



Lohmeyer

**BEBAUUNGSPLAN KRV725
„RIEGEL UND REITER“**

**LOKALKLIMATISCHES GUT-
ACHTEN**

Auftraggeber:

RIEGEL & REITER BAU GMBH
Am Heiligenberg 8
99334 Amt Wachsenburg

Bearbeitung:

Lohmeyer GmbH
Niederlassung Karlsruhe

Dr. rer. nat. B. Brecht

Dipl.-Met. A. Moldenhauer

Dezember 2020
Projekt 10105-20-02
Berichtsumfang 58 Seiten

INHALTSVERZEICHNIS

ERLÄUTERUNG VON FACHAUSDRÜCKEN	1
1 ZUSAMMENFASSUNG	4
2 AUFGABENSTELLUNG	7
3 VORGEHENSWEISE	8
3.1 PALM-4U	9
4 EINGANGSDATEN	11
4.1 Lage des Untersuchungsgebietes	11
4.2 Meteorologische Daten	15
5 ERGEBNISSE	23
5.1 Simulation ohne Antrieb	23
5.2 Simulation mit Anströmung aus Nordost	39
6 FAZIT	55
7 LITERATUR	58

Hinweise:

Vorliegender Bericht darf ohne schriftliche Zustimmung der Lohmeyer GmbH nicht auszugswise vervielfältigt werden.

Die Tabellen und Abbildungen sind kapitelweise durchnummeriert.

Literaturstellen sind im Text durch Name und Jahreszahl zitiert. Im Kapitel Literatur findet sich dann die genaue Angabe der Literaturstelle.

Es werden Dezimalpunkte (= wissenschaftliche Darstellung) verwendet, keine Dezimalkommas. Eine Abtrennung von Tausendern erfolgt durch Leerzeichen.

ERLÄUTERUNG VON FACHAUSDRÜCKEN

Klima

Als Klima definiert man das langjährige Mittel und die Schwankungen des jährlichen Ablaufs der Witterung eines Gebietes, wobei unter Witterung der Wetterzustand einer Zeitspanne von mehreren Tagen verstanden wird (Scherhag et al., 1977). Der Wetterzustand wird beschrieben durch meteorologische Größen wie Wind, Temperatur, Feuchte, Sonnenscheindauer, Strahlungsmenge und Niederschlag.

Man unterscheidet das regionale Klima (mehrere 10 km) und das lokale Klima (ca. 100 m bis mehrere km). Wichtige Einflussgrößen für das regionale und lokale Klima sind, ausgehend von der geographischen Situation und der Verteilung der großräumigen Wetterlagen, die Topographie (z. B. Geländeform, Exposition) und das Muster der Landnutzung.

Im Rahmen der hier vorliegenden Planung interessieren die Auswirkungen der Planung auf das lokale Klima der Umgebung und die zu erwartenden klimatischen Verhältnisse im unmittelbaren Nahbereich der Maßnahme.

Temperaturgradient und Inversionen

Es entspricht einer physikalischen Gesetzmäßigkeit, dass die mittlere Lufttemperatur mit zunehmender Höhenlage eines Ortes abnimmt. Im Jahresmittel beträgt diese höhenbedingte Temperaturabnahme durchschnittlich 0.5 °C pro 100 m Höhenstufe. Im Sommer und Frühjahr erhöht sich der Betrag der Temperaturabnahme auf 0.6 °C pro 100 m Höhenstufe, während er im Herbst auf 0.4 °C und im Winter auf ca. 0.3 °C pro 100 m zurückgeht. Unter besonderen meteorologischen Bedingungen kann aber auch eine Temperaturzunahme mit zunehmender Höhenlage beobachtet werden. Hierbei spricht man von Inversionswetterlagen.

Luftschichtungszustände

Wird ein Luftpaket aus seiner Ruhelage heraus vertikal verschoben, so ändert sich seine Temperatur. Ist nun der Temperaturverlauf der ruhend gedachten Umgebung so beschaffen, dass das Luftquantum durch positive oder negative Auftriebskräfte wieder in seine Ausgangsposition zurückgetrieben wird, so nennen wir die Temperaturschichtung **stabil**. Genügt umgekehrt eine kleine Verschiebung aus der Ruhelage zur endgültigen Entfernung des Luftpaketes, so liegt entsprechend eine **labile** Schichtung vor. Zwischen beiden Möglichkeiten liegt die thermisch **neutrale** Schichtung, bei der das vertikal verschobene Luftpaket in jeder Position in einem indifferenten Gleichgewicht ist, das heißt keine Auftriebskräfte auftreten.

Dieses Stabilitätsverhalten übt einen grundlegenden Einfluss auf den vertikalen Austausch aus. Eine stabile Schichtung wird im Vergleich zum neutralen Fall diesen Austausch behindern, im Extrem unterbinden. Thermische Labilität wird dagegen zu einer mehr oder minder starken Durchmischung eines Luftpörpers und damit zu einer Intensivierung des Vertikal-austausches mit daraus resultierenden niedrigeren Schadstoffkonzentrationen führen.

Kaltluftstaugebiete und Kaltluftammelgebiete

Geländemulden, Senken und Täler wirken als nächtliche Kaltluftammelgebiete. Die dort in windschwachen wolkenarmen Strahlungsnächten von den Kaltlufteinzugsgebieten der Hänge und Höhen zusammenfließende Kaltluft lässt niedrigere nächtliche Temperaturminima entstehen, die am Tage - insbesondere im Sommer - durch die tälertypischen Übergangstemperaturen im statistischen Mittel wieder ausgeglichen werden.

Windsysteme

a) Allgemeines

Als Wind wird in der Meteorologie die gerichtete Bewegung der Luft bezeichnet. Ursache des Windes sind Luftdruckunterschiede. Wirkt nur die Kraft eines horizontalen Druckgradienten, entsteht der Euler-Wind, der nur in kleinräumigen Phänomenen eine Rolle spielt. Wird bei großräumigen Bewegungen der Einfluss der Erdrotation spürbar, so tritt die Corioliskraft zur Druckgradientenkraft hinzu. Der Wind weht isobarenparallel und wird geostrophischer Wind genannt. Sind die Isobaren gekrümmt, so tritt die Zentrifugalkraft hinzu. Dieser Wind wird Gradientwind genannt und kommt dem realen Wind noch etwas näher als der geostrophische Wind. Werden Winde in der atmosphärischen Grenzschicht (Bodennähe) betrachtet, so ist zusätzlich die Kraft der Bodenreibung zu berücksichtigen.

Für die kleinräumigen Betrachtungen innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht spielt die Corioliskraft keine relevante Rolle. Für die Luftbewegung und ihre räumliche Ausprägung (Windfeld) gewinnen Relief und Landnutzung an Bedeutung.

b) allochthone Windsysteme

Der Gradientwind als größte Näherung des realen Windes (siehe oben) ist als solcher nur in höheren Luftschichten ungestört zu beobachten. Die Erdoberfläche bremst die Luftbewegung. Die Reibungsschicht ist im Allgemeinen 1 000 bis 1 500 m hoch. Innerhalb dieser Reibungsschicht zeigt sich eine Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe. Allochthone Wetterlagen sind Wetterlagen mit höheren Windgeschwindigkeiten, so genannte Gradientwindlagen.

c) autochthone Windsysteme

Bei gradientschwachen Wetterlagen (Strahlungswetterlagen) oder bei einer Abkopplung der bodennahen Strömung durch stabile Schichtung der Atmosphäre können auch schwächere Druckunterschiede (durch lokal unterschiedliche Erwärmung) Luftströmungen von kaum spürbaren Luftbewegungen bis hin zu mittleren und hohen Windgeschwindigkeiten hervorrufen. Wie der Name also bereits impliziert, entstehen thermisch induzierte Windsysteme als Ausgleichsströmung zwischen verschiedenen thermischen Regimes innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht. Vertreter thermisch induzierter Prozesse sind Land- und Seewind, Flurwinde, Berg- und Talwind und Kaltluftströmungen.

1 ZUSAMMENFASSUNG

Auf dem Erfurter Ringelberg ist die Bebauung auf einer bisher brachliegenden Fläche geplant. Das Plangebäude befindet sich südlich der Leipziger Straße und westlich des dortigen Supermarktes im Osten des Erfurter Siedlungsgebietes auf der Kuppe des Geländerückens des Ringelbergs. Unmittelbar westlich des Plangebietes fällt das Gelände auf einer Grünfläche nach Westen beziehungsweise Südwesten ab. Das Plangebäude erstreckt sich von der Leipziger Straße etwa 82 m in südöstliche Richtung bei einer Breite von etwa 20 m im nördlichen und 35 m im südlichen Bereich. Neben einer Grundhöhe von etwa 8 m besitzt das Plangebäude im nordwestlichen beziehungsweise südöstlichen Teil zwei höhere Bereiche mit bis zu etwa 26 m beziehungsweise bis zu ca. 20 m Höhe. Auf der nördlichen Seite der Leipziger Straßen schließen sich Bereiche mit Kleingartenanlagen an.

Für die Einbindung lokalklimatischer Belange in die Bebauungsplanung bestehen keine einheitlichen Vorgaben zu inhaltlichen Themen und zu Beurteilungsgrößen. Dementsprechend werden in den Betrachtungen die lokalen Besonderheiten bezüglich lokalklimatischer Belange herangezogen und die Belange in den Vordergrund gestellt, die durch die Planungen modifiziert werden. Das betrifft beispielsweise die bodennahen Strömungsfelder im Hinblick auf die nächtlichen Belüftungsverhältnisse, d. h. den möglichen Abtransport lufthygienisch oder thermisch belasteter Luftmassen. Für das Aufzeigen der Auswirkungen der geplanten Nutzungsänderungen auf die Kaltluftströmungen wurden Simulationen für den baulichen Bestand und den Planfall mit dem Modell PALM-4U durchgeführt. Dafür wurde ergänzend zum Untersuchungsgebiet das umliegende Gelände mit den Geländeanstiegen berücksichtigt. Das Gebiet wurde so groß gewählt, dass die Einflüsse der umliegenden Geländeerhebungen auf die Kaltluftströmungen erfasst werden (gesamtes Einzugsgebiet der Kaltluft wurde mitbetrachtet). Es wurden Simulationen ohne Antrieb und mit Anströmung aus nordöstlichen Richtungen durchgeführt, bei der tagsüber die größte Anzahl an heißen Tagen gemessen wird.

Die Ergebnisse der Simulationen ohne Anströmung zeigen unterschiedliche Phasen der Kaltluftströmungen im Untersuchungsgebiet. In der Anfangsphase der Kaltluftbildung ergeben sich im Untersuchungsgebiet teilweise ungerichtete, teilweise schwache lokale Strömungen, d. h. östliche Hangabwinde am Galgenberg und Ringelberg in Richtung Erfurter Siedlungsbereich, die aber in der Erfurter Mulde, d. h. in der Ebene, aufgrund ihrer schwachen Intensität nicht mehr als gerichtete Strömungen wahrnehmbar sind; im Bereich des Plangebietes ergeben sich ebenfalls keine gerichteten Strömungen aufgrund der Kuppenlage. Dementsprechend ergeben sich aufgrund der Planung nur im Nahbereich der Planungen wesentli-

che Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsrichtung sowie Lufttemperatur. Geringe Änderungen reichen bis maximal 70 m nach Südwesten auf die dortige Freifläche und beeinflussen somit nicht die nächtlichen Belüftungsverhältnisse im bestehenden Siedlungsbereich. Bei ausgeprägter Kaltluftbildung, etwa um Mitternacht, ergeben sich im Untersuchungsgebiet bodennah Anströmungen aus südlichen und südöstlichen Richtungen, die von den an Erfurt im Süden angrenzenden Randhöhen heran transportiert werden, wie z. B: dem Zeisigberg und Fuchshügel und den Ausläufern des Thüringer Waldes. In höheren Schichten ergeben sich Strömungen aus südwestlichen Richtungen, die ebenfalls den Einfluss des Thüringer Waldes und dessen Vorläufer andeuten. Somit ergeben sich Einschränkungen in den Belüftungsverhältnissen sowie leichte Temperaturerhöhungen bis etwa 0.6 K aufgrund der Planung, die nach Norden bis etwa 300 m in die Kleingartenanlagen reichen, Wohnbebauung ist davon nicht betroffen. In den übrigen Bereichen ergeben sich keine Einschränkungen.

Die Ergebnisse der Simulationen mit nordöstlicher Anströmung zeigen in der Anfangsphase der Kaltluftbildung im Untersuchungsgebiet etwas intensivere lokale Strömungen als im Fall ohne Anströmung, d. h. östliche Hangabwinde mit 0.5 m/s bis 1 m/s am Galgenberg und Ringelberg in Richtung des Erfurter Siedlungsbereiches, die sich in der Erfurter Mulde weiter nach Westen fortsetzen. In den Kuppenlagen des Galgenberges und Ringelberges ergeben sich schwache, teils ungerichtete Strömungen. In der Anfangsphase der Kaltluft wirkt der Antrieb aus Nordost mit etwa 2 m/s noch über der sich bildenden Kaltluft und somit im Bereich des Plangebäudes. Dementsprechend ergeben sich Änderungen in der Kaltluftvolumenstromdichte mit etwas über 10 %, die in kleine Teilbereiche des Siedlungsgebietes westlich der Grünfläche, die südwestlich des Plangebietes liegt, hinein reichen. Die wesentlichen Einschränkungen treten dabei ab Höhen von etwa 10 m über Grund auf, bodennah erreichen die Einschränkungen das Siedlungsgebiet nicht und reichen dort bis etwa 200 m auf die Grünfläche. Die wesentlichen Änderungen der Lufttemperatur beschränken sich auf die Nahbereiche des Plangebäudes. Bei ausgeprägter Kaltluftbildung, etwa um Mitternacht, ergeben sich im Untersuchungsgebiet bodennah teilweise noch schwache Hangabwinde an den Hängen des Galgenberges und Ringelberges, sonst großteils ungerichtete, sehr schwache und nicht wahrnehmbare Strömungen. Auf den Kuppenlagen des Galgenberges und Ringelberges, sowie in den übrigen Bereichen ab etwa 10 m bis 15 m Höhe, ergeben sich Anströmungen aus südlichen Richtungen, die von den südlich von Erfurt liegenden Randhöhen heran strömen. Damit ergeben sich Einschränkungen in den Belüftungsverhältnissen aufgrund der Planung, die nach Norden bis etwa 200 m in die Kleingartenanlagen reichen, Wohnbebauung ist davon nicht betroffen. Modifikationen der Temperatur mit bis zu 0.6 K

ergeben sich bis in maximal 100 m Entfernung vom Plangebäude. In den übrigen Bereichen ergeben sich keine Einschränkungen.

Insgesamt zeigen die Simulationsergebnisse, dass sich bei autochthonen Wetterlagen im Laufe der Nacht normalerweise südliche Strömungen von den Randhöhen südlich von Erfurt, d. h. von den näheren Randhöhen wie beispielsweise dem Zeisigberg und Fuchshügel bis zu den weiter entfernt liegenden Randhöhen des Thüringer Waldes und seinen Vorläufern, bis in das Untersuchungsgebiet durchsetzen. Zu Beginn der Nacht und bei etwas stärkeren Anströmungen aus Nordost, d. h. etwa 2 m/s, können sich schwache bis mäßige Hangabwinde bodennah bilden und in Richtung der Erfurter Mulde nach Westen strömen. Die Ergebnisse der Simulationen (Kapitel 5) können mit den Messdaten (Kapitel 4) belegt werden, die zeigen, dass nachts im Untersuchungsgebiet bei wolkenarmen autochthonen Wetterlagen mehr bodennahe Anströmungen aus südlichen Richtungen als Ostanströmungen gemessen werden, wobei Ostanströmungen tendenziell die ersten 1 bis 3 Stunden nach Sonnenuntergang vorherrschen und danach von südlichen Anströmungen abgelöst werden.

2 AUFGABENSTELLUNG

Auf dem Erfurter Ringelberg ist die Bebauung einer bisher brachliegenden Fläche in Kuppenlage geplant. Dazu sind folgende Fragestellungen zu beantworten:

1. Welche Auswirkungen hat die vorgesehene Bebauung/Flächennutzung auf den Kaltluftabfluss (Volumen und Geschwindigkeit) in Richtung Kernstadtgebiet?
2. Mit welchen Änderungen der bioklimatischen Verhältnisse ist im Plangebiet und in den angrenzenden Flächen auf dem Ringelberg zurechnen?
3. Welche städtebaulichen/sonstigen Maßnahmen werden empfohlen, um die ggf. ermittelten Beeinträchtigungen der bio- und stadtklimatischen Funktionalität bzw. des Kaltlufttransports und der Durchlüftung zu mindern?

3 VORGEHENSWEISE

Für die Einbindung lokalklimatischer Belange in die Bebauungsplanung bestehen keine einheitlichen Vorgaben zu inhaltlichen Themen und zu Beurteilungsgrößen. Dementsprechend werden in den Betrachtungen die lokalen Besonderheiten bezüglich lokalklimatischer Belange herangezogen und die Belange in den Vordergrund gestellt, die durch die Planungen modifiziert werden. Das betrifft beispielsweise die bodennahen Strömungsfelder im Hinblick auf die nächtlichen Belüftungsverhältnisse, d. h. den möglichen Abtransport lufthygienisch oder thermisch belasteter Luftmassen durch Kaltluftabflüsse.

Erfurt liegt im südlichen Bereich des Thüringer Beckens in einer nach Norden geöffneten Mulde auf etwa 190 m ü. NHN, wobei die Erhebungen im Osten wie z. B. Ringelberg, Galgenberg, Stollberg, Schwabenberg, etc. etwa 30 m bis 40 m höher liegen und einen begrenzenden Geländerücken darstellen. Südlich beziehungsweise südöstlich des Siedlungsgebietes von Erfurt steigt das Gelände auf etwa 300 m bis 350 m ü. NHN (Steigerwald) beziehungsweise mehr als 400 m ü. NHN (z. B. Zeisigberg, Fuchshügel, etc.) an. Die weiter im Süden beziehungsweise Südwesten liegenden Randhöhen des Thüringer Waldes erreichen Höhen bis über 900 m ü. NHN. Das Plangebiet liegt am östlichen Rand des Stadtgebietes von Erfurt auf dem Ringelberg, der etwa 30 m über der Erfurter Mulde liegt. Westlich des Plangebietes fällt das Gelände nach Erfurt hin ab, sodass durch das Relief bedingt nächtliche Hangabwinde zu lokalen Kaltluftströmungen führen. Die deutlich höheren Erhebungen südlich von Erfurt führen im Laufe der Nacht intensivere Bergwinde bei den entsprechenden Wetterlagen in das Siedlungsgebiet von Erfurt und in das Plangebiet.

Mit dem Bebauungsplan „Riegel und Reiter“ ändern sich dort die Landnutzungen und die zusätzlichen Gebäude sind als Strömungshindernisse wirksam. Dadurch können bestehende regionale Windströmungen sowie lokal thermisch induzierte Winde, wie Kaltluftströmungen, beeinträchtigt werden. Die genannten Modifizierungen und Auswirkungen beziehen sich überwiegend auf die bodennahen Windverhältnisse und die Temperaturverhältnisse in der näheren Umgebung.

Die Kaltluftbildung und Entwicklung der Kaltluftströmung entsteht an wind- und wolkenarmen Tagen nach Sonnenuntergang, indem vegetationsbestandene Flächen gegenüber versiegelten Flächen oder Wasserflächen intensiver und rascher abkühlen. Damit kühlt auch die darüber gelegene Luftschicht intensiver und rascher ab. Bei geneigtem Gelände setzen sich diese kühlen Luftmassen der Geländeneigung folgend in Bewegung und bilden Hangabwinde. In Einschnitten und Tälern werden die Hangabwinde zusammengeführt und bilden inten-

sive Kaltluftströmungen aus, die beispielsweise die nächtliche Belüftung von Siedlungsgebieten fördern können.

Dementsprechend werden hier die Auswirkungen der Planungen auf die nächtlichen Kaltluftströmungen mit Modellsimulationen betrachtet. Für die vorliegende Planung werden Kaltluftberechnungen mit dem prognostischen Modell PALM-4U mit einer hohen räumlichen Auflösung durchgeführt, sodass die Um- und Überströmung der Baukörper im Plangebiet explizit berücksichtigt werden kann und um qualitative sowie quantitative Aussagen über mögliche Modifikationen der Kaltluftströmungen und thermischen Verhältnisse zu erhalten. Betrachtet werden der derzeitige Zustand entsprechend der derzeitigen baulichen Nutzung und ein Planzustand mit einem vorgelegten Entwurf eines Bauvorhabens.

