

Auftraggeber: **Stadt Pforzheim**
Planungsamt
Östliche Karl-Friedrich-Straße 4-6
75175 Pforzheim



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

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

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

Bericht-Nr.: **18-05-08-S**
Umfang: **43 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	6
4	KALTLUFTSIMULATION FÜR DAS PLANGEBIET „KLAPFENHARDT“	8
4.1	DAS PROGNOSTISCHE SIMULATIONSMODELL FITNAH	8
4.2	DAS RECHENGEBIET VON FITNAH.....	9
4.3	EINGANGSDATEN	11
4.3.1	Orographie.....	11
4.3.2	Landnutzung Ist-Zustand.....	11
4.3.3	Landnutzung Planfall	13
4.4	METEOROLOGISCHE SITUATION UND ANFANGSZUSTAND	15
4.5	HINWEISE ZUR AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE.....	16
5	ERGEBNISSE IST-ZUSTAND „KLAPFENHARDT“.....	17
6	ERGEBNISSE PLANFÄLLE 1 UND 2 „KLAPFENHARDT“	20
6.1	PLANFALL 1	20
6.2	PLANFALL 2	22
7	VERÄNDERUNG „KLAPFENHARDT“ PLANFÄLLE - IST-ZUSTAND	24
7.1	PLANFALL 1	24
7.2	PLANFALL 2	27
8	ZUSAMMENFASSUNG UND QUALITATIVE EINORDNUNG.....	29
9	PLANUNGSHINWEISE	31
	LITERATUR.....	33
	ANHANG I: BEGRIFFSBESTIMMUNGEN	34

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](https://www.openstreetmap.org/copyright).

1 Situation und Aufgabenstellung

Die Stadt Pforzheim plant die Ausweisung neuer Gewerbegebiete. Ein möglicher Standort liegt im Gewann „Klapfenhardt“ nördlich der Autobahnanschlussstelle Pforzheim West. 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. Für den Bereich „Klapfenhardt“ umfasste die Aufgabenstellung zusätzlich die Durchführung und Auswertung einer modellgestützten Analyse der lokalen Kaltluftströmungen im Plangebiet und seiner Umgebung. Diese basiert auf dem Ist-Zustand der heutigen Nutzung. Zwei weiteren numerischen Simulationen wurden zwei mögliche zukünftige Flächennutzungen im Plangebiet zugrunde gelegt.

Die Ergebnisse von Ist-Zustand und Planfall ermöglichen eine Einschätzung der Wirkung und der Reichweite der Wirkung der zugrunde gelegten Planung. Dabei wird insbesondere die bestehende Bebauung in Ispringen betrachtet.

2 Örtliche Verhältnisse

Der Bereich „Klapfenhardt“ liegt zwischen dem bestehenden Gewerbegebiet „Wilferdinger Höhe“ und Ispringen (Enzkreis) nördlich der Autobahn A8 und der Anschlussstelle Pforzheim West (Abb. 2-1). Das Plangebiet selbst ist durchgehend bewaldet (Abb. 2-2). Richtung Norden, Westen und Osten schließt sich ebenfalls Wald an, Richtung Süden stellt die Autobahn A8 die Begrenzung dar.

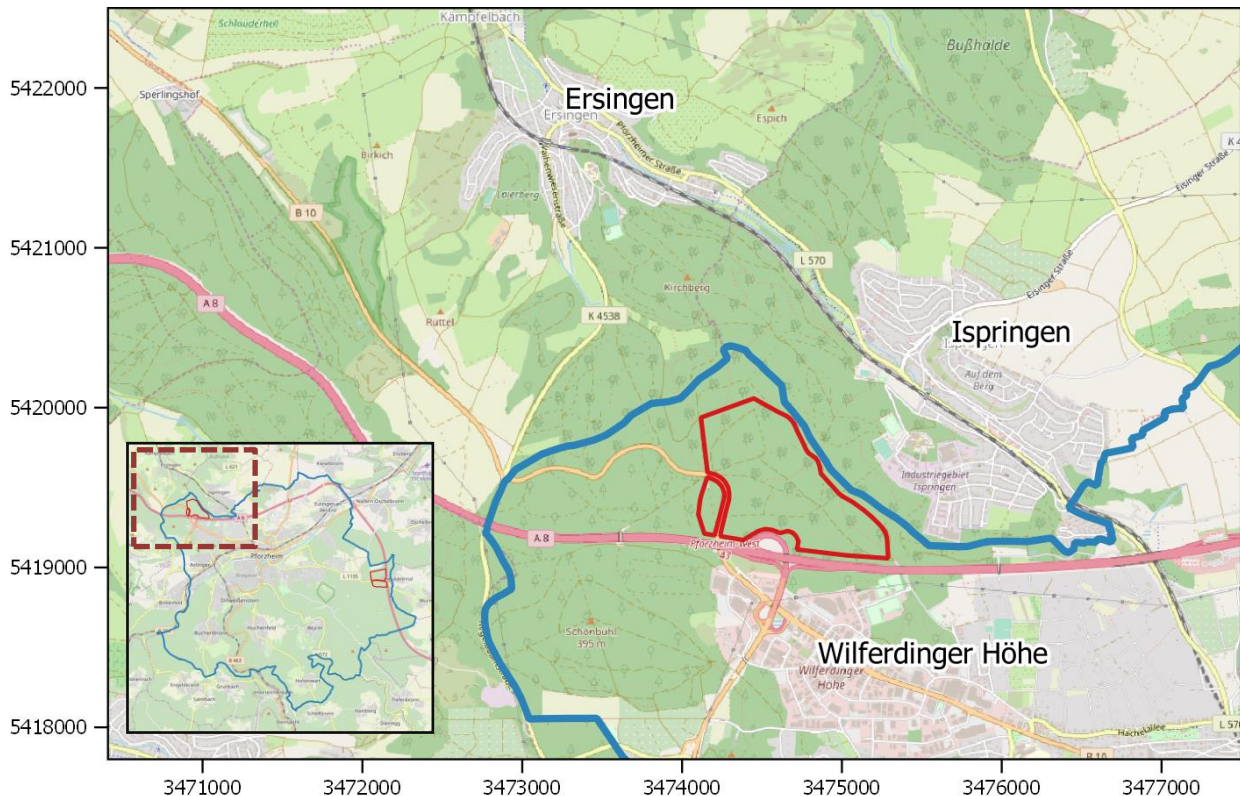


Abb. 2-1: Bereich „Klapfenhardt“ (rot umrandet) im Nordwesten des Stadtgebiets (blau umrandet) von Pforzheim. Koordinaten im Gauß-Krüger-System (Datengrundlage: Stadt Pforzheim und OpenStreetMap®).

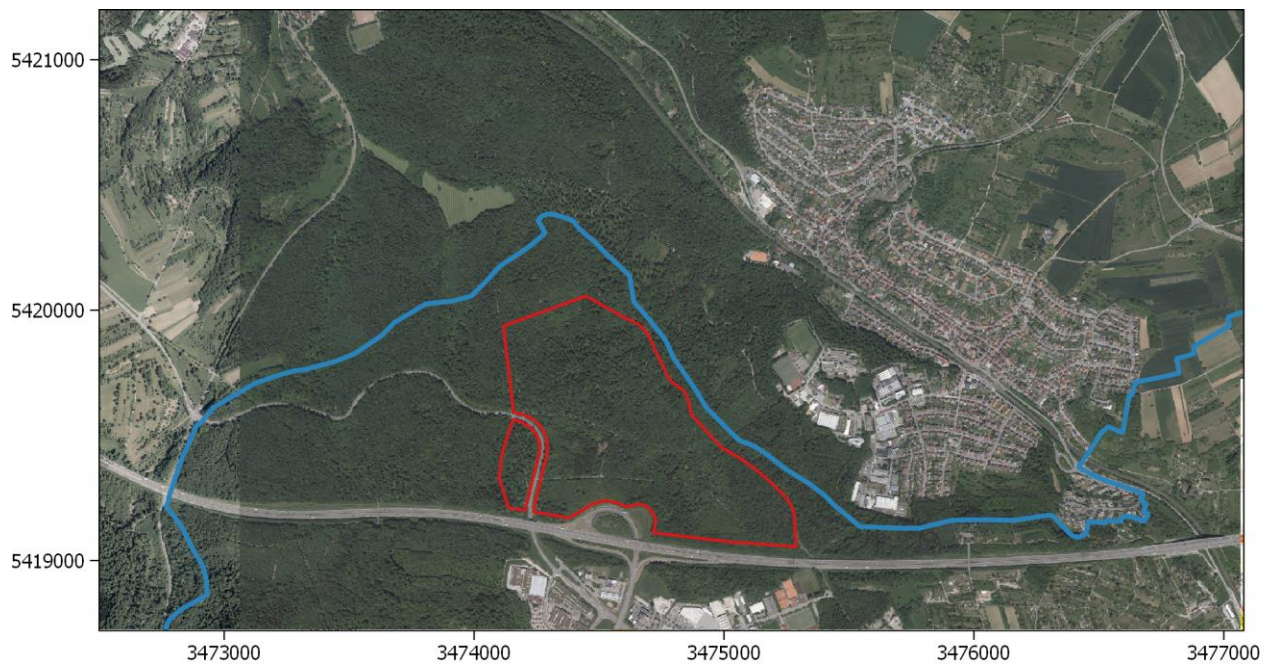


Abb. 2-2: Luftbild mit der Landnutzung in der Umgebung des Bereichs „Klapfenhardt“ (rot umrandet). Koordinaten im Gauß-Krüger-System (Datengrundlage: bereitgestellt von der Stadt Pforzheim im November 2018).

Orographisch liegt das Plangebiet in einer Höhe von ca. 350 m bis 400 m über NN. Richtung Norden und Nordosten hin fällt das Gelände in Richtung Kämpfelbachtal ab. Dort liegen die Orte Ispringen und Ersingen. Der Talgrund weist Höhen von ca. 240 m bis 290 m auf (Abb. 2-3).

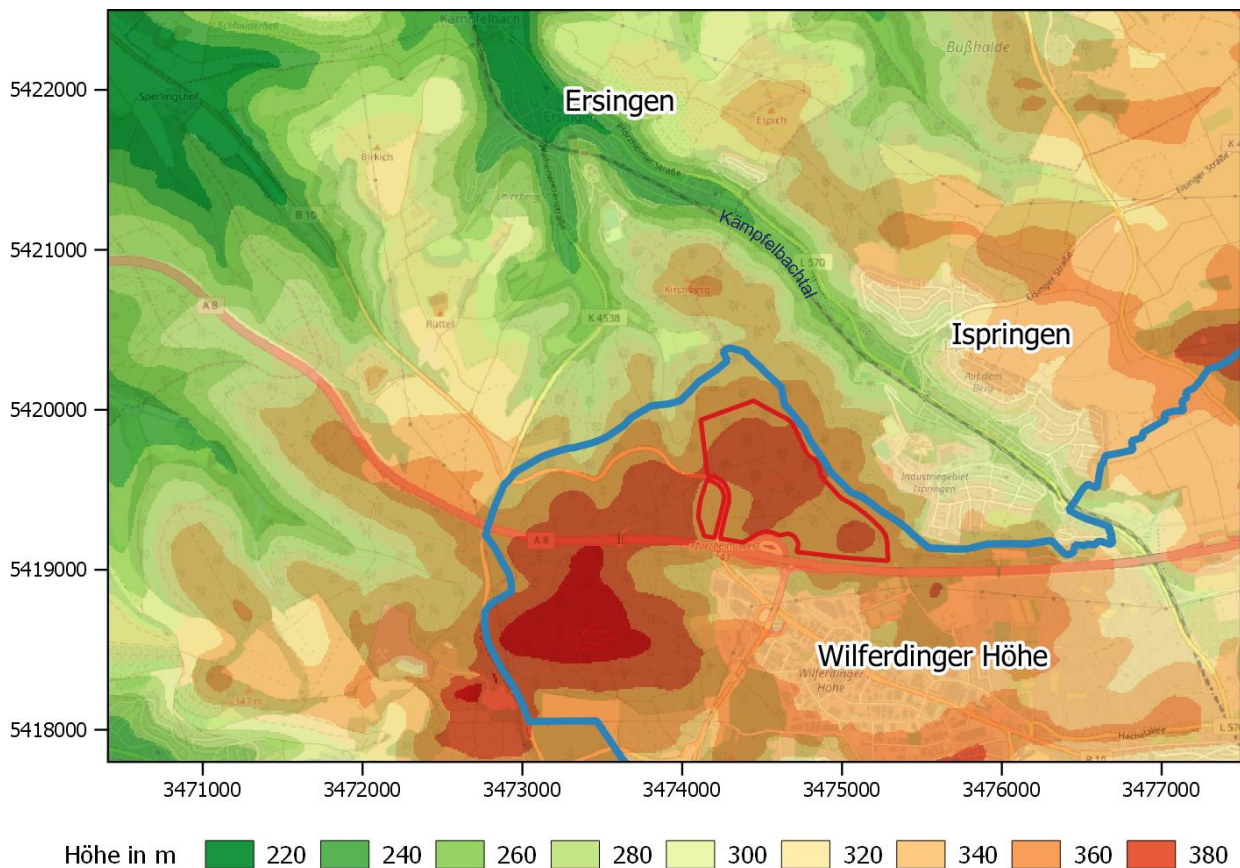


Abb. 2-3: Orographie in der Umgebung des Bereichs „Klapfenhardt“ (rot umrandet). Koordinaten im Gauß-Krüger-System (Datengrundlage: Stadt Pforzheim und OpenStreetMap®).

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.

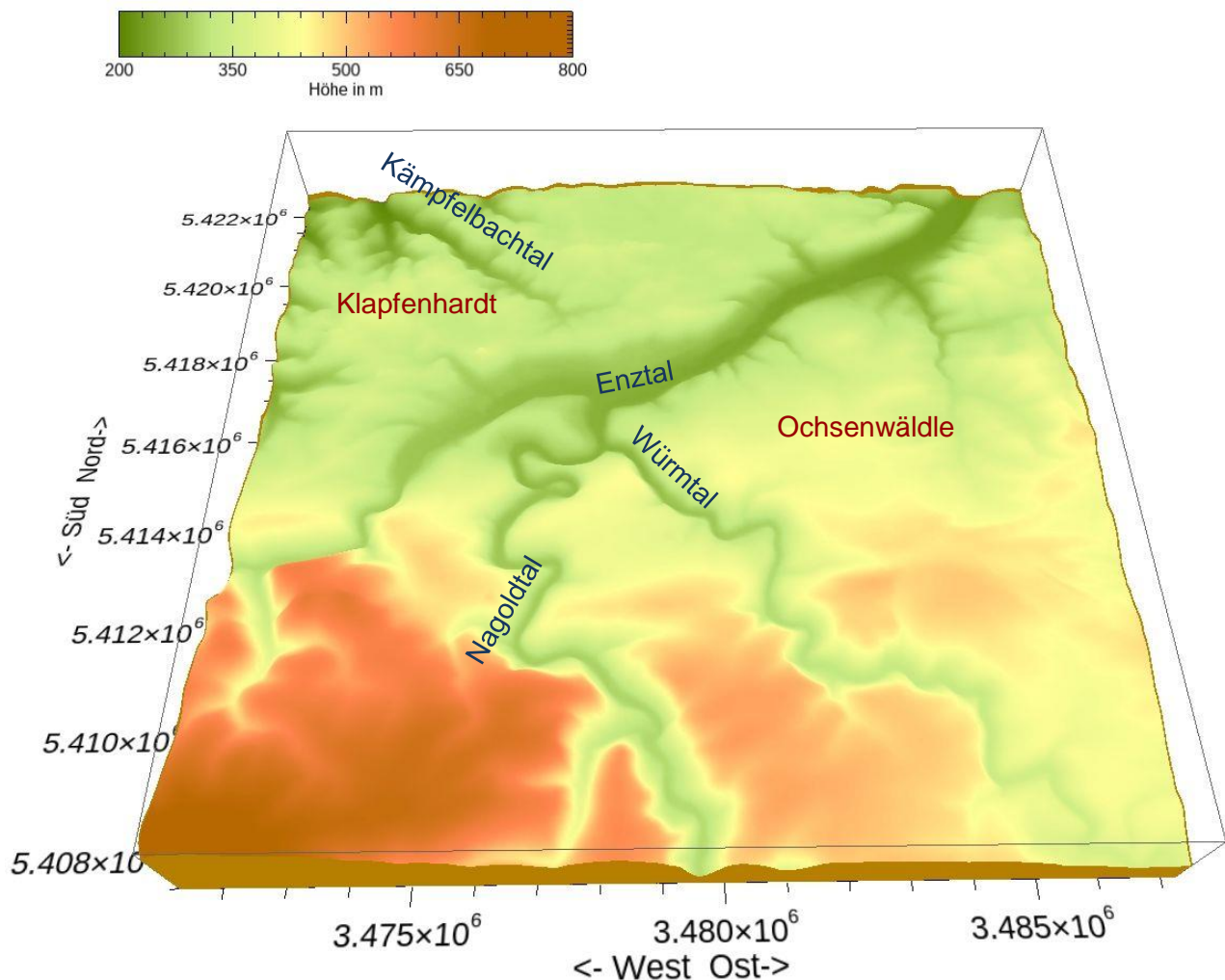


Abb. 3-1: FITNAH-Berechnungsgebiet für die stadtweite Untersuchung von Kaltluftströmungen (aus /1/). Die beiden Plangebiete sowie die wichtigsten Flusstäler sind ebenfalls markiert.

