

DWD

AMTLICHES GUTACHTEN

Beurteilung des nächtlichen Kaltluftverhaltens mit dem
Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des DWD

im Raum Germering

Deutscher Wetterdienst



München
Juli 2021

DEUTSCHER WETTERDIENST

Abteilung Klima- und Umweltberatung



AMTLICHES GUTACHTEN

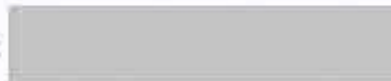
**Beurteilung des nächtlichen Kaltluftverhaltens mit dem
Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des DWD**

im Raum Germering

Auftraggeber:

Stadt Germering
Rathausplatz 1
82110 Germering

wissenschaftliche Bearbeitung:



München, den 22.07.2021



Gutachterin

Dieses Gutachten ist urheberrechtlich geschützt, außerhalb der mit dem Auftraggeber vertraglich vereinbarten Nutzungsrechte ist eine Vervielfältigung oder Weitergabe dieses Gutachtens an Dritte sowie die Mitteilung seines Inhaltes, auch auszugsweise, nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des Deutschen Wetterdienstes gestattet.

Inhalt	Seite	
1	Vorbemerkung	3
2	Einleitung und Aufgabenstellung	3
3	Untersuchungsgebiet	4
3.1	Lage- und Ortsbeschreibung	4
3.2	Flächennutzung (IST-Zustand)	6
3.3	Geplante und mögliche Veränderungen (SOLL)	7
3.3.1	Kreuzlinger Feld	8
3.3.2	Briefverteilzentrum Germeringer Norden	10
3.3.3	Südlich Hochrainweg	11
3.3.4	Grünfläche Hausäcker	12
3.3.5	Vorplanung Max-Reger-Straße	14
3.3.6	Nördlich der S-Bahn - ehemals Grollmus-Möbelhaus	15
4	Klimatische Bedingungen	16
4.1	Allgemeines	16
4.2	Windverhältnisse	17
5	Nächtliches Kaltluftverhalten	19
5.1	Autochthones Klima	19
5.2	Häufigkeit windschwacher Strahlungs Nächte	20
5.3	Kaltluftentstehung, Kaltluftflüsse und Kaltluftstau	21
5.4	Thermisch induzierte Windsysteme	22
6	Quantitative Modellrechnungen - Kaltluftabflussmodell KLAM_21	23
6.1	Beschreibung Kaltluftabflussmodell KLAM_21	23
6.2	Auswahl Simulationsgebiet, Eingabedaten und Aufbereitung	25
6.3	Diskussion der Modellresultate	27
6.3.1	Allgemeines zur Darstellung	27
6.3.2	Regionale Bedingungen (IST-Zustand)	28
6.3.3	Verhältnisse im Raum Germering (IST-Zustand)	29
6.3.4	Betrachtung der Teilflächen (Vergleich Modell-SOLL - Modell-IST)	36
7	Zusammenfassung	42
8	Literatur	46
9	Abbildungsverzeichnis	47
10	Tabellenverzeichnis	49



1 Vorbemerkung

Das vorliegende amtliche Gutachten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurde in dessen Abteilung Klima- und Umweltberatung angefertigt. Für die Gutachtenerstellung und als Ansprechpartner für den Auftraggeber war dabei das Regionale Klimabüro (RKB) München zuständig, das mit dem Schreiben vom 31.07.2020 durch die Stadt Germering beauftragt wurde.

2 Einleitung und Aufgabenstellung

Bei der Planung der baulichen Entwicklung der Großen Kreisstadt Germering sollen die Belange des Klimas berücksichtigt werden. Da Wetter und Klima auf lokaler Ebene im großen Maße durch die Eigenschaften der Erdoberfläche geprägt werden, spielen Flächennutzungsänderungen sowie Siedlungsentwicklung und Bautätigkeit eine große Rolle.

Für die Neuaufstellung des Flächennutzungsplanes und für eine mögliche oder geplante Bebauung von Teilflächen wurde dazu bereits im Jahr 1998 ein Klimagutachten durch den Deutschen Wetterdienst erstellt. Dabei wurden die lokalklimatischen Verhältnisse betrachtet. Auf der Grundlage von temporären Windmessungen an drei Messstandorten im Zeitraum vom März 1997 bis Mai 1998 wurden insbesondere die bodennahen Windverhältnisse im Raum Germering näher untersucht (DWD, 1997 und 1998). Sie besitzen Einfluss auf die Durchlüftung der Stadt sowie die Zufuhr von Kaltluft und Frischluft aus dem Umland und können zu einer Minderung der bioklimatischen und lufthygienischen Belastungen in den Siedlungsbereichen führen.

Aktuell wurde der Deutsche Wetterdienst mit der Untersuchung der lokalklimatischen Bedingungen bzw. Windverhältnisse mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des DWD sowie mit der Durchführung und Auswertung von erneuten Windmessungen über den Zeitraum eines Jahres beauftragt.

Die vorliegende Untersuchung bezieht sich auf die Modellrechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes (SIEVERS, 2005), die flächenhafte Aussagen liefern. Dabei werden die wichtigen nächtlichen Kaltluftströmungen in Abhängigkeit von der Verteilung von Landnutzung und Geländehöhe für eine idealisierte Strahlungsnacht berechnet und ausgewertet. Mit der Simulation lässt sich auch der Ist-Zustand mit einer angenommenen oder geplanten Veränderung (Modell-Sollzustand) vergleichen.

Zur Aktualisierung des DWD-Windgutachtens von 1998 werden vom Frühjahr 2021 bis Frühjahr 2022 einjährige Windmessungen durchgeführt und nach Abschluss der Messreihe 2022 gesondert ausgewertet.

Zur Beschreibung der allgemeinen klimatischen Verhältnisse, insbesondere des Windes, wurden Klimadaten aus dem Mess- und Beobachtungsnetz des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Die Einschätzung der lokalen Situation basiert zusätzlich neben den Modellrechnungen und den vom Auftraggeber bereit gestellten Unterlagen auch auf topografischen Informationen und Karten des Bayerischen Landesamtes für Digitalisierung, Breitband und Vermessung. Außerdem fanden am 19.01.2021 und 23.02.2021 Ortsbesichtigungen durch die Gutachterin statt.

3 Untersuchungsgebiet

3.1 Lage- und Ortsbeschreibung

Die Stadt Germering liegt im Westen des Ballungszentrums München. Der Münchner Süden und Südwesten wird von großflächigen Waldflächen dominiert, die durch Siedlungsachsen radial unterbrochen werden. Die Große Kreisstadt Germering befindet sich nördlich des Kreuzlinger Forstes in etwa zwischen der Bundesautobahn A 96 im Süden und der Bundesstraße B 2 im Norden der Stadt. An die großflächigen Waldgebiete im Süden schließen sich nach Norden hin landwirtschaftliche Nutzflächen an, die das Stadtgebiet umgeben. Weiter im Norden und Nordosten folgen die Ausläufer des Dachauer Moos mit Wiesen und Mooregebieten sowie der Auwald der Aubinger Lohe.

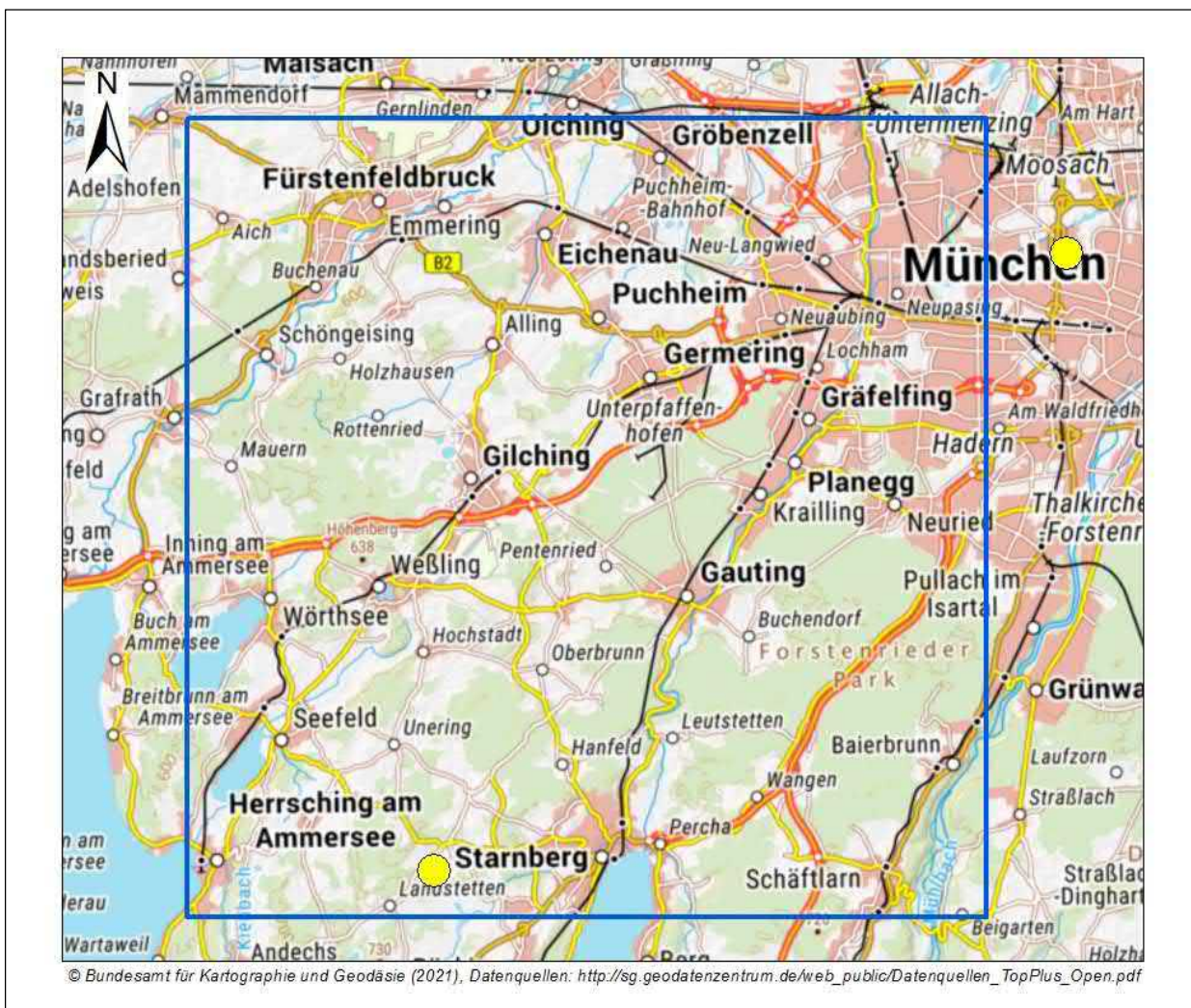


Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebietes, der Stadt Germering, des Rechengebietes (blauer Rahmen) und der Windmessstationen des DWD-Messnetzes (gelbe Punkte)

Im Osten der Stadt verlaufen das inzwischen geschlossene Teilstück des westlichen Autobahn-rings der Stadt München, der A 99, und die neuen Baugebiete bei Freiham und Neuaubing. Süd-westlich, westlich und nordwestlich von Germering erstreckt sich der Höhenzug von Steinberg und Parsberg bis zum Lindbühel. In der Senke davor fließt der Holzbach nach Nordosten. Der Germeringer See entstand als Baggersee.

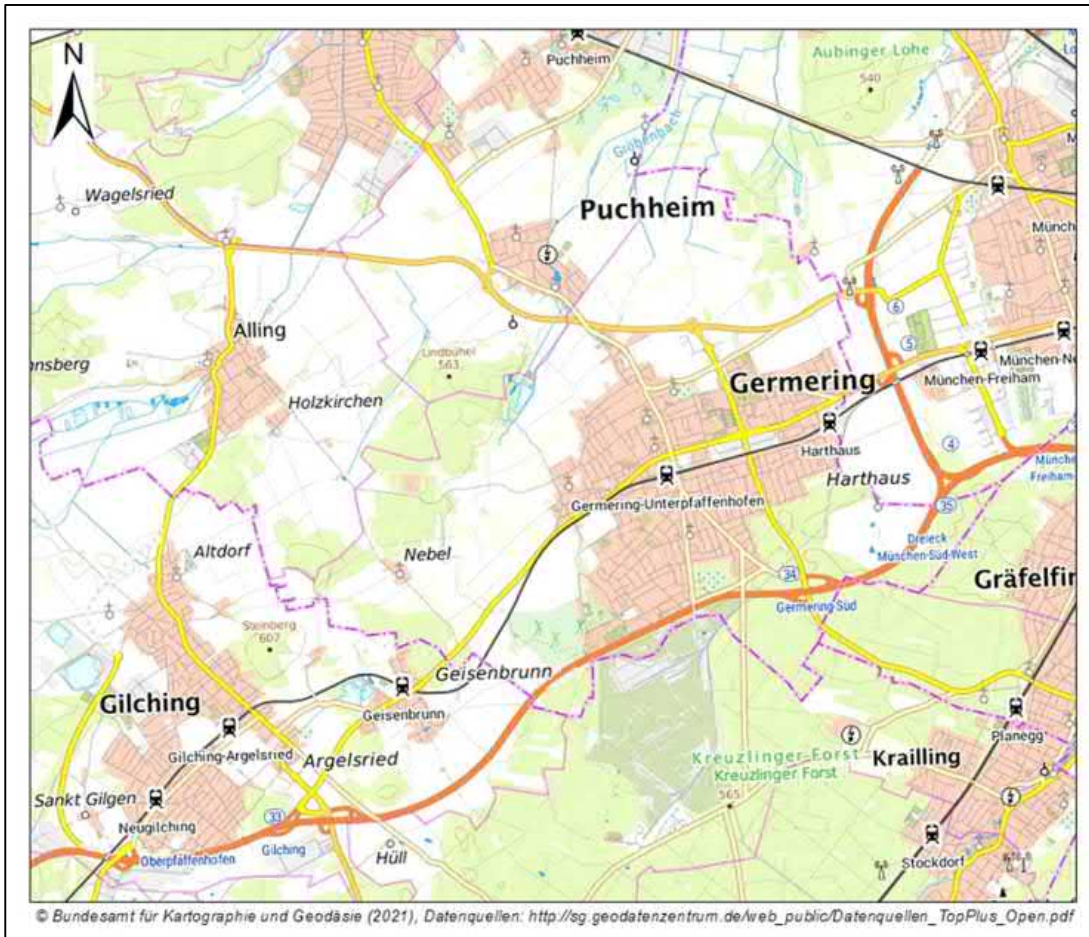


Abbildung 2: Lage der Stadt Germering

Das Untersuchungsgebiet wurde von den Eiszeiten geprägt. Von der naturräumlichen Gliederung befindet es sich im Bereich der nach Norden abfallenden, schiefen „Münchner Ebene“ (051). Es gehört damit zu den „Isar-Inn-Schotterplatten“, die sich von den Jungmoränen des „Voralpinen Hügel- und Moorlandes“ im Süden bis zum „Unterbayerischen Hügelland“ im Norden erstrecken (MICHLER, 1994; MEYNEN et. al., 1962).

Kleinräumig betrachtet zählt das Gebiet zum großen Teil zur „Amper-Würm-Schotterflur“ (051.11) mit dem Germeringer Schotterfeld im Süden und dem Menzinger Schotterfeld im Norden. Hier haben sich die Niederterrassenschotter der letzten Eiszeit abgelagert. Die Dicke der Schotter-schicht nimmt von Süden nach Norden hin ab (MICHLER, 1994). Daher überwiegen im Süden eher Waldflächen, im Norden landwirtschaftlich genutzte Bereiche. Etwas nördlich der Bundes-straße B 2 folgen Flächen, die bereits zum Dachauer Moos (051.02) gehören (MICHLER, 1994) und als Zunge bis Puchheim-Ort und entlang des Holzbaches bis in das nordwestliche Umland

von Germering reichen. Hier gibt es auch Wiesen, Grünland und Moore. In die Zunge des Dachauer Moores ist die Aubinger Lohe als leichte Erhebung eingelagert. Westlich von Germering schließt sich das „Gilchinger Altmoränenhügelland“ (051.20) an. Zu ihm gehört der südwest-nord-ost-ausgerichtete Höhenrücken zwischen Geisenbrunn, Gilching und Puchheim-Ort, der im Steinberg ca. 610, im Parsberg und Lindbüchel etwa 570 bis 560 m über NHN erreicht.

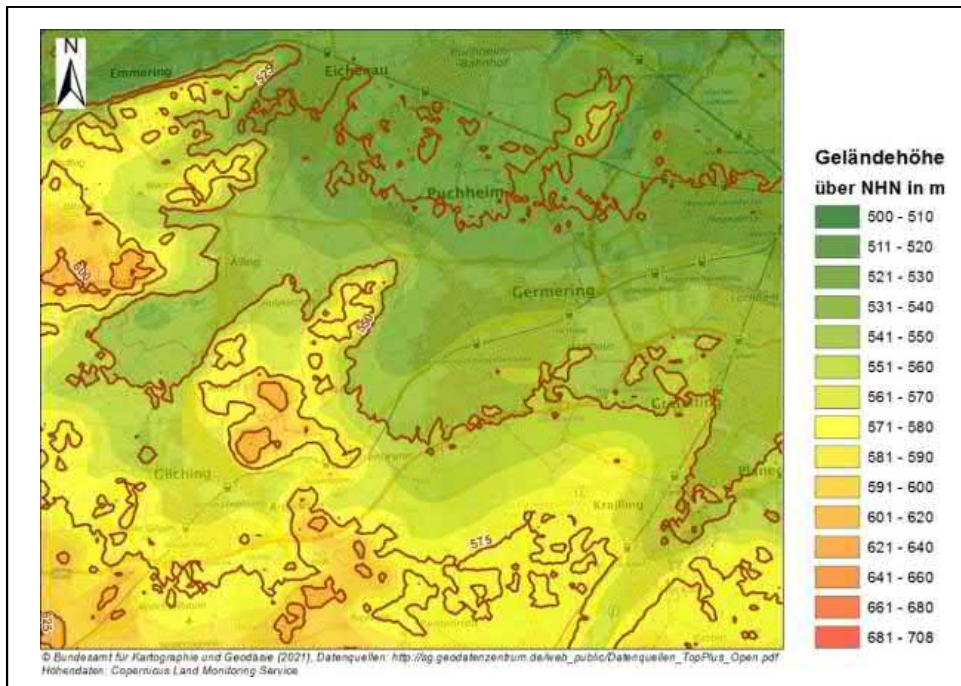


Abbildung 3: Verteilung der Geländehöhen im Untersuchungsgebiet und dessen Umgebung

Das Untersuchungsgebiet ist, wie die Münchner Ebene, insgesamt nach Norden und Nordosten geneigt. In Germering besteht teilweise auch eine leichte Neigung nach Nordwesten zur Senke des Holzbaches hin. Auch südöstlich von Harthaus befindet sich eine Senke. Die Geländehöhe fällt von etwa 555 m über NHN beim Golfplatz nahe der Autobahn auf rund 530 m über NHN an der B2 im Germeringer Norden ab. Nördlich der Bundesstraße setzt sich dieser Trend fort. An der S-Bahnlinie in Puchheim werden ca. 520 m über NHN erreicht.

3.2 Flächennutzung (IST-Zustand)

Die Stadt Germering ist aus verschiedenen Siedlungsschwerpunkten zusammengewachsen, vor allem aus Germering, Unterpfaffenhofen, Harthaus und Neugermering. Zwischen Landsberger Straße und S-Bahntrasse gibt es auch im Ortsinneren gewerblich genutzte Flächen. Teilweise ist mehrstöckige städtische Bebauung vorhanden, unterbrochen von breiten Straßentrassen. Im Süden schließen sich an die Siedlungsbereiche die Waldflächen des Kreuzlinger Forstes an, in die die Autobahn A 96 eingebettet ist. Sonst ist der Ort von landwirtschaftlichen Flächen umgeben. Diese reichen im Westen im Bereich des Kreuzlinger Feldes und von Norden her westlich der Staatsstraße St2544 ein Stück weit in die Bebauung hinein. Auch im Nordwesten ist im Bereich Hausacker noch eine größere Freifläche vorhanden, die im Norden von Einfamilienhäusern, im Süden von mehrgeschossiger Bebauung eingefasst ist.