3.1 PALM-4U

Zur Simulation der Verteilung von Klimaparametern in Einzelsituationen wurde das numerische Modell PALM-4U (<https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/palm4u>) verwendet, das z. B. die Variablen potentielle Temperatur, spezifische Feuchte und die Windkomponenten prognostisch berechnet. PALM-4U ist ein meso- und mikroskaliges Modell, das die Wechselwirkungen zwischen dem Boden, von Oberflächen und der Atmosphäre unter Berücksichtigung des Reliefs und der Landnutzung sowie von Strömungshindernissen, z. B. von Gebäuden, sonstigen Bauwerken oder der Vegetation, beschreibt. Es basiert auf den Grundgesetzen der Strömungs- und Thermodynamik und beinhaltet u. a. die Simulation von:

- Umströmungen, Überströmungen und Unterströmungen von Hindernissen bzw. Bauwerken, z. B. Gebäuden,
- Austausch von Wärme und Feuchte an natürlichen und anthropogenen Oberflächen,
- turbulenten Strömungen,
- Wechselwirkungen von Strahlung, Impuls und Wärme mit einer expliziten Vegetationsschicht,
- bioklimatischen Bewertungsindizes,

Für weiterführende Informationen sei auf die o. g. Internetadresse und Fachliteratur (z. B. Raasch und Schröter, 2001; Maronga et al., 2015, 2019) verwiesen.

Das Modell ist nach der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9 „Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle“ validiert (<https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/doc/tec/evaluation>). Eine Validierung des komplexen Testfalls E8 „Stuttgarter Talkessel Strömungskanalisation, Kalt-

luftabflüsse“ der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 7 „Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle“ wurde von unserem Büro erfolgreich durchgeführt (Lohmeyer, 2020).

Grundlage der Simulationsrechnungen sind die Aufnahme des Reliefs und der Landnutzung sowie der Bebauung nach Lage und Höhe im Betrachtungsgebiet. Die Simulationen der nächtlichen Ausgleichsströmungen werden in drei Schritten mit einem sogenannten Nesting-Verfahren (Gitterverfeinerung) durchgeführt. Um alle relevanten Kaltlufteinzugsgebiete zu erfassen, wurde eine grobe Simulation mit 180 m horizontaler Maschenweite bei 528 x 552 Gitterpunkten (ca. 95 km x 100 km) durchgeführt, wobei das Gitter bis in etwa 11 km Höhe bei einer bodennahen vertikalen Auflösung von 16 m reicht. Mittels Nesting wurde ein kleineres Gebiet mit 30 m horizontaler Maschenweite und 504 x 504 Gitterpunkten (ca. 15 km x 15 km) darin berechnet; die vertikale Maschenweite ist 8 m in Bodennähe. Für das Untersuchungsgebiet wurde eine horizontale Maschenweite von 5 m bei 456 x 456 Gitterpunkten (ca. 2.3 km x 2.3 km) genutzt, um Gebäudestrukturen dreidimensional darstellen zu können; die vertikale Auflösung beträgt in Bodennähe 4 m. Das Setup der Simulationen entspricht den Anforderungen der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 7 „Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle“ (VDI 3787 Blatt 7, 2017) und der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 9 „Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle“ (VDI 3787 Blatt 9, 2017).

Folgende Einteilung wurde für die vorkommenden Oberflächen u. a. gewählt:

- Bauwerke unterschiedlicher Größe, d. h. Gebäude (inneres Gebiet),
- versiegelte oder teils versiegelte Oberflächen wie Straßen, Wege und Parkplätze,
- lockere bis dichte städtische Bebauung (äußere Simulationsgebiete),
- Grünflächen, Grünflächen mit Sträuchern, vegetationsarme Flächen, landwirtschaftlich genutzte Flächen,
- Sportflächen, Wasserflächen und
- Waldflächen bzw. Baumgruppen als dreidimensionale Vegetation.

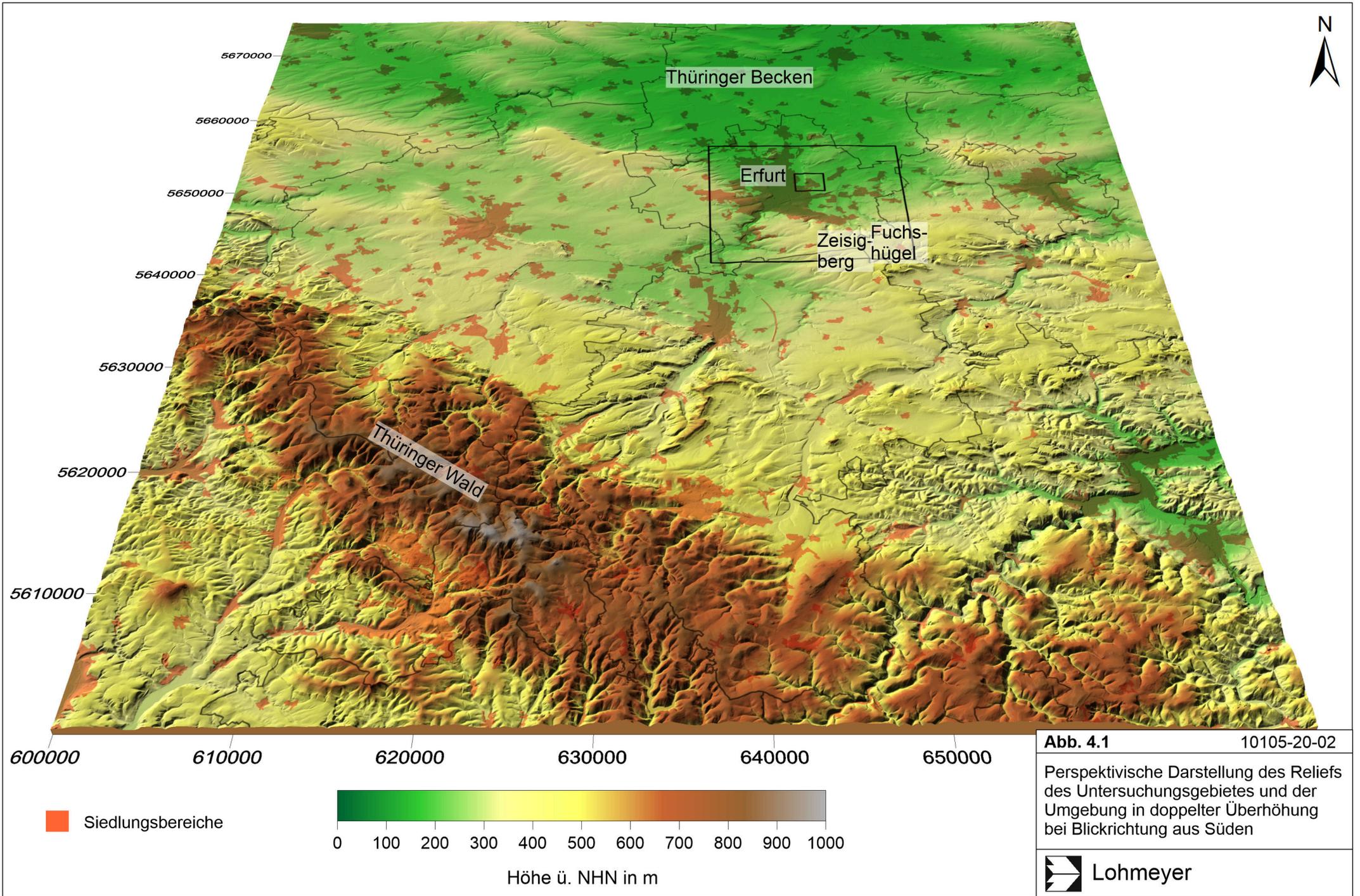
4 EINGANGSDATEN

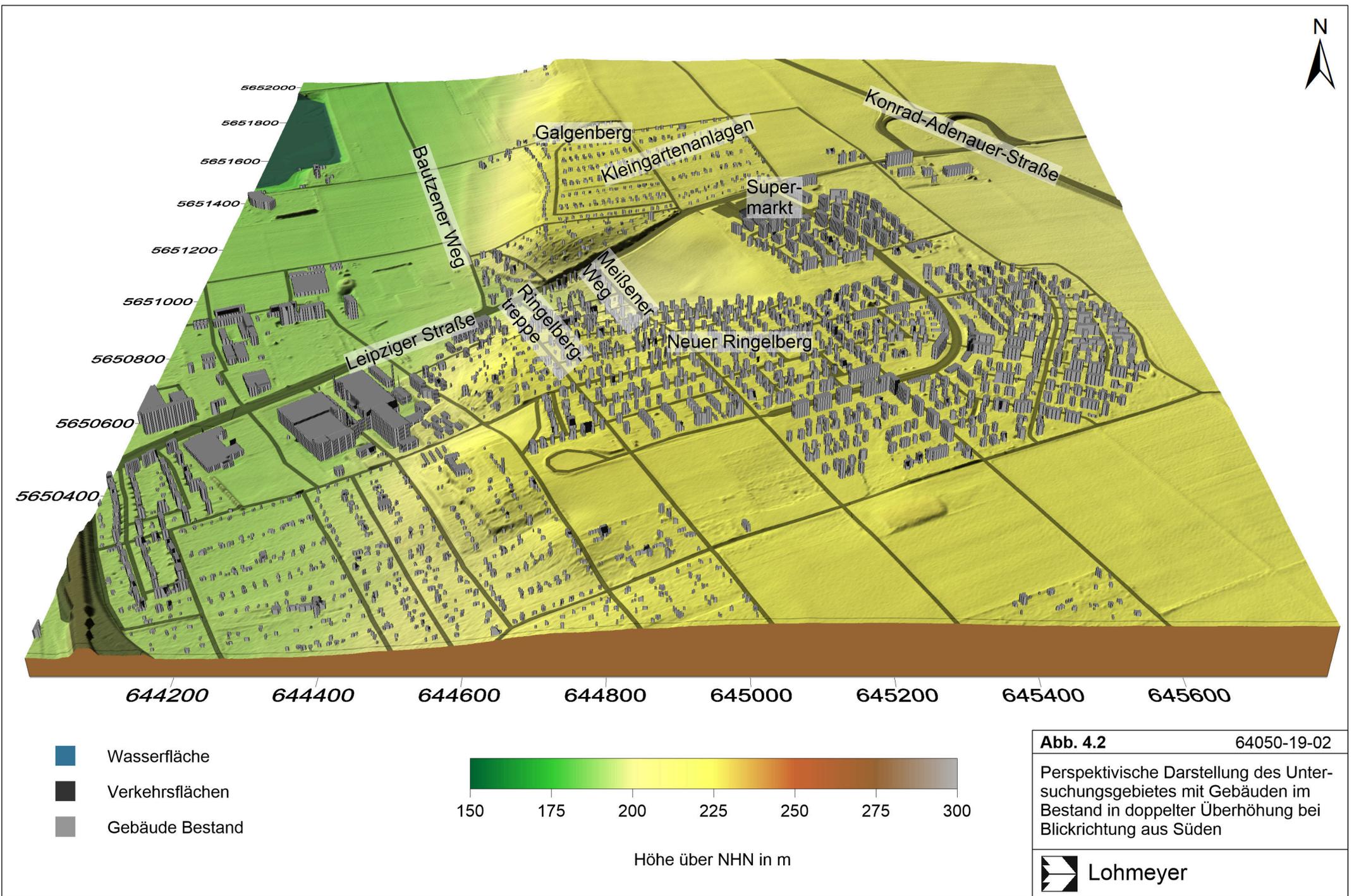
Die in diesem Gutachten genutzten Geländeinformationen und die Lage und Höhe der Gebäude im Bestand wurden dem Geoportal Thüringen entnommen (<https://www.geoportal-th.de/de-de/>). Die Landnutzungsdaten basieren sowohl auf Daten des Geoportals Thüringen, als auch auf den Daten des Urban Atlas (<https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas>) und wurden teilweise detailliert anhand von Luftbildern nachbearbeitet sowie hohe zusammenhängende Vegetation, d. h. Baumgruppen, hinzugefügt. Die Lage und Höhe der Plangebäude und die geplanten Landnutzungen stammen aus folgenden Dokumenten:

- Planzeichnung „Bauvorhaben: Riegel & Reiter auf dem Ringelberg in Erfurt“ (Riegel und Reiter Bau GmbH, 24.06.2019)
- Lageplan „Bauvorhaben: OS - Riegel & Reiter, Leipziger Strasse, 99085 Erfurt“ (Riegel und Reiter Bau GmbH, 02.09.2020)
- Grundrisse „1.OG Ansicht Ost“, „2.OG Ansicht West“ und „3.OG Ansicht Süd/Nord“ (alle: Riegel und Reiter Bau GmbH, 06.06.2020)

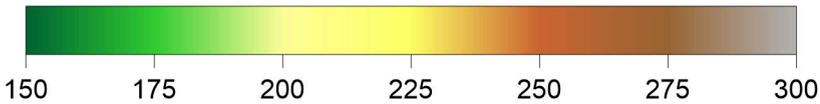
4.1 Lage des Untersuchungsgebietes

Erfurt liegt im südlichen Bereich des Thüringer Beckens in einer nach Norden geöffneten Mulde auf etwa 190 m ü. NHN, wobei die Erhebungen im Osten wie z. B. Ringelberg, Galgenberg, Stollberg, Schwabenberg, etc. etwa 30 m bis 40 m höher liegen und einen begrenzenden Geländerrücken darstellen. Südlich beziehungsweise südöstlich des Siedlungsgebietes von Erfurt steigt das Gelände auf etwa 300 m bis 350 m ü. NHN (Steigerwald) beziehungsweise mehr als 400 m ü. NHN (z. B. Zeisigberg, Fuchshügel, etc.) an. Die weiter im Süden beziehungsweise Südwesten liegenden Randhöhen des Thüringer Waldes erreichen Höhen bis über 900 m ü. NHN. **Abb. 4.1** zeigt eine perspektivische Darstellung des Reliefs von dem überwiegenden Teil des äußeren Simulationsgebietes, Siedlungsflächen sind rötlich gekennzeichnet. Die beiden feineren Simulationsgebiete sind als schwarz umrandete Rechtecke dargestellt, wobei das Plangebiet innerhalb des inneren Rechtecks am östlichen Rand des Siedlungsgebietes von Erfurt auf dem Ringelberg liegt, etwa 30 m über der Erfurter Mulde. **Abb. 4.2** zeigt das Relief des Untersuchungsgebietes mit Gebäuden (grau) im Bestand, Verkehrswege sind in dunkelgrau dargestellt. Vom zentralen Erfurter Siedlungsgebiet westlich beziehungsweise südwestlich des dargestellten Bereichs steigt das Gelände nach Osten hin etwa 30 m an, ehe es das Plateau der Geländerrücken des Galgenbergs und Ringelbergs erreicht. Bis zur Konrad-Adenauer-Straße im östlichen Bereich bleibt das Gelände nach Nordosten auf ähnlichem Niveau beziehungsweise fällt nach Osten wieder





- Wasserfläche
- Verkehrsflächen
- Gebäude Bestand

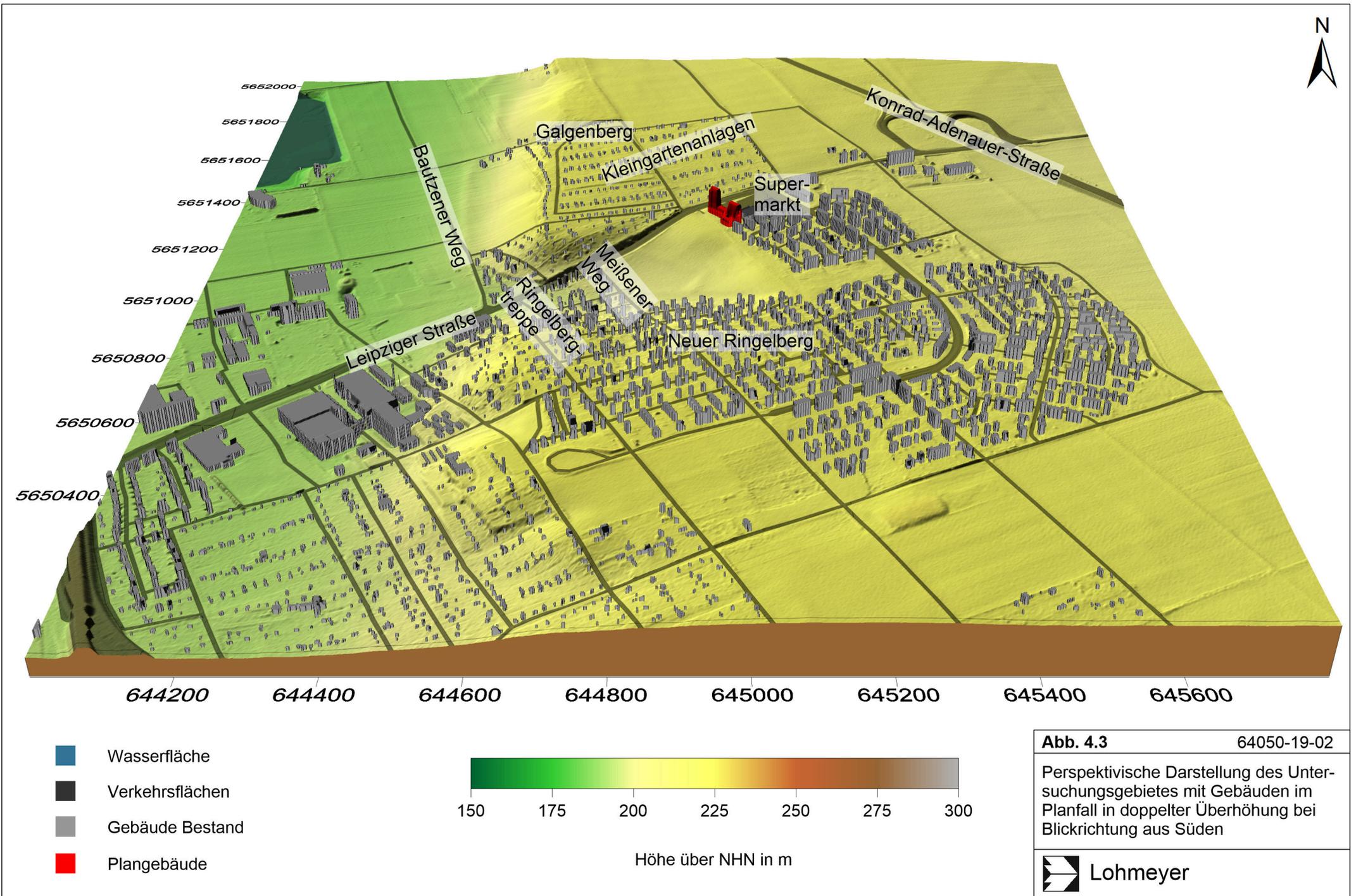


Höhe über NHN in m

Abb. 4.2 64050-19-02

Perspektivische Darstellung des Untersuchungsgebietes mit Gebäuden im Bestand in doppelter Überhöhung bei Blickrichtung aus Süden

Lohmeyer



geringfügig ab. **Abb. 4.3** zeigt das Relief des Untersuchungsgebietes mit Gebäuden im Bestand und dem Plangebäude, das rot dargestellt ist. Das Plangebäude befindet sich südlich der Leipziger Straße westlich des Supermarktes auf einer bisher brach liegenden Fläche auf der Kuppe des Geländerückens des Ringelbergs. Unmittelbar westlich des Plangebietes fällt das Gelände auf einer Grünfläche nach Westen beziehungsweise Südwesten ab. Das Plangebäude erstreckt sich von der Leipziger Straße etwa 82 m in südöstliche Richtung bei einer Breite von etwa 20 m im nördlichen und 35 m im südlichen Bereich. Neben einer Grundhöhe von etwa 8 m besitzt das Plangebäude im nordwestlichen beziehungsweise südöstlichen Teil zwei höhere Bereiche mit bis zu etwa 26 m beziehungsweise bis zu ca. 20 m Höhe.

4.2 Meteorologische Daten

Für Erfurt und Umgebung liegen langjährige Messzeitreihen von u. a. dem Wind, der Temperatur und dem Bedeckungsgrad an der Station Erfurt-Weimar vom Deutschen Wetterdienst (DWD) vor, die westlich des Siedlungsgebietes von Erfurt auf einem Geländerücken liegt. Die Windrose für Erfurt-Weimar von 2000 bis 2019 (**Abb. 4.4**) zeigt die Hauptwindrichtung Südwest bis West und ein Nebenmaximum bei Nordost. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt 4.2 m/s in 10 m Höhe.

Eine Auswertung für heiße Stunden (≥ 30 °C) am Tag mit wenig Bewölkung in den Sommern 2000 bis 2019 zeigt, dass diese hauptsächlich bei bodennahen Anströmungen aus ostnordöstlichen Richtungen auftreten (**Abb. 4.5**).