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 (Details hierzu in Kap. 4.1) berücksichtigt auch die Bewuchs- und Bauungsstrukturen (in parametrisierter Form).

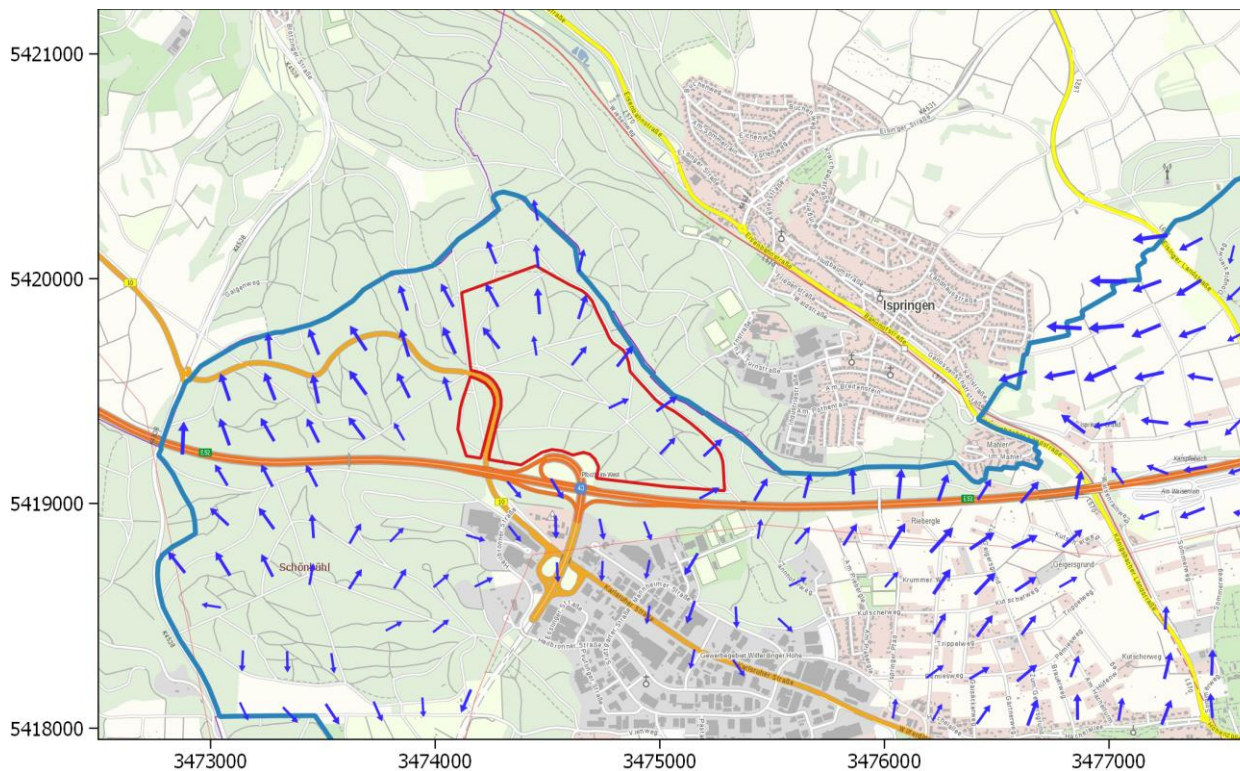


Abb. 3-2: Bodennahe Kaltluft-Strömungsverhältnisse zu Beginn einer Kaltluftsituation, Auswertung Kaltluftströmungsanalyse Gesamtstadt (/1). Das Plangebiet ist rot, die Gemarkungsgrenze blau markiert. (Datengrundlage: LGL, www.lgl-bw.de).

In Bodennähe (Abb. 3-2) wird im Plangebiet „Klapfenhardt“ die Entstehung von Kaltluft berechnet. Auf der Hochfläche bleibt diese Kaltluft – auch wegen des Baumbestandes – liegen, an den angrenzenden Hängen fließt sie ab. Diese Kaltluftströmungen orientieren sich entsprechend der Hangneigungen in Richtung des Kämpfelbachtals in Richtung Nordwesten bis Nordosten. Das Gebiet von Ispringen selbst wurde in der damaligen Untersuchung nicht betrachtet – die Entstehung und Orientierung der Kaltluft im Plangebiet lassen jedoch darauf schließen, dass die Kaltluft bis nach Ispringen vordringt. Daher kann zunächst nicht ausgeschlossen werden, dass Änderungen der Landnutzung unter Umständen auch zu Änderungen der Belüftungssituation in Ispringen führen. Aus diesem Grund wurde für diesen Bereich eine vertiefte Untersuchung durchgeführt (Kap. 4).

4 Kaltluftsimulation für das Plangebiet „Klapfenhardt“

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.

Nicht jeder Kaltluftstrom hat dabei eine Belüftungsfunktion für das gesamte Stadtgebiet. Je nach topografischen Verhältnissen haben in der Regel nur vertikal hoch reichende, aus einem großen Einzugsgebiet, also einem entsprechenden Hinterland gespeiste, Kaltluftströme die notwendige Mächtigkeit und Intensität, größere Teile eines Stadtgebietes zu überströmen und zu belüften.

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

Messungen in der Natur sind mit vertretbarem Aufwand notwendigerweise Punktmessungen. Für ein flächendeckendes, hochauflösendes 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 „Klapfenhardt“ eingesetzt.

Grundlage für die Berechnung von FITNAH ist die Bereitstellung von Eingangsdaten der Geländehöhe, der Landnutzung und den meteorologischen Bedingungen zu Beginn des Simulationslaufes. Auf Basis dieses sog. Anfangszustands berechnet das numerische Modell konsistente ausbalancierte Ergebnisse.

4.1 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” (12/, 13/, 14/, 15/, 16/, 17/).

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 (Navier-Stokes-

Gleichungen für die 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 auf einem numerischen dreidimensionalen Gitter 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.

4.2 Das Rechengebiet von FITNAH

Das Berechnungsgebiet von FITNAH wurde so groß gewählt, dass die Nutzungen im Untersuchungsgebiet und das potenzielle Einzugsgebiet von im Untersuchungsgebiet wirksamen Kaltluftströmungen enthalten sind.

Das Rechengebiet erstreckte sich daher über 9,6 km in West-Ost- und 8,6 km in Süd-Nord-Richtung und reicht über das Stadtgebiet von Pforzheim hinaus (Abb. 4-1). Die horizontale Auflösung (Maschenweite) der Simulation betrug 40 m. Eine einzelne Rechenfläche hat somit eine Ausdehnung von 40 m x 40 m. Dies gewährleistet eine differenzierte Analyse der Strömungen und klimatischen Funktionen im Bereich „Klapfenhardt“ und dem Kämpfelbachtal.

Die vertikalen Abstände des Rechengitters sind bodennah mit 10 m sehr fein aufgelöst. Darüber wurde der Abstand jeweils vergrößert bis insgesamt eine Höhe von 6.500 m erreicht wird.

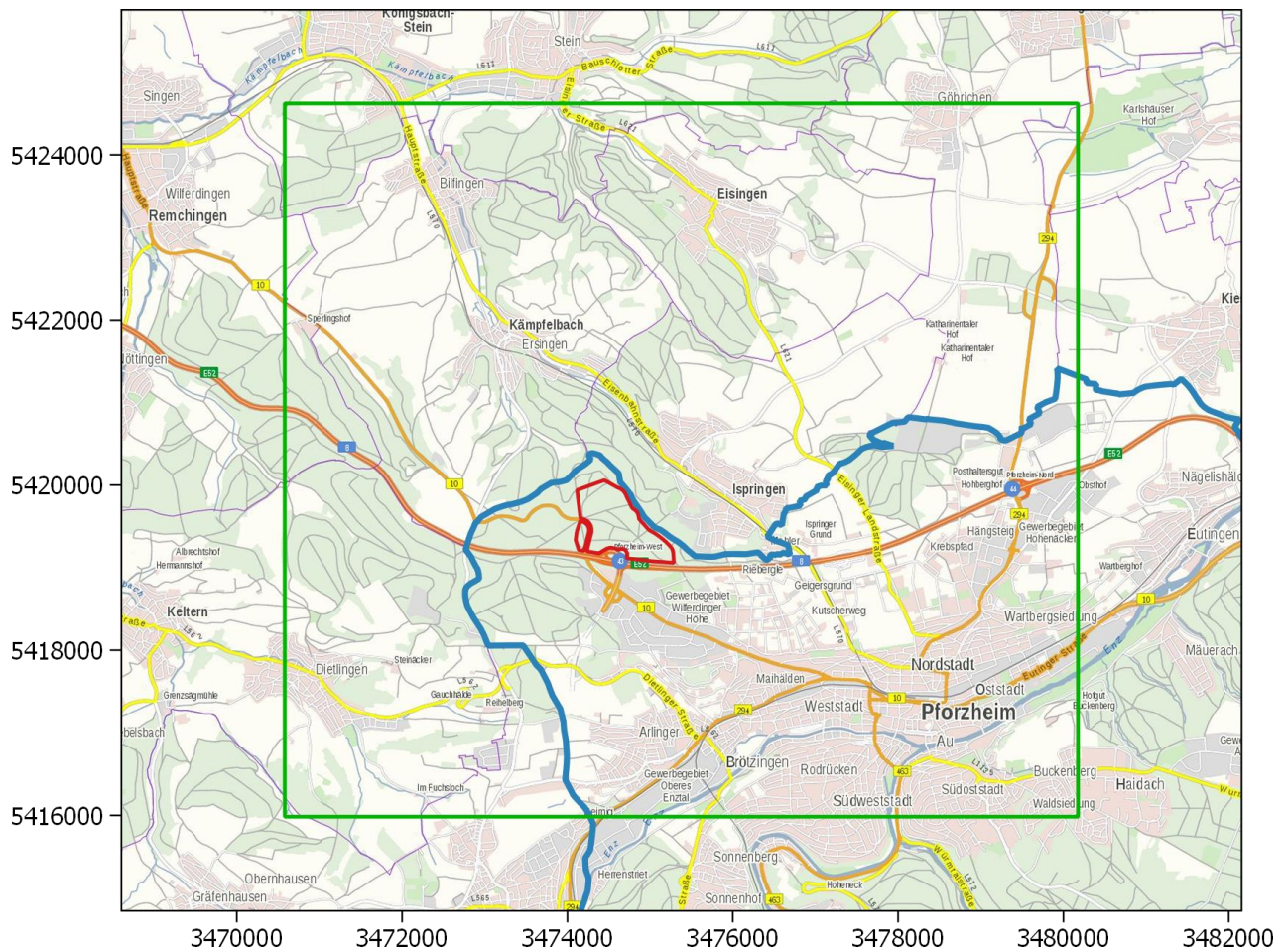


Abb. 4-1: FITNAH-Rechengebiet (grüner Rahmen) mit einer Maschenweite von 40 m. In rot ist das Plangebiet „Klapfenhardt“ und in blau das Stadtgebiet von Pforzheim markiert (Datengrundlage: LGL, www.lgl-bw.de).

4.3 Eingangsdaten

Grundlage für die Berechnung von FITNAH ist die Bereitstellung von Eingangsdaten der Geländehöhe, der Landnutzung und den meteorologischen Bedingungen zu Beginn des Simulationslaufes. Auf Basis dieses sog. Anfangszustands berechnet das numerische Modell konsistente ausbalancierte Ergebnisse.

4.3.1 Orographie

Wesentliche Eingangsgröße für das Modell ist die Geländehöhe im Untersuchungsgebiet. Die damit verbundene Geländeneigung und -struktur ist mitbestimmend für die Ausbildung und Stärke von Kaltluft-Strömungssystemen. Entsprechend der gewählten horizontalen Maschenweite steigt der Detailreichtum der aufgelösten Strukturen. Im vorliegenden Fall wird das Gelände im Bereich der Planung vor allem durch den Höhenrücken geprägt, auf dem das Gebiet „Klapfenhardt“ selbst liegt (Abb. 4-2). Dessen höchste Erhebung ist der Schönbühl mit 395 m über NN. In Richtung Norden ist das Kämpfelbachtal mit seinen Seitentälern, in Richtung Süden das Enztal in das Gelände eingeschnitten.

