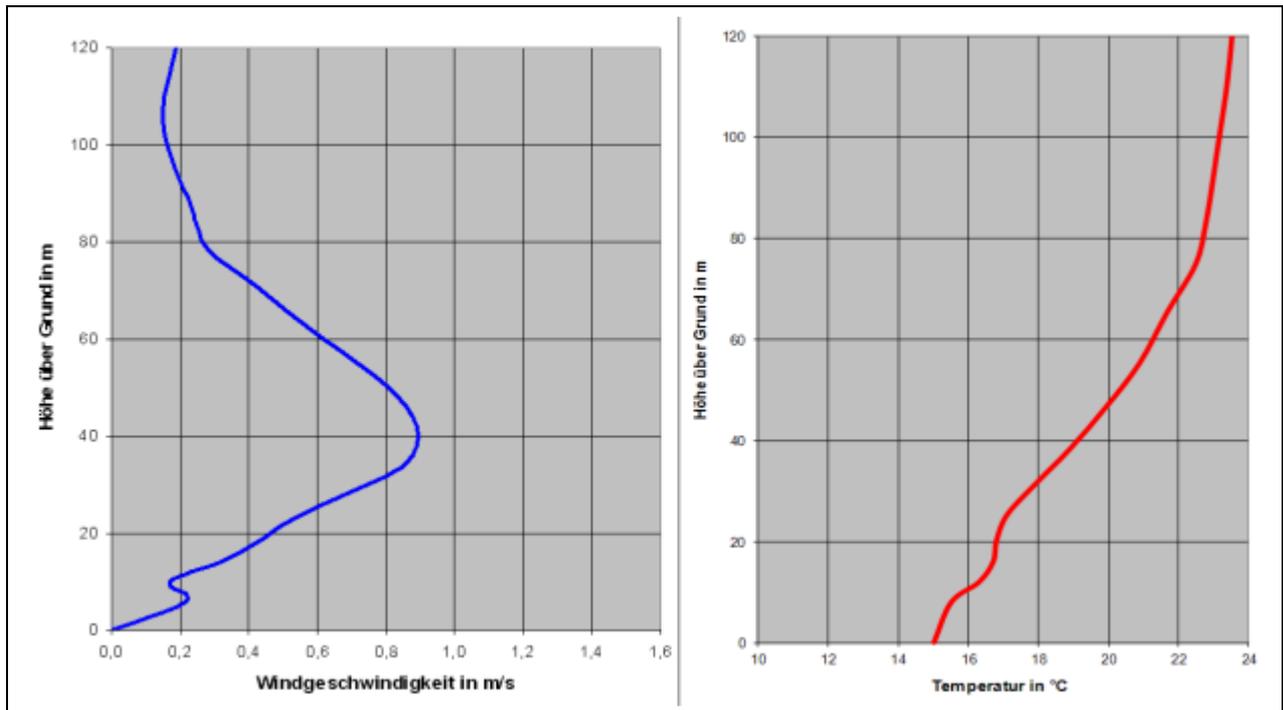
Der Antrieb von Flurwinden ist auch hier die (horizontale) Temperatur*differenz*, nicht die absolute Temperatur der Luft. Aus diesem Grund können sich Flurwinde unter den o.g. Bedingungen das gesamte Jahr über in ähnlicher Struktur mit nur leicht variierenden Intensitäten ausbilden.



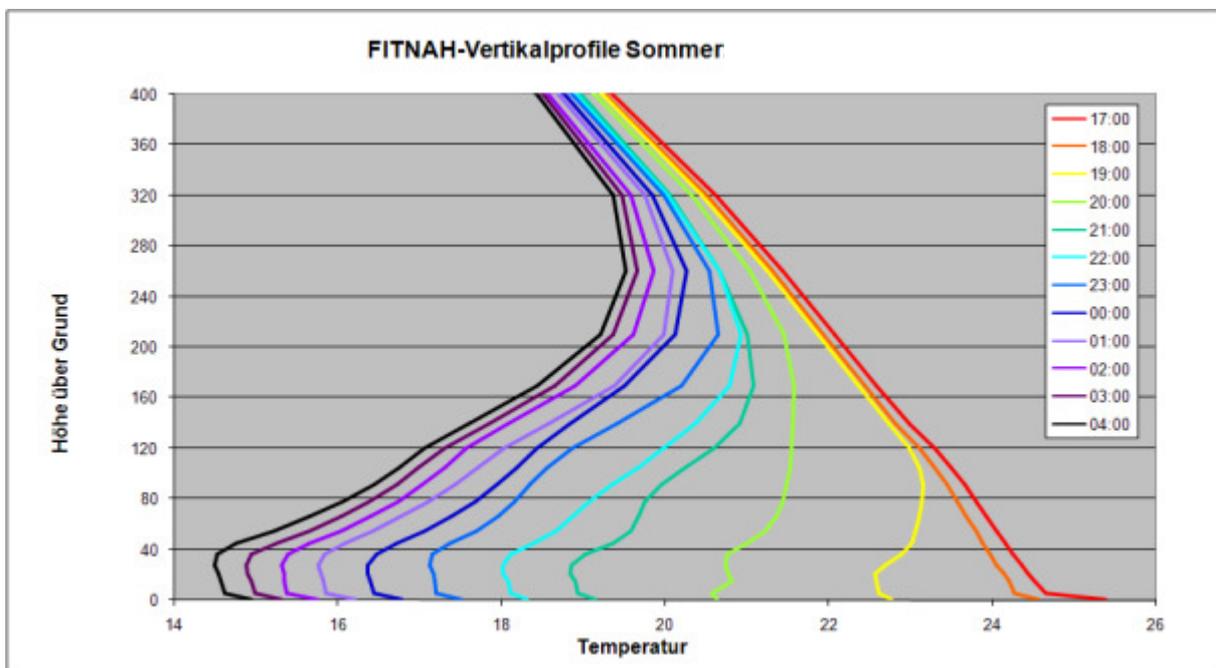
**Abb. 4-6:** Schematische Darstellung von Flurwinden in der Ebene.  
Industriegebiet (links) und ausgedehnter urbaner Bereich (rechts).

### **4.3 Strömungssysteme sind dreidimensional**

Die Strömungssysteme besitzen oft eine vertikale Mächtigkeit, die ein Vielfaches einer Gebäude- oder Bestandshöhe beträgt. Je nach Mächtigkeit einer Kaltluft- oder Flurwindströmung können wesentlich Funktionen dieser Strömung (Lufttransport, Luftleitbahn) auch oberhalb der bodennahen Rauigkeitselemente, im Überdachniveau bzw. oberhalb des Kronenraumes ablaufen (Abb. 4-7).



**Abb. 4-7:** Vertikal-Profile in einer Kaltluftströmung. Links: Windgeschwindigkeit, rechts: Temperatur. Die Kaltluftströmung reicht bis etwa 100 m über Grund, das Maximum liegt in 40 m Höhe.



**Abb. 4-8:** Zeitlicher Verlauf einer Bodeninversion über einem Industriestandort in einem Flusstal. Zu beachten ist: Im Bereich der Industriebebauung ist die Bodentemperatur erhöht, eine Temperaturabnahme setzt erst oberhalb der mittleren Bebauungshöhe (hier ca. 30-40 m) ein. Hier zeigt sich über dem Industriegebiet eine Kaltluftschicht mit einer Mächtigkeit bis 280 m

#### **4.4 Strömungen kennen keine Grenzen**

Ein wesentliches Merkmal von Planungen auf allen denkbaren räumlichen Ebenen ist die Abgrenzung. So wird z.B. kleinskalig nach Flurstücken unterschieden, im Rahmen von Flächennutzungsplanungen nach funktionalen Einheiten, im Rahmen von Regionalplanungen zusätzlich u.a. auch nach Verwaltungseinheiten (Stadtgrenzen, Naturräume etc.).

Es muss betont werden, dass die umweltmeteorologischen Phänomene wie z.B. Kaltluftströmungssysteme die vom Menschen vorgenommenen und gewohnten Abgrenzungen nicht kennen und sich auch nicht daran orientieren.

Kaltluftbildung ist abhängig von der lokalen Energiebilanz einer Fläche, und Kaltluftströme orientieren sich allein an Geländeformationen, in der örtlichen Ausprägung auch an den unterschiedlichen Landnutzungen.

Zudem beginnt „Kaltluft“ auch nicht an irgendeiner Stelle abrupt und hört auch nicht an einer bestimmten Stelle schlagartig auf. Es bilden sich Übergangszonen, in denen sich Intensitäten langsam verringern oder Richtungen ändern. U.U. setzt sich die Funktionalität eines Kaltluftstromes an der Grenze eines Siedlungsgebietes im Überdachniveau fort (s. Abschnitt 4.3). In einem solchen Fall „sieht“ man ihn nicht mehr in einer an das Bodenniveau orientierten Karte, er entfaltet aber gleichwohl eine gewisse Wirkung, hat eine gewisse Reichweite und übernimmt u.U. eine wesentliche Belüftungsfunktion.

Wenn also versucht wird, die Erkenntnisse von Kaltluftströmungsuntersuchungen in planerischen Schemata abgegrenzter Einheiten (Flurstücke, B-Pläne, Flächennutzungspläne, Verwaltungsgrenzen) zu überführen, dann ist das Ergebnis häufig

- für Planer unpraktikabel und schwammig (wenn der Umweltmeteorologe diesen Versuch unternimmt)
- für den Umweltmeteorologen phänomenologisch verzerrt oder gar falsch (wenn der Planer die Erkenntnisse in seine gewohnten Grenzziehungen presst).

Ein wichtiges Ziel der Grundlagenarbeit in diesem Forschungsvorhaben war die Harmonisierung von Begrifflichkeiten und Kategorien, die den Anforderungen beider Beteiligten gerecht werden und in der Planungspraxis einfach und praktikabel angewendet werden können. Dazu fanden zwei Workshops statt (05.02.2013 und 05.03.2013).

#### **4.5 Anthropogener Wärmestrom**

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, wird die Abkühlung der Erdoberfläche (und damit die Bildung bodennaher Kaltluft) durch eine negative Energiebilanz (= Verlust von Energie) verursacht.

In die bodennahe Energiebilanz gehen grundsätzlich folgende Prozesse ein:

- Bodenwärmestrom (Transport von Wärme zur oder von der Erdoberfläche aufgrund höherer bzw. niedrigerer Temperaturen im Erdboden).
- Latenter Wärmestrom (z.B. Wärmeverlust aufgrund Verdunstung von Wasser).
- Fühlbarer Wärmestrom (Wärmeverlust oder –gewinn wegen des Austausches der Oberfläche mit der darüber liegenden Luft).
- Langwellige Ausstrahlung (Wärmeverlust durch Ausstrahlung von Energie aufgrund der Oberflächentemperatur).

- Kurzwellige Einstrahlung (Wärmegewinn durch Einstrahlung tagsüber bei Sonnenschein).
- Langwellige atmosphärische Gegenstrahlung (Wärmegewinn durch langwellige Strahlung von oben, verursacht z.B. durch Wolken und Wasserdampf in der Atmosphäre).

In Waldbeständen kommen langwellige Strahlungsgewinne durch die Bestandselemente hinzu, wobei tagsüber der kurzwellige Strahlungsgewinn an der Erdoberfläche durch Abschattung und nachts der langwellige Strahlungsverlust durch Ausstrahlung gemindert sind.

In bebauten Bereichen kann ein so genannter anthropogener Wärmestrom hinzu kommen. Dieser Wärmestrom beschreibt die Energiezufuhr durch vom Menschen und insbesondere seine Aktivitäten verursachte Energieeinträge (z.B. das Heizen von Gebäuden, Wärmefreisetzung bei industrieller Produktion).

Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass sich die bodennahen Temperaturen stets als Gleichgewicht aller Energieströme einstellen. Genauso, wie ein einzelner Energiefluss (z.B. der anthropogene Wärmestrom) nicht *allein* für die bodennahe Temperatur verantwortlich sein kann, ist es umgekehrt auch nur schwer möglich, eine bodennahe „Ziel-Temperatur“ lediglich durch Änderung einer einzelnen Größe zu erreichen.

#### **4.6 Kaltluftströmungen und Lufthygienische Aspekte**

Kaltluftströmungen werden i.a. und zu Recht positiv bewertet. Sie übernehmen wichtige Belüftungsfunktionen bei Wetterlagen, die im Allgemeinen großräumig windschwach sind und daher als „austauscharm“ bezeichnet werden.

Als nächtliche Strömung bei Wetterlagen mit wolkenarmen Himmel übernehmen sie gerade im Sommer und Hochsommer eine wichtige Abkühlungsfunktion in Siedlungsräumen, wo sie die von der Sonneneinstrahlung des Tages erhitzte Luft verdrängen. Daher wird Kaltluft auch als „Frischluft“ bezeichnet.

Kaltluftströmungen haben jedoch im Hinblick auf lufthygienische Aspekte einige Nachteile, die die positive Bewertung der Funktionalität ins Gegenteil verkehren können:

Kaltluftströmungen entstehen, wenn am Boden durch Ausstrahlung und Energieverlust der Oberfläche kalte Luft gebildet wird und sich geländefolgend in Bewegung setzt. Die Strömungen erreichen Mächtigkeiten von wenigen Metern über einige Dekameter, im gebirgigen Gelände auch mehrere hundert Meter.

Die Kaltluft befindet sich auf dem Boden, die Kaltluftströmung setzte sich bodennah fort, und es liegt in der Natur der Sache, dass sich über dieser Kaltluft i.a. wärmere Luft befindet. Eine solche Situation wird auch als „Inversionswetterlage“ bezeichnet. Jeder Kaltluftstrom führt zu einer (mehr oder weniger hoch reichenden) Bodeninversion (vergl. auch Abb. 4-7 und 4-8).

Eine wesentliche Eigenschaft von Inversionsschichten sind die turbulenzarmen Verhältnisse. Vertikale (turbulente) Bewegungen werden in diesen Schichten gedämpft und unterdrückt, künstliche (etwa durch Hindernisse bewirkte) Auslenkungen werden rasch wieder zurück geführt. Daher nennt man diese Schichtungsverhältnisse auch „stabil“.

Eine Dämpfung der turbulenten Bewegungen bedeutet automatisch weniger Durchmischung und damit eine schlechtere Verdünnung von Luftbeimengungen.

Im ungünstigsten Fall – eine Talkessel-Situation, „aufgefüllt“ mit Kaltluft, in der sich keine signifikanten Strömungen mehr ausbilden – ist der Austausch mit der Umgebungsluft stark eingeschränkt. Befinden sich dort Emittenten von Luftschadstoffen, so können sich diese u.U. in der Kaltluft anreichern und zu erhöhten Konzentrationen führen.

Aber auch dort, wo die Kaltluft strömt – also der Regelfall – besitzt sie als wesentliche Eigenschaften die stabile Schichtung (= Bodeninversion) und die geringe Turbulenz (= wenig Durchmischung und damit wenig Verdünnung).

Überstreicht nun ein Kaltluftstrom einen Bereich mit kontinuierlichen Emittenten von Luftschadstoffen (z.B. eine viel befahrene Autobahn, ein Industriegebiet, aber auch Gerüche emittierende Anlagen), so können die dabei aufgenommenen Luftbeimengungen bodennah über vergleichsweise große Distanzen relativ unverdünnt transportiert werden.

Die Vorteile der Kaltluftströmungen – „Belüftung“, „Frischlufzufuhr“ und „Abkühlung“ – werden u.U. durch die dann entstehenden Nachteile - „relativ hohe Luftschadstoffkonzentrationen“, „Wahrnehmung von Gerüchen weit entfernter Anlagen“ ins Gegenteil verkehrt.