Abbildung 4: Germering Flächennutzung, Lage der betrachteten Teilflächen (rote Zahlen)

3.3 Geplante und mögliche Veränderungen (SOLL)

Bei der vorliegenden Untersuchung sollen zusätzlich zum Gesamtgebiet der Stadt Germering geplante oder angenommene Veränderungen auf verschiedenen Teilflächen betrachtet werden, die jedoch einen unterschiedlichen Planungsfortschritt aufweisen. Bei den Flächen 1 bis 4 sind diese bisher landwirtschaftlich genutzt, die Flächen 5 und 6 dagegen bebaut. Im Gebiet 3 werden bereits Wohngebäude errichtet, bei der Fläche 2 laufen aktuell archäologische Ausgrabungen im Vorfeld der Baumaßnahme. Für die Fläche 1 existieren zwei Bebauungsplanentwürfe. Dagegen ist das Gebiet 4 im Flächennutzungsplan als Grünfläche ausgewiesen. Es könnte aber eventuell einen Bereich für künftige Planungen darstellen, so dass untersucht wurde, welche Auswirkungen eine Bebauung der Fläche haben könnte. Beim Gebiet 5 soll die bestehende Bebauung verdichtet, bei Fläche 6 die Bebauungsstruktur umgestaltet werden. Bei diesen Planungen ist insbesondere eine Veränderung der Gebäudegeometrie, -anordnung, -größe und der Gebäudehöhe vorgesehen, teils durch Abriss und Neubau. Es wurden die Planungsunterlagen verwendet, die von der Stadt zum Zeitpunkt der Modellrechnungen zur Verfügung gestellt und den Berechnungen zugrunde gelegt wurden.

3.3.1 Kreuzlinger Feld

Der Bereich östlich der Freiwilligen Feuerwehr Unterpfaffenhofen wurde bereits im Gutachten des DWD von 1998 betrachtet (DWD, 1998). Er stellt eine große zusammenhängende, landwirtschaftlich genutzte Freifläche dar, die ein Stück weit in die Bebauung hineinreicht. In Verbindung mit den angrenzenden Feldern im Westen, den Freiflächen südlich der S-Bahn im Südwesten sowie dem Geländegefälle ergibt sich eine aus Südwesten in die Besiedlung hineinreichende Zunge.



Abbildung 5: Blick nach Nordosten, Osten und Südosten auf das Kreuzlinger Feld (Panoramaaufnahme, Foto DWD, 2021)

Im Westen wird das Kreuzlinger Feld durch einen Streifen, bestehend aus Feuerwehr, Bauhofgelände und einem ehemaligen Gartenbaubetrieb, begrenzt, der als schmales Hindernis wirkt. Im Norden verläuft die S-Bahntrasse, im Osten schließen sich vorwiegend Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäuser an und im Süden ein Bereich mit größeren Gebäuden und Freiflächen von Kindergarten, Vereinszentrum, Schulen und Seniorenheim. Es folgen eine landwirtschaftliche Freifläche, Kleingartenanlagen sowie im Südwesten die Ausläufer des Westparks und der Golfplatz, bevor sich größere Felder anschließen.

Die Stadt plant auf der Freifläche u. a. das Wohngebiet „Kreuzlinger Feld“ (1. BA, Wohnen) und das Sondergebiet bzw. Gebiet für Gemeinbedarf (2. BA - Sondergebiet Einzelhandel mit Wohnen und Gemeinbedarf Schule und KiTa). Dazu wurden die Bebauungsplanentwürfe am 19.01.2021 vom Stadtrat zur öffentlichen Auslegung beschlossen. Die Auslegung erfolgte vom 20.05.2021 bis 16.07.2021. Abbildung 6 enthält die dazu von der Stadt zur Verfügung gestellten Unterlagen. Zwischen beiden Baugebieten bleibt derzeit noch eine schmale Fläche unbebaut. Bei der künftigen Entwicklung soll diese ebenfalls für Wohnen genutzt werden. Auch für die Bereiche westlich des Starnberger Weges ist nach dem Rahmenplan der Stadt vom 25.09.2018 künftig Wohnbebauung geplant (Abbildung 7).



Abbildung 6: Bebauungsplanentwurf, Planzeichnung "Kreuzlinger Feld - 1. BA, Wohnen" (links) und "Kreuzlinger Feld 2. BA - Sondergebiet Einzelhandel mit Wohnen und Gemeinbedarf Schule und KiTa" (rechts), Fassung vom 19.01.2021 (Quelle: Stadt Germering)



Abbildung 7: Rahmenplan. Rahmenplanung „Kreuzlinger Feld“ der Stadt Germering vom 25.09.2018 (Quelle: Stadt Germering)

3.3.2 Briefverteilzentrum Germeringer Norden

Nördlich der Augsburgger Straße und westlich der DHL-Halle soll auf der bisher landwirtschaftlich genutzten Fläche ein Briefverteilzentrum gebaut werden. Bei dem Bauvorhaben handelt es sich um großflächige Gebäude bzw. Logistikhallen. Dabei ist für die großen Dachflächen eine extensive Dachbegrünung (dunkelgrüne Farbe), für Teilflächen eine intensive Dachbegrünung (hellgrüne Farbe) vorgesehen kombiniert mit Photovoltaikanlagen (s. Abbildung 9). Die Gebäude erhalten sehr langgezogene geschlossene Fassaden, die zum Teil begrünt werden. Die archäologischen Grabungen im Vorfeld dieses Vorhabens haben bereits begonnen.

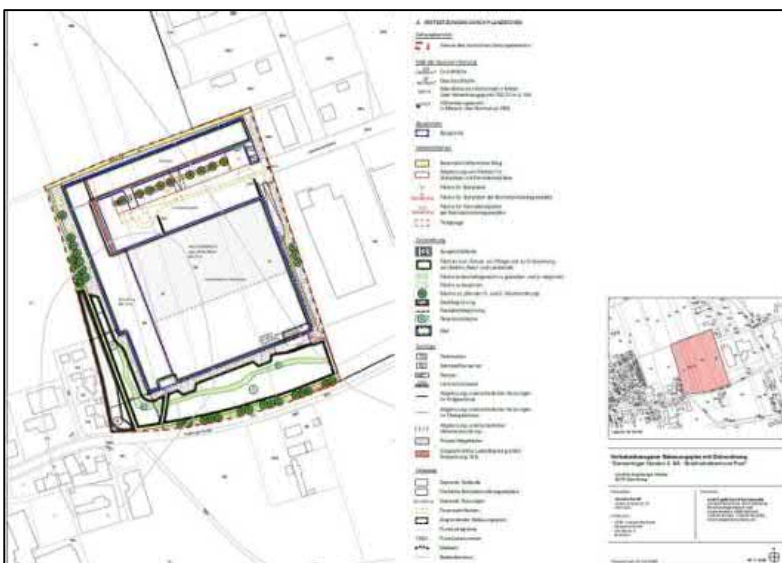


Abbildung 8: Vorhabenbezogener Bebauungsplan mit Grünordnung „Germeringer Norden 2. BA Briefverteilzentrum – Post“ Stand 07.07.2020 (Quelle: Stadt Germering)



Abbildung 9: Vorhaben- und Erschließungsplan. Freiflächenplanung. „Germeringer Norden 2. BA Briefverteilzentrum – Post“, Stand 07.07.2020 (Quelle: Stadt Germering)

Der vorhabenbezogene Bebauungsplan mit Grünordnung „Germeringer Norden, 2. BA–Briefverteilzentrum Post“ der Stadt Germering – Bereich nördlich der Augsburgener Straße, westlich der Lise-Meitner-Straße vom 27.10.2020 ist zum 15.12.2020 rechtswirksam geworden.



Abbildung 10: Blick von Nordwesten auf den Ortsrand mit DHL-Halle (gelbes Gebäude), Plangebiet Briefverteilzentrum westlich (rechts) daneben (Foto, DWD 2021)

3.3.3 Südlich Hochrainweg

Für das Gebiet südlich des Hochrainweges wurde der Bebauungsplan mit Grünordnung „IG28C“ (Südlich Hochrainweg) in der Fassung vom 15.10.2019 zum 12.11.2019 rechtswirksam. Er umfasst neben der Vergrößerung der Feuerwehr Germering sowohl Wohnbau- als auch Gewerbeflächen. Die Errichtung der Wohnbebauung ist bereits vorangeschritten.



Abbildung 11: In Bau befindliche Wohngebäude „Südlich Hochrainweg“ (Foto DWD, 2021)



Abbildung 12: Bebauungsplan mit Grünordnung „IG28C“ (Südlich Hochrainweg) in der Fassung vom 15.10.2019, Planzeichnung (Quelle: Stadt Germering)

3.3.4 Grünfläche Hausäcker

Im Norden von Germering südlich der Dorfstraße ist zwischen Heimgartenstraße und Kirchenstraße bzw. zwischen Oberer Bahnhofstraße und Quirin-Wörl-Straße noch eine ca. 5,6 ha große Freifläche vorhanden. Sie ist im bestehenden Flächennutzungsplan als Grünfläche ausgewiesen und wird derzeit landwirtschaftlich genutzt. Sie ist nach allen Seiten von Bebauung umgeben. Dabei soll hier untersucht werden, wie sich eine angenommene Bebauung auswirken würde, ohne dass derzeit seitens der Stadt konkrete Planungsabsichten bestehen.



Abbildung 13: Auszug Flächennutzungsplan, Stadt Germering, Grünfläche Hausäcker (Quelle: Stadt Germering)



Abbildung 14: Ansicht Hausäcker, Blick nach Osten (Foto DWD, 2021)

3.3.5 Vorplanung Max-Reger-Straße

Nördlich der Landsberger Straße im Anschluss an den Bereich von Hallenbad und Sportplätzen ist eine Fläche zwischen Max-Reger-Straße und Richard-Wagner-Straße bisher an zwei Außenseiten mit Wohnblocks bebaut. Richtung Sportplatz befinden sich Garagen. Dazwischen liegt eine etwa quadratische Grünfläche, die zur Landsberger Straße hin unbebaut, aber durch Bäume abgegrenzt ist. Der Vorentwurf sieht ein L-förmiges Wohngebäude an der noch offenen Seite sowie als Ersatz für die Garagen vor.



Abbildung 15: Auszug Vorentwurf zum B-Plan „Max-Reger-Straße“ Stand 25.09.2018 (Quelle: Stadt Germering)



Abbildung 16: Grünfläche zwischen Max-Reger-Straße und Landsberger Straße, Blick nach Nordosten (Foto DWD, 2021)

3.3.6 Nördlich der S-Bahn - ehemals Grollmus-Möbelhaus

Das Gebäude des ehemaligen Möbelhauses Grollmus soll abgerissen und auch der nach Süden und Osten angrenzende Bereich neu überplant werden. Dazu wird für den nördlichen Teil der Bebauungsplan-Vorentwurf IG 32 in der Fassung vom 16.03.2021 zur Beteiligung der Öffentlichkeit vom 29.06.-29.07.2021 ausgelegt. In dem bereits bebauten Gebiet ändern sich damit die Gebäudeanordnung, -größe und -geometrie, aber auch die Gebäudehöhe.

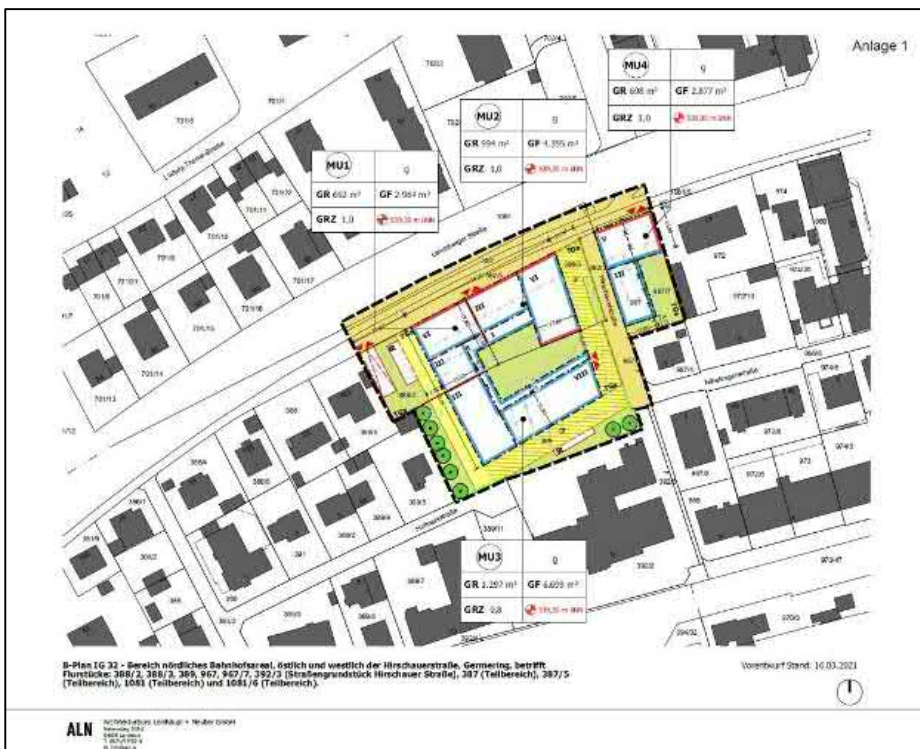


Abbildung 17: B-Plan IG 32 für das nördliche Bahnhofsareal, östlich und westlich der Hirschauer Straße, Stand 16.03.2021 (Quelle: Stadt Germering)

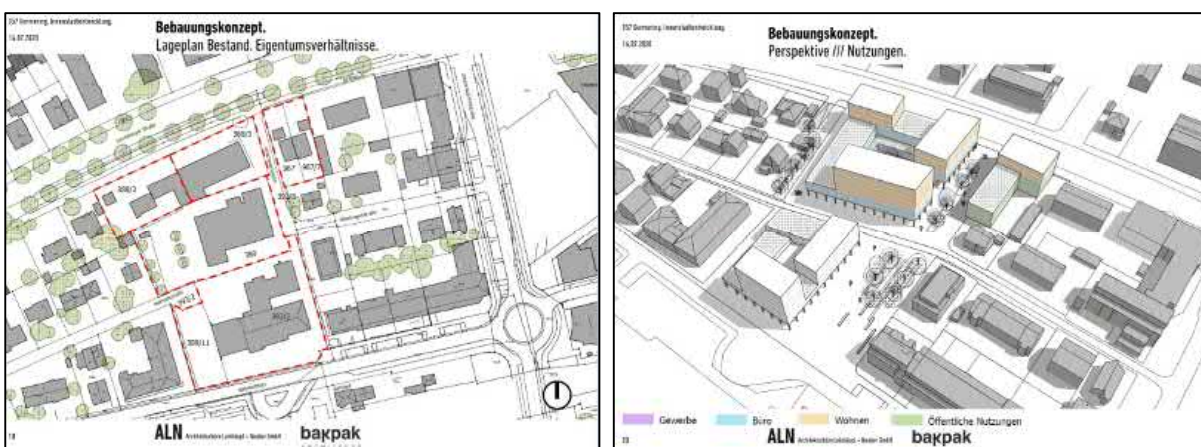


Abbildung 18: Bebauungskonzept „ehemals Grollmus“, Bestand und Perspektive, Stand 14.07.2020 (Quelle: Stadt Germering)



4 Klimatische Bedingungen

4.1 Allgemeines

Unter dem Klima eines Ortes, einer Landschaft oder eines Landes wird die Gesamtheit aller meteorologischen Zustände und Vorgänge während eines längeren Zeitraumes verstanden. Dieser muss ausreichend bemessen sein, um die charakteristischen Gesamteigenschaften des Klimas widerzuspiegeln. Das heißt, unter Klima wird der "mittlere Zustand und gewöhnliche Verlauf der Witterung an einem gegebenen Ort" verstanden (KÖPPEN, 1923).

Das Klima wird durch die einzelnen Klimaelemente Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Niederschlag, Sonnenscheindauer, Bewölkung, Nebel u. a. m. geprägt. Zwischen diesen Klimaelementen, die nicht nur voneinander, sondern auch von den natürlichen Faktoren (geografische Breite, Entfernung zu Wasserflächen, Bodenart und Bewuchs, Oberflächengestalt u. a. m.) und den anthropogenen Faktoren (Dichte der Bebauung, Abholzungen und Aufforstungen, Anlage künstlicher Wasserflächen usw.) abhängen, bestehen komplexe Zusammenhänge.

Bei der Beschreibung des Klimas muss man zwischen verschiedenen atmosphärischen Größenordnungen, sogenannten Skalen (engl. scales) unterscheiden. Neben dem großräumigen Klima (Makroklima) spielt bei der Begutachtung einzelner Standorte vor allem das lokale Klima eine große Rolle. Dabei werden typische Maßstablängen von 100 m bis 10 km betrachtet. Damit lassen sich im vorliegenden Fall die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsgebietes und die Auswirkung der geplanten Nutzungsänderung auf die nähere Umgebung darstellen. Einige physikalische Prozesse, die die Wechselwirkung zwischen der Erdoberfläche und der bodennahen Luftschicht betreffen, sind auch noch kleinräumiger.

Großräumig betrachtet gehört der Untersuchungsbereich entsprechend seiner Lage zur warmgemäßigten Klimazone in Mitteleuropa. Innerhalb dieser Zone liegt die Region, wie der übrige bayerische Raum, im Übergangsbereich zwischen dem maritim geprägten Klima Westeuropas mit kühlen Sommern, relativ milden Wintern und einer hohen Luftfeuchtigkeit und dem kontinentalen Klima im Osten, das sich durch kalte Winter, warme Sommer und eine geringe Luftfeuchtigkeit auszeichnet. Der jeweilige Witterungscharakter wird durch die Großwetterlage bestimmt (BAYFORKLIM, 1996). Langjährig gesehen überwiegt im Großraum München der kontinentale Klimatyp etwas.

Regional wird das Klima in Süddeutschland noch durch die orographische Gliederung und die unterschiedlichen Höhenlagen geprägt. Danach fällt das Untersuchungsgebiet in den Klimabezirk des „Oberbayerischen Alpenvorlands“ (BAYFORKLIM, 1996). Mit zunehmender Höhenlage des Geländes nehmen die Jahresmitteltemperaturen nach Süden hin ab und die mittleren Jahresniederschläge zu. Eine große Rolle spielt hier die Nähe zu den Alpen, wobei Art und Intensität der Auswirkungen stark von der jeweiligen Entfernung zum unmittelbaren Alpenrand abhängen. Es kommt u. a. zu einem komplexen Zusammenspiel von Luv- und Leeeffekten. Dabei reicht die Bandbreite von Föhn bis zu anhaltendem Dauerregen im Staubebereich des Gebirges.



Das **Lokalklima** (kleinräumiger Maßstab) ist in das großräumige Klima (Makroklima) eingebettet. Die Eigenschaften des Makroklimas geben dabei Auskunft über die Frage, in welchem Umfang, unter besonderer Berücksichtigung der landschaftlichen Gegebenheiten wie Relief, Bebauung und Vegetation, mit der Ausbildung eines eigenständigen (autochthonen) Lokalklimas zu rechnen ist.

Dieses autochthone (eigenbürtige) Klima, bei dem sich örtliche Besonderheiten ausprägen, entwickelt sich vor allem im Zusammenhang mit windschwachen und wolkenarmen Wetterlagen, d. h. vor allem bei Hochdruckeinfluss. Unter diesen Bedingungen spielt das Geländere relief in Verbindung mit der Struktur der verschiedenen Landnutzungen (Wald, Wiese, Bebauung etc.) eine wesentliche Rolle. Kleinere Landschaftsmerkmale, wie Bebauungsdichte, Bodenart und Bedeckungsgrad der Vegetation, können dann ursächlich für die räumliche Strukturierung des lokalen Klimas sein.

Im **Verdichtungsraum München** und dessen Umland spielen für das Lokalklima vor allem die unterschiedlichen Flächennutzungen sowie die Höhenlage über Meeresniveau und das Geländere relief eine Rolle. Auf der geneigten Münchner Schotterebene stehen den dicht bebauten Siedlungszentren größere Freiflächen und Waldgebiete im Umland gegenüber. Dabei besteht hier der Kontrast zwischen den dicht bebauten Stadtgebieten mit ihrem Stadtklima, insbesondere dem Wärmeinseleffekt, und dem Klima des kühleren, besser belüfteten und emissionsärmeren Umlands.

4.2 Windverhältnisse

Entsprechend der großräumigen Windverteilung in Bayern herrschen in der Region, insbesondere bei größeren Windgeschwindigkeiten in Verbindung mit Tiefdruckeinfluss oder der Lage auf einer Tiefdruckvorderseite, südwestliche bis westliche Windrichtungen vor. Ein zweites Richtungsmaximum ergibt sich vor allem am Rande von Hochdruckgebieten bei Nordost bis Ost. Auch die Ausrichtung des Alpenrandes unterstützt diese regionale Windrichtungsverteilung im Alpenvorland.

