iMA

Richter & Röckle
Immissionen
Meteorologie
Akustik

Auftraggeber:

Stadt Pforzheim
Planungsamt
Östliche Karl-Friedrich-Straße 4-6

75175 Pforzheim

DAkkS
Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14202-01-00

Durch die DAkkS nach
DIN EN ISO/IEC 17025
akkreditiertes Prüflaboratorium.
Die Akkreditierung gilt für die in der
Urkunde aufgeführten Prüfverfah-
ren

Akkreditiert für
Ausbreitungsrechnung
n. TA Luft und GIRL
Messstelle n. § 29b BImSchG

Klimauntersuchung zu den möglichen Auswirkungen des möglichen Gewerbegebiets „Ochsenwäldle“ in Pforzheim auf die lokalen Kaltluftströmungen

Bericht-Nr.: **18-05-08-S**

Umfang: **21 Seiten**

Datum: **11.04.2019**

Bearbeiter: **Dipl.-Met. Dr. Markus Hasel**

Dipl.-Met. Jost Nielinger
(Anerkannter Beratender Meteorologe DMG e.V.

iMA - Immissionen · Meteorologie · Akustik
Richter & Röckle GmbH & Co. KG
Niederlassung Stuttgart
Hauptstraße 54
D-70839 Gerlingen

Tel. 07156 / 4389 16
Fax: 07156 / 5026-18
Email: hasel@ima-umwelt.de
Internet: ima-umwelt.de

Inhaltsverzeichnis

1 SITUATION UND AUFGABENSTELLUNG 3
2 ÖRTLICHE VERHÄLTNISSE 3
3 AUSWERTUNG DER STADTWEITEN KLIMAUNTERSUCHUNG 2015 5
4 ZUSAMMENFASSUNG UND QUALITATIVE EINORDNUNG 8
5 PLANUNGSHINWEISE 9
LITERATUR 11
ANHANG I: BEGRIFFSBESTIMMUNGEN 12

Hinweis:

Die in den Abbildungen verwendeten Kartengrundlagen basieren auf Daten, die von der Stadt Pforzheim zur Verfügung gestellt wurden sowie aus dem Umweltinformationssystem (UIS) der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) und Geobasisdaten des Landesamts für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg, www.lgl-bw.de, Az.: 2851.9-1/19 und von OpenStreetMap (www.openstreetmap.org/copyright) - Veröffentlicht unter ODbL.

1 Situation und Aufgabenstellung

Die Stadt Pforzheim plant die Ausweisung neuer Gewerbegebiete. Ein möglicher Standort liegt im Gewann „Ochsenwäldle“ westlich der Autobahnanschlussstelle Pforzheim Süd. Im Vorfeld der Bebauungsplanung sollten die zu erwartenden lokalklimatischen Auswirkungen (Kaltluftströmungen) untersucht werden.

Während großräumig windschwachen Situationen in Hochdruckgebieten bilden sich abends und nachts im gegliederten Gelände Kaltluftströmungen, die in der Lage sind, Siedlungsbereiche mit Frischluft zu versorgen.

Durch solche Belüftungsfunktionen werden insbesondere nach heißen Sommertagen wichtige Beiträge zur Wärme-Entlastung und damit zur urbanen Wohnqualität erzielt.

Aus diesem Grund sind die lokalklimatischen Verhältnisse und die durch eine Planung möglicherweise verursachten Veränderungen der Funktionalität der örtlichen belüftungsrelevanten Kaltluftströmungen (und deren Reichweite) eine wichtige Entscheidungsgrundlage in der Abwägung.

Für das Plangebiet sollte eine Analyse der vorliegenden stadtweiten Klimauntersuchung der iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG aus dem Jahr 2013 (Klima- und Strömungsmodell FITNAH) erfolgen.

2 Örtliche Verhältnisse

Das mögliche Plangebiet „Ochsenwäldle“ liegt westlich der Autobahn-Anschlussstelle Pforzheim Süd zwischen dem Ortsteil Altgefäll und der Gemeinde Neubärental (Teilort von Wurmberg im Enzkreis). Der Bereich wie auch die nähere Umgebung ist weitgehend bewaldet, lediglich im Osten schließt sich die Autobahn an (Abb. 2-1).

Das Plangebiet liegt in einer Höhe von etwa 380 m über NN und ist in Richtung Osten geneigt (Abb. 2-2). Dort fällt das Gelände jenseits der Autobahn ins Kirnbachtal leicht ab auf etwa 330 m über NN. Jenseits dieses Einschnitts befindet sich die Gemeinde Neubärental in einer Höhenlage von etwa 360 m bis 390 m über NN.

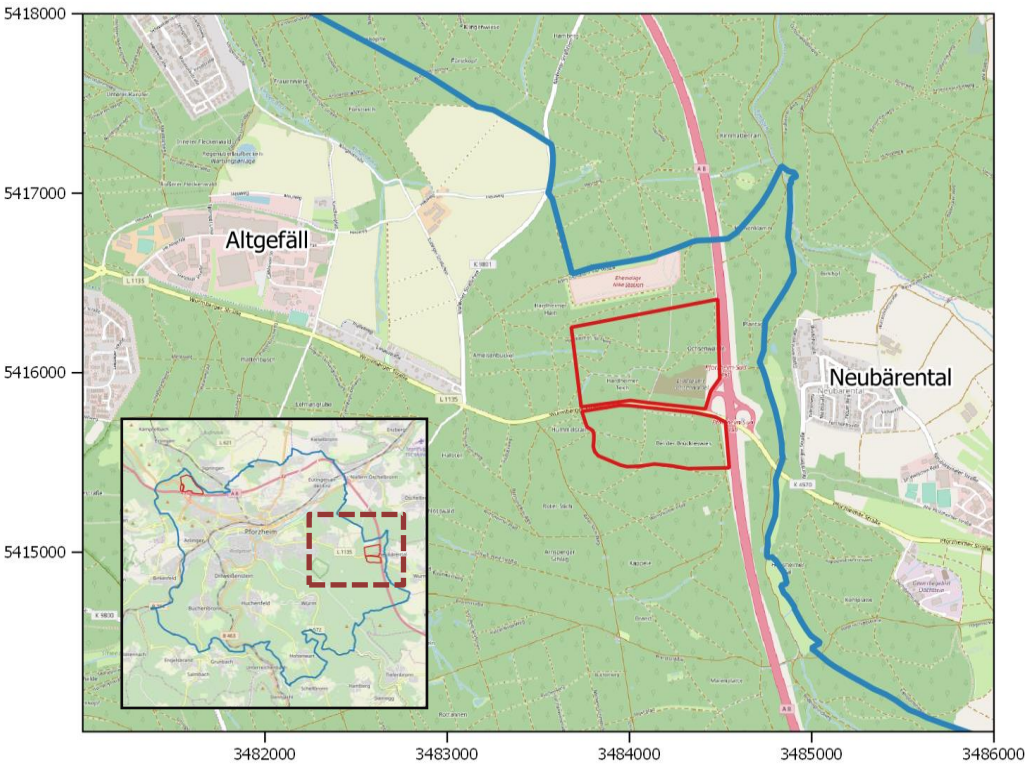

Abb. 2-1: Bereich „Ochsenwäldle“ (rot umrandet) im Osten des Stadtgebiets (blau umrandet) von Pforzheim. Koordinaten im Gauß-Krüger-System (Datengrundlage: Stadt Pforzheim und OpenStreetMap®).

