

Auftraggeber: GEG Rheinland
Grundstücksentwicklungsgesellschaft mbG & Co. KG
Dillenburger Str. 91
51105 Köln

**Klimagutachten
für das Bebauungsplangebiet
„Grauenhofer Weg/Stettiner Straße“
in Aachen**

Projekt-Nr.: 22-06-21-FR

Umfang: 44 Seiten

Datum: 1. Juni 2023

Bearbeiter: Dr. Rainer Röckle, Diplom-Meteorologe
Dr. Tobias Gronemeier, M.Sc. Meteorologie

iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG
Eisenbahnstraße 43
79098 Freiburg
Tel.: 0761/ 202 1662
Fax: 0761/ 202 1671
E-Mail: roeckle@ima-umwelt.de

Inhaltsverzeichnis

1	SITUATION UND AUFGABENSTELLUNG	3
2	EINFÜHRUNG	4
2.1	LOKALKLIMATISCHE VERHÄLTNISSE	4
2.1.1	<i>Klimaatlas NRW</i>	4
2.1.2	<i>Weitere Untersuchungen</i>	6
2.1.3	<i>Strömungsverhältnisse</i>	7
2.1.4	<i>Kaltluftabflüsse</i>	8
2.1.5	<i>Klimawandel</i>	8
2.1.6	<i>Lufthygienische Belastung</i>	8
3	STANDORT UND ÖRTLICHE GEGEBENHEITEN	9
4	PLANUNG	10
5	VERWENDETE METHODEN UND EINGANGSDATEN	12
5.1	DAS KALTLUFTABFLUSSMODELL DFM	12
5.2	DAS MIKROSKALENMODELL PALM-4U	12
5.3	EINGANGSDATEN	13
6	ERGEBNISSE DER MESOSKALIGEN KALTLUFTABFLUSSMODELLIERUNG	15
7	ERGEBNISSE DER MIKROSKALIGEN MODELLIERUNG	21
7.1	BESCHREIBUNG DER BESTANDSSITUATION (SIMULATION BESTAND)	21
7.2	BESCHREIBUNG DER ÄNDERUNGEN (SIMULATION PLANFÄLLE)	21
8	PLANUNGSHINWEISE ZUR MINDERUNG NACHTEILIGER AUSWIRKUNGEN	23
9	ZUSAMMENFASSUNG	25
10	LITERATUR	27
11	ANHANG	28

1 Situation und Aufgabenstellung

Die GEG Rheinland Grundstücksentwicklungsgesellschaft mbH & Co. KG plant die bislang landwirtschaftlich genutzten Freiflächen im Bebauungsplangebiet „Grauenhofer Weg/Stettiner Straße“ in Aachen Ortsteil Driescher Hof zu bebauen.

Eine Bebauung geht mit Versiegelung von Grünflächen und der Errichtung von Rauigkeitselementen einher. Dadurch ergeben sich zum einen Auswirkungen auf die Strahlungsbilanz und die thermischen Verhältnisse, zum anderen auf die Durchlüftung, die infolge der Hinderniswirkung der Bebauung reduziert wird.

Neben der Änderung der lokalklimatischen Verhältnisse im Plangebiet selbst, sind auch Auswirkungen auf die Nachbarschaft möglich. Eine Bewertung der Auswirkungen hängt nicht nur von der Intensität der möglichen Effekte, sondern auch von der bereits vorhandenen Belastungssituation ab.

Gunstfaktoren einer Freifläche sind die geringeren Oberflächen- und Lufttemperaturen, die nächtliche Kaltluftproduktion bei wolkenarmen Verhältnissen und die gute bodennahe Durchlüftung. Auch hinsichtlich der Klimavielfalt kann eine Grünfläche eine Rolle spielen.

Die Auswirkungen einer geplanten Bebauung des Plangebiets auf die lokalklimatischen Verhältnisse werden mittels Modellsimulationen bei einer austauscharmen Wetterlage mit thermischer Belastung untersucht.

Ferner sind die Auswirkungen zweier unterschiedlicher Bebauungsvarianten zu vergleichen.

2 Einführung

2.1 Lokalklimatische Verhältnisse

2.1.1 Klimaatlas NRW

Vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) wurde ein Klimaatlas für ganz NRW herausgegeben (www.klimaatlas.nrw.de). Hier finden sich auch Grundlagenkarten für den Raum Aachen.

In Abbildung 2-1 sind die Klimatope im weiteren Umfeld der Planung dargestellt. Klimatope sind räumliche Einheiten, die mikroklimatisch einheitliche Gegebenheiten aufweisen. Das Mikroklima wird vor allem durch die Faktoren Flächennutzung, Bebauungsdichte, Versiegelungsgrad, Oberflächenstruktur, Relief sowie Vegetationsart beeinflusst (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015)).

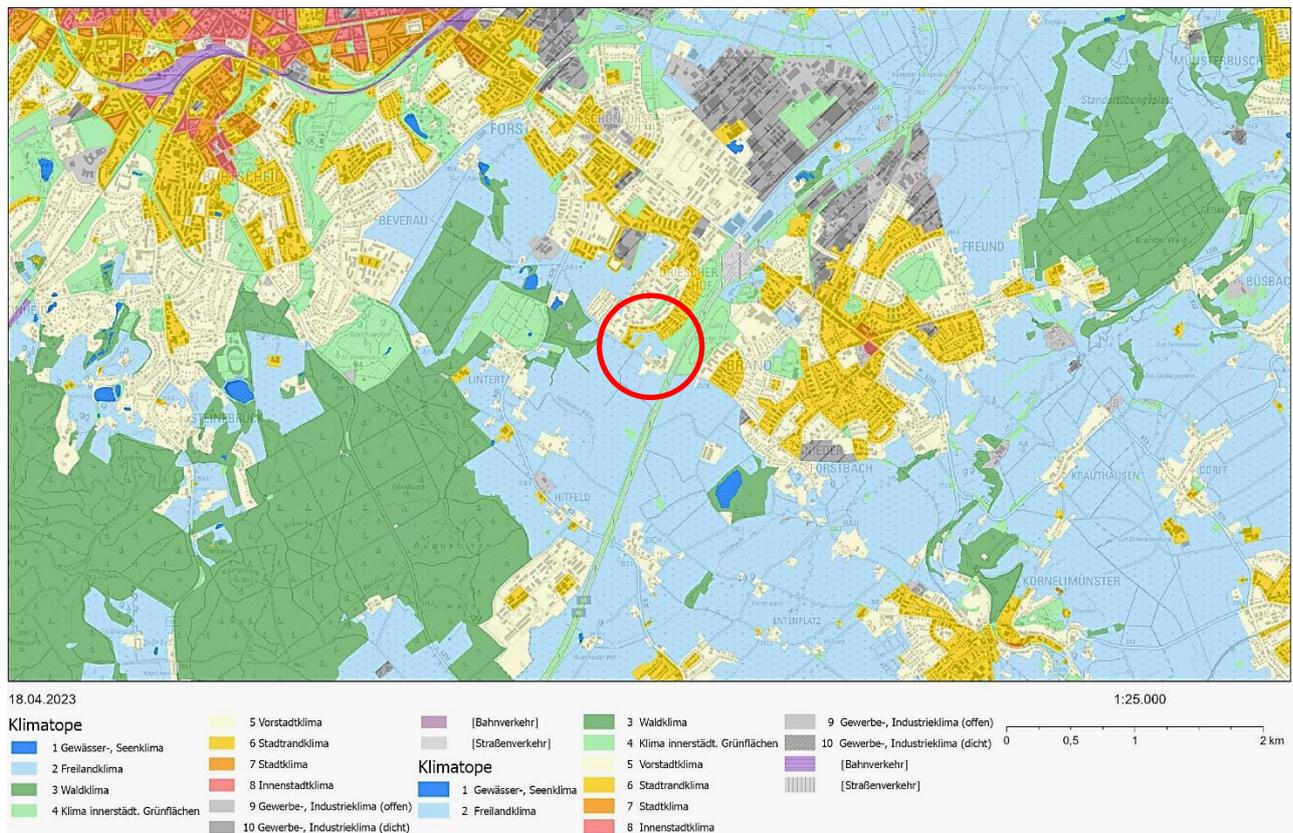


Abbildung 2-1: Klimatopkarte. (Quelle: Klimaatlas NRW, Herausgeber: LANUV NRW unter Verwendung von Geobasisdaten der Landesvermessung Bezirksregierung Köln, Abt. 7 GEObasis.nrw)

Das Plangebiet gehört zum Klimatop „Freilandklima“, die im Norden angrenzende Wohnbebauung zum Typ „Stadtrandklima“. Die weitere umliegende Bebauung wurde als „Vorstadtklima“ eingestuft. Diese Kategorisierung macht nur Aussagen zu den sich in typischen Nutzungsstrukturen entwickelnden Kleinklimaten.

Wesentlich interessanter ist die Karte mit Darstellung der thermischen Situation der Siedlungsbe-
reiche und der Bewertung der Ausgleichsfunktion der Grünflächen (vgl. Abbildung 2-2). Demnach besitzt die überplante Fläche eine „mittlere thermische Ausgleichsfunktion“. Die angrenzende Wohnbebauung weist eine „günstige thermische Situation“ auf.

Der nächtliche Kaltluftabfluss (zweite Nachthälfte, 4 Uhr) und die nächtliche Überwärmung sind in Abbildung 2-3 dargestellt. Die Kaltluft strömt von Südsüdost über das Plangebiet hinweg. Der Volumenstrom wird mit knapp 2.800 m³/s angegeben. Er bezieht sich aber im Gegensatz zur VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003) auf eine 100 m breite durchströmte Fläche und nicht auf einen Meter.

Die belüfteten Siedlungsbereiche weisen „keine nächtliche Überwärmung“ auf.

Abbildung 2-4 zeigt einen Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte für die Regionalplanung. Das Plangebiet liegt demnach in einer Leitbahn mit „hoher Priorität“. Aufgrund des regionalen Charakters der Ausweisung sind die Ausweisungen stark stilisiert. Leitbahnen sind eigentlich gekennzeichnet durch hindernisarme bzw. hindernisfreie Bereiche. Bei detaillierter Betrachtung müssten Siedlungsbereiche ausgenommen werden und die Konturen auch an die Strömungsrichtung angeglichen werden. Aus unserer Sicht ist diese Karte für die Bauleitplanung nur sehr eingeschränkt verwendbar.

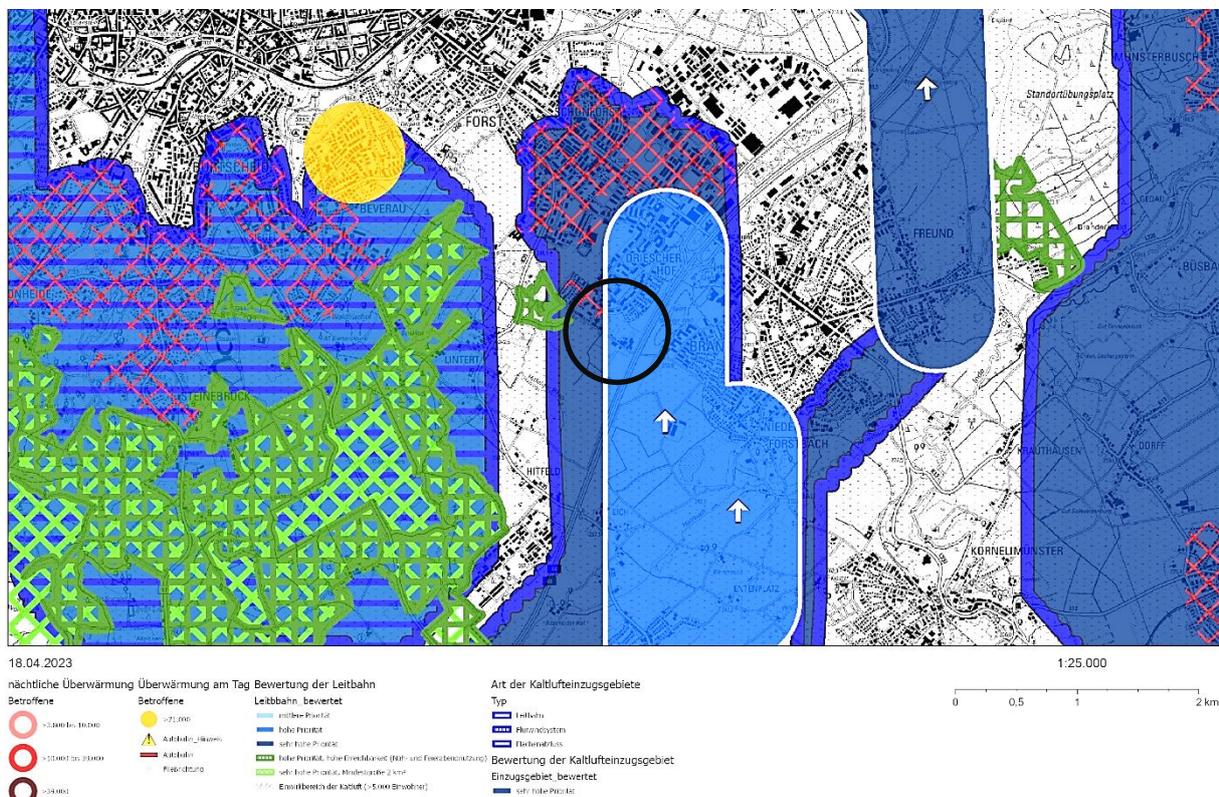


Abbildung 2-4: Bewertung der Leitbahnen. (Quelle: Klimaatlas NRW des LANUV NRW unter Verwendung von Geobasisdaten der Landesvermessung Bezirksreg. Köln, Abt. 7 GEObasis.nrw)

2.1.2 Weitere Untersuchungen

Im Gesamtstädtischen Klimagutachten Aachen vom Oktober 2000 wurde bereits auf das Plangebiet (dort Stettiner Straße genannt) eingegangen. Dort steht:

„Auf Grund seiner Größe und der bereits vorhandenen randlichen Bebauung ist von einer nennenswerten Verbindung zum großen Kaltluftsammler-/durchflussgebiet Grauenhofer Weg (siehe Stellungnahme zum dortigen Bauvorhaben bzw. zu "Adenauerallee") nicht auszugehen. Eine genügend breite Freifläche im Richtung Autobahn A 44 soll nach vorliegenden Unterlagen bestehen bleiben. Von daher bestehen aus klimatologischer Sicht gegen das geplante Bauvorhaben keine Bedenken.“

Im Flächennutzungsplan Aachen 2030 vom 11.05.2020 wird unter „AM-WO-32 – Grauenhofer Weg Variante 2“ dagegen ausgeführt:

5 Klima		
Bestandsaufnahme	Prognose bei Durchführung der Planung	Bewertung
Anpassung an den Klimawandel: Fläche liegt nicht in einem thermisch belasteten Bereich.	Keine Auswirkungen.	Nicht relevant
Gesamtstädtisches Klimagutachten: Flächen mit Freilandklima außerhalb der Talachsen, südwestlicher Teilbereich liegt in einem Kaltlufteinzugsgebiet besonderer Bedeutung. Großräumige Kaltluftbahn außerhalb der Bebauung.	Weitere Verdichtung in einer großräumigen Kaltluftbahn außerhalb der Bebauung. Ausdehnung des Siedlungsklimas auf die Fläche. Mögliche Kumulationseffekte mit weiteren Bauflächen im lokalen Kaltluftsystem möglich.	Erheblich
Empfehlungen zur Vermeidung und Verminderung		
Detailuntersuchung, wie die Bauflächen im lokalen Kaltluftsystem kumulierend auf den vorhandenen Kaltluftstrom wirken. Berücksichtigung der in der Begründung zum FNP Aachen*2030 empfohlenen Maßnahmen innerhalb der Belüftungsbahn Stadtklima. Insbes. aufgelockerte Bebauung, klimaoptimierte Ausrichtung der neuen Baukörper.		
Fazit		
Die Planung ist mit erheblichen Auswirkungen auf das Schutzgut Klima verbunden.		

Nicht ganz nachzuvollziehen ist, dass der südwestliche Teil in einem Kaltlufteinzugsgebiet besonderer Bedeutung liegen soll, das in der Planungsempfehlungskarte zwar so ausgewiesen ist, aber auch bebaute Bereiche beinhaltet, die in der Regel nicht relevant zur Kaltluftbildung beitragen.

2.1.3 Strömungsverhältnisse

Für den Abtransport von thermischen und lufthygienischen Belastungen sind die lokalen meteorologischen Verhältnisse von Bedeutung. Die Windrichtung bestimmt, in welche Richtung die Luft verfrachtet wird. Die Windgeschwindigkeit bestimmt neben den Turbulenzverhältnissen die Durchlüftungsintensität.

In ca. 10 km Entfernung nordöstlich des Plangebiets befindet sich in vergleichbarer Höhenlage die Messstation Aachen-Orsbach des DWD. An dieser Station werden die meteorologischen Verhältnisse seit Mitte 2011 gemessen. Von der IVU GmbH wurde eine „Detaillierte Prüfung der Repräsentativität meteorologischer Daten nach VDI-Richtlinie 3783 Blatt 20 für Ausbreitungsrechnungen nach TA Luft“ (Mai 2023) durchgeführt. Demnach ist die Station Orsbach repräsentativ für den betrachteten Standort. Als langjährig repräsentatives Jahr wurde das Jahr 2012 ermittelt.

Abbildung 2-5 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen an der Messstelle Orsbach für das Jahr 2012. Farblich sind die unterschiedlichen Windgeschwindigkeitsklassen nach TA Luft differenziert. Bei geringeren Windgeschwindigkeiten treten auch östliche Windrichtungen vermehrt auf.

Am häufigsten treten Südwestwinde auf, die häufig mit hohen Windgeschwindigkeiten über 5 m/s verbunden sind.

Die mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund liegt bei 4,6 m/s.

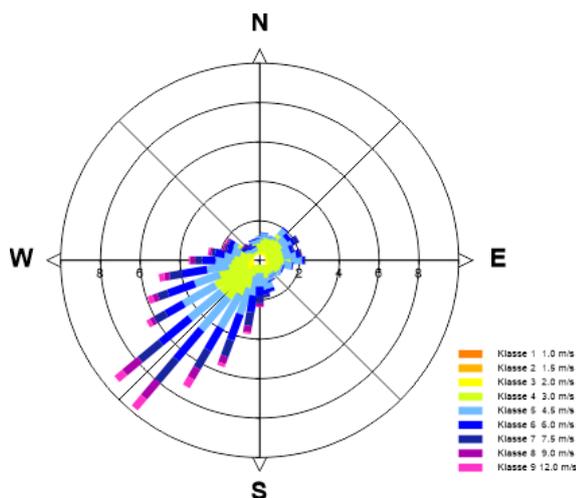


Abbildung 2-5: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen.

2.1.4 Kaltluftabflüsse

Bei Wetterlagen, bei denen die Witterung durch die großräumige Verteilung der Tiefdruckgebiete geprägt ist, herrschen in der Regel gute Austauschbedingungen. Lokal führt im Wesentlichen die Orographie zu Strömungsbeeinflussungen, in Tallagen treten z.B. Kanalisierungen der Strömung auf. Temperaturunterschiede zwischen bebauten und unbebauten Flächen sind vergleichsweise gering.

Hochdruckwetterlagen können dagegen mit geringen übergeordneten Windgeschwindigkeiten und geringer Bewölkung verbunden sein. Bei dieser so genannten autochthonen Wetterlage stellt sich meist ein ausgeprägter Tagesgang der Lufttemperatur ein. Aufgrund des geringen großräumigen Luftaustausches prägen die lokalen topographischen Verhältnisse (sowohl das Geländere relief als auch die Realnutzung) das lokalklimatische Geschehen.