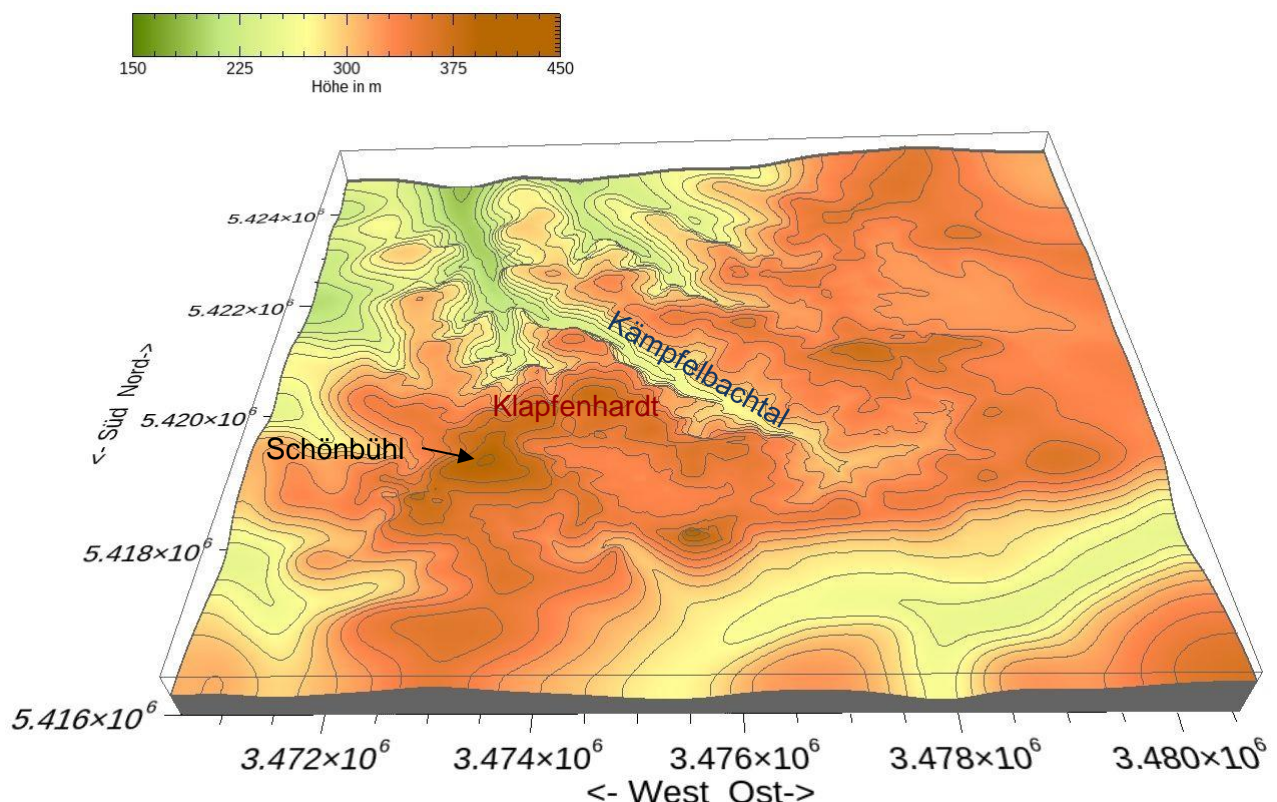


Abb. 4-2: Orographie des FITNAH-Rechengebiets Pforzheim „Klapfenhardt“: Geländeform überhöht.

4.3.2 Landnutzung Ist-Zustand

Die Landnutzungsdaten stehen europaweit flächendeckend in Form des CORINE-Katasters zur Verfügung. Diese Daten verfügen aber nur über eine begrenzte Auflösung der lokalen Gegebenheiten. Um die im 40 m-Raster auch kleinräumig stark variierenden Nutzungen und Oberflächeneigenschaften realistisch erfassen zu können, wurde die Landnutzung auf Basis von ALKIS- und Gebäudedaten präzisiert, welche die Stadt Pforzheim zur Verfügung stellte.

Dabei wurden jeder Rechenfläche Anteile der modellinternen Landnutzungstypen zugeordnet. Je nach Bebauungstyp und Bestandsart berücksichtigt das Modell unterschiedliche Höhen von Bebauung und Bewuchs. Für die Bebauung wird zudem ein für den Bebauungstyp charakteristischer anthropogener Wärmestrom einbezogen.

Ausgegangen wird vom heutigen **Ist-Zustand**, in dem das gesamte Plangebiet durch Wald bedeckt ist. Die folgende Abbildung zeigt in einem Ausschnitt des Untersuchungsgebiets die Landnutzung, wie sie im Modell berücksichtigt wurde (Abb. 4-3).

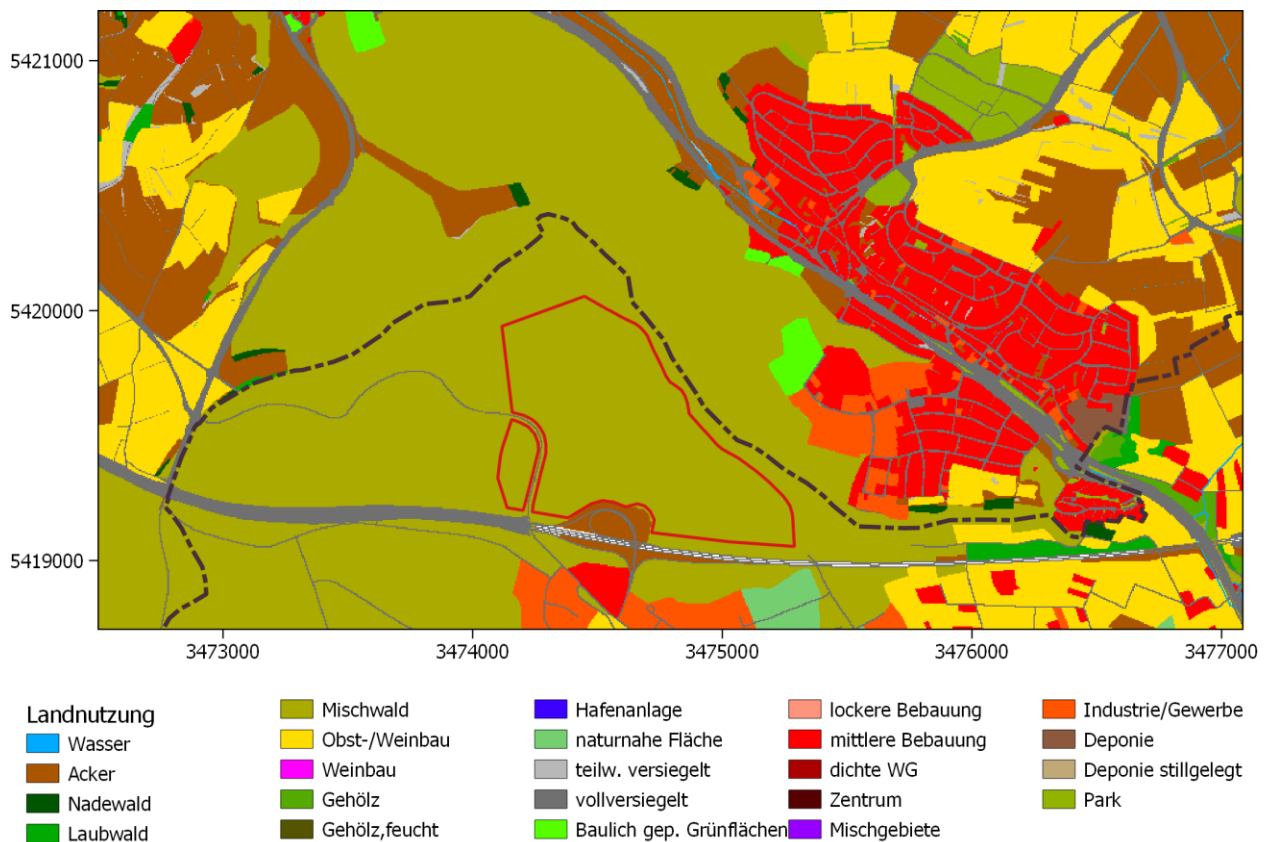


Abb. 4-3: Landnutzung im Modell (aufbereitet aus ALKIS-Daten) in einem Ausschnitt des Berechnungsgebietes, Ist-Zustand. Der Bereich „Klapfenhardt“ ist rot umrandet, das Stadtgebiet schwarz strich-punktiert.

4.3.3 Landnutzung Planfall

Untersucht wurden zwei von der Stadt vorgegebene Umgriffe des geplanten Gewerbegebiets „Klapfenhardt“ (Planfall 1 in Abb. 4-4 und Planfall 2 in Abb. 4-5). Im Planfall 2 ist erstreckt sich das Gewerbegebiet nur bis zur Kammlinie, die Flächen nördlich davon bleiben dagegen bewaldet.

Da zum Zeitpunkt der Bearbeitung von Seiten der Stadt Pforzheim noch keine Vorgaben für die maximale Bebauungsdichte und Gebäudehöhen im Geltungsbereich des möglichen Bebauungsplans festgelegt wurden, wurden konservative obere Abschätzungen zugrunde gelegt. Als Versiegelungsgrad wurden 90 %, als Gebäudehöhen bis zu 20 m angenommen. Außerdem wurde eine Nivellierung des Geländes im Plangebiet angenommen.

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen, wie sich die Planfälle in die Landnutzung für die Strömungssimulation einfügen (Abb. 4-4).

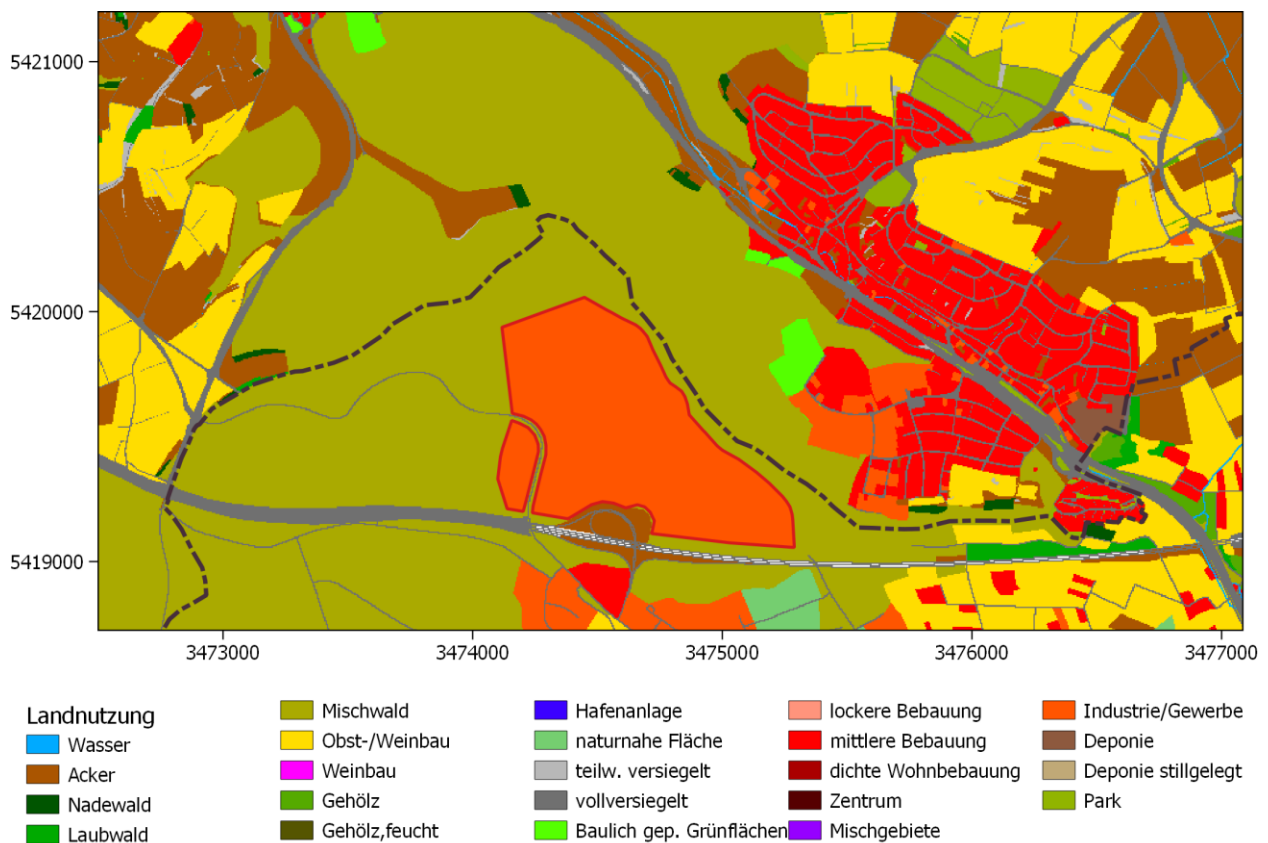


Abb. 4-4: Landnutzung in einem Ausschnitt des Berechnungsgebietes mit der Nutzung des Planfalls 1. Der Bereich „Klapfenhardt“ ist rot umrandet, das Stadtgebiet schwarz strich-punktiert.

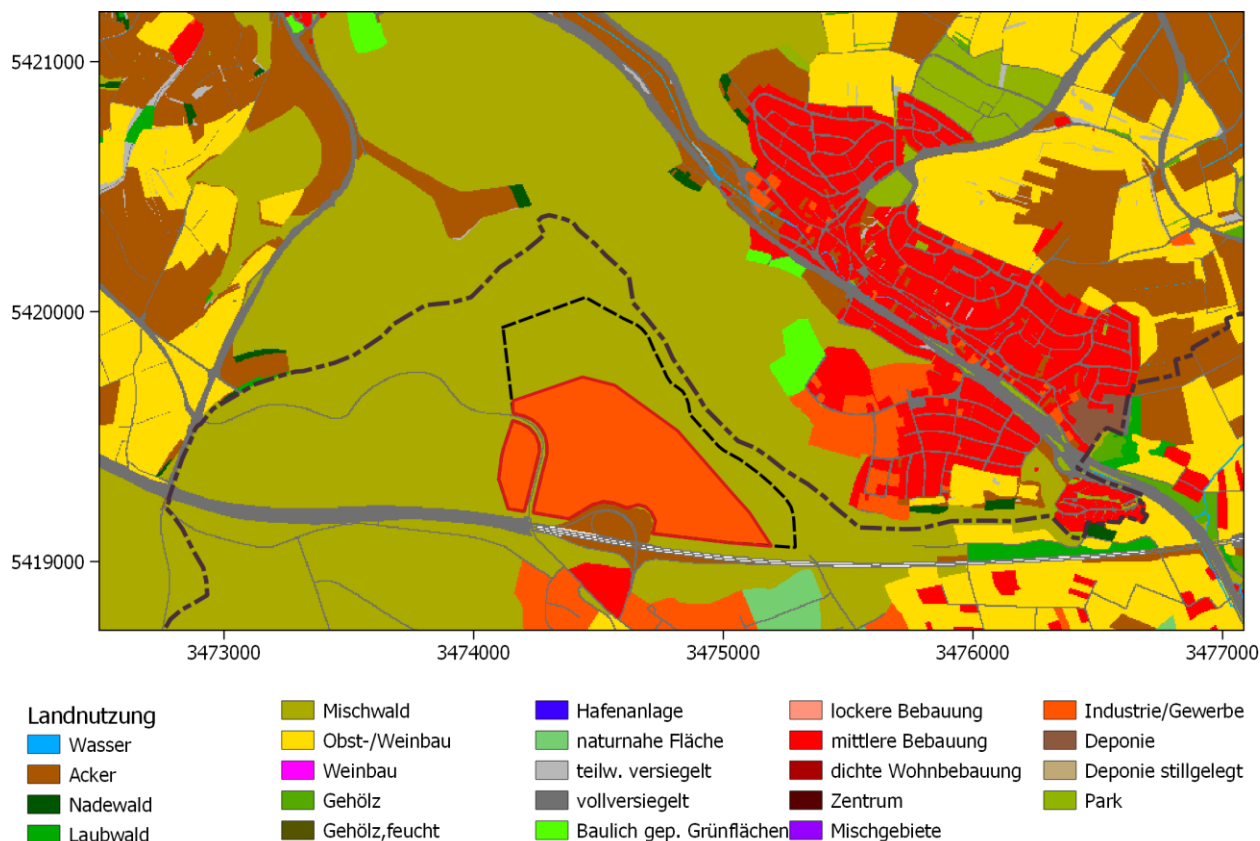


Abb. 4-5: Landnutzung in einem Ausschnitt des Berechnungsgebietes mit der Nutzung des Planfalls 2. Der Bereich „Klapfenhardt“ ist rot umrandet, das Stadtgebiet schwarz strich-punktiert. Schwarz gestrichelt die Ausdehnung des Plangebiets in Planfall 1.