Kaltluftströmungen können sich abends und nachts bei austauscharmen Wetterlagen mit wenig Bewölkung bilden. Für Nachtstunden mit wenig Bewölkung in den Sommermonaten ergeben sich für den Zeitraum von 2000 bis 2019 hauptsächlich südliche bis südwestliche Anströmungen für Erfurt-Weimar (**Abb. 4.6**), die auf Kaltluftströmungen von den südlich gelegenen Randhöhen bis zum Thüringer Wald hindeuten. Im Bereich des Untersuchungsgebietes liegen Messdaten der Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN) für den Sommer 2020 vor (www.tlug-jena.de). Diese werden in etwa 10.0 m über Grund auf einer Freifläche westlich des Bautzener Wegs gemessen, d. h. etwa 100 m westlich des Geländeanstiegs zum Galgenberg (**Abb. 4.2**). In Kombination mit den Bedeckungsdaten der Station Erfurt-Weimar ergibt sich für Nachtstunden mit wenig Bedeckung im Sommer die Windrose aus **Abb. 4.7**. Die Hauptanströmung ist aus südlichen Richtungen, was auf den großen Einfluss von Kaltluftströmungen von den südlich von Erfurt gelegenen Randhöhen sowie dem Thüringer Wald hindeutet, die sich regelmäßig bis nach Erfurt und auch ins Untersuchungsgebiet durchsetzen. Die teilweise auftretenden östlichen

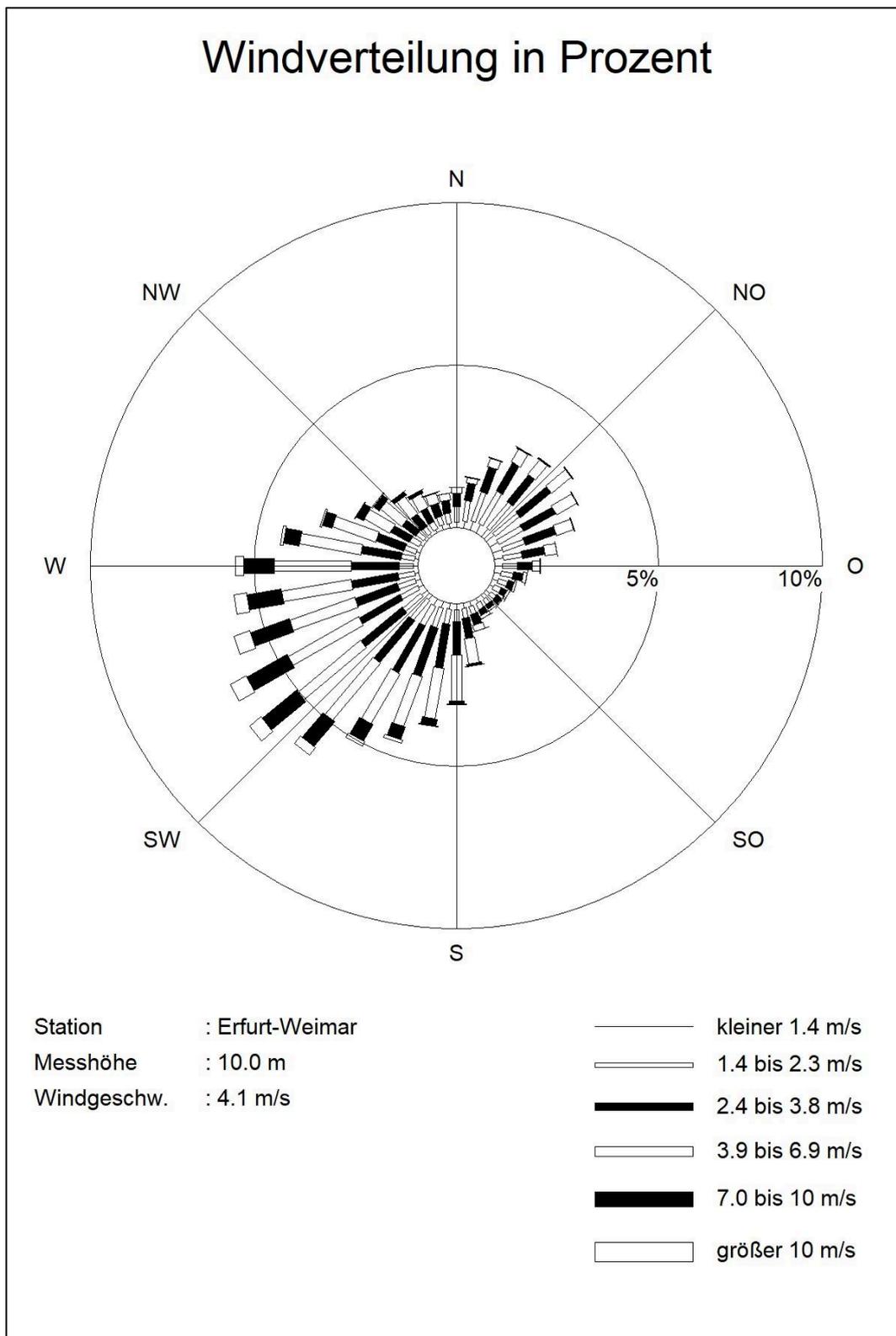


Abb. 4.4: Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung an der DWD-Station Erfurt-Weimar im Zeitraum 2000 bis 2019 (Quelle: DWD)

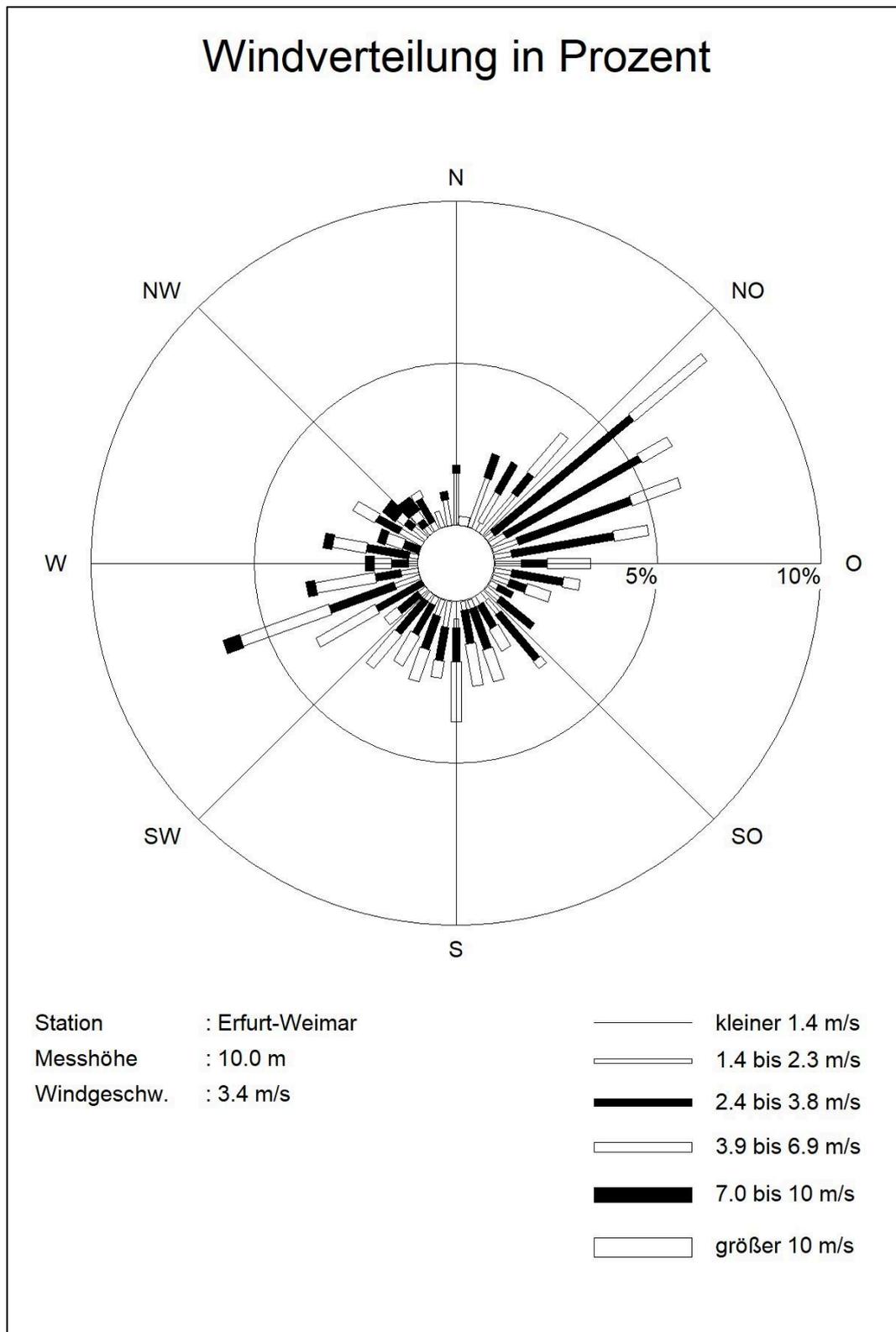


Abb. 4.5: Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung an der DWD-Station Erfurt-Weimar für gering bewölkte Stunden tagsüber mit einer Lufttemperatur größer gleich 30 °C in den Sommermonaten 2000 bis 2019 (Quelle: DWD)

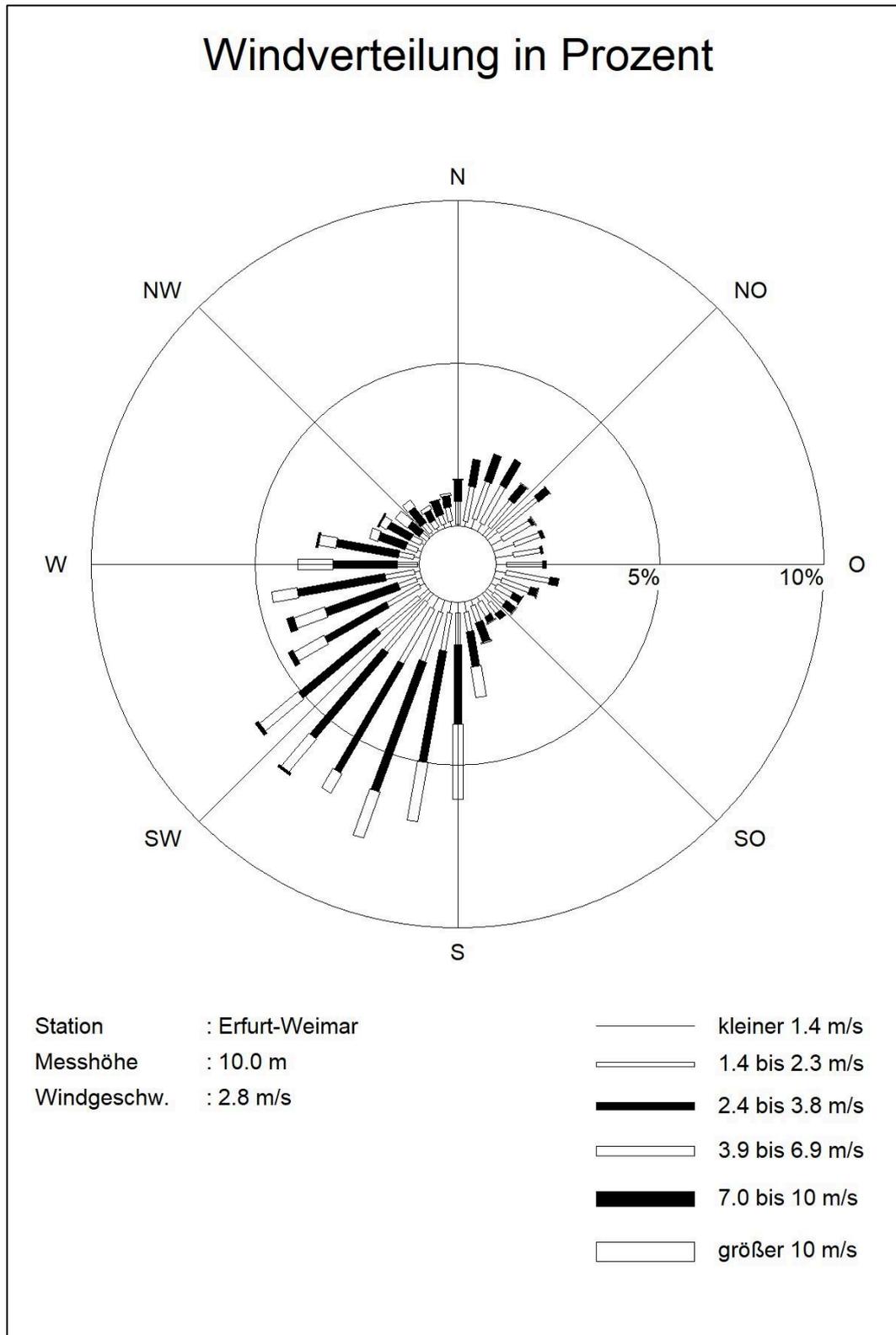


Abb. 4.6: Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung an der DWD-Station Erfurt-Weimar für gering bewölkte Stunden nachts in den Sommermonaten 2000 bis 2019 (Quelle: DWD)

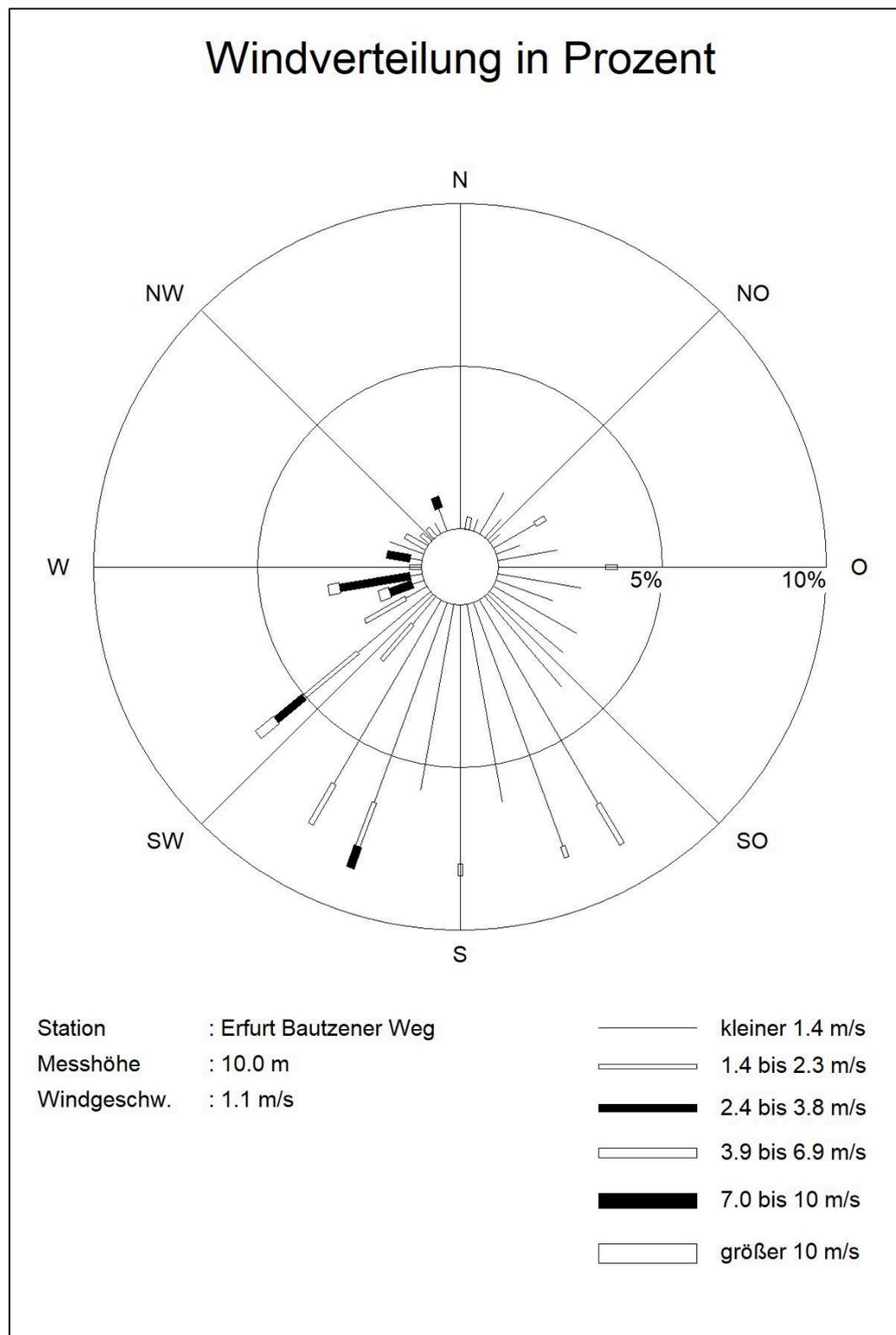


Abb. 4.7: Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung an der Station Erfurt Bautzener Weg der TLUBN für gering bewölkte Stunden nachts in den Sommermonaten 2020 (Quelle: TLUBN auf www.tlug-jena.de)

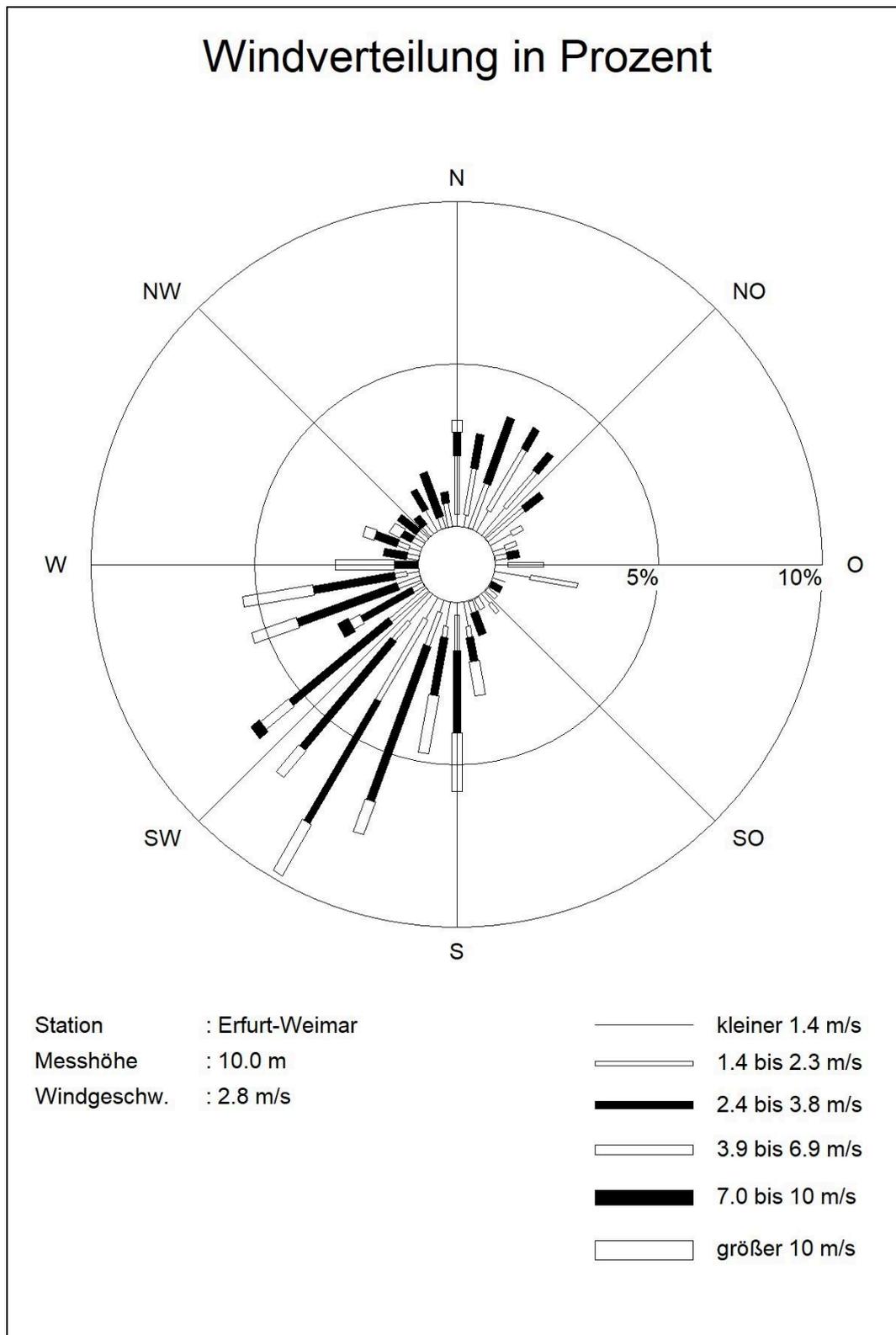


Abb. 4.8: Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung an der DWD-Station Erfurt-Weimar für gering bewölkte Stunden nachts in den Sommermonaten 2020 (Quelle: DWD)

bis südöstlichen Richtungen deuten auf lokale Hangabwinde hin, die in der Anfangsphase der Kaltluftbildung auftreten, bevor die stärkeren südlichen Ausgleichsströmungen das Gebiet erfassen. Zum Vergleich zeigt **Abb. 4.8** die Windrose für die DWD-Station Erfurt-Weimar für die gleichen Zeiten wie am Bautzener Weg (**Abb. 4.7**). Da die Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung aus der **Abb. 4.8** ist vergleichbar ist mit derjenigen aus **Abb. 4.6**, d. h. für den gleichen Standort und gleiche Bedingungen, aber unterschiedlich lange Zeiträume, kann gefolgert werden, dass auch die Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung am Bautzener Weg für den Sommer 2020 (**Abb. 4.7**) repräsentativ für wolkenarme Sommernächte anderer Jahre ist.

