

# Klimaökologische Untersuchung Städtebauliche Entwicklungsmaß- nahme Frankfurt Nordwest (SEM 4)

## Bestandsanalyse und Planungshinweise

**Stadt Frankfurt am Main**  
**Stadtplanungsamt**  
**Kurt-Schumacher-Straße 10**  
**60311 Frankfurt am Main**

Erstellt von:  
GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover

Stand:  
**November 2019**





## Inhaltsverzeichnis

<b>Glossar</b> .....	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Klimaplanatlas der Stadt Frankfurt.....	3
<b>2 Fachliche Grundlagen</b> .....	<b>4</b>
2.1 Der Wärmeinseleffekt .....	4
2.2 Gravitationsbedingte Berg- und Hangwinde .....	5
2.3 KLIMA in Frankfurt .....	5
<b>3 Methodik der klimaökologischen Untersuchung</b> .....	<b>8</b>
3.1 Die Modellierung.....	8
3.2 Die Messungen.....	9
<b>4 Ergebnisse ausgewählter stadtklimatischer Parameter</b> .....	<b>10</b>
4.1 Vorgehensweise .....	10
4.2 Nächtliches Temperaturfeld.....	10
4.3 Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom .....	16
4.4 Thermische Belastung am Tag.....	27
4.5 Klimaanalysekarte .....	30
<b>5 Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>36</b>
<b>6 Planungshinweise</b> .....	<b>38</b>
<b>7 Anhang Teil A</b> .....	<b>42</b>
<b>8 Anhang Teil B</b> .....	<b>47</b>
<b>Quellenverzeichnis</b> .....	<b>50</b>



## KARTENVERZEICHNIS

KARTE 1: LAGE DES UNTERSUCHUNGSGEBIETS (QUELLE: STADTVERMESSUNGSAMT FRANKFURT AM MAIN) .....	1
KARTE 2: STADTKLIMATISCHES UNTERSUCHUNGSGEBIET ZUR STÄDTEBAULICHEN ENTWICKLUNGSMAßNAHME FRANKFURT NORDWEST (SEM 4). KARTENGRUNDLAGE: STADT FRANKFURT AM MAIN .....	2
KARTE 3: GELÄNDEHÖHEN IM UNTERSUCHUNGSGEBIET (DGM 10 M). .....	8
KARTE 4: VERGLEICH DER TEMPERATUREN ZWISCHEN DER MESSFAHRT AM 24.07.2018 (22:05) UND DER MODELLIERUNG VON FITNAH (23:00) .....	14
KARTE 5: VERGLEICH DER TEMPERATUREN ZWISCHEN DER MESSFAHRT VOM 25.07.2018 (03:25) UND DER MODELLIERUNG VON FITNAH (04:00) .....	15
KARTE 6: NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD UM 23:00 UHR FÜR EINE AUTOCHTHONE WETTERLAGE. ....	20
KARTE 7: NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD UM 04:00 UHR FÜR EINE AUTOCHTHONE WETTERLAGE. ....	21
KARTE 8: NÄCHTLICHE KALTLUFTVOLUMENSTROM(-DICHTE) UM 23:00 UHR FÜR EINE AUTOCHTHONE WETTERLAGE. ....	24
KARTE 9: NÄCHTLICHE KALTLUFTVOLUMENSTROM(-DICHTE) UM 04:00 UHR FÜR EINE AUTOCHTHONE WETTERLAGE. ....	25
KARTE 10: WÄRMEBELASTUNG AM TAGE UM 14:00 UHR NACH DER SIMULATION VON FITNAH 3D FÜR EINE AUSTAUSCHARME, WOLKENLOSE, SOMMERLICHE HOCHDRUCKWETTERLAGE.....	29
KARTE 11: KLIMAANALYSEKARTE FÜR EINE AUSTAUSCHARME, WOLKENLOSE, SOMMERLICHE HOCHDRUCKWETTERLAGE AUF BASIS DER SIMULIERTEN DATEN NACH FITNAH 3D FÜR 23:00 UHR.....	32
KARTE 12: LEGENDE DER KLIMAANALYSEKARTE FÜR EINE AUSTAUSCHARME, WOLKENLOSE, SOMMERLICHE HOCHDRUCKWETTERLAGE AUF BASIS DER SIMULIERTEN DATEN NACH FITNAH 3D FÜR 23:00 UHR.....	33
KARTE 13: PLANUNGSHINWEISKARTE KLIMA.....	40
KARTE B 1: PROZENTUALE ÄNDERUNG DES KALTLUFTVOLUMENSTROMS WÄHREND EINER AUSTAUSCHARMEN, WOLKENLOSEN, SOMMERLICHEN HOCHDRUCKWETTERLAGE INFOLGE DES EINFLUSSES VON LÄRMSCHUTZWÄNDEN/-WÄLLEN ENTLANG DER BAB A 5. ....	48
KARTE B 2: ÄNDERUNG DER BODENNAHEN WINDGESCHWINDIGKEITEN WÄHREND EINER AUSTAUSCHARMEN, WOLKENLOSEN, SOMMERLICHEN HOCHDRUCKWETTERLAGE INFOLGE DES EINFLUSSES VON LÄRMSCHUTZWÄNDEN/-WÄLLEN ENTLANG DER BAB A 5. ....	49