Dies gilt vor allem für bodennahe Quellen. Bei einer Mächtigkeit des Kaltluftstroms z.B. bis 100 m können die Emissionen einer Autobahn, eines Umschlagplatzes für staubende Güter oder eines Hähnchenmastbetriebes der Kaltluftströmung kaum entkommen.

Hohe Quellen (Schornsteine) stellen hingegen oft kein Problem dar – emittieren sie oberhalb der Kaltluftschicht oder wenigstens in den oberen Teil einer solchen hinein, so erreichen die Emissionen wegen der geringen vertikalen Durchmischung den Boden oft gar nicht oder erst in sehr großen Entfernungen und dann - aufgrund des langen Weges - stark verdünnt.

Bei der Bewertung der Funktionalität und der Bedeutung eines Kaltluftstromes sollten daher grundsätzlich auch lufthygienische Aspekte einbezogen werden.

## 5 Kaltluftströmungs-Simulation mit FITNAH

Messungen in der Natur sind mit vertretbarem Aufwand notwendigerweise Punktmessungen. Für ein flächendeckendes, hoch auflösendes und vor allem 3-dimensionales Bild des Kaltluftgeschehens werden spezielle Kaltluft-Strömungssimulations-Modelle eingesetzt. Sie berechnen die Kaltluftströmung in einem engmaschigen Berechnungsgitter unter Berücksichtigung der Geländeform und der thermischen Eigenschaften der Landoberflächen.

Im vorliegenden Fall wurde das Modell FITNAH zur Berechnung der Kaltluftströmungen im Untersuchungsgebiet eingesetzt.

### 5.1 Das prognostische Simulationsmodell FITNAH

Das Modell FITNAH wird speziell für die Berechnung lokaler Strömungssysteme eingesetzt. Es kann sowohl die dynamische Strömungsbeeinflussung berechnen (wie z.B. die Kanalisierung von Strömungen durch Geländeformen) als auch thermische Strömungen (Kaltluftabflüsse, Hangaufwinde, Berg-Tal-Wind- und Land-See-Wind-Systeme) simulieren.

Die Modellname FITNAH steht für "**F**low over **I**rregular **T**errain with **N**atural and **A**nthropogenic **H**eat Sources" (/1/, /2/, /3/, /4/, /5/,/6/).

Die mathematisch formulierten und im Modell numerisch implementierten physikalischen Prozesse ermöglichen es, die Ausbildung von geländebeeinflussten Strömungen sowie die Temperatur- und Verdunstungsabläufe unter Berücksichtigung von Bewuchs und Bebauung realistisch zu berechnen. Das Modell arbeitet mit einem geländefolgenden Koordinatensystem und ist in der Lage, eine ganze Reihe von verschiedenen Landnutzungen mit den jeweils spezifischen Eigenschaften hinsichtlich der Energieumsetzung (z.B. den anthropogenen Wärmestrom, die mittlere Bebauungshöhe usw.) differenziert zu behandeln.

Als so genanntes „nicht-hydrostatisches, prognostisches“ Modell beruht es auf einem voll-dynamischen Strömungskern auf Basis der Gleichungen für alle drei Windkomponenten (Komponenten des Windvektors im 3D-Raum, x-, y- und z-Richtung), sowie auf den Bilanzgleichungen für Temperatur, Feuchte und Turbulenzenergie. Diese (miteinander gekoppelten) Gleichungen werden in kleinen Zeitschritten gelöst, so dass sich die vielfältigen nicht-linearen Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Topographie-Bereichen, vergleichbar der Natur auch, sukzessive einstellen und der von der Natur erzielte Balancezustand zwischen den unterschiedlichen strömungsbeeinflussenden Effekten realistisch berechnet wird.

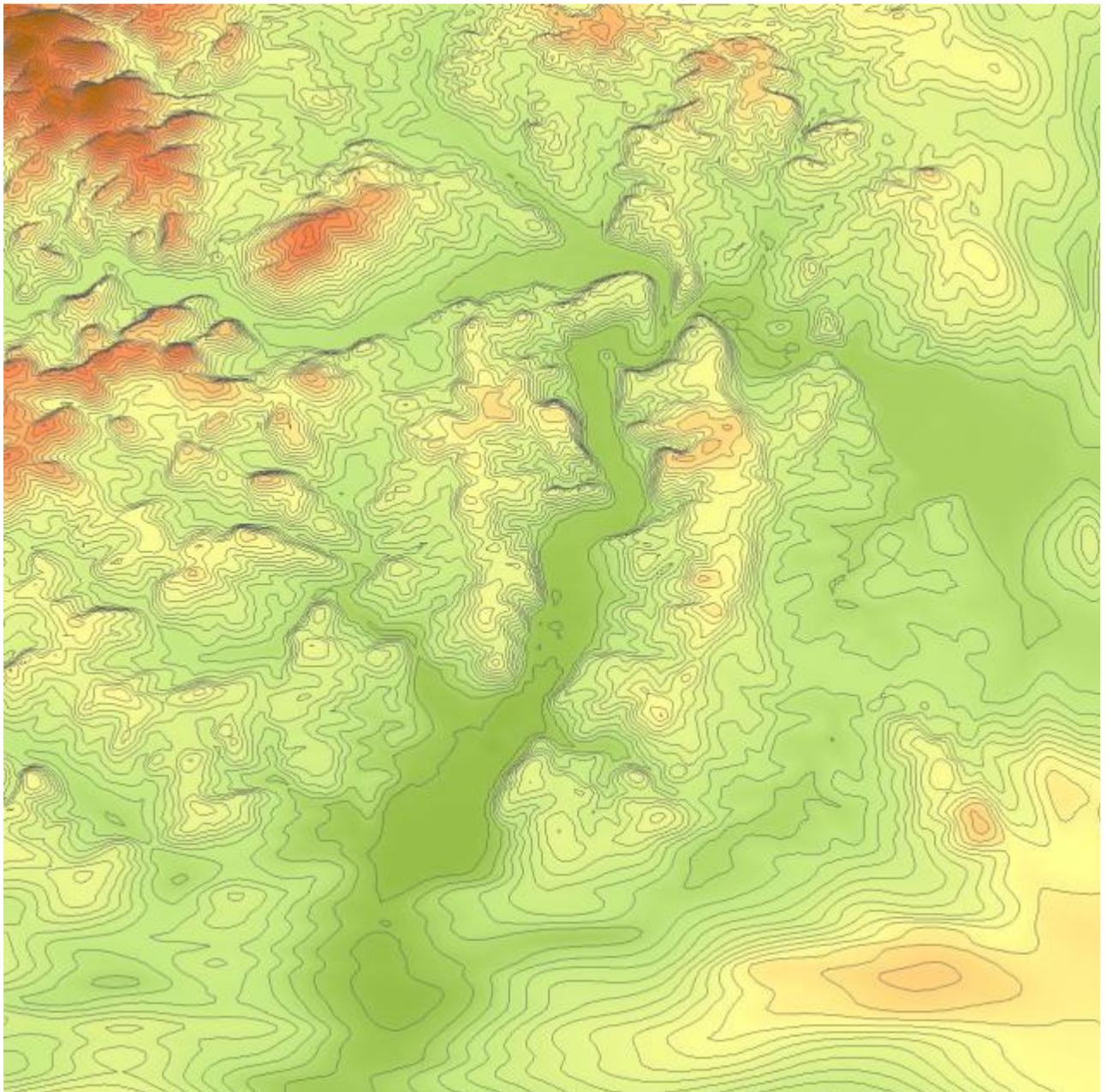
Das Modell **FITNAH** ist vielfach validiert und ist von zahlreichen Fachbehörden als eines der leistungsfähigsten Instrumente zur Simulation meteorologischer Phänomene im Bereich der Umweltmeteorologie anerkannt.

### 5.2 Das Rechengebiet von FITNAH für das Beispiel Marburg

Das Rechengebiet oder Berechnungsgebiet von FITNAH wurde so groß gewählt, dass das gesamte Stadtgebiet von Marburg (Abb. 5-1) und das potentielle Einzugsgebiet von im Stadtgebiet wirksamen Kaltluftströmungen enthalten sind. Dieser zweite Punkt führt zu einer Ausdehnung des Berechnungsgebietes bis zu den Ausläufern des Sauerlandes am Oberlauf der Lahn.

Das Rechengebiet erstreckte sich daher über 36 km in West-Ost- und 36 km in Süd-Nord-Richtung. Die horizontale Auflösung (Maschenweite) der Simulation betrug 100 m. Eine einzelne der somit 360 x 360 Rechenflächen hat eine Ausdehnung von 100 m x 100 m.

Die vertikalen Abstände des Rechengitters sind bodennah sehr klein (0, 5, 15, 21, 28, 36, 45, 55, 66, 78 m usw.). Darüber wurde der Abstand jeweils um etwa 20% vergrößert, insgesamt wurden 40 Gitter-Höhen-Niveaus bis in eine Höhe von 8.500 m definiert.

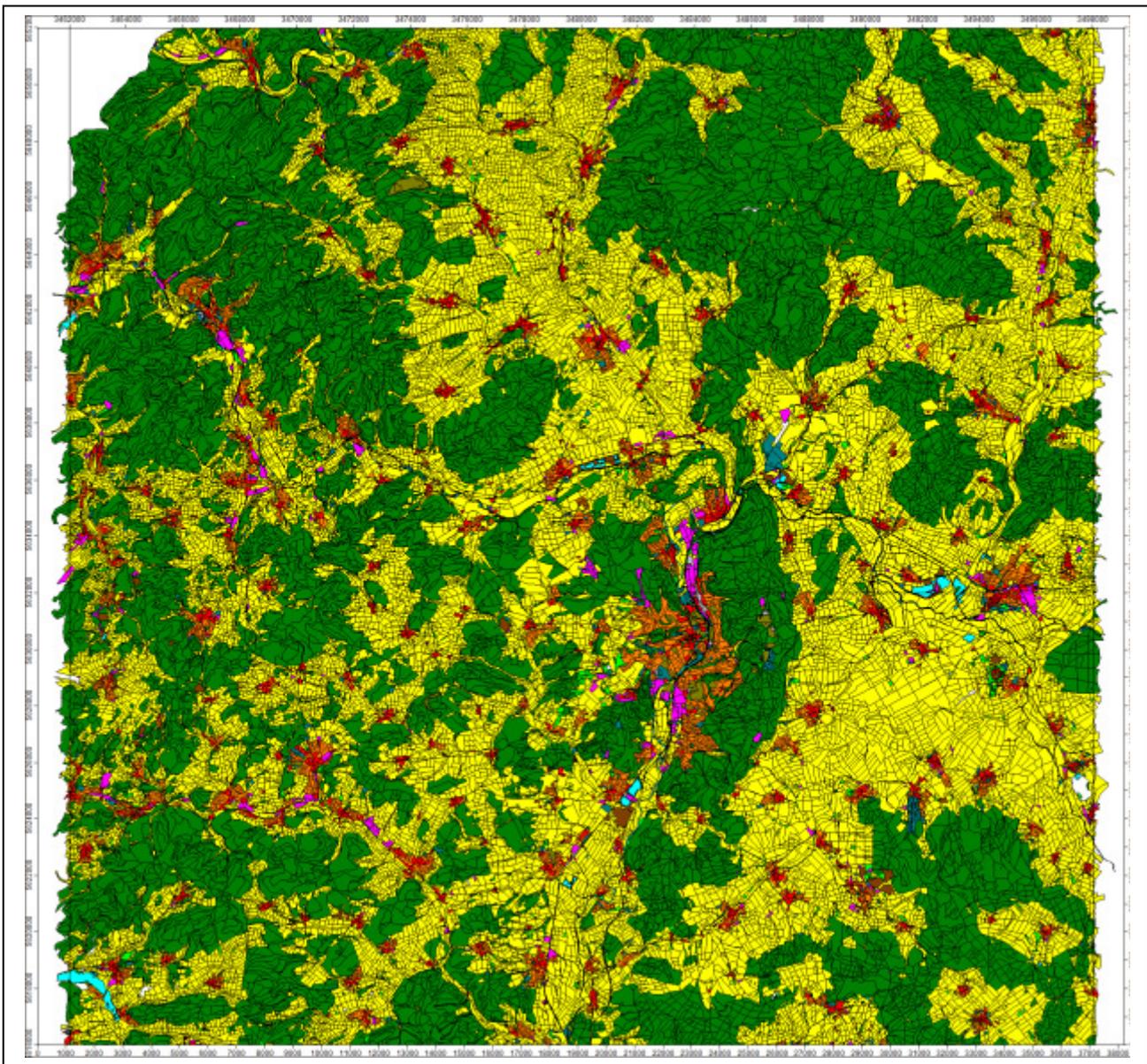


**Abb. 5-1:** Ausschnitt Stadtgebiet Marburg aus dem FITNAH-Rechengebiet mit Maschenweite 100 m: Geländeform überhöht.

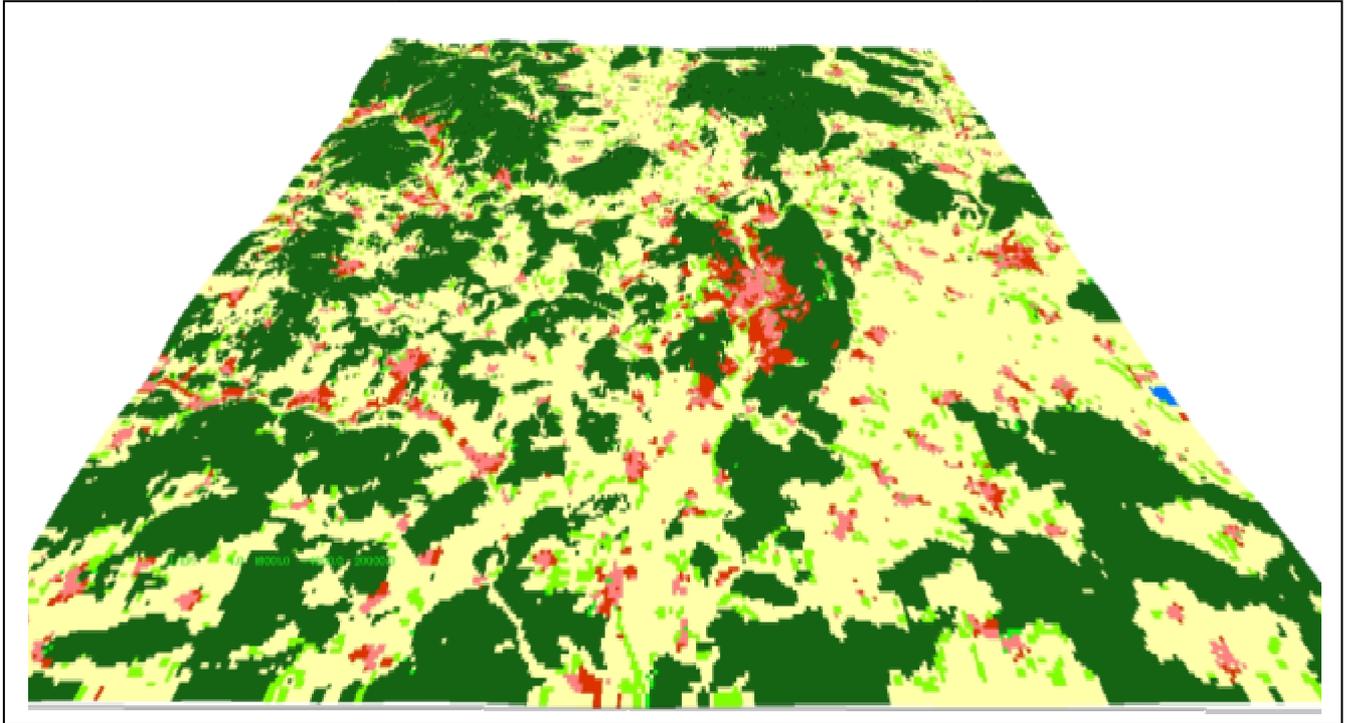
### 5.3 Landnutzung

Die Landnutzung wurde zunächst auf Basis des CORINE-Katasters bestimmt. Dabei wurde jeder Rechenfläche von 100 m x 100 m ein Anteil der Landnutzungen „Wasser“, „Freifläche“, „Bebauung“ und „Bewaldung“ zugeordnet. Dabei werden je nach Bebauungstyp und Bestandsart unterschiedliche Höhen von Bebauung und Bewuchs berücksichtigt. Für die Bebauung wird zudem ein für den Bebauungstyp charakteristischer anthropogener Wärmestrom einbezogen.