In reliefiertem Gelände bilden sich tagesperiodische Windsysteme aus. In den Tagstunden tal- und hangaufwärtsgerichtete, meist böige Winde, in den Nachtstunden dagegen Kaltluftabflüsse. In Ebenen sind insbesondere nachts nur geringe Strömungen vorhanden. Deshalb zählen Kaltluftabflüsse in gegliedertem Gelände zu den klimatischen Gunstfaktoren einer Region.

Auf die Kaltluftsituation wird in Kapitel 6 ausführlich eingegangen.

2.1.5 Klimawandel

Durch den Klimawandel nimmt die thermische Belastung sowohl tags wie auch nachts weiter zu. An die generelle Erwärmung kann man sich im Laufe der Zeit adaptieren. Problematisch sind dagegen die Hitzewellen, von denen anzunehmen ist, dass diese intensiver werden und länger andauern werden. Diese Belastungen sind lokal nur durch Adaptionmaßnahmen zu mindern. Darauf wird in den Planungshinweisen eingegangen.

2.1.6 Lufthygienische Belastung

Neben den thermischen Belastungen spielt in besiedelten Bereichen die lufthygienische Belastung eine Rolle. Hauptverursacher der bodennahen Luftbelastung ist der Kfz-Verkehr.

Aufgrund des Verkehrsaufkommens ist der Nahbereich der A 44 am höchsten belastet. Aufgrund des Abstands des Plangebiets zur Autobahn und den vorherrschenden Hauptwindrichtungen sind im Bereich des Plangebiets eher leicht erhöhte Belastungen zu erwarten.

Durch den im Süden angrenzenden landwirtschaftlichen Betrieb mit Tierhaltung sind Einwirkungen durch Gerüche nicht ausgeschlossen. Dies wird in einem separaten Gutachten näher untersucht.



Abbildung 3-3: Panorama von nordwestlichen Plangebiet bis zum Grauenhofer Weg.



Abbildung 3-4: Südöstlich der Autobahn.

Während nordwestlich der Autobahnwall sehr markant ist, zeigt sich der Wall von Südosten her eher schwach ausgeprägt. Dafür findet man sehr hohe und dichte Baumbestände entlang der Autobahn (Abbildung 3-4)

4 Planung

Das Plangebiet soll mit Wohnnutzung überplant werden. Für die Schaffung eines neuen Wohnquartiers wurden zwei Planungen ausgearbeitet, welche beide in der Klimanalyse zu betrachten sind.

Planvariante 1 „Cluster“ (Abbildung 4-1) beruht auf einem Entwurf der Stadt Aachen. Die Planung greift die vorhandene Erschließungsstruktur auf und führt diese fort. Die in Cluster unterteilten Bereiche innerhalb des Plangebiets weisen überwiegend drei- bis vierstöckige Wohngebäude auf. Die Gebäude sind teilweise riegelhaft (meist L-förmig) ausgeführt. Der südliche Bereich des Plangebiets ist offen gestaltet.

Planvariante 2 „Höfe“ (Abbildung 4-2) von Cross Architecture verfolgt das Konzept von umschlossenen Innenhöfen als Mittelpunkt der Nachbarschaften. Die Ausführung der Bebauung gestaltet sich kleinteiliger mit zwei- bis fünfgeschossigen Gebäuden, wobei die meisten Gebäude dreigeschossig ausgeführt sind. Durch den Verzicht von riegelhafter Bebauung gestaltet sich der Entwurf offener als die Planvariante 1, ist im südöstlichen Bereich allerdings geschlossener gestaltet als die Variante „Cluster“.

Beide Planfälle beinhalten größere Grünflächen (insges. ca. 17.000 m² Grün- und Freiflächen) und weisen einen vergleichsweise nur geringen Versiegelungsgrad auf.



Abbildung 4-1: Entwurf der geplanten Bebauung für das Plangebiet für die Variante 1 „Cluster“; CROSS Architecture, Stand 25.08.2022.



Abbildung 4-2: Entwurf der geplanten Bebauung für das Plangebiet für die Variante 2 „Höfe“; CROSS Architecture, Stand 25.08.2022.

5 Verwendete Methoden und Eingangsdaten

Bisherige Analysen (z.B. die Stadtklimaanalyse Aachen) zeigen, dass die Kaltluftabflüsse im Plangebiet im Wesentlichen auf übergeordnete Strömungen zurückzuführen sind. Daher ist als Grundlage der Klimaanalyse das großräumige Kaltluftentstehungsgebiet zu erfassen, das für den Untersuchungsbereich maßgebend ist. Diese mesoskalige Betrachtung erfolgt mit dem Kaltluftabflussmodell DFM (Kapitel 5.1) in einer räumlichen Auflösung von 20 m.

Da selbst bei einer Auflösung von 20 m eine geplante Bebauung in ihrem Verbauungsgrad nicht wirklich aufgelöst wird, werden mit dem mikroskaligen Modell PALM-4U (Kapitel 5.2) zusätzlich hochauflösende Simulationen durchgeführt.

Die Grundlagen für die Simulationen wurden aus dem Geoportal NRW¹ und frei zugänglichen Daten für die Gebiete außerhalb der Bundesrepublik Deutschland bezogen (Kapitel 5.3).

5.1 Das Kaltluftabflussmodell DFM

Das Kaltluftabflussmodell DFM ist ein prognostisches Strömungsmodell, das abhängig von Orographie und Landnutzung die Kaltluftverhältnisse (Strömungen und Kaltluftmächtigkeiten) im Laufe einer typischen Strahlungsnacht berechnet.

Das Modell beruht auf Gleichungen, die von Garrett und Smith (1984) hergeleitet wurden. Es beschreibt ein vertikal integriertes Kaltluftabflussmodell.

In einem geländefolgenden Koordinatensystem werden die Erhaltungsgleichungen für Impuls und Masse numerisch gelöst. Die Gleichungen enthalten Terme für Advektion, Schwerebeschleunigung, Reibung an der Erdoberfläche, Einmischen von Luft am oberen Rand der Kaltluft (Entrainment), mesoskalige und großräumige Druckgradienten, Antrieb durch übergeordnete Strömungen, Coriolis-Effekte und horizontale Diffusion.

Eingangsgrößen für das Modell sind die Geländehöhe und landnutzungsabhängige Größen wie der Reibungsbeiwert, der potentielle Temperaturgradient der Kaltluft und ein Höhenzuschlag zur Orographie.

Ausgabegrößen sind die vertikal gemittelten Horizontalkomponenten und die Höhe der fließenden Kaltluft. Daraus lassen sich der lokale Volumenstrom (Produkt aus Kaltluflhöhe und Horizontalgeschwindigkeit) und unter Annahme eines typischen Kaltluftströmungsprofils auch Geschwindigkeiten in vorgegebenen Höhen ableiten.

5.2 Das Mikroskalenmodell PALM-4U

Um die lokalklimatischen Auswirkungen der Planung zu ermitteln, werden hochaufgelöste Modellsimulationen durchgeführt. Mit den Simulationsergebnissen können Aussagen zu den Kaltluftströmungen in der Umgebung des Plangebiets getroffen werden. Dazu wird zunächst der Bestandsfall mit aktueller Bebauung simuliert und anschließend der Planfall betrachtet. Aus der Differenz dieser zwei Simulationen können die Auswirkungen des Planfalls auf das Stadtklima ermittelt werden.

Zur Modellierung kommt das prognostische Mikroskalenmodell PALM-4U (Maronga et al. (2020)) zum Einsatz. Dieses erlaubt detaillierte Aussagen zur stadtklimatischen und bioklimatischen Situation. Das Stadtklimamodell PALM-4U basiert auf dem prognostischen turbulenzauflösenden Grobstruktursimulationsmodell (engl.: Large-Eddy simulation model, LES model) PALM und ist daher in der Lage turbulente atmosphärische Strömungen in hoher räumlicher Auflösung (< 10 m) zu

¹ <https://www.geoportal.nrw>

simulieren. Atmosphärische Turbulenz wird explizit aufgelöst und ermöglicht eine exakte Simulation der Auswirkung der Turbulenz auf die Wind- sowie Temperatur- und Feuchteverteilung.

Die Landnutzung wird über verschiedene Bodenmodelle in der Simulation berücksichtigt (Gehrke, Sühling & Maronga (2021); Resler et al. (2017)). Dabei wird zwischen versiegelten Oberflächen, mit Vegetation bedeckten Oberflächen, Wasseroberflächen oder Gebäudestrukturen unterschieden. Je nach Klassifizierung werden entsprechende Parameter für die Beschaffenheit der Oberfläche angesetzt (Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Albedo, usw.). Durch die direkte Berücksichtigung von Turbulenz wird die Durchmischung der Luft und somit die Durchlüftung und der Kaltlufttransport in den Abend- und Nachtstunden realistisch dargestellt.

Die Vegetation wird mit Hilfe eines Vegetationsmodells detailgetreu berücksichtigt. Dabei werden einzelne Bäume und Sträucher, sofern es die Gitterweite zulässt, explizit als Strömungshindernis sowie über den Schattenwurf sowohl dynamisch (Einfluss auf Windgeschwindigkeit und -richtung) als auch thermisch (Einfluss auf Temperatur und Feuchte) berücksichtigt.

PALM-4U wurde in der Vergangenheit bereits mehrfach erfolgreich im Bereich der Stadtklimafor- schung validiert (Gronemeier et al. (2021)) und angewandt und wird seit Kurzem erfolgreich im gutachterlichen Bereich für Stadtklimaanalysen verwendet.

5.3 Eingangsdaten

Die mesoskalige Berechnung erfolgt in einer räumlichen Auflösung von 20 m für ein Gebiet von 50 km x 40 km, so dass das gesamte Kaltlufteinzugsgebiet für den Bereich der Planung beinhaltet ist.

Das digitale Höhenmodell ist in Abbildung 11-1 dargestellt. Die Geländehöhen sind dem EU-DEM Datensatz entnommen.

Abbildung 11-2 zeigt die Landnutzung im Simulationsgebiet. Die Landnutzungsdaten für die me- soskalige Berechnung entspricht einem Komposit aus dem Basis-DLM vom Geoportal NRW (für den Bereich innerhalb Deutschlands) und CORINE Landnutzungsdaten (Version 2020 20u1) für Belgien und die Niederlande. Die Daten lagen teilweise in gröberer räumlicher Auflösung vor. Wo notwendig wurden die Daten auf 20 m interpoliert.

Das Simulationsgebiet für die mikroskalige Modellierung mit PALM-4U gliedert sich in zwei Berei- che (siehe Abbildung 5-1): Der erste Bereich umfasst das größere Umfeld um das Plangebiet und erstreckt sich über eine Fläche von ca. 1,8² km². Der innere Bereich umfasst ein Gebiet von etwa 1 km² und beinhaltet das Plangebiet und die nähere Umgebung und wird mit einer hohen räumli- chen Auflösung von 2 m betrachtet, um alle Details der Strömung, insbesondere die Änderungen durch die Planung zu erfassen.

Die Gebäudedaten im Bestand beruhen auf dem LoD1-Datensatz vom Geoportal NRW. Die Land- nutzung basiert auf den Daten des Basis-DLM und wurde ebenfalls vom Geoportal NRW bezogen. Für die Vegetation lagen keine Daten vor. Diese wurden anhand von Luftbildern erfasst.

Für die zwei Planfälle wurden die Gebäude, die Landnutzung und der Vegetationsbestand im Be- reich des Plangebiets gemäß der Planunterlagen (Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2) angepasst. Neupflanzungen wurden mit einer Höhe und einem Kronendurchmesser, wie sie im ausgewachsen- en Stadium zu erwarten sind, betrachtet.

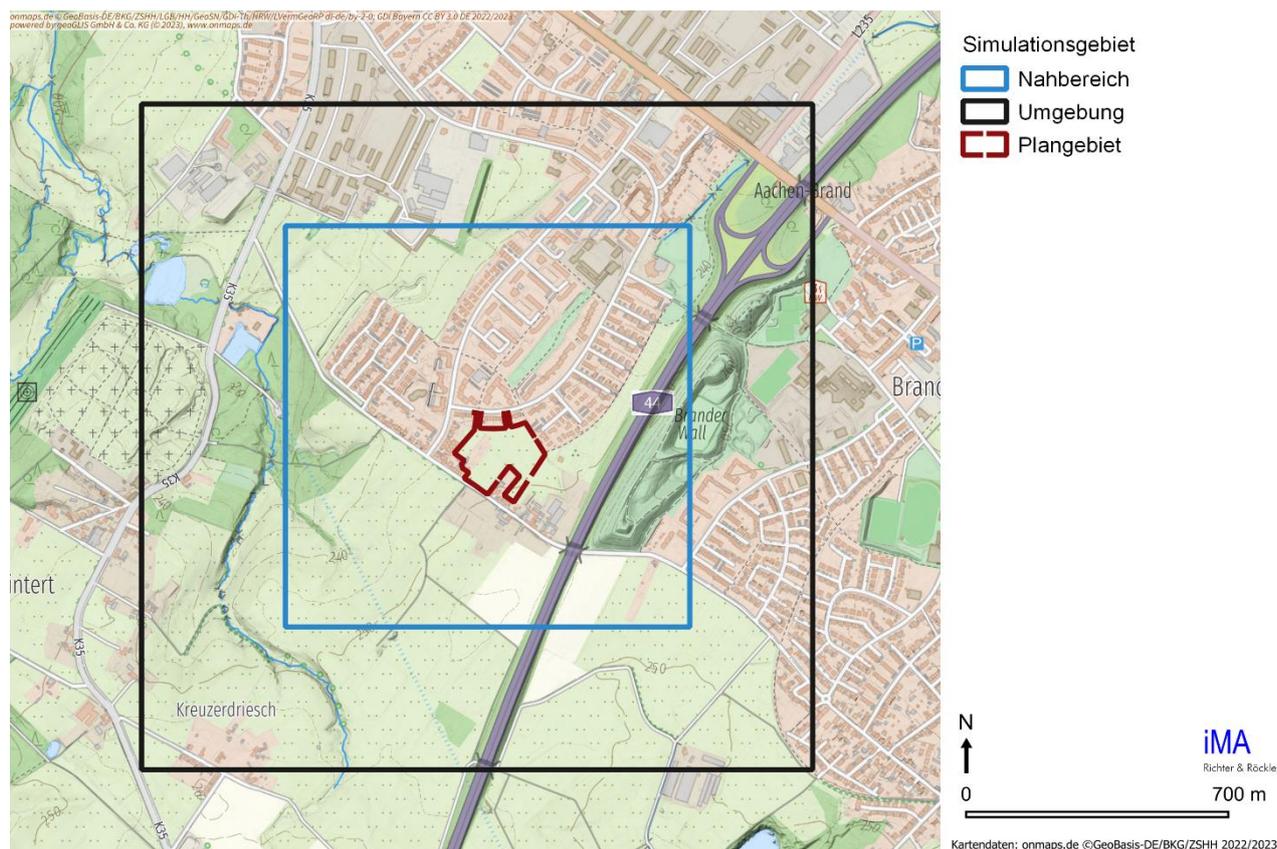


Abbildung 5-1: Modellgebiet für die mikroskalige Betrachtung mit PALM-4U.

Betrachtet wird eine typische Kaltluftabflusssituation im Sommer. Solche Situationen treten insbesondere bei autochthonen Wetterlagen auf, d.h. bei Wetterlagen, in denen keine großräumige Strömung vorliegt und allein die örtlichen Gegebenheiten (Relief, Landnutzung, etc.) das Lokalklima prägen. Die geringen Windgeschwindigkeiten bei diesen Wetterlagen bedingen eine austauscharme Situation, bei denen lokale thermische oder lufthygienische Belastungen kaum abgebaut werden. Daher ist dieses Szenario für die Bewertung des Stadtklimas von besonderer Bedeutung.

Für die mikroskalige Betrachtung wird sowohl die Tagsituation an einem heißen Sommertag wie auch die nächtliche Durchlüftung bei Kaltluftabflusssituationen analysiert.

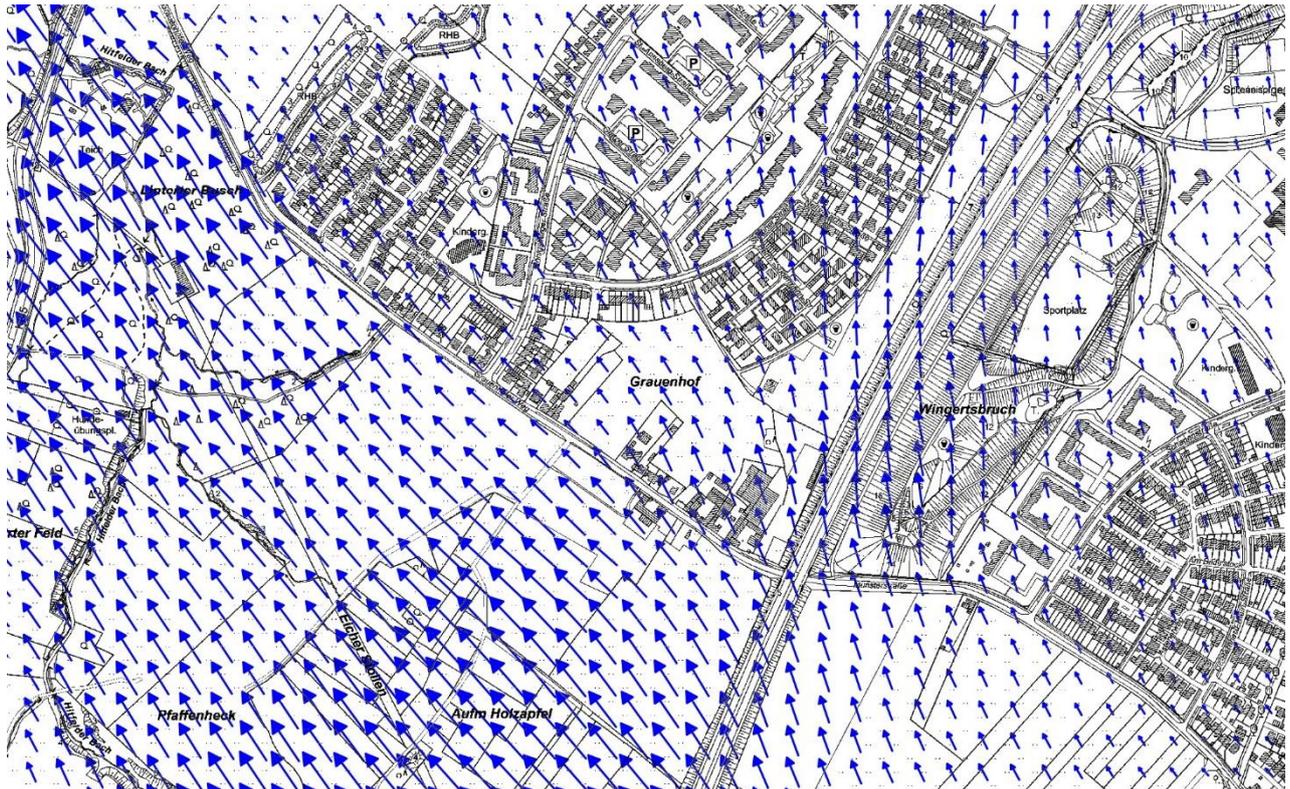


Abbildung 6-3: Kaltluftströmung 7 Stunden nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse.

Um die Unterschiede zwischen Nullfall und Planfall im zeitlichen Verlauf einer Strahlungsnacht darzustellen, wurden an 4 Monitorpunkten (M1 bis M4) die berechneten Kaltluftgrößen dargestellt (Abbildung 6-4). Ergänzend wurde auch ein Monitorpunkt (M5) im Hauptabflussbereich der Kaltluft betrachtet.