Zur Beschreibung der regionalen Windverhältnisse mit neueren Daten wurden Werte der Windmessstationen des DWD in München-Stadt und Starnberg-Perchting verwendet. In Abbildung 19 ist jeweils die sogenannte Stärkewindrose dargestellt. Sie zeigt die durchschnittliche Häufigkeitsverteilung für die verschiedenen Windrichtungssektoren in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit auf der Grundlage von Stundenmittelwerten für den Zeitraum 2006 bis 2015.

Die Station in Starnberg-Perchting kann als repräsentativ für das südwestliche Umland von München angesehen werden. Die Station liegt in 675 m über NHN im Starnberger Ortsteil Perchting etwa 17 Kilometer südwestlich von Germering (vgl. Abbildung 1). Die Messhöhe ist in 10 m über Grund. Die Windmessstation ist gekennzeichnet durch die freie Lage auf der Hochfläche zwischen Starnberger See und Ammersee. Die Station München-Stadt befindet sich etwa 13 km nordöstlich von Germering in 515 m über NHN innerhalb der städtischen Bebauung der Stadt München. Aufgrund der größeren Rauigkeit des Untergrundes beträgt die Messhöhe 28,5 m über Grund (bzw. 9 m über der Dachfläche). Die Verhältnisse in Germering sind in etwa zwischen beiden Stationen einzuordnen.

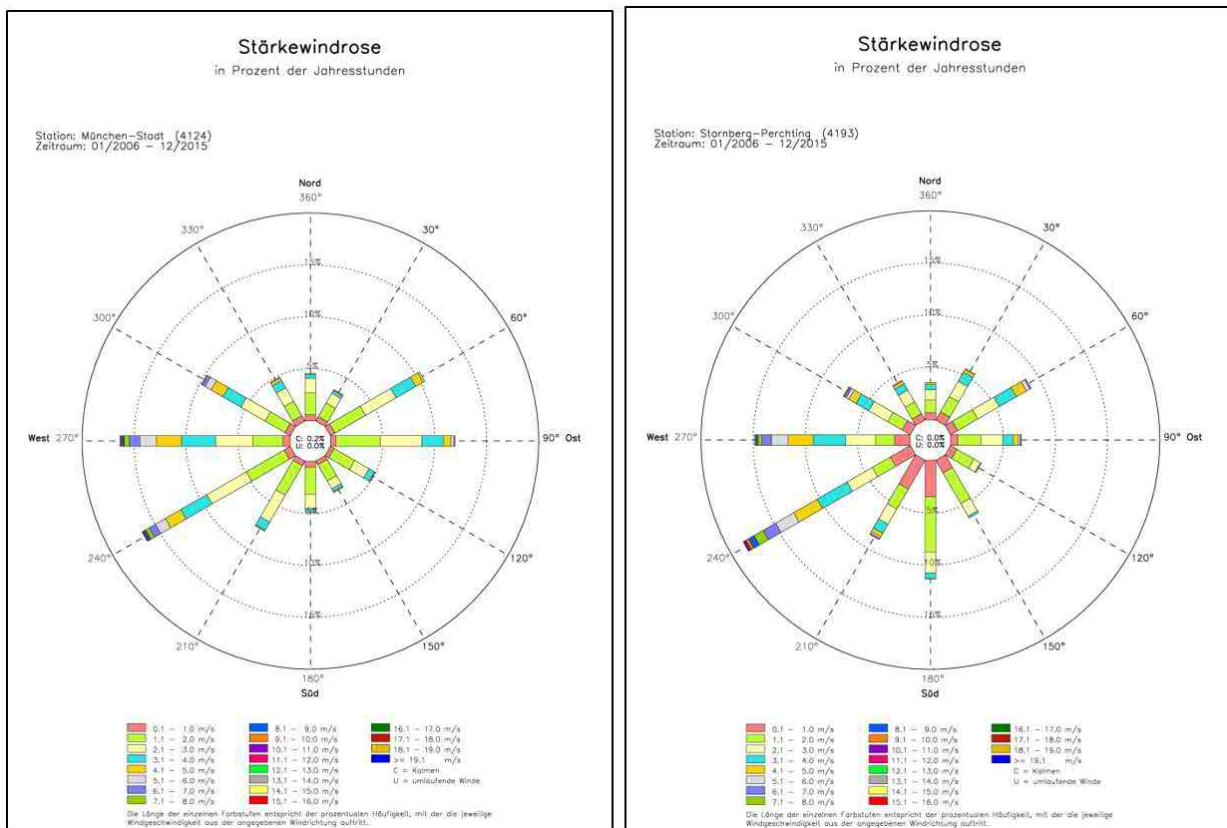


Abbildung 19: Stärkewindrosen in Prozent der Jahresstunden für 2006-2015 für die DWD-Stationen München-Stadt und Starnberg-Perchting

Bei beiden Stationen spiegelt sich die großräumige Windrichtungsverteilung wider mit einem Überwiegen von südwestlichen bis westlichen Winden und einem weiteren Maximum bei nord-östlichen bis östlichen Winden. In Starnberg-Perchting ist zusätzlich auch der Anteil von südlichen Winden höher. Hier macht sich der Föhneinfluss bemerkbar. Dieser nimmt mit zunehmender Entfernung zum Alpenrand und damit auch Richtung Germering noch etwas ab.

Eine große Bedeutung besitzen thermisch induzierte, lokale und regionale Windsysteme, die sich durch die unterschiedliche Aufheizung bzw. Abkühlung der einzelnen Flächen bei wolkenarmen, windschwachen Hochdruckwetterlagen (starke Sonneneinstrahlung am Tage, kräftige Ausstrahlung nachts) als Folge der dadurch hervorgerufenen Temperatur- und Druckunterschiede ausbilden können. Es entstehen Windsysteme in Form von Hangab- und Hangaufwinden, wie von den Hängen des Parsberges herab, Berg- und Talwinden entlang der Taleinschnitte sowie Flurwinden zwischen Bereichen mit unterschiedlicher Flächennutzung. Über den wärmeren Gebieten (wie z. B. der städtischen Bebauung) steigt die Luft auf und wird durch aus dem kühleren Umfeld nachströmende Luft ersetzt.

Zusätzlich zu den Lokalwinden bildet sich im Untersuchungsgebiet bei entsprechenden Wetterlagen eine tageszeitabhängige **Regionalwindzirkulation** zwischen Alpen und Alpenvorland. Sie wird auch als „Alpines Pumpen“ bezeichnet und ist den sonst vorherrschenden Windverhältnissen überlagert. Nachts wehen südliche bis südwestliche Winde aus dem Alpenraum heraus ins Alpenvorland. Tagsüber ist die Luftströmung dagegen aus dem Alpenvorland in Richtung Alpen

gerichtet und weist häufiger nördliche und nordöstliche Komponenten auf. Dabei sind die Windgeschwindigkeiten nachts in der Regel schwächer als am Tage (MÜHLBACHER et al., 2020). Für Starnberg-Perchting (Abbildung 19) erkennt man daher bei den schwachen Winden (rote Einfärbung) eine Häufung der Windrichtungen aus Süd bis Südwest.

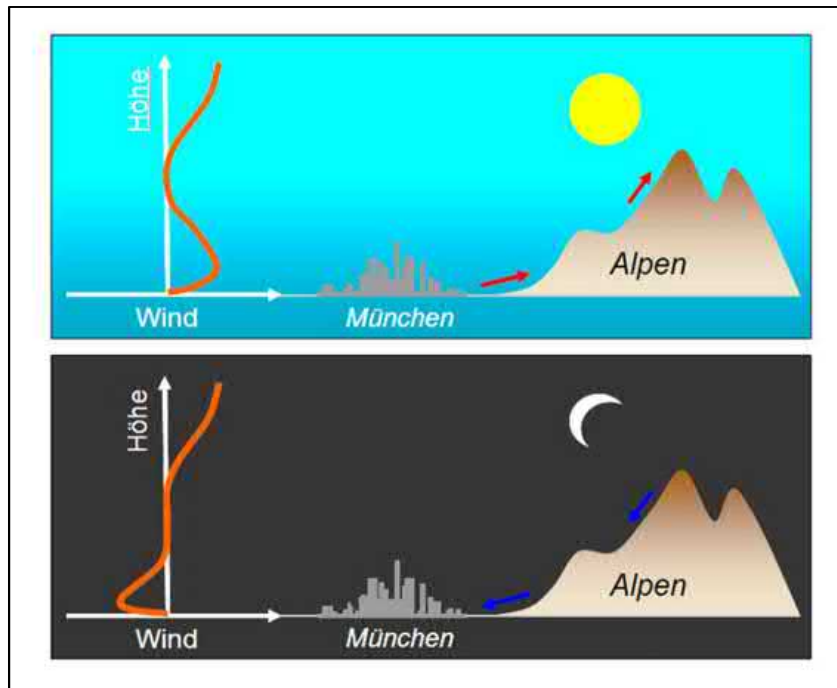


Abbildung 20: Schematische Darstellung der alpinen Regionalwindzirkulation (Quelle DWD)

Betrachtet man die Verhältnisse in den Nächten, dann setzt sich die Kaltluft, die sich in gering bewölkten oder klaren Nächten infolge der langwelligen Ausstrahlung vor allem über Freiflächen bildet, der Geländeneigung folgend hangabwärts bzw. talabwärts in Bewegung. Daher besitzt die Verteilung der Geländehöhen sowohl auf lokaler Ebene (Abbildung 3) als auch auf regionaler Ebene (Abbildung 21) eine entscheidende Bedeutung und begünstigt bei derartigen Wetterlagen ebenfalls südwestliche bis südliche Luftströmungen. Im Folgenden wurden dazu die Einflüsse von Geländere relief und Landnutzung für eine idealisierte Strahlungsnacht mit dem Kaltabflussmodell des DWD (KLAM_21) berechnet und in Kapitel 6 diskutiert.

5 Nächtliches Kaltluftverhalten

5.1 Autochthones Klima

Der großräumige Ablauf der Witterung ist in unseren Breiten durch die Zufuhr verschiedener Luftmassen bestimmt. Deutschland wird häufig von Tiefausläufern überquert, die in die großräumige Zirkulation eingebettet und oftmals mit auffrischenden, meist westlichen Winden verbunden sind. Derartige Wetterlagen kennzeichnen die **allochthone**, d. h. fremdbürtige Witterung, die die Ausbildung von lokalklimatischen Besonderheiten behindert bzw. unterdrückt.

Ein eigenständiges (**autochthones**) Lokalklima, bei dem sich örtliche Besonderheiten ausprägen, entwickelt sich insbesondere im Zusammenhang mit windschwachen und wolkenarmen Strahlungswetterlagen. Eine Betrachtung dieser Vorgänge im Folgenden soll zum Verständnis lokaler Klimabesonderheiten beitragen.

5.2 Häufigkeit windschwacher Strahlungsnächte

Für die Auswirkungen von Bautätigkeit und Flächennutzungsänderungen ist die Häufigkeit von Situationen, bei denen sich ein eigenständiges Lokalklima ausprägen kann wichtig. Die unterschiedlichen Strahlungseigenschaften der Erdoberfläche können nur dann die horizontale Verteilung der Lufttemperatur stärker beeinflussen, wenn die Ausstrahlungsbedingungen gut und die horizontale Durchmischung gering sind. Auf die Nacht bezogen wird daher für eine windschwache Strahlungsnacht eine geringe Windgeschwindigkeit und wenig Bewölkung gefordert.

Tabelle 1: Mittlere Anzahl windschwacher Strahlungsnächte sowie prozentualer Anteil an allen Nächten, München-Flughafen (2010-2019)

München-Flughafen	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Anzahl	2	4	7	7	6	9	10	11	9	6	2	2	75
Anteil in %	6	13	24	23	20	30	32	34	31	18	7	7	21

Die mittlere jährliche Häufigkeit von Strahlungsnächten wurde aus Daten des Deutschen Wetterdienstes ermittelt. Dabei wurden aus den stündlichen Beobachtungen und Messungen der Wetterstation München-Flughafen die Parameter Windgeschwindigkeit und Bedeckung des Himmels mit Wolken ausgewertet, da diese Station die Bedingungen im Umland von München besser wiedergibt, als die Station München-Stadt, die inmitten städtischer Bebauung liegt und auch eine relativ große Messhöhe aufweist (s. Abschn. 4.2). Eine Nacht wurde im Berechnungsschema als windschwache Strahlungsnacht gewertet, wenn während der Nacht in mindestens 50% der Gesamtzeit zusammenhängende Stunden oder mindestens 80% nicht zusammenhängende Stunden auftraten, die das Kriterium einer Windgeschwindigkeit kleiner oder gleich 2,6 m/s und eines Bedeckungsgrades des Himmels mit Wolken kleiner oder gleich 4 Achteln erfüllten. Der Zeitraum der Nacht wurde durch die Bedingung Sonnenhöhe unter 5° festgelegt.

Danach ergeben sich im Mittel rund 70 bis 80 Strahlungsnächte pro Jahr (vgl. Tabelle 1). Im Durchschnitt der ausgewerteten 10 Jahre (2010 bis 2019) waren ca. 21% der Nächte, d. h. etwa jede fünfte Nacht, eine durch geringe Bewölkung und schwachen Wind definierte Strahlungsnacht. Die Häufigkeit solcher Nächte ist aber nicht gleichförmig über das Jahr verteilt, sondern zeigt deutlich höhere Werte von März bis Oktober (ca. 6 bis 11 Nächte pro Monat) mit einem Maximum im Juli und August. Von Jahr zu Jahr kann diese Anzahl zusätzlich erheblich schwanken, im Zeitraum 2010 bis 2019 zwischen etwa 58 und 92 Nächten pro Jahr.

5.3 Kaltluftentstehung, Kaltluftflüsse und Kaltluftstau

In klaren, windschwachen Nächten kühlen sich die Erdoberfläche und die bodennahe Luftschicht besonders gut ab. Der Wärmeaustausch zwischen der sich abkühlenden aktiven Oberfläche und der Atmosphäre führt dazu, dass die abgestrahlte Wärme – wenigstens zum Teil – der bodennahen Luftschicht entzogen wird, d. h. es kommt zur **Produktion von Kaltluft**.

Die Menge der entstehenden Kaltluft hängt einerseits von der Jahreszeit (Andauer der Nacht) und andererseits von der Art der Landnutzung (Bewuchs und Bebauung) ab. Bei vegetationsbedecktem Boden erfolgt die Ausstrahlung hauptsächlich von den Blättern des Bewuchses, wobei der Wärmetausch mit der Atmosphäre (wegen der Größe der gesamten Blattfläche in Verbindung mit ihrer geringen Wärmekapazität) besonders gut funktioniert. Weide- und Ackerland erweisen sich deshalb als gute Kaltluftproduzenten.

Bei Waldgebieten liegen die Verhältnisse etwas komplizierter, weil die Ausstrahlung – und damit die primäre Abkühlung – nicht aus unmittelbarer Bodennähe, sondern hauptsächlich aus dem oberen Kronenbereich der Bäume erfolgt. Die dort produzierte Kaltluft sinkt ab, vermischt sich mit der wärmeren Luft des Stammraumes und wird z. T. durch die Wärmeabgabe von Stämmen, Zweigen und Blättern sowie den Waldboden aufgezehrt, an Hängen auch abtransportiert. Dann strömt von oben her wärmere Luft nach. Die am Boden messbare Abkühlung der Atmosphäre ist deshalb im Wald – jedenfalls bei geschlossenem Bestand – meist geringer als über vegetationsbedeckten Freiflächen. In Lichtungen, die besonders windgeschützt sind und bei denen die Ausstrahlung aus niedriger Vegetation erfolgt, kann es aber auch empfindlich kalt werden.

Für praktische Zwecke wird die Stärke der Kaltluftproduktion unterschiedlicher Flächen durch empirische Kaltluftproduktionsraten charakterisiert, die in $\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ (Kubikmeter Kaltluft pro Quadratmeter Oberfläche und pro Stunde) angegeben werden. Nach King (1973) haben Freiflächen (Wiese, Acker, Brachland etc.) eine Kaltluftproduktionsrate von ca. $12 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$.

Demgegenüber liefern Gewässer, versiegelte Oberflächen und dicht bebaute Siedlungs-, Gewerbe- und Industriegebiete keinen Beitrag zur Kaltluftbildung. Die Materialien derartiger Flächen (Wasser, Beton, Asphalt etc.) speichern tagsüber große Wärmemengen, die sie nachts wieder an die Atmosphäre abgeben. Sie sind deshalb in windschwachen Strahlungs Nächten wärmer als ihr Umland (Freiflächen, Wald).

Auf unbebauten Hängen entwickelt sich bei nächtlicher Abkühlung aufgrund des höheren spezifischen Gewichtes der kälteren Luft nach Überwindung der Bodenrauigkeit ein mehr oder weniger starker, hangabwärts gerichteter **Kaltluftfluss**, dessen Fließgeschwindigkeit von der Hangneigung, der Bodenrauigkeit und der Größe des Kaltlufteinzugsgebietes (Gebiet, in dem die Kaltluft produziert wird) abhängt. Die Hangneigung muss erfahrungsgemäß wenigstens 1 bis 2 Grad (entsprechend etwa 1 bis 3 m Gefälle auf 100 m Strecke) betragen. Die Fließgeschwindigkeit erreicht in Gegenden mit geringer Reliefenergie meist Werte von 0,5 bis 1 m/s. Die vertikale Mächtigkeit dieser Kaltluftflüsse ist im Allgemeinen auf wenige Dekameter beschränkt. Untersuchungen haben gezeigt, dass der Kaltluftfluss bereits kurz vor Sonnenuntergang beginnt. Bei guten Abflussmöglichkeiten kann ein Kaltluftfluss die ganze Nacht andauern und erst nach dem



Sonnenaufgang versiegen. Ebene Flächen produzieren gleichermaßen Kaltluft, diese kann dann aber nicht abfließen, so dass die Höhe der Kaltluftschicht rasch ansteigt.

Kaltluftstaus bilden sich im Luv von Hindernissen (Wald- und Siedlungsrand, Straßendam, Talsperre u. a.). Die kalte Luft staut sich bis zur Hindernishöhe auf. Bei weiterem Nachfließen von Kaltluft wird das Hindernis schließlich überströmt. Kleinere Hindernisse werden von der abfließenden Kaltluft ohne nennenswerte Staubbildung um- oder überströmt. **Kaltluftseen** entstehen durch Ansammlung kalter Luftmassen in Mulden und Senken. Bedingt durch die fortdauernde Ausstrahlung und den geringen Austausch mit den höheren Luftschichten kühlen sich die (im Kaltluftstau oder Kaltluftsee) stagnierenden Luftmassen weiter ab, es ist dort - insbesondere im Frühjahr und Herbst - mit erhöhter Frost- und Nebelhäufigkeit zu rechnen. Liegen bodennahe Emissionsquellen in einem Kaltluftstau oder -see, kann sich eine beträchtliche Anreicherung der Luft mit Schadstoffen ergeben.

5.4 Thermisch induzierte Windsysteme

Kaltluftproduktion und Geländere relief sind die treibenden Kräfte für thermisch bedingte Windsysteme, auch **Lokalwindzirkulationen** genannt. Diese entstehen bei autochthonen Wetterlagen durch horizontale Temperaturunterschiede, d. h. sie sind Folge einer unterschiedlichen Erwärmung oder Abkühlung von Luftschichten mit gleicher absoluter Höhe. Da kältere Luft (bei gleichem Druck) schwerer ist als warme, beginnt sie abzusinken. Die Folge ist ein Druckanstieg am Boden unter dem Absinkbereich und eine Druckabnahme in der Höhe, was wiederum zu Ausgleichsströmungen mit zirkulierendem Charakter führt. Solche thermischen Windsysteme sind beispielsweise Hangauf- und Hangabwinde oder Berg- und Talwinde.

Unter Hangwinden versteht man das nächtliche Abfließen der über Bodenerhebungen abgekühlten Luft (Hangabwinde) bzw. das Aufsteigen der an einem Hang erwärmten Luft bei Tage (Hangaufwinde). Dabei bewegt sich die Luft in Richtung der Hangneigung, d. h. bei Hängen, die ein Tal seitlich begrenzen, senkrecht zur Talachse. Nach dem Zusammenfließen im Talgrund erzeugen die Hangabwinde den zum Talausgang gerichteten Bergwind oder Talabwind. Vormittags entsteht der talaufwärts gerichtete Talwind oder Talaufwind. Beide Lokalwindzirkulationen unterscheiden sich von der grundströmungsbedingten Komponente des bodennahen Windes durch den für sie typischen Tagesgang der Windrichtung. Flurwinde bilden sich zwischen Bereichen mit unterschiedlicher Flächennutzung. Über den wärmeren Gebieten (wie z. B. der städtischen Bebauung) steigt die Luft auf und wird durch aus dem kühleren Umfeld nachströmende Luft ersetzt.