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABB. 1: AUSZUG AUS DEM KLIMAPLANATLAS 2016 STADT FRANKFURT AM MAIN - KLIMAFUNKTIONSKARTE. ....	3
ABB. 2: PRINZIPIKIZZE FLURWIND.....	4
ABB. 3: MITTLERE MONATLICHE LUFTTEMPERATUR- UND NIEDERSCHLAGSWERTE FÜR DEN ZEITRAUM VON 1971-2010 (DWD-STATION FRANKFURT/MAIN-WESTEND; NACH DWD 2019B). ....	6
ABB. 4: PRINZIPIKIZZE DER FÜR FRANKFURTS NORDWESTEN IN DEN NACHTSTUNDEN RELEVANTEN WINDSYSTEME. DARGESTELLT IST DIE VERTIKALE MÄCHTIGKEIT DES JEWEILIGEN WINDSYSTEMS, WOBEI DIE ANGEGEBENEN MÄCHTIGKEITEN EXEMPLARISCH ZU SEHEN UND NICHT EXAKT DERART AN JEDEM PUNKT IM UNTERSUCHUNGSGEBIET ZU FINDEN SIND. ....	7
ABB. 5: TAGESGANG DER LUFTTEMPERATUR VON URBANER UND RURALER MESSSTATION (06.08./07.08.2018).....	13
ABB. 6: ZEITLICHER VERLAUF DER PROZENTUALEN VERTEILUNG DER WINDRICHTUNG DER ERSTEN UND ZWEITEN NACHTHÄLFTE FÜR DEN RURALEN SOWIE DEN URBANEN STANDORT. ....	22
ABB. 7: TEMPERATURPROFILE DER VERTIKALSONDIERUNGEN (19:00 UHR UND 21:00 UHR) UND DER MODELLIERUNG (23:00 UHR UND 04:00 UHR) AM PUNKT DER VERTIKALSONDIERUNGEN. ....	26
ABB. A 1: LANGJÄHRIGES MONATSMITTEL DER ANZAHL AUTOCHTHONER NÄCHTE AN DER DWD-STATION FRANKFURT AM MAIN (1971 – 2018, QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2019B) .....	42
ABB. A 2: STANDORTE DER METEOROLOGISCHEN MESSUNGEN. ....	42
ABB. A 3: VERGLEICH DER TEMPERATUREN ZWISCHEN DER MESSFAHRT AM 07.08.2018 (22:15) UND DER MODELLIERUNG (23:00). ....	43
ABB. A 4: VERGLEICH DER TEMPERATUREN ZWISCHEN DER MESSFAHRT AM 08.08.2018 (03:25) UND DER MODELLIERUNG (04:00). ....	44
ABB. A 5: RAUCHSCHWADENVERSUCH DES 24.07.2018 UM 19:00 UHR.....	45
ABB. A 6: RAUCHSCHWADENVERSUCH DES 24.07.2018 UM 21:00 UHR.....	45



## Glossar

**Albedo:** Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung). Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtmenge. Die Albedo ist abhängig von der Beschaffenheit der bestrahlten Fläche sowie vom Spektralbereich der eintreffenden Strahlung.

**Allochthone Wetterlage:** Durch großräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, die die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert.

**Ausgleichsraum:** Grüengeprägte, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → *Wirkungsraum* angrenzt oder mit diesem über → *Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.

**Austauscharme Wetterlage:** → *Autochthone Wetterlage*

**Autochthone Wetterlage:** Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Maße durch die Luftmasse geprägt, sodass sich lokale Klimate wie das Stadtklima bzw. lokale Windsysteme wie z.B. Berg- und Talwinde am stärksten ausprägen können.

**Autochthones Windfeld:** Strömungen, deren Antrieb im Betrachtungsgebiet selber liegt und die nicht durch großräumige Luftdruckgegensätze beeinflusst werden, z.B. → *Kaltluftabflüsse* und → *Flurwinde*, die sich als eigenbürtige, landschaftsgesteuerte Luftaustauschprozesse während einer windschwachen sommerlichen → *autochthonen Wetterlage* ausbilden.

**Bioklima:** Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (= atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf den Menschen (Humanbioklima).

**Flurwind:** Thermisch bedingte, relativ schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Flurwinde strömen vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in Richtung der Überwärmungsbereiche (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum).

**Grünfläche:** Als „Grünfläche“ werden in dieser Arbeit unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung diejenigen Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal ca. 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Forsten und Wälder.

**Kaltluft:** Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperatur-



differenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).

**Kaltluftabfluss:** Flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auftretende Kaltluftabflüsse. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Der Abfluss erfolgt schubweise. Er setzt bereits vor Sonnenuntergang ein und kann die ganze Nacht andauern.

**Kaltlufteinwirkungsbereich:** Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung (Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets) gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen  $\rightarrow$  *Kaltluftvolumenstrom*  $> 2,6 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  durchflossen werden.