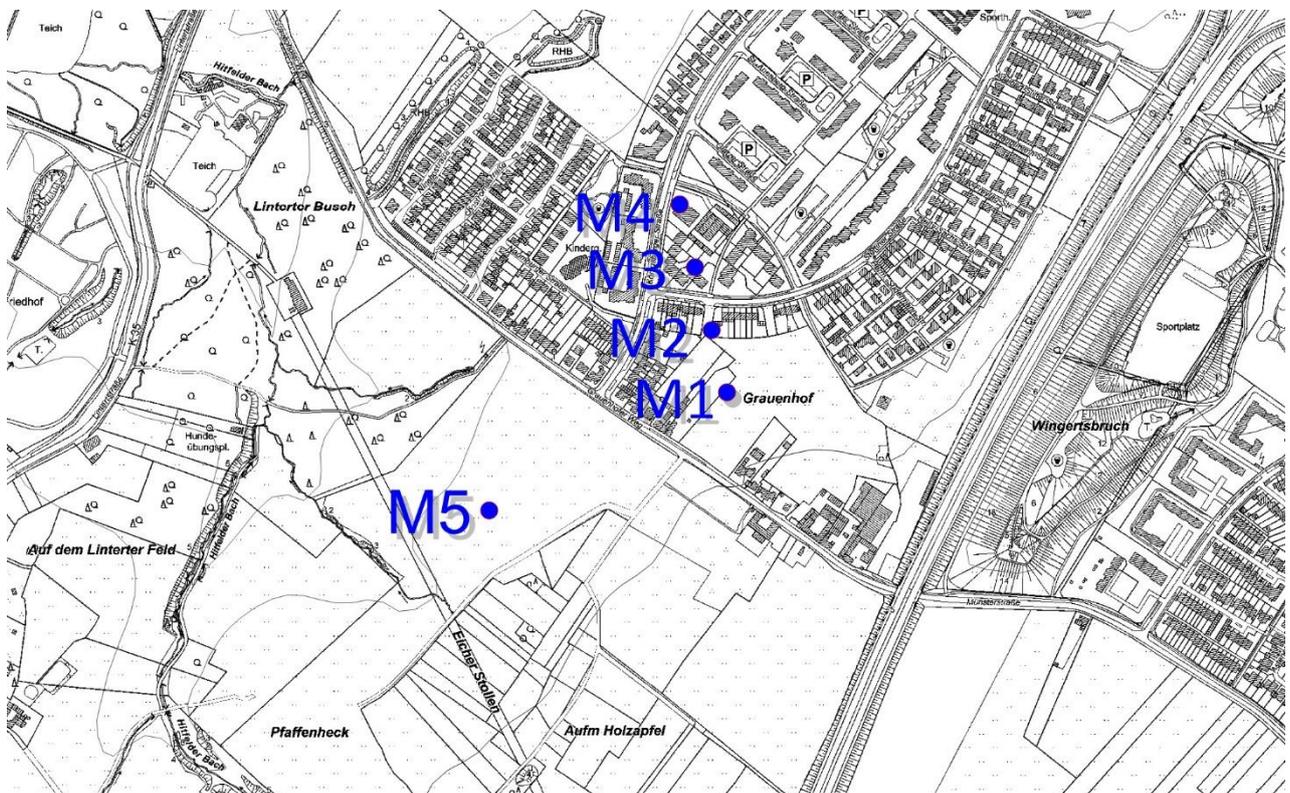


Abbildung 6-4: Lage der Monitorpunkte.

In den nachfolgenden Diagrammen ist die zeitliche Entwicklung im Nullfall in blau und im Planfall in rot für die Kaltluftmächtigkeit, die Volumenstromdichte, die mittlere² Windgeschwindigkeit und die Windrichtung dargestellt.

Am Monitorpunkt 1 im Plangebiet selbst (Abbildung 6-5) gibt es die größten Unterschiede, da die Nutzung im Planfall von Wiese auf Bebauung geändert wird. Infolge der Bebauung geht die Kaltluftmächtigkeit und die Volumenstromdichte zurück. Die mittlere Windgeschwindigkeit ist in den ersten 4 Stunden durch die geringe Kaltluftmächtigkeit deutlich reduziert, gleicht sich aber mit wachsender Kaltfluthöhe an den Nullfall an. Die Windrichtung weicht in den ersten ca. 3 Stunden etwas vom Nullfall ab. Während im Nullfall am Monitorpunkt eher Ost-südostwind simuliert wird, kommt die Strömung im Planfall eher aus südlicher Richtung.

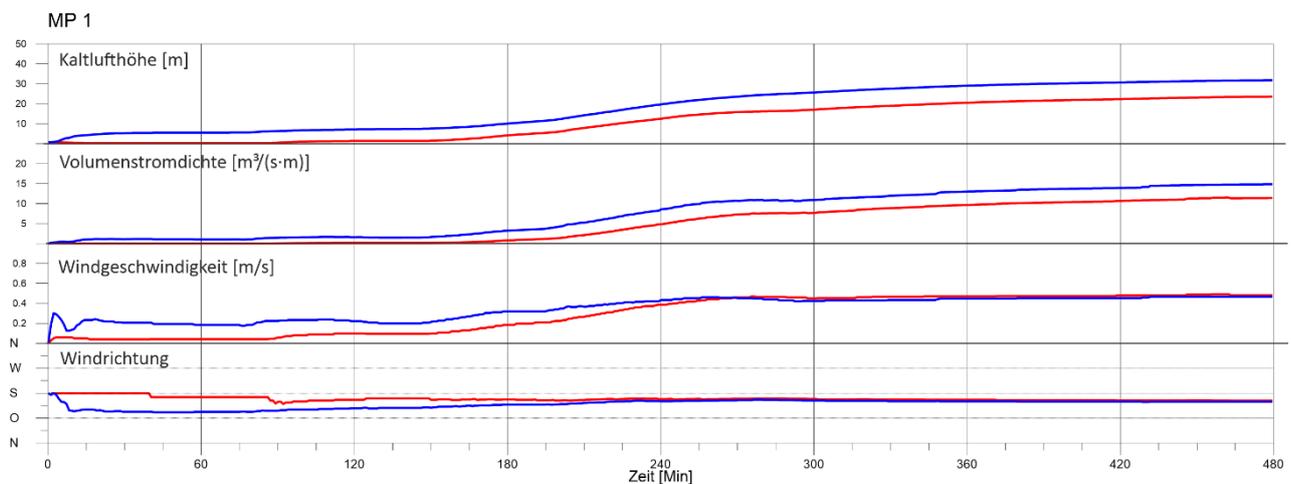


Abbildung 6-5: Zeitlicher Verlauf der Kaltluftparameter am Monitorpunkt 1 im Plangebiet (blau: Nullfall; rot: Planfall).

Am Rand des Plangebiets (Monitorpunkt 2, Abbildung 6-6 oben) südlich der Stettiner Straße im Gartenbereich findet man erwartungsgemäß noch merkliche Effekte durch die Bebauung des Plangebiets. So ist die Kaltluftmächtigkeit und der Volumenstrom reduziert, allerdings bereits weniger als im Plangebiet selbst. Die mittlere Windgeschwindigkeit und die Strömungsrichtung unterscheiden sich im Wesentlichen nur in der ersten Nachthälfte.

Am Monitorpunkt 3 nördlich der Stettiner Straße (Abbildung 6-6 Mitte) sind die Auswirkungen der Planung nur noch gering. Da in der Bebauung zu Beginn der Nacht nur sehr schwache Strömungen auftreten, gibt es erst in der zweiten Nachthälfte mit Anwachsen der Kaltluft und Überströmen der Bebauung leichte Unterschiede.

Am Monitorpunkt 4 (Abbildung 6-6 unten), ca. 200 m vom Plangebiet entfernt, sind die Unterschiede nur noch marginal.

² Die Windgeschwindigkeit ist über die Kaltluftmächtigkeit gemittelt.

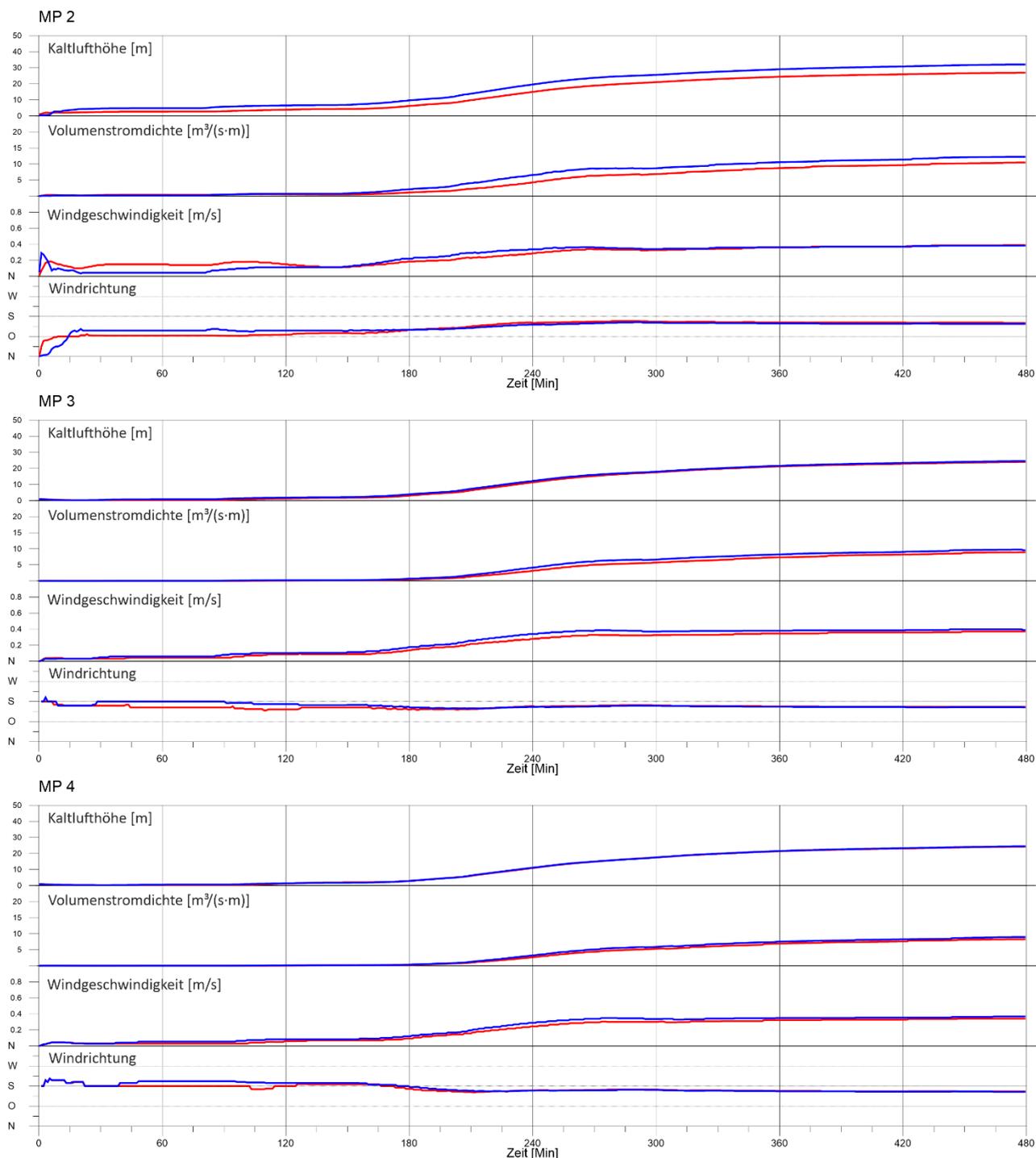


Abbildung 6-6: Zeitlicher Verlauf der Kaltluftparameter am Monitorpunkt 2 am Rand des Plangebiets (oben), am Monitorpunkt 3 (Mitte) und am Monitorpunkt 4 (unten) außerhalb des Plangebiets (blau: Nullfall; rot: Planfall).

Auch an der Kaltluftleitbahn westlich des Grauenhofer Wegs (Abbildung 6-7) sind die Auswirkungen marginal. Durch den Verdrängungseffekt der geplanten Bebauung ist davon auszugehen, dass die Geschwindigkeit im Planfall leicht zunimmt. Der Durchfluss bleibt konstant da die Kaltluftmächtigkeit minimal zurückgeht.

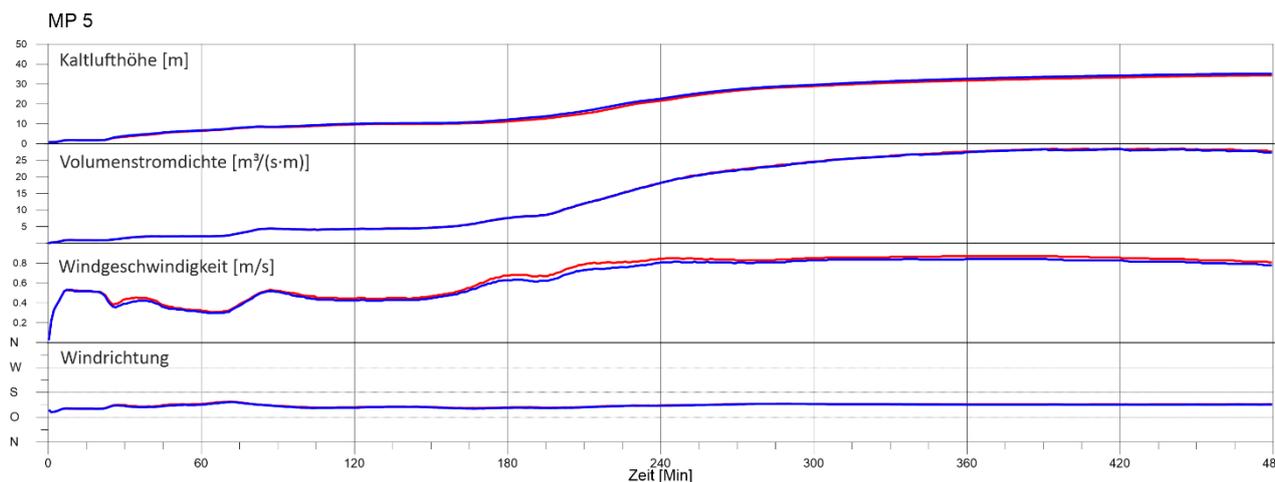


Abbildung 6-7: Zeitlicher Verlauf der Kaltluftparameter am Monitorpunkt 5 im Bereich der Kaltluftleitbahn östlich des Plangebiets (blau: Nullfall; rot: Planfall).

Das Mesoskalenmodell differenziert z.B. die Bebauung wenig. So wird die teils hohe Bebauung im Driescher Hof genauso als Siedlungsnutzung behandelt, wie andere locker bebaute Stadtbereiche oder die Planung selbst.

Um die Feinheiten zu untersuchen und weil es zwei Planvarianten gibt, wurde eine mikroskalige Untersuchung angeschlossen, welche Gebäude und Vegetation explizit auflösen. Dies ist im nächsten Kapitel dargestellt.

7 Ergebnisseder der mikroskaligen Modellierung

Um die Ergebnisse im näheren Umfeld des Plangebiets im Detail zu untersuchen, werden die Kaltluftabflussmodellierungen mit räumlich hochaufgelösten mikroskaligen Simulationen ergänzt. Nachfolgend wird zunächst die Bestandssituation betrachtet und anschließend die Änderungen durch die beiden Planfälle analysiert.

7.1 Beschreibung der Bestandssituation (Simulation Bestand)

Bei typischen Kaltluftsituationen wird das Plangebiet von Südosten her überströmt. Dies ist in der mikroskaligen Simulation entsprechend berücksichtigt (Abbildung 11-9). Über dem freien Feld werden dabei höhere Windgeschwindigkeiten in Bodennähe erreicht als im Wohngebiet oder im Bereich des Gehölz- und Baumbestands innerhalb des Plangebiets. Im Bereich der Stettiner Straße wird die Strömung durch die Bebauung am Südrand der Straße merklich reduziert im Vergleich zum freien Feld. Die Kaltluft fließt durch die vorhandenen Baulücken hindurch und belüftet den Bereich zwischen Stettiner Straße und Königsberger Straße.

In der Nacht werden Unterschiede in der Lufttemperatur durch die vorhandene Strömung ausgeglichen (Abbildung 11-10). Es bilden sich keine signifikanten Bereiche mit wärmerer oder kühlerer Luft aus.

Am Tage heizen sich insbesondere versiegelte Flächen durch die Sonneneinstrahlung stark auf. Dies macht sich durch hohe Oberflächentemperaturen bemerkbar (Abbildung 11-11³). Niedrige Oberflächentemperaturen sind in verschatteten Bereichen zu finden. Dabei spielen sowohl der Schattenwurf der Bebauung eine Rolle, aber auch besonders der Schattenwurf des Baumbestands und der Gehölzflächen.

Zur Beurteilung des thermischen Komforts wird nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (2022) die physiologische äquivalente Temperatur (PET) verwendet. Sie beschreibt das thermische Empfinden eines Menschen und berücksichtigt neben der Lufttemperatur auch die Feuchte, den Wind und die solare Einstrahlung. Die PET eignet sich daher deutlich besser als Indikator für den thermischen Komfort als die Lufttemperatur. Den größten Einfluss auf das thermische Empfinden hat die solare Einstrahlung. Daher ist die PET im Schatten am geringsten (Abbildung 11-12). Über den landwirtschaftlichen Nutzflächen herrschen durch die fehlende Verschattung warme Bedingungen. Kommen bei fehlender Verschattung noch versiegelte Flächen hinzu wie beispielsweise entlang der Herrmann-Sudermann-Straße oder entlang der Stettiner Straße, erreicht die PET hohe Werte. Bei längerem Aufenthalt in diesen Bereichen entsteht Hitzestress.

7.2 Beschreibung der Änderungen (Simulation Planfälle)

Durch die Errichtung von Gebäuden wird die Windverteilung auf dem freien Feld verändert. Das im Bestand noch hindernisarme Plangebiet kann von der Kaltluft nicht mehr ungestört überströmt werden. Dadurch reduziert sich die Volumenstromdichte innerhalb des Plangebiets im Vergleich zur Bestandssituation (jeweils unterer Teil in Abbildung 11-13 und Abbildung 11-14). Die Änderungen des Volumenstroms beschränken sich allerdings in beiden Planfällen auf das Plangebiet selbst. Die Bestandsbebauung auf der Südseite der Stettiner Straße wirkt bereits im Bestand als Barriere für die Kaltluft (Abbildung 11-9). Die zusätzliche Bebauung innerhalb des Plangebiets hat daher

³ Die markanten Linien, die in der Abbildung über den Freiflächen zu erkennen sind, werden durch Höhenstufen im Modell verursacht und sind technisch bedingt. Sie haben keinen Einfluss auf die Aussagen des Gutachtens.

keine zusätzliche negative Auswirkung auf das nördliche Wohngebiet. Die Unterschiede zwischen den Planfällen sind vernachlässigbar.

In der nächtlichen Lufttemperatur ergeben sich in beiden Planfällen kaum Änderungen zum Bestand (Abbildung 11-15, Abbildung 11-16). Lediglich im westlichen Teil des Plangebiets werden leicht höhere Temperaturen erreicht. Dies hängt zusammen mit der reduzierten Gehölzfläche in diesem Bereich und den dadurch höheren Temperaturen tagsüber, was auch zu höheren Temperaturen in der Nacht führt. Der Effekt bleibt allerdings in beiden Planfällen auf das Plangebiet beschränkt. Weiterhin nimmt die Lufttemperatur im südlichen Teil des Plangebiets geringfügig zu. Hier wird zum einen die Strömung durch die Bebauung und den Baum- und Heckenbestand reduziert, als auch durch die Bebauung und die Versiegelung mehr Energie am Tage gespeichert, was in Kombination zu einer höheren Lufttemperatur führt. Auch hier sind die Unterschiede zwischen den Planfällen gering.