Die **Abb. 4.9** zeigt beispielhaft den Verlauf der Windrichtung- und Windgeschwindigkeit für mehrere aufeinanderfolgende heiße Tage (=Tageshöchsttemperatur $\geq 30^\circ\text{C}$) im August 2020 bei nordöstlicher Anströmung am Tag für die Stationen Erfurt-Weimar des DWD und Bautzener Weg des TLUBN, **Abb. 4.10** zeigt die dazugehörigen Verläufe der Temperatur und relativen Feuchte. Während tagsüber an beiden Stationen nahezu durchgehend nördliche bis nordöstliche Strömungen bestehen, drehen die Strömungen nach Sonnenuntergang auf Südost und bis Mitternacht auf südliche Richtungen. Im weiteren Verlauf der Nacht finden teilweise noch Drehungen auf südwestliche Richtungen statt. Tagsüber ergeben sich an der DWD-Station Erfurt-Weimar 1.5 m/s bis 3.5 m/s, nachts 1 m/s bis 3 m/s. An der Station Bautzener Weg des TLUBN ergeben sich tagsüber Windgeschwindigkeiten von 1 m/s bis 3 m/s und nachts bis zu 1 m/s. Die Lufttemperaturen in 2 m Höhe erreichen an der DWD-Station in Erfurt-Weimar etwa 30°C am 07.08.2020 und 33°C am 08.08.2020 und sinken nachts bis auf knapp unter 20°C . An der Station Bautzener Weg des TLUBN werden am 07.08.2020 bis etwa 33°C gemessen und am 08.08.2020 bis etwa 35°C , nachts sinken die Temperaturen auf knapp unter 20°C beziehungsweise etwa 20°C . Zur Initialisierung des Anfangszustandes der Atmosphäre der Simulationen mit und ohne Anströmung mit PALM-4U wurden die Werte der Temperatur und relativen Feuchte in Anlehnung an die gemessenen Werte des 08.08.2020 um 00 Uhr genutzt. Die Simulation mit nordöstlicher Anströmung wurde mit einem Antrieb von etwa 2 m/s in 10 m Höhe durchgeführt. Bei deutlich geringeren Anströmungen (< 1 m/s) dreht der Wind im Untersuchungsgebiet, wie in der Beispielzeitreihe aus **Abb. 4.9**, kurz nach Sonnenuntergang auf Süd und ergibt qualitativ keine anderen Ergebnisse als eine Simulation ohne Anströmung.

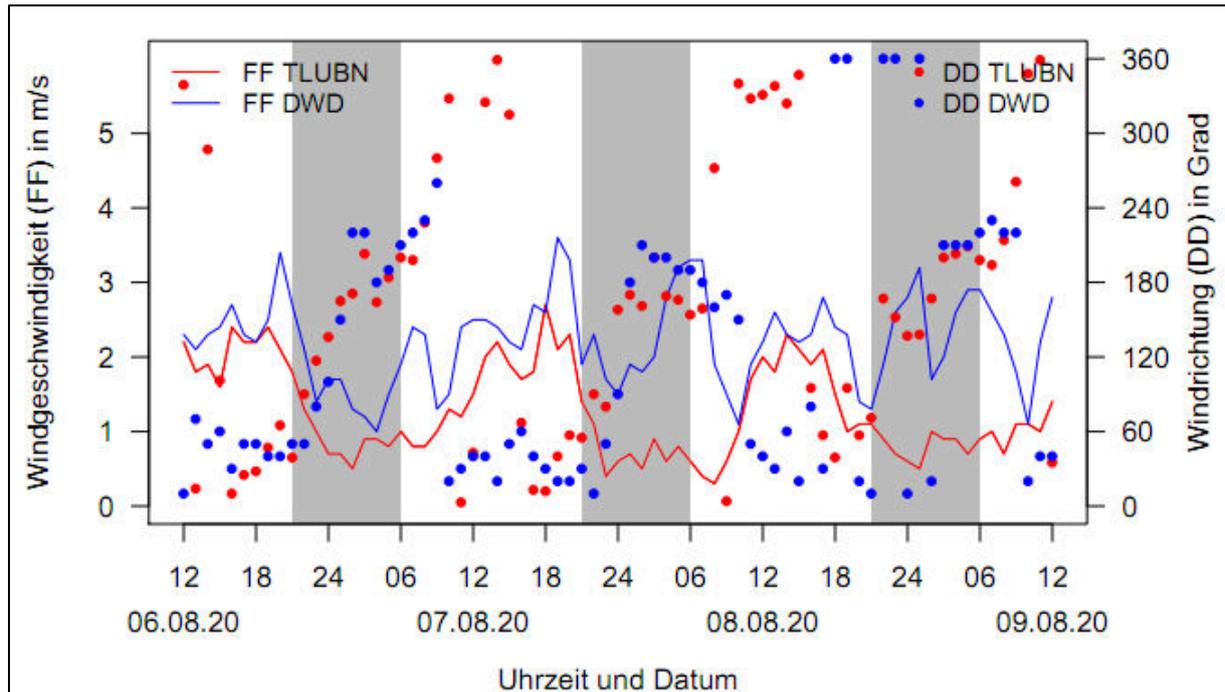


Abb. 4.9: Zeitreihe der Windgeschwindigkeit (FF, Linien) und Windrichtung (DD, Punkte) an den Stationen Bautzener Weg (TLUBN, rot) und Erfurt-Weimar (DWD, blau) vom 06.08.2020 bis 09.08.2020. Nachstunden sind grau eingefärbt.

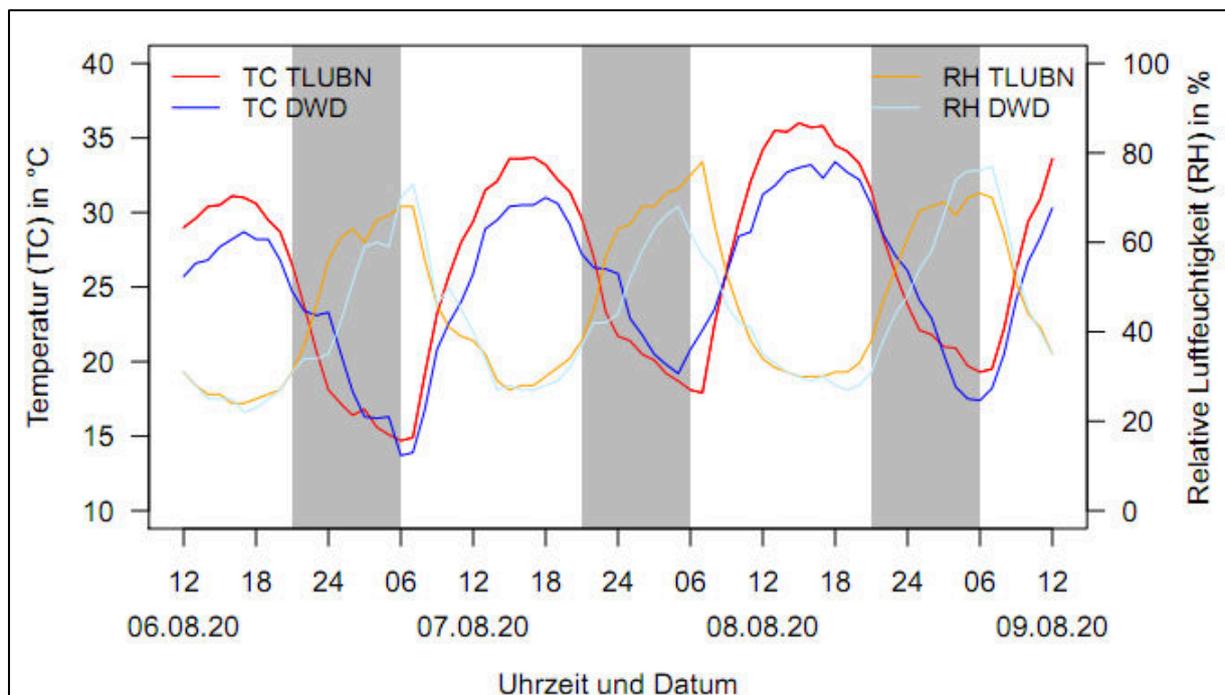


Abb. 4.10: Zeitreihen der Temperatur (TC) und relativen Feuchte (RH) an den Stationen Bautzener Weg (TLUBN) und Erfurt-Weimar (DWD) vom 06.08.2020 bis 09.08.2020. Nachstunden sind grau eingefärbt.

5 ERGEBNISSE

Für das Aufzeigen der Auswirkungen der geplanten Nutzungsänderungen auf die Kaltluftströmungen wurden Simulationen für den baulichen Bestand und den Planfall mit dem Modell PALM-4U durchgeführt. Dafür wurde ergänzend zum Untersuchungsgebiet das umliegende Gelände mit den Geländeanstiegen berücksichtigt (**Abb. 4.1**). Das Gebiet wurde so groß gewählt, dass die Einflüsse der umliegenden Geländeerhebungen auf die Kaltluftströmungen vollständig erfasst werden. Dafür war auch die Berücksichtigung der südlich von Erfurt liegenden Ausläufer des Thüringer Waldes und des Thüringer Waldes selbst notwendig.

Die Ergebnisse der Kaltluftberechnungen beinhalten die Richtung und die Geschwindigkeit des Kaltluftstroms, die Mächtigkeit der Kaltluft und die daraus resultierende Kaltluftvolumenstromdichte. Die Kaltluftvolumenstromdichte beschreibt die Kaltluftmenge in m^3 , die pro Sekunde durch einen 1 m breiten Streifen zwischen der Erdoberfläche und der Oberkante der Schichtdicke, die senkrecht zur Strömung steht, fließt; die Einheit ist $\text{m}^3/(\text{m s})$ bzw. m^2/s . Falls die Volumenstromdichte über einen Querschnitt konstant ist, lässt sich der Volumenstrom direkt und einfach als Volumenstromdichte mal Länge der Grundlinie dieser Fläche berechnen. Der Kaltluftvolumenstrom kann als Größe zur Beschreibung der Durchlüftungintensität aufgefasst werden. Darüber hinaus werden die Windrichtung, Windgeschwindigkeit und die Lufttemperatur in Bodennähe (2 m über Grund) betrachtet.

5.1 Simulation ohne Antrieb

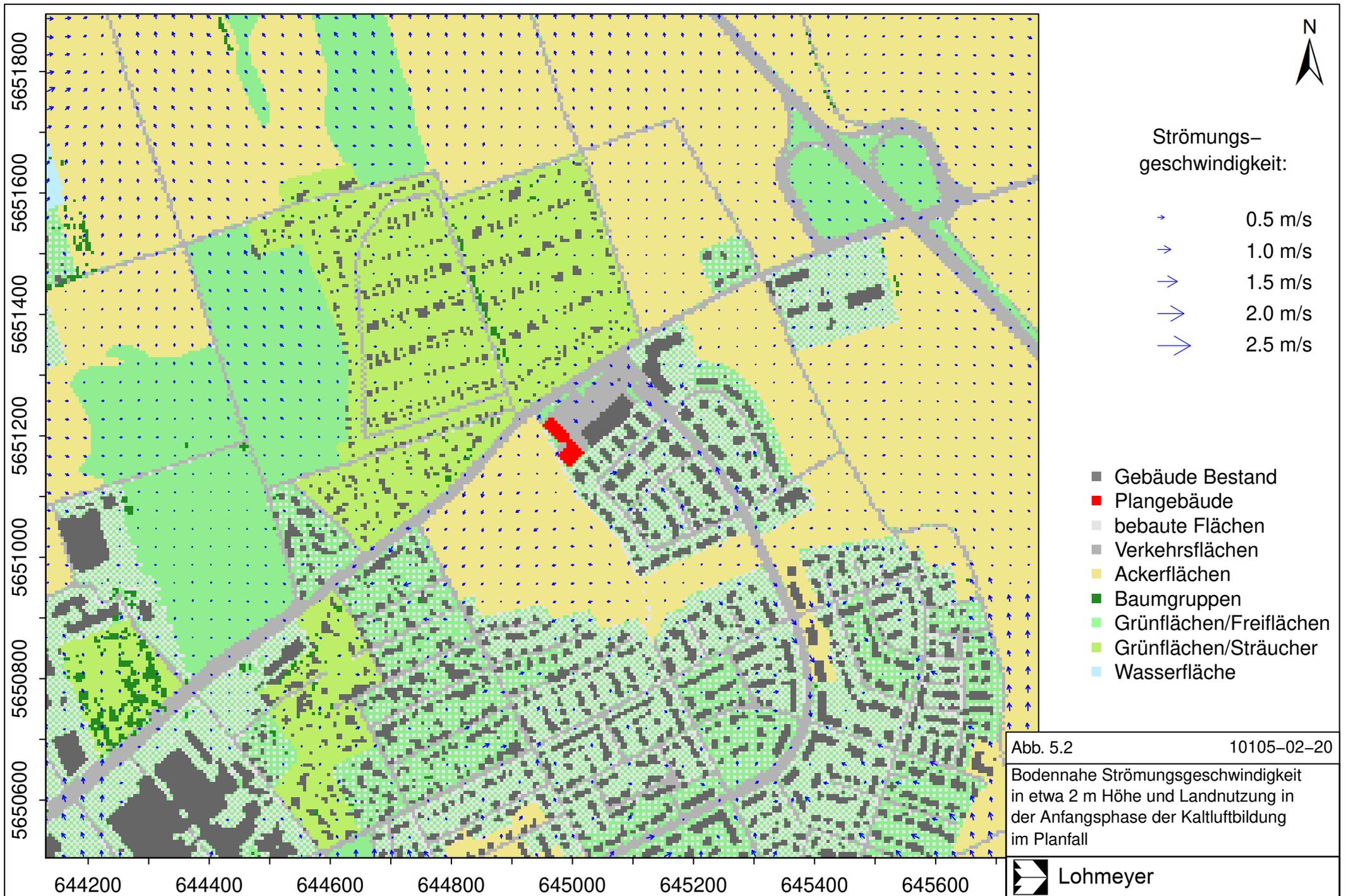
In den unbebauten Bereichen des Untersuchungsgebietes bildet sich bei den entsprechenden Wetterlagen bodennah Kaltluft aus, die die Hänge der Geländerücken des Galgenbergs und Ringelbergs hinab strömen. Neben den lokalen Kaltluftentstehungsbereichen strömen aus Süden auch von weiter entfernten Bereichen im Laufe der Nacht kühle Luftmassen in das Bereich des Untersuchungsgebietes. **Abb. 5.1** zeigt die bodennahe Kaltluftströmungsgeschwindigkeit in der Anfangsphase der Kaltluftbildung im Bestand für einen wolkenlosen Strahlungstag bei einer autochthonen Wetterlage ohne großräumige Anströmung. Von den Hängen des Galgenbergs und Ringelbergs strömen bodennah Kaltluftmassen mit bis zu 0.5 m/s in westliche Richtungen. Aufgrund der schwachen Strömungsgeschwindigkeiten ergeben sich in den nicht mehr abfallenden Bereichen im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes keine gerichteten Strömungen mehr. Auf dem Plateau der Geländerücken Galgenberg und Ringelberg sind ebenfalls keine gerichteten Strömungen erkennbar, ebenso über dem Plangebiet. Im südwestlichen und südöstlichen Bereich der Darstellung erreichen



schon Kaltluftströmungen von den Randhöhen südlich von Erfurt das Untersuchungsgebiet. Aufgrund der Planung ergeben sich Änderungen der Strömungsrichtungen und Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich des Plangebäudes (**Abb. 5.2**), die sich aber aufgrund der großteils nicht gerichteten und schwachen Strömungen auf dessen Nahbereich beschränken. Auf der Freifläche südwestlich der Planung ergeben sich weiterhin schwache bodennahe hangabwärts gerichtete Nordost- beziehungsweise Ostströmungen.

Abb. 5.3 zeigt die Kaltluftmächtigkeit und die Kaltluftvolumenstromdichte in der Anfangsphase der Kaltluftbildung im Bestand. Die Kaltluftmächtigkeit variiert je nach Höhenlage sowie Lage im Siedlungsbereich oder auf vegetationsbestandenen Flächen. Über vegetationsbestandenen Muldenlagen, d. h. im Westen des Untersuchungsgebietes, ergeben sich Kaltluftmächtigkeiten bis zu 25 m. In Siedlungsbereichen und auf den Geländerücken sind noch keine wesentlichen Kaltfluthöhen erkennbar. Über dem Plangebiet sind aufgrund der Kuppenlage und Nähe zu versiegelten Bereichen beziehungsweise Siedlungsbereichen ebenfalls keine wesentlichen Kaltfluthöhen vorhanden. Die Kaltluftströmungsrichtung ist als Median der Strömungsrichtungen jedes Höhenlevels bis zur Höhe der Kaltluft angegeben und entspricht hier im Wesentlichen den Strömungsrichtungen in Bodennähe, d. h. die Richtung der Kaltluftströmungen variiert mit der Höhe nicht wesentlich. Die Kaltluftvolumenstromdichten erreichen in den nach Westen abfallenden Hangbereichen des Galgenberges und Ringelberges maximal $5 \text{ m}^3/(\text{m s})$. In den Siedlungsbereichen und auf den Kuppenlagen ergeben sich keine wesentlichen Kaltluftvolumenstromdichten, d. h. auch auf dem Plangebiet. Von den südlich von Erfurt gelegenen Randhöhen dringen schon kräftigere Kaltluftvolumenstromdichten mit bis zu $20 \text{ m}^3/(\text{m s})$ in das Untersuchungsgebiet vor. Aufgrund der Planung ergeben sich keine wesentlichen flächenhaften Änderungen der Kaltluftvolumenstromdichten (**Abb. 5.4**). Vereinzelt dargestellte relative Änderungen der Kaltluftvolumenstromdichten sind in Bezug auf die absoluten Werte minimal, da diese im Bestand schon geringer als $5 \text{ m}^3/(\text{m s})$ sind.

Mit dem Sonnenuntergang setzt eine spürbare Abkühlung der unteren Luftschichten ein, d. h. es wird mehr Wärme von der Erdoberfläche abgegeben als aufgenommen. Großen Anteil daran haben die strahlungsbedingten Anteile, d. h. es entsteht eine negative Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche aufgrund von mehr Aus- als Einstrahlung aufgrund des Wegfallens der kurzwelligigen Einstrahlung der Sonne. In reliefiertem Gelände strömen die bodennah kühlen Luftmassen die Hänge gravitativ hinab und sammeln sich in den nieder gelegenen Bereichen, wie z. B. Senken, Mulden und Tälern, und verstärken dort die Abkühlung. **Abb. 5.5** zeigt die 2 m-Lufttemperatur zu Beginn der Kaltluftbildung. In den tiefer gelegenen