**Kaltluftentstehungsgebiete:** Grünflächen mit einem überdurchschnittlichen  $\rightarrow$  *Kaltluftvolumenstrom*, die  $\rightarrow$  *Kaltluftleitbahnen* speisen ( $\rightarrow$  *Flurwinde* zeigen in Richtung der Kaltluftleitbahnen) bzw. über diese hinaus bis in das Siedlungsgebiet reichen..

**Kaltluftleitbahnen:** Kaltluftleitbahnen verbinden  $\rightarrow$  *Kaltluftentstehungsgebiete* ( $\rightarrow$  *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche ( $\rightarrow$  *Wirkungsräume*) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Beinhalten thermisch induzierte Ausgleichströmungen sowie reliefbedingte  $\rightarrow$  *Kaltluftabflüsse*.

**Kaltluftvolumenstrom:** Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der  $\rightarrow$  *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an  $\rightarrow$  *Kaltluft* in der Einheit  $\text{m}^3$ , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer  $\rightarrow$  *Kaltluftleitbahn* fließt. Anders als das  $\rightarrow$  *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht. In der vorliegenden Studie wird genau genommen die Kaltluftvolumenstromdichte in der Einheit  $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$  betrachtet, um den Bezug zur Modellrausterausdehnung zu vernachlässigen. Es wird im Folgenden der Begriff Kaltluftvolumenstrom äquivalent verwendet.

**Kelvin (K):** SI-Basiseinheit der thermodynamischen Temperatur, die zur Angabe von Temperaturdifferenzen verwendet wird. Der Wert kann in der Praxis als Abweichung in Grad Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) interpretiert werden.

**Klimaanalysekarte:** Analytische Darstellung der Klimaauswirkungen und Effekte in der Nacht sowie am Tage im Stadtgebiet und dem näheren Umland (Kaltluftprozessgeschehen, Überwärmung der Siedlungsgebiete).

**PET (Physiologisch äquivalente Temperatur):** Humanbioklimatischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung des Menschen, der Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombiniert und aus einem Wärmehaushaltsmodell abgeleitet wird.

**Planungshinweiskarte:** Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet ( $\rightarrow$  *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als  $\rightarrow$  *Ausgleichsräume* für die Tag- und die Nachtsituation und Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

**Städtische Wärmeinsel (Urban Heat Island):** Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland aufgrund des anthropogenen Einflusses (u.a. hoher Versiegelungs- und geringer



Vegetationsgrad, Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalt) ein modifiziertes Klima auf, das im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen führt. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet.

**Strahlungswetterlage** → *Autochthone Wetterlage*

**Strömungsfeld:** Für den Analysezeitpunkt 04:00 Uhr morgens simulierte flächendeckende Angabe zur Geschwindigkeit und Richtung der → *Flurwinde* in 2 m über Grund während einer → *autochthonen Wetterlage*.

**Strukturwind:** Kleinräumiges Strömungsphänomen, das sich zwischen strukturellen Elementen einer Stadt ausbildet (bspw. zwischen einer innerstädtischen → *Grünfläche* und der Bebauung entlang einer angrenzenden Straße).

**Taunusabwinde:** Gravitationsbedingte Berg- und Hangwinde; aufgrund ihrer höheren Dichte fließt die kühlere Luft hangabwärts. Die Mächtigkeit der Winde ist bestimmt durch den Temperaturunterschied zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes. Die vertikale Mächtigkeit der aus westliche/nordwestlichen Richtungen einströmenden Taunus-Hangabwinde erreicht bis zu 30 m, teilweise auch bis zu 50 m. )

**Wetterauwind:** Im Rhein-Main-Gebiet auftretende Regionalströmung aus Nordost. Bis zu 300 m mächtig.

**Wirkungsraum:** Bebaute oder zur Bebauung vorgesehener Raum (Siedlungs- und Gewerbeflächen), in dem eine bioklimatische Belastung auftreten kann.