Um die im 100 m-Raster auch kleinräumig stark variierenden Nutzungen und Oberflächeneigenschaften realistisch erfassen zu können wurde die Landnutzung nahezu im gesamten Berechnungsgebiet auf Basis von ATKIS-Daten präzisiert (Abb. 5-2).



**Abb. 5-2:** Datengrundlage zur Landnutzung (ATKIS-Daten) im Berechnungsgebiet.



**Abb. 5-3:** Haupt-Landnutzung (Landnutzung mit prozentual höchstem Anteil) auf jeder der 100 m x 100 m großen Rechenflächen im Modell. Schrägsicht, in der Bildmitte das Stadtgebiet von Marburg.

#### **5.4 Meteorologische Situation und Anfangszustand**

Für die hoch auflösende Simulation im Berechnungsgebiet wurde von einer „autochthonen“ Wetterlage ausgegangen. Die Luftdruckverteilung weist kaum Druckunterschiede auf (wie es z.B. im Kern von Hochdruckgebieten typischerweise der Fall ist) und es gibt keine übergeordnete bzw. überregionale Strömung.

Die Simulation wurde für einen typischen Sommertag durchgeführt (01. August), die Sonnenuntergangs- und –aufgangszeiten waren 19:30 und 4:30 (wahre Ortszeit, die Sonne steht dabei um 12:00 im Zenit).

Die Berechnung wurde um 15:00 gestartet, damit sich die zu berechnenden meteorologischen Größen noch vor dem Beginn der abendlichen Abkühlung in Wechselwirkung mit Geländestrukturen und Landnutzung ausbalanciert und in sich konsistent einstellen können (Einschwingphase, meist ca. 1 simulierte Stunde).

Das Modell benötigt während der Simulation keine weiteren Eingaben von außen, alle Größen werden in Balance miteinander konsistent und fortwährend modellintern berechnet. Allerdings muss ein Anfangszustand vorgegeben werden (bezogen auf 15:00 Startzeit):

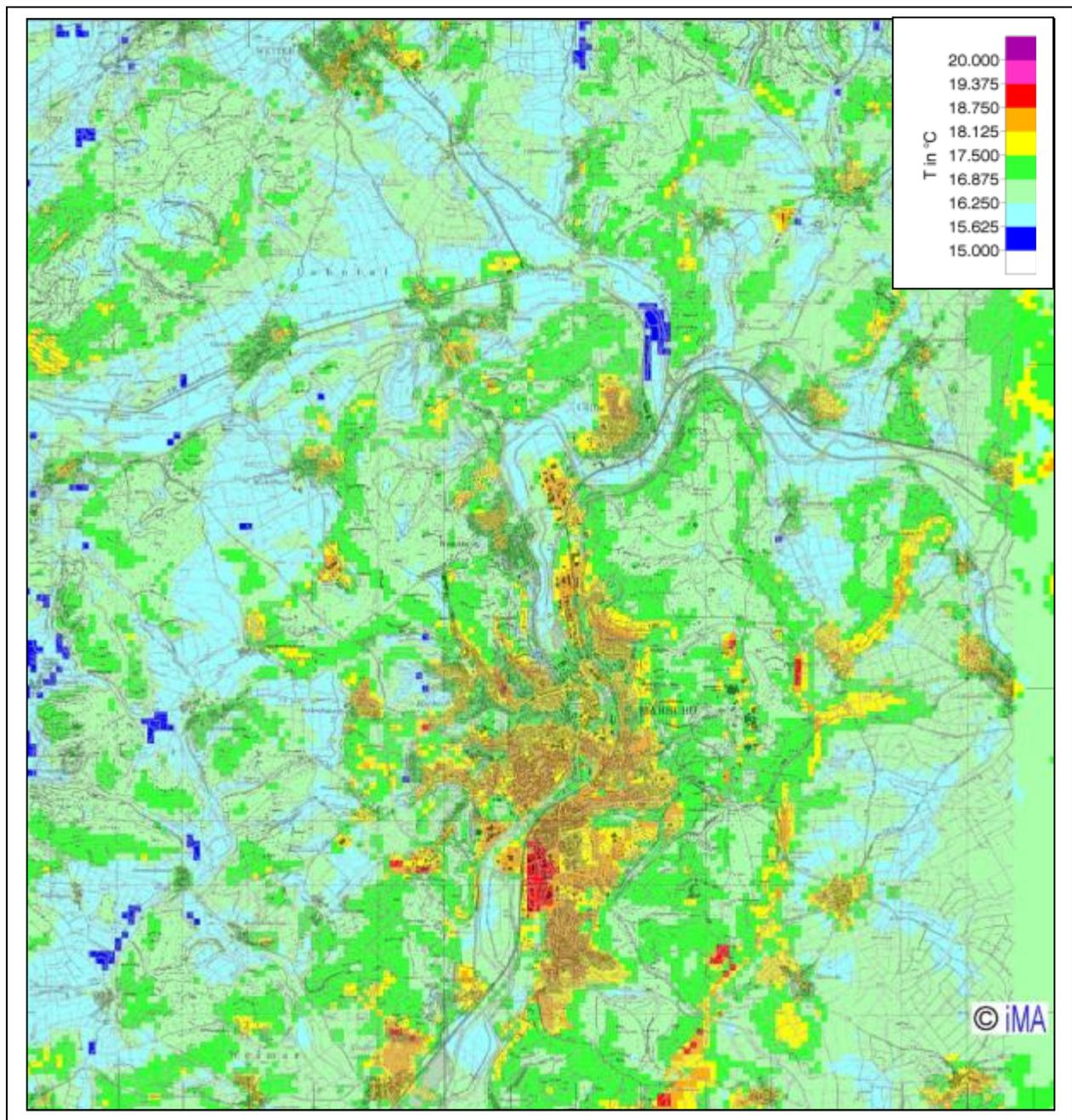
- Zu Beginn ebenes Gelände, Übergang zu den tatsächlichen Geländehöhen innerhalb der ersten 5 Minuten der Simulationszeit (Diastrophie-Phase).

- Temperatur der Erdoberfläche über freiem Feld 25°C, in überwiegend dicht bebauten städtischen Strukturen um bis zu 4 K wärmer (max. 29°C), je nach Versiegelungsgrad auf einer 100 m x 100 m großen Fläche, in Waldbeständen je nach Dichte des Bestandes um bis zu 4 K kühler (minimal 21°C)
- Konstante Boden-Temperatur in 1 m Tiefe 15°C.
- Konstante Temperatur von Wasseroberflächen 20°C.
- Temperaturgradient mit der Höhe leicht stabil (Standard-Atmosphäre), Höhe der Mischungsschicht zu Beginn 1.100 m über Grund.
- Relative Feuchte in Bodennähe 60%.
- Keine Wolken (Bedeckungsgrad 0/8).

Die Aktualisierung der Berechnung des Schattenwurfes erfolgte bei Sonnenständen über dem Horizont alle 5 Minuten, die Aktualisierung der Berechnung der langwelligen Strahlungsströme (Divergenzen) alle 10 Minuten.

## 6 Ergebnisse für das Stadtgebiet

Die folgenden Abbildungen zeigen die mittlere Bodentemperatur (2 m über Grund, Abb. 6-1) und die mittleren Strömungsverhältnisse in 0-10 m über Grund (Abb. 6-2) sowie in 50 m über Grund (Überdachniveau, Abb. 6-3) zu Beginn einer Strahlungsnacht, etwa 1 bis 2 Stunden nach Sonnenuntergang. Es ist das Stadium, in der die Temperaturen vom Tage her zwar noch relativ hoch sind, die Abkühlungsraten jedoch am größten sind (vergl. auch Abb. 4-5) und die Kaltluftströmungen am intensivsten. Zu dieser Zeit dominieren noch lokale Kaltluftabflüsse, die Ausbildung von komplexeren Strömungssystemen hat gerade erst begonnen.

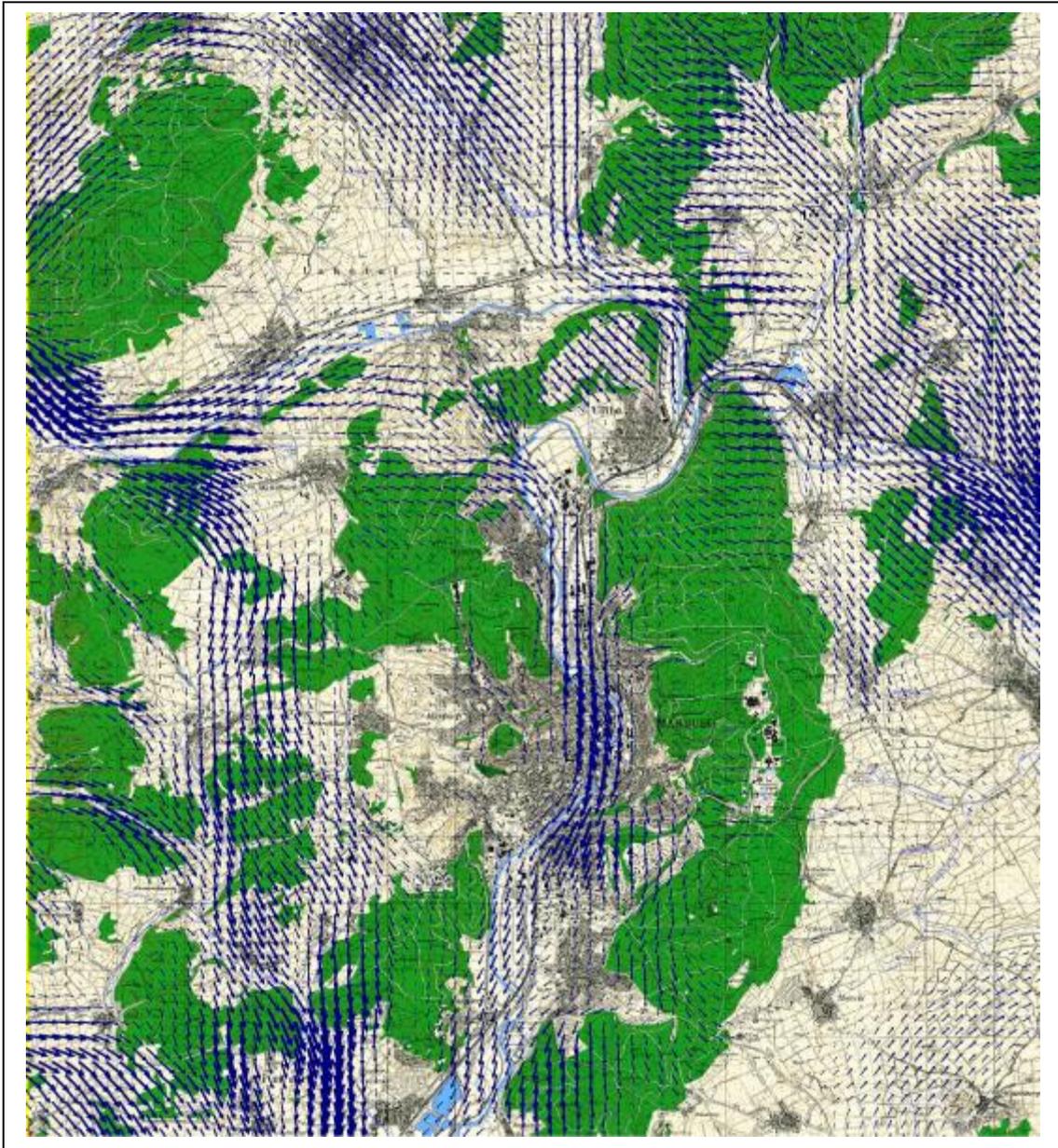


**Abb. 6-1:** Bodennahe Temperaturen (2 m über Grund) zu Beginn einer Strahlungsnacht, ca. 1 bis 2 Stunden nach Sonnenuntergang.

Zu Beginn der Strahlungsnacht ist die Abkühlung bereits vorangeschritten, das Temperaturniveau liegt zwischen 15°C und 20°C (zum Startzeitpunkt des Modellaufes um 15:00 herrschten im Mittel 25°C). Die höchsten Temperaturen des Stadtgebietes findet man erwartungsgemäß im Innenstadtbereich von Marburg und speziell in den Gewerbe- und Industriegebieten. Höhere Temperaturen werden zudem generell im Bereich der Siedlungsstrukturen berechnet. Waldgebiete sind zu diesem Zeitpunkt etwas kühler als die Siedlungsgebiete. Niedrige Temperaturen werden über größeren zusammenhängenden Freiflächen und in den Tallagen berechnet. Die Temperatur-Unterschiede zwischen Stadt und Umland betragen etwa 2°C bis 5°C.



**Abb. 6-2:** Bodennahe mittlere Strömung (10 m über Grund) zu Beginn einer Strahlungsnacht, ca. 1 bis 2 Stunden nach Sonnenuntergang. Die Strömung ist dargestellt durch Vektoren an jedem 2. Berechnungspunkt. Die Länge der Vektoren ist ein Maß für die lokale Geschwindigkeit.



**Abb. 6-3:** Mittlere Strömung im Überdachniveau (50 m ü. Grund) zu Beginn einer Strahlungsnacht, ca. 1 bis 2 Stunden nach Sonnenuntergang. Die Strömung ist dargestellt durch Vektoren an jedem 2. Berechnungspunkt. Die Länge der Vektoren ist ein Maß für die lokale Geschwindigkeit.

Die bodennahen Strömungsverhältnisse (Abb. 6-2) zeigen an vielen Hanglagen lokale Kaltluftabflüsse. Zu diesem Zeitpunkt ist sowohl die Richtung als auch die Geschwindigkeit von Kaltluftströmungen insgesamt sehr heterogen und primär am Gelände orientiert. Großflächige Kaltluftströmungen findet man über zusammenhängenden Freiflächen in Hanglage.

Direkt über dem Boden zeigen sich im Modell über zusammenhängenden städtischen Baustrukturen und Siedlungsgebieten keine markanten gerichteten Strömungen mehr. Hier sorgen die Baukörper als Strömungshindernisse und die vielen Rauigkeitselemente dafür, dass sich keine eindeutige gerichtete Kaltluftströmung mehr ausbildet oder durchsetzt. Das Durchsickern von

bebauten Strukturen mit Kaltluft durch pulsierende, ungerichtete, schwache und damit störanfällige Teilströme kann in seiner hochgradigen Zeitabhängigkeit und seinen lokal stark variierenden Umgebungsverhältnissen nicht berechnet werden. In den Genuss direkter bodennaher Kaltluftzufuhr aus dem Umland geraten daher in der Regel nur die Stadt- und Siedlungsränder. Die Abbildung 6-2 erlaubt dennoch eine grobe Einschätzung der Eindringtiefe der gerichteten Kaltluftströmung für die Verhältnisse unmittelbar über dem Boden.