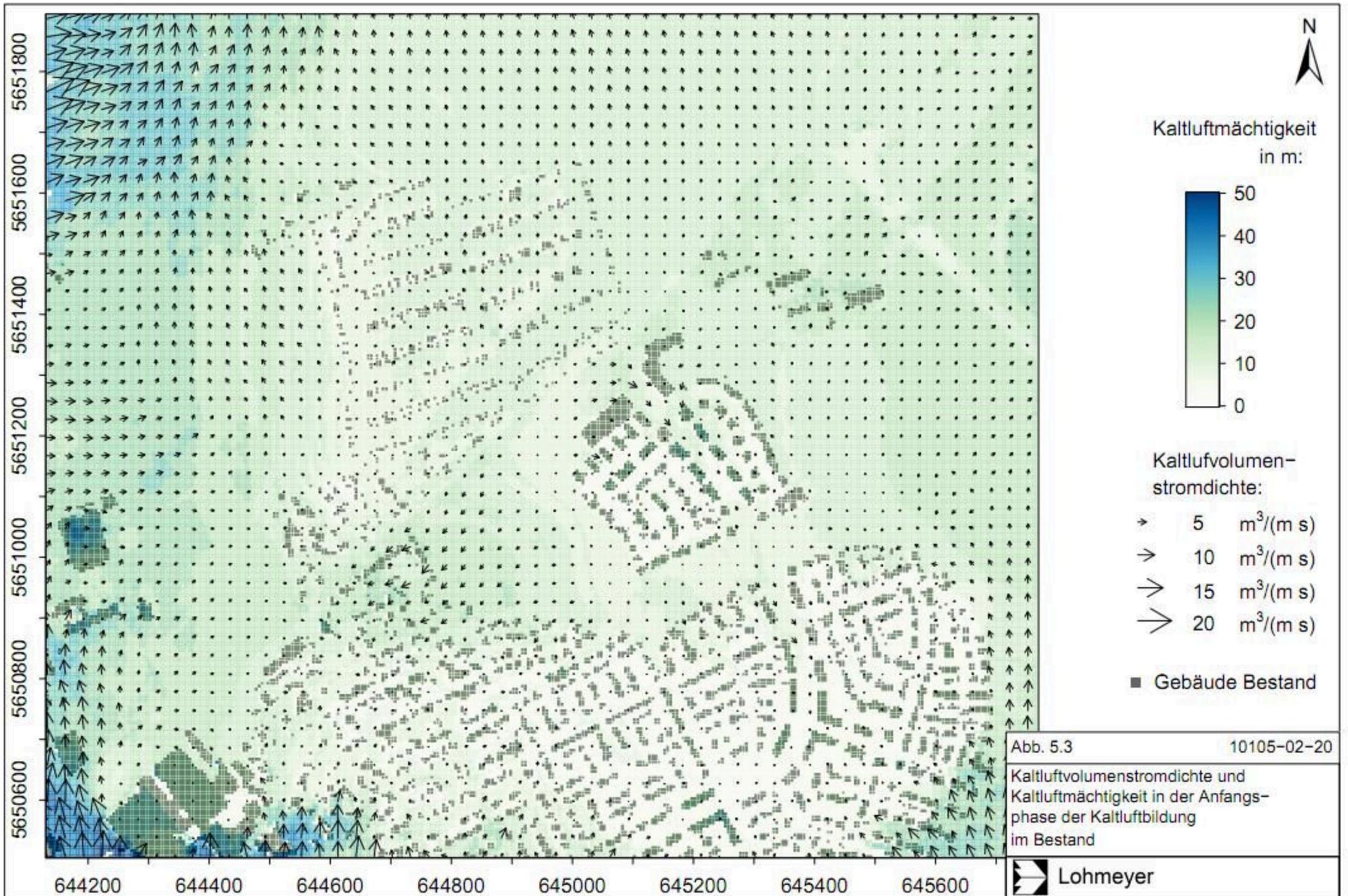
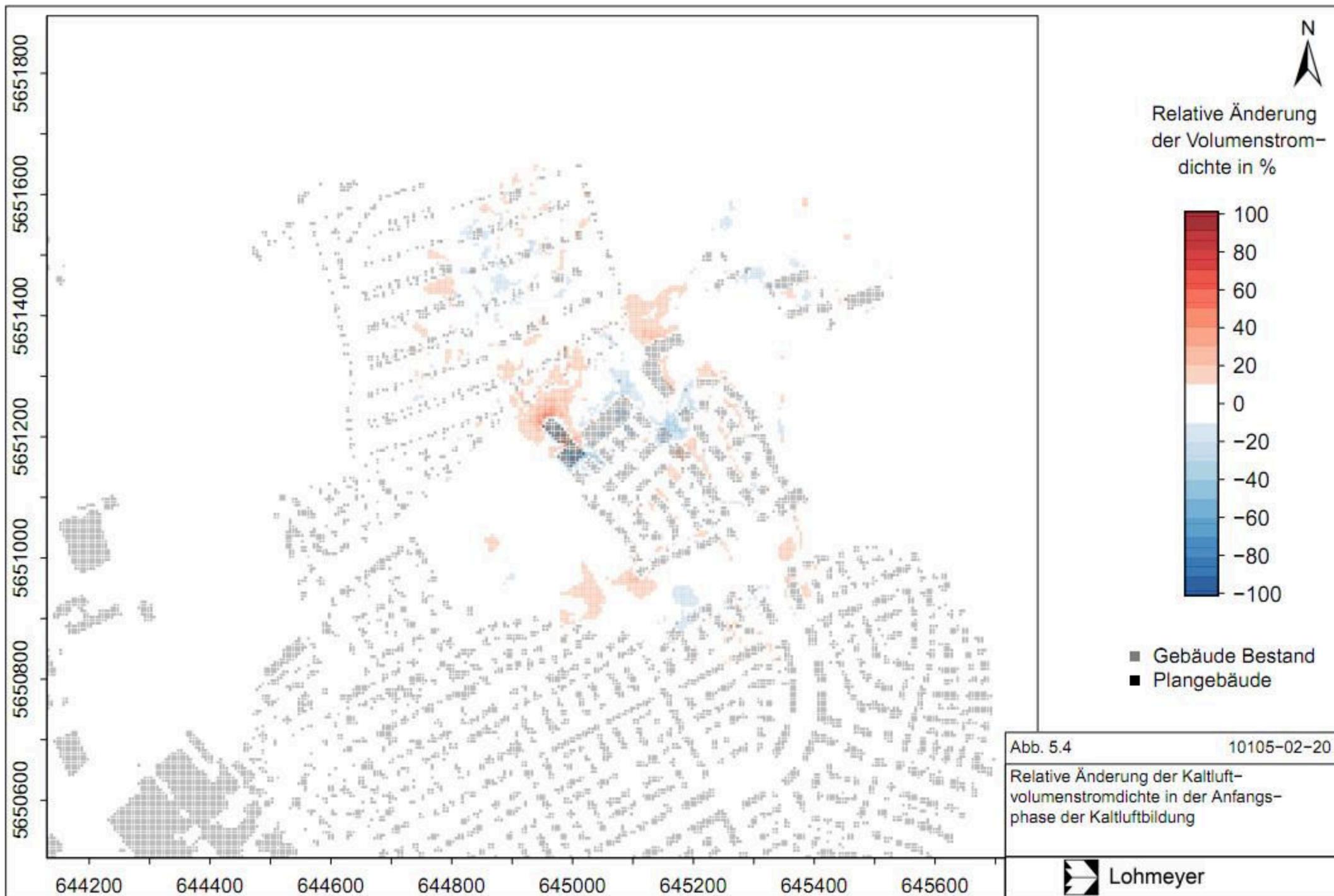
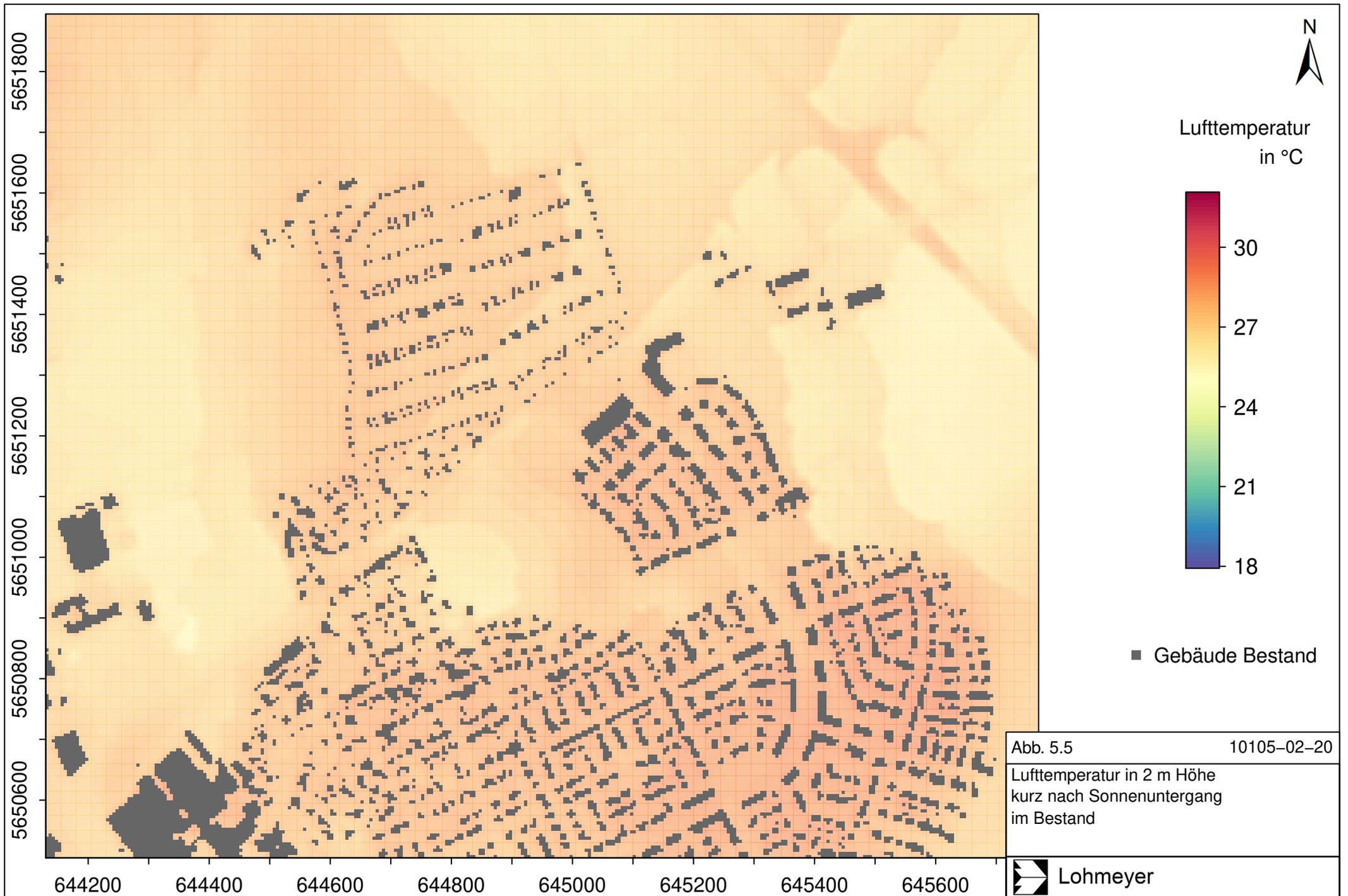


Abb. 5.3 10105-02-20

Kaltluftvolumenstromdichte und Kaltluftmächtigkeit in der Anfangsphase der Kaltluftbildung im Bestand





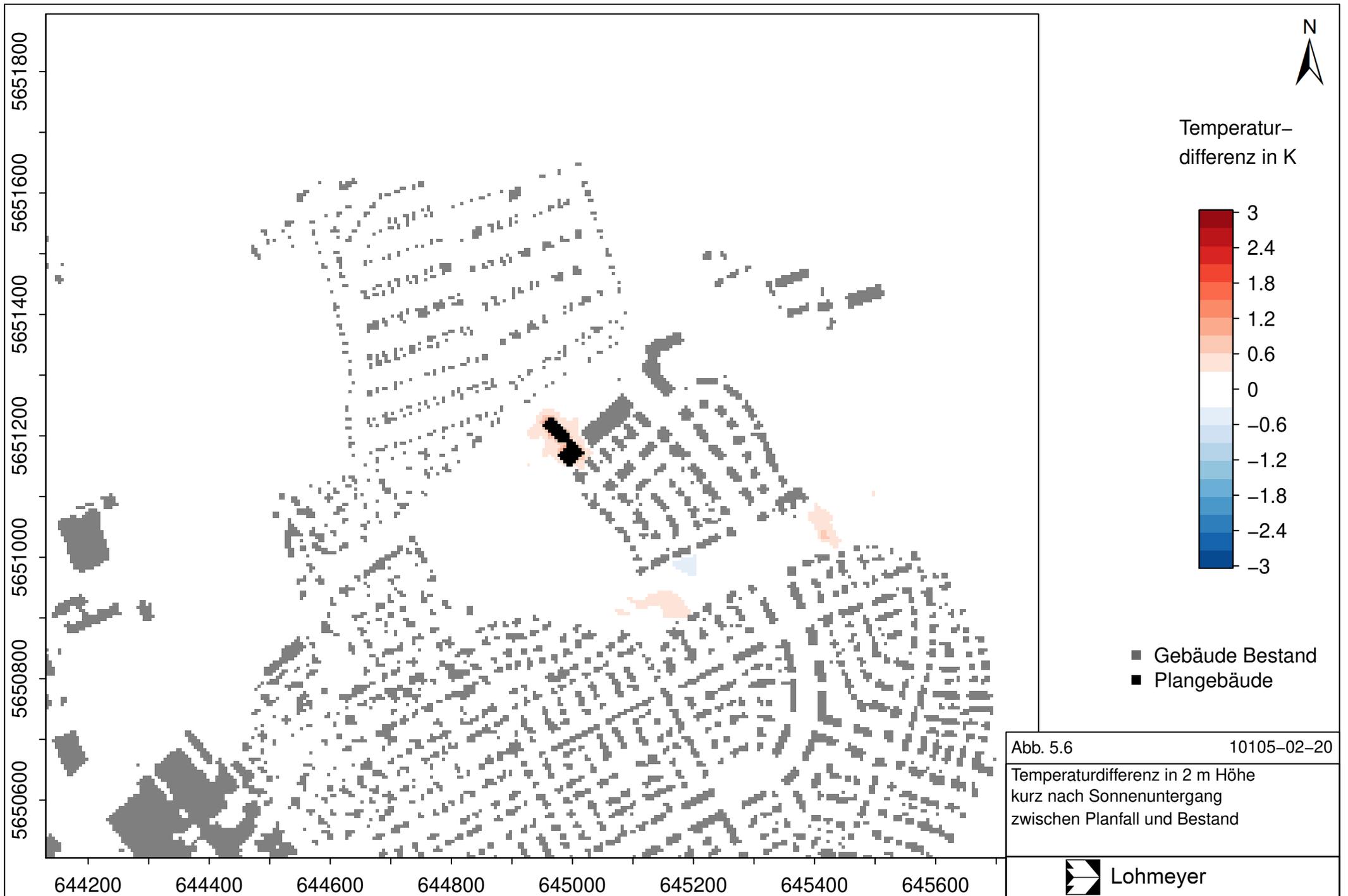
5651800
5651600
5651400
5651200
5651000
5650800
5650600

644200 644400 644600 644800 645000 645200 645400 645600

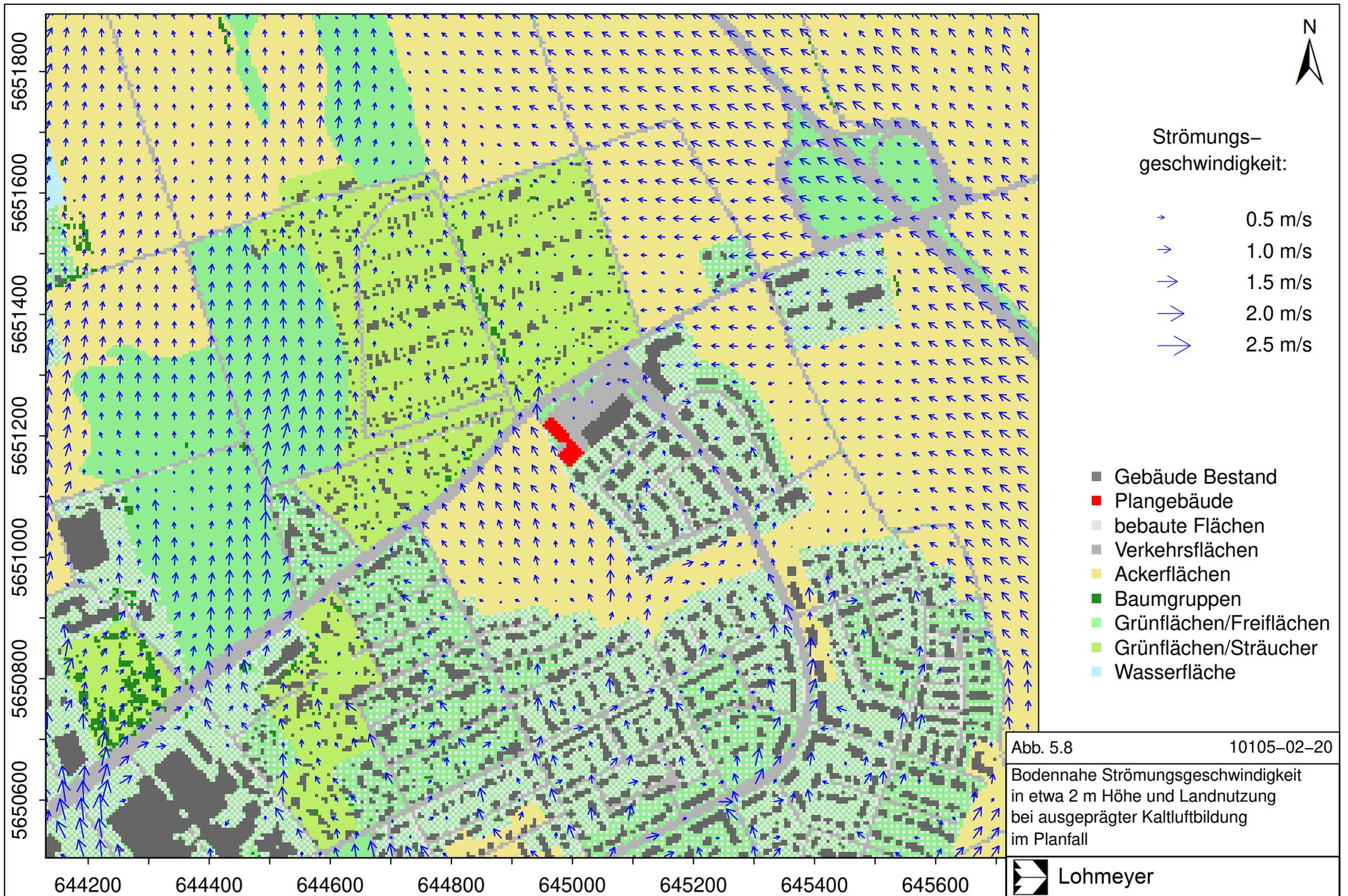
vegetationsbestandenen Bereichen wie z. B. im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes oder im unteren Hangbereich südwestlich der Planung, ergeben sich Temperaturen von 26 °C bis 27 °C. Im Bereich der Kuppenlagen und somit auch auf dem im Plangebiet ergeben sich Temperaturen von etwa 28 °C bis 29 °C. In versiegelten Bereichen und/oder Siedlungsbereichen werden jeweils etwa 1 °C bis 2 °C mehr simuliert. Aufgrund der Planung ergeben sich im Bereich des Plangebietes und dessen Nahbereich großteils etwas höhere Temperaturen (**Abb. 5.6**). Im Nahbereich der Planungen werden bis zu 1.5 K höhere Lufttemperaturen in 2 m Höhe berechnet. Temperaturerhöhungen von mehr als 0.3 K ergeben sich bis in etwa 70 m südwestlich der Planung und mit geringerer Reichweite in die übrigen Richtungen.

Abb. 5.7 zeigt die Kaltluftströmungsgeschwindigkeit in 2 m Höhe bei ausgeprägter Kaltluftbildung im Bestand. Im gesamten Untersuchungsgebiet ergeben sich im Vergleich zu den schwachen lokalen Strömungen aus der Anfangsphase der Kaltluftbildung, etwas intensivere südöstliche bis südliche Strömungen; diese stammen von den südlich und südöstlich des Siedlungsbereichs von Erfurt liegenden Randhöhen, wie z. B. Zeisigberg und Fuchshügel, sowie von den nördlichen Ausläufern des Thüringer Waldes und haben großteils bodennahe Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 0.5 m/s bis 1 m/s. Über dem Plangebiet ergeben sich südliche Strömungen mit etwa 1 m/s. Bebaute Bereiche weisen signifikante Modifikationen aufgrund der Gebäudeumströmungen auf. Somit ergeben sich aufgrund des Plangebäudes deutliche Änderungen der Strömungsrichtungen und Strömungsgeschwindigkeiten im Nahbereich der Planungen (**Abb. 5.8**). Im Nahbereich der Plangebäude sowie in deren Vorlauf und Nachlauf ergeben sich Abnahmen der bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten, die bis auf die Freifläche südlich des Plangebäudes sowie bis in die Kleingartenanlagen nördlich davon reichen.