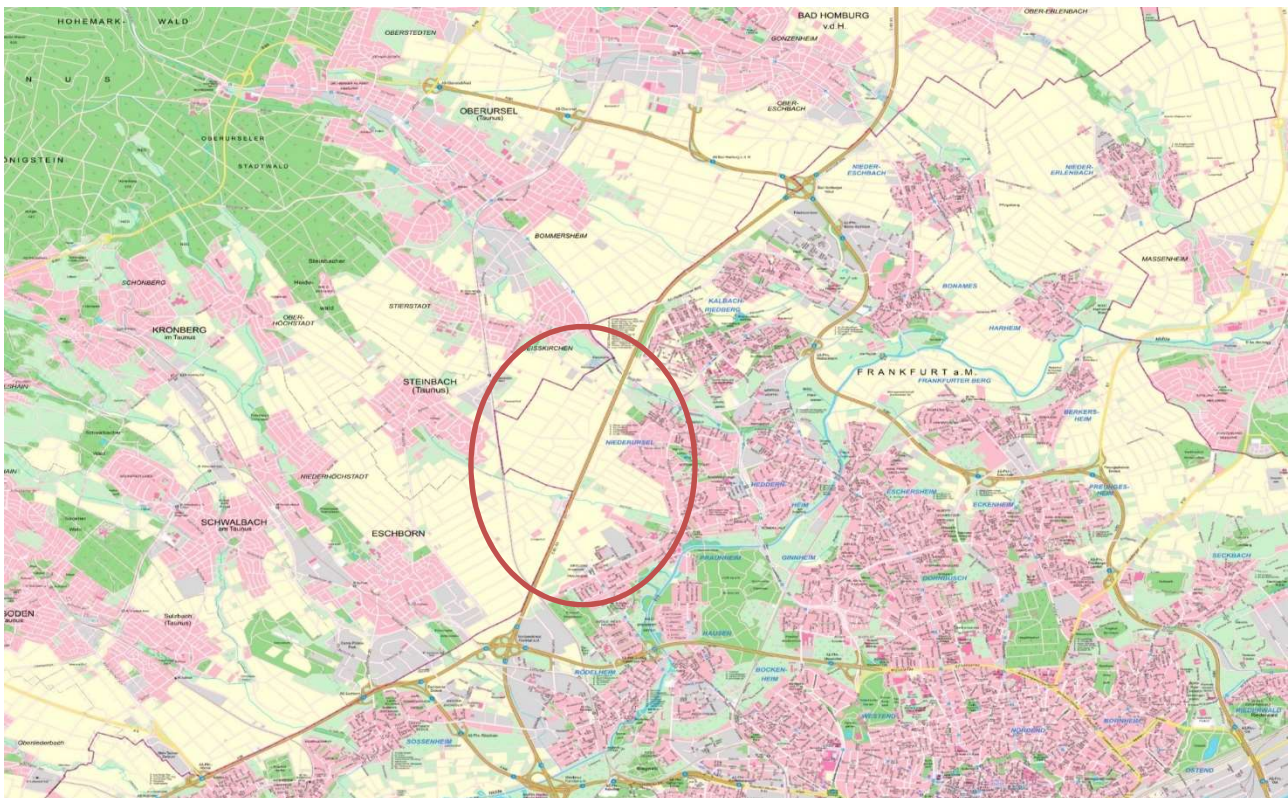
**z-Transformation:** Umrechnung zur Standardisierung einer Variablen, sodass der arithmetische Mittelwert der transformierten Variable den Wert Null und ihre Standardabweichung den Wert Eins annimmt. Dies wird erreicht, indem von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und anschließend durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, die in Vielfachen der Standardabweichung vorliegen. Die Form der Verteilung bleibt dabei unverändert.



## 1 Einleitung

Die Einwohnerzahl Frankfurts wächst stetig. Um dem damit verbundenen Bedarf an Wohnraum zu entsprechen, hat die Stadt Frankfurt am Main im Nordwesten des Stadtgebietes eine städtebauliche Entwicklungsmaßnahme (SEM 4) beschlossen. Zunächst wird im Rahmen einer Voruntersuchung geprüft, ob und in welchem Umfang in diesem Bereich eine Siedlungserweiterung möglich ist.

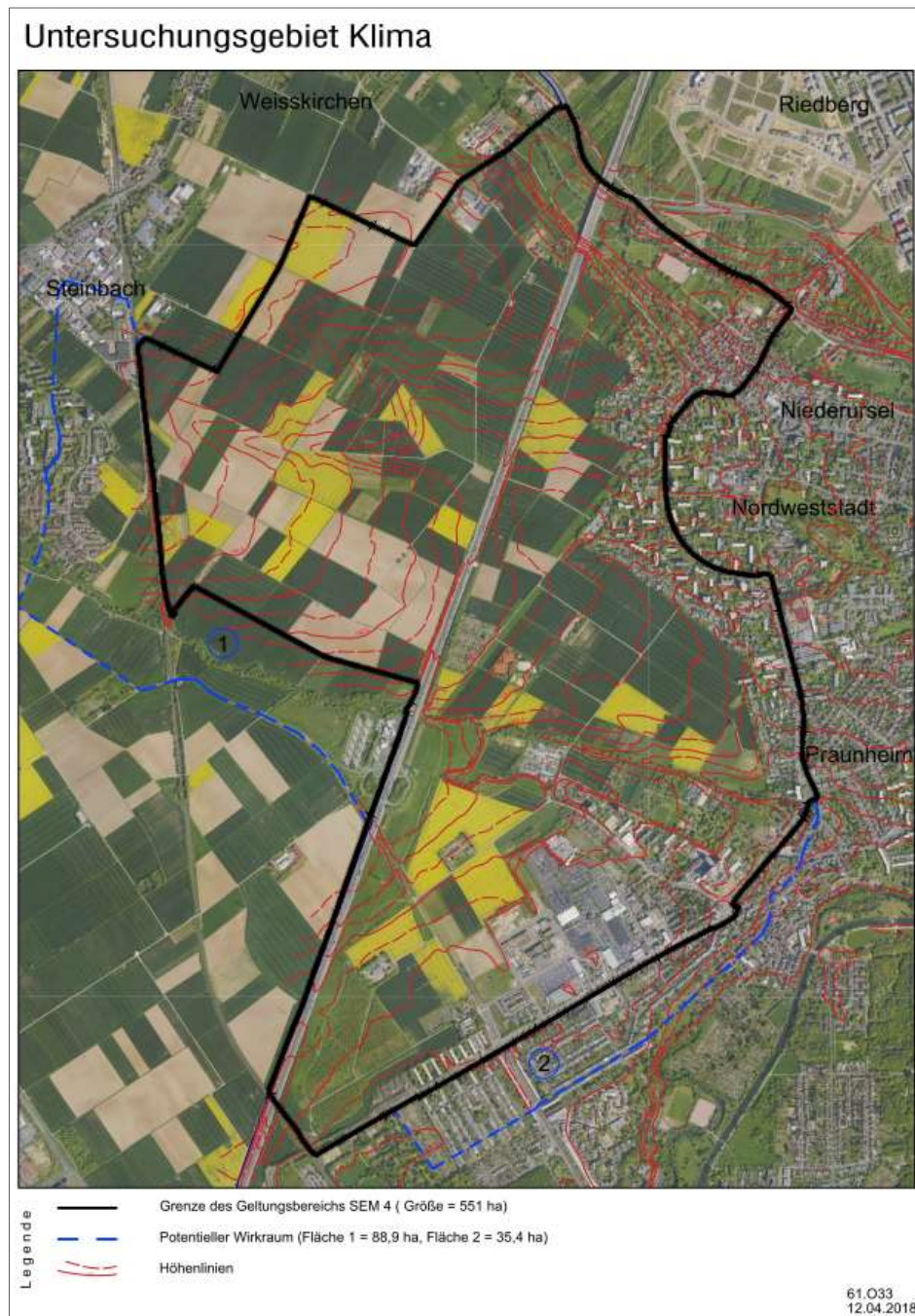
Der Untersuchungsbereich zur SEM 4 liegt am Stadtrand im Nordwesten Frankfurts. Östlich grenzen die Frankfurter Stadtteile Niederursel, Nordweststadt und Praunheim an. Außerhalb der Frankfurter Gemarkung liegen die Städte Steinbach, Oberursel-Weißkirchen und Eschborn im Nahbereich westlich des Untersuchungsgebiets (s. Karte 1).