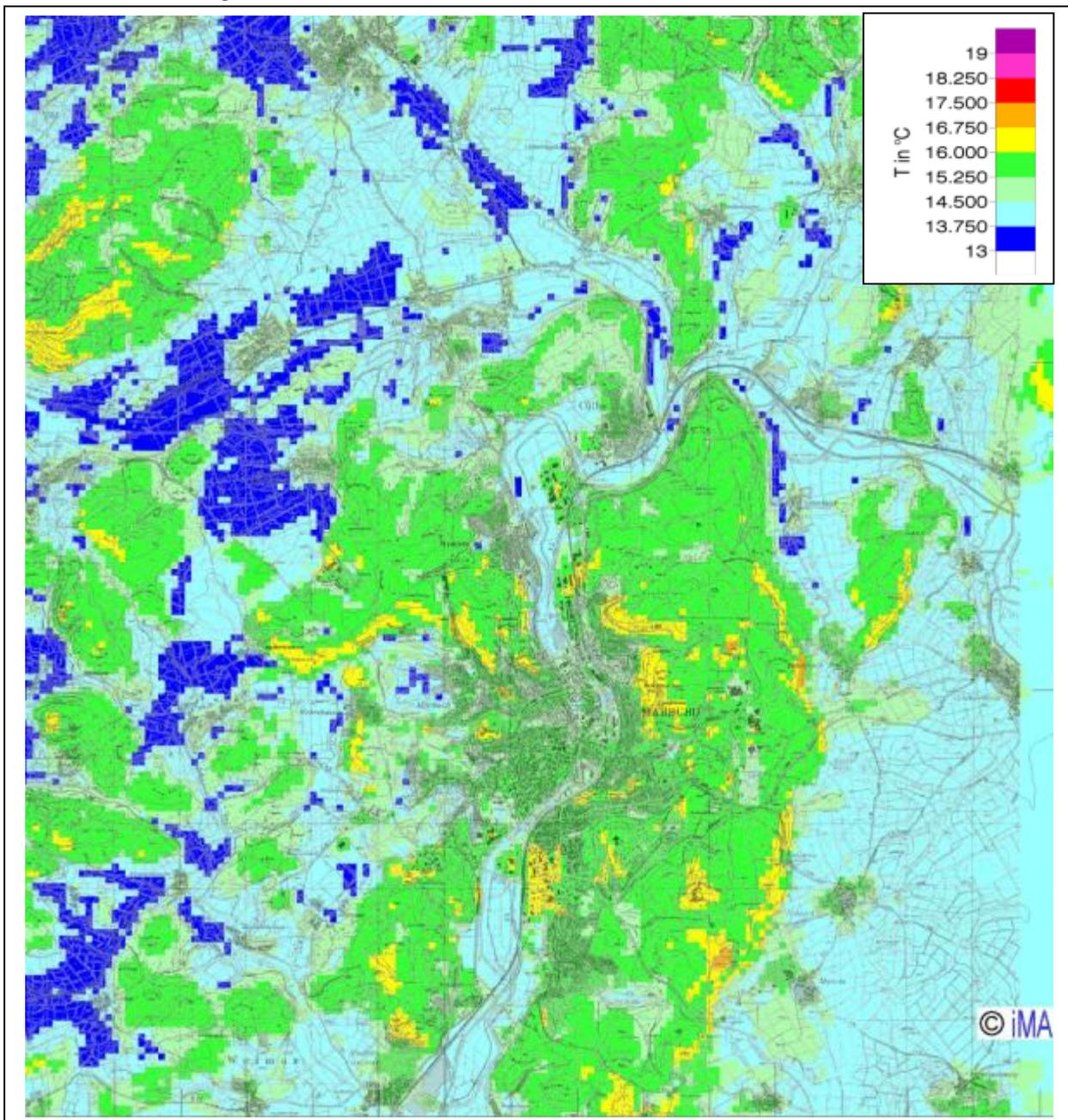
Die Kaltluftströmung ist aber durch diese bodennahen Effekte keinesfalls blockiert, sondern wird nach Überstreichen einer gewissen Übergangszone im Wesentlichen im Überdachniveau fortgesetzt, wenn der Kaltluftstrom eine entsprechende vertikale Mächtigkeit ausgebildet hat.

Im Überdach-Niveau (Abb. 6-3) zeigt sich, dass die Kaltluftversorgung des Innenstadtbereiches von Marburg hauptsächlich von Norden, über das Lahntal, erfolgt.

Die sehr intensiven bodennahen Kaltluftabflüsse auf den Freiflächen östlich des Waldgürtels im Osten von Marburg zeigen sich in 50 m über Grund nicht mehr. Es handelt sich dort folglich um eine dünne bodennahe Kaltluftschicht.

### Verhältnisse mehr als 3 Stunden nach Sonnenuntergang, zweite Nachthälfte

Die folgenden Abbildungen zeigen die mittlere Bodentemperatur (2 m über Grund, Abb. 6-4) und die mittleren Strömungsverhältnisse in 0-10 m über Grund (Abb. 6-5) sowie in 50 m über Grund (Überdachniveau, Abb. 6-6) im weiteren Verlauf einer Strahlungsnacht, mehr als 3 Stunden nach Sonnenuntergang bzw. in der zweiten Nachthälfte. Es ist das Stadium, in dem sich die Abkühlung verlangsamt, die Intensität der einzelnen Kaltluftabflüsse abnimmt, aber verstetigt, und in dem sich viele kleine und mittlere Strömungssysteme zu größeren übergeordneten Strömungen zusammenschließen können. Dargestellt sind hier die mittleren Verhältnisse in dieser zweiten Phase einer Strahlungsnacht.



**Abb. 6-4:** Bodennahe Temperaturen (2 m über Grund) später in der Strahlungsnacht, mehr als 3 Stunden nach Sonnenuntergang bzw. in der zweiten Nachthälfte.

Das Temperaturniveau hat im Mittel Werte zwischen 13°C und 16°C erreicht. Geringe Temperaturen werden nun über ausgedehnten Freiflächen, die niedrigsten in den Tallagen berechnet. In diesen späteren Stunden einer Strahlungsnacht zeigt sich, dass innerhalb der Waldbestände (dargestellt ist die Temperatur in 2 m über Grund) die Verhältnisse wärmer bleiben als über offenem Acker- oder Grünland. Die Übertemperaturen in der Innenstadt sind zu großen Teilen abgebaut worden. Dieser Bereich tritt nun nicht mehr als „besonders warm“ in Erscheinung.

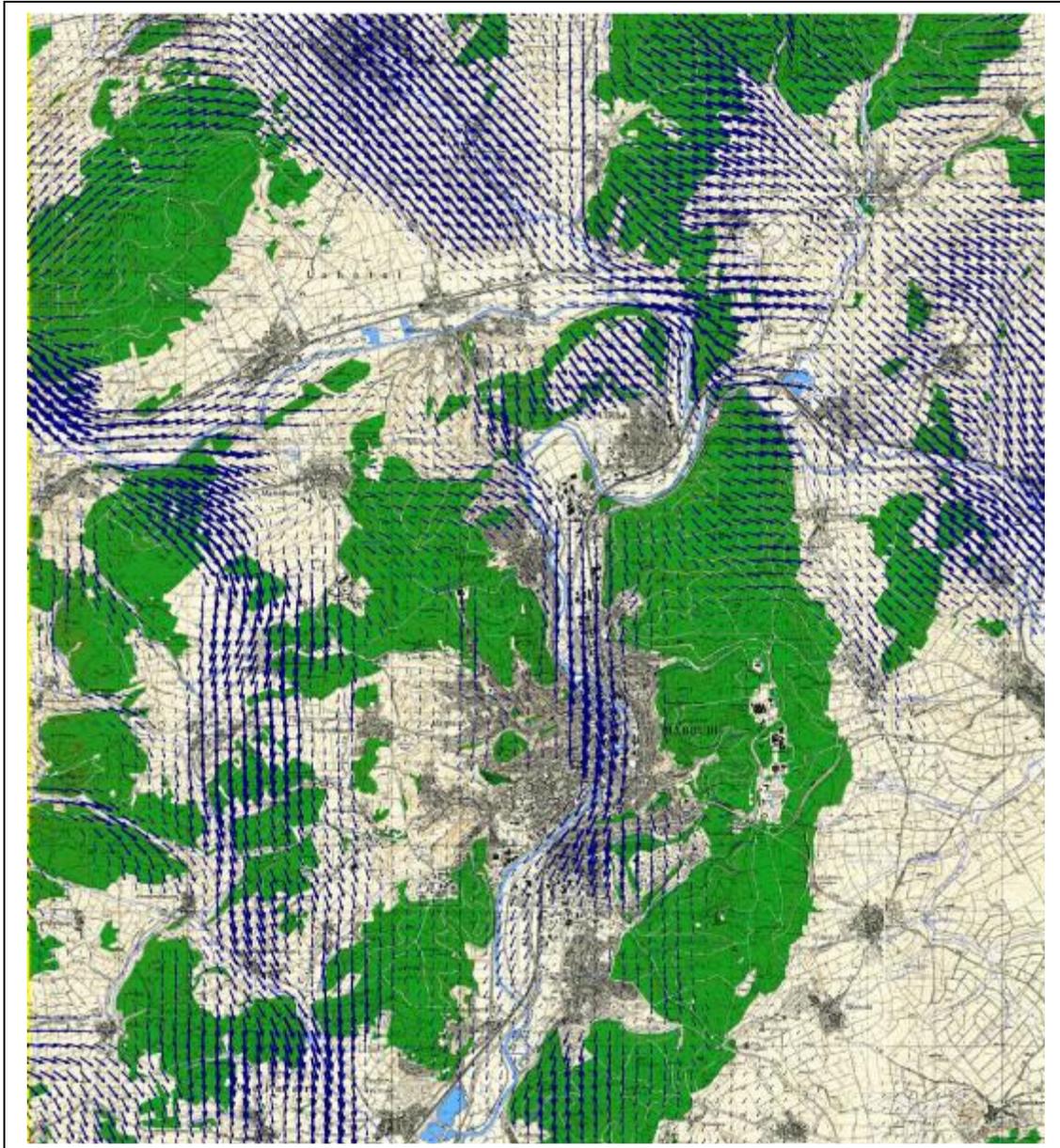


**Abb. 6-5:** Bodennahe mittlere Strömung (10 m über Grund) später in der Strahlungsnacht, mehr als 3 Stunden nach Sonnenuntergang bzw. in der zweiten Nachthälfte. Die Strömung ist dargestellt durch Vektoren an jedem 2. Berechnungspunkt. Die Länge der Vektoren ist ein Maß für die lokale Geschwindigkeit.

Die Strömungsverhältnisse zeigen sich in Bodennähe (Abb. 6-5) im Ganzen betrachtet strukturell wenig verändert; sie haben aber generell etwas an Intensität verloren. Auch später in der Nacht bleiben die Kaltluftabflüsse und –strömungen in den untersten 10 m sehr stark an den örtlichen

Geländeverhältnissen orientiert. Der Zustrom in das Stadtgebiet über das nördliche Lahntal besteht weiterhin.

Auch im Überdachniveau bleibt das Lahntal aus Norden die Haupt-Belüftungsachse für das Stadtgebiet (Abb. 6-6).



**Abb. 6-6:** Mittlere Strömung im Überdachniveau (50 m ü. Gr.) später in der Strahlungsnacht, mehr als 3 Stunden nach Sonnenuntergang bzw. in der zweiten Nachthälfte. Die Strömung ist dargestellt durch Vektoren an jedem 2. Berechnungspunkt. Die Länge der Vektoren ist ein Maß für die lokale Geschwindigkeit.

## 7 Erste Analysen zu regionalplanerischen Kategorien

### 7.1 Anforderungen der Regionalplanung

Die Regionalplanung hat definitionsgemäß einen weiträumigeren Scope als die Stadtplanung.

Während der Stadtplaner nicht selten die lokal- oder mikroklimatischen Auswirkungen von Teilplanungen in einzelnen Stadtteilen (B-Plan-Verfahren) einschätzen muss und sich sein Informationsbedarf im Kern auf „das Stadtgebiet“ bezieht, denkt der Regionalplaner in deutlich größeren Strukturen.

Die „kleinste Einheit“ des Regionalplaners ist „die Stadt“, „die Ortschaft“, „die überörtliche Luftleitbahn“, und der Informationsbedarf erstreckt sich nicht selten über weite Teile eines Bundeslandes.

Entsprechend unterscheiden sich die Anforderungen des Regionalplaners an die Auswertung von Strömungssimulationen, wie sie im vorangegangenen Kapitel vorgestellt worden sind.

Ziele der Regionalplanung sind:

- Identifikation von überörtlich bedeutsamen bioklimatischen und lufthygienischen Belastungsräumen oder die Frage: Wo besteht ein Bedarf an überörtlicher Entlastung?

Belastungsräume sind dann überörtlich bedeutsam, wenn sie eine gewisse Flächengröße überschreiten und *sich nicht aus sich selbst heraus, z.B. durch intensive Durchgrünung des Siedlungskörpers, bzw. aus dem unmittelbaren Umfeld heraus entlasten* können, sondern auf überörtlich entlastend wirkende Kaltluft-Strömungen bzw. -strömungssysteme angewiesen sind.

Daraus ergeben sich unmittelbar die folgenden Aufgaben für den Regionalplaner:

- Sicherung von überörtlichen bedeutsamen Kaltluft-Strömungsbahnen und
- Sicherung von überörtlichen Kaltluft-Produktionsgebieten

Zur Wahrnehmung dieser Aufgabe verfügt die Regionalplanung über verschiedene Instrumente. So können Bereiche gegen negative Veränderungen gesichert werden oder auch Vorbehalts- oder Vorranggebiete ausgewiesen werden, um bestimmte Funktionen zu erhalten oder zu verbessern.

Die genannten Maßnahmen stellen u.U. erhebliche Eingriffe in die planerischen Gestaltungsmöglichkeiten für ein Gebiet dar (Stichwort „kommunale Planungshoheit“) und müssen daher fundiert begründet werden.

Grundlage einer solchen Festlegung muss daher eine Analyse der Kaltluftströmungen sein, die auf die Anforderung der Regionalplanung zugeschnitten ist:

- Untersuchung von zusammenhängenden Siedlungsstrukturen (Stadt, Gemeinde, Teilort, Ortschaft) im Hinblick auf die lokalen Belüftungsfunktionen. Darstellung in einer Weise, die eine Einstufung zulässt, ob sich der Siedlungsraum aus sich selbst oder aus dem eigenen Umfeld heraus entlasten kann oder auf überörtliche Zuströme angewiesen ist.
- Ausweisen *und Abgrenzen* von für einen Belastungsraum belüftungsrelevanten überörtlichen Kaltluft-Leitbahnen.
- Ausweisen *und Abgrenzen* von den Kaltluftentstehungsgebieten, die eine für einen Belastungsraum belüftungsrelevante überörtliche Kaltluft-Leitbahn speisen.

Die Anforderung an die Genauigkeit der Abgrenzung beträgt – anders als beim Stadtplaner, der oft flurstücksgrenzengenau urteilen muss – ca. 100 m bis 200 m.

Wie in Kapitel 6 dargestellt besteht der Ergebnis-Datensatz einer Kaltluftströmungsuntersuchung aus 3dimensionalen Verteilungen hauptsächlich folgender Größen:

- Temperatur, inkl. Oberflächentemperatur
- Windvektor 3D, insbesondere Windrichtung und Windgeschwindigkeit, aber auch die Vertikalgeschwindigkeit

Diese Informationen liegen in hoher räumlicher Dichte vor (Beispiel Marburg: Das Berechnungsgebiet umfasst horizontal 360 x 360 Berechnungspunkte und bis in 100 m über Grund 12 Schichten, insgesamt stehen also zur Analyse über 1,5 Mio. unterschiedliche Daten der o.g. Größen zur Verfügung).