Unterschiede im thermischen Komfort werden überwiegend durch Änderungen in der Verschattung erzielt, d.h. durch Abholzung (weniger Schatten, negativer Effekt) oder Neupflanzungen und Neubauten (mehr Schatten, positiver Effekt). Da das Plangebiet im Bestand überwiegend keine Verschattung aufweist, wird die PET durch die zusätzlichen Baumanpflanzungen im Planfall überwiegend reduziert; es wird ein angenehmer thermischer Komfort geschaffen (Abbildung 11-17, Abbildung 11-18). Lediglich im Bereich der Gehölzfläche wird die PET reduziert durch die teilweise Reduktion des dortigen Baum- und Gehölzbestands. Der thermische Komfort bleibt in diesem Bereich dennoch erhalten. Es ist zu berücksichtigen, dass die Gehölzfläche derzeit keine Aufenthaltsfläche darstellt und erst durch die Umgestaltung für einen Aufenthalt erschlossen wird.

8 Planungshinweise zur Minderung nachteiliger Auswirkungen

Durch die Bebauung einer Freifläche geht ein Teil der Kaltluftproduktivität verloren. Das Plangebiet erwärmt sich infolge der Speicherwirkung der Bebauung und der geänderten Strahlungsumsetzung tagsüber stärker und kühlt nachts langsamer ab.

Die Durchlüftung wird durch die Hinderniswirkung der Bebauung sowohl im Plangebiet wie auch in der direkt angrenzenden Nachbarschaft reduziert. Eine reduzierte Durchlüftung ist vor allem dann wichtig, wenn erhöhte thermische oder lufthygienische Belastungen vorliegen. Thermische Belastungen sind vergleichsweise gering (vgl. Kapitel 2.1.1). Relevante Schadstoffquellen (Hauptverkehrsstraßen, emittierendes Gewerbe/Industrie) in der nördlich angrenzenden Nachbarschaft sind nicht vorhanden.

Insofern liegt der Fokus auf den thermischen Verhältnissen. Zur Minimierung der lokalklimatischen Einflüsse der geplanten Bebauung auf das Plangebiet und die Umgebung können die folgenden Planungshinweise formuliert werden. Diese gelten allgemein für das Plangebiet. Teilweise sind diese Planungshinweise bereits in der aktuellen Planung berücksichtigt.

- a) Der Baumbestand, insbesondere das Wäldchen mit Biotopcharakter im rückwärtigen Bereich des Anwesens Grauenhofer Weg 117, sollten unbedingt erhalten werden. Diese sind aufgrund ihrer Entwicklung heute schon klimawirksam, während Neupflanzungen erst in ca. 20 Jahren eine relevante Klimafunktion bewirken.
- b) Freiflächen sollten möglichst begrünt werden. Grünflächen heizen sich tagsüber weniger stark auf als versiegelte Oberflächen. Dies führt in den Abend- und Nachtstunden zu kühleren Oberflächen und somit zu geringeren Lufttemperaturen. Kfz-Stellflächen können beispielsweise mit Rasenpflastersteinen ausgeführt werden, um den Anteil an versiegelten Flächen weiter zu reduzieren.
- c) Um ein starkes Aufheizen von versiegelten Flächen vorzubeugen, können verschattende Elemente wie Bäume eingesetzt werden. Diese verringern durch ihren Schattenwurf ein übermäßiges Aufheizen und sorgen so in den frühen Nachtstunden zu niedrigeren Lufttemperaturen.
- d) Helle Oberflächen (z.B. Gebäudefassaden) heizen sich weniger stark auf als dunkle Oberflächen. Dadurch kann die Aufheizung und die Wärmespeicherung im Plangebiet weiter reduziert werden und damit erhöhten Lufttemperaturen in der Nacht entgegengewirkt werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass es aufgrund der höheren Rückstrahlung des Sonnenlichts zu einer höheren lokalen Hitzebelastung am Tag kommen kann. Helle Oberflächen haben zudem eine höhere Blendwirkung als dunkle Oberflächen. Verschattende Elemente wie Gebäude und laubwerfende Bäume sind daher eine wichtige Entlastung für die sich im Plangebiet aufhaltenden Personen.
- e) Zukunftsorientiert sollte nach dem Prinzip der „Schwammstadt“ vorgegangen werden, d.h. ein Großteil des Niederschlagswassers sollte im Gebiet zurückgehalten werden (Retention), so dass dieser für die Bewässerung des Grüns zur Verfügung steht. Damit können Grünbereiche (insbesondere Bäume) auch in Trockenperioden ihre klimatische Funktion erfüllen.
- f) Eine Fassaden- oder Dachbegrünung im Bereich von Garagen oder Wohngebäuden kann helfen die Oberflächentemperaturen und somit die Lufttemperatur zu reduzieren. Vorteile sind eine kühlere Fassaden- bzw. Dachoberfläche, zumindest solange die Vegetation die Möglichkeit der Verdunstung hat. Ausgetrocknete Begrünungen können die Temperatur

nicht mehr senken und heizen sich ebenfalls auf, allerdings weniger stark als Ziegel-, Kies- oder Blechdächer. Weitere Vorteile sind die Retention von Niederschlag. Auch die Biodiversität wird gefördert. Der Effekt einer Fassaden- oder Dachbegrünung ist sehr lokal. Dachbegrünungen auf mehrgeschossigen Gebäuden können zwar für ein angenehmes Raumklima im Gebäude sorgen, der Effekt auf das Klima im Straßenraum auf Fußgängerniveau ist hingegen kaum spürbar. Die mögliche Vegetation und Retentionsfähigkeit steigt mit der Aufbaudicke an. Die Dachneigung sollte möglichst gering sein. Nachteile sind höhere Baukosten und Aufwand für die Pflege.

- g) Neubauten sollten nach aktuellen Energiestandards (GEG (2023), Artikel 18a) errichtet werden. Durch die Anforderung an die Dämmung verringert sich die Wärmespeicherung in der Bausubstanz und führt zu einem schnelleren Abkühlen der Fassaden in den Abend- und Nachtstunden.

9 Zusammenfassung

Die GEG Rheinland Grundstücksentwicklungsgesellschaft mbH & Co. KG plant die bislang landwirtschaftlich genutzten Freiflächen im Bebauungsplangebiet „Grauenhofer Weg/Stettiner Straße“ in Aachen Ortsteil Driescher Hof zu bebauen.

Eine Bebauung geht mit Versiegelung von Grünflächen und der Errichtung von Rauigkeitselementen einher. Dadurch ergeben sich zum einen Auswirkungen auf die Strahlungsbilanz und die thermischen Verhältnisse, zum anderen auf die Durchlüftung, die infolge der Hinderniswirkung der Bebauung reduziert wird.

Neben der Änderung der lokalklimatischen Verhältnisse im Plangebiet selbst, sind auch Auswirkungen auf die Nachbarschaft möglich. Eine Bewertung der Auswirkungen hängt nicht nur von der Intensität der möglichen Effekte, sondern auch von der bereits vorhandenen Belastungssituation ab.

Laut der Planungshinweiskarte für die Regionalplanung liegt das Plangebiet in einer Leitbahn mit „hoher Priorität“. Insofern sind die Auswirkungen der Planung auf die nächtliche Belüftung des Umfeldes und von Aachen selbst zu betrachten. Hierzu ist eine großräumige Kaltluftanalyse mit aktuellen Nutzungsdaten in hoher räumlicher Auflösung erstellt worden. Die Ergebnisse decken sich mit den größeren Untersuchungen im Klimaatlas NRW.

Die Belüftung des Aachener Talkessels erfolgt hauptsächlich durch zahlreiche Täler aus südwestlicher Richtung. Hinzu kommt der Kaltluftstrom, der im Wesentlichen westlich des Grauenhofer Wegs in den Talkessel abfließt. Dieser Strom wird in den ersten Nachtstunden durch lokale Kaltluftproduktionsgebiete gespeist (Niederungen des Hitfelder Bachs und des Bevertbachs). In der zweiten Nachthälfte nimmt dieser Kaltluftstrom deutlich zu, da hier Kaltluft aus dem Kaltlufteinzugsgebiet der Inde über die Höhenlage der Autobahn den lokalen Kaltluftstrom unterstützt.

Das Plangebiet liegt am Rande dieses Kaltluftstroms. Die Kaltluftsituation im Plangebiet zeigt ebenfalls den zeitlichen Ablauf des Hauptstroms auf. In den Abendstunden herrschen nur sehr geringe Abflüsse vor, da das Kaltlufteinzugsgebiet lokal begrenzt ist und das Gelände nur eine geringe Neigung aufweist. Diese Strömung dringt nicht signifikant in die nördlich angrenzende Bebauung ein. Die geringe Kaltluftmächtigkeit und die nahezu geschlossene Bebauung an der Stettiner Straße im Zusammenwirken mit dem dort vorhandenen dichten Baumbestand verhindert einen relevanten Abfluss.

Im weiteren Verlauf der Nacht wird auch das Plangebiet von der größerräumig anströmenden Kaltluft überströmt. Diese Kaltluft dringt aufgrund der Mächtigkeit und Intensität in die nördlich angrenzenden Siedlungsbereiche ein und überströmt diese.

Im Planfall ergeben sich im Plangebiet deutliche Reduzierungen der Durchlüftung, die jedoch zu Beginn der Nacht auf das Plangebiet selbst und die unmittelbar angrenzende Wohnbebauung südlich der Stettiner Straße beschränkt bleibt. Nach Einsetzen der Überströmung der Autobahn wird auch das Plangebiet überströmt. Gegenüber dem Bestandsfall ergeben sich in der stromab liegenden Nachbarschaft eine Reduktion der Kaltluftmächtigkeit und des Volumenstroms, die jedoch mit zunehmendem Abstand zum Plangebiet rasch abklingen. Bereits in 200 m Entfernung sind keine spürbaren Effekte mehr vorhanden.

Ferner waren die Auswirkungen zweier unterschiedlicher Bebauungsvarianten zu vergleichen. Hierzu wurde das mikroskalige Modell PALM-4U eingesetzt, das Bebauung und Bewuchs explizit

auflöst und auch die thermischen Verhältnisse ausweist. Betrachtet wurden die Bestandssituation, die Bebauungsvariante „Cluster“ und die Bebauungsvariante „Höfe“.

Erwartungsgemäß gibt es die größten Änderungen der Durchlüftung und der thermischen Verhältnisse im Plangebiet selbst. Bei Umsetzung der Planung stellen sich im Plangebiet vergleichbare Verhältnisse wie in den angrenzenden Wohngebieten ein. Die Verhältnisse werden durch die Bebauung und den Bewuchs stärker differenziert als im Bestand. So gibt es tagsüber sowohl heißere besonnte Bereiche wie auch kältere verschattete Zonen.

Die bodennahen Auswirkungen bleiben jedoch auf den unmittelbaren Nahbereich beschränkt, da geringe Auswirkungen im Überdachniveau sich stromab bodennah nicht spürbar auswirken.

Sowohl die Durchlüftung als auch der thermische Komfort erreicht in beiden Planvarianten ähnliche Werte wie in der umliegenden Bebauung. Ein signifikanter Unterschied in den lokalklimatischen Auswirkungen zwischen den beiden Planvarianten konnte nicht festgestellt werden.

Die Variante „Höfe“ wirkt kleinteiliger, was für die bodennahe Durchlüftung im Plangebiet leichte Vorteile bringt. Die Variante „Cluster“ weist hier teils riegelhafte (meist L-förmige) Strukturen auf, dafür ist der südliche Einströmrand offener gestaltet. Der südliche Abschluss der Variante „Höfe“ ist deutlich geschlossener. Dies hat den Vorteil einer Abschirmung von Lärm und Luftschadstoffen der Autobahn 44. Inwieweit die von der landwirtschaftlichen Hofstelle ausgehenden Belastungen durch Lärm und Gerüche zu Einschränkungen oder Auflagen führen, wird in separaten Gutachten geklärt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die geplante Bebauung zwar zu einem Verlust an Kaltluftproduktionsfläche führt. Diese ist, gemessen am gesamten Einzugsgebiet des Kaltluftstroms westlich des Grauenhofer Wegs, aber sehr gering, so dass sich keine großräumigen Auswirkungen auf die Kaltluftversorgung von Aachen ergeben. Auswirkungen sind im unmittelbaren Nahbereich zu erwarten, der aber weder besonders thermisch belastet noch signifikante Luftschadstoffquellen aufweist.

Zur Minimierung der thermischen Auswirkungen sollten die Planungshinweise in Kapitel 8 beachtet werden.

Freiburg, 1. Juni 2023



Dr. Rainer Röckle
Diplom-Meteorologe



Dr. Tobias Gronemeier
M.Sc. in Meteorologie

Dieser Bericht wurde nach den Anforderungen unseres Qualitätsmanagementsystems nach DIN 17025 erstellt. Der Bericht oder Teile daraus dürfen nur für das vorliegende Projekt vervielfältigt oder weitergegeben werden.

10 Literatur

- GEG** (2023): Gesetz zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor vom 20. Juli 2022. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2022 Teil I Nr. 28, ausgegeben am 28. Juli 2022.
- Gehrke, K.F., M. Sühling & B. Maronga** (2021): Modeling of land–surface interactions in the PALM model system 6.0: land surface model description, first evaluation, and sensitivity to model parameters. *Geoscientific Model Development* (14)8: 5307–5329.
- Gronemeier, T., K. Surm, F. Harms, B. Leidl, B. Maronga & S. Raasch** (2021): Evaluation of the dynamic core of the PALM model system 6.0 in a neutrally stratified urban environment: comparison between LES and wind-tunnel experiments. *Geoscientific Model Development* (14)6: 3317–3333.
- Maronga, B., S. Banzhaf, C. Burmeister, T. Esch, R. Forkel, D. Fröhlich, V. Fuka, K.F. Gehrke, J. Getič, S. Giersch, T. Gronemeier, G. Groß, W. Heldens, A. Hellsten, F. Hoffmann, A. Inagaki, E. Kadasch, F. Kanani-Sühling, K. Ketelsen, B.A. Khan, C. Knigge, H. Knoop, P. Krč, M. Kurppa, H. Maamari, A. Matzarakis, M. Mauder, M. Pallasch, D. Pavlik, J. Pfafferott, J. Resler, S. Rissmann, E. Russo, M. Salim, M. Schrempf, J. Schwenkel, G. Seckmeyer, S. Schubert, M. Sühling, R. von Tils, L. Vollmer, S. Ward, B. Witha, H. Wurps, J. Zeidler & S. Raasch** (2020): Overview of the PALM model system 6.0. *Geoscientific Model Development* (13)3: 1335–1372.
- Resler, J., P. Krč, M. Belda, P. Juruš, N. Benešová, J. Lopata, O. Vlček, D. Damašková, K. Eben, P. Derbek, B. Maronga & F. Kanani-Sühling** (2017): PALM-USM v1.0: A new urban surface model integrated into the PALM large-eddy simulation model. *Geoscientific Model Development* (10)10: 3635–3659.
- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1** (2015): Umweltmeteorologie - Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1:2015-09.
- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2** (2022): Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2:2022-06.
- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5** (2003): Umweltmeteorologie - Lokale Kaltluft. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5:2003-12.

11 Anhang

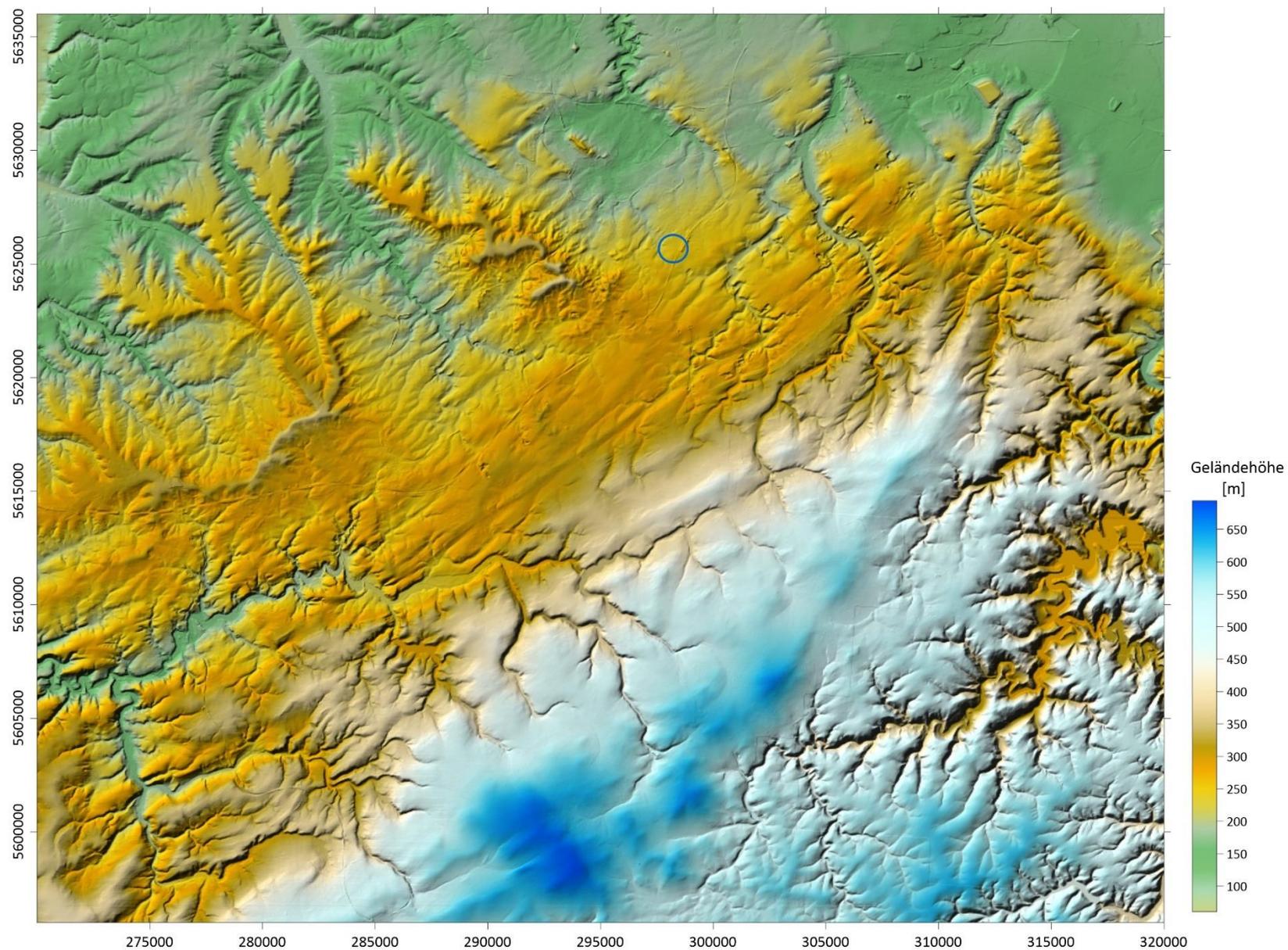


Abbildung 11-1: Geländemodell für die mesoskalige Simulation.