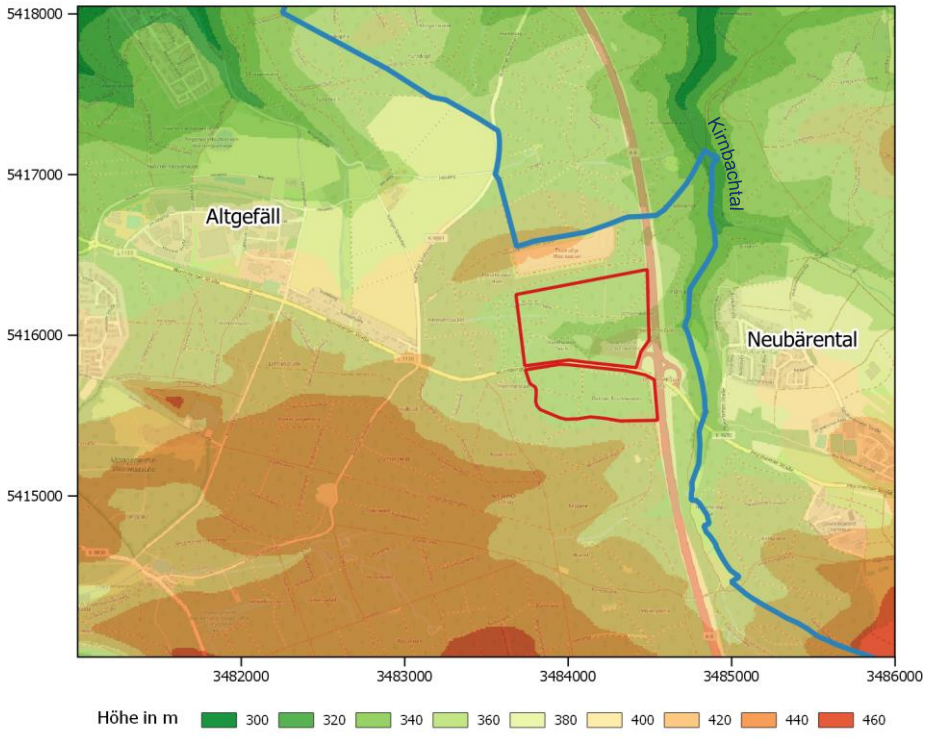

Abb. 2-2: Orographie in der Umgebung des Bereichs „Ochsenwäldle“ (rot umrandet). Koordinaten im Gauß-Krüger-System (Datengrundlage: Stadt Pforzheim und OpenStreetMap®).

3 Auswertung der stadtweiten Klimauntersuchung 2015

Die iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG hat 2015 eine gesamtstädtische Klimauntersuchung für die Kaltluftströmungen und Kaltluftströmungssysteme mit dem Modell FITNAH durchgeführt (/1/). Die folgende Abbildung zeigt das Berechnungsgebiet.

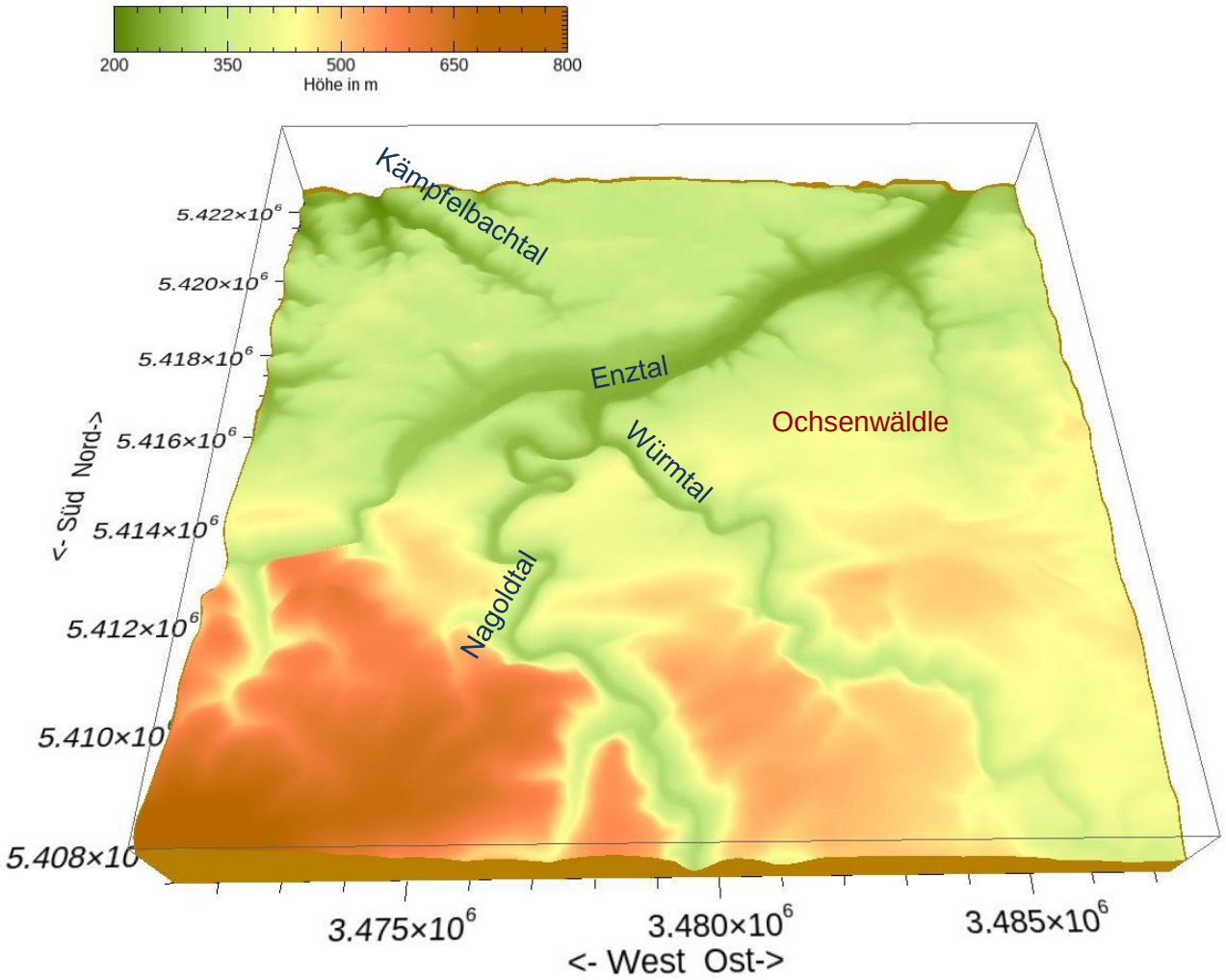

Abb. 3-1: FITNAH-Berechnungsgebiet für die stadtweite Untersuchung von Kaltluftströmungen (aus /1/). Das Plangebiet sowie die wichtigsten Flusstäler sind ebenfalls markiert.