Karte 1: Lage des Untersuchungsgebiets (Quelle: Stadtvermessungsamt Frankfurt am Main).

Im Rahmen der Voruntersuchungen wird auch eine klimatische Untersuchung erforderlich. Der Geltungsbereich der SEM 4 umfasst eine Fläche von rund 551 ha. Für die klimatische Untersuchung wurde dieser Bereich um ca. 125 ha erweitert, um die potenziell relevanten Bereiche für die Ermittlung der klimatischen Wirkungsgebiete mit zu erfassen. Dargestellt ist das Untersuchungsgebiet in Karte 2.

Im vorliegenden Gutachten wird die klimatische Bestandssituation erfasst und die klimatische Relevanz sowie mögliche Auswirkungen der geplanten Siedlungserweiterung dargelegt. Ferner werden die bioklimatische Situation beurteilt sowie Planungsempfehlungen zur Berücksichtigung des Stadtklimas abgeleitet. Dafür wurden neben verschiedenen Simulationen mit dem numerischen Klima-Modell FITNAH 3D auch Langzeitmessungen (Temperatur, Windrichtung und -stärke) sowohl innerhalb auch als auch außerhalb des geplanten Siedlungserweiterungsbereichs durchgeführt. Die Simulationen zur Erfassung einer hochsommerlichen Belastungssituation berücksichtigen einen Sommertag mit einer ausgeprägten autochthonen, windschwachen Wetterlage mit einer Lufttemperatur von 22°C um 21 Uhr über dem Freiland.



Karte 2: Stadtklimatisches Untersuchungsgebiet zur städtebaulichen Entwicklungsmaßnahme Frankfurt Nordwest (SEM 4). Kartengrundlage: Stadt Frankfurt am Main

Mit dieser Untersuchung sollen zudem die Aussagen des Klimaplanatlas (2016) der Stadt Frankfurt am Main zur stadtklimatischen Bedeutung der Freiflächen sowie zur bioklimatischen Belastung der angrenzenden Siedlungsflächen präzisiert werden.