Ob es sich bei der Kaltluft um Frischluft handelt oder nicht, hängt im Wesentlichen vom Kaltluftentstehungsgebiet und den Kaltluftabflussbahnen ab. Ist die Kaltluft schadstofffrei oder schadstoffarm, so wird sie die Immissionskonzentration im Wirkungsraum reduzieren. Überstreicht die Kaltluft auf ihrem Weg in den Wirkungsraum (z. B. eine Siedlung) bodennahe Emissionsquellen (Kfz-Emissionen, Geruchsemissionen durch Mülldeponien, Staub in Steinbrüchen u. ä.), so können eine Schadstoffanreicherung und ein Transport der Verunreinigungen stattfinden. Auch in Mulden, Senken und vor Hindernissen, in denen sich Kaltluftstau/Kaltluftseen bilden, können sich die Schadstoffe in der stagnierenden Kaltluft anreichern.

6 Quantitative Modellrechnungen - Kaltluftabflussmodell KLAM_21

6.1 Beschreibung Kaltluftabflussmodell KLAM_21

Das Modell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes ist ein zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftflüssen in orographisch gegliedertem Gelände für Fragen der Standort-, Stadt- und Regionalplanung (SIEVERS, 2005). Es simuliert die Entwicklung von Kaltluftflüssen und die Ansammlung von Kaltluft in einem beliebig auswählbaren, rechteckig begrenzten Untersuchungsgebiete. Über dieses Gelände wird ein numerisches Gitter gelegt, typische Abstände sind dabei 10 bis 50 m. Beispielhafte Größen für Untersuchungsgebiete liegen bei 50 bis 500 km², es sind jedoch bei einer Rasterweite von 50 m auch Untersuchungsgebiete bis zu 2.000 km² möglich.

In KLAM_21 wird für die Prognose der Kaltfluthöhe über jedem Flächenelement modellintern zunächst (als Bilanz aus Kälteproduktion sowie aus Kaltluftzu- und -abflüssen) der Kälteinhalt der zugehörigen Kaltluftsäule berechnet. Die benötigte Kaltfluthöhe wird dann aus dem Kälteinhalt und einer Annahme über das vertikale Temperaturprofil errechnet. Dies erleichtert die numerische Sicherstellung des physikalischen Prinzips der Energieerhaltung. Herausragende Hindernisse wie Gebäude oder Schallschutzwände können als solche behandelt werden und müssen nicht als Modifikationen der Orografie angesehen werden. Bei KLAM_21 kann ein "Regionalwind" vorgegeben werden, der eine vom Kaltluftgeschehen unbeeinflusste Grundströmung im Modellgebiet repräsentiert, die "von oben" auf die Kaltluftflüsse einwirkt und sie modifiziert.

Tabelle 2: Zuordnung Modellparameter Rauigkeitslänge, Höhe der Bebauung bzw. Vegetation und Kälteproduktionsrate zu Landnutzungsklassen in KLAM_21

Landnutzungs-kategorie		Rauigkeitslänge z ₀ in m	Höhe Bebauung bzw. Vegetation in m	Kälteproduktionsrate in % (100 % = 30 Watt/m ²)
1	Siedlungsfläche (dicht)	0,1	15	0
2	Siedlungsfläche (locker)	0,1	8	28
3	Wald	0,4	20	56
4	halb versiegelte Flächen	0,02	0	64
5	Gewerbe-/Industriegebiet	0,08	12	0
6	Parkfläche	0,1	20	100
7	unversiegelte Flächen/Freiland	0,05	0	100
8	versiegelte Flächen	0,01	0	28
9	Gewässer	0,001	0	0

Jedem Gitterpunkt werden eine Flächennutzung (schematisiert zu insgesamt 9 Nutzungsklassen) sowie eine Geländehöhe zugeordnet. Jeder Landnutzungsklasse wiederum entsprechen eine fest vorgegebene Kälteproduktionsrate und eine "Rauigkeit" als Maß für den aerodynamischen Widerstand beim Überströmen der Fläche (s. Tabelle 2) sowie modellintern vordefinierte Werte für weitere Modellparameter. So wird zum Beispiel bei Wald und Bebauung eine Hindernishöhe je Nutzungsklasse (s. Tabelle 2, Höhe von Vegetation und Bebauung) vorgegeben sowie eine Flächenbedeckung des Bodens durch Gebäude oder Bäume (Sievers, 2005). Für dichte Besiedlung und Gewerbe-/Industriegebiete wird im Modell ein Gebäudeanteil an der Grundfläche (GRZ) von 0,6 sowie für lockere Siedlungen von 0,4 angenommen. Außerdem können aus dem Gelände herausragende Hindernisse (z. B. Gebäude, Dämme, Schutzwände) modelliert werden, die von der Kaltluft erst dann überwunden werden, wenn die Kaltluftschicht eine entsprechende Höhe erreicht hat. Das Zusammenspiel dieser Einflussgrößen bestimmt das Entstehen, Fließen und die Ansammlung der Kaltluft.

Zu Beginn der Simulation wird eine annähernd adiabatisch geschichtete Atmosphäre vorausgesetzt. Es sind keine horizontalen Gradienten der Temperatur und der Luftdichte vorhanden und es erfolgt keine kurzweilige Einstrahlung. Weiterhin soll die langwellige Gegenstrahlung der Atmosphäre zeitlich konstant, horizontal homogen und schwach ausgeprägt sein. Die Differenz der thermischen Ausstrahlung des Bodens und der langwelligen Gegenstrahlung, die sogenannte effektive Ausstrahlung, bildet dann den Antrieb für die einsetzende Abkühlung der Atmosphäre. Feuchtigkeit und Kondensationsprozesse werden nicht berücksichtigt.

Der Simulationszeitraum von acht Stunden insgesamt entspricht der mittleren Andauer einer klaren Nacht während einer windstillen und trockenen Hochdruckwetterlage, der Start der Simulation liegt dabei kurz vor Sonnenuntergang, d. h. dem Zeitpunkt, zu dem typischerweise die Abkühlung in untersten Luftschichten beginnt.

An den Gitterpunkten werden die dem Modell zugrundeliegenden thermohydrodynamischen Gleichungen gelöst. Die physikalische Basis bilden folgende prognostische Gleichungen:

- die Bewegungsgleichungen für die zwei Horizontalkomponenten der über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelten Windgeschwindigkeit sowie
- die Bilanzgleichungen für den Kälteinhalt der über jeder Gitterfläche befindlichen Kaltluftsäule.

Sie wurden mit den angedeuteten Vereinfachungen und einigen Zusatzannahmen aus den allgemeingültigen Impuls-, Energie- und Massenerhaltungsgleichungen der Atmosphäre durch Integration über die Höhe der Kaltluftschicht abgeleitet. Aus dem Kälteinhalt einer jeden Säule wird dann (unter der Annahme einer bestimmten Höhenabhängigkeit der Abkühlung) die Kaltfluthöhe errechnet. Die Modellgleichungen stellen ein System gekoppelter, nichtlinearer partieller Differentialgleichungen dar, welches durch die Gittereinteilung in ein umfangreiches System von Differenzgleichungen überführt wird. Diese werden mit geeigneten Randbedingungen und bei Vorgabe verschwindender Anfangswerte numerisch gelöst. Als Ergebnis von KLAM_21 erhält man in erster Linie die flächenhafte Verteilung der „effektiven Kaltfluthöhe“ H_{eff} , die etwa 5/12 der absoluten Kaltfluthöhe entspricht, sowie die über die Kaltfluthöhe gemittelte Fließgeschwindigkeit zu beliebig abgreifbaren Simulationszeitpunkten. Im Folgenden ist mit „Kaltluft“ immer die Schicht mit der Dicke H_{eff} gemeint, da sie den für das Strömungsgeschehen relevanten Bereich umfasst.



Unter Annahme einer für Kaltluftströmungen typischen Form des Vertikalprofils des Windes, kann für bestimmte Fragestellungen aus der mittleren Windgeschwindigkeit der Kaltluftschicht die Windgeschwindigkeit in einer bestimmten Höhe (z. B. 2 oder 10 m über Grund) berechnet werden.

6.2 Auswahl Simulationsgebiet, Eingabedaten und Aufbereitung

Die Rechnungen zu den Kaltluftflüssen wurden für einen Ausschnitt von 25 km x 25 km durchgeführt, dessen Größe so festgelegt wurde, dass mögliche Wechselwirkungen mit umliegenden Tälern bzw. Höhenrücken noch miteingefasst werden (vergleiche mit Abbildung 1). Aufgrund der auf regionaler Ebene vorherrschenden südwestlichen Strömungskomponenten, wurde das Rechengebiet daher etwas nach Süden und Westen verschoben und damit das Einzugsgebiet in diese Richtungen vergrößert.

Um das Kaltluftabflussmodell anwenden zu können, werden als Eingabewerte digitalisierte topographische Daten in Rasterfeldern benötigt. Die Modellierung des Geländes und der Landnutzung erfolgt anhand von Karten- und Datenmaterial des EU-Projektes Copernicus sowie der Europäischen Umweltagentur EEA. Für jedes Rasterfeld müssen die Höhe über Normalhöhennull (über NHN) und die Flächennutzung (z. B. Bewuchs, Bebauung, Gewässer) bekannt sein. Das Höhenraster ist dem EU-DEM v1.1¹ entnommen. Informationen zur Landnutzung stammen aus dem Urban Atlas 2012².

Die Auflösung des Rasters wird in der Regel so groß gewählt, dass alle wesentlichen Strukturen des Geländes auch in den digitalisierten Rasterwerten enthalten sind. Im vorliegenden Fall wurden die Höhenrasterdatei im 25 m-Raster und die entsprechende Digitalisierung der Landnutzung verwendet. Jedem Gitterpunkt wurde eine der Landnutzungsklassen 1 bis 9 aus Tabelle 2 zugeordnet.

Das Simulationsgebiet (Rechengebiet) umfasst insgesamt 1000 x 1000 Gitterpunkte bzw. 25 x 25 km = 625 km² und ist aus Abbildung 1 zu entnehmen. In Abbildung 21 und Abbildung 22 sind die Verteilung der Höhenlagen und der Flächennutzungsklassen im Rechengebiet enthalten. Für die Darstellung der Ergebnisse im Raum Germering wurde ein 10 km x 10 km großer Ausschnitt (A) ausgewählt mit den Rechts- und Hochwerten 36 70 000 und 53 30 000 (linke untere Ecke) und 36 80 000 und 53 40 000 (rechte obere Ecke).

Die Modellberechnungen wurden sowohl für einen Ist-, als auch für einen Soll-Zustand durchgeführt. Im Folgenden ist mit Istzustand immer der Modell-Istzustand, mit Sollzustand immer der Modell-Sollzustand gemeint. Dabei entspricht der Modell-Istzustand den verwendeten digitalen Höhen- und Landnutzungsdaten^{1 2}. Für den Modell-Sollzustand, für die geplanten oder für die Berechnungen angenommenen Veränderungen in den Teilbereichen, wurde die Flächennutzung im Folgenden, wie auf Seite 27 beschrieben, in dem zugrunde liegenden digitalen Höhen- und Landnutzungsdatensatz entsprechend verändert.

¹ <http://land.copernicus.eu/pan-european/satellite-derived-products/eu-dem/eu-dem-v1.1> (zuletzt abgerufen am 29.09.2020)

² <http://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2012> (zuletzt abgerufen am 23.09.2020)

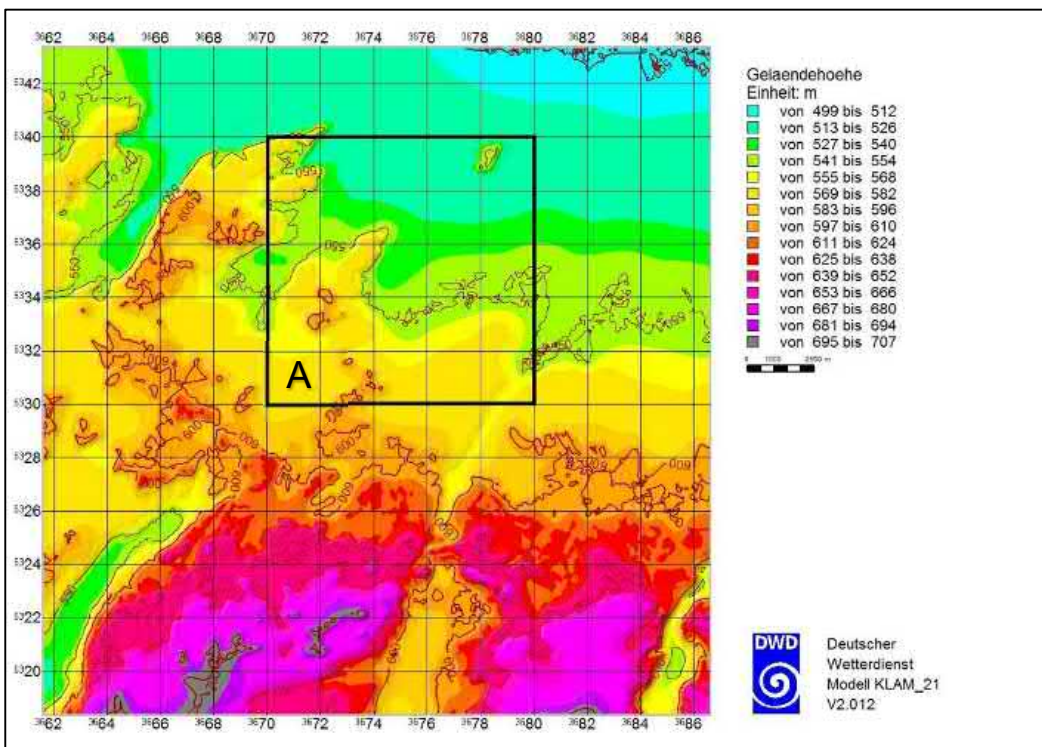


Abbildung 21: Geländehöhen und Höhenlinien im Rechengebiet ¹ sowie Lage Ausschnitt A

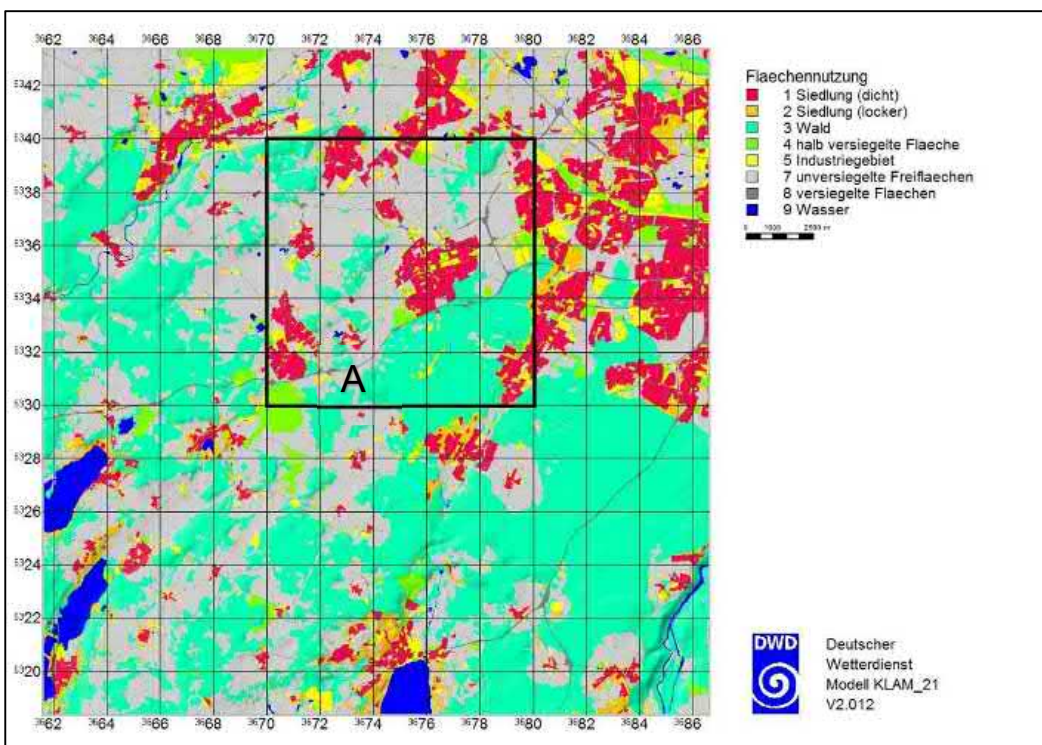


Abbildung 22: Ist-Zustand Flächennutzung im Rechengebiet ² sowie Lage Ausschnitt A

Für den Modell-Sollzustand wurde für das Kreuzlinger Feld (Gebiet 1 in Abbildung 4) neben den aktuellen Bebauungsplanentwürfen auch die Rahmenplanung von 2018 berücksichtigt, so dass in Zukunft beabsichtigte Entwicklungen mit abgeschätzt werden können. Für die Wohnbebauung wurde die Landnutzungs-kategorie 1 (dichte Besiedlung) gewählt, auch für den derzeit noch unbauten Streifen und die Bereiche westlich des Starnberger Weges. Für das geplante Sondergebiet bzw. Gebiet für Gemeinbedarf gibt es im Modell keine separate Nutzungskategorie. Es wurde in Analogie zu dem verwendeten Landnutzungsdatensatz, ähnlich wie für die Feuerwehr und die Schulen südlich der Alfons-Baumann-Straße, der Klasse 5 zugeordnet.

Für das Gebiet 3 (Südlich Hochrainweg) wurde pauschal dichte Besiedlung (Kategorie 1) gesetzt, für die Fläche 4 (Hausäcker) zur Abschätzung für den Worst Case fiktiv auf der gesamten Fläche Nutzungskategorie 1 (dichte Besiedlung) angenommen. Das Briefverteilzentrum (Nr. 2 in Abbildung 4) wurde in die Nutzungskategorie 5 eingestuft. Die Änderung in den Gebieten 5 und 6 konnte nicht berücksichtigt werden, da sich hier vor allem die Struktur der Bebauung ändern soll und diese Flächen bereits als dichte Besiedlung simuliert werden.

6.3 Diskussion der Modellresultate

6.3.1 Allgemeines zur Darstellung

Die Modellergebnisse werden als flächenhafte Verteilung der Kaltluflhöhe (effektive Kaltluflhöhe H_{eff}) und der horizontale Fließgeschwindigkeit der Kaltluft (Höhenmittel) zu bestimmten Integrationszeitpunkten farblich dargestellt.

Für die Beurteilung der Durchlüftung und der Zufuhr von Kaltluft oder Frischluft wird häufig der Volumenstrom betrachtet (VDI 3787, 2003). Er gibt an, wie viel Kubikmeter Luft pro Zeiteinheit eine bestimmte Fläche, einen bestimmten Querschnitt durchströmen und hat damit die Einheit m^3/s . Im Modell wird der Volumenstrom für die einzelnen Gitterzellen des Rechengitters über die gesamte Höhe der Kaltluftschicht berechnet. Er stellt damit genau genommen, bei Berücksichtigung der Gittergröße, eine Volumenstromdichte dar und wird in m^3/ms angegeben.

Zusätzlich werden Betrag und Richtung der horizontalen Fließgeschwindigkeit der Kaltluft bzw. des Kaltluft-Volumenstroms durch Pfeile unterschiedlicher Länge wiedergegeben. Zugunsten einer übersichtlicheren Darstellung werden die eigentlich im 25 m Abstand vorliegenden Windpfeile in einem größeren Abstand gezeichnet, wobei der Bezugspunkt jeweils in der Mitte des Pfeils liegt. Die Richtung der Pfeile gibt die Richtung an, in die der Wind weht bzw. die Kaltluftströmung fließt. Die Länge der Pfeile ist ein Maß für die Windgeschwindigkeit bzw. die Stärke des Volumenstroms.

Zuerst werden die Verhältnisse für den Ist-Zustand auf regionaler und lokaler Ebene betrachtet. Anschließend erfolgt ein Vergleich zwischen dem Modell-Plan-/Soll-Zustand für die Teilflächen und dem Modell-Ist-Zustand. Dabei werden zur besseren Anschaulichkeit Differenzfelder berechnet. Die wichtigsten Flächennutzungen - Siedlung, Wald und Wasser - sind bei der Darstellung farblich schraffiert. Dabei enthält die Siedlung die Flächennutzungsklassen 1 und 2. Die Flächennutzungskategorie 5 (Gewerbe- und Industriegebiet), in die auch Gewerbeflächen in Germering fallen, ist in den Ergebniskarten dagegen nicht schraffiert dargestellt.