Die Größe des Berechnungsgebietes gestattete es, während einer Strahlungsnacht auch das Zusammenfließen mehrerer Kaltluftströmungen zu einem Kaltluftströmungssystem und ggf. zu einem regionalen Windsystem zu berechnen. Das für die Berechnung der Kaltluftflüsse im Stadtgebiet verwendete Modell FITNAH berücksichtigt auch die Bewuchs- und Bebauungsstrukturen (in parametrisierter Form).

Im östlichen Teil des Stadtgebiets herrscht in einer typischen Kaltluftnacht eine schwache übergeordnete südwestliche Strömung vor (Abb. 3-2). Im Bereich des Kirnbachtals schwenkt diese Strömung auf Richtung Süd und orientiert sich am Relief (Kanalisierung). In erhöhten Bereichen, wie z.B. südlich des Plangebiets „Ochsenwäldle“, kann die übergeordnete Strömung bis in Bodennähe durchgreifen, wird durch den Waldbestand aber abgebremst (Abb. 3-3).

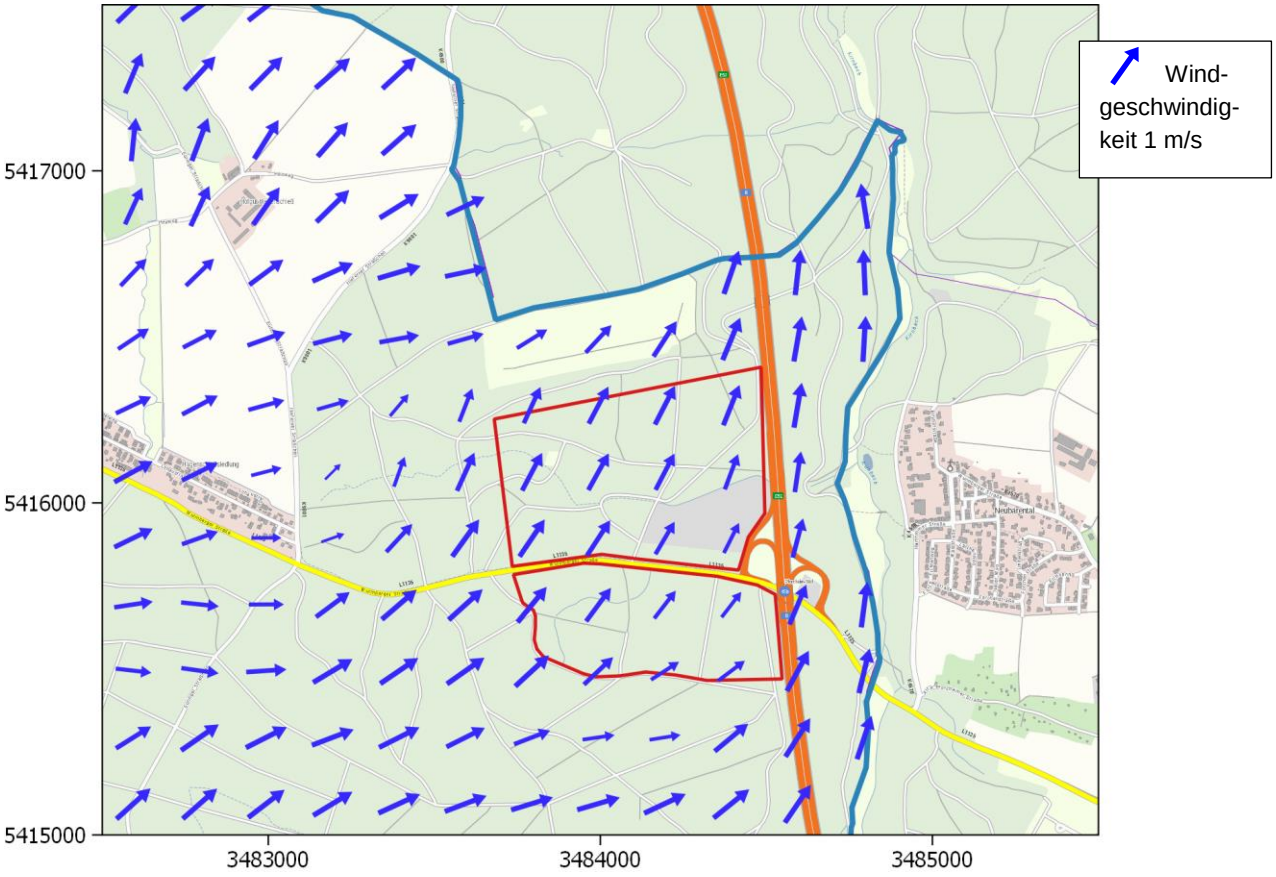

Abb. 3-2: Kaltluft-Strömungsverhältnisse im Überdach-Niveau zu Beginn einer Kaltluftsituation, Auswertung Kaltluftströmungsanalyse Gesamtstadt (/1/). Das Plangebiet ist rot, die Gemarkungsgrenze blau markiert. (Datengrundlage: LGL, www.lgl-bw.de).

Das Plangebiet selbst liegt in einer leichten Senke (Abb. 2-2). Dieser Effekt zusammen mit dem Waldbestand führen dazu, dass in Bodennähe Kaltluftströmungen mit nur geringer Intensität entstehen können (Abb. 3-3). Nur in Bereichen mit etwas offenerer Landnutzung bildet sich eine schwache Kaltluftströmung, die in Richtung des Kirnbachtals fließt.

Die Ergebnisse lassen erwarten, dass die bodennahe Kaltluftströmung im Kirnbachtal entsprechend der Talorientierung und -neigung in Richtung Norden abfließt. Da die Gemeinde Neubärental deutlich oberhalb des Talgrunds am Gegenhang - und damit nicht im direkten Einflussbereich des Kaltluftstroms im Kirnbachtal - liegt, ist nicht zu erwarten, dass eine Änderung der bereits schwachen Strömung im Plangebiet zu lokalklimatischen Auswirkungen in der Wohnbebauung von Neubärental führen wird.