Neben diesen „Hauptgrößen“ können weitere Informationen hilfreich sein:

- Geländehöhe (2D)
- Landnutzung (2D) mit prozentualer Verteilung verschiedener Nutzungen an jedem Gitterpunkt.
- Weitere vom Modell berechnete Größen und Felder (Feuchte, Energiebilanz u.ä.).

Was allen zur Verfügung stehenden Daten und Größen grundsätzlich gemeinsam ist:

Die Darstellung der vorhandenen Größen lässt nicht *automatisch* eine *objektive* Abgrenzung und Differenzierung im Sinne der Regionalplanung zu.

Das menschliche Auge und das menschliche Gehirn vermögen zwar Strukturen zu erkennen und abzugrenzen, diese Trennung ist aber notwendigerweise immer subjektiv und würde von jedem Bearbeiter sicher etwas anders vorgenommen. Außerdem kann die Abgrenzung in der Regel nur verbal beschrieben werden und kann sich kaum auf quantitative (d.h. objektive) Kategorien berufen. Für eine rechtssichere Entscheidung von u.U. großer Tragweite ist diese Art der Entscheidungsfindung unbefriedigend.

Wünschenswert wären stattdessen Analyse-Größen und Methoden, die aus den vorhandenen Daten räumliche Verteilungen abgeleiteter (berechneter) Größen generieren, die – unter Anwendung einer geeigneten Skala – die vom Regionalplaner gewünschte Differenzierung und Abgrenzung objektiv und nachvollziehbar nahelegen.

Dies führt unmittelbar zu den wichtigen Fragestellungen:

- Welche (abgeleitete, berechnete) Zielgröße ermöglicht eine klare Differenzierung?
- Welche Skala soll angesetzt werden, um eine eindeutige Abgrenzung zu ermöglichen?

Diese Fragen sind bis heute für die regionalplanerische Ebene nicht eindeutig und allgemeingültig beantwortet.

Im Rahmen der Bearbeitung dieses Grundlagen-Projektes wurden anhand der vorliegenden Ergebnis-Datensätze erste Schritte in Richtung der Entwicklung solcher objektiven regionalplanerischen Kategorien unternommen. Dabei wurde auf Erfahrungen aus dem stadtplanerischen Bereich zurückgegriffen.

Diese Schritte werden im folgenden Abschnitt exemplarisch dokumentiert. Dabei werden auch die auftretenden Schwierigkeiten und bisherigen Unzulänglichkeiten im Hinblick auf die Kombination „Zielgröße – Skala“ aufgezeigt.

Eine tiefere Bearbeitung des Themas war im Rahmen des für diese Grundlagen-Studie zur Verfügung stehenden Zeitrahmens und Budgets nicht möglich.

Aus diesem Grund enthält dieses Kapitel als Schlussabschnitt eine Zusammenfassung des „Standpunktes“ am Ende des Projektes (Abschnitt 7.3).

## **7.2 Erste Analyse-Ansätze zu regionalplanerischen Verwendung**

Die folgenden Beispiele sollen zeigen, wie aus den vorhandenen hochwertigen Ergebnisdaten Größen abgeleitet werden können, die – nach Anwendung einer Skala – eine Differenzierung und Abgrenzung eher ermöglichen als die einfachen Modellgrößen.

Die Beispiele erheben keinen Anspruch auf Richtigkeit oder Vollständigkeit, sondern sollen exemplarisch aufzeigen, welche Wege beschränkt bzw. welche Methoden angewendet werden könnten.

### **7.2.1 Bodentemperaturen**

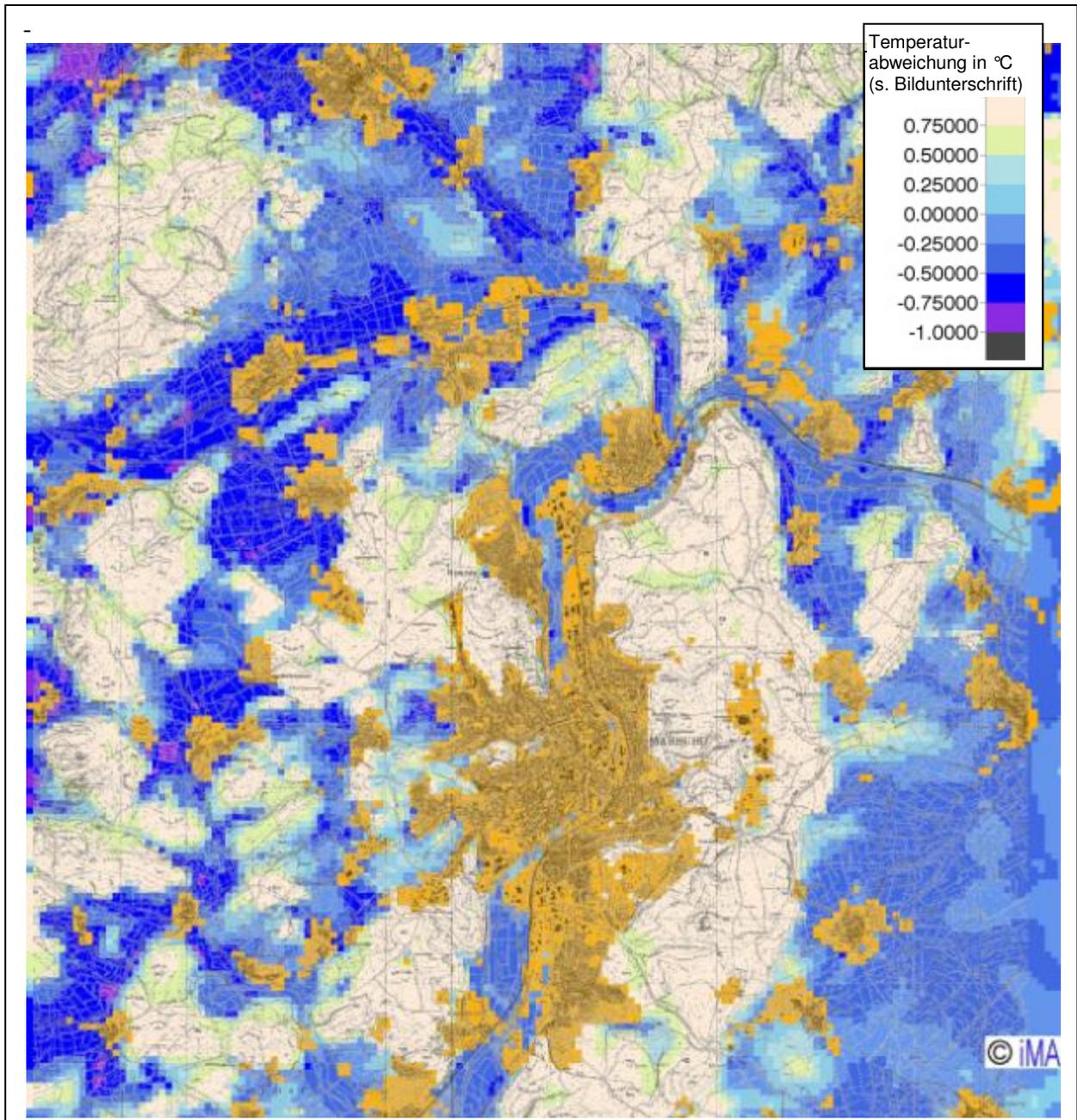
Das Bodentemperaturfeld (Abb. 6-1 und 6-4) lässt zwar relativ schnell die Identifizierung von „belasteten“ Siedlungsgebieten zu (höhere Temperaturen), eine Differenzierung von Wald- und Freiflächen hinsichtlich ihres Kaltluftpotentials ist aber aufgrund der Temperaturskala, die den gesamten Ergebnisbereich umfasst, nicht möglich.

Daher liegt es nahe, eine separate flächenhafte Auswertung vorzunehmen, die die Siedlungsgebiete ausnimmt. Dazu wird das bodennahe Temperaturfeld mit den Landnutzungsdaten überlagert und alle Berechnungsflächen herausgenommen, die 10% oder mehr an Siedlungsformen oder versiegelten Flächen enthalten. Von den verbleibenden Berechnungsflächen wird in einem ersten Schritt ein (Berechnungsgebiets-) Mittelwert der Bodentemperatur von Wald- und Freiflächen gebildet. Anschließend wird für jede Wald- oder Freiflächen-Rechenfläche (100 m x 100 m) die Abweichung zu diesem Mittelwert bestimmt.

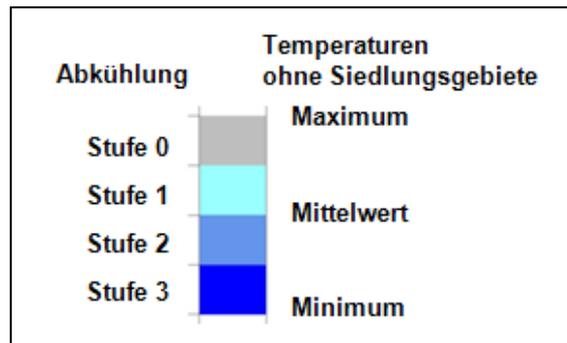
Das Ergebnis für eine Kaltluftsituation in der zweiten Nachthälfte ist in Abb. 7-1 dargestellt. Siedlungsflächen und Rechenflächen mit mehr als 10% Siedlungs-/Versiegelungsanteil sind in orange abgehoben. Die Farbskala umfasst nun nur noch Wald- und Freiflächen. Flächen, deren Temperatur höher ist als das Gebietsmittel für Wald- und Freiflächen sind hellblau und grün, Flächen mit niedrigeren Temperaturen als der Mittelwert in dunkelblau und violett-grau dargestellt.

In einem nächsten Abstraktionsschritt könnte eine Stufen-Skala eingeführt werden, um sich von den absoluten Temperaturen zu lösen. Auch hier wird wieder vom Rechengebiets-Mittelwert ausgegangen, hinzu genommen werden außerdem der maximale und der minimale Wert der auf Wald- und Freiflächen berechneten Temperaturen. Die Spanne wird jeweils noch einmal zwischen Maximal-Wert und Mittelwert sowie zwischen Mittelwert und Minimalwert unterteilt, so dass sich eine Skala mit 5 Werten und dazwischen 4 Bereichen ergibt, die im folgenden „Stufen“ heißen sollen (Abb. 7-2). Die Nummerierung der Stufen erfolgt von „0“ = „wärmste Gebiete unter den Wald- und Freiflächen“ bis „3“ = „kälteste Gebiete unter den Wald- und Freiflächen“.

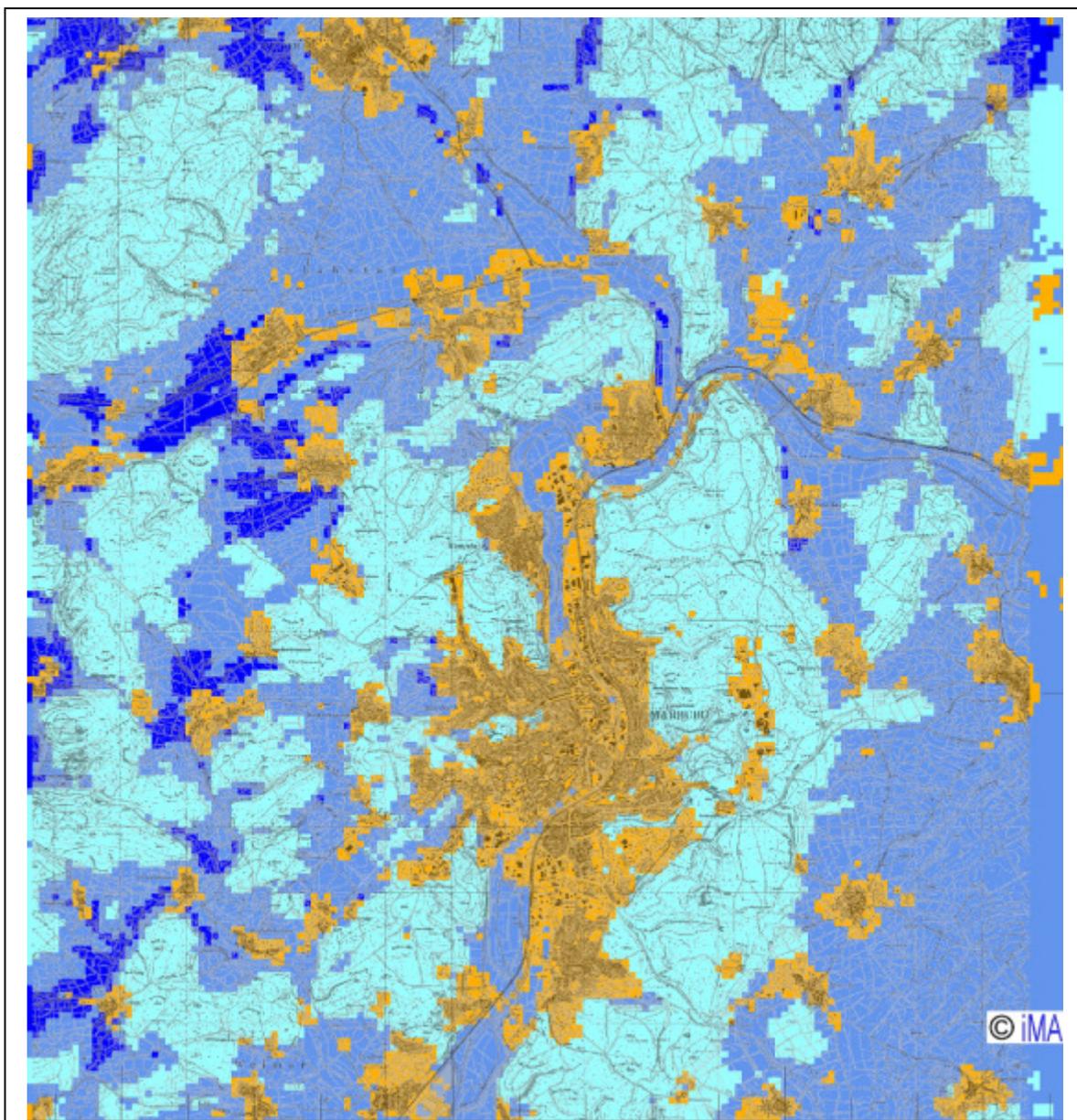
Das Ergebnis zeigt die Abb. 7-3. Die flächenhafte Verteilung wird auf den ersten Blick einfacher und klarer.



**Abb. 7-1:** Darstellung der Temperaturabweichung der Bodentemperaturen auf Wald- und Freiflächen mit weniger als 10% Siedlungsanteil gegenüber dem Mittelwert im Berechnungsgebiet (ebenfalls ohne Siedlungsstrukturen berechnet). Orange: Flächen mit mehr als 10% Siedlungsanteil.



**Abb. 7-2:** Entwicklung einer Stufenskala für die Temperaturabweichung der Bodentemperaturen auf Wald- und Freiflächen mit weniger als 10% Siedlungsanteil gegenüber dem Mittelwert im Berechnungsgebiet (ebenfalls ohne Siedlungsstrukturen berechnet).