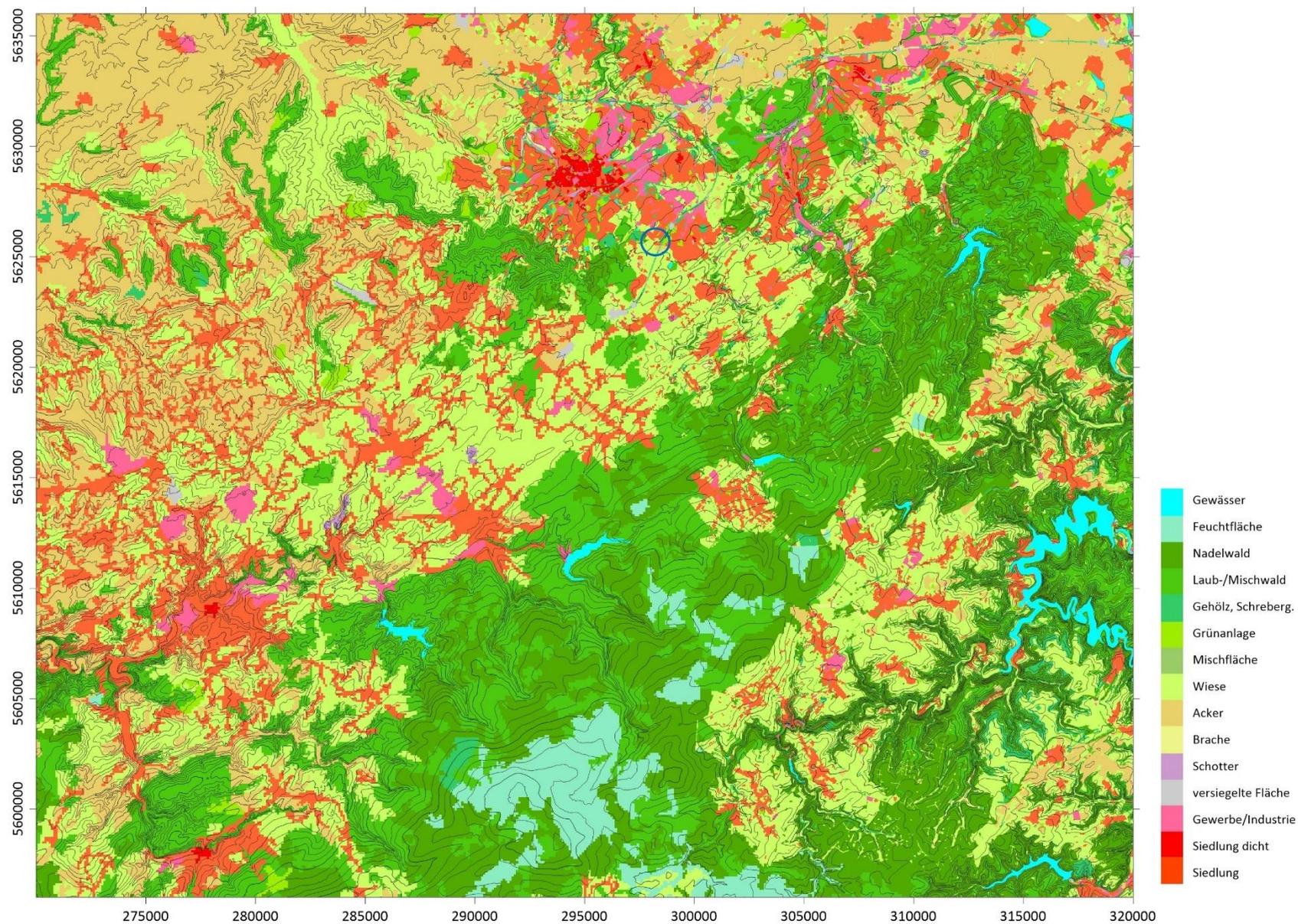


Abbildung 11-2: Landnutzung für die mesoskalige Simulation.

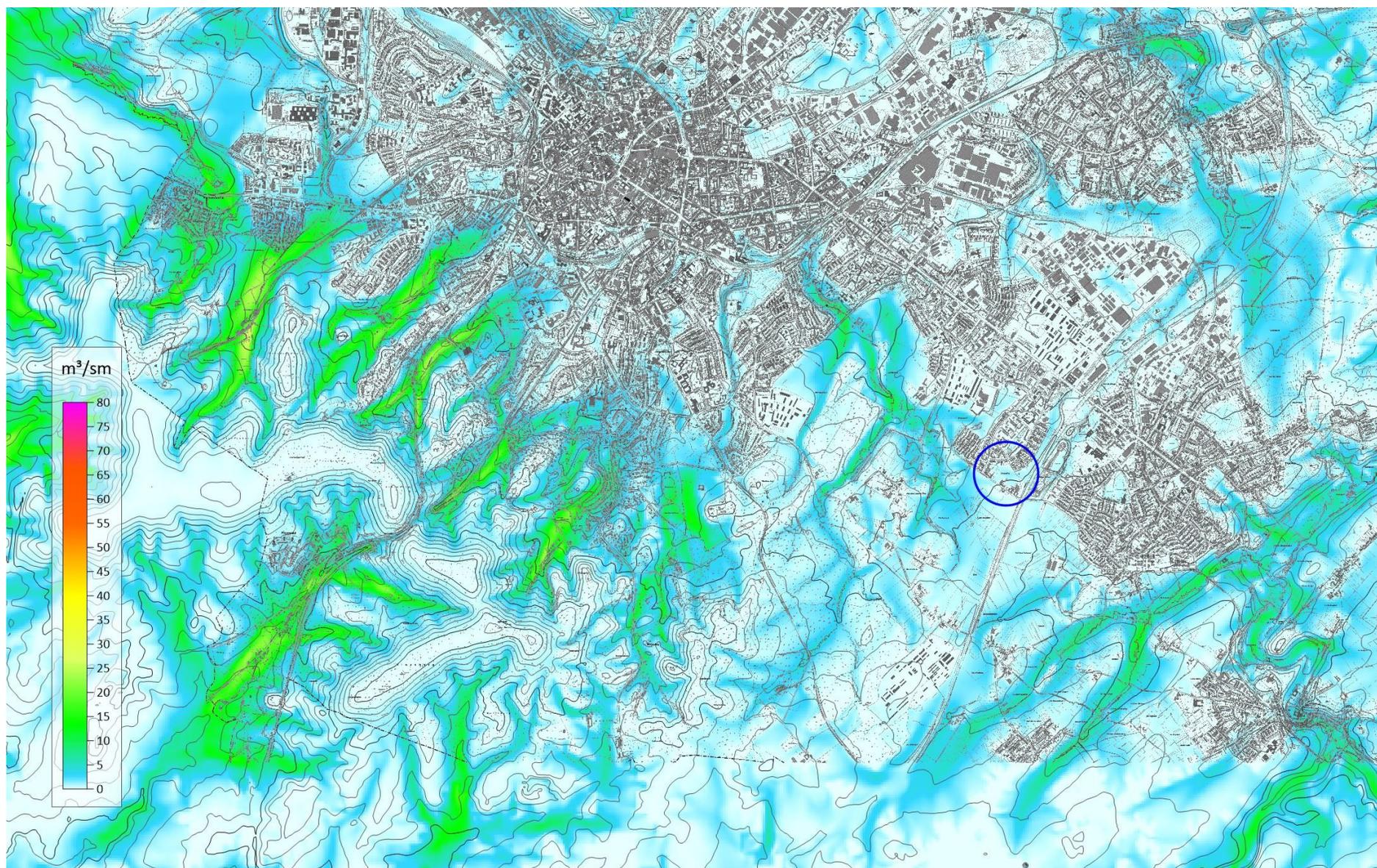


Abbildung 11-3: Volumenstromdichte eine Stunde nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse.

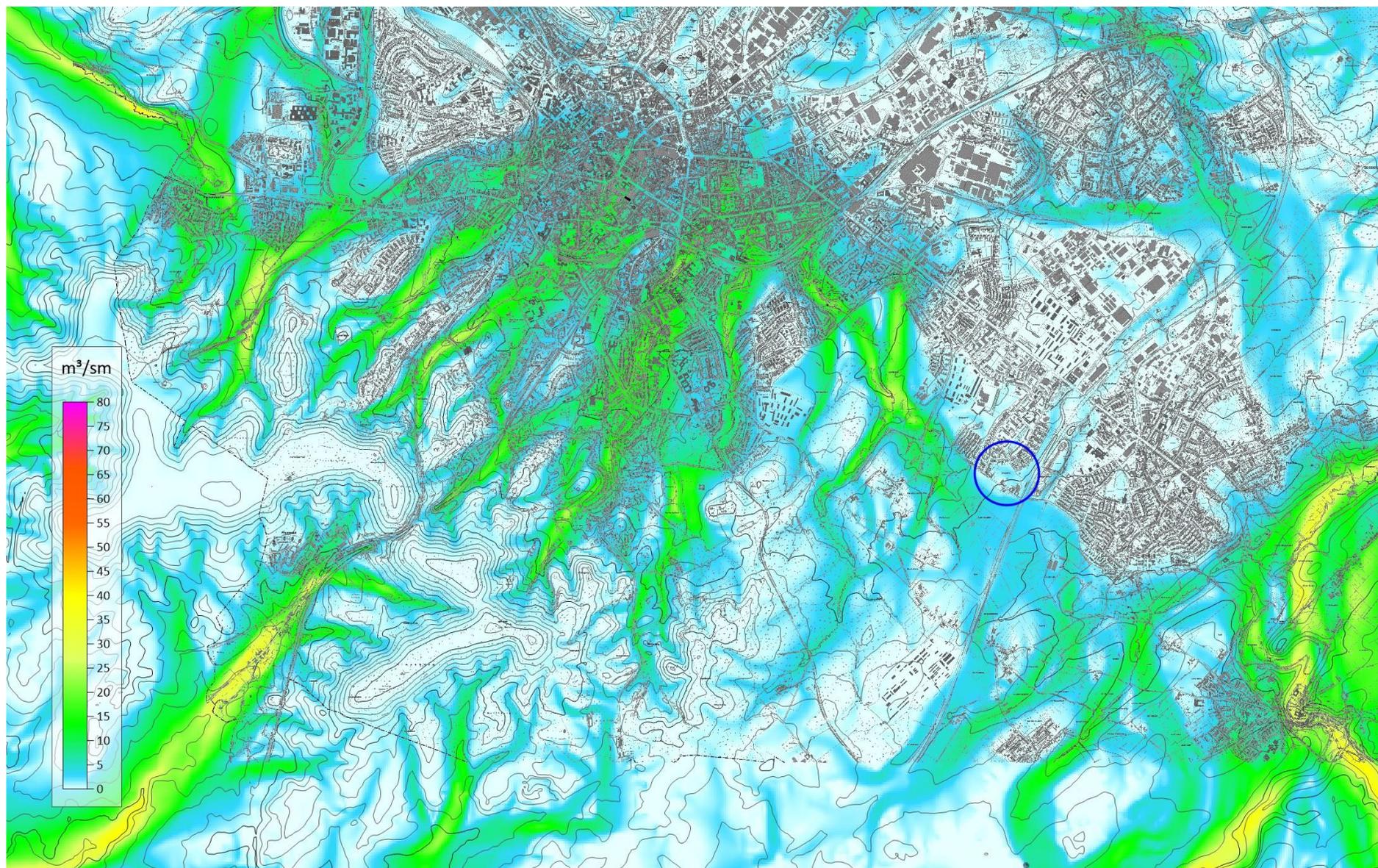


Abbildung 11-4: Volumenstromdichte 3 Stunden nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse.

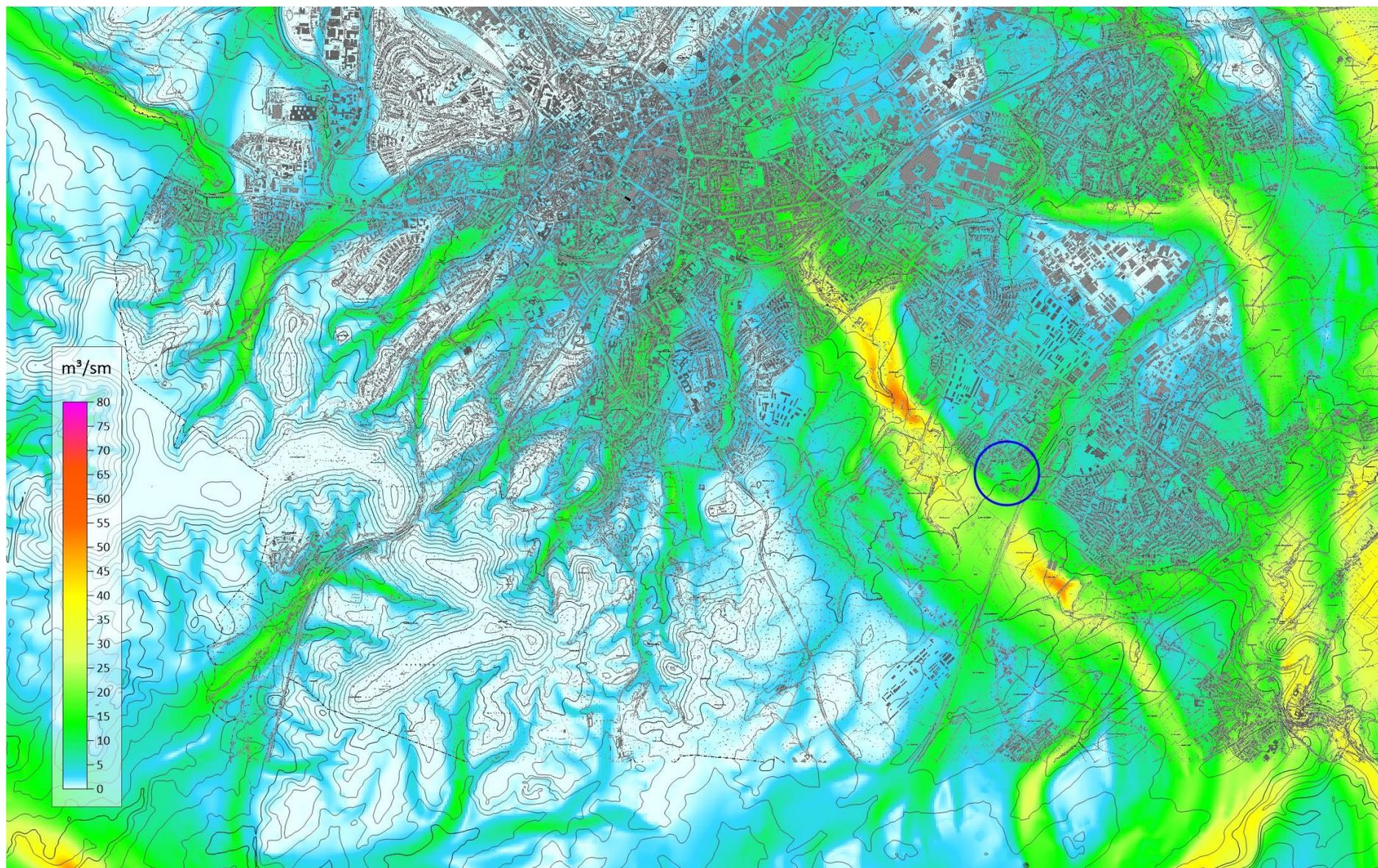


Abbildung 11-5: Volumenstromdichte 7 Stunden nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse.

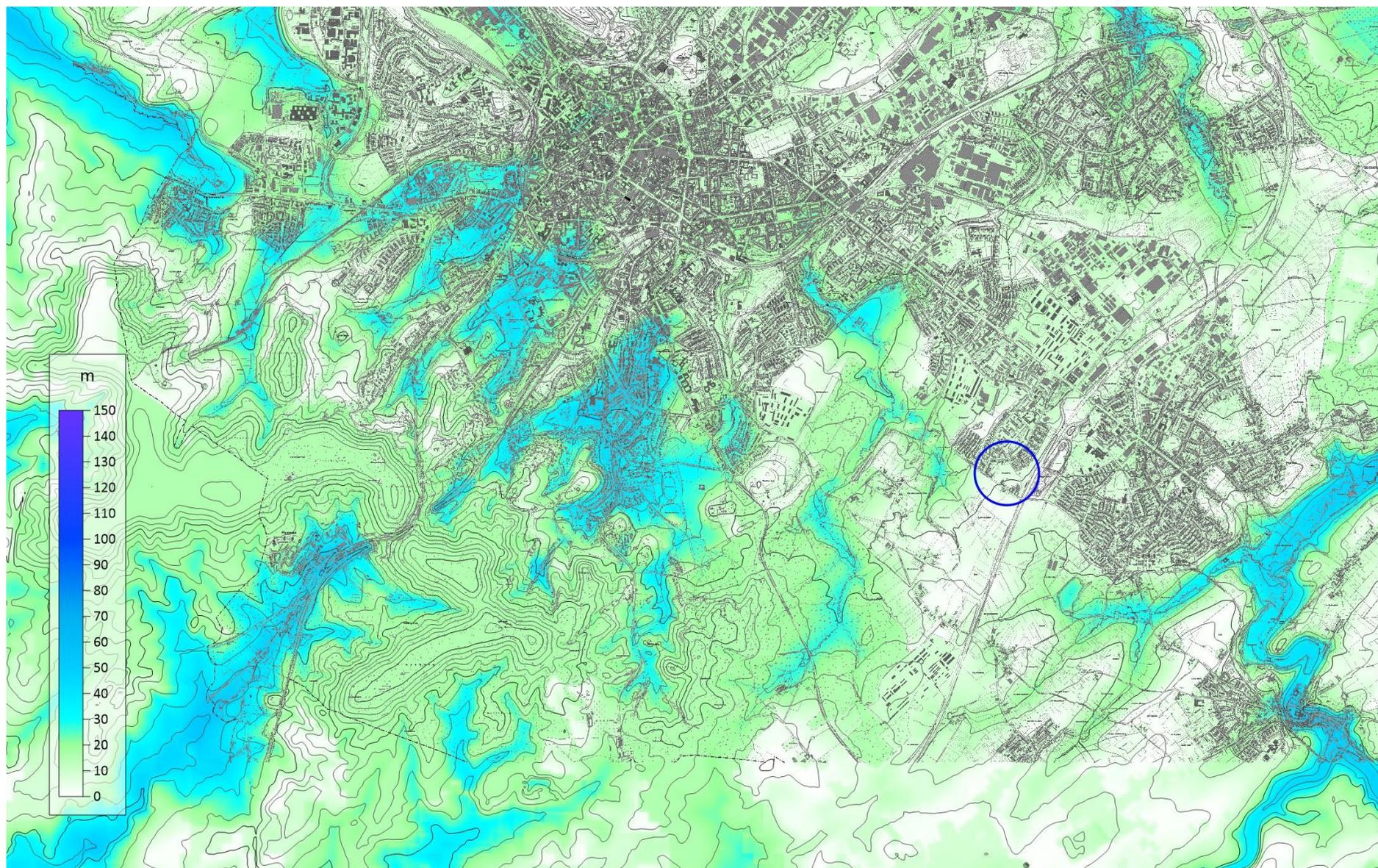


Abbildung 11-6: Kalluftmächtigkeit eine Stunde nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse.