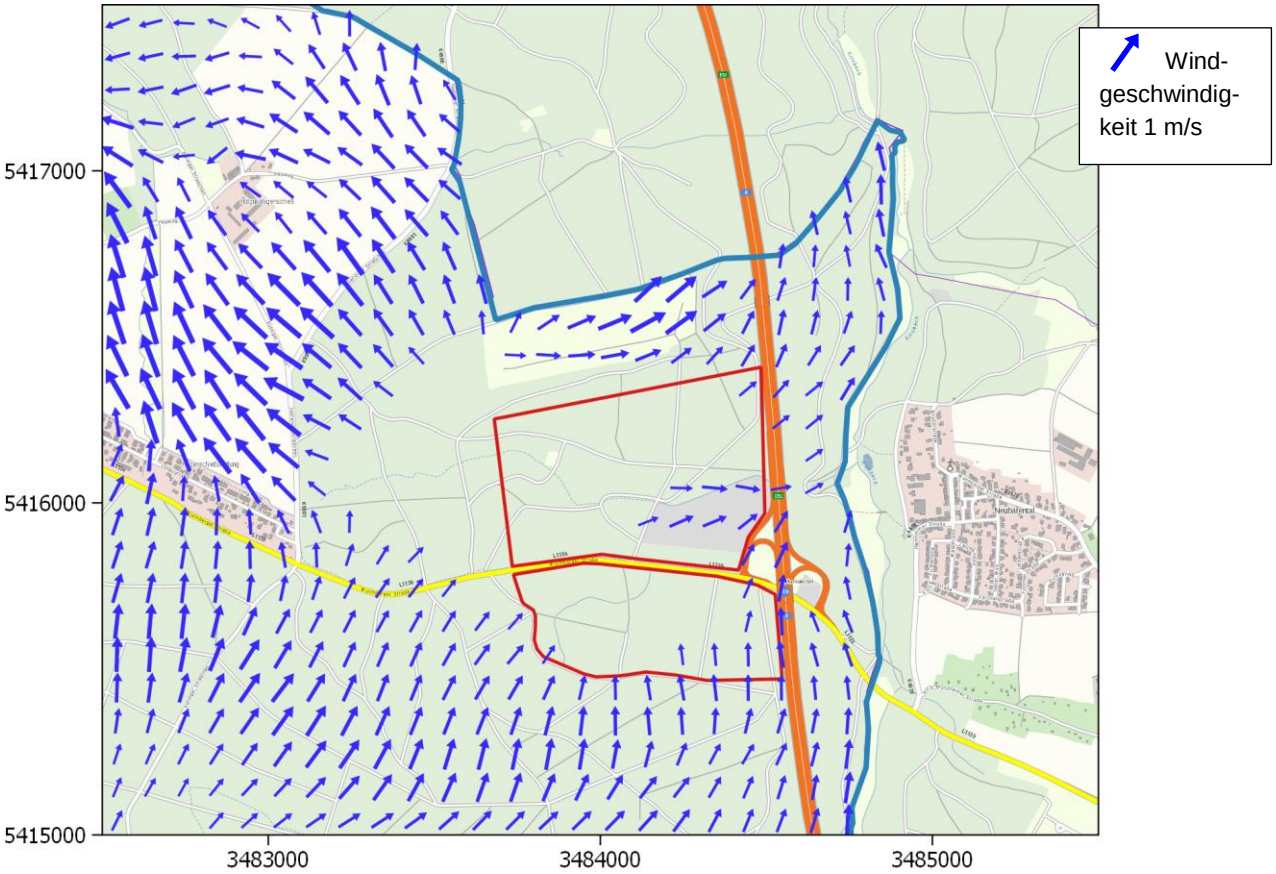

Abb. 3-3: Bodennahe Kaltluft-Strömungsverhältnisse zu Beginn einer Kaltluftsituation, Auswertung Kaltluftströmungsanalyse Gesamtstadt (/1/). Das Plangebiet ist rot, die Gemarkungsgrenze blau markiert. (Datengrundlage: LGL, www.lgl-bw.de).

Diese Struktur und die Intensität der bodennahen und übergeordneten Strömungsverhältnisse ändern sich während der Kaltluftnacht nicht wesentlich (Abb. 3-4).

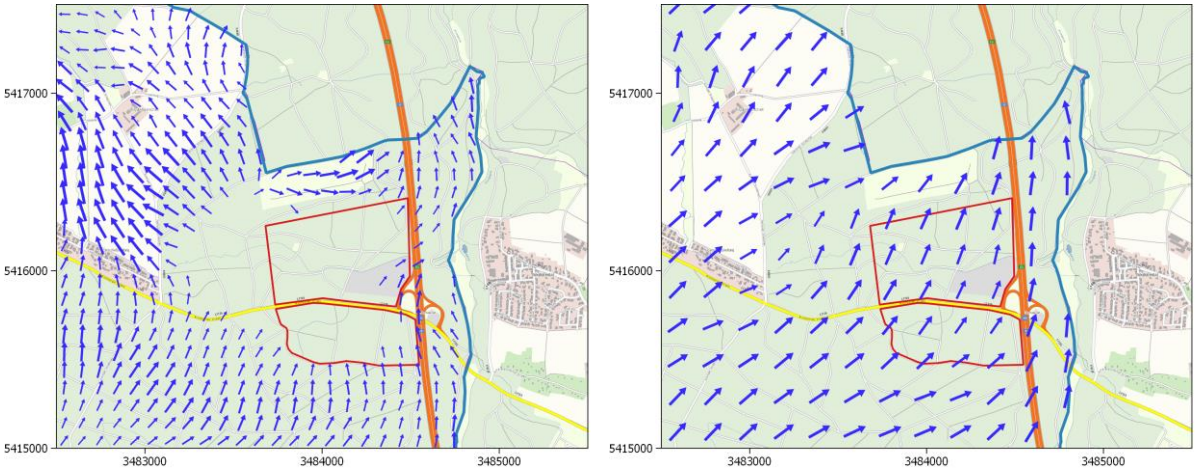

Abb. 3-4: Kaltluft-Strömungsverhältnisse bodennah (links) und im Überdach-Niveau (rechts) später in der Kaltluftnacht, Auswertung Kaltluftströmungsanalyse Gesamtstadt (/1/). Das Plangebiet ist rot, die Gemarkungsgrenze blau markiert. (Datengrundlage: LGL, www.lgl-bw.de).

Aus der stadtweiten Kaltluft-Strömungsuntersuchung kann abgeleitet werden, dass es sich bei der Kaltluftströmung im Bereich „Ochsenwäldle“ um eine räumlich und in ihrer Reichweite (=Belüftungsfunktion) lokal begrenzte Strömung handelt. Da sich die nächstgelegene geschlossene Wohnbebauung im Kirnbachtal Richtung Norden erst in mehreren Kilometern Entfernung befindet, sind dort ebenfalls keine lokalklimatischen Auswirkungen durch eine veränderte Nutzung im Plangebiet „Ochsenwäldle“ zu erwarten

4 Zusammenfassung und qualitative Einordnung

Bei Betrachtungen des Stadtklimas nehmen die Belüftungsfunktionen nächtlicher Kaltluftströmungen bei Hochdruckwetterlagen eine zentrale Rolle ein. Derartige Wetterlagen sind häufig verbunden mit hohen Tagestemperaturen, und die nächtlichen Kaltluftzuflüsse übernehmen eine wichtige Aufgabe, um die Wärmebelastung für die Stadtbewohner zu verringern.

Vielerorts kommt es geländebedingt zu lokalen Kaltluftströmungen, die relativ flach bleiben, nur ein kleines Einzugsgebiet haben und daher ihre Belüftungsfunktion nur in der unmittelbar angrenzenden Wohnbebauung ausüben.

Um den möglichen Einfluss möglicher neuer Gewerbeflächen im Stadtgebiet Pforzheim abzuschätzen, wurden Ergebnisse der vorhandenen stadtweiten Klimauntersuchung für die betreffenden Standorte ausgewertet.

Diese Analyse zeigt, dass im Bereich „Ochsenwäldle“ nur wenig Kaltluft produziert und transportiert wird. Auswirkungen auf bebaute Bereiche sind auch aufgrund der Entfernungen und vorherrschenden Strömungsrichtungen nicht zu erwarten.