4.4 Meteorologische Situation und Anfangszustand

Für die Simulation im Berechnungsgebiet wurde von einer autochthonen („eigenbürtigen“) 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. Bei einer autochthonen Wetterlage herrschen vergleichsweise geringe Windgeschwindigkeiten. Der damit verbundene herabgesetzte Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht kann zu einer Wärmebelastung in den Siedlungsflächen und damit zu bioklimatischen Belastungen führen. Lokalklimatische Besonderheiten im Untersuchungsgebiet können sich unter diesen Bedingungen gut herausbilden. Typischerweise entwickeln sich in diesen Wetterlagen Kaltluftströmungen und Flurwindssysteme. Sie sind in solchen Fällen verbunden mit Bodeninversionen, d.h. mit einer bodennahen Temperaturzunahme mit der Höhe.

Die Häufigkeit von Inversionswetterlagen liegt im Bereich des Untersuchungsgebiets Pforzheim je nach Höhenlage bei 100 bis 150 Tagen im Jahr, also bei etwa in Drittel des Jahres (Abb. 4-6).

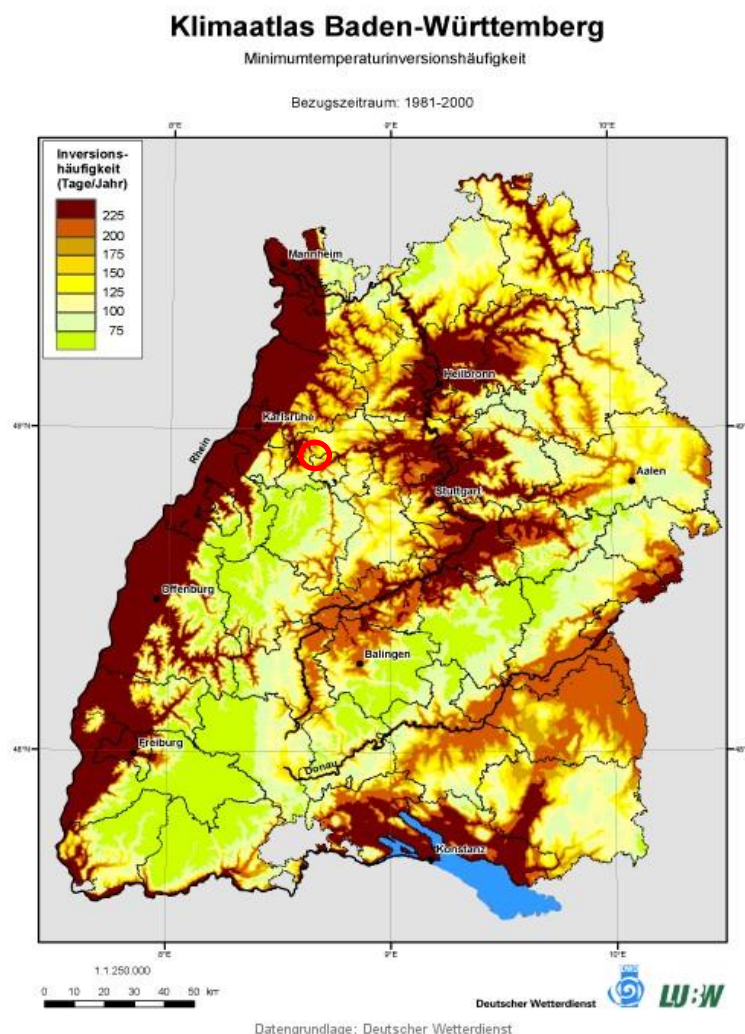


Abb. 4-6: Inversionshäufigkeiten in Baden-Württemberg im Zeitraum 1981 – 2000. Auszug aus dem Klimaatlas Baden-Württemberg (/8/). Das Untersuchungsgebiet ist rot umrandet.

Die Kaltluft-Strömungs-Simulationen wurden für eine typische Sommernacht durchgeführt (1. August, die im Text genannten Zeiten sind wahre Ortszeiten, die Sonne steht dabei um 12:00 im Zenit).

Die Berechnungen wurde am Nachmittag 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).

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 (bezogen auf die Startzeit) für die großräumigen Windverhältnisse (kein überlagerter Wind) und die relative Feuchte vorgegeben werden. Um eine optimale Ausbildung der Strömungs-Strukturen zu simulieren, wurde keine Bewölkung angesetzt (Bedeckungsgrad 0/8). Als Starttemperaturen wurden typische Werte eines Sommertags vorgegeben. Die Ergebnisse der Simulation repräsentieren damit mittlere sommerliche Verhältnisse.

4.5 *Hinweise zur Auswertung der Ergebnisse*

Die Auswertung der *Temperatur* erfolgte für die Standardmesshöhe in *2 m über Grund*. Zu beachten ist, dass diese Temperatur im Wald innerhalb des Bestandes und in bebauten Bereichen innerhalb der urbanen Strukturen ebenfalls in 2 m über Grund gilt.

Die *bodennahen Windverhältnisse* stehen stellvertretend für die untersten 10 m des Rechengebietes und wurden in einer Höhe von *5 m über Grund* ausgewiesen. Sie werden in bebautem Gebiet und in Waldbeständen unter Berücksichtigung von deren Hinderniswirkung auf die Strömung berechnet. Da es sich um einen Mittelwert für die Rechen-Teilflächen handelt und zur Mittelbildung der Versiegelungsgrad bzw. die Bestandsdichte mit zu berücksichtigen sind, ist im Bereich dichter Strukturen insbesondere der Mittelwert der Windgeschwindigkeit oft vergleichsweise niedrig.

5 Ergebnisse Ist-Zustand „Klapfenhardt“

Grundsätzlich werden bei der Analyse von Kaltluftströmungen aufgrund ihres zeitlichen Entwicklungsverhaltens zwei Phasen betrachtet: Das Einsetzen der Kaltluftströmung zu Beginn (Abend, erste Nachthälfte) und die Etablierung eines meist etwas abgeschwächten, aber anhaltenden Kaltluftströmungssystems in der zweiten Nachthälfte.

Die niedrigsten Temperaturen zeigen sich im Ist-Zustand über den offenen Flächen (Abb. 5-1). Die dortigen Grünland- und Ackerflächen begünstigen die Ausstrahlung der Erdoberfläche und damit der Abkühlung der bodennahen Luft.

Zunächst strömt die an den Hängen entstehende Kaltluft meist senkrecht zur jeweiligen Geländeneigung ab. Mit dem Eintritt in einen flacheren Talgrund dreht die vorherrschende Strömungsrichtung in Talrichtung, wie z.B. über den Freiflächen nordwestlich der Stadtgrenze (Markierung 1 in Abb. 5-1). Im Kämpfelbachtal ist dieser Effekt weniger ausgeprägt, da hier der Talgrund nicht hindernisfrei ist, sondern die Strömung durch Bebauung oder Vegetation abgebremst wird (Markierung 2).

Auch orographische Effekte kommen zum Tragen. In Senken oder vor Hindernissen sammelt sich kühlere und damit schwerere Luft, wie z.B. im südwestlichen Teil des Plangebiets (Markierung 3).

Kaltluftnächte sind dadurch gekennzeichnet, dass die Atmosphäre durch die Ausstrahlung der Erdoberfläche von unten her abkühlt. Dadurch entsteht eine sogenannte Temperaturinversion, bei der die Temperatur mit der Höhe zunimmt. Dort, wo keine bebauten Bereiche Einfluss auf die Temperatur nehmen, findet man die tieferen Temperaturen in den Tal- und Senkenlagen, die höheren Temperaturen in den Höhen und Kuppenlagen. Dieser Effekt tritt auch im Plangebiet auf. Die höheren Temperaturen korrespondieren auch hier vor allem mit der Höhenlage (Markierung 4).

Die höchsten Temperaturen werden jedoch erwartungsgemäß in Bereichen mit dichter Bebauung und größerem Abstand von den belüftenden bodennahen Kaltluftströmungen wie z.B. im Gewerbegebiet „Wilferdinger Höhe“ berechnet (Markierung 5).

Das Kämpfelbachtal und damit Ispringen erhalten einen Zustrom von Kaltluft aus zwei Bereichen: Einmal aus dem Bereich der Hochflächen bzw. Talhänge nördlich und östlich des Ortes, und einmal aus Süden bzw. Südwesten von den dort gelegenen Talhängen. Das Entstehungsgebiet des westlichen Teils dieser Kaltluft liegt teilweise im Bereich des Höhenrückens, in dem das geplante Gewerbegebiet „Klapfenhardt“ vorgesehen ist, und dort vor allem im nördlichen Teil. Überwiegend entsteht die Kaltluftströmung aber an den bewaldeten Hängen selbst. Die bodennahe Strömung von den südlichen Hängen ist vor allem im westlichen Teil von Ispringen wirksam. Ihre Eindringtiefe ist aber aufgrund der niedrigen Geschwindigkeiten in Verbindung mit der Bebauung begrenzt.

Die grundsätzliche Struktur der Kaltluftströmungen und damit die Belüftungssituation verändert sich im Laufe einer Kaltluft-Nacht nur wenig (Abb. 5-2). Der Zustrom von den südlichen Talhänge verringert sich etwas, da der Baumbestand die Abkühlung der Erdoberfläche und damit die Kaltluftbildung gegenüber freiem Feld verringert.

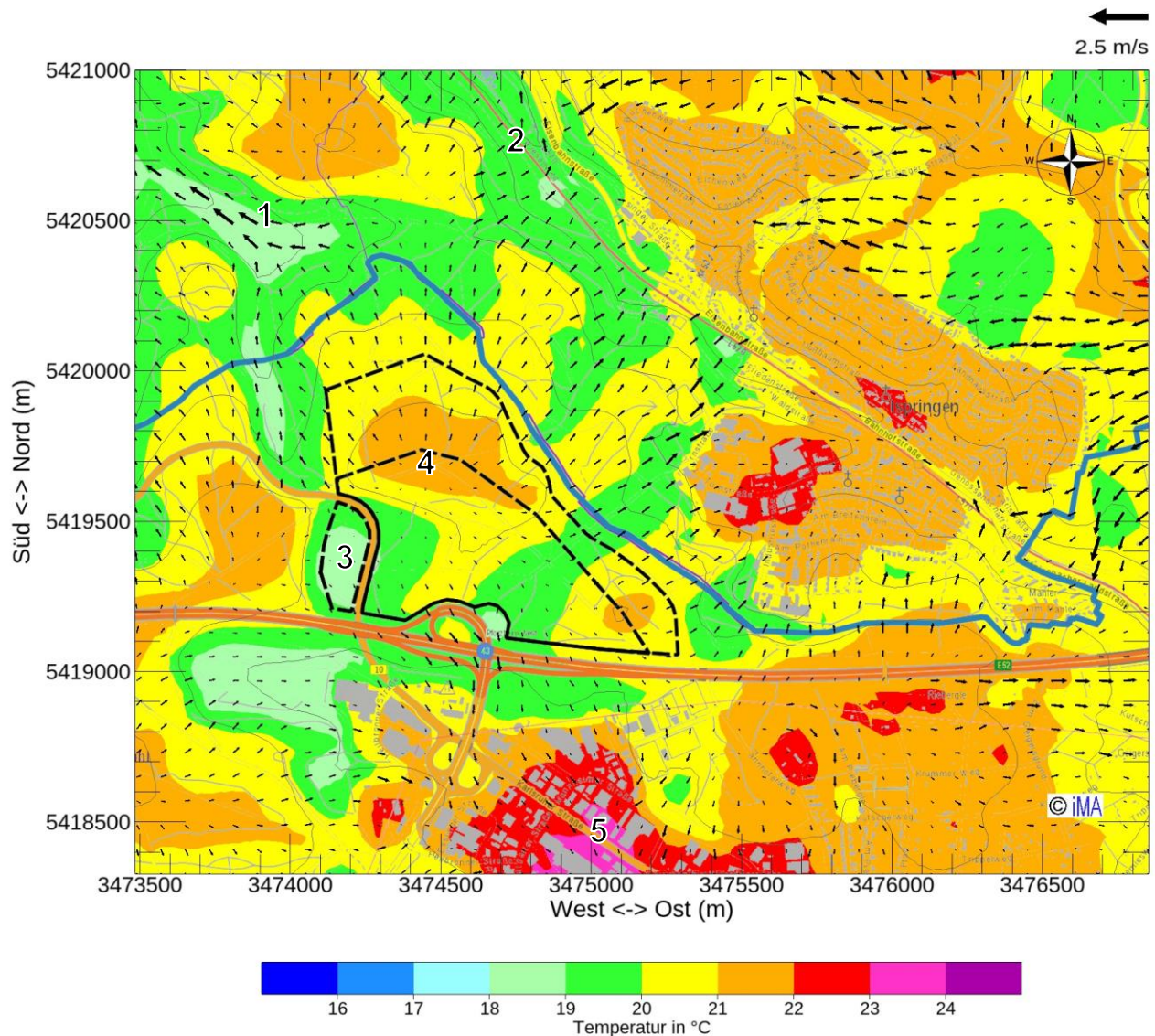


Abb. 5-1: Ist-Zustand: Bodennahe Strömung (Windpfeile) und Temperaturverhältnisse (2 m über Grund) zu Beginn der Nacht während einer typischen autochthonen Wetterlage im Bereich des Plangebiets und seiner näheren Umgebung. Die Zahlen-Markierungen werden im Text erläutert. Die möglichen Plangebiete sind für den Planfall 1 und Planfall 2 schwarz gestrichelt markiert. Der besseren Übersicht wegen ist die Strömung hier als Pfeil an jedem zweiten Berechnungspunkt dargestellt (Datengrundlage Hintergrundkarte: LGL, www.lgl-bw.de).