Abb. 5.9 zeigt die Kaltluftmächtigkeit und die Kaltluftvolumenstromdichte bei ausgeprägter Kaltluftbildung im Bestand. Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Werte im Vergleich zur Anfangsphase der Kaltluftbildung sind die Kaltluftmächtigkeit und die Größe der Strömungspfeile in der Abbildung anders skaliert als in **Abb. 5.3**. Die Kaltluftmächtigkeit variiert weiterhin je nach Höhenlage sowie Lage im Siedlungsbereich oder auf vegetationsbestandenen Flächen. Über vegetationsbestandenen Muldenlagen, d. h. im Westen des Untersuchungsgebietes, ergeben sich Kaltluftmächtigkeiten von etwa 90 m bis 110 m. Über den Geländerücken ergeben sich Kaltfluthöhen von etwa 60 m bis 80 m, über dem Plangebiet sind es etwa 70 m. Dies bedeutet, dass sich das Erfurter Becken so mit Kaltluft gefüllt hat, dass die Kuppen des Galgenberges und Ringelberges von der aus Süden heran strömenden Kaltluft







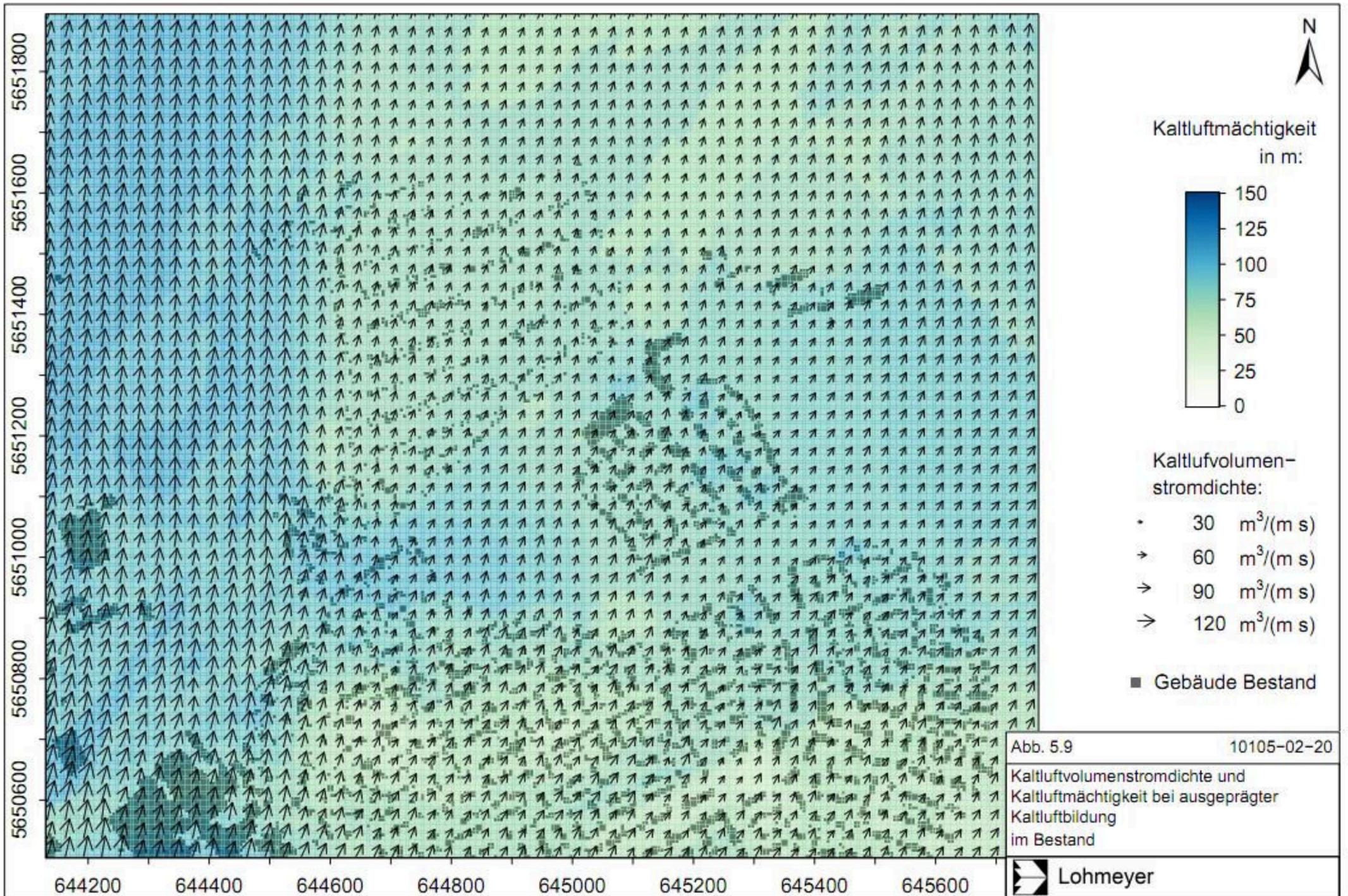
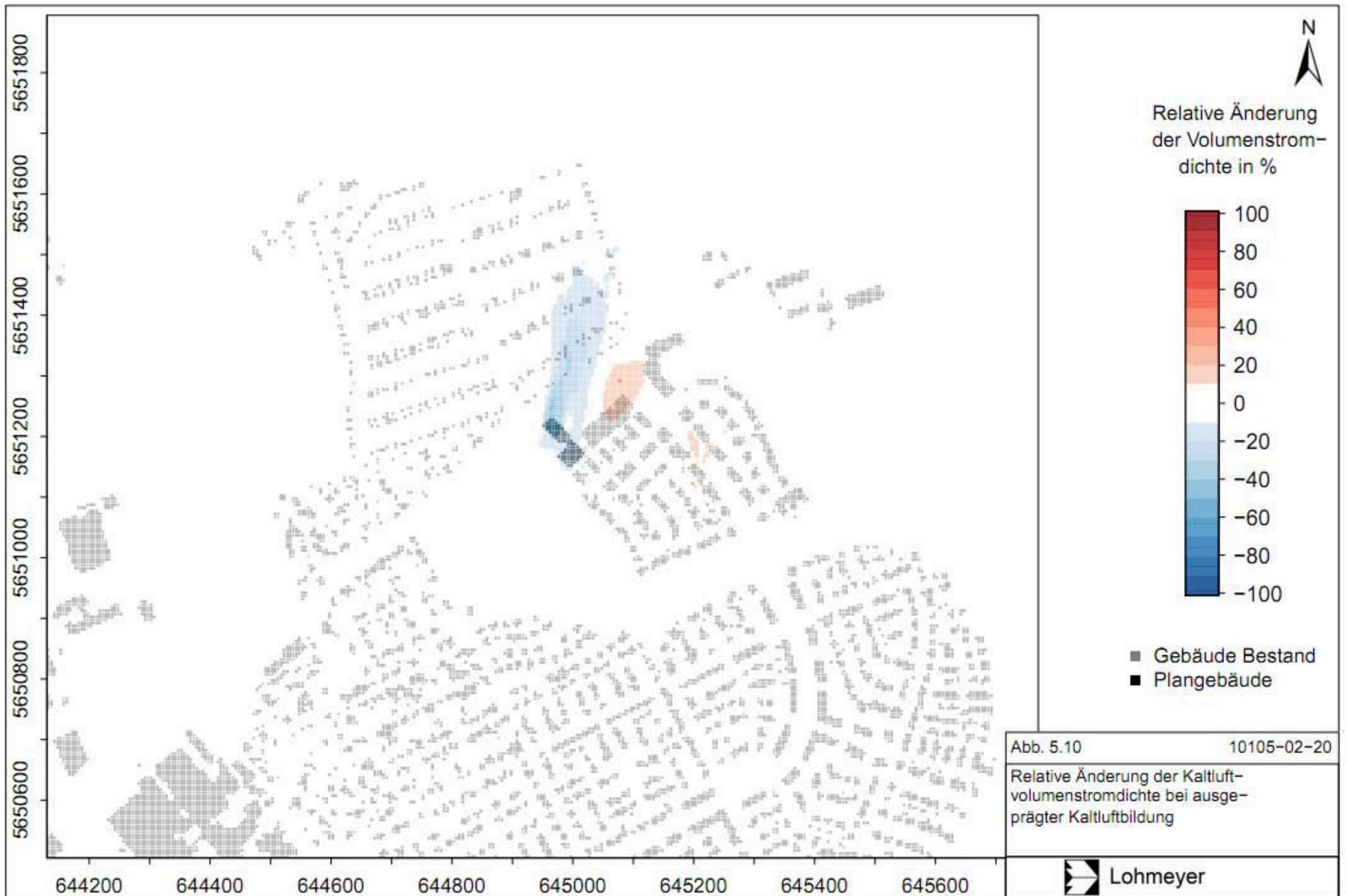


Abb. 5.9 10105-02-20

Kaltluftvolumenstromdichte und Kaltluftmächtigkeit bei ausgeprägter Kaltluftbildung im Bestand

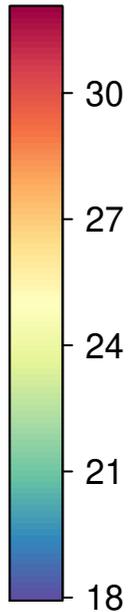
überströmt werden. Die Kaltluftströmungsrichtung ist als Median der Strömungsrichtungen jedes Höhenlevels bis zur Höhe der Kaltluft angegeben. Im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes entspricht die Kaltluftströmung wie in der Anfangsphase der Kaltluftbildung überwiegend den Strömungsrichtungen in Bodennähe, d. h. die Richtung der Kaltluftströmungen variiert mit der Höhe nicht wesentlich. Dort, d. h. in der Erfurter Mulde und somit westlich der Hänge des Galgenbergs und Ringelbergs, werden Kaltluftvolumenstromdichten von etwa $100 \text{ m}^3/(\text{m s})$ bis $140 \text{ m}^3/(\text{m s})$ bei südlicher Anströmung erreicht, im Nahbereich höherer Gebäude etwas weniger. Im Bereich der Geländerücken ergeben sich ab einer Höhe von etwa 20 m über Grund südliche bis südwestliche Anströmungen, darunter sind es südliche bis südöstliche Anströmungen (**Abb. 5.7**). Dort überlagern sich die Höhenströmungen von den weiter weg liegenden Randhöhen des Thüringer Waldes und seinen Vorläufern mit den bodennahen Strömungen der südlich beziehungsweise südöstlich an Erfurt angrenzenden Randhöhen. Insgesamt ergeben sich für die Bereiche auf den Geländerücken Kaltluftvolumenstromdichten von etwa $70 \text{ m}^3/(\text{m s})$ bis $90 \text{ m}^3/(\text{m s})$, d. h. auch auf dem Plangebiet. Aufgrund der Planung ergeben sich vor allem in dessen Nachlauf, d. h. in nördliche Richtung, Abnahmen der Kaltluftvolumenstromdichten um bis zu 20 % bis in etwa 150 m bis 200 m Entfernung und 10 % bis in etwa 250 m Entfernung. In den übrigen Bereichen werden keine wesentlichen flächenhaften Veränderungen berechnet (**Abb. 5.10**).

Abb. 5.11 zeigt die Lufttemperatur in 2 m Höhe um bei voll ausgebildeter Kaltluft, etwa um Mitternacht, im Bestand. In tiefer gelegenen vegetationsbestandenen Bereichen wie z. B. im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes oder im unteren Hangbereich südwestlich der Planung, ergeben sich Temperaturen von 22.5 °C bis 24 °C . Im Bereich der Kuppenlagen und somit auch auf dem im Plangebiet ergeben sich Temperaturen von etwa 24 °C . In versiegelten Bereichen und/oder Siedlungsbereichen werden jeweils etwa 1 °C bis 2 °C mehr simuliert. Aufgrund der Planung ergeben sich im Bereich des Plangebietes und dessen Nahbereich großteils etwas höhere Temperaturen (**Abb. 5.12**). Im Nahbereich der Planungen werden bis zu 1 K höhere Lufttemperaturen in 2 m Höhe berechnet. Temperaturerhöhungen von mehr als 0.3 K ergeben sich bis in etwa 100 m nördlich der Planung in Strömungsrichtung. Davon ist keine Wohnbebauung betroffen, jedoch Teile der nördlich anschließenden Kleingartenanlagen.





Lufttemperatur
in °C



■ Gebäude Bestand

Abb. 5.11

10105-02-20

Lufttemperatur in 2 m Höhe
um Mitternacht
im Bestand



Lohmeyer

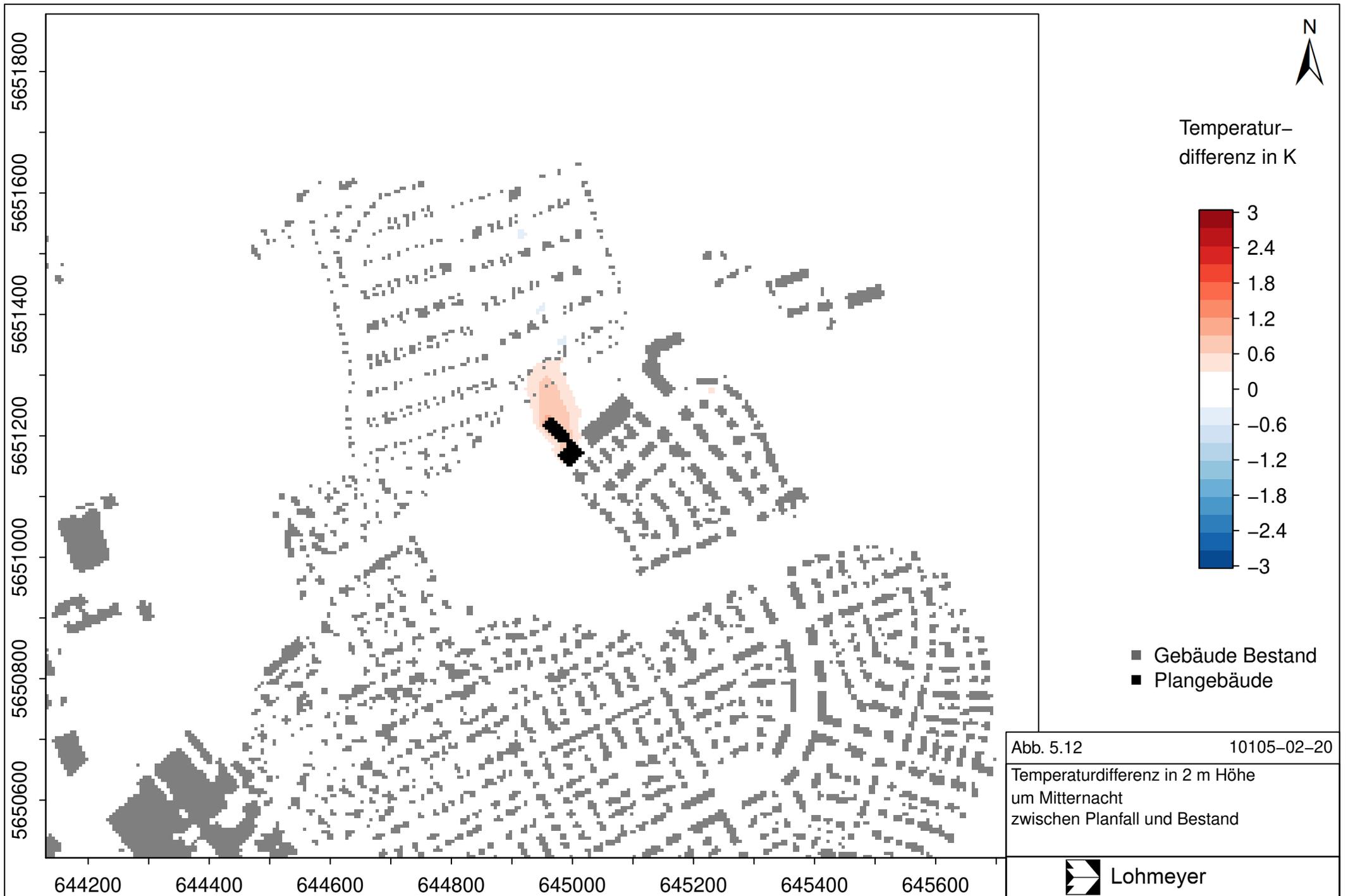


Abb. 5.12 10105-02-20

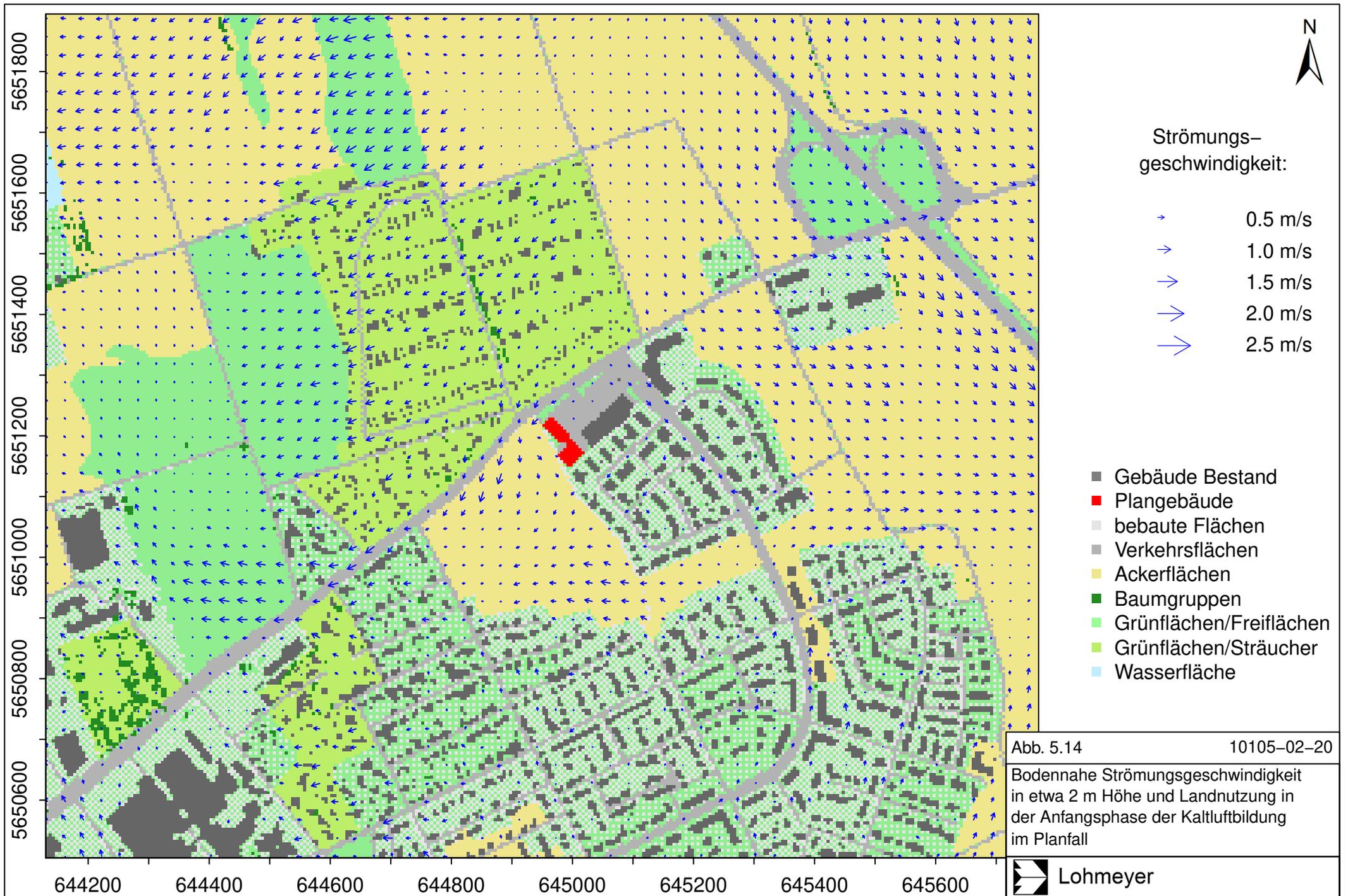
Temperaturdifferenz in 2 m Höhe
um Mitternacht
zwischen Planfall und Bestand

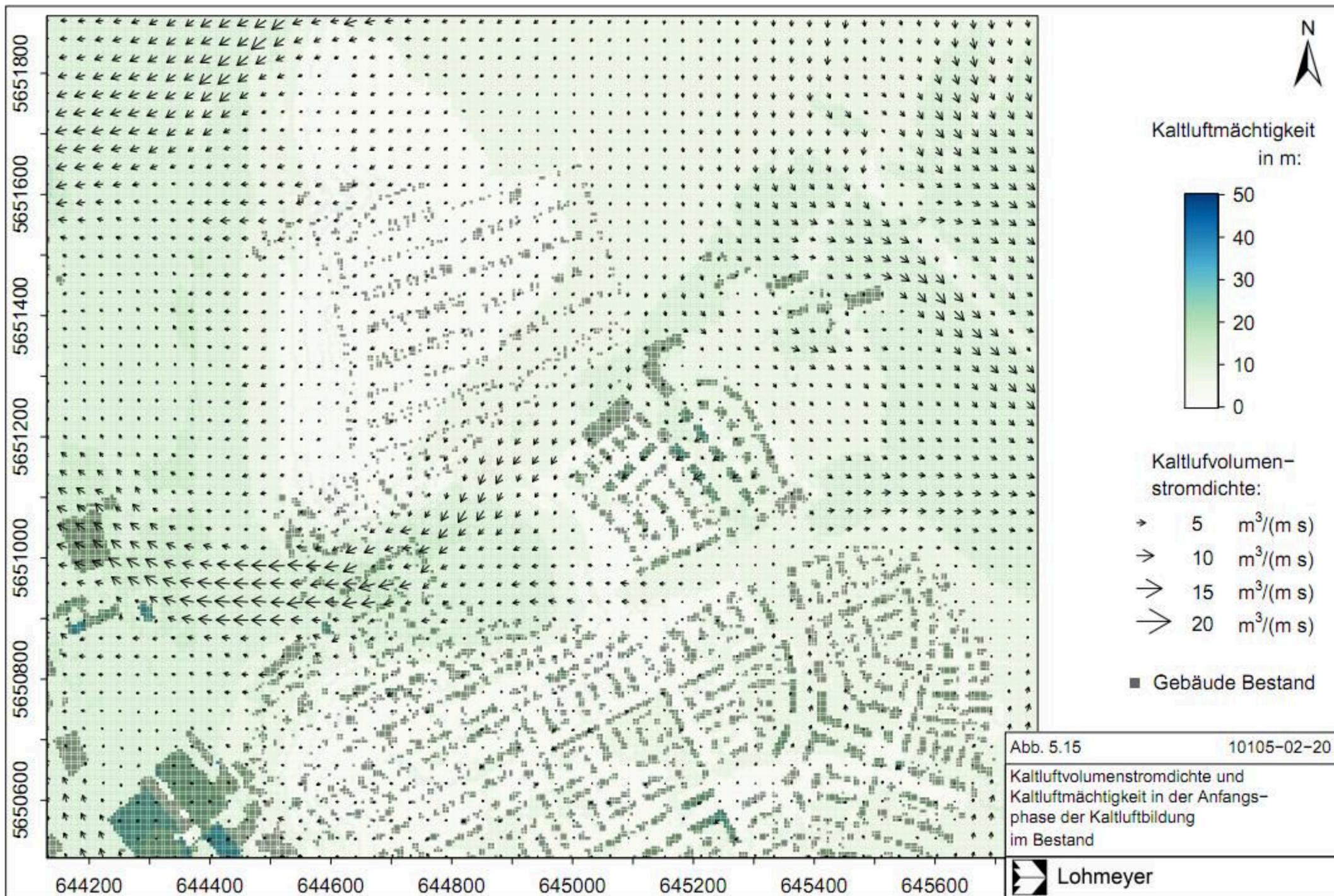
5.2 Simulation mit Anströmung aus Nordost

Heiße Tage treten in Erfurt häufig bei schwachen bis mäßigen nordöstlichen Anströmungen in Bodennähe auf. Deshalb wurden zusätzlich zu den Simulationen ohne Antrieb Rechnungen mit nordöstlichen Anströmungen durchgeführt. Tests zeigen, dass sich die Verhältnisse in Bezug auf die Kaltluft bei schwachen nächtlichen nordöstlichen Anströmungen, d. h. etwa 0.5 m/s, im hier zu betrachtenden Untersuchungsgebiet nicht wesentlich von denen ohne Anströmung unterscheiden, sodass eine etwas stärkere Anströmung von 2 m/s gewählt wurde. Dies sind auch etwa diejenigen Windgeschwindigkeiten, die an der Station Erfurt-Weimar außerhalb des Talkessels von Erfurt bei solchen Wetterlagen gemessen werden. **Abb. 5.13** zeigt die bodennahe Kaltluftströmungsgeschwindigkeit in der Anfangsphase der Kaltluftbildung im Bestand für einen wolkenlosen Strahlungstag mit nordöstlicher Anströmung. Von den Hängen des Galgenbergs und Ringelbergs strömen bodennah Kaltluftmassen mit bis zu 1 m/s in westliche Richtungen bis in den westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes. Auf dem Plateau der Geländerücken Galgenberg und Ringelberg sind die Strömungen schwächer, über dem Plangebiet ergeben sich schwache nordnordöstliche Strömungen, d. h. mit weniger als 0.5 m/s. Aufgrund der Planung ergeben sich deutliche Änderungen der Strömungsrichtungen und Strömungsgeschwindigkeiten im Nahbereich des geplanten Gebäudekomplexes (**Abb. 5.14**). Außerdem ergeben sich vor allem in Strömungsrichtung Verringerungen der bodennahen Kaltluftströmungen bis etwa 200 m auf die Freifläche südwestlich der Planung, Wohnbebauung ist davon nicht betroffen. In den übrigen Bereichen ergeben sich keine wesentlichen Änderungen der bodennahen Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit.