6.3.2 Regionale Bedingungen (IST-Zustand)

Die Simulationsergebnisse zeigen eine relativ große Kaltluftproduktion über den Freiflächen, die im Modell zu einem Anstieg der Höhe der Kaltluftschicht führt. Dagegen ist sie über besiedelten Gebieten geringer. Zwei Stunden nach Simulationsstart (120 Minuten) wird der Kontrast z. B. zum Stadtgebiet von Germering (G) und München (am oberen rechten Bildrand) sichtbar (Abbildung 23), wo es wärmer bleibt, die Kaltluftproduktion und damit die Kaltlufthöhe nur gering ist (rötliche Einfärbung).

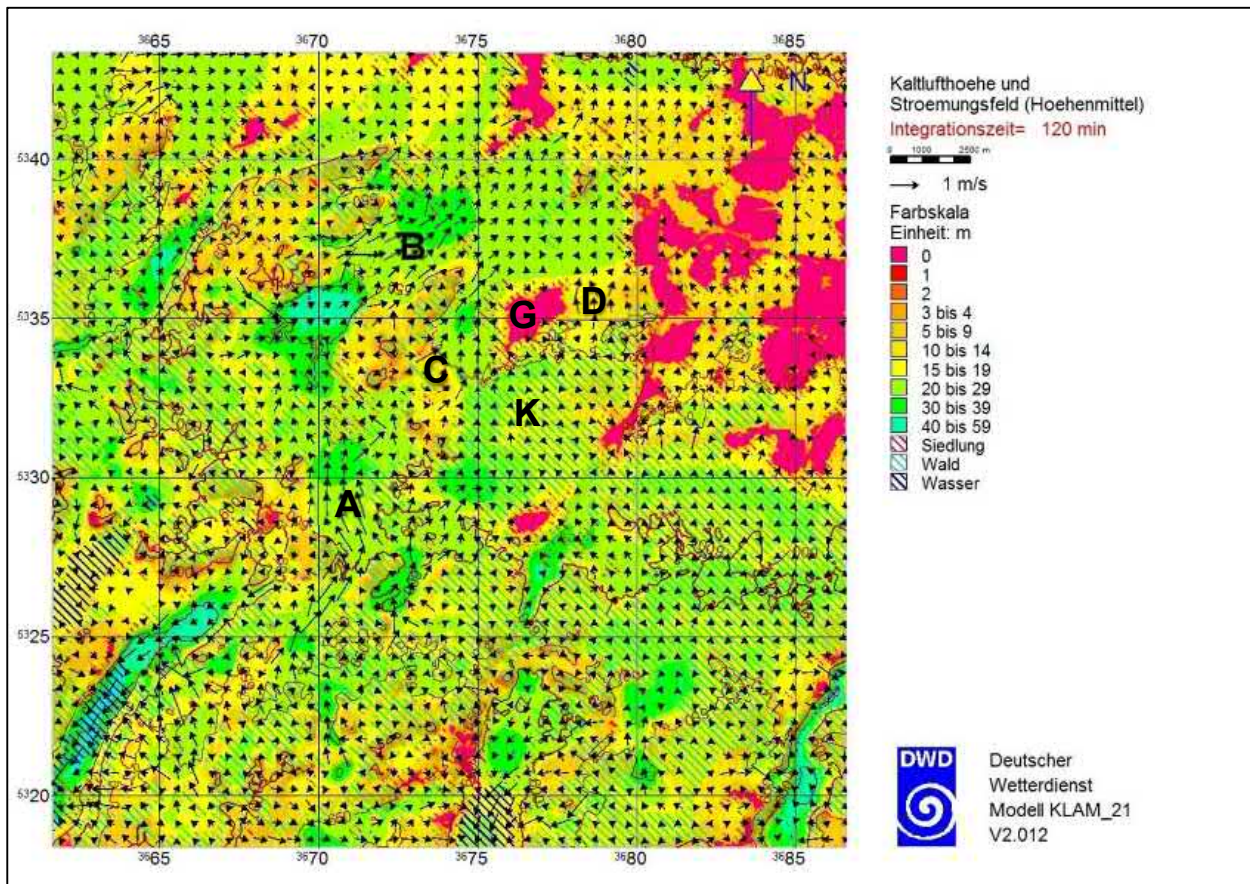


Abbildung 23: Kaltlufthöhe/Strömungsfeld 120 Minuten (2 Stunden) nach Simulationsstart (komplettes Rechengebiet)

Dem Geländegefälle folgend setzten Kaltluftströmungen ein, die sich an Hindernissen wie Wald und Siedlungsflächen teilweise aufstauen und abschwächen, wie z. B. über dem Kreuzlinger Forst (K). Teils umströmen sie auch die Hindernisse, wie das Stadtgebiet von Germering (G). In Verbindung mit Relief und Geländeneigung entstehen Bereiche mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten. So werden die Strömungen z. B. in Geländeeinschnitten kanalisiert. Solche Bereiche mit stärkeren Kaltluftströmungen gibt es zum Beispiel im Gebiet A südlich von Gilching oder B nordöstlich von Alling. Auch südwestlich (C), westlich und nordwestlich von Germering sowie im Osten der Stadt (D) ist der Kaltluftstrom stärker. In den Tälern und Senken sammelt sich Kaltluft. Im Münchner Südwesten stellen sich aufgrund der Neigung der Münchner Ebene insgesamt überwiegend südwestliche bis südliche Luftströmungen ein.

6.3.3 Verhältnisse im Raum Germering (IST-Zustand)

Zur Betrachtung der lokalen Verhältnisse wurde ein 10 km x 10 km großer Ausschnitt (A) ausgewählt (schwarzer Rahmen in Abbildung 21 und Abbildung 22). Die Berechnungen zeigen eine relativ große Kaltluftproduktion über den Freiflächen, so dass die Höhe der Kaltluftschicht im Modell ansteigt. Dagegen ist sie über den besiedelten Gebieten zunächst gering.

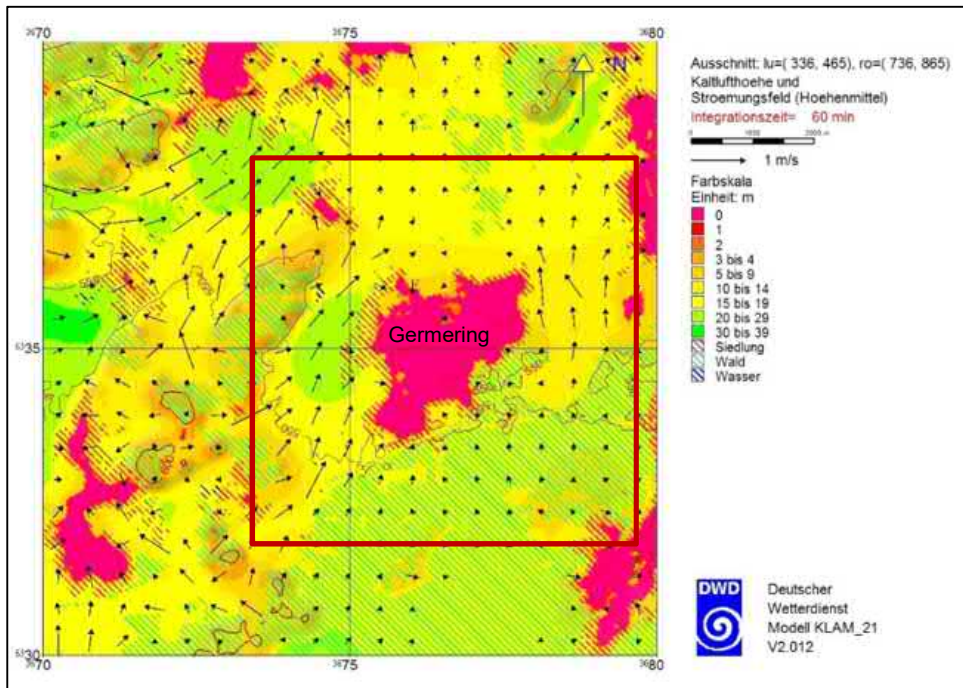


Abbildung 24: Kaltfluthöhe/Strömungsfeld 60 Minuten nach Simulationsstart für Ausschnitt A sowie Lage Ausschnitt B (roter Rahmen)

Etwa eine Stunde (60 Minuten) nach Simulationsstart (Abbildung 24) ist die Höhe der Kaltluftschicht über dem Stadtgebiet nahe null (karminrote Einfärbung), in den Randgebieten gering, so dass dort die Schraffur der Siedlungsflächen sichtbar wird. Über den Waldgebieten südlich von Germering bleibt die Strömung schwach. Dagegen hat sich von den höheren Bereichen südwestlich der Stadt dem Geländegefälle folgend ein Kaltluftstrom gebildet. Er wird zwischen den Hindernissen des Stadtgebietes und des Parsbergs kanalisiert und umströmt die Stadt westlich. Dort, wo mehr Kaltluft nachströmt als abfließt, kommt es zu Stauwirkungen, so dass die Kaltfluthöhe schneller anwächst. Nach etwa einer Stunde beträgt die Kaltfluthöhe westlich von Germering etwa 15 bis 30 Meter (gelbe und grüne Einfärbung). Auch östlich der Stadt verläuft der Kaltluftstrom über die landwirtschaftlich genutzten Freiflächen zwischen Germering und München nach Norden. Die Höhe der Kaltluft erreicht dort ungefähr 5 bis 10 Meter an. Nördlich der Stadt ist die Luftbewegung noch schwach.

Zwei Stunden (120 Minuten) nach Simulationsstart (Abbildung 25) ist die Höhe der Kaltluftschicht im Umland weiter angewachsen auf etwa 20 bis 40 Meter im Westen sowie ca. 20 bis 30 Meter nördlich der Stadt. Auch im Osten von Germering haben die Werte teilweise etwas zugenommen.

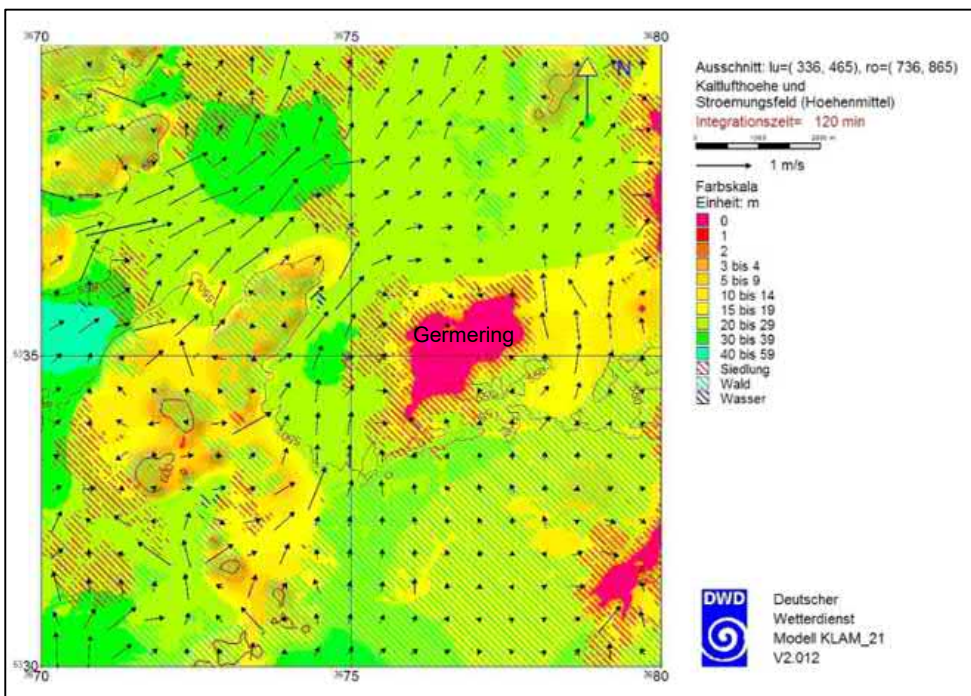


Abbildung 25: Kaltluflhöhe/Strömungsfeld 120 Minuten (2 Stunden) nach Simulationsstart

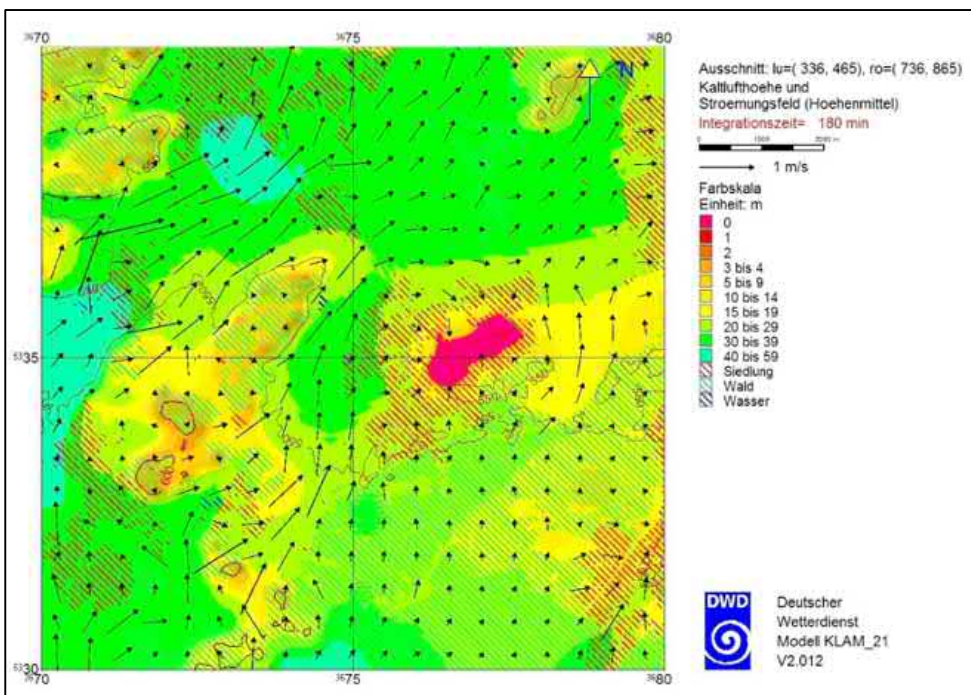


Abbildung 26: Kaltluflhöhe/Strömungsfeld 180 Minuten (3 Stunden) nach Simulationsstart

Mit dem Anwachsen der Kaltluflhöhe dringt die Kaltluft ein Stück weit von den Rändern her in die Stadtfläche ein bzw. überströmt die bebauten Flächen (gelbliche bis grünliche Farbgebung). Dadurch ergeben sich in den westlichen Stadtbereichen südliche bis westliche, in den nördlichen Stadtgebieten westliche bis nördliche Strömungskomponenten (Höhenmittel über die Kaltluftschicht).

Im Laufe der Nacht gewinnen die regionalen Prozesse aus dem Hinterland zunehmend an Bedeutung mit südlichen bis südwestlichen Strömungskomponenten. Das Stadtgebiet wird weiter umströmt, im nördlichen Umland stellt sich eine westliche Luftströmung ein. Nach dem Zusammentreffen mit der östlich um Germering herumgeführten Luft, kommt der Wind dann wieder aus Südwesten.

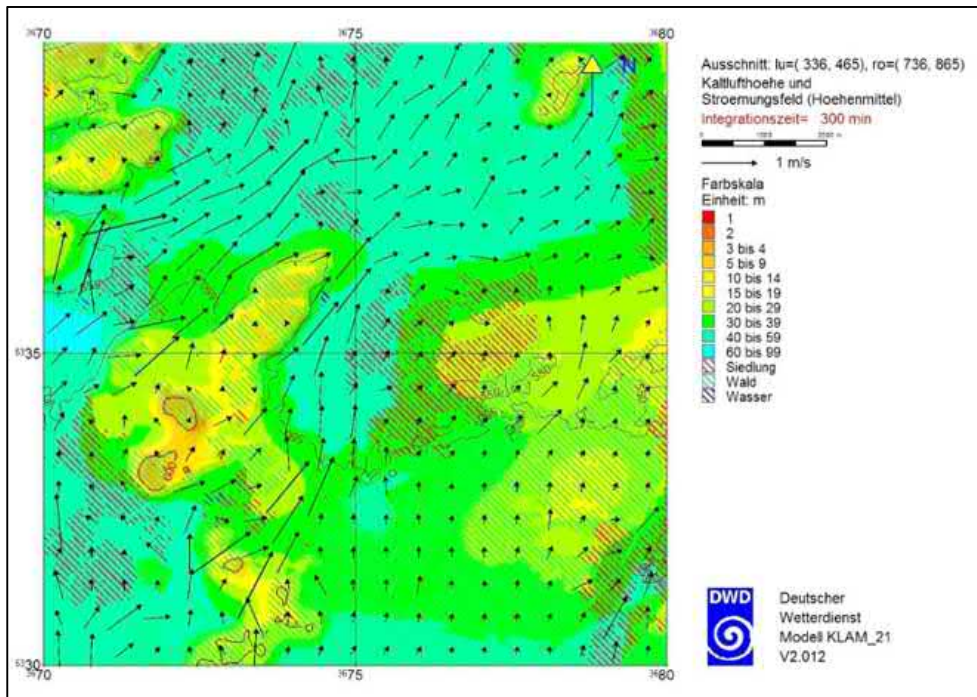


Abbildung 27: Kaltluflhöhe/Strömungsfeld 300 Minuten (5 Stunden) nach Simulationsstart

Der Kaltlufttransport aus Süden und Südwesten wird insbesondere im Westen und Norden um Germering herumgeführt wird. Dort beträgt die Höhe der Kaltluftschicht ca. 300 Minuten nach Simulationsstart (nach 5 Stunden) etwa 40 bis 60 Meter (Abbildung 27). Dabei sind die größten Strömungsgeschwindigkeiten nordöstlich von Geisenbrunn sowie in der Engstelle zwischen Parsberg, Puchheim und dem Stadtgebiet von Germering im Nordwesten der Stadt zu finden. Ein Teil der Strömung geht weiter östlich um Germering herum. Das Stadtgebiet selbst wird inzwischen überströmt mit vorwiegend südwestlichen, teils auch südlichen und westlichen Winden. Die Geschwindigkeiten sind aber durch die abbremsende Wirkung der Bebauung deutlich geringer.

Gegen Ende der idealisierten Strahlungsnacht nach acht Stunden ist der größte Teil des Gebietes mit Kaltluft überflutet. Die Höhe der Kaltluftschicht beträgt meist etwa 40 bis 60 Meter. Nur in einem kleinen Teilbereich im Südosten, im Lee der Stadt, ist sie mit ca. 30 bis 40 Meter noch etwas geringer. Entsprechend den regionalen Verhältnisse dauert der Kaltluftstrom aus den Gebieten südlich und vor allem aus dem Altmoränenhügelland südwestlich die ganze Nacht über an.

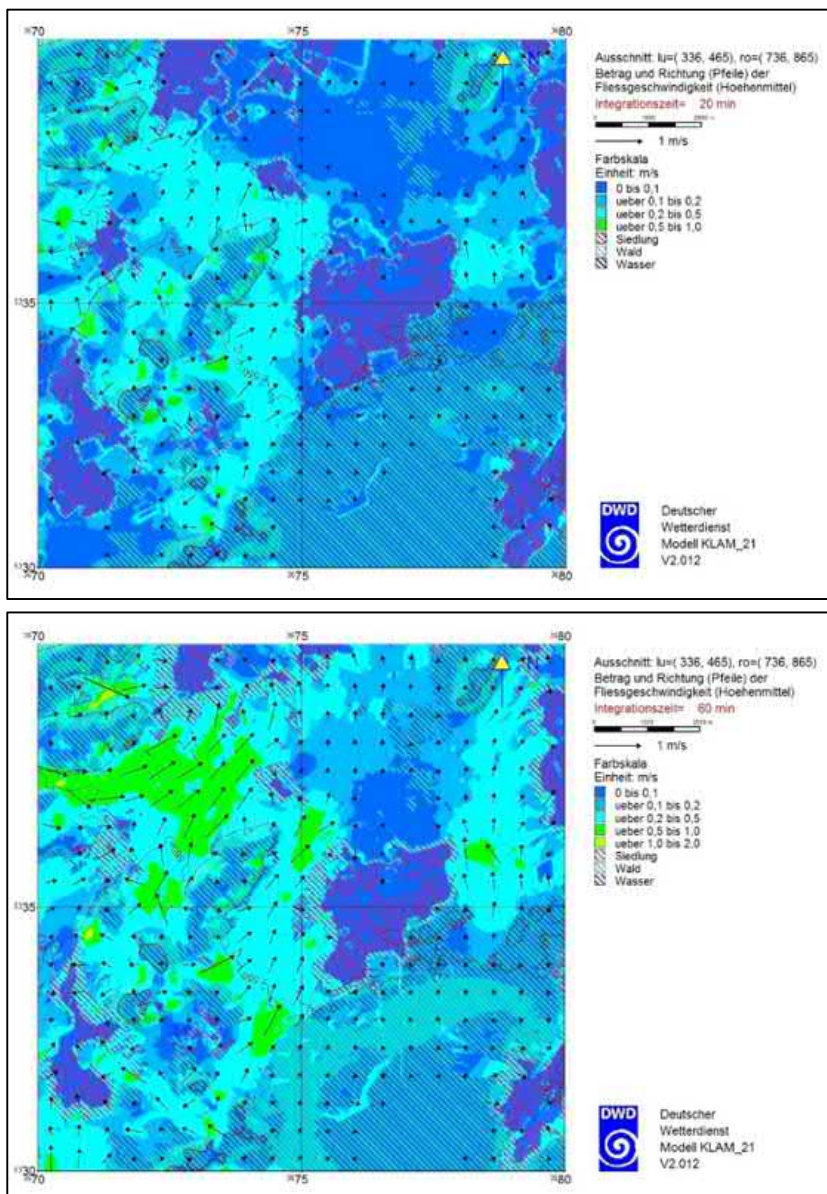


Abbildung 28: Fließgeschwindigkeit der Kaltluft (Höhenmittel) nach 20 und 60 Minuten

Statt der Kaltfluthöhe wurde jetzt die Fließgeschwindigkeit der Kaltluftschicht (Höhenmittel) farblich dargestellt. Zu Beginn nach 20 Minuten (Abbildung 28 oben) dominieren die Strömungen vom Parsberg, von dem Höhenzug im Westen und Südwesten, herab. Hier werden 0,2 bis 0,5 m/s (hellblaue Einfärbung) erreicht. Auch östlich der Stadt ergeben sich ähnliche Werte. Sonst ist die Strömung schwächer.