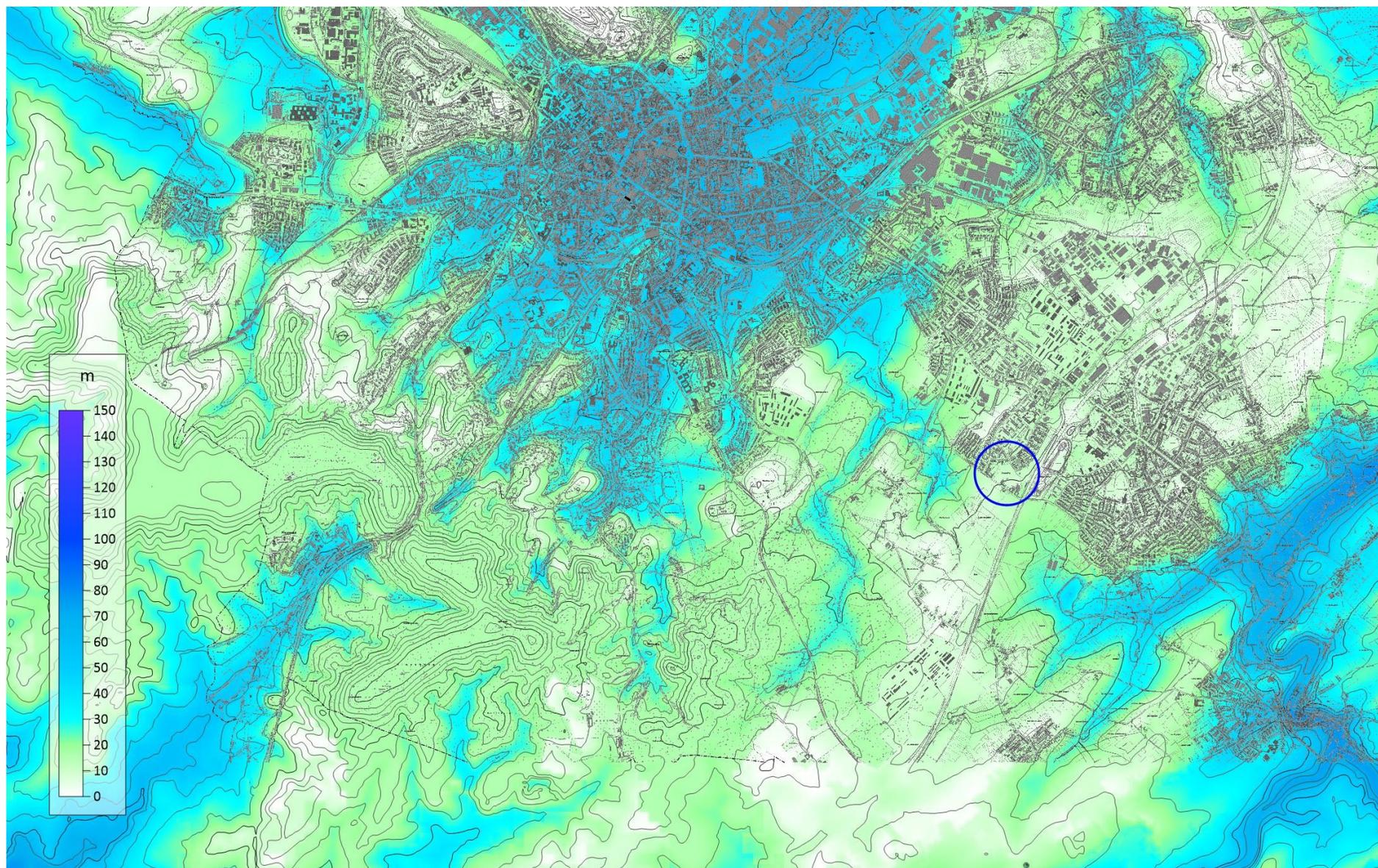


Abbildung 11-7: Kalluftmächtigkeit 3 Stunden nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse.

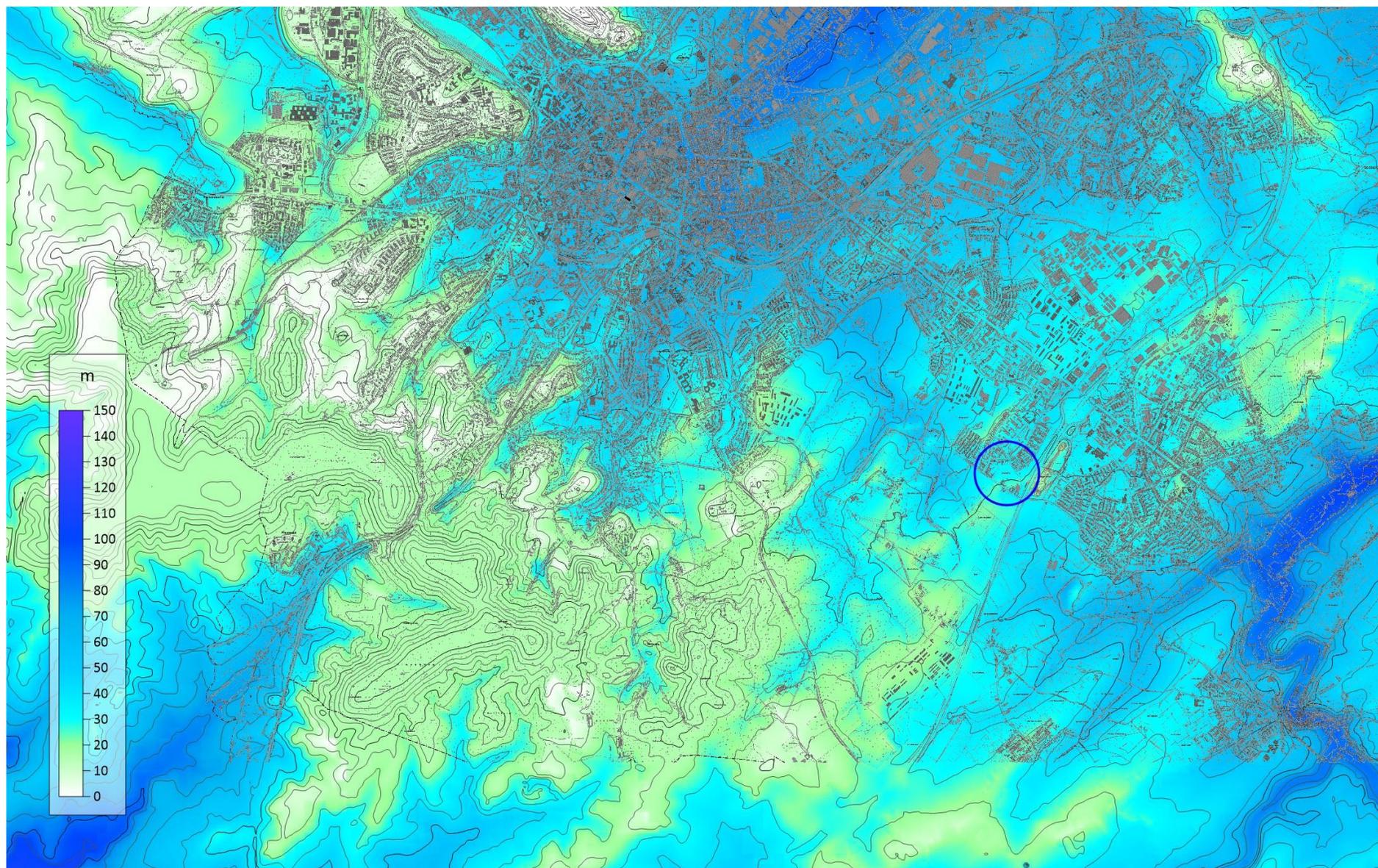


Abbildung 11-8: Kalluftmächtigkeit 7 Stunden nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse.

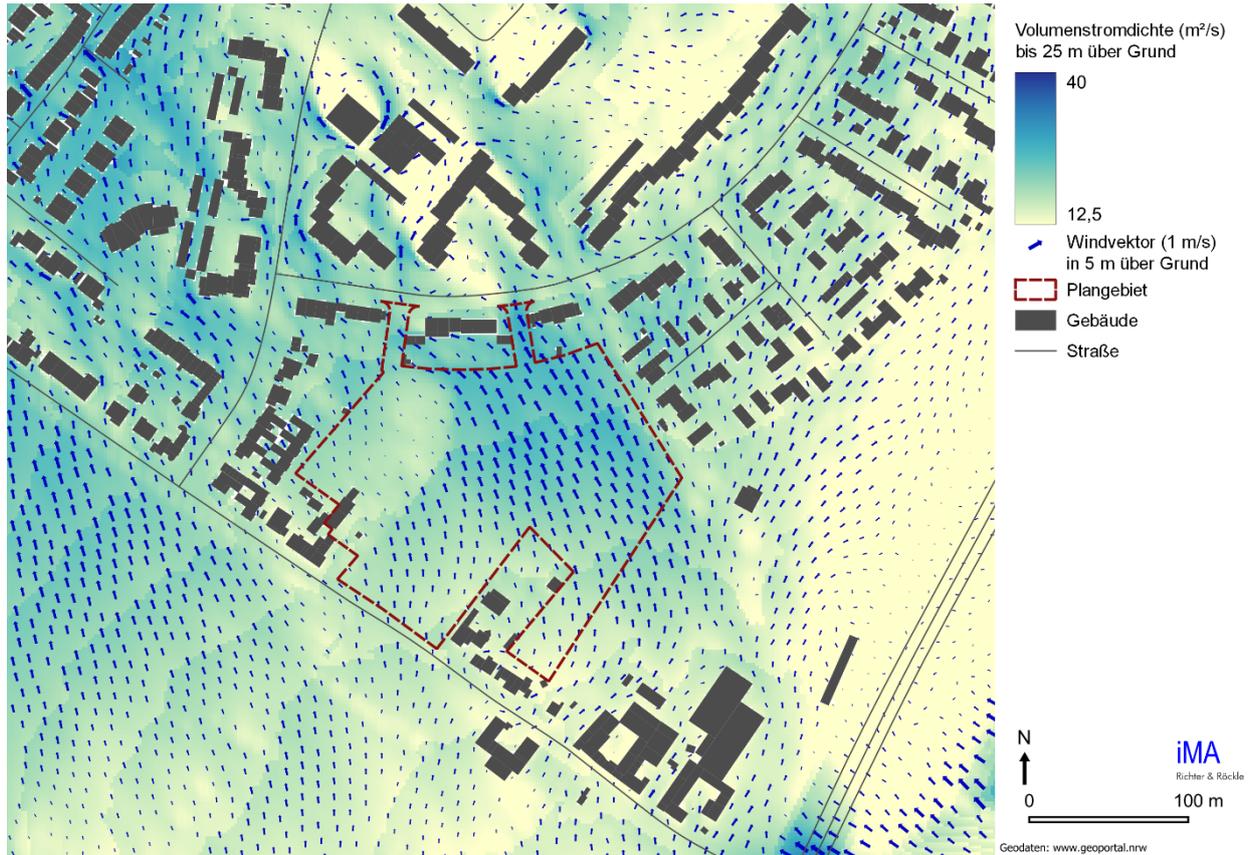


Abbildung 11-9: Nächtliche bodennahe Volumenstromdichte und Windverteilung in 5 über Grund im Bestand.

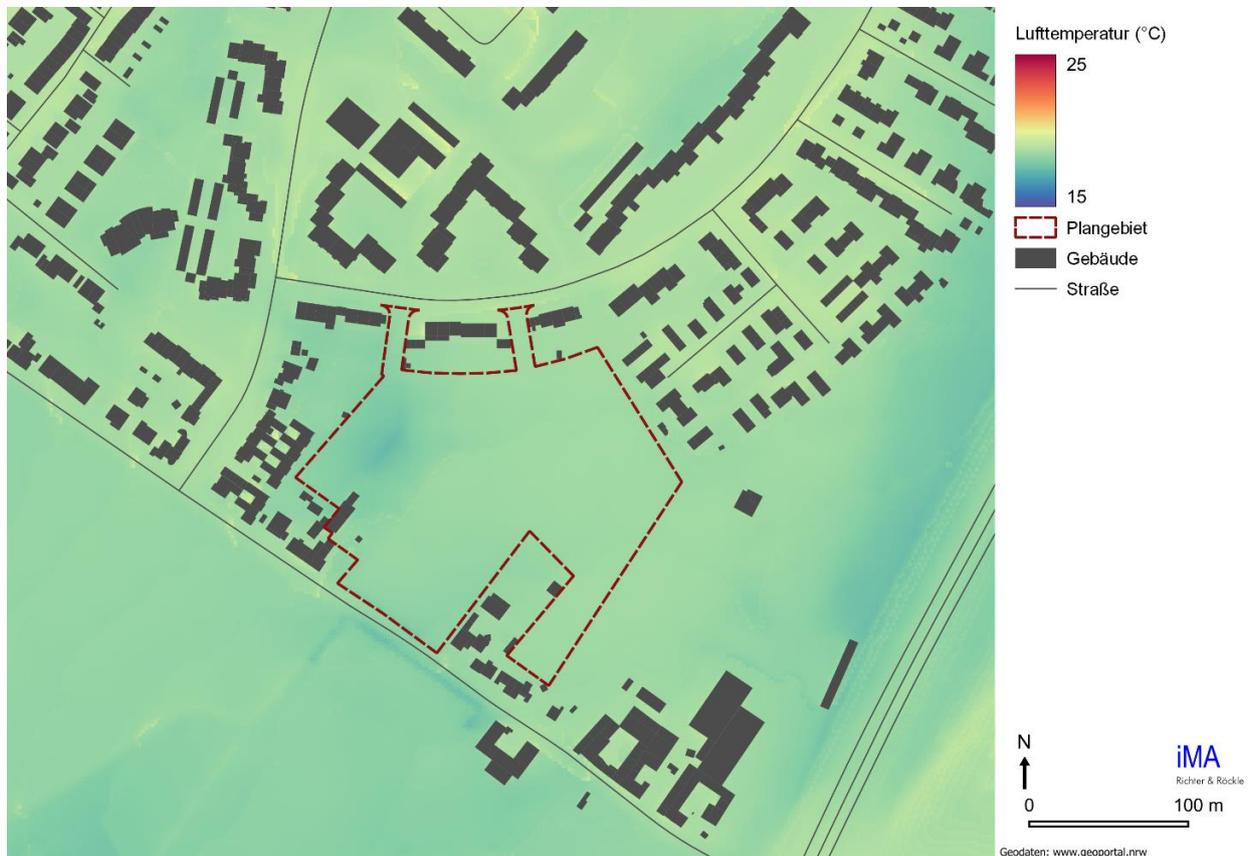


Abbildung 11-10: Nächtliche Lufttemperatur in 2 m über Grund im Bestand.

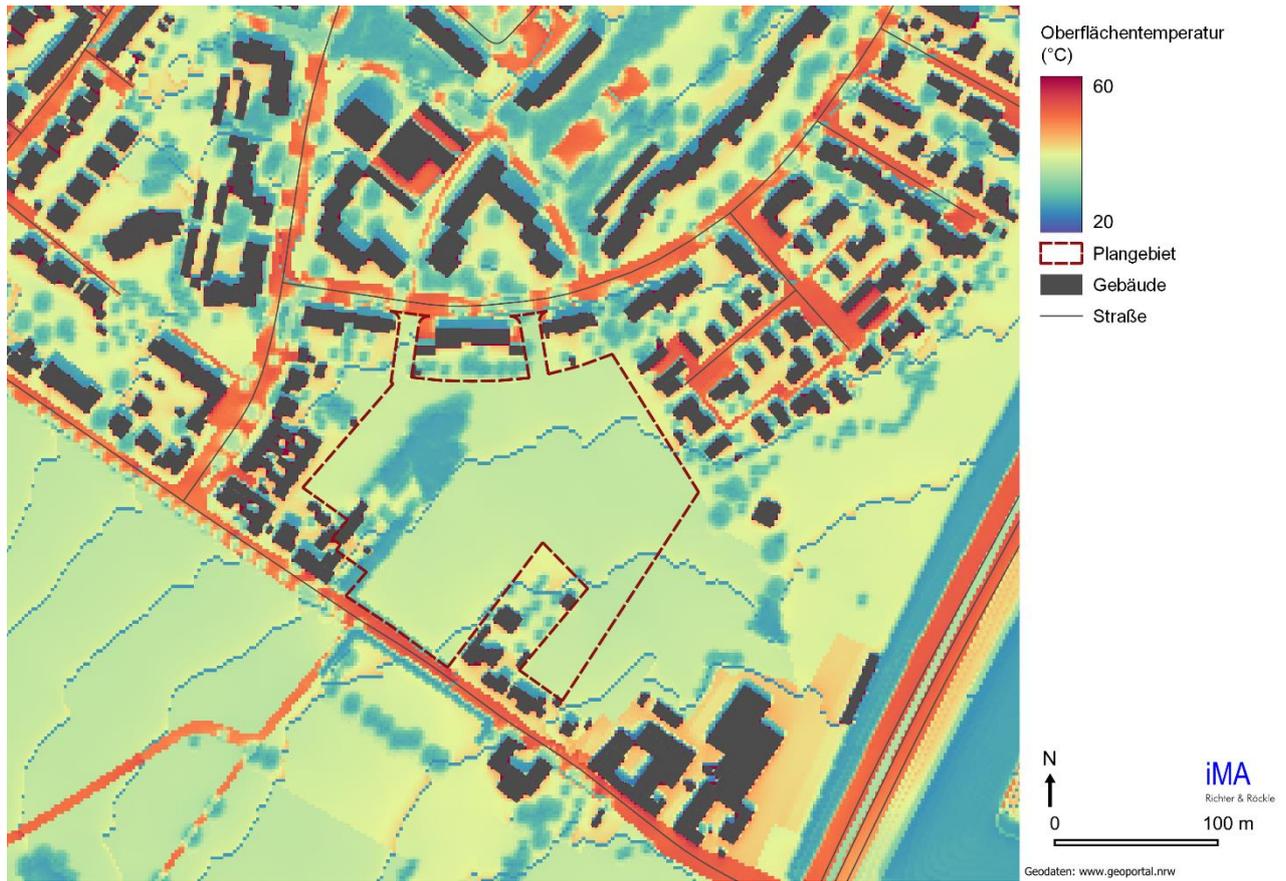


Abbildung 11-11: Oberflächentemperatur zur Mittagszeit im Bestand.

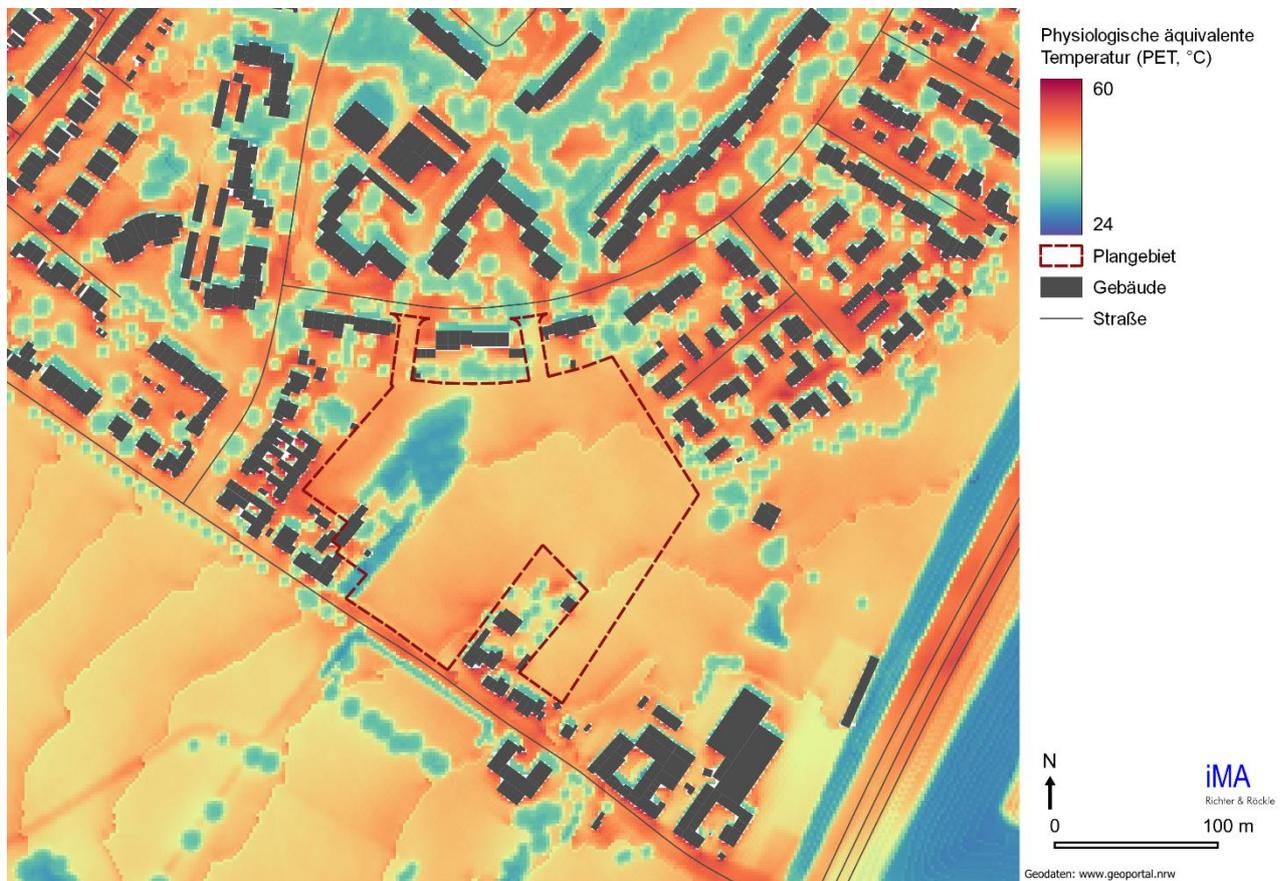


Abbildung 11-12: Physiologische äquivalente Temperatur PET zur Mittagszeit im Bestand.