Abb. 5.15 zeigt die Kaltluftmächtigkeit und die Kaltluftvolumenstromdichte in der Anfangsphase der Kaltluftbildung mit nordöstlicher Anströmung von etwa 2 m/s im Bestand. Die Kaltluftmächtigkeit variiert je nach Höhenlage sowie Lage im Siedlungsbereich oder auf vegetationsbestandenen Flächen. In den niedriger gelegenen Gebieten ergeben sich Kaltluftmächtigkeiten bis etwa 20 m. In den Siedlungsbereichen auf den Geländerücken sind teilweise noch keine wesentlichen Kaltfluthöhen erkennbar. Über dem Plangebiet sind aufgrund der Kuppenlage und Nähe zu versiegelten Bereichen beziehungsweise Siedlungsbereichen ebenfalls keine wesentlichen Kaltfluthöhen vorhanden. Die Kaltluftströmungsrichtung ist als Median der Strömungsrichtungen jedes Höhenlevels bis zur Höhe der Kaltluft angegeben und entspricht hier im Wesentlichen den Strömungsrichtungen in Bodennähe, d. h. die Richtung der Kaltluftströmungen variiert mit der Höhe nicht wesentlich. Die Kaltluftvolumenstromdichten erreichen in den nach Westen abfallenden Hangbereichen des Galgenberges und

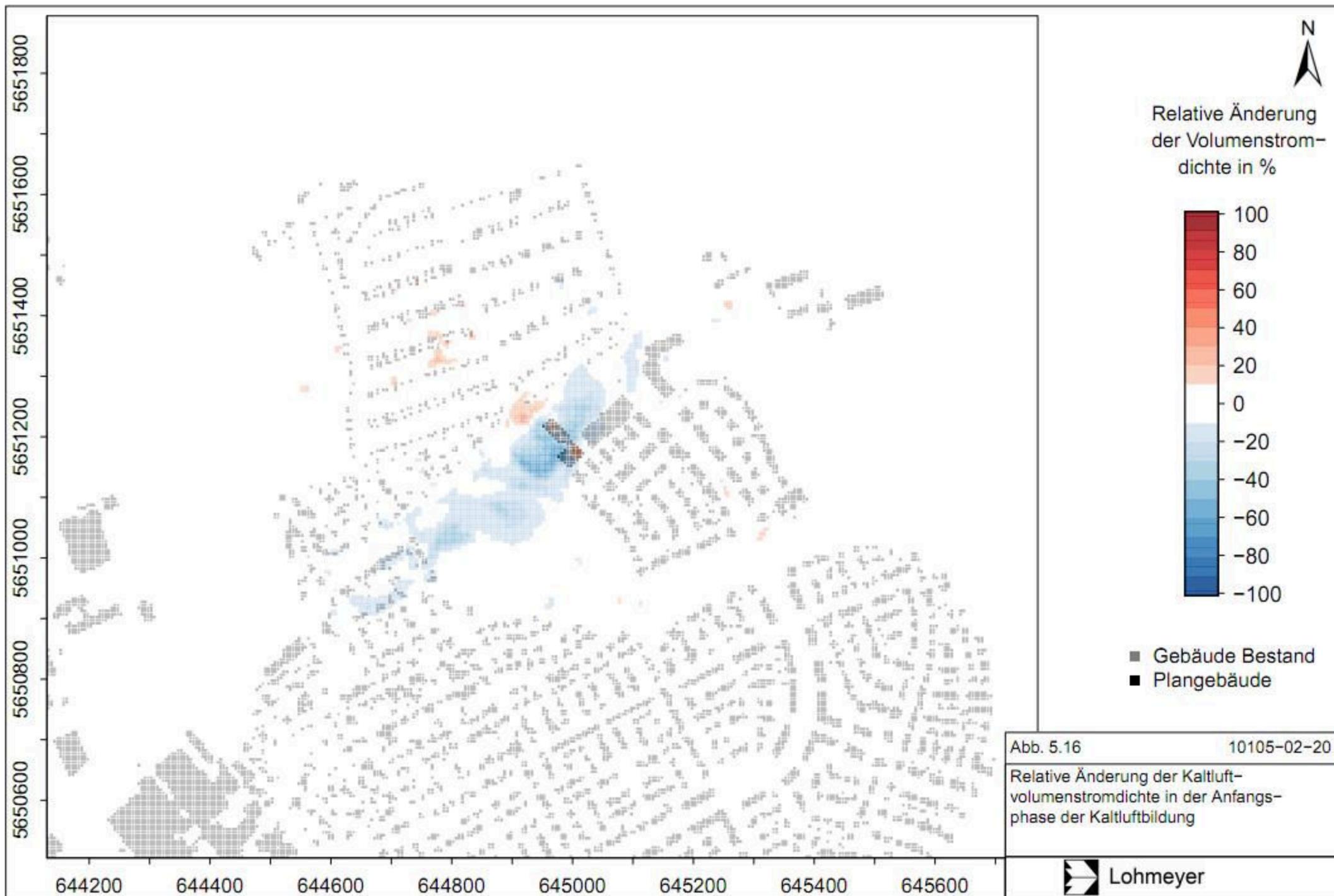






Ringelberges etwa $5 \text{ m}^3/(\text{m s})$ und leicht darüber, im Bereich der Leipziger Straße südwestlich des Plangebietes reliefbedingt auch teilweise bis über $10 \text{ m}^3/(\text{m s})$ und strömen in westliche Richtungen weiter. In den Siedlungsbereichen auf den Kuppenlagen ergeben sich großteils keine wesentlichen beziehungsweise nur geringe Kaltluftvolumenstromdichten, d. h. auch im Bereich des Plangebietes. Aufgrund der Planung ergeben sich insbesondere in Strömungsrichtung deutliche Verringerungen der Kaltluftvolumenstromdichte (**Abb. 5.16**). Verringerungen über 20 % reichen teilweise bis knapp vor die Siedlungsbereiche westlich der Grünfläche im Bereich des Meißener Weges, die südwestlich des Plangebietes liegt. Im weiteren Verlauf ergeben sich Verringerungen über 10 % in kleinen Bereichen des Siedlungsbereiches westlich des Meißener Weges; die Verringerungen treten ab etwa 10 m Höhe und damit oberhalb der dortigen Wohnhäuser auf. Deshalb sind die Auswirkungen auch nur bei der Darstellung des Volumenstromes sichtbar, bei dem die gesamte Kaltluftschicht betrachtet wird. In Bodennähe ergeben sich aber auch dort keine wesentlichen Veränderungen (**Abb. 5.13** und **Abb. 5.14**). Die im Vergleich zum Fall ohne Anströmung weiter reichenden Änderungen zeigen den Einfluss des Antriebs der Simulation mit 2 m/s Nordostanströmung, die auch oberhalb der Kaltluft auf den Gebäudekomplex wirkt und somit zu Änderungen in dessen Nachlauf in höheren Schichten führt, d. h. ab etwa 10 m Höhe. Weiter westlich der Ringelbergterrasse in Richtung des Siedlungsbereiches von Erfurt und in den übrigen Richtungen ergeben sich keine wesentlichen flächenhaften Änderungen der Kaltluftvolumenstromdichten. Vereinzelt dargestellte relative Änderungen der Kaltluftvolumenstromdichte sind in Bezug auf die absoluten Werte minimal, da diese im Bestand schon geringer als $5 \text{ m}^3/(\text{m s})$ sind.

Abb. 5.17 zeigt die 2 m-Lufttemperatur zu Beginn der Kaltluftbildung. In den tiefer gelegenen vegetationsbestandenen Bereichen wie z. B. im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes oder im unteren Hangbereich südwestlich der Planung, ergeben sich Temperaturen von 26 °C bis 27 °C . Im Bereich der Kuppenlagen und somit auch auf dem Plangebiet ergeben sich Temperaturen von etwa 28 °C bis 29 °C . In versiegelten Bereichen und/oder Siedlungsbereichen werden jeweils etwa 1 °C mehr simuliert; durch die flächenhaft höhere Windgeschwindigkeit ist der Wärmeinseleffekt in den hier dargestellten Siedlungsbereichen geringer als bei der Rechnung ohne Anströmung. Aufgrund der Planung ergeben sich im Bereich des Plangebietes und dessen Nahbereich großteils etwas höhere Temperaturen (**Abb. 5.18**). Im Nahbereich der Planungen werden bis zu 1.5 K höhere Lufttemperaturen in 2 m Höhe berechnet. Temperaturerhöhungen von mehr als 0.3 K ergeben vom Plangebäude bis in etwa 50 m nach Nordosten und mit geringerer Reichweite in die übrigen Richtungen.





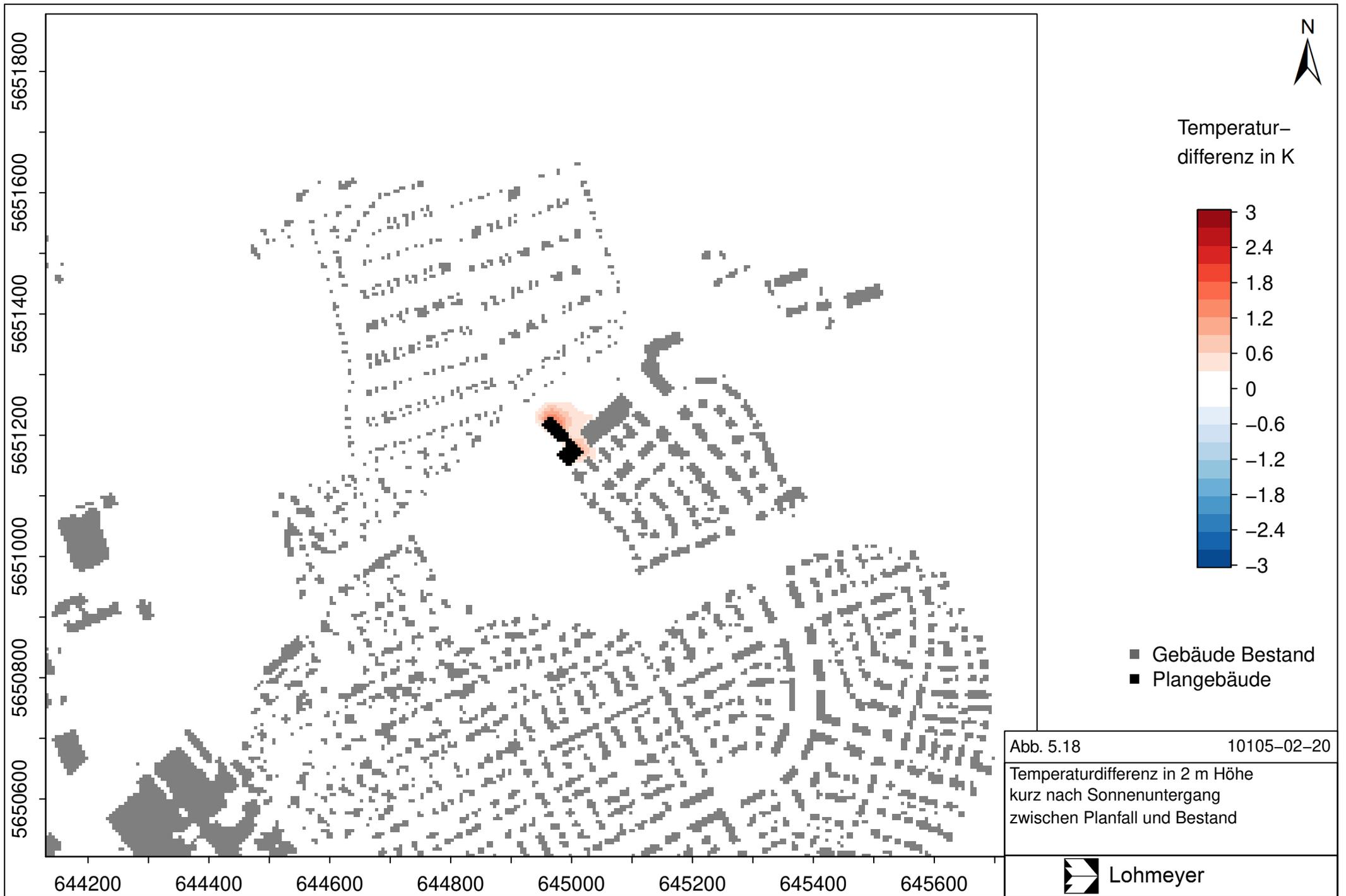


Abb. 5.18 10105-02-20

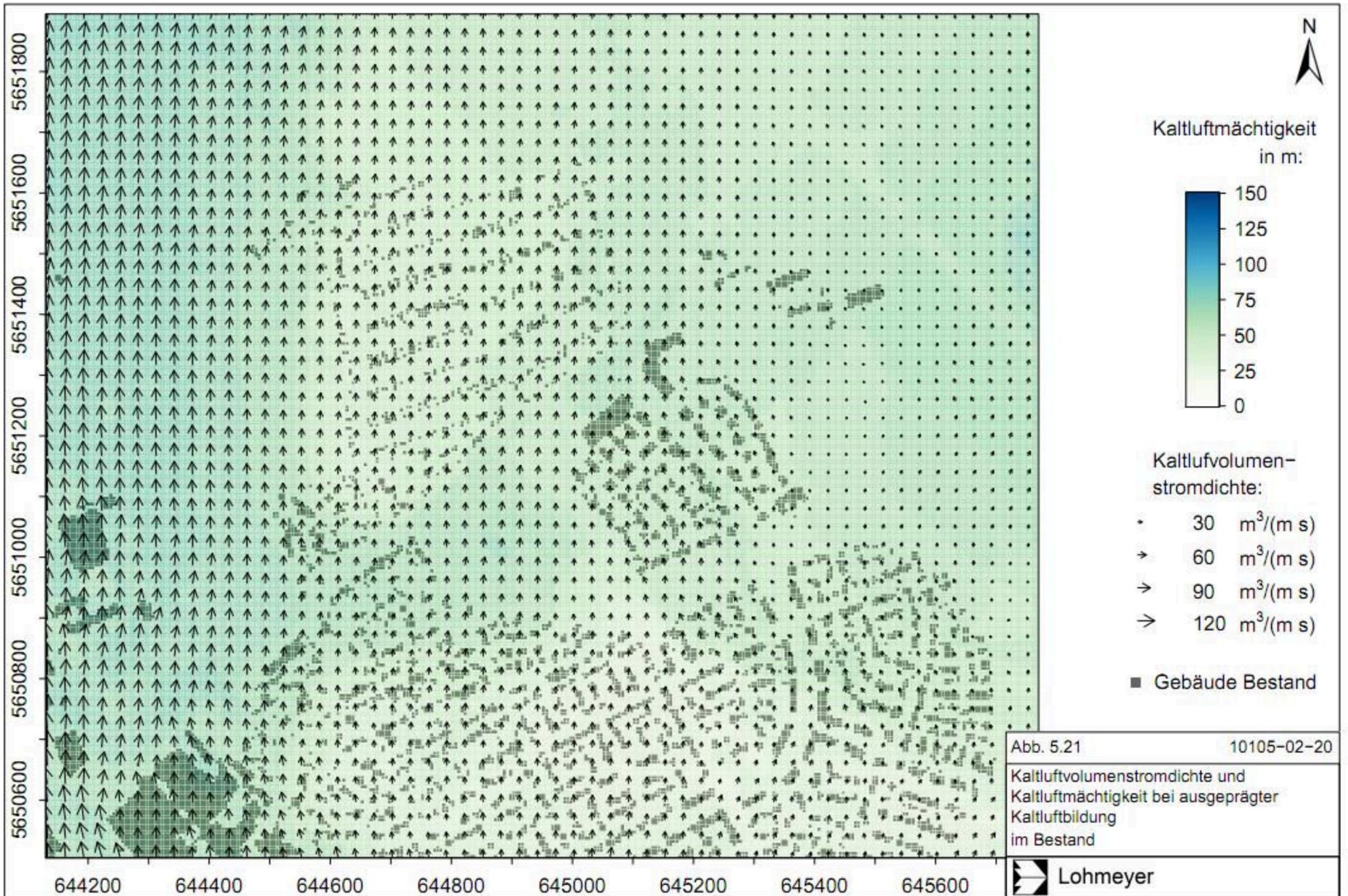
Temperaturdifferenz in 2 m Höhe kurz nach Sonnenuntergang zwischen Planfall und Bestand

Abb. 5.19 zeigt die Kaltluftströmungsgeschwindigkeit in 2 m Höhe bei ausgeprägter Kaltluftbildung mit nordöstlicher Anströmung im Bestand. In den Kuppenlagen setzen sich südliche Strömungen der südlich und südöstlich des Siedlungsbereichs von Erfurt liegenden Randhöhen, wie z. B. dem Zeisigberg und Fuchshügel, sowie von den nördlichen Ausläufern des Thüringer Waldes mit etwa 0.5 m/s bis 1 m/s durch. Dementsprechend ergeben sich über dem Plangebiet schwache Strömungen aus Süden. In den westlichen Hangbereichen des Galgenbergs und Ringelberges strömen teilweise noch schwache Kaltluftströmungen bodennah nach Westen, d. h. weniger als 0.5 m/s, das betrifft insbesondere die Bereiche am Hang südwestlich des Plangebietes. In den übrigen Bereichen ergeben sich großteils bodennah nur sehr schwache und damit keine gerichteten Strömungen. Bebaute Bereiche weisen signifikante Modifikationen aufgrund der Gebäudeumströmungen auf. Somit ergeben sich aufgrund des geplanten Gebäudekomplexes deutliche Änderungen der Strömungsrichtungen und Strömungsgeschwindigkeiten im Nahbereich der Planungen (**Abb. 5.20**). Im Nahbereich der Plangebäude sowie in deren Vorlauf und Nachlauf ergeben sich Abnahmen der bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten, die bis auf die Freifläche südlich des Plangebäudes und bis in die Kleingartenanlagen nördlich beziehungsweise nordöstlich davon reichen. In den übrigen Bereichen ergeben sich keine wesentlichen Änderungen, auch Wohnbebauungen sind nicht von Modifikationen der bodennahen Strömung aufgrund der Planung betroffen.