Gesetzlich vorgeschriebene quantitative Bewertungsmaßstäbe für solche Veränderungen bei Umsetzung einer Planung gibt es nicht. Es existieren auch keine Richtlinien, Zielwerte oder ähnliches, nach denen eine formale quantitative Bewertung vorgenommen werden könnte. Die Bewertung der dargelegten Auswirkungen der Planung auf die lokalen Belüftungsfunktionen und damit das Stadtklima im Umfeld muss daher durch die Stadt bzw. die Gemeinde im Rahmen der Abwägung erfolgen.

5 Planungshinweise

Aufgrund der geringen zu erwartenden Effekte durch die möglichen Gewerbegebiete haben konkrete Umsetzungen im Rahmen der zugrunde gelegten Bedingungen bezüglich der Baumasse und Höhenentwicklung der Gebäude voraussichtlich nur einen geringen Einfluss. Zukünftige Planungen, die an gleicher Stelle weniger Baumasse und/oder eine geringere Höhenentwicklung aufweisen, sind durch die Ergebnisse dieser Untersuchung mit abgedeckt.

Im Hinblick auf eine weitgehende Minimierung der Einflüsse der geplanten Bebauung auf die Belüftung insbesondere der angrenzenden bestehenden Siedlungsränder können aus rein strömungstechnischer Sicht die folgenden allgemeinen Planungshinweise formuliert werden. Sie dienen einer Optimierung der Bedingungen für den Kaltluftstrom bei gleichzeitiger Realisierung einer geplanten Bebauung.

- Das Plangebiet sollte möglichst frei durchströmbar sein. Das bedeutet für die geplante Bebauung, dass diese entsprechend der möglichen Hangneigung bzw. der daraus resultierenden Strömungsrichtung der Kaltluft orientiert sein sollte.
- Auf den verbleibenden Freiflächen sollten aus strömungstechnischer Sicht möglichst keine kompakten Hindernisse – dazu zählen z.B. Baumgruppen und riegelartiges Buschwerk oder Hecken, aber auch Schallschutzwände – geplant werden. Einzelbäume sind möglich und werden dort empfohlen, wo Schattenwurf in den Sommermonaten für das Mikroklima im Umfeld der Gebäude förderlich ist, z.B. vor einer Südwest- oder Westfassade, wenn sich Menschen dort länger als nur vorübergehend im Freien aufhalten (Freisitze, Außengastronomie). Es sollte sich jedoch um laubwerfende Bäume handeln, damit im Winter keine Verdunklungs-Effekte auftreten und der Genuss von Sonnenlicht möglich ist
- Um den Einfluss auf die bodennahen Temperaturverhältnisse zu minimieren sollte angestrebt werden, die Wärmeabstrahlung der Gebäude durch bauliche Maßnahmen (Materialien, helle Farbgebung) und/oder durch Begrünungsmaßnahmen (Dachbegrünung, Fassadenbegrünung) zu minimieren. Technische Maßnahmen zur energetischen Optimierung der Plangebäude werden darüber hinaus empfohlen.
- Die Versiegelung von Flächen um die Gebäude sollte auf das notwendigste (Fuß- und Rettungswege) beschränkt werden. Wo möglich (z.B. Parkierungsflächen), wird die Verwendung von nicht vollständig versiegelnden und hellen Materialien, z.B. Rasenpflastersteine, empfohlen.

Gerlingen, den 11.04.2019

Dr. Jost Nielinger

Dipl. Meteorologe

Anerkannter Beratender Meteorologe
der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e.V. .
Ausbreitung von Luftbeimengungen
Stadt- und Regionalklima

Dr. Markus Hasel

Dipl. Meteorologe

Dieser Bericht darf nur für projektbezogene Zwecke vervielfältigt oder weitergegeben werden.

Literatur

/1/ iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG 2015: Fortschreibung der Stadtklimauntersuchung Pforzheim. iMA-Bericht Nr. 13-04-05-S, 04.02.2015, 148 Seiten.

Anhang I: Begriffsbestimmungen

Temperatur

Die Lufttemperatur weist einen ausgeprägten Tagesgang auf. Sie ist direkt verknüpft mit der Energiebilanz der Erdoberfläche. Wesentlicher Einflussfaktor hierfür ist die Landnutzung, welche die Eigenschaften der Oberfläche bestimmt (Abbildung A-1).

Auf Vegetationsflächen wirken sich hier vor allem die Art des Bestandes und die Wasserverfügbarkeit aus sowie die Orientierung des Reliefs zum Sonnenstand. Da diese Eigenschaften oft kleinräumig variieren, ist auch das Temperaturfeld durch große Inhomogenität geprägt.

Innerhalb von Siedlungen weichen die Oberflächen von den natürlichen Gegebenheiten ab. Bebaute Areale zeichnen sich durch eine erhöhte anthropogene Wärmefreisetzung, höhere Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, geringer Wasserverfügbarkeit und vermindertes Rückstreuvermögen (Albedo) bei gleichzeitig vergrößerter Oberfläche durch die Baukörper aus. Diese behindern darüber hinaus aufgrund ihrer Wirkung als Strömungshindernis auch die Durchlüftung und damit den Luftaustausch mit der Umgebung.

Im Falle strukturierten Geländes, wie es im Stadtgebiet von Pforzheim vorhanden ist, wirkt sich darüber hinaus auch die Höhenlage eines Ortes auf die Temperatur aus. Üblicherweise weist die Atmosphäre einen negativen Temperaturgradienten auf, d.h. die Temperatur nimmt mit der Höhe ab und höher gelegene Orte sind begünstigt. Mit autochthonen Wetterlagen ist dagegen oft eine nächtliche Temperaturinversion verknüpft, bei der die Temperatur mit der Höhe zunimmt. Je nach vertikaler Mächtigkeit und Stärke der Inversion kann dies dazu führen, dass in höheren Lage die Temperatur zunimmt.

Neben diesen lokalen Einflüssen wirkt sich auch die Strömung, bedingt oder modifiziert durch das Relief, aus.

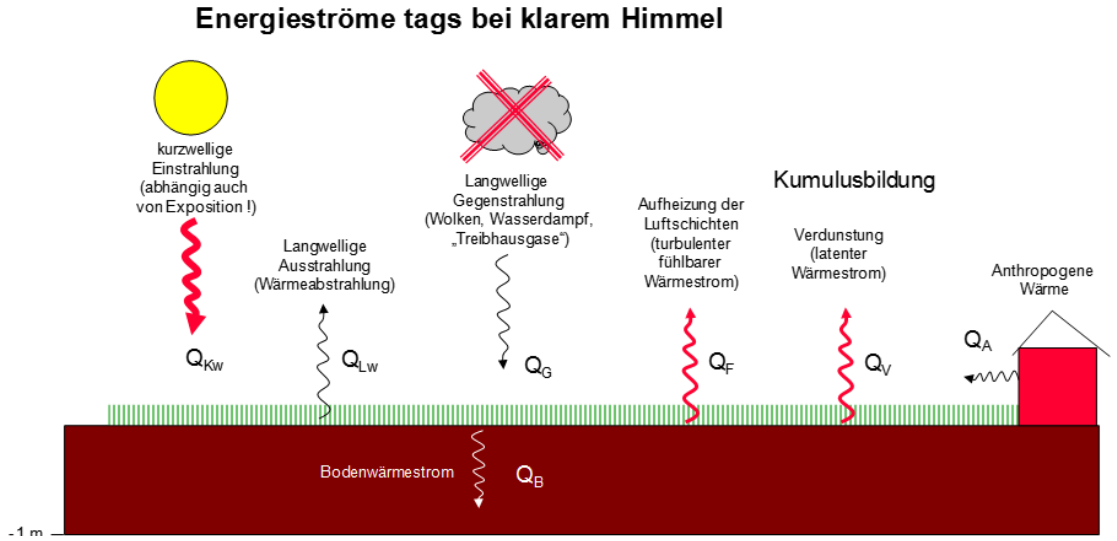

Abb. A-1: Schema zur Erwärmung einer Landoberfläche aufgrund unterschiedlicher Strahlungsströme. Bewölkung behindert mit ihrer Gegenstrahlung die Ausstrahlung der Erdoberfläche und vermindert somit die Abkühlung.