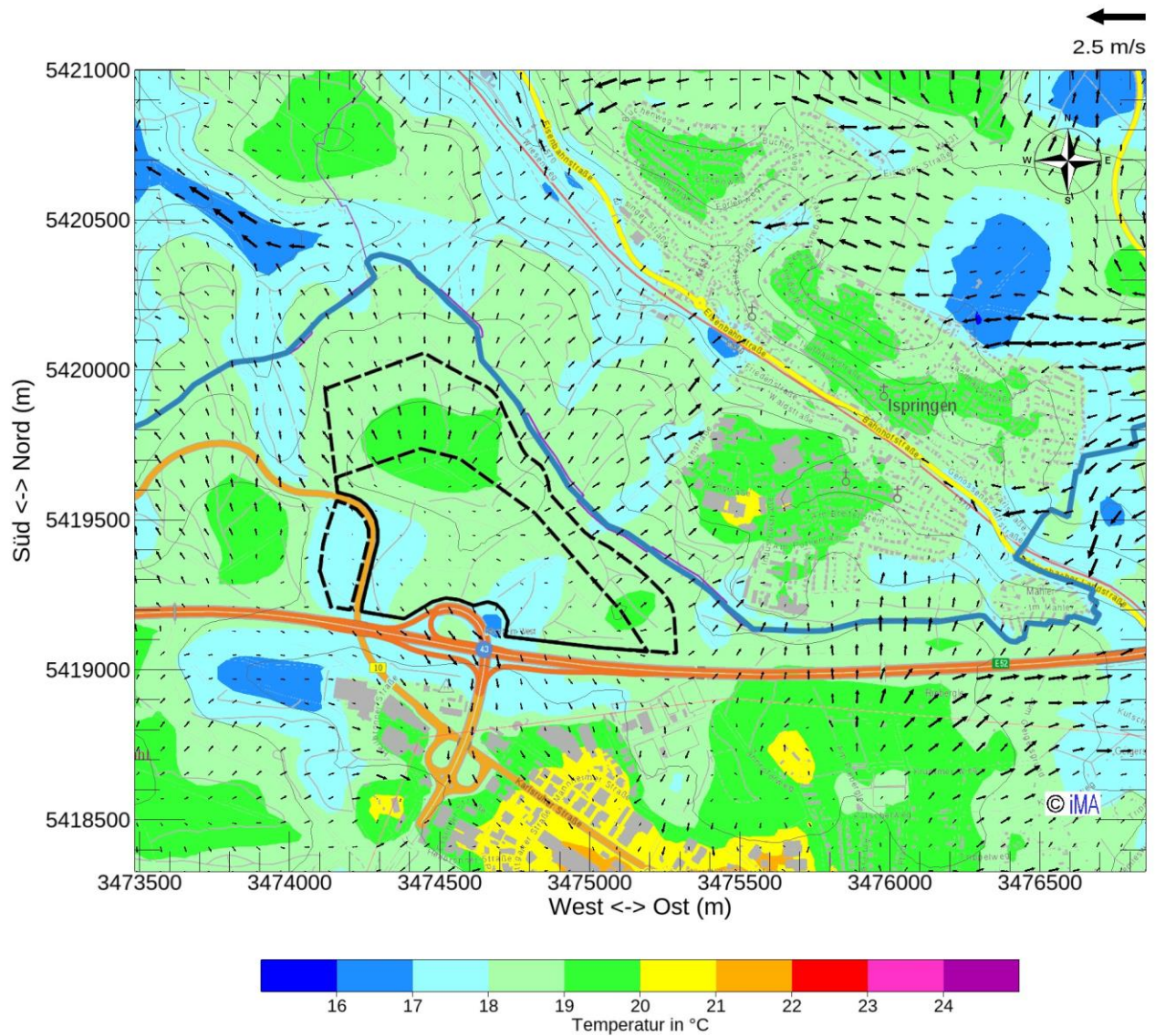


Abb. 5-2: Ist-Zustand: Bodennahe Strömung (Windpfeile) und Temperaturverhältnisse (2 m über Grund) später in der Nacht während einer typischen autochthonen Wetterlage. Der besseren Übersicht wegen ist die Strömung hier als Pfeil an jedem zweiten Berechnungspunkt dargestellt (Datengrundlage Hintergrundkarte: LGL, www.lgl-bw.de).

6 Ergebnisse Planfälle 1 und 2 „Klapfenhardt“

6.1 Planfall 1

Aufgrund der geplanten Bebauung verändert sich die Strömung im Plangebiet selbst am meisten. Auch in der Temperaturverteilung tritt im Unterschied zum Ist-Zustand vor allem das Plangebiet selbst hervor, das durch die Versiegelung und Bebauung deutlich wärmer bleibt als es im vorher dort befindlichen Wald der Fall war (Abb. 6-1). Wie an den fehlenden Windpfeilen erkennbar, ist davon auszugehen, dass im Plangebiet keine oder nur noch geringfügig Kaltluft gebildet wird.

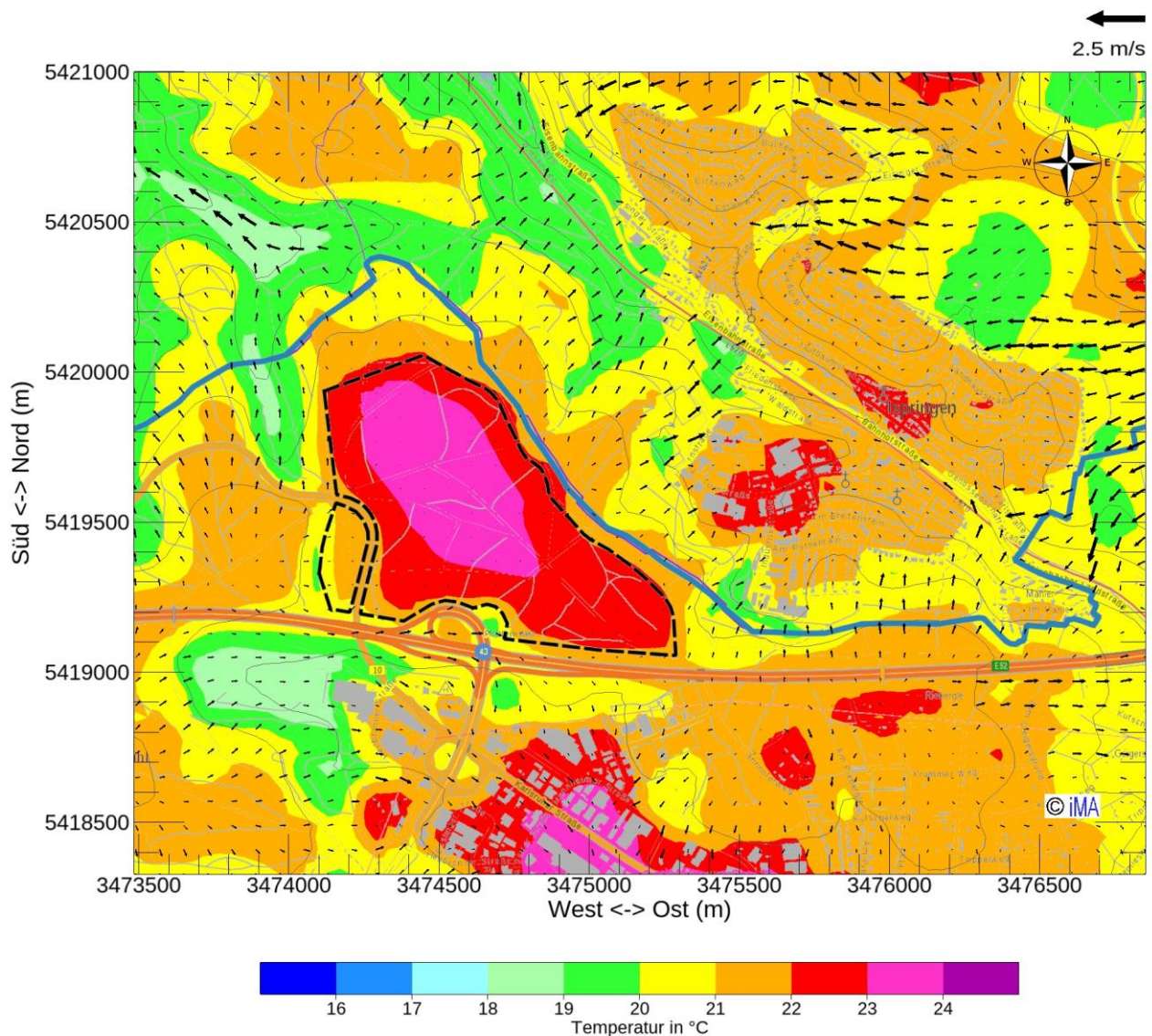


Abb. 6-1: Planfall 1: Bodennahe Strömung (Windpfeile) und Temperaturverhältnisse (2 m über Grund) zu Beginn der Nacht während einer typischen autochthonen Wetterlage. Das Plangebiet ist gestrichelt markiert. Der besseren Übersicht wegen ist die Strömung hier als Pfeil an jedem zweiten Berechnungspunkt dargestellt. (Datengrundlage Hintergrundkarte: LGL, www.lgl-bw.de).

Die Struktur der Kaltluftströmungen in das Kämpfelbachtal wird dadurch aber nur wenig beeinflusst. Insbesondere der Zustrom von Kaltluft von den südlichen Talhängen bleibt weiter erhalten. Vor allem im oberen Teil der Hänge ist die Intensität, bedingt durch den fehlenden Zustrom aus dem Plangebiet, jedoch etwas schwächer. Auch in der Temperaturverteilung im Bereich Ispringen zeigen sich keine markanten Unterschiede. Dies gilt auch für die Situation später in der Nacht (Abb. 6-2).

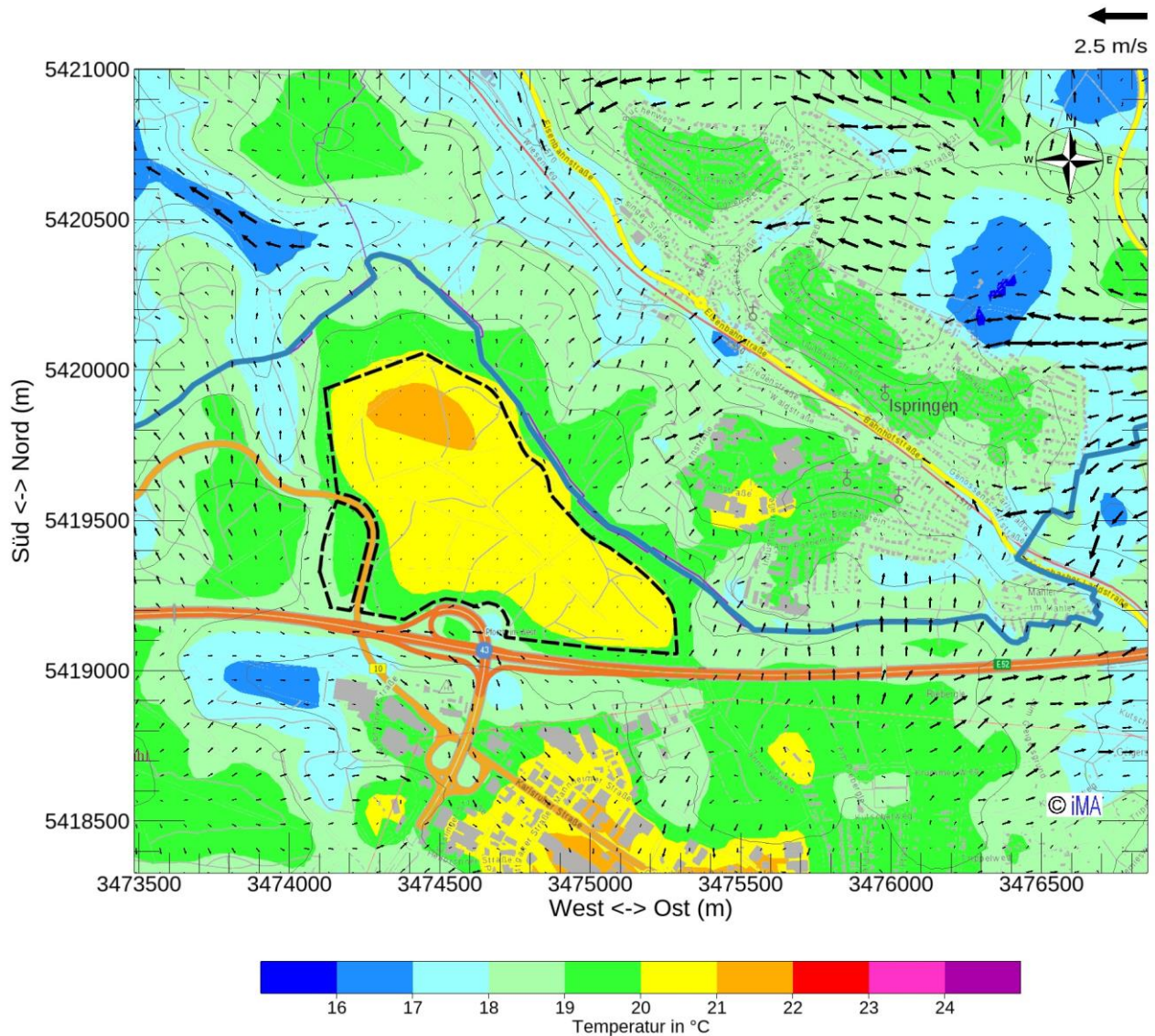


Abb. 6-2: Planfall 1: Bodennahe Strömung (Windpfeile) und Temperaturverhältnisse (2 m über Grund) später in der Nacht während einer typischen autochthonen Wetterlage. Das Plangebiet ist gestrichelt markiert. Der besseren Übersicht wegen ist die Strömung hier als Pfeil an jedem zweiten Berechnungspunkt dargestellt (Datengrundlage Hintergrundkarte: LGL, www.lgl-bw.de).

6.2 Planfall 2

Im Planfall 2 ist das Gebiet, das überbaut wird, auf den Teil südlich der Kammlinie beschränkt. Aufgrund der geringeren Ausdehnung der bebauten Flächen im Plangebiet bildet sich im Gegensatz zu Planfall 1 vor allem im nördlichen Teil weiter Kaltluft (Abb. 6-3). Die Kaltluftströmungen nach Norden bleiben unter nur sehr geringer Abschwächung erhalten. Auch im weiteren Verlauf der Nacht bleibt diese Kaltluftströmung bestehen (Abb. 6-4). Die Temperaturänderungen im Umfeld des Plangebiets haben dadurch im Vergleich zu Planfall 1 eine etwas geringere Reichweite.

Außerhalb des Plangebiets sind die Unterschiede zum Ist-Zustand insgesamt sehr gering.

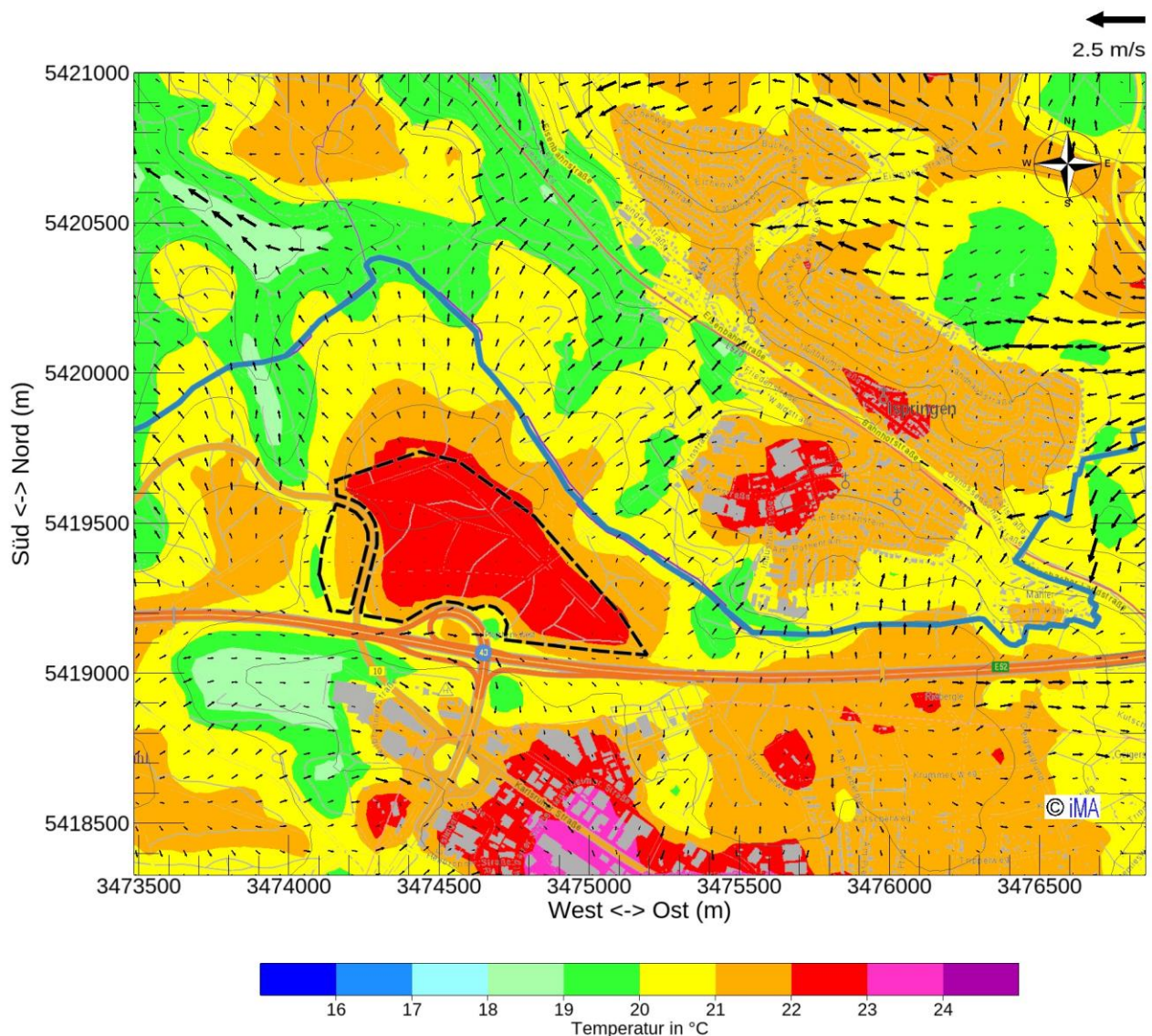


Abb. 6-3: Planfall 2: Bodennahe Strömung (Windpfeile) und Temperaturverhältnisse (2 m über Grund) zu Beginn der Nacht während einer typischen autochthonen Wetterlage. Der besseren Übersicht wegen ist die Strömung hier als Pfeil an jedem zweiten Berechnungspunkt dargestellt (Datengrundlage Hintergrundkarte: LGL, www.lgl-bw.de).