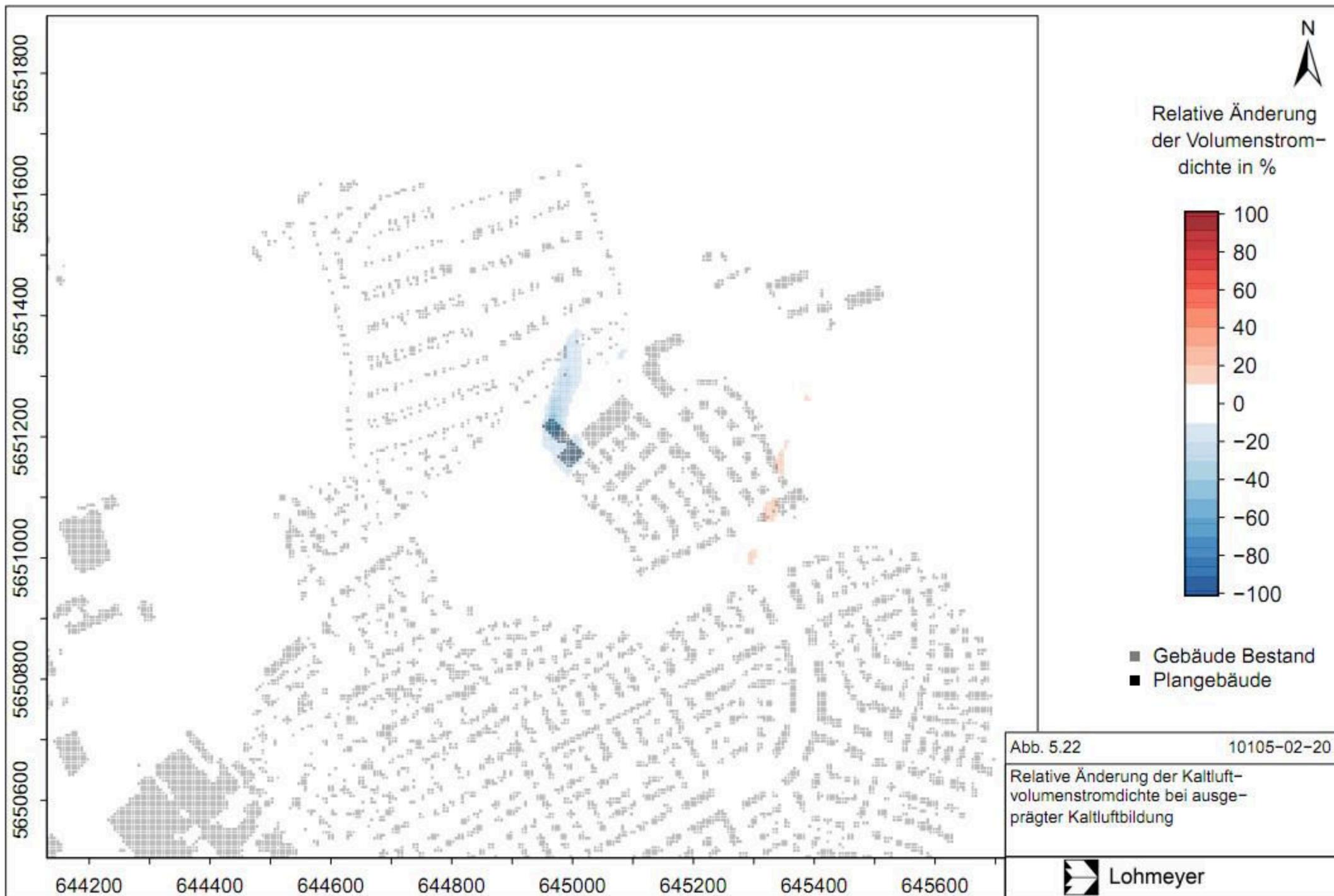
Abb. 5.21 zeigt die Kaltluftmächtigkeit und die Kaltluftvolumenstromdichte bei ausgeprägter Kaltluftbildung mit nordöstlicher Anströmung von etwa 2 m/s im Bestand. Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Werte im Vergleich zur Anfangsphase der Kaltluftbildung werden die Kaltluftmächtigkeit und die Größe der Strömungspfeile in der Abbildung anders skaliert als in **Abb. 5.15**. Die Kaltluftmächtigkeit variiert weiterhin je nach Höhenlage sowie Lage im Siedlungsbereich oder auf vegetationsbestandenen Flächen. Über vegetationsbestandenen Muldenlagen, d. h. im Westen des Untersuchungsgebietes, ergeben sich Kaltluftmächtigkeiten von etwa 50 m bis 70 m. Über den Geländerrücken ergeben sich Kaltfluthöhen von etwa 20 m bis 40 m, über dem Plangebiet sind es etwa 35 m. Dies bedeutet, dass sich das Erfurter Becken so mit Kaltluft gefüllt hat, dass die Kuppen des Galgenberges und Ringelberges von der aus Süden heran strömenden Kaltluft überströmt werden und somit die Hauptströmungsrichtung der Kaltluft von derjenigen in Bodennähe abweicht, abgesehen von den Kuppenlagen; die Kaltluftströmungsrichtung ist als Median der Strömungsrichtungen jedes Höhenlevels bis zur Höhe der Kaltluft angegeben. Im Bereich der Hangbereiche des Galgenberges und Ringelberges setzen sich ab etwa 10 m Höhe die Südströmungen durch, darunter sind bodennah teilweise schwache Hangabwinde vorhanden (**Abb. 5.19**). In der Erfurter Mulde, d. h. im



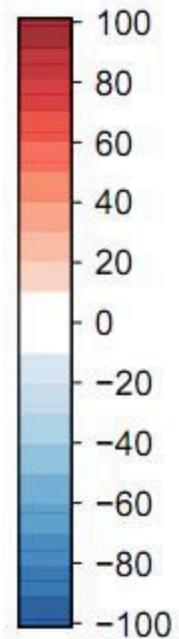




westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes und somit westlich der Hänge des Galgenbergs und Ringelbergs, werden Kaltluftvolumenstromdichten von etwa $80 \text{ m}^3/(\text{m s})$ bis $100 \text{ m}^3/(\text{m s})$ bei südlicher Anströmung erreicht, im Nahbereich höherer Gebäude etwas weniger. Über dem Plangebiet ergeben sich Kaltluftvolumenstromdichten von etwa $40 \text{ m}^3/(\text{m s})$ bis $60 \text{ m}^3/(\text{m s})$ bei südlicher Anströmung. Aufgrund der Planung ergeben sich vor allem in dessen Nachlauf, d. h. in nordnordöstliche, Abnahmen der Kaltluftvolumenstromdichten um bis zu 20 % bis in etwa 100 m und 10 % bis in etwa 200 m Entfernung. In den übrigen Bereichen werden keine wesentlichen flächenhaften Veränderungen berechnet (**Abb. 5.22**). **Abb. 5.23** zeigt die Lufttemperatur in 2 m Höhe um bei voll ausgebildeter Kaltluft, etwa um Mitternacht, im Bestand. In tiefer gelegenen vegetationsbestandenen Bereichen wie z. B. im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes oder im unteren Hangbereich südwestlich der Planung, ergeben sich Temperaturen von 22.5 °C bis 24 °C . Im Bereich der Kuppenlagen und somit auch auf dem im Plangebiet ergeben sich Temperaturen von etwa 24 °C . In versiegelten Bereichen und/oder Siedlungsbereichen werden jeweils etwa 1 °C mehr simuliert; durch die flächenhaft höhere Windgeschwindigkeit ist der Wärmeinseleffekt in den hier dargestellten Siedlungsbereichen geringer als bei der Rechnung ohne Anströmung. Aufgrund der Planung ergeben sich im Bereich des Plangebietes geringfügige Temperaturmodifikationen (**Abb. 5.24**), die 1 K nicht überschreiten und in mehr als 100 m Entfernung vom Plangebäude nicht mehr auftreten.



Relative Änderung
der Volumenstrom-
dichte in %

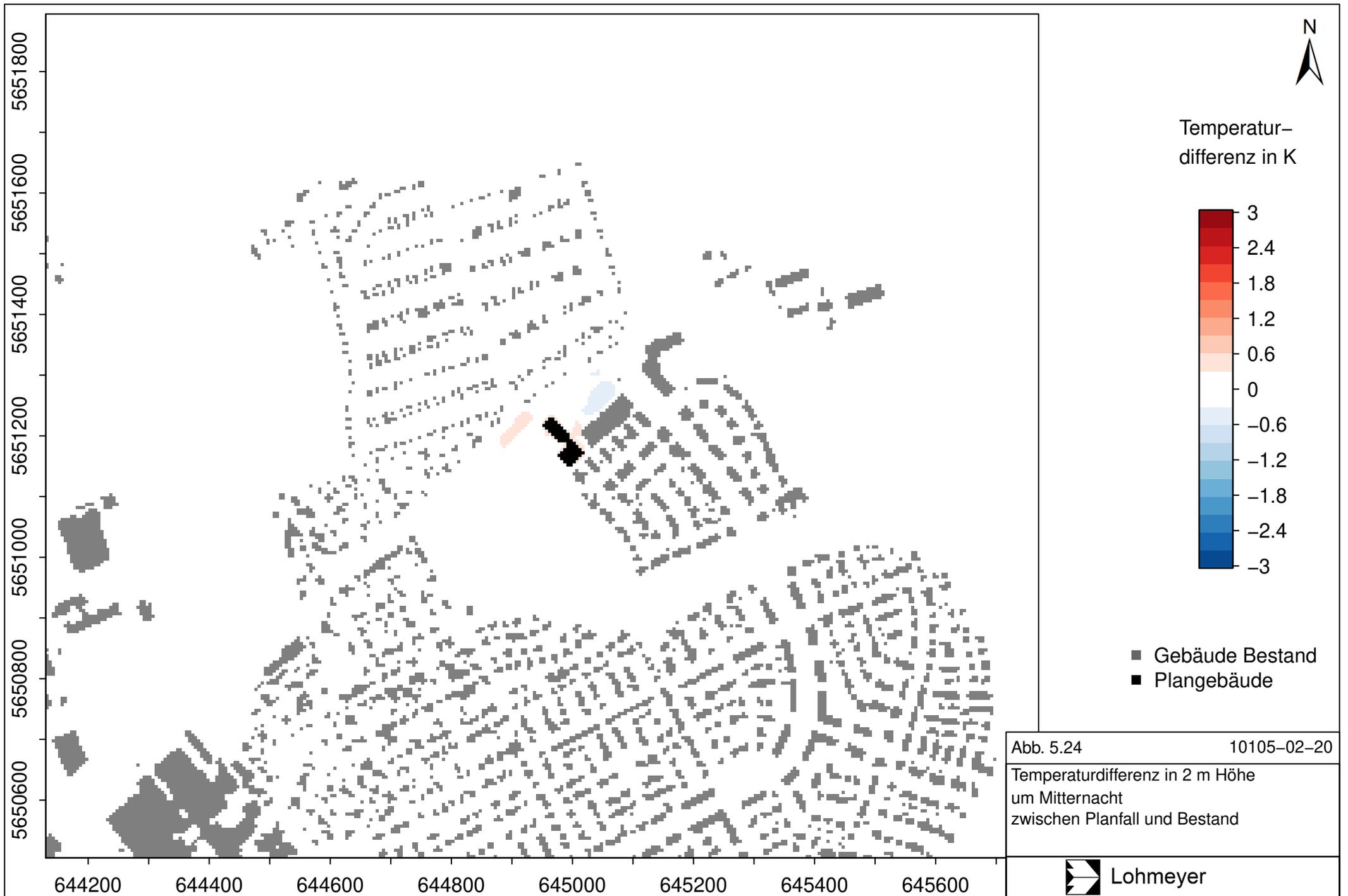


■ Gebäude Bestand
■ Plangebäude

Abb. 5.22 10105-02-20

Relative Änderung der Kaltluft-
volumenstromdichte bei ausge-
prägter Kaltluftbildung





6 FAZIT

Auf dem Erfurter Ringelberg ist die Bebauung auf einer bisher brachliegenden Fläche geplant. Das Plangebäude befindet sich südlich der Leipziger Straße und westlich des dortigen Supermarktes im Osten des Erfurter Siedlungsgebietes auf der Kuppe des Geländerückens des Ringelbergs. Unmittelbar westlich des Plangebietes fällt das Gelände auf einer Grünfläche nach Westen beziehungsweise Südwesten ab.

Für das Aufzeigen der Auswirkungen der geplanten Nutzungsänderungen auf die Kaltluftströmungen wurden Simulationen für den baulichen Bestand und den Planfall mit dem Modell PALM-4U durchgeführt. Dafür wurde ergänzend zum Untersuchungsgebiet das umliegende Gelände mit den Geländeanstiegen berücksichtigt. Das Gebiet wurde so groß gewählt, dass die Einflüsse der umliegenden Geländeerhebungen auf die Kaltluftströmungen erfasst werden (gesamtes Einzugsgebiet der Kaltluft wurde mitbetrachtet). Es wurden Simulationen ohne Antrieb und mit Anströmung aus nordöstlichen Richtungen durchgeführt, bei der tagsüber die größte Anzahl an heißen Tagen gemessen wird.

Die Ergebnisse der Simulationen ohne Anströmung zeigen unterschiedliche Phasen der Kaltluftströmungen im Untersuchungsgebiet. In der Anfangsphase der Kaltluftbildung ergeben sich im Untersuchungsgebiet teilweise ungerichtete, teilweise schwache lokale Strömungen, d. h. östliche Hangabwinde am Galgenberg und Ringelberg in Richtung Erfurter Siedlungsbereich, die aber in der Erfurter Mulde, d. h. in der Ebene, aufgrund ihrer schwachen Intensität nicht mehr als gerichtete Strömungen wahrnehmbar sind; im Bereich des Plangebietes ergeben sich ebenfalls keine gerichteten Strömungen aufgrund der Kuppenlage. Dementsprechend ergeben sich aufgrund der Planung nur im Nahbereich der Planungen wesentliche Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsrichtung sowie Lufttemperatur. Geringe Änderungen reichen bis maximal 70 m nach Südwesten auf die dortige Freifläche und beeinflussen somit nicht die nächtlichen Belüftungsverhältnisse im bestehenden Siedlungsbereich. Bei ausgeprägter Kaltluftbildung, etwa um Mitternacht, ergeben sich im Untersuchungsgebiet bodennah Anströmungen aus südlichen und südöstlichen Richtungen, die von den an Erfurt im Süden angrenzenden Randhöhen heran transportiert werden, wie z. B. dem Zeisigberg und Fuchshügel und den Ausläufern des Thüringer Waldes. In höheren Schichten ergeben sich Strömungen aus südwestlichen Richtungen, die ebenfalls den Einfluss des Thüringer Waldes und dessen Vorläufer andeuten. Somit ergeben sich Einschränkungen in den Belüftungsverhältnissen sowie leichte Temperaturerhöhungen bis etwa 0.6 K aufgrund der Planung, die nach Norden bis etwa 300 m in die Kleingartenanlagen reichen,

Wohnbebauung ist davon nicht betroffen. In den übrigen Bereichen ergeben sich keine Einschränkungen.

Die Ergebnisse der Simulationen mit nordöstlicher Anströmung zeigen in der Anfangsphase der Kaltluftbildung im Untersuchungsgebiet etwas intensivere lokale Strömungen als im Fall ohne Anströmung, d. h. östliche Hangabwinde mit 0.5 m/s bis 1 m/s am Galgenberg und Ringelberg in Richtung des Erfurter Siedlungsbereiches, die sich in der Erfurter Mulde weiter nach Westen fortsetzen. In den Kuppenlagen des Galgenberges und Ringelberges ergeben sich schwache, teils ungerichtete Strömungen. In der Anfangsphase der Kaltluft wirkt der Antrieb aus Nordost mit etwa 2 m/s noch über der sich bildenden Kaltluft und somit im Bereich des Plangebäudes. Dementsprechend ergeben sich Änderungen in der Kaltluftvolumenstromdichte mit etwas über 10 %, die in kleine Teilbereiche des Siedlungsgebietes westlich der Grünfläche, die südwestlich des Plangebietes liegt, hinein reichen. Die wesentlichen Einschränkungen treten dabei ab Höhen von etwa 10 m über Grund auf, bodennah erreichen die Einschränkungen das Siedlungsgebiet nicht und reichen dort bis etwa 200 m auf die Grünfläche. Die wesentlichen Änderungen der Lufttemperatur beschränken sich auf die Nahbereiche des Plangebäudes. Bei ausgeprägter Kaltluftbildung, etwa um Mitternacht, ergeben sich im Untersuchungsgebiet bodennah teilweise noch schwache Hangabwinde an den Hängen des Galgenberges und Ringelberges, sonst großteils ungerichtete, sehr schwache und nicht wahrnehmbare Strömungen. Auf den Kuppenlagen des Galgenberges und Ringelberges, sowie in den übrigen Bereichen ab etwa 10 m bis 15 m Höhe, ergeben sich Anströmungen aus südlichen Richtungen, die von den südlich von Erfurt liegenden Randhöhen heran strömen. Damit ergeben sich Einschränkungen in den Belüftungsverhältnissen aufgrund der Planung, die nach Norden bis etwa 200 m in die Kleingartenanlagen reichen, Wohnbebauung ist davon nicht betroffen. Modifikationen der Temperatur mit bis zu 0.6 K ergeben sich bis in maximal 100 m Entfernung vom Plangebäude. In den übrigen Bereichen ergeben sich keine Einschränkungen.

Insgesamt zeigen die Simulationsergebnisse, dass sich bei autochthonen Wetterlagen im Laufe der Nacht normalerweise südliche Strömungen von den Randhöhen südlich von Erfurt, d. h. von den näheren Randhöhen wie beispielsweise dem Zeisigberg und Fuchshügel bis zu den weiter entfernt liegenden Randhöhen des Thüringer Waldes und seinen Vorläufern, bis in das Untersuchungsgebiet durchsetzen. Zu Beginn der Nacht und bei etwas stärkeren Anströmungen aus Nordost, d. h. etwa 2 m/s, können sich schwache bis mäßige Hangabwinde bodennah bilden und in Richtung der Erfurter Mulde nach Westen strömen. Die Ergebnisse der Simulationen (Kapitel 5) können mit den Messdaten (Kapitel 4) belegt werden, die zei-

gen, dass nachts im Untersuchungsgebiet bei wolkenarmen autochthonen Wetterlagen mehr bodennahe Anströmungen aus südlichen Richtungen als Ostanströmungen gemessen werden, wobei Ostanströmungen tendenziell die ersten 1 bis 3 Stunden nach Sonnenuntergang vorherrschen und danach von südlichen Anströmungen abgelöst werden.

Da die geplante Bebauung lokalklimatisch keine wesentlichen Einschränkungen in den bestehenden Siedlungsbereichen bei den nächtlichen Belüftungsverhältnissen hervorruft, sind keine städtebaulichen/sonstigen Maßnahmen notwendig, um die bio- und stadtklimatische Funktionalität bzw. den Kaltlufttransport zu erhalten. Dennoch können folgenden Maßnahmen zu einem günstigeren Lokalklima und/oder Innenraumklima des Gebäudes führen:

- Baumpflanzungen vor den südlichen, westlichen und östlichen Gebäudefassaden (ideal wären Laubbäume, da sie im Sommer zur Verschattung der Fassade beitragen können, während sie im Winter die Sonneneinstrahlung nur wenig behindern).
- Beibehaltung nicht versiegelter Bereiche auch innerhalb der Baugrenzen
- Begrünung von Straßenzügen und Verkehrswegen
- Dachbegrünungen von Flachdächern
- Fassadenbegrünungen an südlichen, westlichen und östlichen Fassaden

7 LITERATUR

- Lohmeyer GmbH, 2020: „Simulationen mit PALM-4U. Lohmeyer aktuell, August 2020. URL: <http://www.lohmeyer.de/de/system/files/content/download/hauszeitung/ausgabe43.pdf>
- Maronga, B., Gryschka, M., Heinze, R., Hoffmann, F., Kanani-Sühring, F., Keck, M., Ketelsen, K., Letzel, M. O., Sühring, M., and Raasch, S., 2015: The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives. *Geoscientific Model Development Discussions* 8 (2015), Nr. 2, S. 1539-1637 (2015).
- Maronga, B., Gross, G., Raasch, S., Banzhaf, S., Forkel, R., Heldens, W., Kanani-Sühring, F., Matzarakis, A., Mauder, M., Pavlik, D., Pfaffenrott, J., Schubert, S. Seckmeyer, G., Sieker, H., and Winderlich, Kristina, 2019: Development of a new urban climate model based on the model PALM-Project overview, planned work, and first achievements. *Meteorologische Zeitschrift* (2019): 1-15.
- Raasch, S., and Schröter, M., 2001: PALM – a large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. *Meteorologische Zeitschrift* 10.5 (2001): 363-372.
- Schädler, G., Bächlin, W., Lohmeyer, A., van Wees, T. (1996): Vergleich und Bewertung derzeit verfügbarer mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle. In: *Berichte Umweltforschung Baden-Württemberg (FZKA-PEF 138)*.
- Scherhag, R., Blüthgen, J., Lauer, W. (1977): *Klimatologie*. 9. Aufl. Westermann Verlag, Braunschweig. ISBN N 3-14-160284-0, S. 204.
- VDI 3787 Blatt 7 (2017): *Umweltmeteorologie – Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle, Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder*. Richtlinie VDI 3783 Blatt 7, Hrsg.: Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN – Normenausschuss, Düsseldorf, Mai 2017.
- VDI 3787 Blatt 9 (2017): *Umweltmeteorologie – Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle – Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung*. VDI-Richtlinie VDI 3783 Blatt 9. Hrsg.: Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN – Normenausschuss, Düsseldorf, Mai 2017.