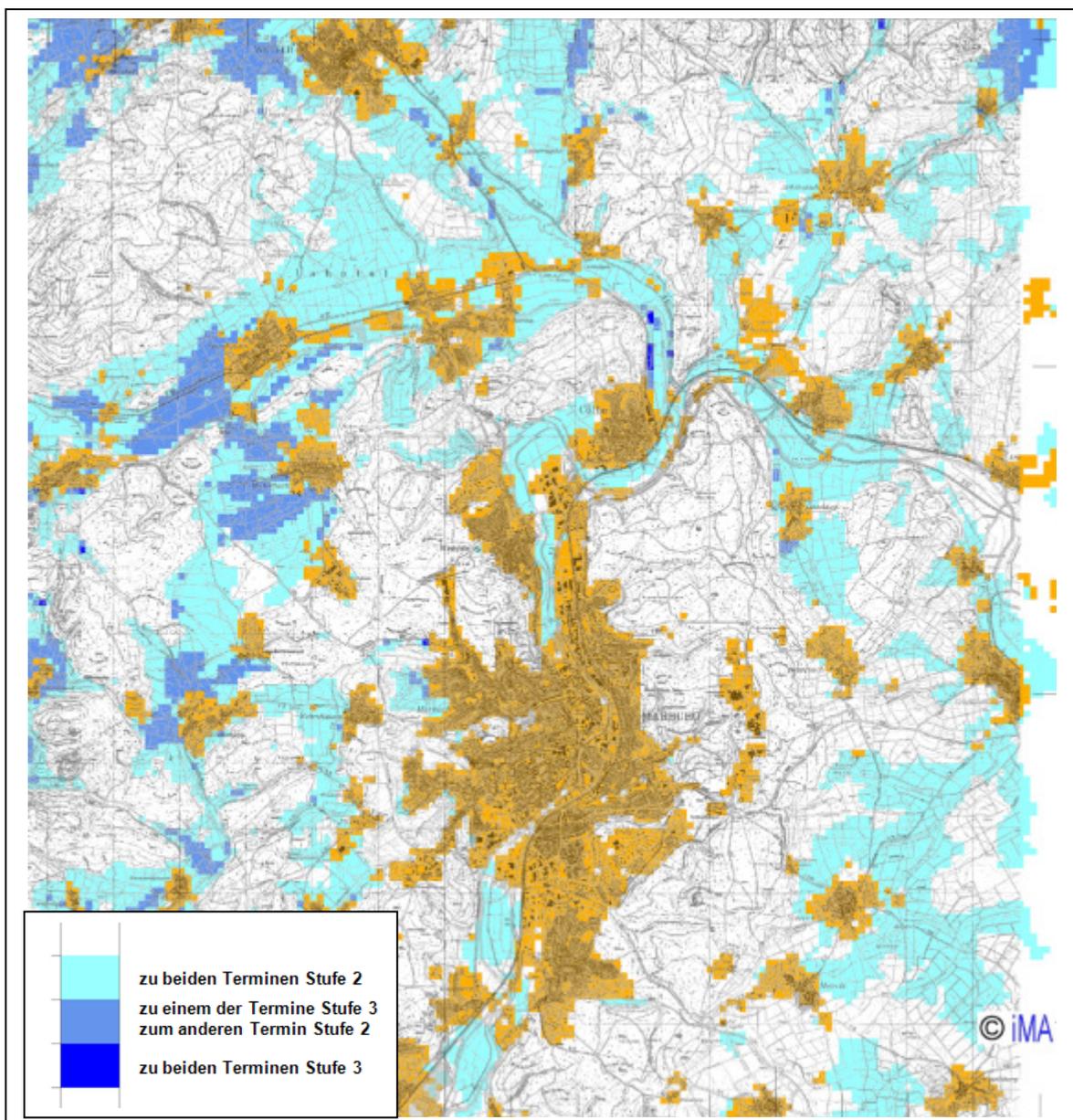


**Abb. 7-3:** Überführung der Temperatur-Abweichung in eine Stufenskala (s. Text und Abb. 7-2). Orange: Flächen mit mehr als 10% Siedlungsanteil.

Da man eine ganze Kaltluftnacht berücksichtigen möchte und dazu zwei Termine zur Verfügung stehen („Beginn einer Kaltluftsituation“ und „später in der Nacht“), kann die Auswertung bis zur Differenzierung „Stufe 0 bis 3“ für beide Termine separat durchgeführt werden.

Beide Ergebnisse können dann zum Beispiel wie folgt zusammengeführt werden:

Flächen, die zu beiden Terminen zu den kältesten gehörten (2 x Stufe 3) bekommen eine dunkelblaue Färbung, Flächen, die wenigstens zu einem Termin zur Stufe 3 gehörten, zum anderen Termin zur (zweitkältesten) Stufe 2, bekommen eine mittelblaue Färbung und Flächen, die zu beiden Terminen der Stufe 2 angehörten, eine hellblaue Färbung. Alle übrigen Termine wurden nicht eingefärbt. Das Ergebnis ist in Abb. 7-4 dargestellt.



**Abb. 7-4:** Zusammenführung der Temperaturabweichung über Wald- und Freiflächen aus den Stufen-Ergebnissen nach Abb. 7-3 für die zwei Ausgabezeitpunkte „Beginn einer Kaltluftsituation“ und „später in der Kaltluftnacht bzw. 2. Nachthälfte“. Erläuterungen s. Text.

Flächen mit besonderem Kaltluftpotential (besonders niedrigen Temperaturen während einer gesamten Kaltluftsituation) sind nun eindeutig erkennbar und abgrenzbar.

Es ist allerdings zu beachten, dass es sich dabei nicht um Kaltluftproduktionsflächen handelt, sondern um Flächen die entweder lokal stark abkühlen oder um Kaltluftammelgebiete in den Niederungen. Die Analyse wäre also gut geeignet, um z.B. eine Standortsuche unter dem Gesichtspunkt der Frostgefährdung für Obstbau oder empfindliche Pflanzen durchzuführen oder aber die Wahrscheinlichkeit von stellenweisem Auftreten von Bodenfrost räumlich abzugrenzen.

Für die im Abschnitt 7.1 geschilderten Ziele der Regionalplanung liefern die hier exemplarisch abgeleiteten Größen und verwendeten Skalen jedoch noch keine hinreichenden Argumente.

Folgende Probleme sind zu erkennen:

- Ableitungen aus dem bodennahen Temperaturfeld erlauben keine Abgrenzung der Kaltluftproduktion, da die Identifikation hangnah gebildeter Kaltluft auf diesem Wege nicht überall und damit zuverlässig gelingt. (Ursache: Siehe z.B. Abb. 4-4, Kaltluft an Hängen kann warm erscheinen.)
- Selbst bei Abstrahieren der Zielgröße und Vereinfachung der Differenzierung bis hin zu einem 3stufigen System können die vom Regionalplaner gewünschten eindeutigen Differenzierungen und Abgrenzungen nicht vorgenommen werden.

Es bedarf also offensichtlich anderer (komplexerer?) Zielgrößen und dazu passender Skalen.

### 7.2.2 Volumenströme

Eine in der Stadtplanung oft verwendete Größe zur Bestimmung, Differenzierung und Abgrenzung von Kaltluftströmen ist die Berechnung eines Volumenstromes. Dabei wird die Windgeschwindigkeit (m/s) in einer Gitterbox (100 m x 100 m x Höhe einer durch das Rechengitter gebildeten Zelle) multipliziert mit der Seitenfläche der Box (m<sup>2</sup>). Es ergibt sich ein Luftvolumen pro Zeit (m<sup>3</sup>/s), das die Gitterbox durchströmt.

Üblicherweise wird diese Betrachtung vom Boden bis in eine bestimmte Höhe „z“ integriert (aufsummiert).

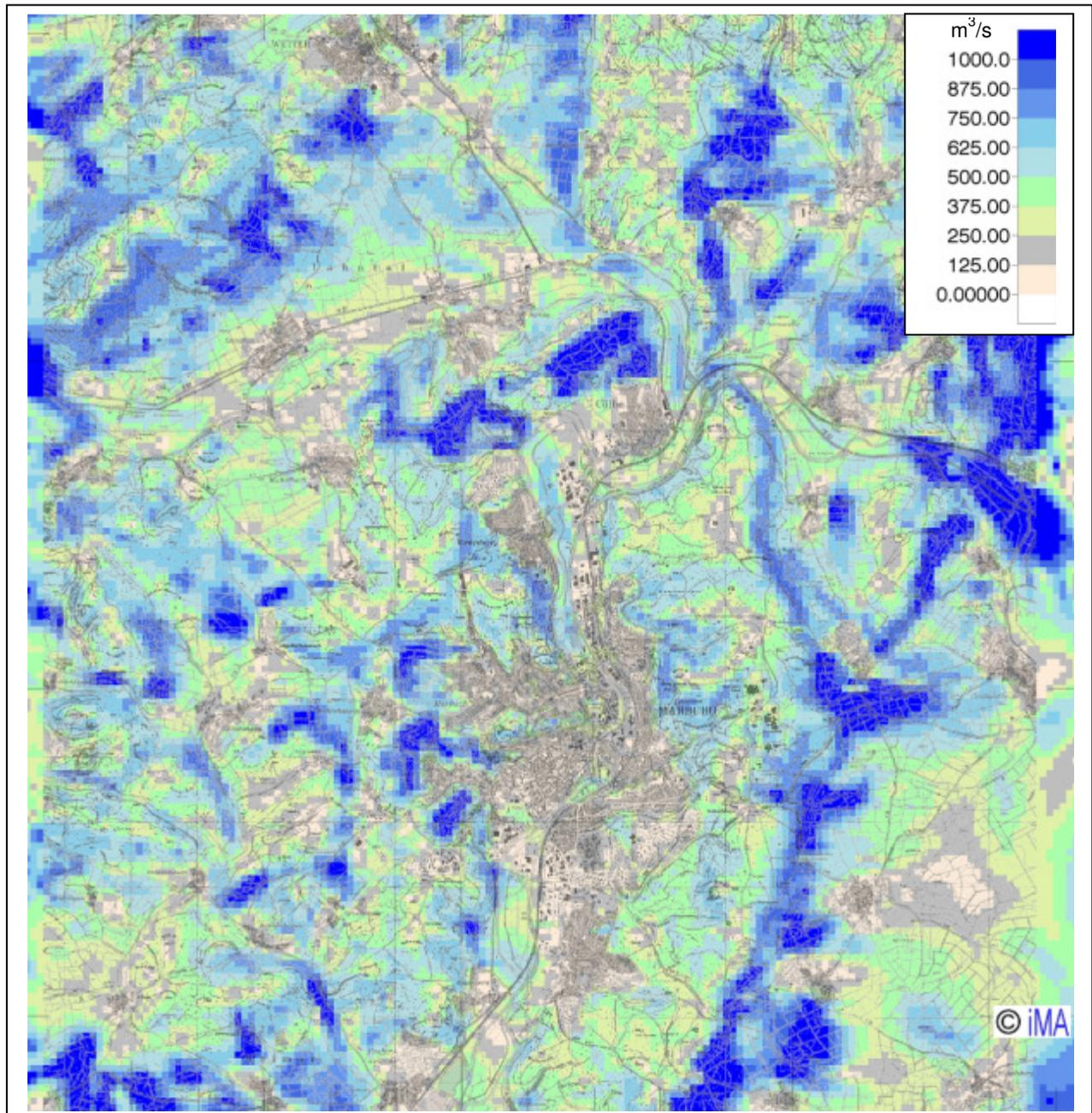
Die Abbildungen 7-5 und 7-6 zeigen die Volumenströme, einmal ausgewertet von 0 m bis 10 m über Grund und einmal von 0 m bis 50 m über Grund.

Jede der Abbildungen ermöglicht die Abgrenzung von Bereichen mit hohem Volumenstrom (dunkelblau) und weniger effektivem Lufttransport (hellgrün, grau, orange).

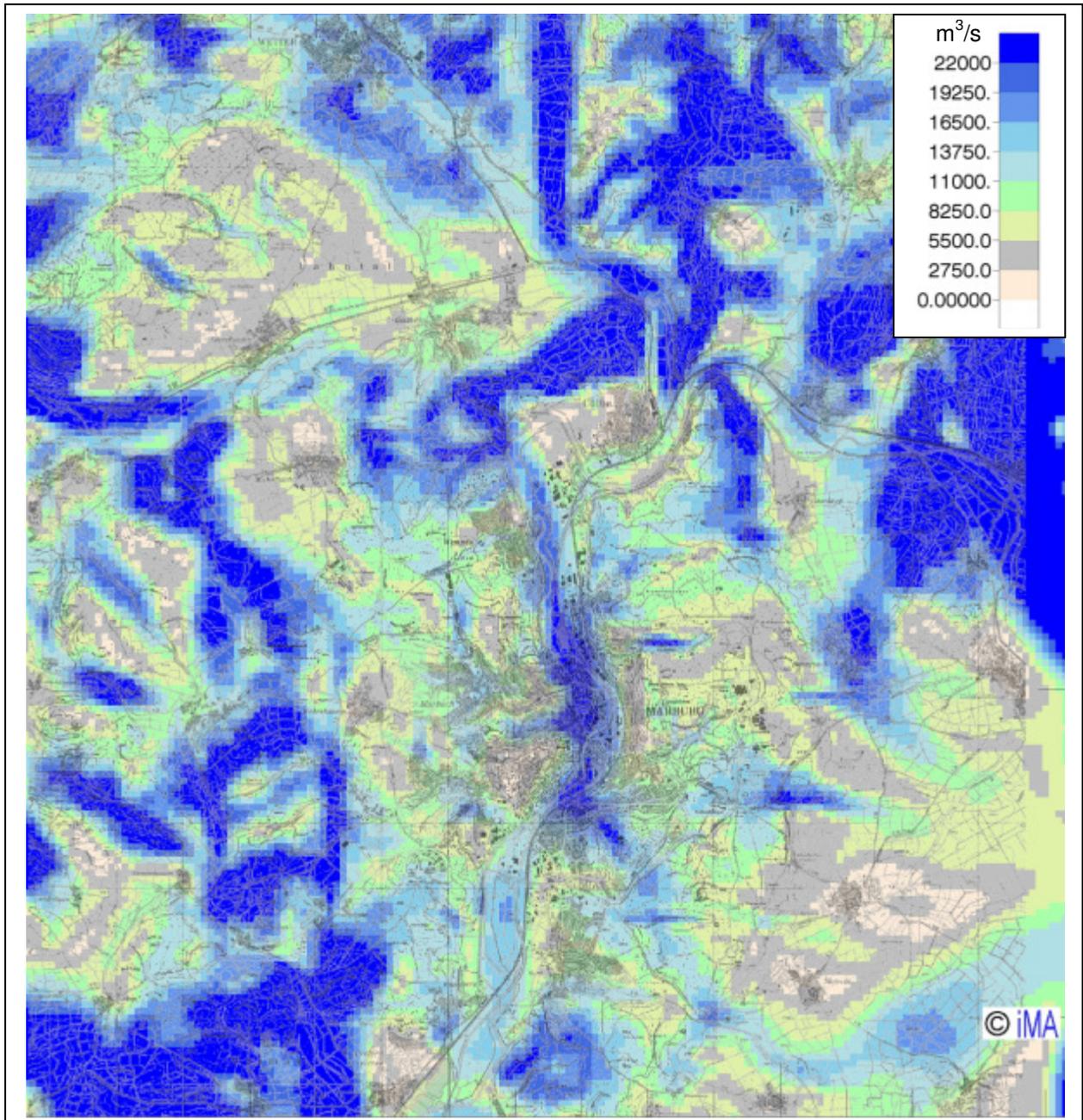
Allerdings zeigen die Abbildungen auch das Dilemma bei der Auswertung von Volumenströmen unter regionalplanerischen Gesichtspunkten: Je nach Höhe „z“, bis zu der die Volumenströme berechnet werden, ergeben sich z.T. sehr unterschiedliche Strukturen.