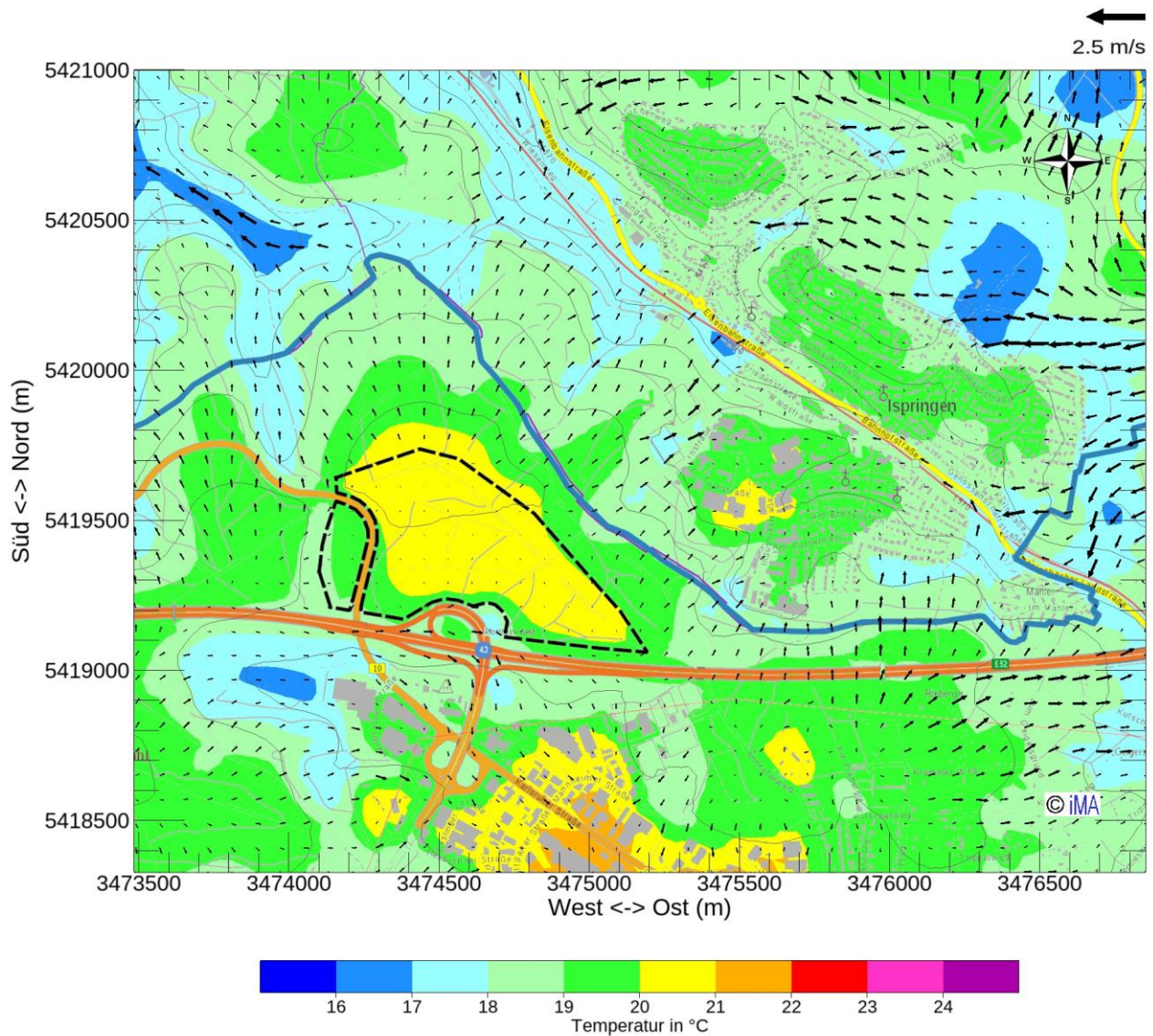


Abb. 6-4: Planfall 2: Bodennahe Strömung (Windpfeile) und Temperaturverhältnisse (2 m über Grund) zu später in der Nacht während einer typischen autochthonen Wetterlage. Der besseren Übersicht wegen ist die Strömung hier als Pfeil an jedem zweiten Berechnungspunkt dargestellt (Datengrundlage Hintergrundkarte: LGL, www.lgl-bw.de).

7 Veränderung „Klapfenhardt“ Planfälle - Ist-Zustand

Die Wirkung und die Reichweite der Wirkung einer Planung werden besonders deutlich, wenn man die Differenzen „Planfall minus Ist-Zustand“ betrachtet. Im Folgenden wird dies für die bodennahen Temperaturverhältnisse und die Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt.

7.1 Planfall 1

Die folgende Abbildung zeigt die Änderung der bodennahen Temperaturverhältnisse zu Beginn der Nacht bei Umsetzung des **Planfalls 1** (Abb. 7-1).

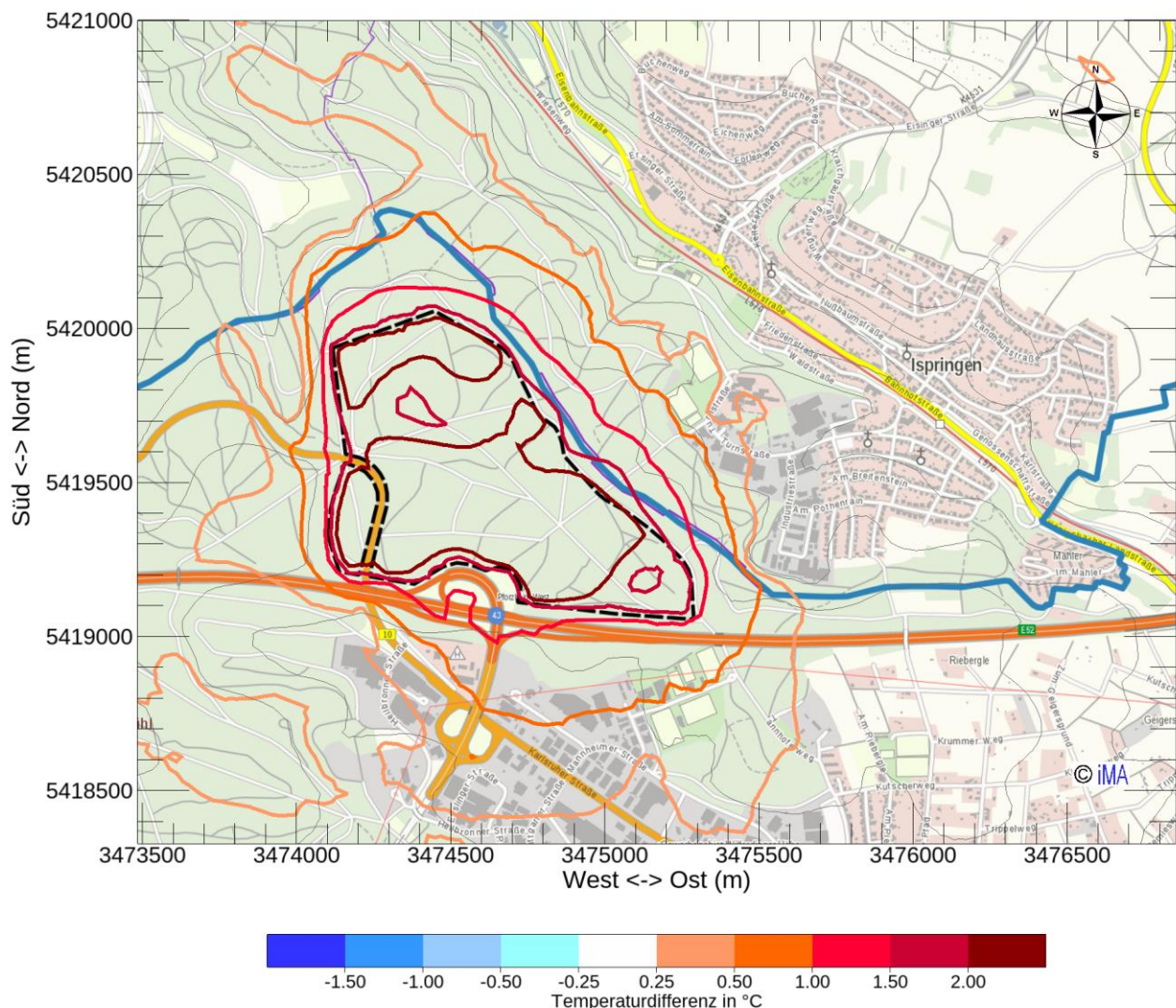


Abb. 7-1: Differenz Planfall 1 minus Ist-Zustand: Temperaturverhältnisse 2 m über Grund zu Beginn der Nacht während einer typischen autochthonen Wetterlage (Datengrundlage Hintergrundkarte: LGL, www.lgl-bw.de).

Die größten Temperaturzunahmen gegenüber dem gegenwärtigen Ist-Zustand werden dort berechnet, wo im Planfall die zusätzlichen Baumassen vorgesehen sind. Im Bereich der Planbebauung steigen die Temperaturen in der Kaltluftnacht gegenüber den heute vorhandenen Waldflächen um mehr als 2 Kelvin¹ an.

Geringe Temperaturerhöhungen werden – unter Abschwächung – vom überplanten Bereich jeweils in Strömungsrichtung berechnet. Dies betrifft zunächst die umgebenden Waldflächen wie die Südhänge des Kämpfelbachtals. Dort liegen die Temperaturen im Planfall etwas höher, da der Zustrom bereits kühlerer Luft aus dem Plangebiet ausbleibt. Jenseits der bewaldeten Talhänge ist die Reichweite dieses Effekts begrenzt. Neben dem Gewerbegebiet „Wilferdinger Höhe“ sind kleine Temperaturunterschiede im Randbereich im südlichen Teil von Ispringen erkennbar, wo sich vorwiegend gewerbliche Nutzung, Schulen sowie Sportstätten befinden. Der Effekt bleibt dort mit maximal +0,5 K am Ortsrand aber gering. In der Wohnbebauung von Ispringen sind keine Auswirkungen auf die Temperatur zu erwarten.

Die Änderungen im Temperaturfeld gehen einher mit den Auswirkungen auf die Strömung. Im Plangebiet und an den südlichen Talhängen verringert sich die Strömungsgeschwindigkeit und damit der Zufluss an Kaltluft in das Kämpfelbachtal (Abb. 7-2). Dies betrifft in der Bebauung ebenfalls nur den Bereich des Gewerbegebiets und der angrenzenden Sportstätten. Die Geschwindigkeitsabnahme bleibt aber sehr gering.

Auswirkungen auf die Geschwindigkeit sind im geringen Umfang auch auf den Hochflächen nördlich Ispringens feststellbar. Da die Kaltluft auch von dieser Seite in das Tal einströmt, führt die Verringerung des Zustroms aus Süden offensichtlich auch zu leichten Änderungen im Zustrom aus Norden.

Durch die schnelle Abnahme der Effekte durch die Planung ist auch in weiter talabwärts gelegenen Bereichen wie in der Gemeinde Ersingen mit keinen Auswirkungen zu rechnen.

¹ Temperaturdifferenzen werden im Text in Kelvin statt in Grad Celsius angegeben.

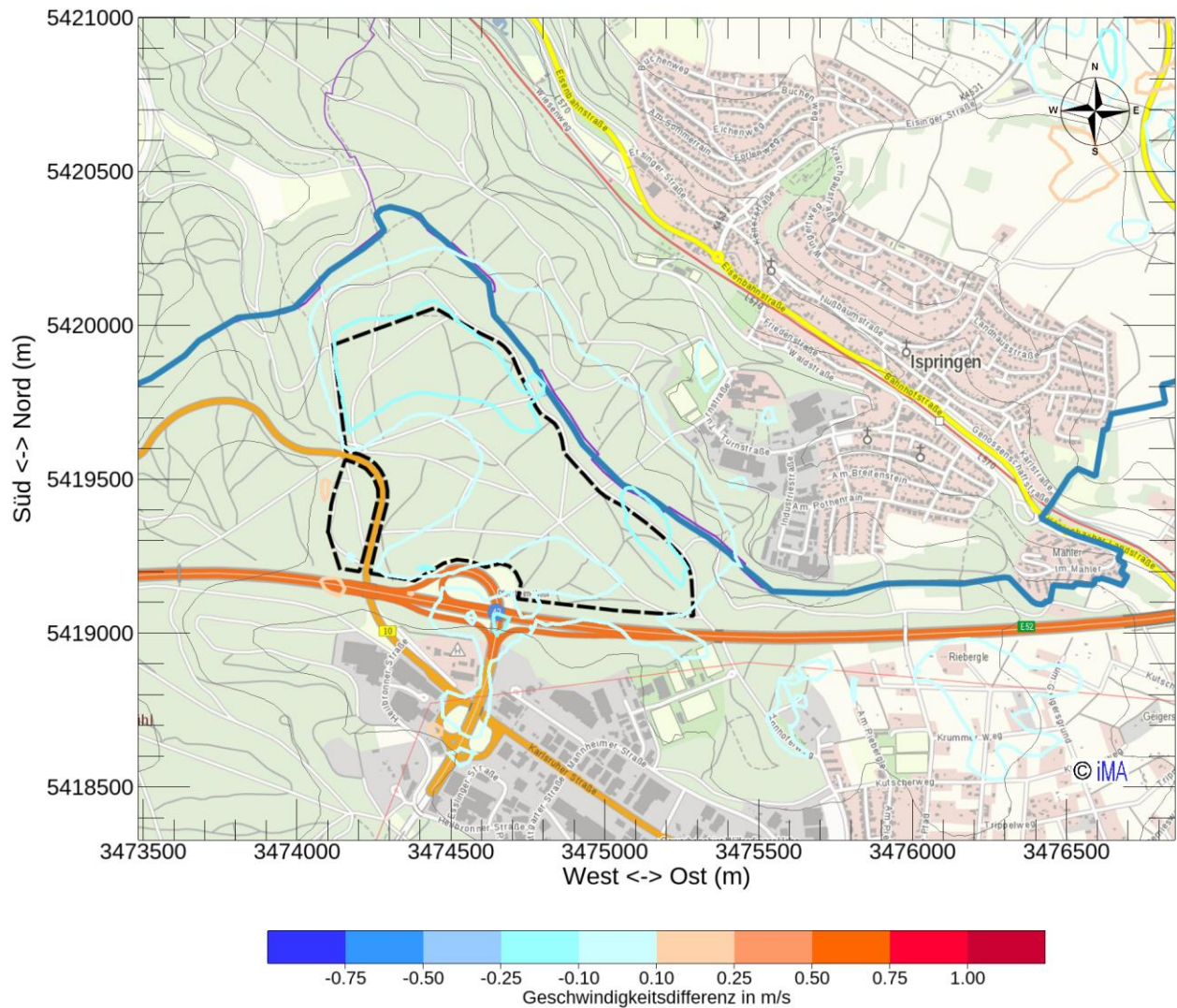


Abb. 7-2: Differenz Planfall 1 minus Ist-Zustand: Bodennahe Windgeschwindigkeit zu Beginn der Nacht während einer typischen autochthonen Wetterlage (Datengrundlage Hintergrundkarte: LGL, www.lgl-bw.de).