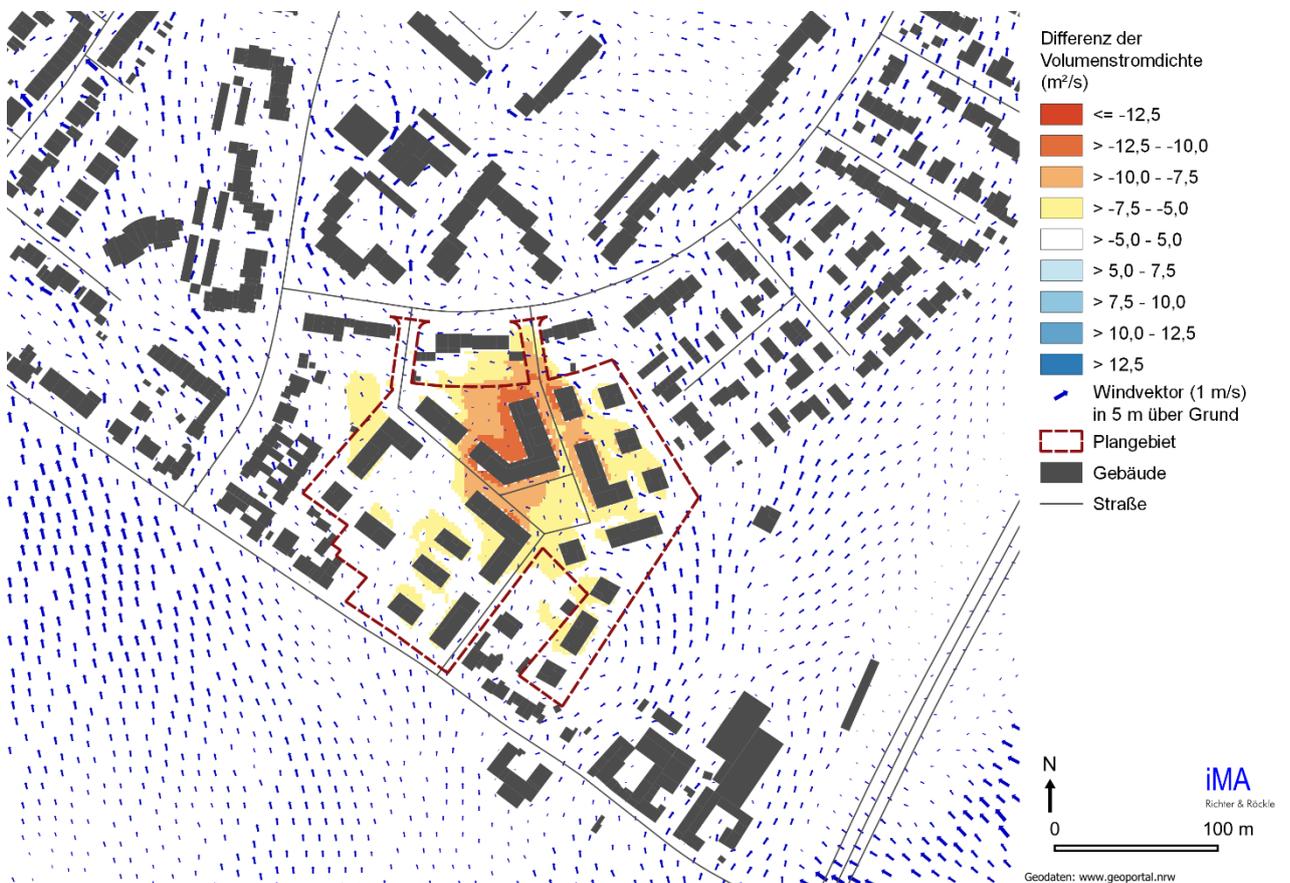
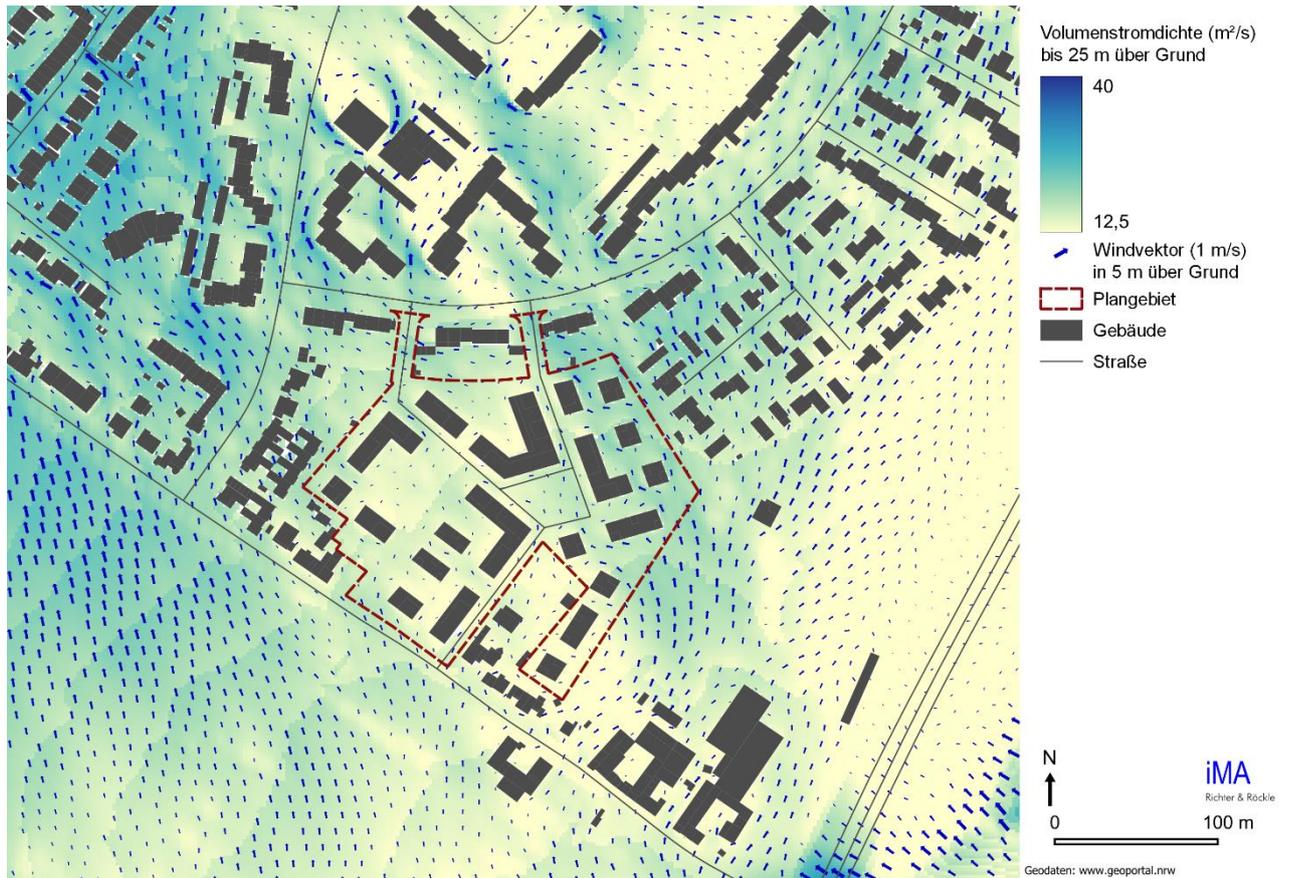


Abbildung 11-13: Nächtliche bodennahe Volumenstromdichte und Windverteilung in 10 über Grund im Planfall 1 „Cluster“ (oben) und die Änderung gegenüber dem Bestand (unten).

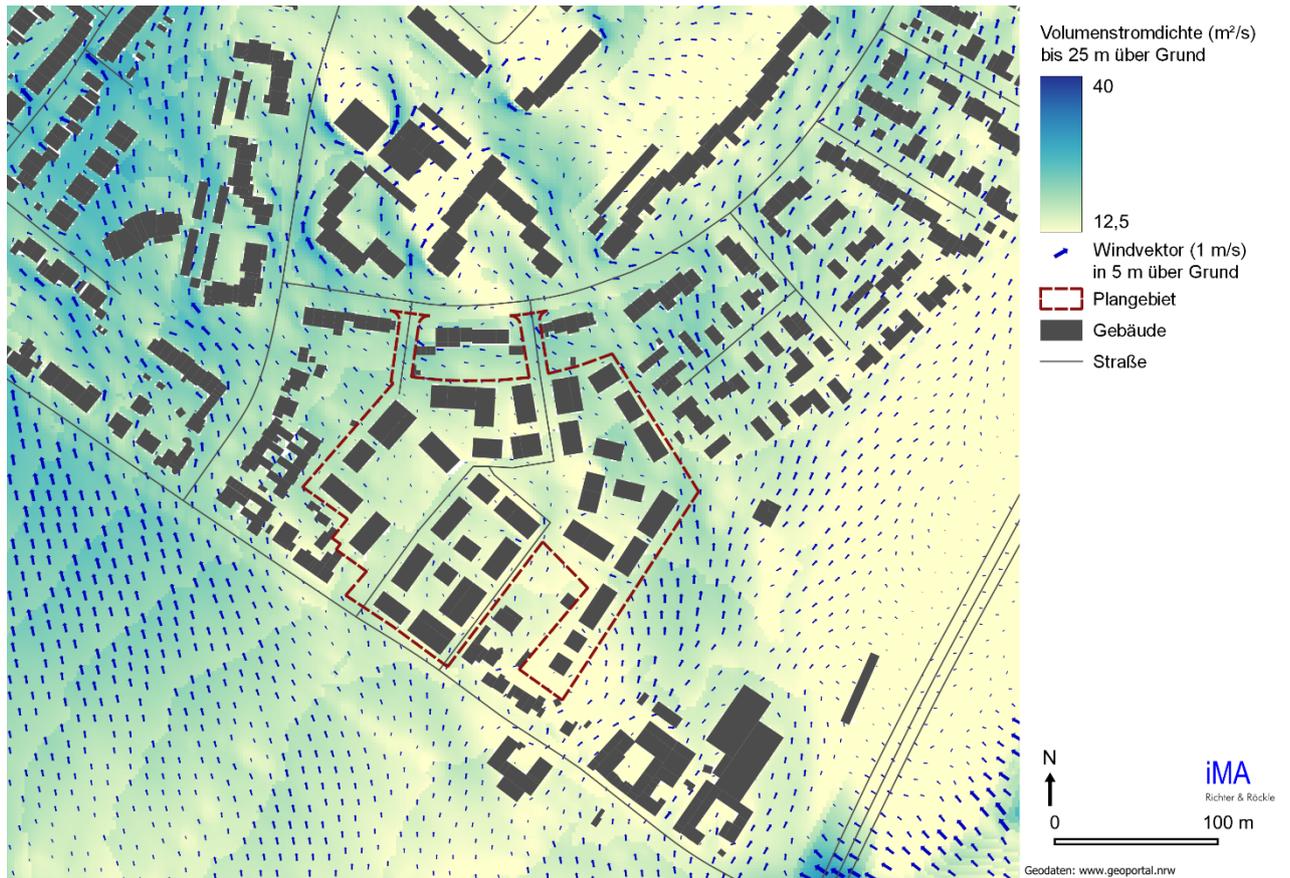


Abbildung 11-14: Nächtliche bodennahe Volumenstromdichte und Windverteilung in 10 über Grund im Planfall 2 „Höfe“ (oben) und die Änderung gegenüber dem Bestand (unten).

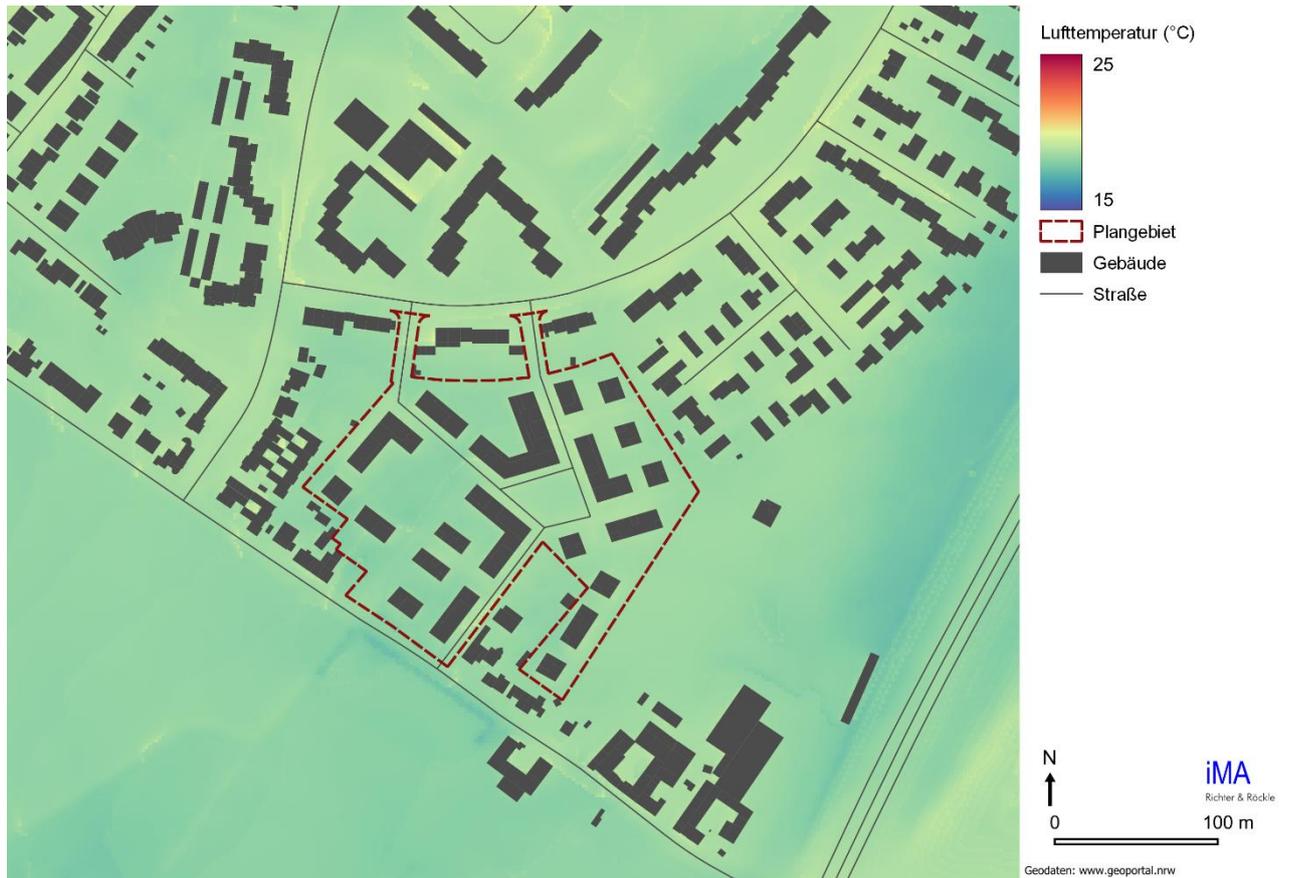


Abbildung 11-15: Nächtlche Lufttemperatur in 2 m über Grund im Planfall 1 „Cluster“ (oben) und die Änderung gegenüber dem Bestand (unten).