Bereits nach 60 Minuten (Abbildung 28 unten) gewinnt der Kaltluftstrom aus Südwesten und Süden die Oberhand. Die hellblaue Fläche dehnt sich nach Osten aus und reicht jetzt etwas in die Bebauung im Westen der Stadt Germering hinein. Örtlich werden auch 0,5 bis 1,0 m/s erreicht (hellgrüne Einfärbung). Auch im Osten der Stadt wird die Strömung stärker. Im Norden und über großen Teilen der Stadt ist die Fließgeschwindigkeit noch relativ schwach.

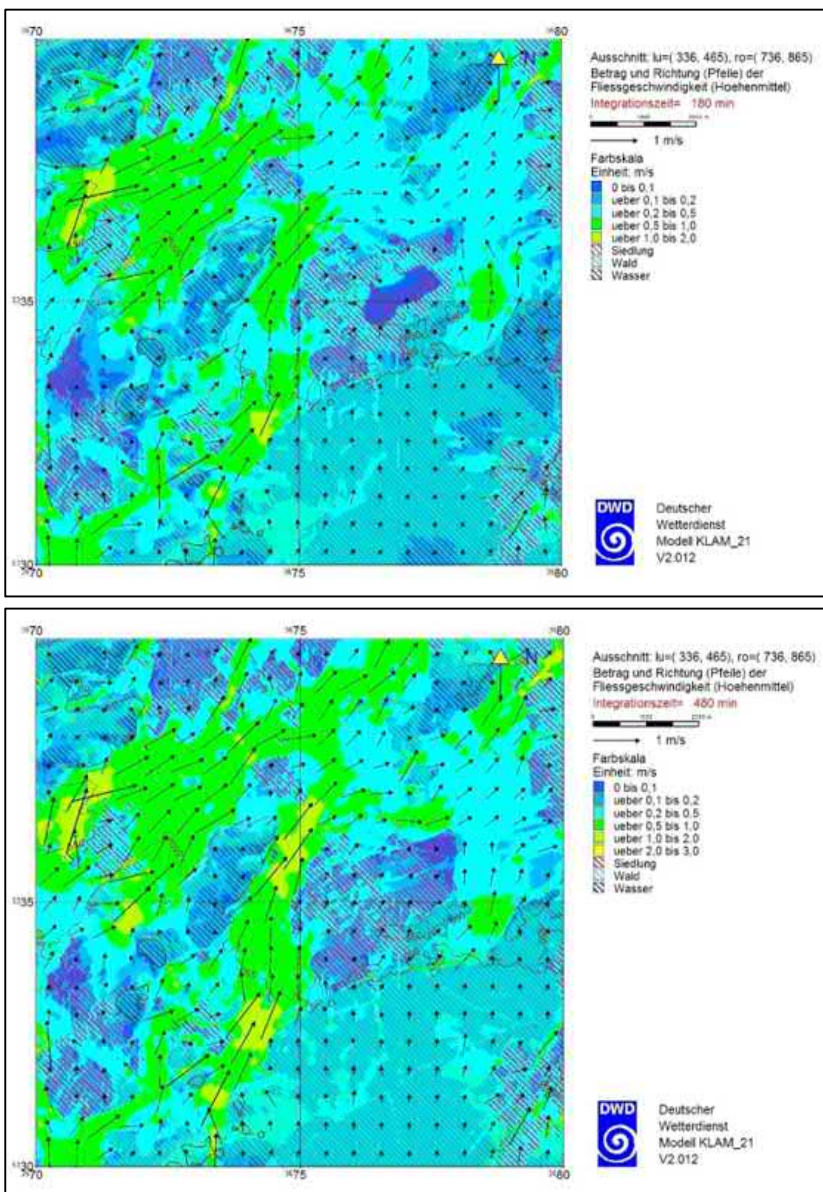


Abbildung 29: Fließgeschwindigkeit (Höhenmittel) nach 180 und 480 Minuten

Nach drei Stunden (180 Minuten) haben die Kaltluftströmungen vor allem im Westen und Osten weiter zugenommen (Abbildung 29 oben). Die Fläche mit 0,5 bis 1,0 m/s (grün eingefärbt) hat sich ausgedehnt. Im Norden und teilweise auch über dem Stadtgebiet ist die Geschwindigkeit auf 0,2 bis 0,5 m/s angestiegen (hellblaue Farbe)

Im Laufe der Nacht nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten vor allem im Umland von Germering weiter zu. Nach acht Stunden (480 Minuten) (Abbildung 29 unten) werden gebietsweise 0,5 bis 1,0 m/s (grüne Einfärbung), im Südwesten und Nordwesten teils auch 2,0 bis 3,0 m/s (gelbe Einfärbung) vom Modell berechnet. Das Stadtgebiet wird überströmt. Die Geschwindigkeiten sind in der Simulation über der Stadt meist aber nur gering.

Bisher wurden der Kälteinhalt der Luftsäule (die Höhe der Kaltluftschicht) und die Strömungsgeschwindigkeit einzeln betrachtet. Der Kaltluft-Volumenstrom stellt dagegen eine Kombination aus beiden dar. Er gibt an wie viel Kubikmeter Luft pro Zeiteinheit eine bestimmte Fläche, einen bestimmten Querschnitt durchströmen. Im Modell wird der Volumenstrom für die einzelnen Gitterzellen des Rechengitters über die gesamte Höhe der Kaltluftschicht berechnet und als Volumenstromdichte in m^3/ms ausgegeben. Dargestellt wurde der Nahbereich um die Stadt (Ausschnitt B).

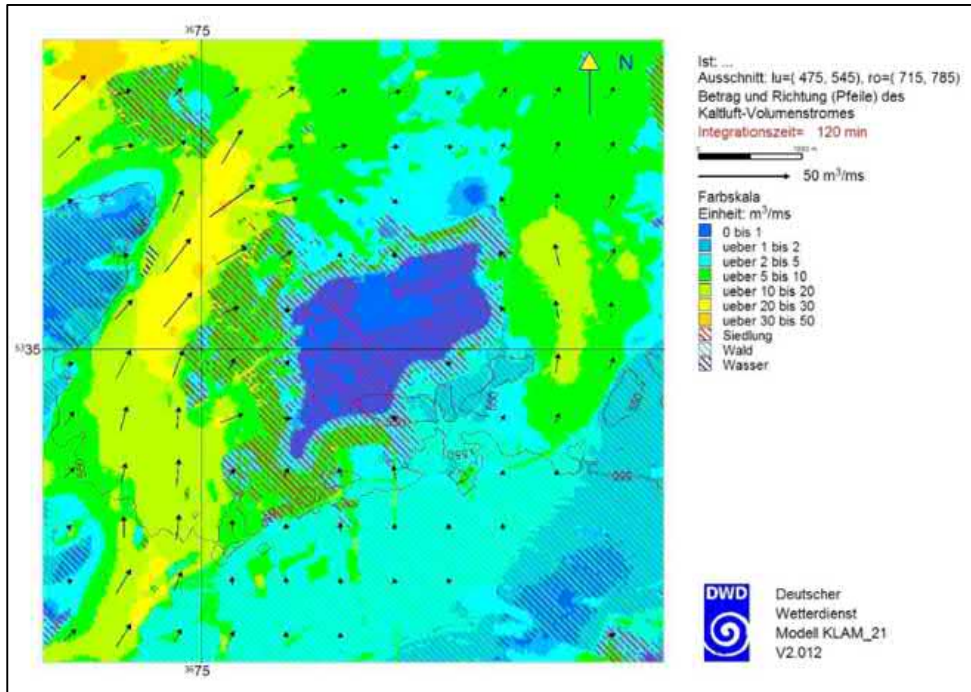


Abbildung 30: Kaltluft-Volumenstrom(dichte) 120 Minuten nach Simulationsstart

Etwa 120 Minuten nach Simulationsstart (Abbildung 30) ist der Kaltluft-Volumenstrom westlich und östlich von Germering bereits gut ausgeprägt und kommt aus Süden. Im Nordwesten biegt er auf Südwesten um. In den westlichen Stadtbereichen weist er ebenfalls eine südwestliche Richtung auf. Im Norden und über der Stadt sind die Werte noch sehr gering.

Nach 240 Minuten (Abbildung 31) hat die Volumenstromdichte insgesamt zugenommen. Die Stadt wird mit einer kräftigen Strömung vor allem im südwestlichen, westlichen und nordwestlichen Umland umströmt. Nördlich der Stadt überwiegen westliche Komponenten. Über dem Stadtgebiet sind die Verhältnisse schwächer ausgeprägt. In den westlichen Stadtteilen herrschen südwestliche und südliche Komponenten vor. Dagegen ergeben sich im Norden und im Zentrum der Stadt teils auch westliche, nordwestliche und nördliche Richtungen. Allerdings ist die Volumenstromdichte hier deutlich geringer.

Im Laufe der Nacht nehmen die Kaltluftströmungen vor allem in der Umgebung der Stadt weiter zu (Abbildung 32). Der Haupttransport der Kaltluft führt weiter im Bogen um die Stadt herum. Die Stadt wird überströmt. Nach sieben Stunden (420 Minuten) dominieren südwestliche Richtungen. Teilweise treten auch Süd- und Westkomponenten auf.

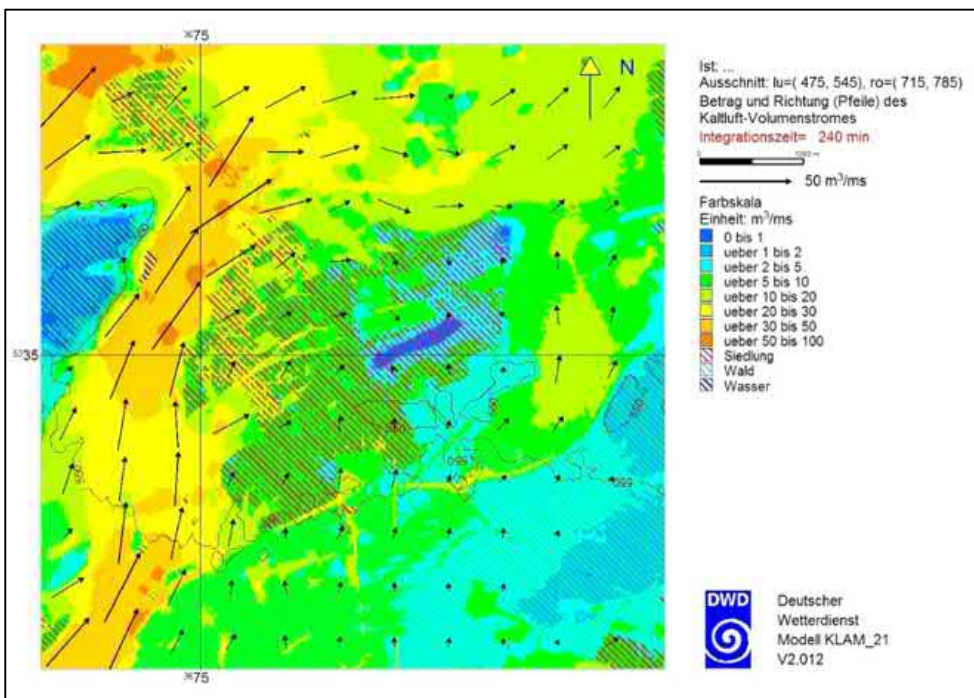


Abbildung 31: Kaltluft-Volumenstrom(dichte) 240 Minuten nach Simulationsstart

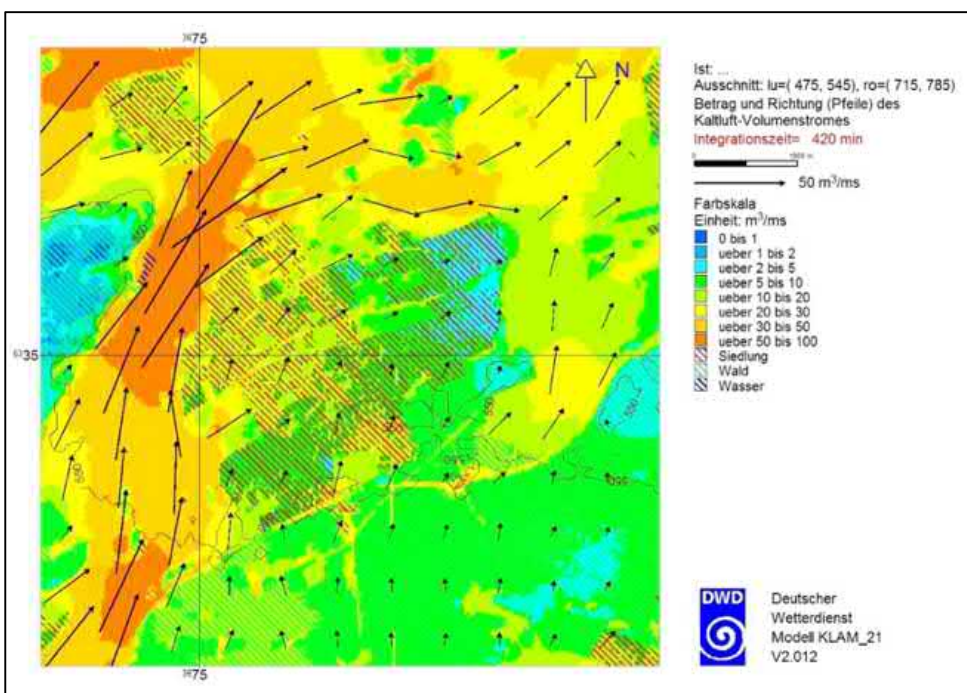


Abbildung 32: Kaltluft-Volumenstrom(dichte) 420 Minuten nach Simulationsstart

Durch die Fläche des Stadtgebietes werden die Kaltluftströme insgesamt abgebremst. Daher sind die Werte in den östlichen Stadtteilen, im Lee der Stadtfläche, geringer (bläuliche Einfärbung). Auch die großen Straßenzüge in Strömungsrichtung werden zum Teil sichtbar und damit ihre Bedeutung für die Durchlüftung.

Für die betrachteten Teilflächen ergibt sich für das Kreuzlinger Feld ein südwestlicher Kaltluft-Volumenstrom, der etwas größer ist als in der Umgebung. Die Volumenstromdichte steigt im Laufe der Nacht an. Das gilt auch für das Gebiet Hausäcker. Im Bereich des Briefverteilzentrums kommen die Kaltluftströme erst später in Gang und sind schwächer. Nach 4 Stunden ergeben sich dort westliche, nach 7 Stunden südwestliche Richtungen. Das Gebiet südlich des Hochrainwegs befindet sich am weitesten im Norden und liegt damit dichter zu der im Norden vorbeiführenden Kaltluftbahn. Hier überwiegen westliche bis südwestliche Ströme, deren Stärke nach einem schwachen Beginn dann rasch zunimmt.

6.3.4 Betrachtung der Teilflächen (Vergleich Modell-SOLL - Modell-IST)

Um den Einfluss der geplanten oder angenommenen Bebauung zu verdeutlichen, wurden die Berechnungen für das gesamte Gebiet mit den simulierten Flächennutzungsänderungen in den Teilgebieten 1 bis 4 (aus Abbildung 4) wiederholt. Für die Beschreibung dieses Modell-Sollzustandes wird auf Abschnitt 6.2 (Seite 27) verwiesen. Um die Änderungen besser sichtbar zu machen, wurden Differenzfelder zwischen den Ergebnissen mit veränderter Landnutzung (Modell-Soll) und für den ursprünglich verwendeten Landnutzungsdatensatz (Modell-Ist) bestimmt: Zur Darstellung wurde ein vergrößerter Teilausschnitt für den Stadtbereich (Ausschnitt B) verwendet.

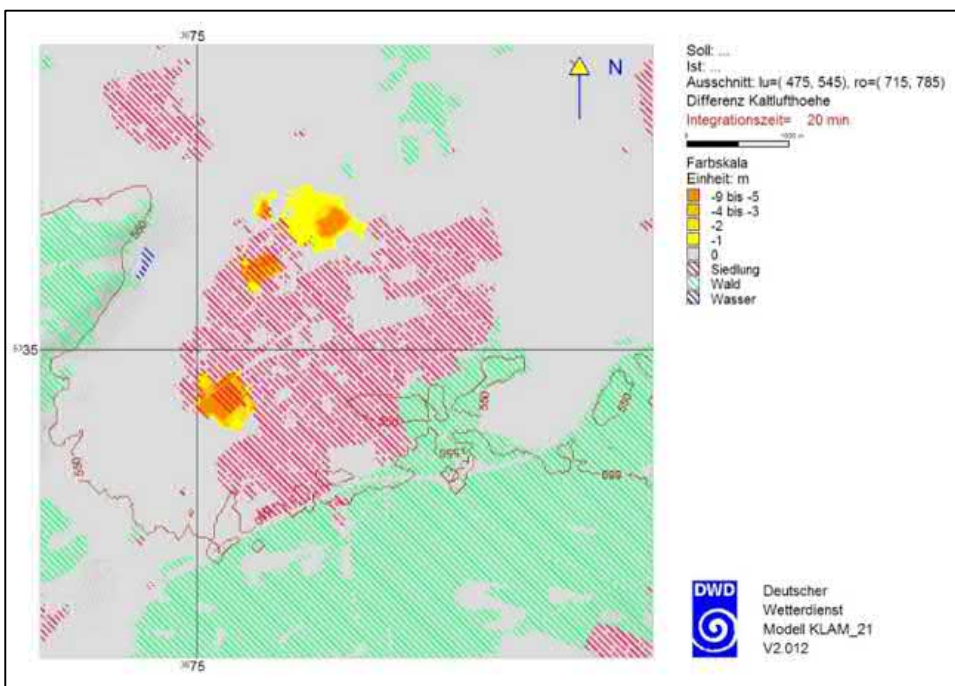


Abbildung 33: Differenz Kaltfluthöhe zwischen Soll- und Istzustand nach 20 Minuten

Da im Modell über den dicht besiedelten Flächen und Gewerbegebieten keine Kaltluft produziert wird (vgl. Tabelle 2), ist die Höhe der Kaltluftschicht dort im Planungszustand (Soll) geringer als im Modell-Istzustand. Kurz nach Simulationsstart werden die vier betrachteten Teilgebiete sichtbar. Die Menge der produzierten Kaltluft, die Höhe der Kaltluftschicht, ist verringert. In Abbildung 33 sind die Verhältnisse 20 Minuten nach Beginn der Simulation dargestellt. Für die gelben Flächen ergeben sich kaum Änderungen (nur -1 Meter).