7.2 Planfall 2

Sowohl bei der Temperatur als auch bei der Strömungsgeschwindigkeit zeigt sich ein ähnliches Bild wie im Planfall 1. Die größten Unterschiede sind im Plangebiet selbst zu finden. In Ispringen ist die Reichweite etwas geringer als im Planfall 1 und beschränkt sich bei der Temperatur auf äußerst geringe Veränderungen, die gerade noch an die äußeren Siedlungsränder heranreichen (Abb. 7-3). Änderungen in der Strömungsstruktur innerhalb der Bebauung von Ispringen sind darüber hinaus nicht zu erwarten (Abb. 6-4Abb. 7-4).

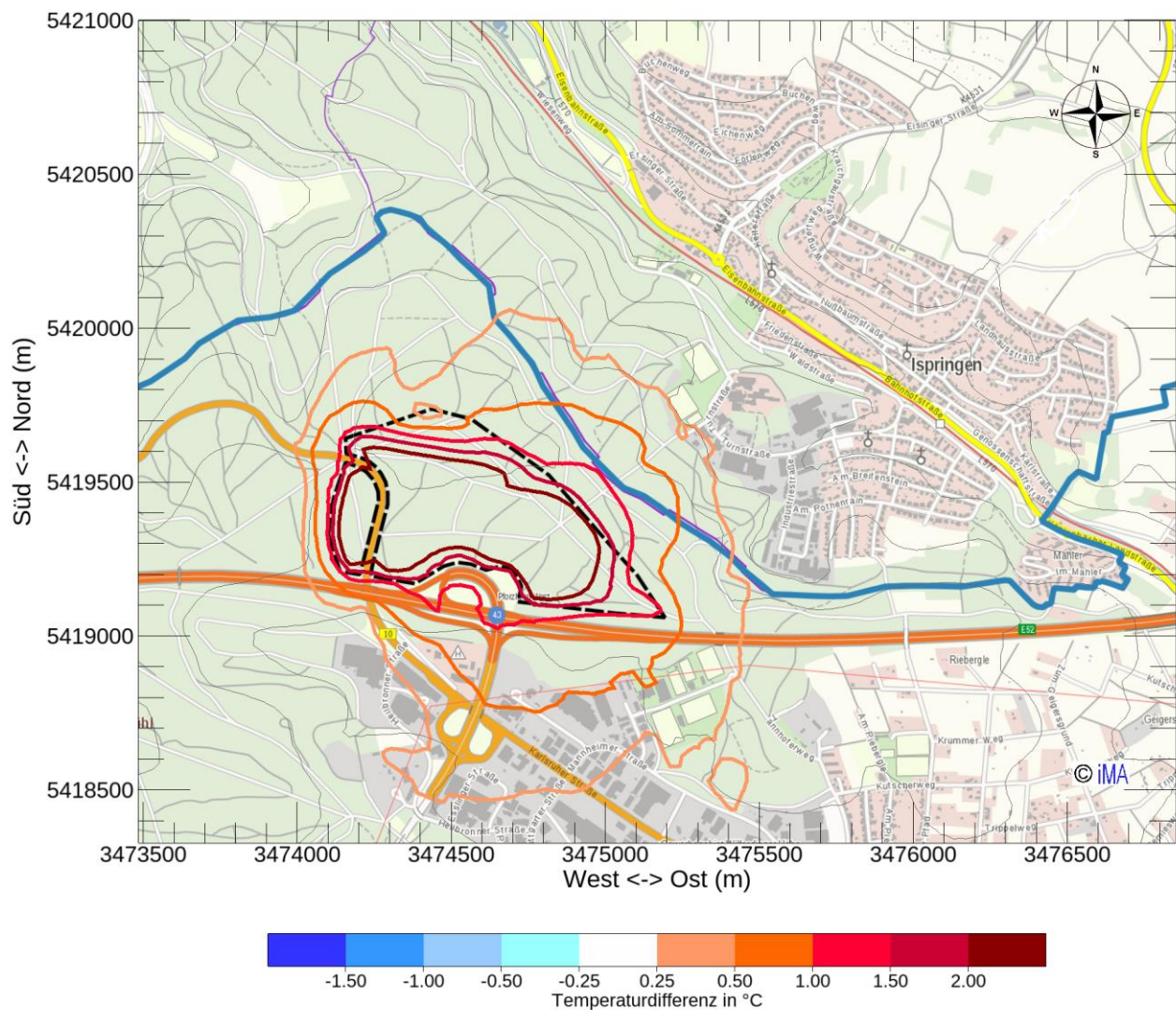


Abb. 7-3: Differenz Planfall 2 minus Ist-Zustand Temperaturverhältnisse 2 m über Grund zu Beginn der Nacht während einer typischen autochthonen Wetterlage (Datengrundlage Hintergrundkarte: LGL, www.lgl-bw.de).

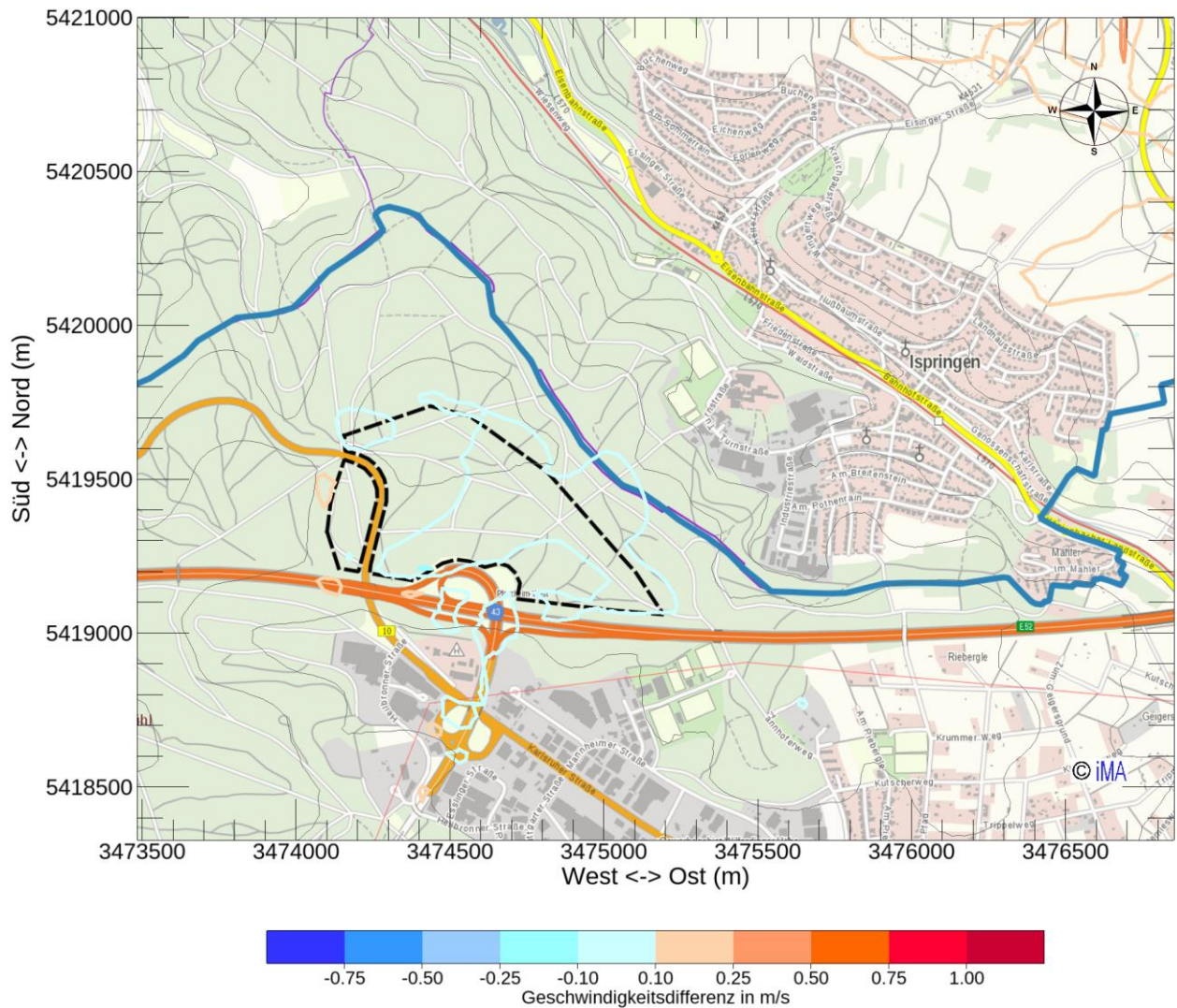


Abb. 7-4: Differenz Planfall 2 minus Ist-Zustand. Bodennahe Windgeschwindigkeit zu Beginn der Nacht während einer typischen autochthonen Wetterlage (Datengrundlage Hintergrundkarte: LGL, www.lgl-bw.de).

8 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 Belüpfungsfunktion nur in der unmittelbar angrenzenden Wohnbebauung ausüben.

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

Für den Bereich „Klapfenhardt“ konnten Auswirkungen auf bebaute Bereiche auf Basis der bereits existierenden Ergebnisse nicht von vorneherein ausgeschlossen werden. Daher wurde je eine Simulation des Ist-Zustandes und der beiden Planfälle mit dem Modell FITNAH durchgeführt. Das Modell dient dabei als Instrument, die zeitliche Entwicklung und räumlich differenzierte Struktur des Kaltluftstroms in diesem Bereich realistisch zu berechnen.

Die Stärke der Simulation liegt darin, dass im Modell mögliche Planzustände vorweggenommen werden können. Das Ergebnis zeigt, wie sich der Kaltluftstrom bei Hinzutreten neuer Baumassen verändert. Die Wirkung der Planung und die Reichweite dieser Wirkung lassen sich durch Gegenüberstellung der beiden Ergebnisse Ist-Zustand und Planfall quantitativ herausarbeiten.

Da derartige Untersuchungen üblicherweise weit im Vorfeld eines konkreten Architekten-Entwurfs durchgeführt werden und zudem eine obere Abschätzung möglicher Auswirkungen erarbeitet werden soll, wurde für die Planvarianten eine „maximale“ Gebäudeausstattung zugrunde gelegt. Es wurde daher von einer großen Baumasse und einer großzügigen Höhenentwicklung im Plangebiet ausgegangen.

Bei der untersuchten Kaltluft-Situation zeigten sich für das Plangebiet Klapfenhardt und sein Umfeld die folgenden Ergebnisse:

- Die zusätzliche Bebauung sorgt im Plangebiet für Temperatur-Erhöhungen und für eine Minderung der Strömungsgeschwindigkeit (Bremswirkung) im Vergleich zum heutigen Ist-Zustand.
- Lokale Kaltluftströmungen tragen bei autochthonen Wetterlagen zur Belüftung der Ortsränder von Ispringen bei. Kaltluftströmungen werden sowohl von den bewaldeten Südhängen des Tals als auch aus dem Bereich der Hochflächen und Hänge nördlich und östlich Ispringens berechnet.
- Bei Realisierung des **Planfalls 1** verringert sich die Kaltluftbildungsfläche auf der Hochfläche südlich Ispringens. Da ein wesentlicher Teil der Kaltluft jedoch an den Hängen selbst gebildet wird, bleibt die Kaltluftströmung von den Südhängen her bestehen, nur die Intensität nimmt leicht ab.
- Als unmittelbare Folge der geringen Abschwächung des Kaltluftstromes aus Süden wird eine leichte Zunahme der Temperatur während einer nächtlichen autochthonen Wetterlage

am südwestlichen Ortsrand von Ispringen berechnet, wo sich Gewerbeflächen, Schulen und Sportstätten befinden. Der Betrag der Temperaturänderung beträgt dort maximal 0,5 K und bleibt damit sehr gering. In der Wohnbebauung von Ispringen sind keine Änderungen zu erwarten.

- Durch die schnelle Abnahme der Effekte durch Umsetzung der Planung ist auch in weiter talabwärts gelegenen Bereichen wie in der Gemeinde Ersingen mit keinen Auswirkungen zu rechnen.
- Im **Planfall 2**, in dem eine geringere Ausdehnung der Bebauung innerhalb des Planfläche zugrunde gelegt wurde, bleibt ein Teil der Kaltluft-Bildungsfläche auf der Anhöhe erhalten. Dementsprechend haben die Auswirkungen auf die Strömung und Temperatur gegenüber Planfall 1 eine geringere Reichweite und sind bereits am Siedlungsrand nur noch sehr gering.

Es ist insbesondere bei den Auswirkungen auf die Temperaturen zu beachten, dass es sich hier nicht um die gern verwendete global-klimatologische Größe „Änderungen der Jahresmitteltemperatur“ handelt, sondern um in einer Kaltluftnacht real messbare Temperaturen. Der Kaltluftstrom, der im gegenwärtigen Ist-Zustand in einer Nacht zu einem bestimmten Zeitpunkt eine Temperatur von z.B. 17°C hat, würde nach Umsetzung des Planfalles dann bei einer Änderung von +0,5 K mit 17,5°C heranwehen.

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.

9 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 Siedlungsråder 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. Dies gilt im Bereich „Klapfenhardt“ vor allem für den Bereich nördlich der Kammlinie.
- 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.
- /2/ Groß, G. (1991): Anwendungsmöglichkeiten mesoskaliger Simulationsmodelle, dargestellt am Beispiel Darmstadt. Teil I: Wind- und Temperaturfelder. Meteorol. Rdsch. 43, 97-112.
- /3/ Groß, G. (1993): Numerical Simulations of Canopy Flow. Springer Verlag, Heidelberg, Springer Series in Physical Environment 12, 167 pp.
- /4/ Nielinger, J. (1994): Instationäre Ausbreitung von Luftbeimengungen in komplexem Gelände - Numerische Simulationen. Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Klimatologie, Universität Hannover, 139 S.
- /5/ 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.
- /6/ Nielinger, J.; Kost, W.-J. (2001): Simulation of realistic location-related wind distributions with the mesoscale model FITNAH. Meteorol. Zeitschr. 10, No. 4, 235-238.
- /7/ Nielinger, J.; Kost, W.-J.; Nobel, W.; Müller, K. und Winkelbaur, W. (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.
- /8/ Klimaatlas Baden-Württemberg, <http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servelet/is/16703/?shop=true&shopView=6646>

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.