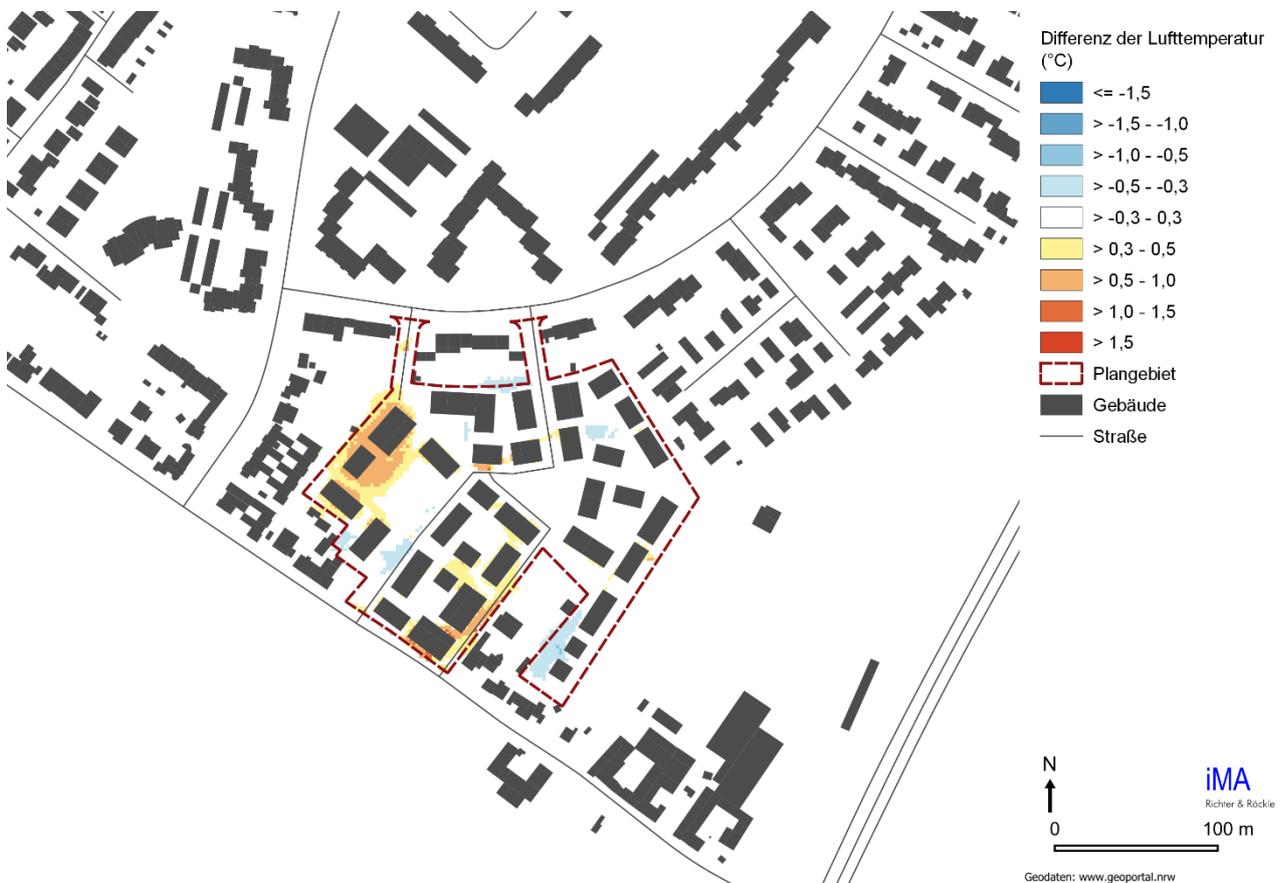
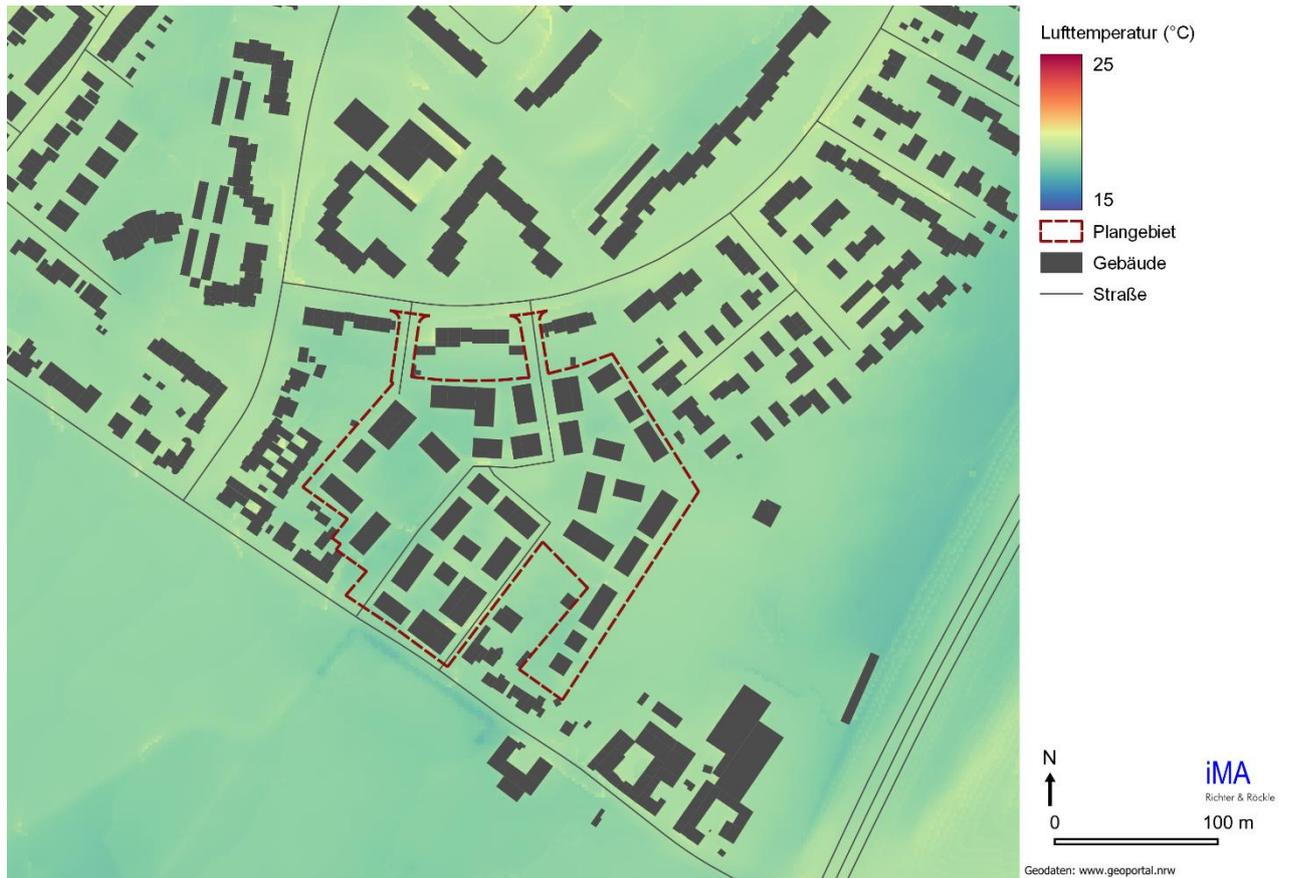


Abbildung 11-16: Nächtliche Lufttemperatur in 2 m über Grund im Planfall 2 „Höfe“ (oben) und die Änderung gegenüber dem Bestand (unten).

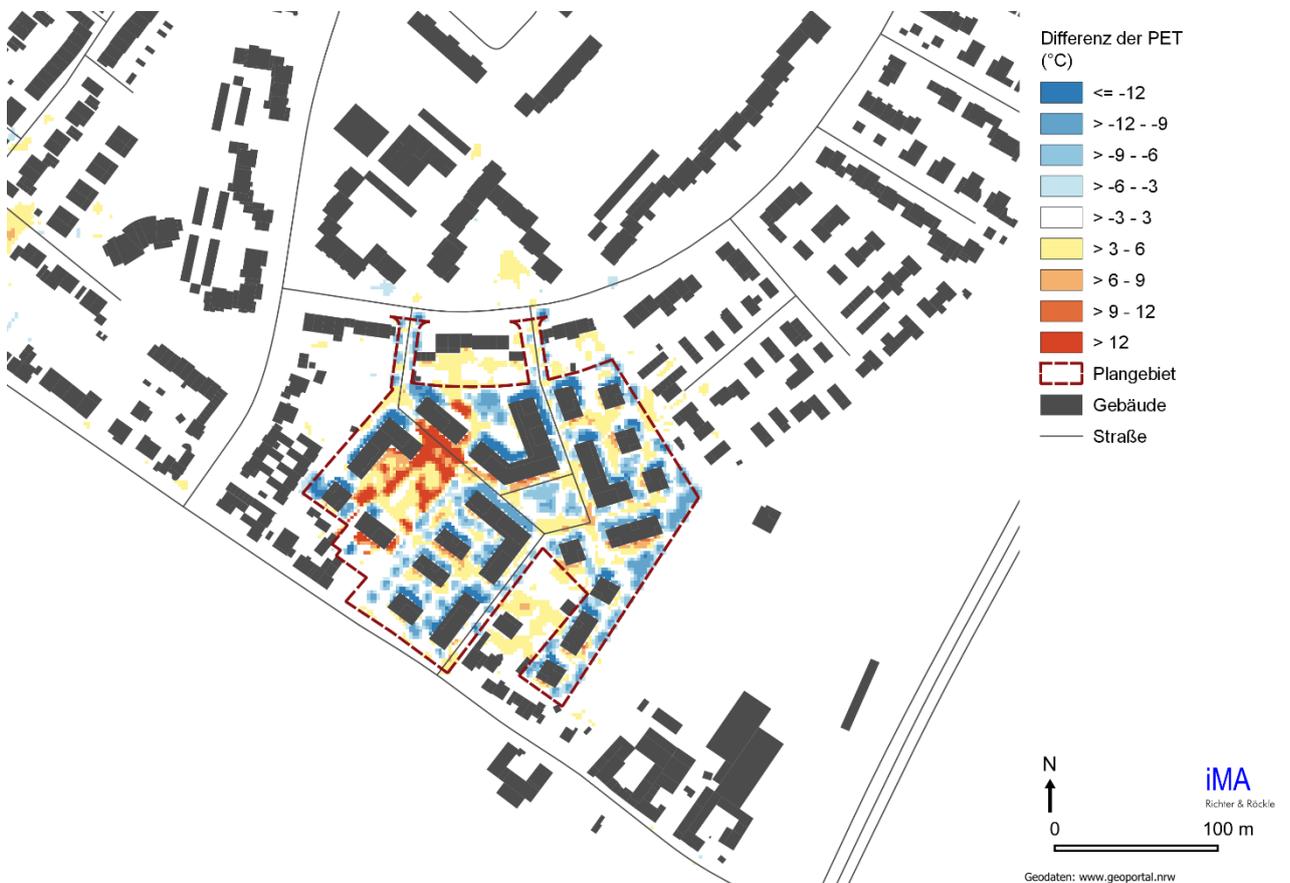
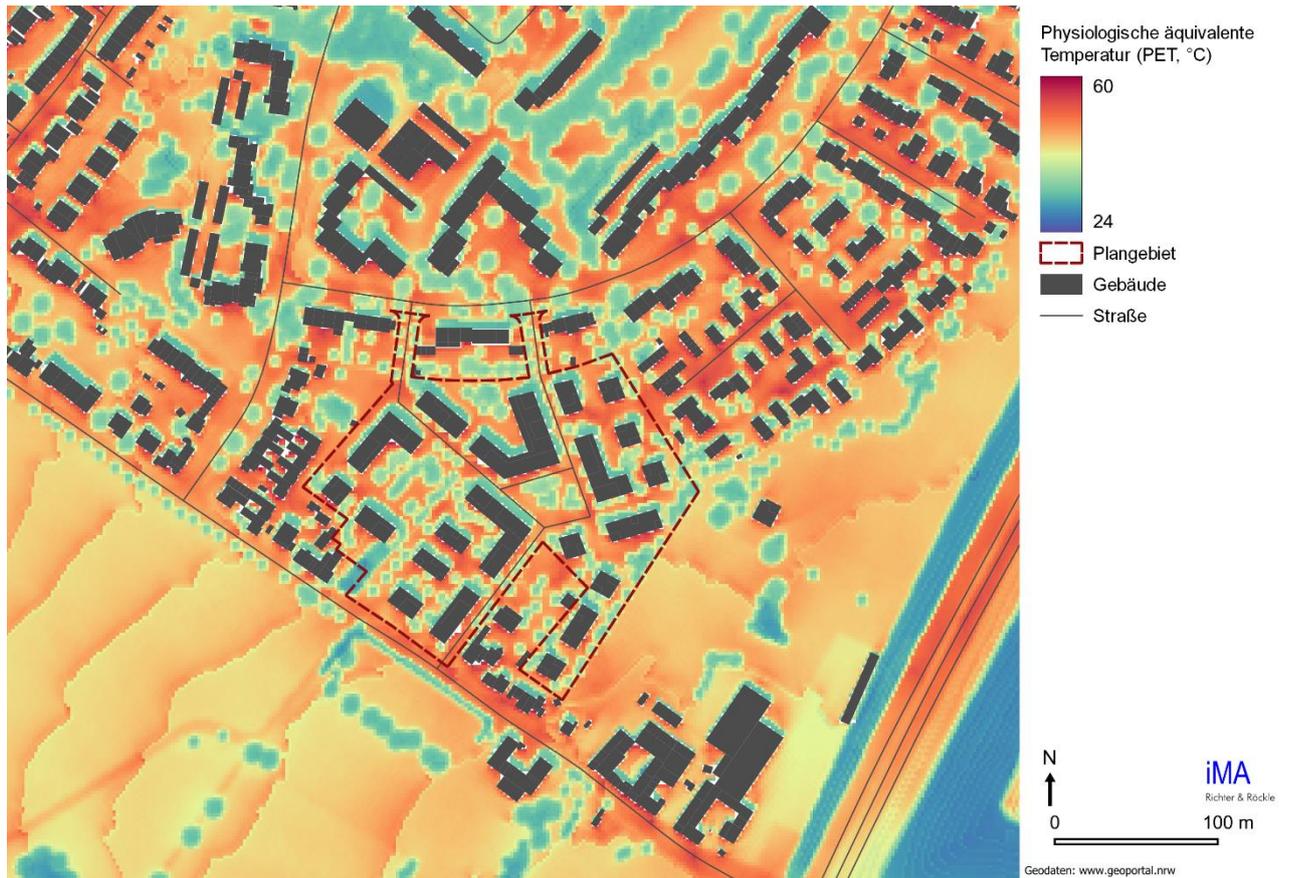


Abbildung 11-17: PET zur Mittagszeit im Planfall 1 „Cluster“ (oben) und die Änderung gegenüber dem Bestand (unten).

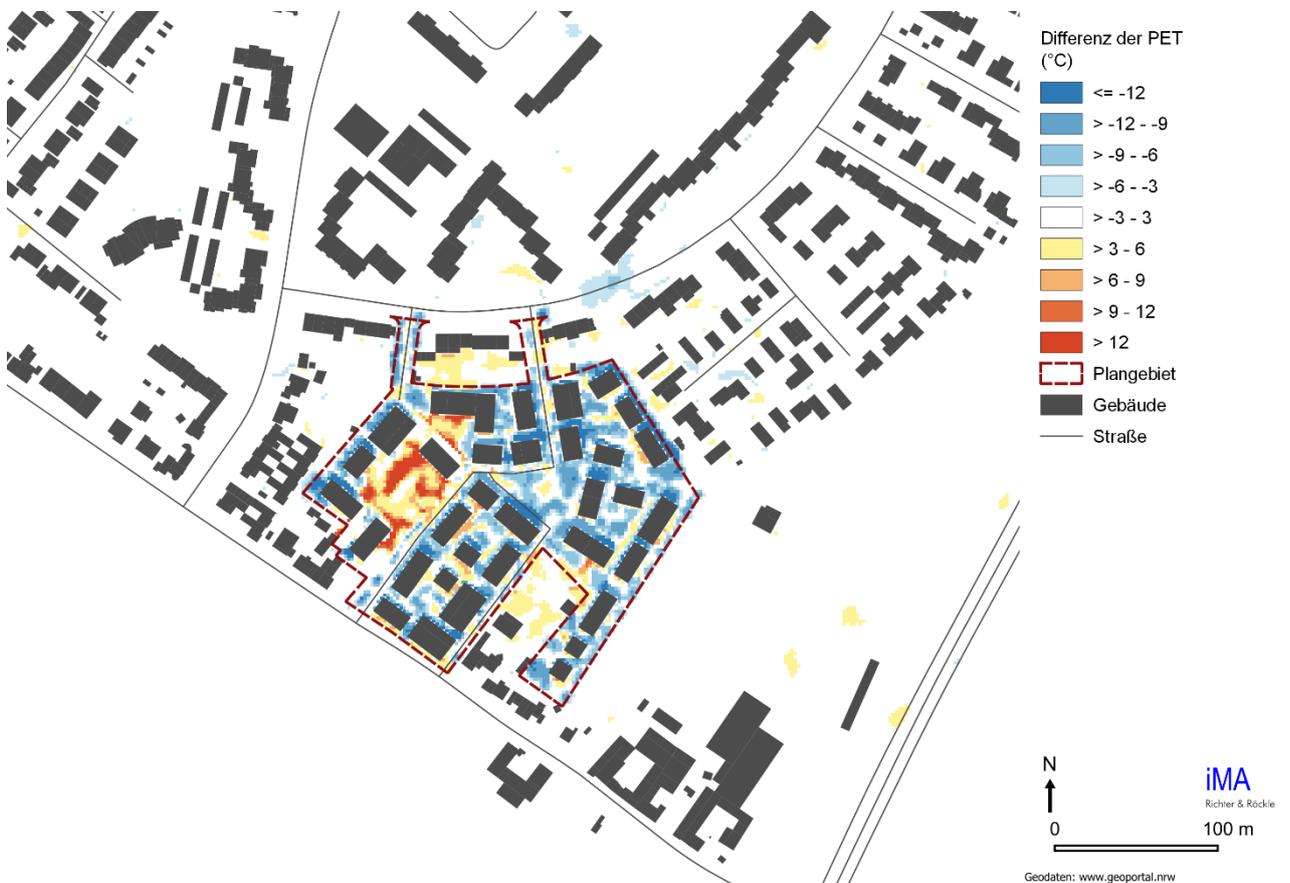
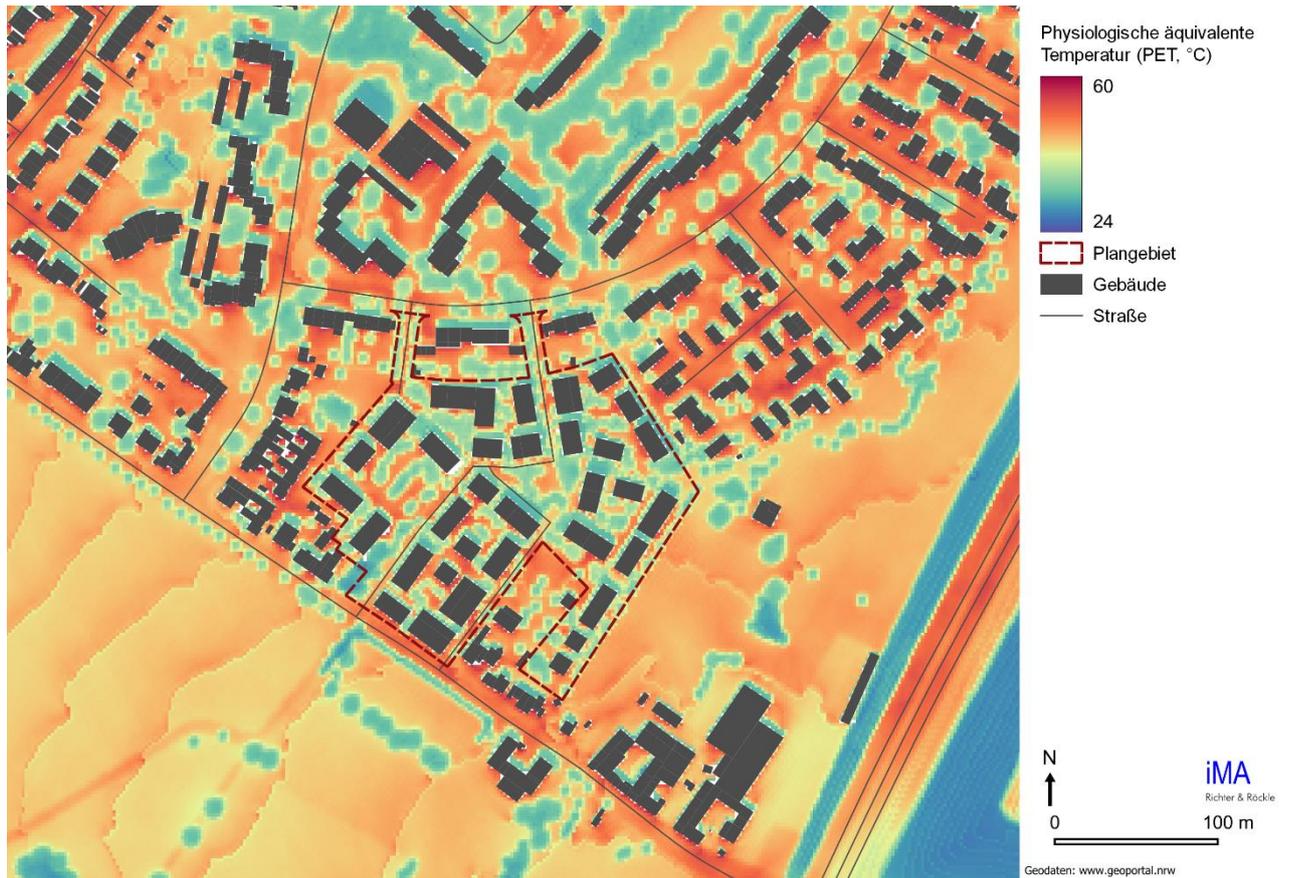


Abbildung 11-18: PET zur Mittagszeit im Planfall 2 „Höfe“ (oben) und die Änderung gegenüber dem Bestand (unten).