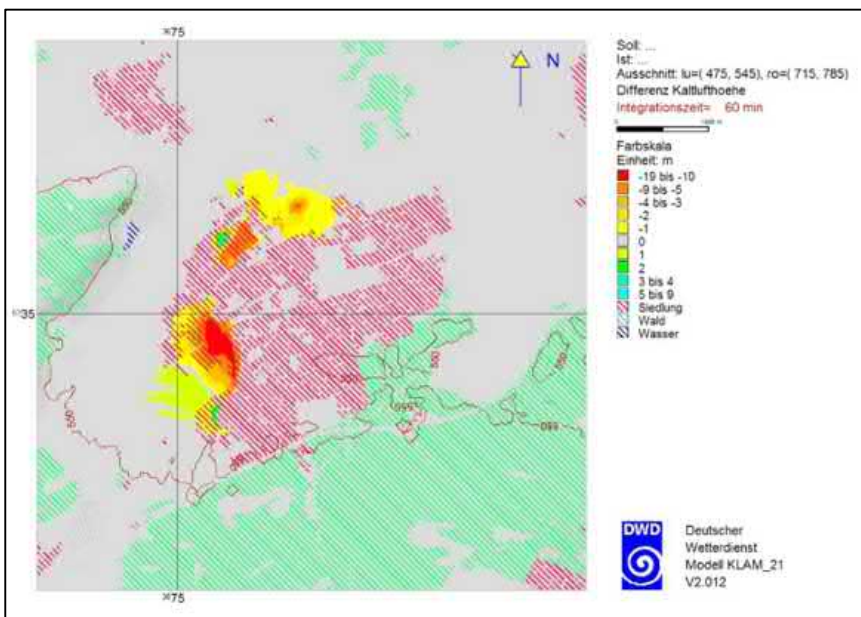


Abbildung 34: Differenz Kaltluflhöhe zwischen Soll- und Istzustand nach 60 Minuten

Je nach herrschenden Windverhältnissen weitet sich dieser Effekt auch auf die angrenzenden Gebiete aus. Teilweise staut sich auch die Kaltluft am Rand der Bebauung auf (s. Abbildung 34), so dass die Kaltluflhöhe dort etwas höher liegt (grünliche Einfärbung).

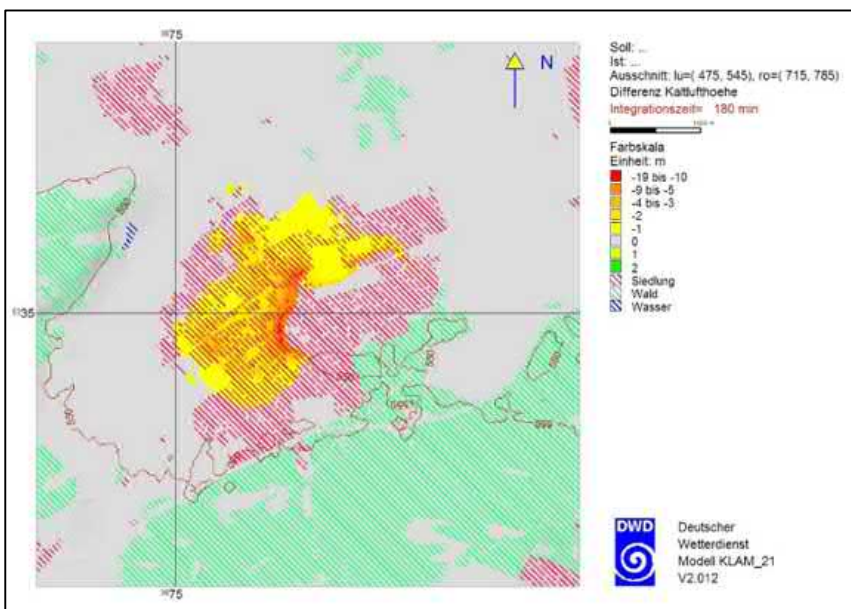


Abbildung 35: Differenz Kaltluflhöhe Soll- minus Istzustand 180 Minuten nach Simulationsstart

Im weiteren Verlauf breiten sich die Effekte mit der Überströmung des Stadtgebietes in Strömungsrichtung aus, schwächen sich dabei aber ab (Abbildung 35). Nach fünf Stunden (300 Minuten) wird auch der Südosten der Stadt erfasst (ohne Abbildung). Die Unterschiede sind mit 1 bis 2 Metern relativ zur Gesamthöhe der Kaltluftschicht aber nur noch gering. Der Effekt des Kaltlufttransportes überwiegt dann den der Kaltluftproduktion vor Ort.

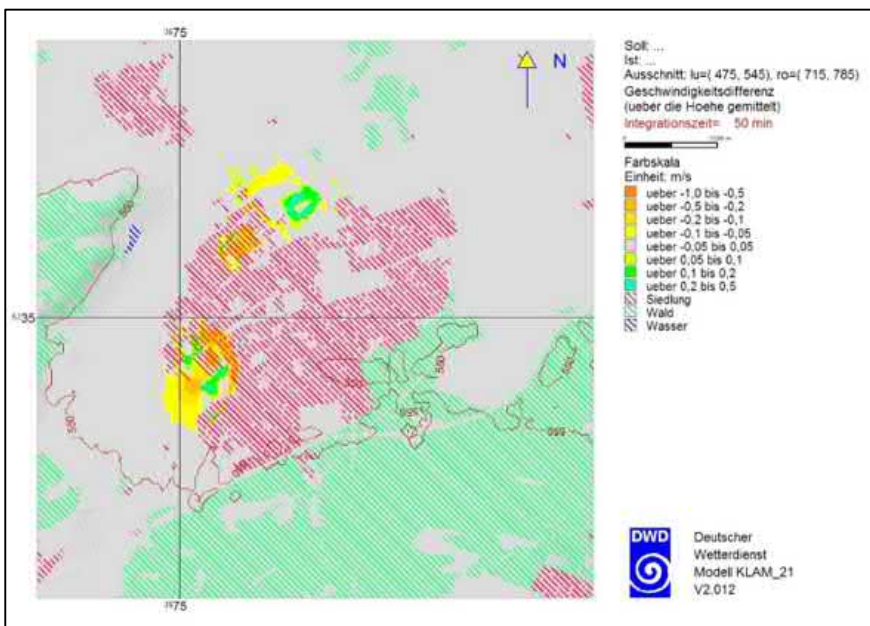


Abbildung 36: Differenz Fließgeschwindigkeit zwischen Soll und Ist nach 50 Minuten

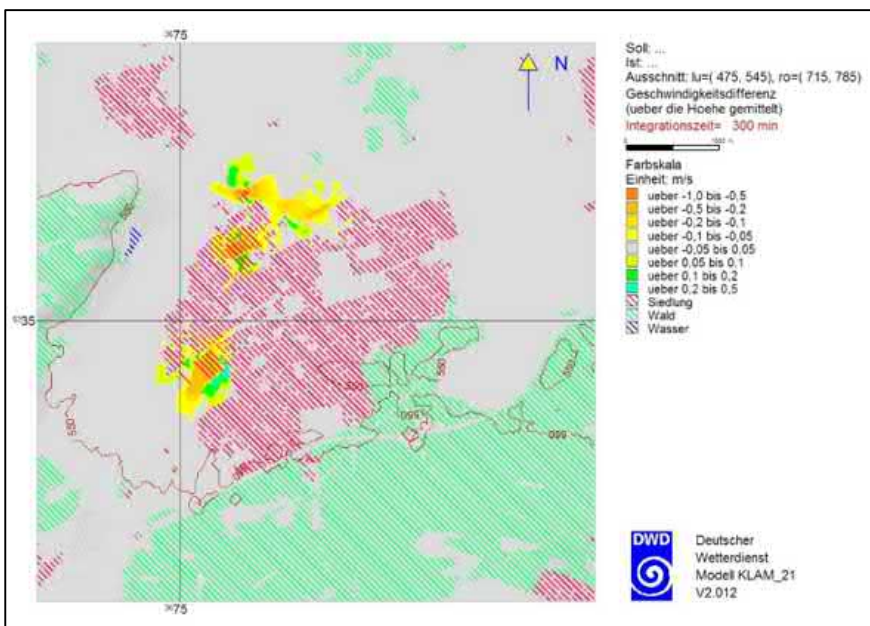


Abbildung 37: Differenz Fließgeschwindigkeit zwischen Soll und Ist nach 300 Minuten

Betrachtet man die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft (Höhenmittel über die Kaltluftschicht), so wird sie über dem bebauten Gelände aufgrund der größeren Rauigkeit verringert. Teilweise gilt das auch für die Staubereiche vor dem Hindernis und die Gebiete im Lee der Hindernisse. Bezüglich der Differenz zwischen Soll- und Ist-Zustand sind Gebiete mit Geschwindigkeitsabnahme in Gelb- und Orangetönen dargestellt. Durch die Hinderniswirkung der geplanten Baugebiete werden diese teils auch umströmt. Dadurch können sich die Strömungsgeschwindigkeiten in den Randbereichen etwas erhöhen. Gebiete mit Geschwindigkeitszunahme sind grünlich eingefärbt (Abbildung 36 und Abbildung 37).

Die simulierten Geschwindigkeitsänderungen (Abbildung 36 und Abbildung 37) sind oft nur schwach und auf die Plangebiete sowie umliegenden Bereiche bezogen. Sie erreichen meist 0,1 bis 0,5 m/s, teils auch 0,5 bis 1,0 m/s. Entlang der breiteren Straßenzüge, die in Strömungsrichtung liegen, kann sich die Geschwindigkeit teilweise auch etwas verringern oder erhöhen. Da die Strömungsgeschwindigkeit im Germeringer Norden im Laufe der Nacht zunimmt, haben sich die betroffenen Bereiche dort nach 5 Stunden (300 Minuten) ausgeweitet (Abbildung 37). Die Verhältnisse dauern die Nacht über an. Dabei unterscheiden sich die Darstellungen nach fünf Stunden und nach acht Stunden am Ende der idealisierten Strahlungsnacht nur noch wenig.

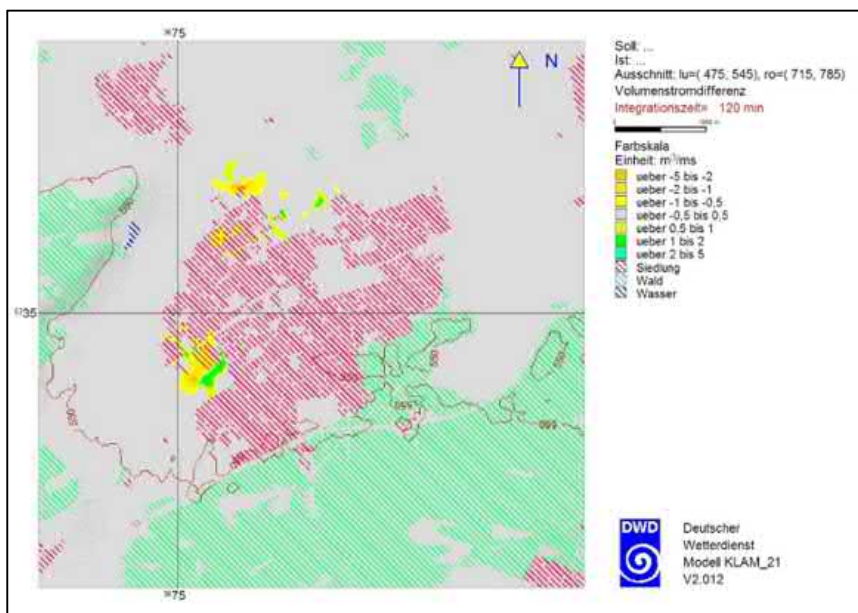


Abbildung 38: Differenz Kaltluft-Volumenstrom(dichte) zwischen Soll und Ist nach 120 Minuten

Im Unterschied dazu sind die Differenzen bei der Kaltluft-Volumenstromdichte zunächst geringer und bilden sich zuerst im Gebiet des Kreuzlinger Feldes und ganz im Norden aus (Abbildung 38) und erst später in den anderen Bereichen. Erst mit dem Anwachsen der Kaltfluthöhe und im Norden auch der Fließgeschwindigkeit nehmen die Effekte zu. Mit zunehmender Dauer der Nacht ähnelt dann die Darstellung der Kaltluft-Volumenstromdichte der für die Fließgeschwindigkeit.

Etwa 300 Minuten nach Simulationsstart (Abbildung 39 auf der Folgeseite) ist die Volumenstromdifferenz (die Differenz der Volumenstromdichte) zwischen Soll- und Istzustand jeweils über den Baugebieten am größten (orange Farbe). Eine Veränderung ergibt sich sonst vor allem in der Umgebung. Dabei sind die Werte jeweils im Staubereich der Kaltluft (im Luv) und in Strömungsrichtung hinter dem Hindernis (im Lee) etwas reduziert (Ocker- bis Gelbtöne). In den Randbereichen resultiert als Folge des Umströmens eine Kanalisierung und damit eine Zunahme der Volumenstromdichte (grünliche bis bläuliche Töne). Am Ende der Simulation nach acht Stunden ergibt sich ein ähnliches Bild.

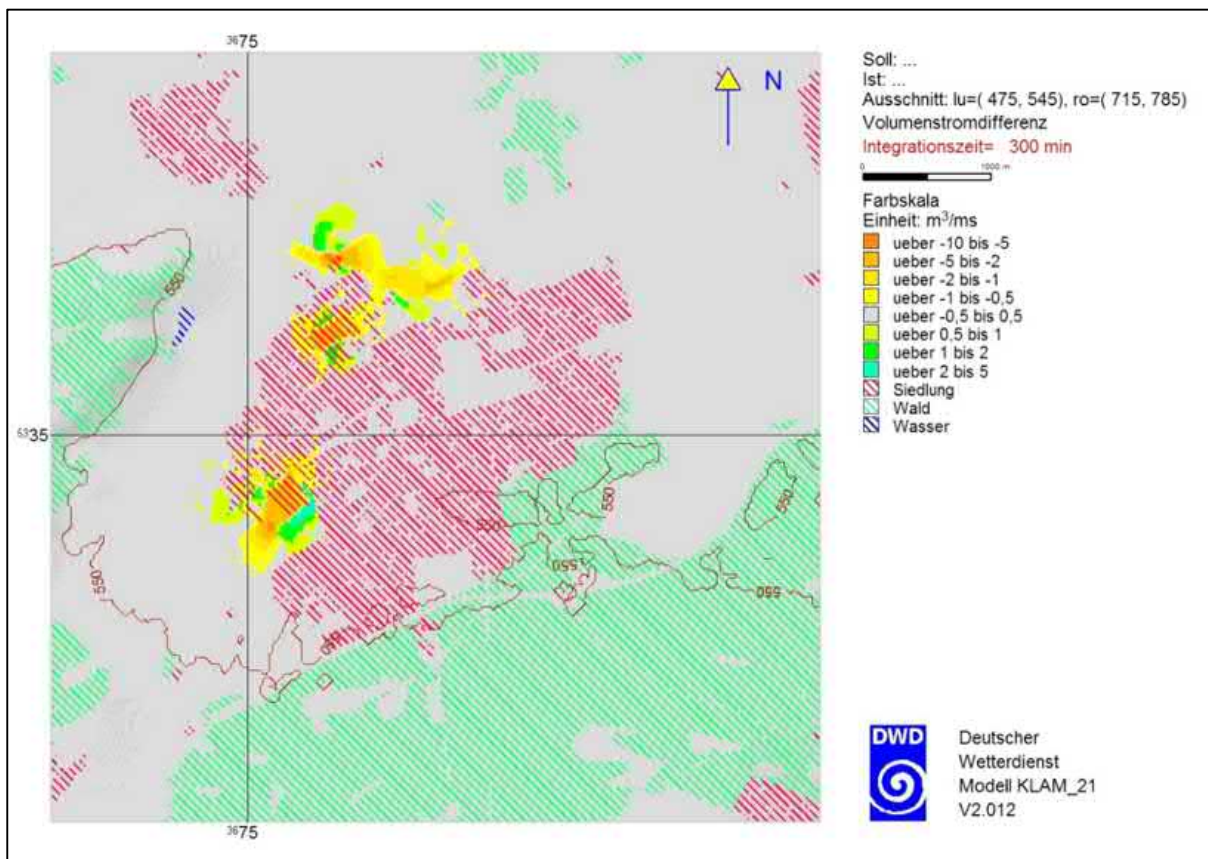


Abbildung 39: Differenz Kaltluft-Volumenstrom(dichte) zwischen Soll und Ist nach 300 Minuten

Im Gebiet des **Kreuzlinger Feldes** (Abbildung 39 und Abbildung 40 links) verringert sich die Kaltluft-Volumenstromdichte nach den Berechnungen vor allem im Luv südwestlich und über dem Gebiet um ca. 2 bis 5 m³/ms. Am südwestlichen Rand sind es örtlich auch 5 bis 10 m³/ms. Die berechneten Auswirkungen im Lee sind geringer.

Durch das Umströmen der Bebauung als Hindernis und eine Kanalisierung der Strömung nimmt die berechnete Kaltluft-Volumenstromdichte in den Randbereichen südöstlich um 0,5 bis 5 m³/ms zu (grünliche bis bläuliche Einfärbung). Dieser Effekt tritt teilweise auch am nordwestlichen Rand des Plangebietes (S-Bahntrasse, Landsberger Straße) und dem angrenzenden Stadtrand auf.

Im Gebiet westlich des Starnberger Weges sind die simulierten Effekte geringer, da der Ist-Zustand im verwendeten Landnutzungskataster bereits mit Klasse 5 berücksichtigt wurde. Dadurch sind die Unterschiede zu der für den Soll-Zustand angenommenen Nutzungsklasse 1 - dichte Besiedlung geringer und damit auch die berechneten Auswirkungen der Veränderung. Für das Gelände der Freiwilligen Feuerwehr Unterpfeffenhofen ändert sich die Flächennutzung zwischen Ist- und Sollzustand dagegen nicht.

Für den Bereich **Hausäcker** (Abbildung 39 und Abbildung 40 rechts) wurde untersucht, was bei einer Nutzungsänderung passieren könnte. Dabei würden sich die größten Änderungen auf der

jetzigen Freifläche ergeben. Im Luv und Lee sind die berechneten Differenzen geringer. Die betroffene Fläche wäre im Luv ebenfalls größer als im Lee. Südlich und nördlich würde die Volumenstromdichte etwas zunehmen.

Bei dem Baugebiet „**Südlich Hochrainweg**“ im Norden ergibt sich, als Folge der höheren Windgeschwindigkeiten in diesem Abschnitt, ein schmaler langgezogener Bereich im Luv und Lee mit einer Abnahme der Kaltluft-Volumenstromdichte. Im Kernbereich werden ca. 5 bis 10 m³/ms erreicht. In den angrenzenden Gebieten nimmt die Volumenstromdichte zu. Besonders ausgeprägt ist dies im Norden.

Für das **neue Briefverteilzentrum** und dessen Umgebung ändert sich die simulierte Kaltluft-Volumenstromdichte gebietsweise nur um 1 bis 2 m³/ms. Örtlich treten auch Differenzen von 2 bis 5 m³/ms auf. In den Randbereichen, vor allem südlich, ergibt sich lokal eine leichte Zunahme.

Die Größenordnung der Veränderung muss in Relation zur Stärke der Volumenströme im Ist-Zustand gesehen werden: Bei einer Volumenstromdichte von ca. 20 bis 50 m³/ms, wie über dem Kreuzlinger Feld nach 480 Minuten, entspräche eine Differenz zwischen Soll- und Ist-Zustand von 2 bis 5 m³/ms etwa 10 Prozent.