Kaltluftströmungen

Als Kaltluftströmung wird in der Umweltmeteorologie 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: „Luftmenge, die gegenüber durchschnittlichen Verhältnissen der Unterlage oder ihrer Umgebung eine niedrigere Temperatur aufweist“.

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 (Grünland, Ackerland). Bebautes Gebiet hat i.a. ein reduziertes Kaltluftbildungsvermögen, dichte Bebauung und industriell genutzte Flächen können je nach anthropogener Wärmefreisetzung als - relativ - warme Zonen wirken.

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 i.A. im Bestand 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.

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.

Eine Kaltluft*strömung* 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“) und sich daher geländefolgend in Bewegung setzt. Dieses Stadium wird auch als Kaltluft*abfluss* 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 Kaltluftabflüsse 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 (Abbildung A-3).

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. Dabei verliert sie allerdings fortwährend an Impuls, so dass sie nach einer bestimmten Distanz zum stagnieren kommt („liegen bleibt“).

Idealiserter Kaltluftabfluss an einem Hang mit nachfogender Ebene

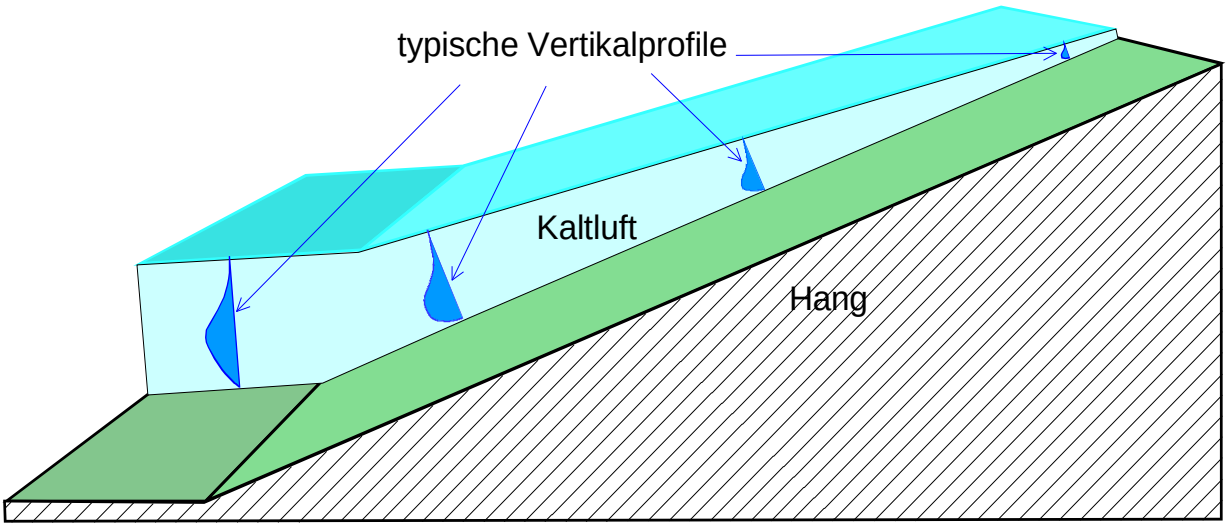

Abb. A-3: Idealisiertes Schema eines Kaltluftabflusses an einem Hang mit nachfolgender Ebene.

Mehrere solcher hanggebunden Kaltluftabflüsse schließen sich im orographisch gegliederten 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 (Abbildung A-4).

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.

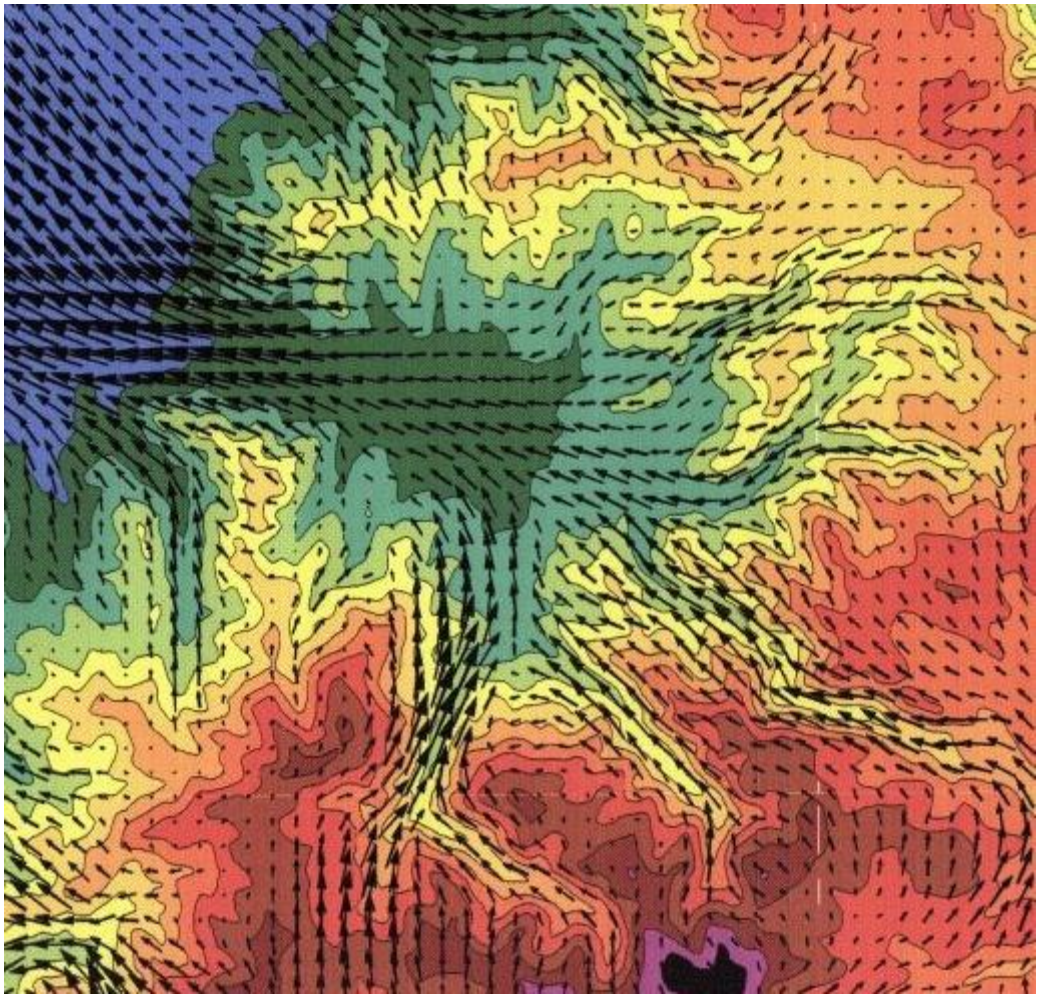

Abb.A-4: Kaltluftströmungssysteme in flachen Talsohlen und in der Ebene am Beispiel Freiburg: Schwarzwaldhöhen (unterer und rechter Bildbereich), Tal bei Ebnet und Stadtgebiet von Freiburg (Mitte) und Rheintal (links oben).