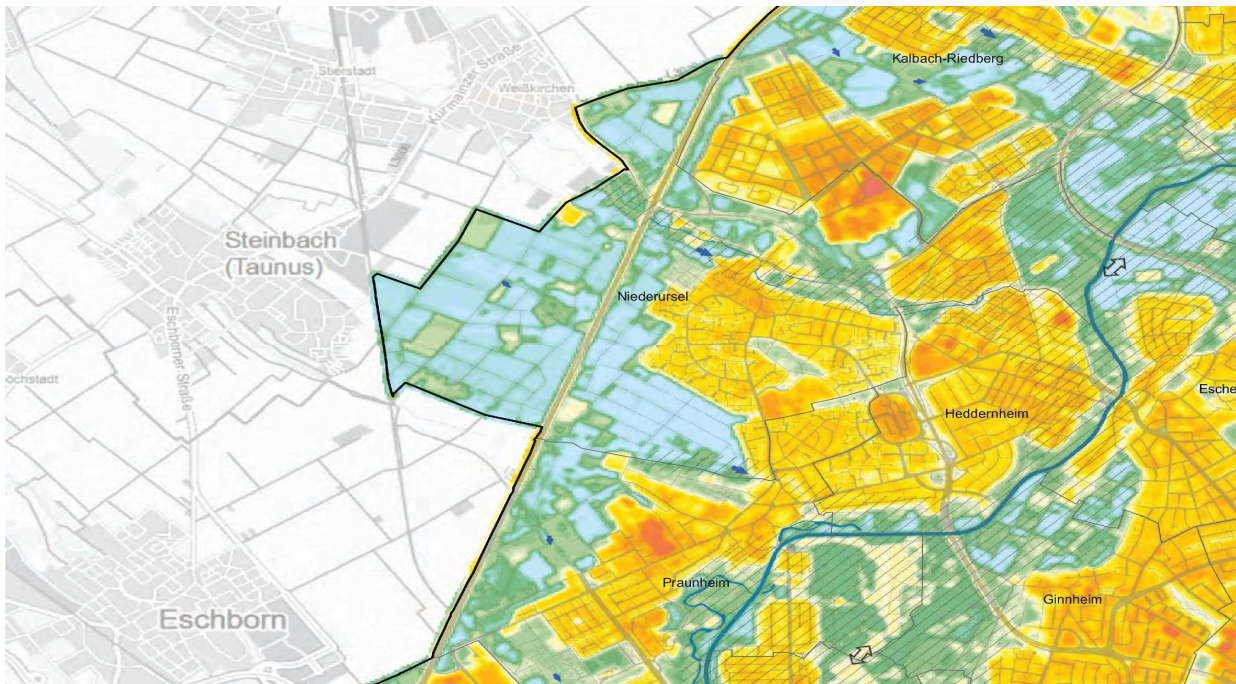


### 1.1 KLIMAPLANATLAS DER STADT FRANKFURT

Im Jahr 2016 wurde der Klimaplanatlas Frankfurt aktualisiert. Ziel war es, die klimatische Ist-Situation zu analysieren. Die Klimafunktionskarte ist der zentrale Bestandteil des Klimaplanatlas. Es handelt sich um die kartografische Synthese des gegenwärtigen Stadtklimas hinsichtlich der thermischen und dynamischen Verhältnisse (entsprechend der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1). In die Berechnungen zur Erstellung der Karte wurden u.a. Vegetation, Baudichten bzw. Bauhöhen eingestellt. Kaltluftleitbahnen wurden mit dem Simulationsmodell KLAM\_21 ermittelt. Bei der Betrachtung wird eine sommerliche nächtliche Wetterlage mit hohem Luftdruck, geringen Windgeschwindigkeiten und geringer bzw. keiner Bewölkung zugrunde gelegt.

Im Ergebnis wird das Stadtgebiet in der thermischen Komponente bestimmten Klimateigenschaften zugeordnet. Die Spannweite reicht von Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiet bis zum Gebiet starker Überwärmung. In der dynamischen Komponente werden u.a. Windverhältnisse, Luftleitbahnen und Kaltluftbahnen berücksichtigt.

Die Freiflächen im Geltungsbereich der SEM 4 werden dabei größtenteils im Klimaplanatlas als Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiet eingeordnet und die Überwärmung der Siedlungsbereiche als moderat bis stark eingeordnet.



Thermische Komponente:

Kategorie	Name	Beschreibung
+ Klimatologische Wertigkeit	Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiet	Orientierung nach VDI Klimateigenschaft: <b>Freilandklima</b> . Hoch aktive, vor allem kaltluftproduzierende Flächen im Außenbereich; Größtenteils mit geringer Rauigkeit und entsprechender Hangneigung.
	Frischlufentstehungsgebiet	Orientierung nach VDI Klimateigenschaft: <b>Waldklima</b> . Flächen ohne Emissionsquellen; Hauptsächlich mit dichten Baumbestand und hoher Filterwirkung.
	Misch- und Übergangsklimate	Orientierung nach VDI Klimateigenschaft: <b>Klima innerstädtischer Grünflächen</b> . Flächen mit sehr hohem Vegetationsanteil, geringe und diskontinuierliche Emissionen; Pufferbereiche zwischen unterschiedlichen Klimatopen.
	Überwärmungspotential	Orientierung nach VDI Klimateigenschaft: <b>Vorstadtklima</b> . Baulich geprägte Bereiche mit versiegelten Flächen, aber mit viel Vegetation in den Freiräumen; Größtenteils ausreichende Belüftung.
	Moderate Überwärmung	Orientierung nach VDI Klimateigenschaft: <b>Stadtklima</b> . Dichte Bebauung, hoher Versiegelungsgrad und wenig Vegetation in den Freiräumen; Belüftungsdefizite.
-	Starke Überwärmung	Orientierung nach VDI Klimateigenschaft: <b>Innenstadtklima</b> . Stark verdichtete Innenstadtbereiche/City, Industrie- und Gewerbeflächen mit wenig Vegetationsanteil und fehlender Belüftung.