Während z.B. östlich des Waldsaums im Osten von Marburg bodennah (d.h. bis 10 m) ein sehr markanter, süd-nördlicher verlaufender Streifen relativ hoher Volumenströme blau in Erscheinung tritt, „verschwindet“ bzw. „zerfällt“ diese Struktur, wenn der Bereich bis 50 m Höhe betrachtet wird. Umgekehrt ist der Zustrom von Norden über das Lahntal in den Stadtkernbereich von Marburg in der Auswertung bis 10 m Höhe sehr blass, in der Analyse bis 50 m jedoch sehr deutlich sichtbar.

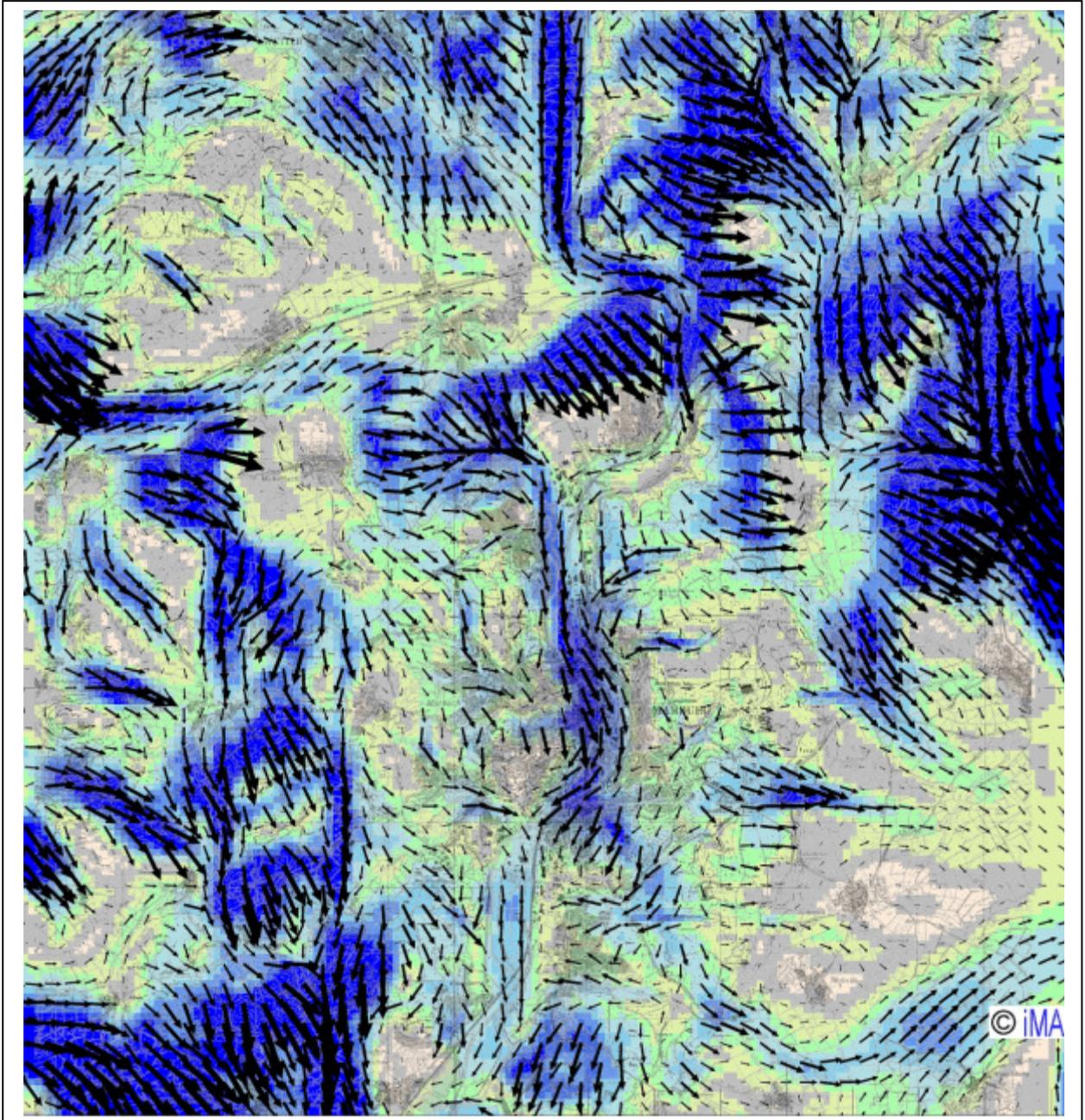
Schließlich darf nicht vergessen werden, dass ein zusammenhängendes Gebiet hoher Volumenströme noch keine Auskunft über die Orientierung des effizienten Lufttransportes gibt. Hier hilft nur eine Überlagerung z.B. mit Windvektoren (Abb. 7-7), die es aber wieder nur dem Auge des Betrachters überlässt eine Zuordnung zu treffen. Beispiel: Zusammenhängende dunkelblaue Bereiche mit großen Pfeilen in der zweiten Nachthälfte sind ein Indiz für Lage und Orientierung einer regionalen Luftleitbahn.



**Abb. 7-5:** Volumenströme in  $\text{m}^3/\text{s}$  bei Betrachtung des Höhenbereiches von 0 bis 10 m über Grund.



**Abb. 7-6:** Volumenströme in  $\text{m}^3/\text{s}$  bei Betrachtung des Höhenbereiches von 0 bis 50 m über Grund.



**Abb. 7-7:** Volumenströme in  $\text{m}^3/\text{s}$  bei Betrachtung des Höhenbereiches von 0 bis 50 m über Grund (wie Abb. 7-6), hier zusätzlich mit Vektoren der Strömung an jedem zweiten Gitterpunkt in 28 m über Grund (in etwa die mittlere Höhe im Bereich zwischen 0 m und 50 m über Grund)

### 7.2.3 Kaltluftproduktion

Wie gezeigt wurde (Abschnitt 7.2.1, Abb. 4-4) lässt sich eine Kaltluftproduktionsfläche oft nicht durch eine Analyse des bodennahen Temperaturfeldes eindeutig identifizieren oder abgrenzen.

Die Berechnung einer Kaltluftproduktion (die Einheit ist produziertes Kaltluftvolumen pro Bodenfläche und pro Zeiteinheit,  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$ ) ist in der Praxis äußerst schwierig. Über durchgängig ebenem Gelände (keine Luftbewegung!) könnte die Kaltluftproduktion sehr einfach aus dem Anwachsen der Kaltluftschicht mit der Zeit abgeleitet werden. In gegliedertem Gelände und bei vorhandenen Kaltluftströmungen und/oder Flurwinden wird es deutlich komplizierter, da Luftvolumina auch heran oder weg transportiert werden und Einfluss auf die Mächtigkeit einer Kaltluftschicht und deren zeitliche Veränderung nehmen. Allein schon die Ermittlung der Höhe einer Kaltluftschicht ist in einem Simulationsmodell mit diskreten vertikalen Rechenflächen nicht trivial.

Daher war es in der Vergangenheit üblich, die Kaltluftproduktion empirisch auf Basis der im Modell verwendeten Landnutzungsverteilung zu berechnen. Ausgehend von spezifischen Kaltluftproduktionswerten für unterschiedliche Flächen (z.B. Tabelle 7-1) kann für jede Rechenfläche (Beispiel Marburg: 100 m x 100 m) eine Kaltluftproduktion entsprechend der prozentualen Häufigkeit der in Tabelle 7-1 aufgeführten Landnutzungen auf dieser Fläche als Mischwert berechnet werden. Das Ergebnis einer solchen Berechnung ist in Abb. 7-8 zu sehen. Es treten hauptsächlich die Flächen in Erscheinung, die einen hohen Anteil Grünland/Ackerland aufweisen.

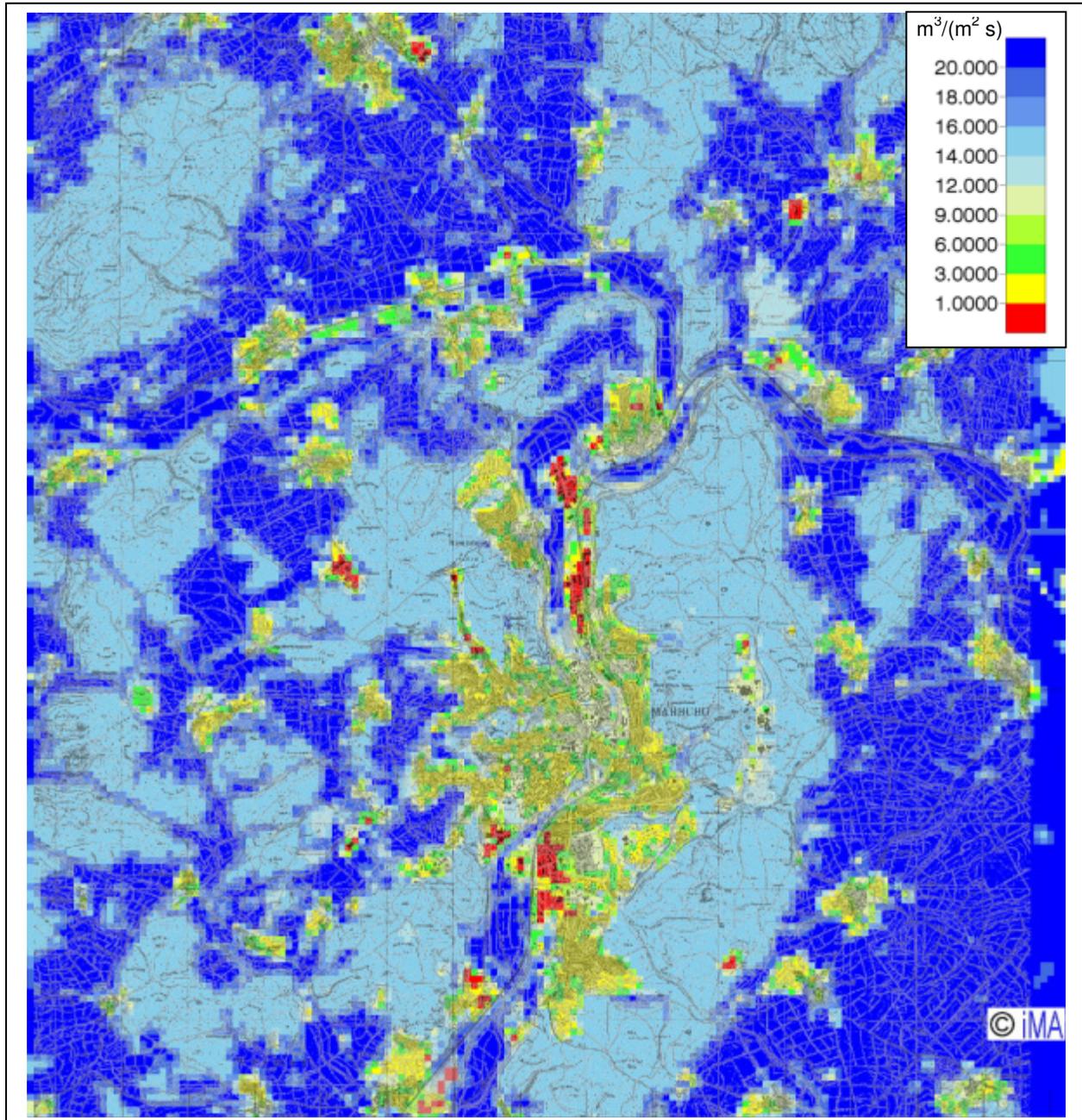
Die Abb. 7-8 ähnelt strukturell sehr stark der Abb. 7-3. Auch mit dieser Abbildung ist es schwer, die für die Speisung wichtiger überörtlicher Kaltluftströmungen „zuständigen“ Quellgebiete/Kaltluftproduktionsflächen automatisch und objektiv mit der nötigen Aussagesicherheit zuzuordnen bzw. abzugrenzen.

Die Berechnung der Kaltluftproduktion kann durch die Berücksichtigung der Geländeneigung modifiziert werden. Bislang wurde dieser Ansatz jedoch nur vereinzelt und dann empirisch verwendet, messtechnische Nachweise oder einheitliche Konventionen sind nicht dokumentiert.

**Tab. 7-1:** Bsp. einer Zuordnung von Kaltluftproduktionsraten für unterschiedliche Landnutzungen.

Landnutzung	Wert	Einheit
Grünland, Ackerland	15 – 20	$\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$
Wald <sup>**1)</sup>	12 - 15	$\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$
Gartenbau, Mischflächen	10 - 15	$\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$
Siedlungsgebiete	1	$\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$
Wasserflächen	0	$\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$

<sup>\*\*1)</sup>: Etwas höher (bis 20) bei Laubwald im Winterhalbjahr



**Abb. 7-8:** Flächenhafte Darstellung von Kaltluftproduktion im Bereich Marburg auf Basis der Landnutzung (Abb. 5-2) und der exemplarisch in Tabelle 7-1 aufgelisteten Raten.

#### 7.2.4 Rückwärtstrajektorien

Die Simulationsrechnungen liefern ein hoch aufgelöstes dreidimensionales Windfeld. Mit Hilfe dieses Windfeldes kann die Herkunft von (Kalt-) Luft an einem Zielort rechnerisch „rückverfolgt“ werden. Dabei wird ein Luftpaket am Zielort gestartet und für einen kurzen Zeitraum im Sekundenbereich mit den am Zielort vorherrschenden Windgeschwindigkeiten rückverlagert. Damit erreicht es einen nächsten Ort, an dem die Strömungsverhältnisse geringfügig anders sind. Der nächste Rückverlagerungsschritt erfolgt mit diesen neuen Strömungsverhältnissen und wiederum über einen kurzen Zeitraum. Die Aneinanderreihung vieler solcher Rückwärtsverlagerungen ergibt eine Bahnkurve im Modellgebiet. Diese wird als Rückwärtstrajektorie bezeichnet.

Dabei muss allerdings die vereinfachende Annahme getroffen werden, dass das Windfeld über den Zeitraum der Rückverfolgung stationär ist, d.h. sich zeitlich nicht verändert. Diese Annahme ist je nach Fall für Zeiträume von 1 bis 4 Stunden in erster Näherung akzeptabel. Dies entspricht bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s einer Verlagerungsdistanz zwischen 4 und 14 km.

Die zweite vereinfachende Annahme besteht in der Vernachlässigung turbulenter Verlagerungen. Obwohl Kaltluftströmungen als turbulenzarm gelten, ist dieser Punkt nicht unkritisch, da gerade in Bodennähe bei sehr rauer Oberfläche (Bebauung, Wald) die turbulenten Bewegungen von gleicher Größenordnung sein können wie die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten. Zudem nimmt die Ungenauigkeit der Rückverfolgung bei Vernachlässigung der turbulenten Bewegungen mit zunehmender Distanz vom Zielort stetig zu.

Die Abbildungen 7-9 und 7-10 zeigen exemplarisch zwei Beispiele zur Identifizierung von Luftleitbahnen zur Belüftung bestimmter Quartiere in Marburg mittels Rückwärtstrajektorien.