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 sehr 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. Allerdings kann die human-klimatologische Funktion der Strömungen je nach Jahreszeit stark differieren.

Flurwinde

Auch in der Ebene bildet sich unter den eingangs im Anhang 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 hineinragendes Kaltluftströmungssystem.
- Ein übergeordnetes Regionalwindsystem, 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 (Abbildung A-5). Im Laufe der Nacht bildet sich im Vergleich zum Umland bodennah eine relativ warme Zone aus, die deshalb auch gelegentlich als „Wärmeinsel“ bezeichnet wird.

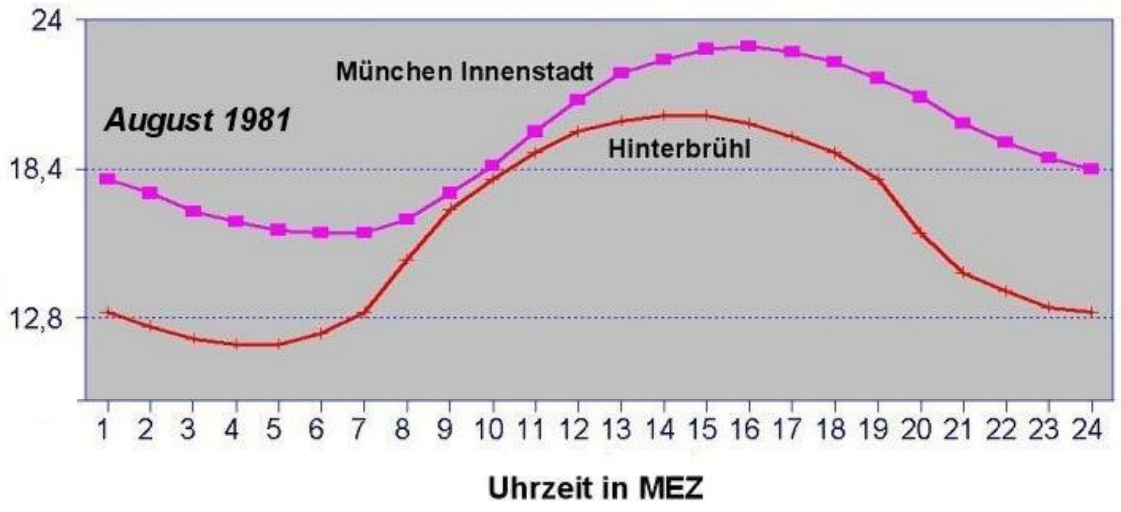

Abb. A-5: Unterschiede im Temperaturverlauf zwischen Innenstadt und Umland am Beispiel von München.

Diese relativ wärmere Luft hebt sich mit geringer Geschwindigkeit an, was zur Folge hat, das kühlere Luft aus der Umgebung nachströmt (Abbildung A-6). Dieses Nachströmen wird als Flurwind

bezeichnet. Er bildet insbesondere für Großstädte einen wichtigen Belüftungsmechanismus („Wärmeinsel“).

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 des Belüftungsmechanismus 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 Flurwindsystem 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.

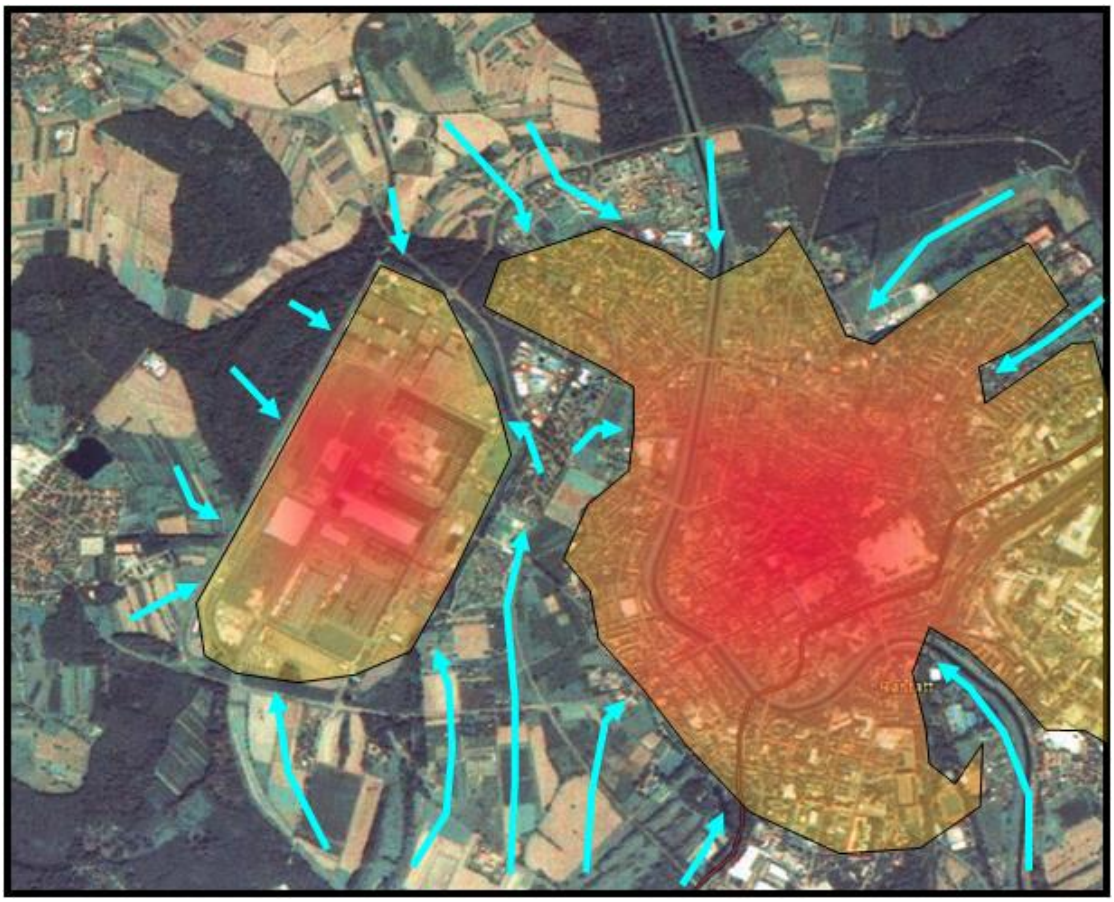

Abb. A-6: Schematische Darstellung von Flurwinden in der Ebene.
Industriegebiet (links) und ausgedehnter urbaner Bereich (rechts)..