Dynamische Komponente:

Kategorie	Name	Beschreibung
↑ größenabhängig	Wetterauwind	Der Wetterauwind ist eine bis zu 300 m mächtige nächtliche Regionalströmung aus Nordost. Sie überströmt das zentrale Stadtgebiet Frankfurts und greift als wichtige Ausgleichsströmung östlich und westlich des Stadtkerns bis in die bodennahen Bereiche durch. Tagsüber kehrt sich die Windrichtung entsprechend der Leitwirkung des Taunuskamms auf südwest.
	Luftleitbahn	Durch Ausrichtung, Oberflächenbeschaffenheit und Breite bevorzugte Fläche für den bodennahen Luftmassentransport. Luftleitbahnen sind durch geringe Rauigkeit (keine hohen Gebäude, nur einzeln stehende Bäume) gekennzeichnet.
	Wirkrichtung Luftleitbahn	Sie ermöglichen den Luftmassenaustausch zwischen Umland und Stadt. Die Wirksamkeit hängt von der Windverteilung ab. Ferner können Luftleitbahnen vor allem bei Schwachwindlagen von großer Bedeutung für die klimatische Entlastung sein.
↑ höhenabhängig	Kaltluftbahn/ Kaltluftabflussrichtung	Thermisches, während der Nacht induziertes Windsystem (Hangabwind). Dabei fließt die am Hang bodennah erzeugte Kaltluft ab. Das Pfeilsymbol entspricht der Abflussrichtung.
	Durchlüftung/ Durchlüftungsbahn	Neben Luftleitbahnen auch Gleisanlagen, breite Straßen, Flussläufe etc. die als zusätzliche Bahnen belüftend wirken. Kanalisierung von Luftströmungen.
	Windfeldveränderung	Durch hohe Bebauung hervorgerufene Störung des Windfeldes. Hinweis auf erhöhte turbulente Windgeschwindigkeitsänderungen (Böigkeit) und drastische Windrichtungsänderungen (Wirbelbildung, Umströmung).

Abb. 1: Auszug aus dem Klimaplanatlas 2016 Stadt Frankfurt am Main - Klimafunktionskarte.

## 2 Fachliche Grundlagen

### 2.1 DER WÄRMEINSELEFFEKT

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen gegenüber dem Umland vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke 1973). Gründe hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenüber steht, die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion der Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss). Im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als **Städtische Wärmeinsel** bezeichnet.

Für die Stadtbevölkerung entstehen hohe Belastungen vornehmlich bei Hochdruckwetterlagen, die durch einen ausgeprägten Tagesgang von Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Bewölkung bestimmt sind (autochthone Wetterlagen). Unter diesen Rahmenbedingungen kommt es tagsüber zu einem konvektiven Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper. Als Folge des entstehenden bodennahen Tiefdruckgebietes treten Ausgleichsströmungen auf, d.h. Luftmassen aus dem Umland können bis in das Stadtgebiet hinein strömen (**Flurwinde**; Abb. 2). Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht. Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und eine Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts dagegen kann kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen (und ggf. innerstädtischen) Grünflächen in das wärmere Stadtgebiet strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse, sodass er nur entlang von Flächen ohne blockierende Bebauung bzw. sonstige Hindernisse erfolgen kann (insb. über sogenannte Kaltluftleitbahnen)<sup>1</sup>.

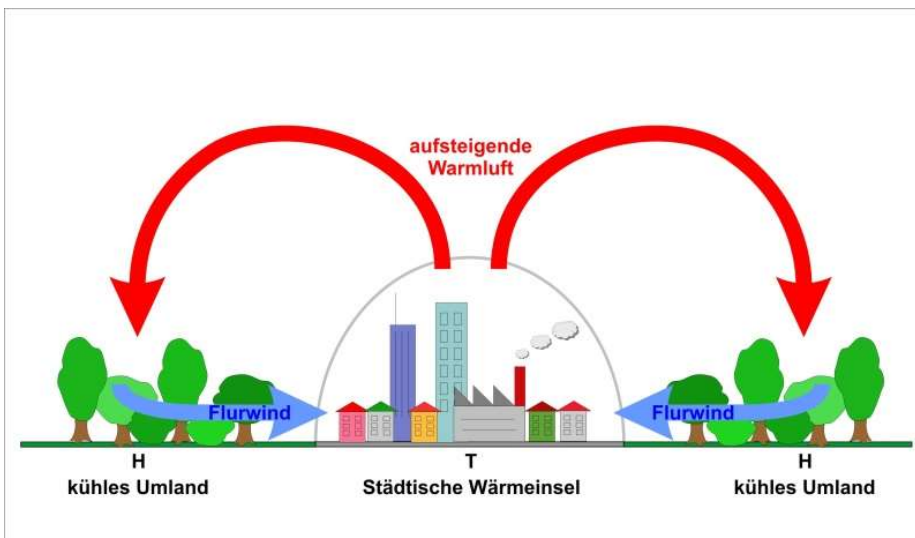


Abb. 2: Prinzipskizze Flurwind

<sup>1</sup> In den Nachtstunden sind autochthone Wetterlagen durch stabile Temperaturschichtungen der bodennahen Luft gekennzeichnet. Damit wird eine vertikale Durchmischung unterbunden und eine ggf. überlagerte Höhenströmung hat keinen Einfluss mehr auf das bodennahe Strömungsfeld, das entsprechend sensibel auf Hindernisse reagiert. Tagsüber sind die Verhältnisse weniger stabil. Durch das Aufsteigen von Warmluftblasen aus der bodennah nachströmenden Luft (Böigkeit) ist eine vertikale Durchmischung der Luftschichten möglich, sodass Strömungshindernisse ggf. überwunden werden können.