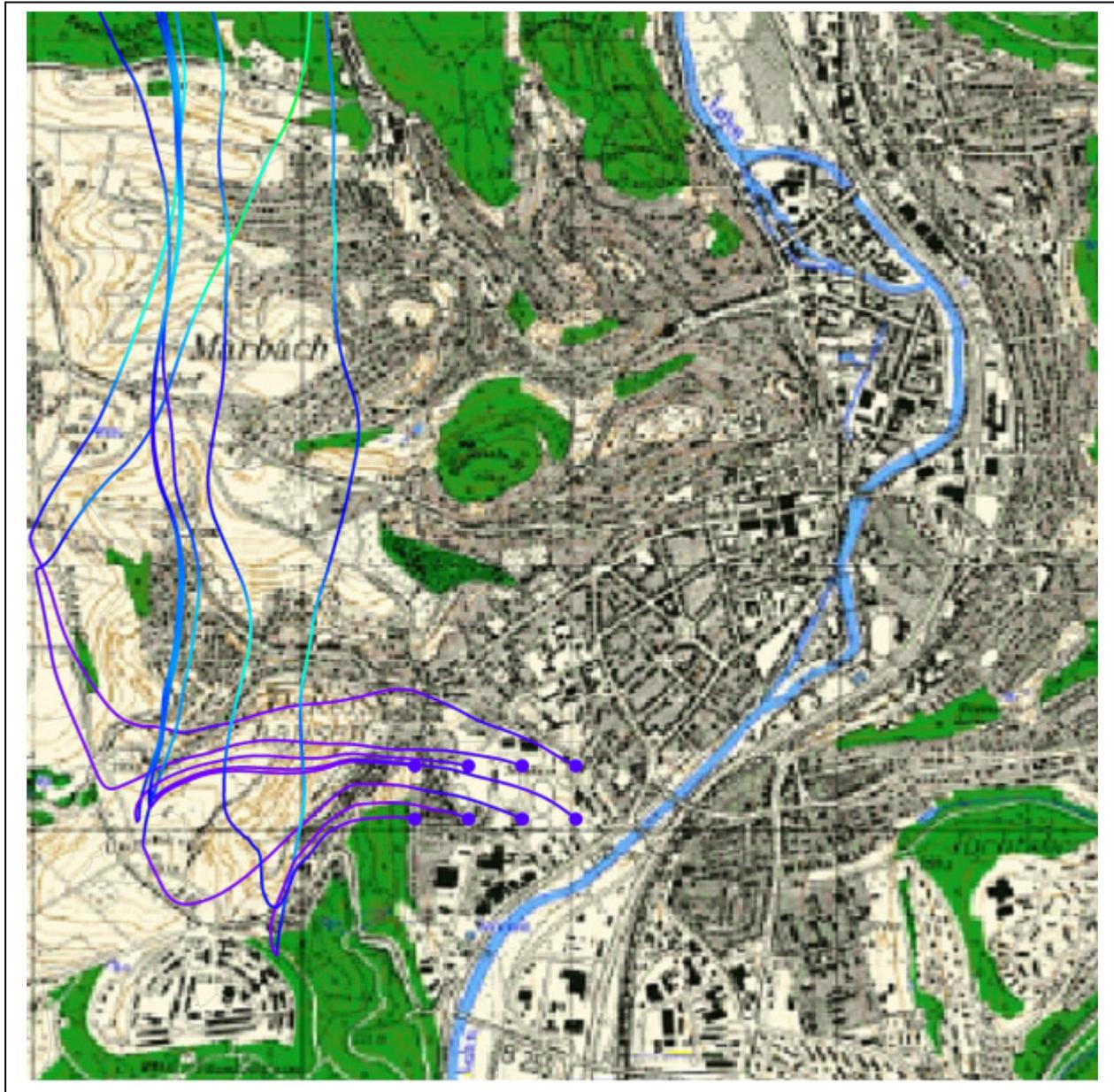
In Abb. 7-9 wurde als Zielgebiet das Sportgelände im Südwesten von Marburg ausgewählt. Rückwärts verfolgt wurden Luftpakete, die in 30 m über Grund dort ankommen sollen. Es ist zu erkennen, dass die Zufuhr zuletzt als bodennaher Kaltluftstrom entlang des Hanges des Nordost-Ausläufers des Hasenkopfs erfolgt. Über diesem Höhenrücken wurden die Luftpakete durch Absinken aus größerer Höhe einbezogen. Dorthin gelangten sie in Höhen zwischen 50 und 120 m über Grund aus nördlichen Richtungen.

In Abb. 7-10 war das Zielgebiet der Bereich „Cappeler Straße“. Auch hier zeigt sich, dass die letzten Meter auf dem Weg dorthin im Bereich des lokalen, nach Westen orientierten Hanges des Richtsberges zurückgelegt werden. Dorthin gelangen sie mit der nördlichen Strömung über dem Talgrund der Stadt östlich der Lahn, in Höhen zwischen 50 und 120 m über Grund.

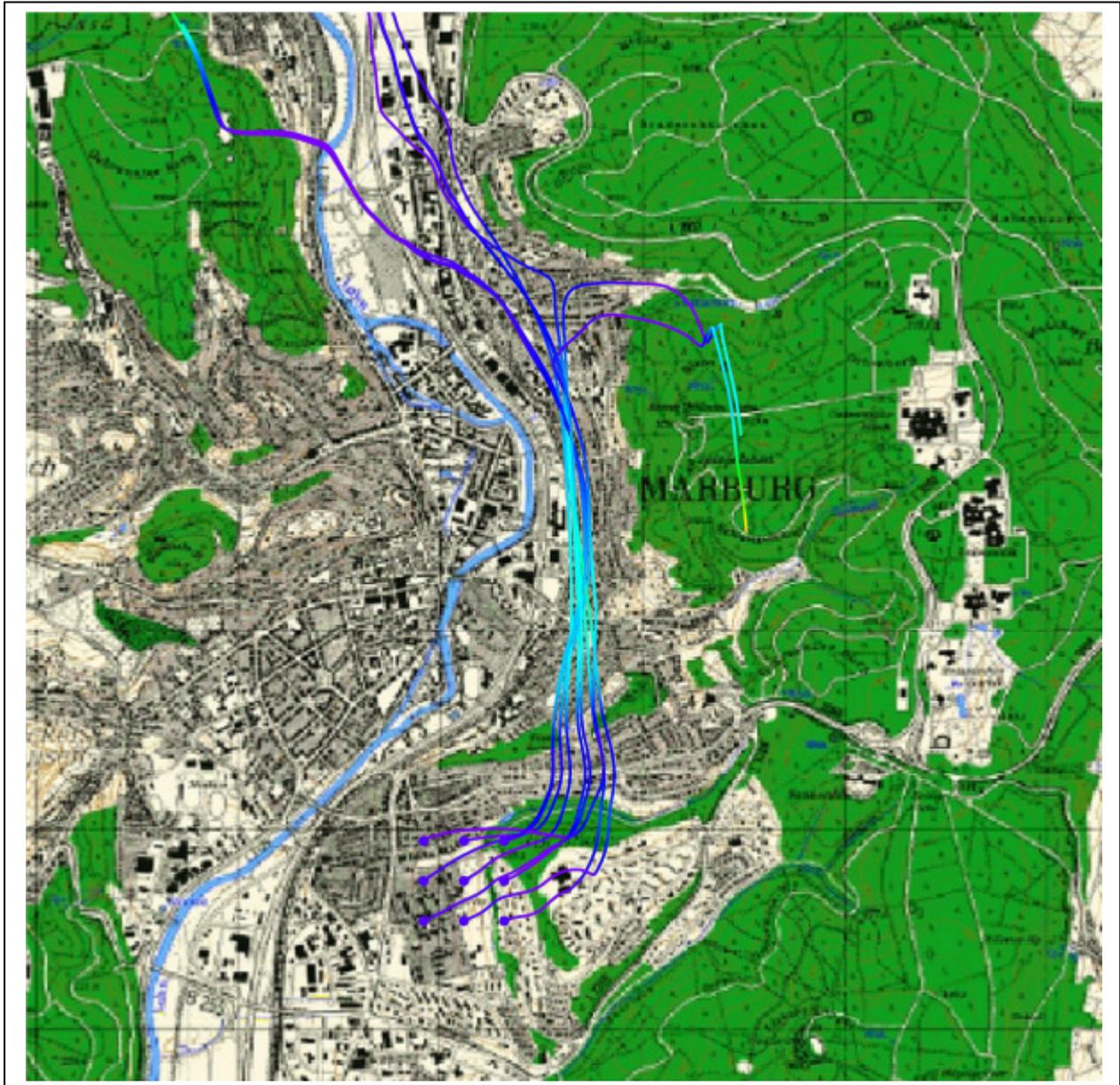
Wie aus den Abbildungen ersichtlich ergeben sich bei Verwendung von Rückwärtstrajektorien zur planerischen Analyse für den Betrachter auch Nebeneffekte:

Durch die notwendige (und realistische) Berücksichtigung der Vertikalgeschwindigkeiten im dreidimensionalen Windfeld verlaufen die Rückwärtstrajektorien in Teilen nicht bodennah, auch nicht in den untersten 50 m über Grund, sondern z.T. deutlich höher. Dort „geraten“ sie auch gelegentlich in den Einflussbereich von gegenläufigen Ausgleichsströmungen in mehr als 100 m über Grund und „verlieren sich“. Eine eindeutige Zuordnung eines an einem Zielort belüftungswirksamen Luftpaketes zu einem bestimmten Kaltluftstrom und vor allem zu einem bestimmten bodennahen Herkunftsgebiet ist auch mit dem Instrument der Rückwärtstrajektorien nicht automatisch gewährleistet. Insofern kann die räumliche Reichweite des Zusammenhangs zwischen Belas-

tungsraum und Ausgleichsraum (Kaltluftentstehungsgebiete) auf diese Weise sicher nicht immer ermittelt werden.



**Abb. 7-9:** 3D-Rückwärtstrajektorien für das Zielgebiet „Sportanlagen im Südwesten von Marburg in 30 m über Grund“. Farbtöne violett: Luftpaket in Bodennähe (0-30 m über Grund), Farbtöne blau 30 bis 60 m über Grund, Farbtöne Hellblau und grün 60 bis 120 m über Grund.



**Abb. 7-10:** 3D-Rückwärtstrajektorien für das Zielegebiet „Cappeler Straße 30 m über Grund“. Farbtöne violett: Luftpaket in Bodennähe (0-30 m über Grund), Farbtöne blau 30 bis 60 m über Grund, Farbtöne Hellblau und grün 60 bis 120 m über Grund.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick nach dem Grundlagen-Projekt

Die wesentlichen Begrifflichkeiten zur Bildung von Kaltluft, Kaltluftströmungen und Flurwinden wurden phänomenologisch und allgemeinverständlich erklärt. Dabei wurden auch die „Grenzenlosigkeit“ und die Dreidimensionalität dieser meteorologischen Prozesse hervorgehoben, die eine erste Hürde für eine automatisierte Analyse von Ergebnissen von Kaltluftströmungsuntersuchungen unter planerischen Gesichtspunkten und mit planerischen Kategorien darstellt. Betont wurde zudem die Bedeutung von lufthygienischen Aspekten, die die prinzipiell als positiv bewerteten Funktionen der Kaltluftströmungen ins Gegenteil verkehren können, wenn sie als turbulenzarme Strömungen Luftschadstoffe bodennah über weite Strecken in relativ hohen Konzentrationen verfrachten können.

Die Stärken der Kaltluftströmungsmodellierung mit dem Modell FITNAH wurden genutzt, um am Beispiel des Stadtgebietes Marburg entsprechend hochwertige dreidimensionale Felder von Temperatur und Strömung zu berechnen. Die Auswertung wurde exemplarisch für zwei Zeitpunkte („Beginn einer Kaltluftsituation“ und „mehr als 3 Stunden nach Sonnenuntergang bzw. zweite Nachthälfte“) vorgenommen. Die horizontalen Strömungen wurden in zwei Höhen ausgewertet: Bodennah (0-10 m über Grund) und im Überdachniveau (50 m über Grund).

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten zwei Workshops erwiesen sich als äußerst wertvoll, um einerseits den Regionalplanern die Größen und die Eigenschaften der Ergebnisdaten von Kaltluftströmungs-Untersuchungen am Beispiel Marburg deutlich zu machen und umgekehrt dem Umweltmeteorologen einen umfassenden Einblick in den Bedarf und die Kategorien der Regionalplanung zu verschaffen. Dabei war insbesondere auch Gelegenheit, die jeweilige Begrifflichkeit der Fachterminologie ausführlich zu erläutern.

Es wurde zudem deutlich, dass die beteiligten Fachgebiete für sich genommen hochwertige Grundlagen bereitstellen können (Umweltmeteorologie) bzw. über sehr gute, bewährte Instrumente zur Steuerung der Raumnutzung verfügen (Regionalplaner), es bis zum heutigen Tag aber an geeigneten und erprobten Analyseinstrumenten und –methoden fehlt, um die Simulationsergebnisse in eine für den Regionalplaner sichere und eindeutige Entscheidungsgrundlage zu überführen.

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Reihe von Voruntersuchungen in Angriff genommen, um diese Lücke zu schließen. Dabei wurde einige erfolversprechende Lösungsansätze verfolgt um aufzuzeigen, wie man dabei methodisch vorgehen kann.

Zu den ersten Lehren aus diesen Grundlagenuntersuchungen gehört aber auch, dass die Entwicklung geeigneter Methoden und Instrumente einen größeren zeitlichen und finanziellen Rahmen erfordert, als es im Rahmen dieses Grundlagen-Projektes möglich war.

Die Bearbeitung der gleichen Situation unter geänderten Klimabedingungen konnte von vorneherein nicht im verfügbaren Zeitrahmen dieses Grundlagen-Projektes mit bearbeitet werden. Die Bestimmung möglicher Auswirkungen unter geänderten klimatischen Verhältnissen (z.B. Projektion 2050) würde jedoch enorm von der Entwicklung von Methoden und Instrumenten zur automatischen Analyse unter planerischen Gesichtspunkten profitieren, da die Veränderung z.B. von abgegrenzten Kaltluftentstehungsgebieten mit dem identischen objektiven Instrumentarium bestimmt werden könnte und somit planerische Gegen- bzw. Schutzmaßnahmen objektiv und rechtssicher begründet werden könnten.

## Literatur

- /1/ Groß, G., 1991: Anwendungsmöglichkeiten mesoskaliger Simulationsmodelle, dargestellt am Beispiel Darmstadt. Teil I: Wind- und Temperaturfelder. Meteorol. Rdsch. 43, 97-112.
- /2/ Groß, G., 1993: Numerical Simulations of Canopy Flow. Springer Verlag, Heidelberg, Springer Series in Physical Environment 12, 167 pp.
- /3/ Nielinger, J. 1994: Instationäre Ausbreitung von Luftbeimengungen in komplexem Gelände - Numerische Simulationen. Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Klimatologie, Universität Hannover, 139 S.
- /4/ Nielinger, J., 1998: Kopplung numerischer Simulationsmodelle zur Regionalisierung von Ergebnissen globaler Klimaszenarienrechnungen. Dissertation Fachbereich Physik, Universität Hannover. Berichte des Institutes für Meteorologie und Klimatologie Band 57.
- /5/ Nielinger, Jost and Werner-Jürgen Kost 2001: Simulation of realistic location-related wind distributions with the mesoscale model FITNAH. Meteorol. Zeitschr. 10, No. 4, 235-238.
- /6/ Nielinger Jost, Werner-Jürgen Kost, Wilfried Nobel, Karl Müller und Wolfgang Winkelbauer 2012: Biomonitoring im Rahmen der Ökosystembewertung eines Automobilstandortes. Teil 4: Mikro- und lokalklimatische Untersuchung – Wirkung und Einflussnahme auf das Umfeld. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 72 (2012) Nr. 4, S. 127-130.
- /7/ Meyers kleines Lexikon Meteorologie. Meyers Lexikonverlag 1987.