Strömungssysteme sind dreidimensional und haben eine zeitliche Entwicklung

Die Strömungssysteme besitzen oft eine vertikale Mächtigkeit, die ein Vielfaches einer Gebäude- oder Bestandshöhe beträgt. Auf diese Weise können wesentlich Funktionen einer Strömung (Lufttransport, Luftleitbahn) auch im Überdachniveau bzw. oberhalb des Kronenraumes ablaufen (Abbildung A-7).

Je nach Mächtigkeit einer Kaltluft- oder Flurwindströmung findet ein Großteil des Lufttransportes oberhalb der bodennahen Rauhigkeitselemente (Bebauung, Bewuchs) statt (Abbildung A-7).

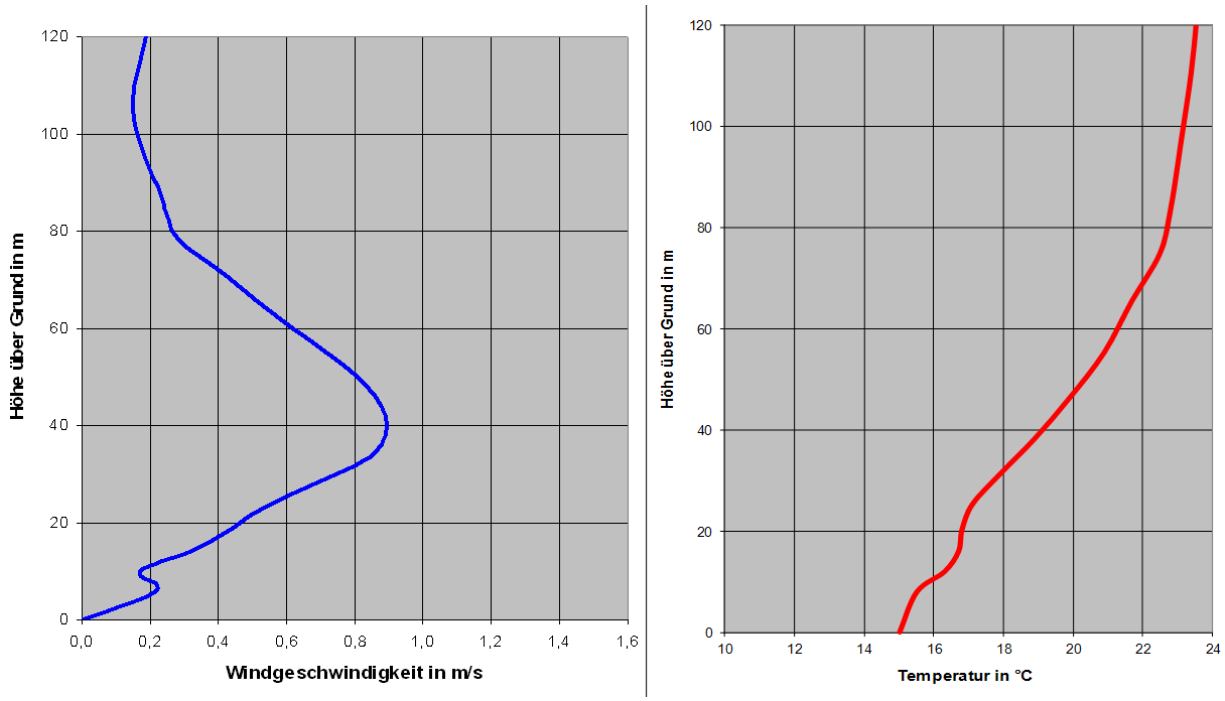

Abb. A-7: Vertikal-Profile in einer Kaltluftströmung. Links: Windgeschwindigkeit, rechts: Temperatur. Die Kaltluftströmung reicht bis etwa 100 m über Grund, das Maximum liegt in 40 m Höhe

Die Abbildung A-8 auf der nächsten Seite zeigt exemplarisch die zeitliche Entwicklung der Mächtigkeit einer Kaltluftschicht, hier erkennbar an der Höhe der Bodeninversion (Temperaturzunahme mit der Höhe).

Während die Luft am Abend noch neutral geschichtet ist (rot, orange), bildet sich im Beispiel ab etwa 19:00 eine bodennahe Kaltluftschicht, deren Mächtigkeit hier im Verlauf der Nacht von rund 80 m auf etwa 320 m anwächst. Im Beispiel tut sie dies, obwohl bodennah anthropogene Wärmeströme (Industriegebiet) aktiv sind, erkennbar an der bodennah labilen Temperaturschichtung bis in etwa 30 m bis 40 m über Grund.

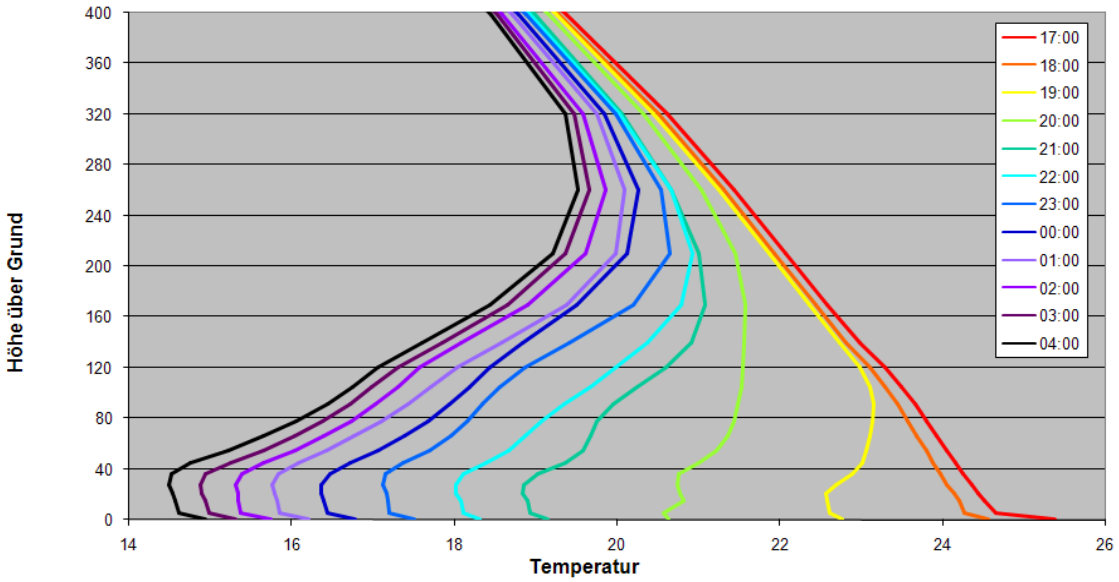

Abb. A-8: Zeitlicher Verlauf einer Bodeninversion über einem Industriestandort in einem Flusstal. Zu beachten ist: Im Bereich der Industriebebauung ist die Bodentemperatur erhöht, eine Temperaturabnahme setzt erst oberhalb der mittleren Bebauungshöhe (hier ca. 30-40 m) ein. Hier zeigt sich über dem Industriegebiet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

Anthropogener Wärmestrom

Wie zuvor 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 hinzukommen. Dieser Wärmestrom beschreibt die Energiezufuhr durch vom Menschen und insbesondere seine Aktivitäten verursachte Energieeinträge (z.B. das Heizen von Gebäuden, Wärmefreisetzung bei industrieller Produktion).