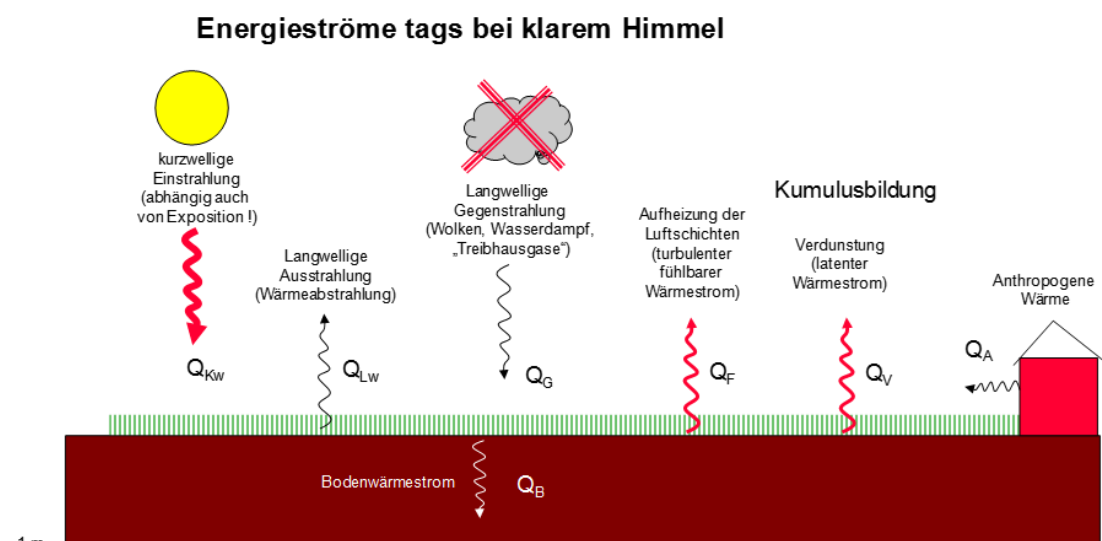


Abb. A-1: Schema zur Erwärmung einer Landoberfläche aufgrund unterschiedlicher Strahlungsströme. Bewölkung behindert mit ihrer Gegenstrahlung die Ausstrahlung der Erdoberfläche und vermindert somit die Abkühlung.

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 *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“) 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 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“).

Idealisierter Kaltluftabfluss an einem Hang mit nachfolgender Ebene

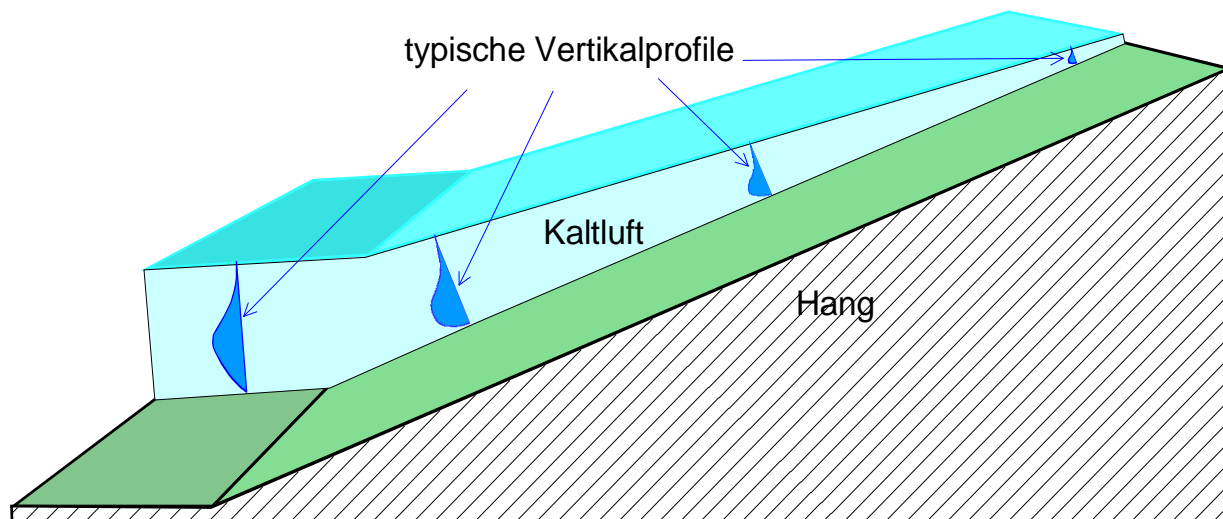


Abb. A-3: Idealisiertes Schema eines Kaltluftabflusses an einem Hang mit nachfolgender Ebene.

Mehrere solcher hanggebundenen 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.

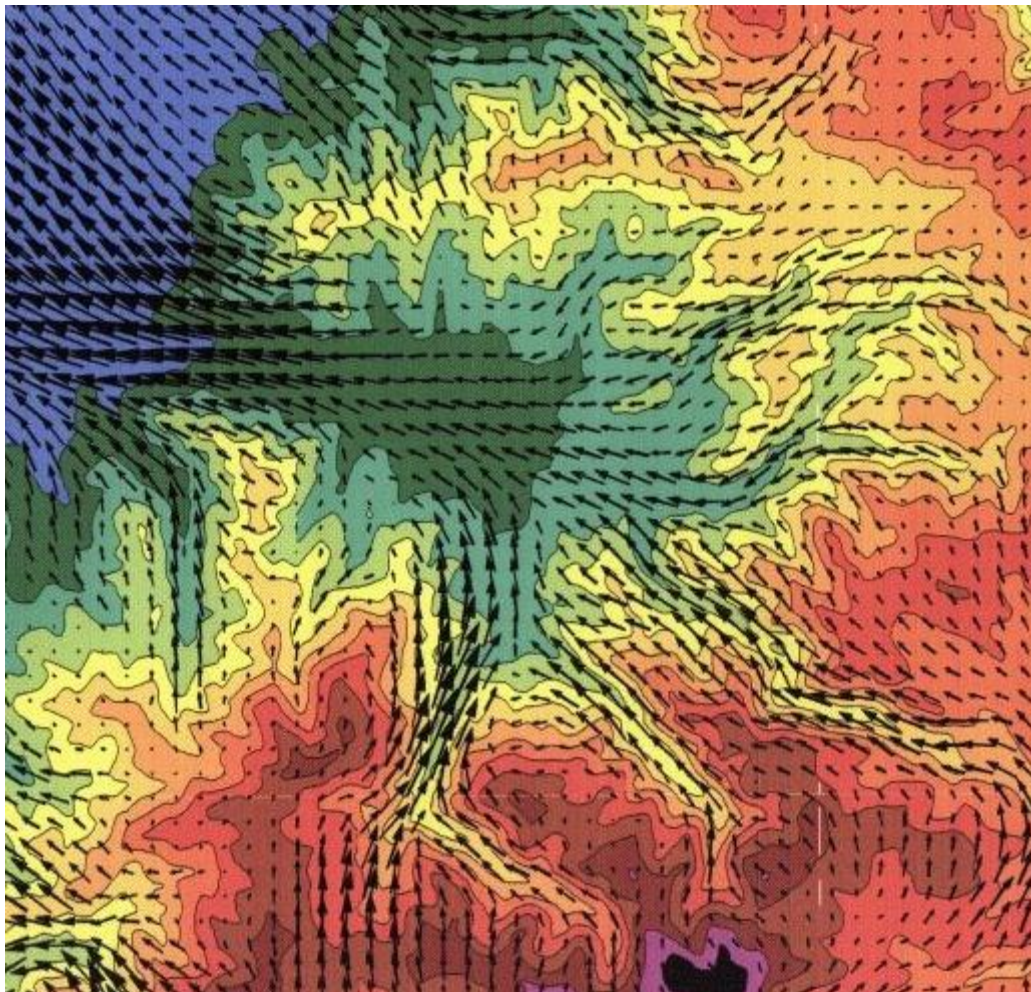


Abb.A-4: Kaltluftströmungssysteme in flachen Talsohlen und in der Ebene am Beispiel Freiburg: Schwarzwaldhöhen (unterer und rechter Bildbereich), Tal bei Ebnet und Stadtgebiet von Freiburg (Mitte) und Rheintal (links oben).

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 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 (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.

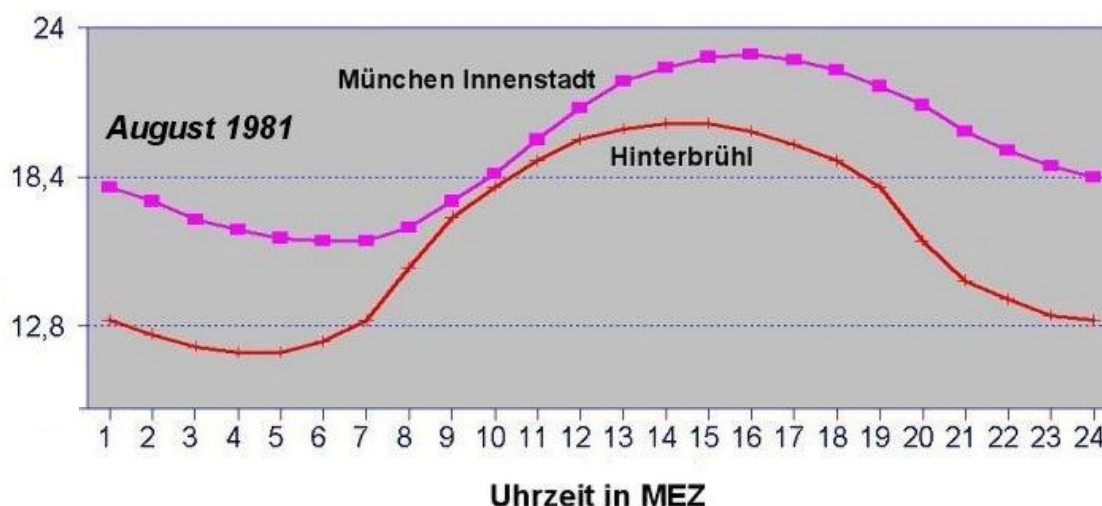


Abb. A-5: Unterschiede im Temperaturverlauf zwischen Innenstadt und Umland am Beispiel von München.

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 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) Temperaturdifferenz, 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 Rauigkeitselemente (Bebauung, Bewuchs) statt (Abbildung A-7).

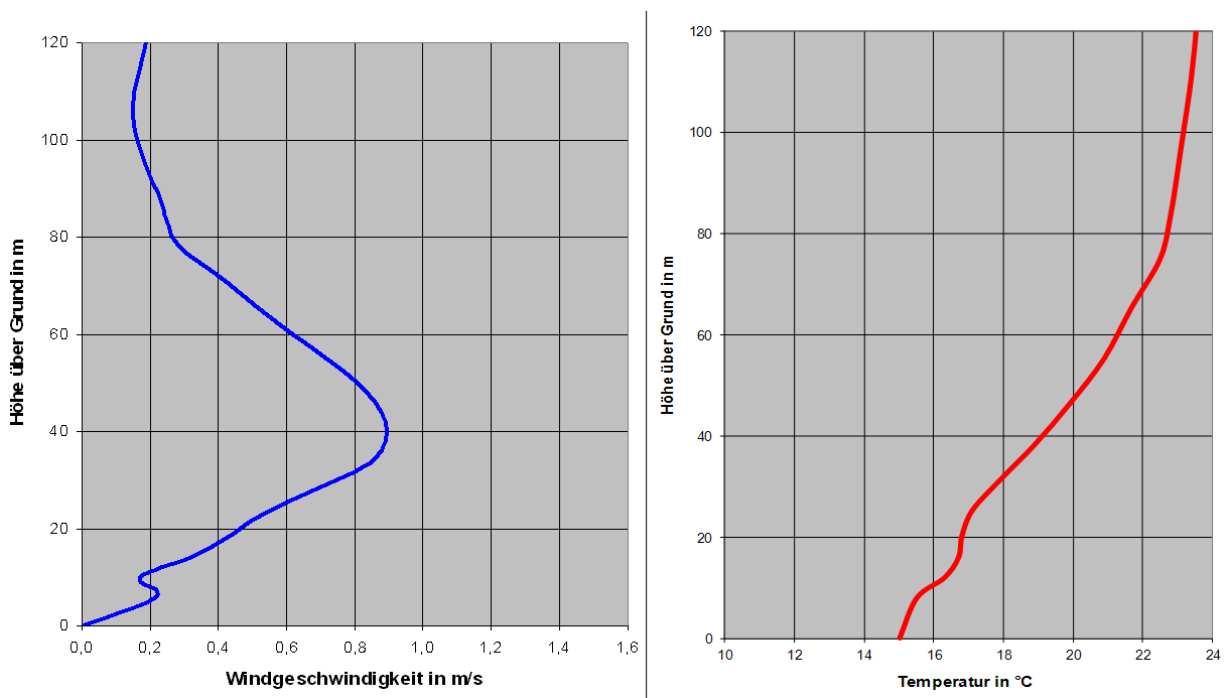


Abb. A-7: Vertikal-Profile in einer Kaltluftströmung. Links: Windgeschwindigkeit, rechts: Temperatur. Die Kaltluftströmung reicht bis etwa 100 m über Grund, das Maximum liegt in 40 m Höhe

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.

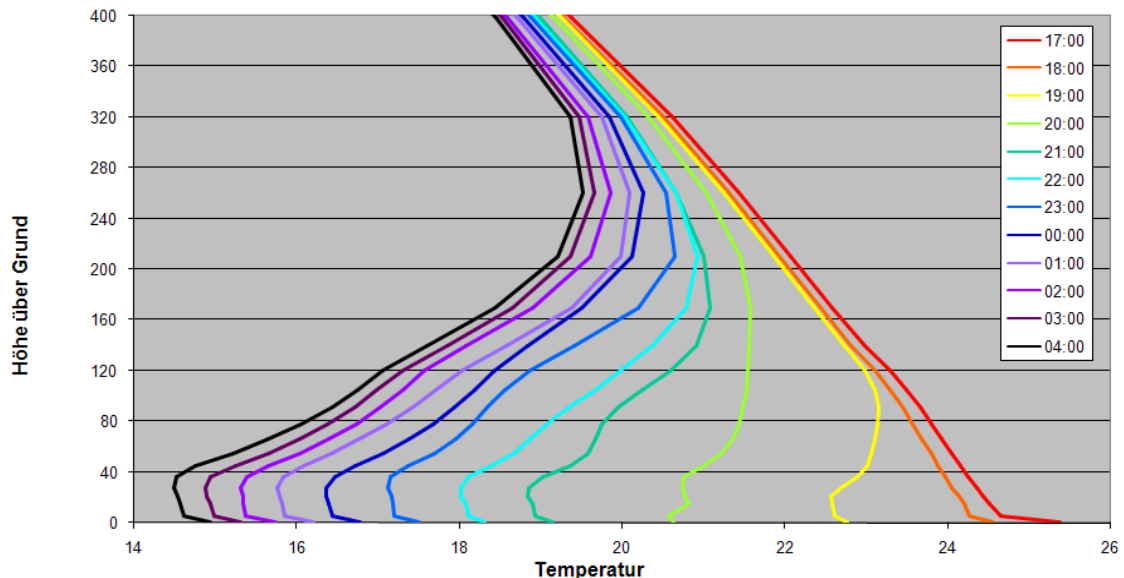


Abb. A-8: Zeitlicher Verlauf einer Bodeninversion über einem Industriestandort in einem Flusstal. Zu beachten ist: Im Bereich der Industriebebauung ist die Bodentemperatur erhöht, eine Temperaturabnahme setzt erst oberhalb der mittleren Bebauungshöhe (hier ca. 30-40 m) ein. Hier zeigt sich über dem Industriegebiet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