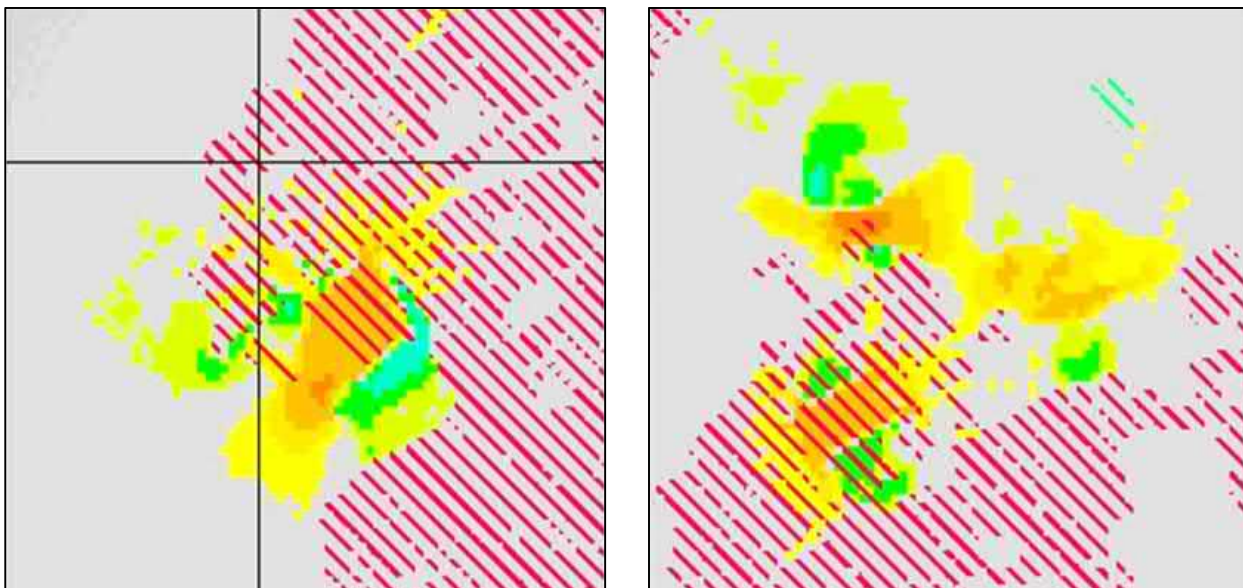


Abbildung 40: Ausschnitt Gebiet 1 (links), Gebiete 2-4 (rechts), Differenz Kaltluft-Volumenstromdichte zwischen Soll und Ist nach 480 Minuten, Farbskala wie Abbildung 39

Die Flächennutzung (schraffiert) ist, wie bei den Abbildungen zuvor, wegen der besseren Übersichtlichkeit nur für Wald, Wasser und Siedlungsflächen (Nutzungsklasse 3, 9 sowie 1 und 2) dargestellt. Die Nutzungsklasse 5 (Gewerbe- und Industrieflächen) ist dagegen nicht abgebildet.

7 Zusammenfassung

Für die Stadt Germering wurden geplante bzw. angenommenen Bebauungs- und damit Flächen-nutzungsänderungen in Teilbereichen untersucht. Die Auswirkungen auf das Klima sind vor allem im lokalen Umfeld zu erwarten. Diese stellen sich insbesondere bei windschwachen wolkenarmen Hochdruckwetterlagen mit kräftiger Sonneneinstrahlung am Tage und stärkerer Ausstrahlung in der Nacht ein, da sich dann die örtlichen Gegebenheiten wie Flächennutzung und Relief dem Klima stärker aufprägen.

Im thermischen Bereich sind die Auswirkungen bei den derzeit landwirtschaftlich genutzten Flächen in der Nacht größer als am Tage. Nachts gehen diese Flächen im Modell als Kaltluftproduktionsflächen verloren bzw. werden verkleinert. Die Auswirkungen auf die nächtliche Kaltluftverhältnisse in einer idealisierten Strahlungsnacht wurden mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des DWD sowohl für den Ist- als auch für den angenommenen Sollzustand simuliert. Die Produktion der nächtlichen Kaltluft insgesamt wird etwas verringert mit Auswirkungen vor allem auf die Plangebiete und das lokale Umfeld (siehe Abbildungen).

Außerdem stellt die geplante Bebauung ein Strömungshindernis dar, an dem sich die Kaltluftströme teilweise aufstauen, es aber auch umströmen und mit zunehmender Dicke der Kaltluftschicht überströmen. Durch die größere Rauigkeit der bebauten Flächen werden zudem die Windgeschwindigkeiten über der Stadt abgebremst.

Auf regionaler Ebene stellt sich bei windschwachen Strahlungswetterlagen in der geeigneten Münchner Ebene nachts eine südliche bis südwestliche Strömung ein. Die Stadt Germering wird als größeres Strömungshindernis im Wesentlichen umströmt. Die Hauptkaltluftströmungen führen nicht durch das Stadtgebiet hindurch, sondern entsprechend Relief und Flächennutzung im Bogen um die Stadtfläche herum.

Im Laufe der Nacht dringt die Kaltluft von den Rändern her auch in das Stadtgebiet ein Stück weit ein bzw. überströmt die Bebauung mit zunehmend anwachsender Kaltluflhöhe. Daher ergeben sich für die Teilflächen am südwestlichen und westlichen Stadtrand nach den Modellrechnungen vorwiegend südwestliche (südliche bis westliche) Winde, im Germeringer Norden anfangs auch westliche bis nördliche Strömungen. Mit dem Voranschreiten der Nacht wird das komplette Stadtgebiet dann von der Kaltluft vielfach überströmt, meist mit schwachen südwestlichen Winden.

Nach den Modellrechnungen sind die **Auswirkungen** der Flächennutzungsänderungen **auf die nächtliche Abkühlung** zunächst vor allem auf die betroffenen Flächen und die angrenzenden Bereiche beschränkt (s. Abbildung 33 und Abbildung 34). Im Laufe der Nacht breitet sich der Wirkungsradius aus, die Effekte klingen aber ab (Abbildung 35) und sind am Ende der Nacht nur noch gering. Die Wirkung des Kaltlufttransportes aus dem Umland überwiegt mit zunehmender Andauer der Nacht die der Kaltluftproduktion vor Ort.

Bezüglich der **Änderung der Strömungsgeschwindigkeit** dauern die Veränderungen die Nacht über an. Sie sind meist auf den Nahbereich und die umgebenden Gebiete begrenzt (s. Abbildung 36 und Abbildung 37). Die Geschwindigkeiten werden in den Baugebieten und im Umfeld vielfach



etwas abgeschwächt, insbesondere im Luv und Lee der Plangebiete relativ zur Strömungsrichtung. Bei einem Umströmen sind sie in den Randbereichen teils auch verstärkt. Die berechnete Stärke des Betrags der Veränderung ist meist $\leq 0,5$ m/s. örtlich wurden auch 0,5 bis 1,0 m/s simuliert.

Für die Beurteilung der Durchlüftung und den Transport von Kaltluft wird häufig der **Kaltluft-Volumenstrom** betrachtet. Er kombiniert den Kälteinhalt der Kaltluftsäule (Höhe der Kaltluftschicht) mit der Strömungsgeschwindigkeit. Er gibt an wie viel Kubikmeter Luft pro Zeiteinheit eine bestimmte Fläche, einen bestimmten Querschnitt durchströmen und hat damit die Einheit m^3/s . Im Modell wird der Volumenstrom für die einzelnen Gitterzellen des Rechengitters über die gesamte Höhe der Kaltluftschicht berechnet. Unter Berücksichtigung der Größe der Gitterzellen erhält man eine Volumenstromdichte (in m^3/ms).

Die Ergebnisse sind ähnlich wie für die zuvor betrachteten Größen. Die Berechnungen ergeben kräftige Kaltluftströmungen, die vor allem im Westen und Norden im Bogen um Germering herumführen und im Laufe der Nacht noch an Stärke zunehmen. Anfangs gibt es im Germeringer Norden mit der von den Stadträndern eindringenden Kaltluft schwache westliche bis nördliche Luftströmungen. Im Laufe der Nacht gewinnt der regionale Kaltlufttransport aus dem Hinterland an Bedeutung. Dadurch sind dann über der Stadt allgemein südliche bis südwestliche, örtlich auch westliche Komponenten vorherrschend. Die Strömung wird durch die städtische Bebauung abgebremst. Im Lee, in den östlichen Stadtteilen, ist die Kaltluft-Volumenstromdichte geringer, über den größeren Freiflächen teilweise etwas größer.

Für die geplante bzw. angenommene Bebauung wurde die Berechnungen für den Modell-Sollzustand wiederholt. Auch hier kommt es, ähnlich wie bei den anderen Größen, zu einer Verringerung der Kaltluft-Volumenstromdichte über den Hindernissen sowie im Staubereich der Kaltluft (in deren Luv) und teilweise auch hinter dem Hindernis im Lee. Durch ein Umströmen und eine Kanalisierung erhöht sich auch die Kaltluft-Volumenstromdichte in den Randbereichen. Die Auswirkungen treten vor allem im Nahbereich und den angrenzenden Gebieten auf (siehe Abbildung 38 bis Abbildung 40). Die Größenordnung der Veränderung wird auf rund 10 bis 20 Prozent abgeschätzt, örtlich sind aber auch höhere oder tiefere Werte möglich.

Daher nimmt die **Durchlüftung** innerhalb der Planungsgebiete aufgrund der Bebauung ab, betroffen sind teilweise auch die angrenzenden Bereiche. Deshalb sollte auf die Freihaltung von Durchlüftungsschneisen geachtet werden.

Der Einfluss der geplanten Bebauungsänderungen in den **Teilgebieten 5 und 6** konnte bei den Modellrechnungen nicht berücksichtigt werden, da sich die Zuordnung zu einer der Flächennutzungsklassen nicht ändern würde. Aber auch hier sind lokalklimatische Auswirkungen möglich, da sich Parameter wie z. B. der Versiegelungsgrad, der Grünflächenanteil sowie die Anordnung, Höhe und Geometrie der Gebäude und damit auch die thermischen Eigenschaften sowie die aerodynamische Rauigkeit verändern würden.

Am Tage heizen sich bebaute Flächen stärker auf als vegetationsbestandene Bereiche. Das besitzt vor allem bei sommerlichen Hitzeperioden Bedeutung, die im Rahmen des Klimawandels in Zukunft auch im Großraum München weiter zunehmen (MÜHLBACHER et al., 2020).



Die Auswirkungen der Flächennutzungsänderungen auf die Versickerung und Speicherung der **Niederschläge**, die Verdunstung und Luftfeuchte lassen sich mit dem Modell KLAM_21 nicht bestimmen. Allgemein kann man aber sagen, dass der Versiegelungsgrad möglichst gering sein sollte, da versiegelte Flächen keine Versickerung des Niederschlagswassers und keine Feuchteabgabe aus dem Boden oder der Vegetation an die Luft ermöglichen. Auch für Starkregenereignisse, die im Zuge des Klimawandels wahrscheinlich weiter zunehmen, spielen wenig versiegelte Flächen, wasserdurchlässige Oberflächen sowie Versickerungs- und Wasserspeichermöglichkeiten eine wichtige Rolle.

Insgesamt können die lokalklimatischen Auswirkungen der geplanten Baugebiete durch **planerische Maßnahmen** abgemildert werden. Hierzu wird auf die Aussagen des DWD-Gutachtens von 1998 (DWD, 1998) verwiesen.

Grundsätzlich können folgende allgemeine Empfehlungen gegeben werden. Die thermische Ausgleichsfunktion kann durch eine entsprechende Be- und Durchgrünung verbessert werden. Für die Durchlüftung spielen die Bebauungsdichte sowie die entsprechende Anordnung von Gebäuden, Straßen, Grünflächen und Bäumen eine Rolle. Speziell frei gehaltene, durchgehende Durchlüftungsachsen in Richtungen der häufigen Windrichtungen können, insbesondere bei windschwachen Verhältnissen, die Belüftung zusätzlich verbessern. Auch riegelartige Hindernisse quer zur vorherrschenden Luftströmung sollten vermieden werden. Niedrigere Gebäude können leichter überströmt werden. Auch durch einen geringeren Versiegelungsgrad und z. B. Dachbegrünung kann die Stärke der lokalklimatischen Auswirkungen reduziert werden.

Nach der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 (VDI, 2015) werden folgende allgemeine planerische Maßnahmen zur Begrenzung der bioklimatischen Auswirkungen der Flächennutzung als Gewerbe- bzw. Industriegebiet angeführt, die auch für die geplanten neuen Wohngebiete gelten (emissionsarme Betriebe sind in den Wohngebieten nicht relevant):

- Dach- und Fassadenbegrünung
- Begrünung von Parkplätzen
- Flächenbegrünung und Grünvernetzung
- Entsiegelung, hier ein möglichst geringer Versiegelungsgrad
- Durchgängige Belüftungsstrukturen erhalten/schaffen
- Beschränkung auf emissionsarme Betriebe
- emissionsarme Energieversorgung, z. B. Fernwärme.

Für das Klimatop der Stadtrandgebiete gilt zusätzlich (VDI, 2015):

- die Grünflächenvernetzung zum Freiland zu erhalten oder zu schaffen
- hohe geschlossene Bauformen und verriegelnde Bebauung zum Umland zu vermeiden,

(Dabei sind Klimatope räumliche Einheiten mit ähnlichen mikroklimatischen Bedingungen (VDI, 2015))

Für das Klimatop des Stadtklimas (hier neue Wohngebiete) wird zusätzlich empfohlen (VDI, 2015):

- Blockentkernung- und -begrünung
- hohe Verkehrsdichte und enge Straßenschluchten vermeiden
- Verkehrsberuhigung anstreben.

In den Bebauungsplänen bzw. Planentwürfen für die betrachteten Gebiete sind eine Reihe von Maßnahmen zur Grünordnung bzw. zum Klima- und Niederschlagsmanagement enthalten (GERMERING, 2021).



8 Literatur

BAYFORKLIM, 1996: Klimaatlas von Bayern. Bayerischer Klimaforschungsverbund. Verlag Hanns Linder München.

DWD, 1997: Amtliches Gutachten. Zwischenbericht über die Windmessungen in Germering. Deutscher Wetterdienst München.

DWD, 1998: Amtliches Gutachten über die Windmessungen in Germering. Deutscher Wetterdienst München.

GERMERING, 2021: Homepage der Stadt Germering. <https://www.germering.de>

KING, E., 1973: Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefahr durch Straßenbauten. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 130, Offenbach am Main.

KÖPPEN, W., 1923: Die Klimate der Erde, Grundriss der Klimakunde. Berlin, Verlag de Gruyter.

MICHLER, G., 1994: Geographische Landesaufnahme 1:200 000. Naturräumliche Gliederung. Blatt 181 München. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Bonn.

MEYNEN, E., J. SCHMITHÜSEN, J. GELLERT, E. NEEF, H. MÜLLER-MINY UND J. H. SCHULTZE., 1962: Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung. Selbstverlag Bad Godesberg.

MÜHLBACHER, G., M. KOSSMANN, K. SEDLMEIER UND K. WINDERLICH, 2020: Stadtklimatische Untersuchung der sommerlichen Temperaturverhältnisse und des Tagesgangs des Regionalwindes („Alpines Pumpen“) in München. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 252, Offenbach am Main.

SIEVERS, U., 2005: Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 227, Offenbach am Main.

VDI, 2003: VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5: Umweltmeteorologie – Lokale Kaltluft. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b.

VDI, 2015: VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1: Umweltmeteorologie – Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lage des Untersuchungsgebietes, der Stadt Germering, des Rechengebietes (blauer Rahmen) und der Windmessstationen des DWD-Messnetzes (gelbe Punkte)	4
Abbildung 2:	Lage der Stadt Germering.....	5
Abbildung 3:	Verteilung der Geländehöhen im Untersuchungsgebiet und dessen Umgebung	6
Abbildung 4:	Germering Flächennutzung, Lage der betrachteten Teilflächen (rote Zahlen)	7
Abbildung 5:	Blick nach Nordosten, Osten und Südosten auf das Kreuzlinger Feld (Panoramaaufnahme, Foto DWD, 2021).....	8
Abbildung 6:	Bebauungsplanentwurf, Planzeichnung "Kreuzlinger Feld - 1. BA, Wohnen" (links) und "Kreuzlinger Feld 2. BA - Sondergebiet Einzelhandel mit Wohnen und Gemeinbedarf Schule und KiTa" (rechts), Fassung vom 19.01.2021 (Quelle: Stadt Germering).....	9
Abbildung 7:	Rahmenplan. Rahmenplanung „Kreuzlinger Feld“ der Stadt Germering vom 25.09.2018 (Quelle: Stadt Germering)	9
Abbildung 8:	Vorhabenbezogener Bebauungsplan mit Grünordnung „Germeringer Norden 2. BA Briefverteilzentrum – Post“ Stand 07.07.2020 (Quelle: Stadt Germering).....	10
Abbildung 9:	Vorhaben- und Erschließungsplan. Freiflächenplanung. „Germeringer Norden 2. BA Briefverteilzentrum – Post“, Stand 07.07.2020 (Quelle: Stadt Germering).....	10
Abbildung 10:	Blick von Nordwesten auf den Ortsrand mit DHL-Halle (gelbes Gebäude), Plangebiet Briefverteilzentrum westlich (rechts) daneben (Foto, DWD 2021)	11
Abbildung 11:	In Bau befindliche Wohngebäude „Südlich Hochrainweg“ (Foto DWD, 2021)	11
Abbildung 12:	Bebauungsplan mit Grünordnung „IG28C“ (Südlich Hochrainweg) in der Fassung vom 15.10.2019, Planzeichnung (Quelle: Stadt Germering)	12
Abbildung 13:	Auszug Flächennutzungsplan, Stadt Germering, Grünfläche Hausäcker (Quelle: Stadt Germering).....	13
Abbildung 14:	Ansicht Hausäcker, Blick nach Osten (Foto DWD, 2021).....	13

Abbildung 15: Auszug Vorentwurf zum B-Plan „Max-Reger-Straße“ Stand 25.09.2018 (Quelle: Stadt Germering).....	14
Abbildung 16: Grünfläche zwischen Max-Reger-Straße und Landsberger Straße, Blick nach Nordosten (Foto DWD, 2021).....	14
Abbildung 17: B-Plan IG 32 für das nördliche Bahnhofsareal, östlich und westlich der Hirschauer Straße, Stand 16.03.2021 (Quelle: Stadt Germering).....	15
Abbildung 18: Bebauungskonzept „ehemals Grollmus“, Bestand und Perspektive, Stand 14.07.2020 (Quelle: Stadt Germering)	15
Abbildung 19: Stärkewindrosen in Prozent der Jahresstunden für 2006-2015 für die DWD-Stationen München-Stadt und Starnberg-Perchting	18
Abbildung 20: Schematische Darstellung der alpinen Regionalwindzirkulation (Quelle DWD).....	19
Abbildung 21: Geländehöhen und Höhenlinien im Rechengebiet sowie Lage Ausschnitt A ...	26
Abbildung 22: Ist-Zustand Flächennutzung im Rechengebiet sowie Lage Ausschnitt A	26
Abbildung 23: Kaltfluthöhe/Strömungsfeld 120 Minuten (2 Stunden) nach Simulationsstart (komplettes Rechengebiet)	28
Abbildung 24: Kaltfluthöhe/Strömungsfeld 60 Minuten nach Simulationsstart für Ausschnitt A sowie Lage Ausschnitt B (roter Rahmen)	29
Abbildung 25: Kaltfluthöhe/Strömungsfeld 120 Minuten (2 Stunden) nach Simulationsstart....	30
Abbildung 26: Kaltfluthöhe/Strömungsfeld 180 Minuten (3 Stunden) nach Simulationsstart....	30
Abbildung 27: Kaltfluthöhe/Strömungsfeld 300 Minuten (5 Stunden) nach Simulationsstart....	31
Abbildung 28: Fließgeschwindigkeit der Kaltluft (Höhenmittel) nach 20 und 60 Minuten.....	32
Abbildung 29: Fließgeschwindigkeit (Höhenmittel) nach 180 und 480 Minuten.....	33
Abbildung 30: Kaltluft-Volumenstrom(dichte) 120 Minuten nach Simulationsstart.....	34
Abbildung 31: Kaltluft-Volumenstrom(dichte) 240 Minuten nach Simulationsstart.....	35
Abbildung 32: Kaltluft-Volumenstrom(dichte) 420 Minuten nach Simulationsstart.....	35
Abbildung 33: Differenz Kaltfluthöhe zwischen Soll- und Istzustand nach 20 Minuten	36
Abbildung 34: Differenz Kaltfluthöhe zwischen Soll- und Istzustand nach 60 Minuten	37

Abbildung 35: Differenz Kaltfluthöhe Soll- minus Istzustand 180 Minuten nach Simulationsstart	37
Abbildung 36: Differenz Fließgeschwindigkeit zwischen Soll und Ist nach 50 Minuten.....	38
Abbildung 37: Differenz Fließgeschwindigkeit zwischen Soll und Ist nach 300 Minuten.....	38
Abbildung 38: Differenz Kaltluft-Volumenstrom(dichte) zwischen Soll und Ist nach 120 Minuten	39
Abbildung 39: Differenz Kaltluft-Volumenstrom(dichte) zwischen Soll und Ist nach 300 Minuten	40
Abbildung 40: Ausschnitt Gebiet 1 (links), Gebiete 2-4 (rechts), Differenz Kaltluft-Volumenstromdichte zwischen Soll und Ist nach 480 Minuten, Farbskala wie Abbildung 39.....	41

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittlere Anzahl windschwacher Strahlungsnächte sowie prozentualer Anteil an allen Nächten, München-Flughafen (2010-2019)	20
Tabelle 2: Zuordnung Modellparameter Rauigkeitslänge, Höhe der Bebauung bzw. Vegetation und Kälteproduktionsrate zu Landnutzungsklassen in KLAM_21 ...	23