Neben der vom Menschen freigesetzten Abwärme (anthropogener Wärmefluss), kommt es durch den hohen Versiegelungsgrad zu einer Erwärmung des Stadtgebietes. Während unbebaute Flächen im Umland schnell auskühlen, erfolgt der Prozess des Abkühlens bei städtischen, versiegelten Flächen über einen längeren Zeitraum. Beton und Asphalt besitzen eine geringe Albedo<sup>2</sup>, sodass viel Strahlung absorbiert wird und sich die Flächen am Tag stark aufwärmen. In der Nacht kann die gespeicherte Wärme als langwellige Ausstrahlung an die Atmosphäre abgegeben werden (Häckel 2012, Malberg 2002). Aufgrund der stärkeren Versiegelung bzw. des geringeren Grünanteils (und zudem meist geringerer Wasserverfügbarkeit) ist die Verdunstung und damit verbundene Kühlleistung in der Stadt herabgesetzt<sup>3</sup> (Schönwiese 2008).

Verkehr, Industrie und Hausbrand bewirken nicht nur einen anthropogenen Wärmefluss, sondern führen auch zu vermehrten Emissionen. Entsprechend weist die Luft in der Stadt erhöhte Verunreinigungen durch Schadstoffe und Staub auf, die sich negativ auf die Gesundheit des Menschen auswirken können. Da die Windgeschwindigkeiten in der Stadt in der Regel herabgesetzt sind, kann kein ausreichender Luftaustausch stattfinden, um die Luftqualität merklich zu verbessern (Kuttler 2009).

Dies erklärt die Notwendigkeit der Betrachtung des Stadtklimas, insbesondere da ein Großteil der Bevölkerung in Städten wohnt und demzufolge Belastungen so gering wie möglich gehalten werden sollten, um gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse sicherzustellen.

## 2.2 GRAVITATIONSBEDINGTE BERG- UND HANGWINDE

Ab einer Geländeneigung von ein bis zwei Grad setzen nach Sonnenuntergang über natürlichen Oberflächen abwärts gerichtete Strömungen ein, weil die hangnahe Luft durch nächtliche Ausstrahlung stärker abkühlt als die freie Luft in gleicher Höhe. Aufgrund ihrer höheren Dichte fließt die kühlere Bodenluft hangabwärts. Die Ausprägung dieses Phänomens wird in erster Linie durch den Temperaturunterschied der Kaltluft zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt (Mosimann et. al, 1999). Hangabwinde erreichen maximale Abflussgeschwindigkeiten von etwa 3 m/s, ihre Mächtigkeit liegt zumeist bei etwa 10 m oder einigen Dekametern. Im Bergvorland sind Hangwinde oftmals Teilglieder einer übergeordneten Berg- und Talwind-Zirkulation. Aufgrund ihrer größeren Einzugsgebiete sind nächtliche Bergwinde deutlich stärker ausgeprägt als Hangwinde und erreichen bei Mächtigkeiten bis zu mehreren Dekametern oder hunderten Meter Strömungsgeschwindigkeiten von über 5 m/s (Werner, 1979).

## 2.3 KLIMA IN FRANKFURT

Das Klima charakterisiert gemäß Definition des Deutschen Wetterdienstes (DWD) den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bzw. Gebiet und wird durch die statistischen Gesamteigenschaften über einen genügend langen Zeitraum repräsentiert (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten, etc.). Im Allgemeinen werden Zeiträume von 30 Jahren zugrunde gelegt – so wurde z.B. die aktuell gültige internationale klimatologische Referenzperiode auf den Zeitraum 1961-1990 festgelegt (DWD 2019a). Dennoch wird gegenwärtig häufig (wie auch in den folgenden Kennzahlen) die Periode 1971 - 2000 verwendet (DWD 2019a).

Frankfurt am Main liegt in einer gemäßigten Klimazone im Übergangsbereich zwischen ozeanisch und kontinental geprägtem Einfluss (Strahler 2009). Durch die Lage in der Rhein-Main-Ebene ist die Stadt durch die umgebenden Höhenzüge von starken Winden weitgehend abgeschirmt. Zusätzlich ist die geschützte Beckenlage verantwortlich für das vergleichsweise milde Klima sowie für den geringen Luftaustausch im Ballungsraum (Stadt Frankfurt am Main o.J.).

---

<sup>2</sup> Rückstrahlvermögen einer Oberfläche

<sup>3</sup> In der Stadt steht dem geringeren latenten Wärmestrom ein höherer fühlbarer Wärmetransport gegenüber.

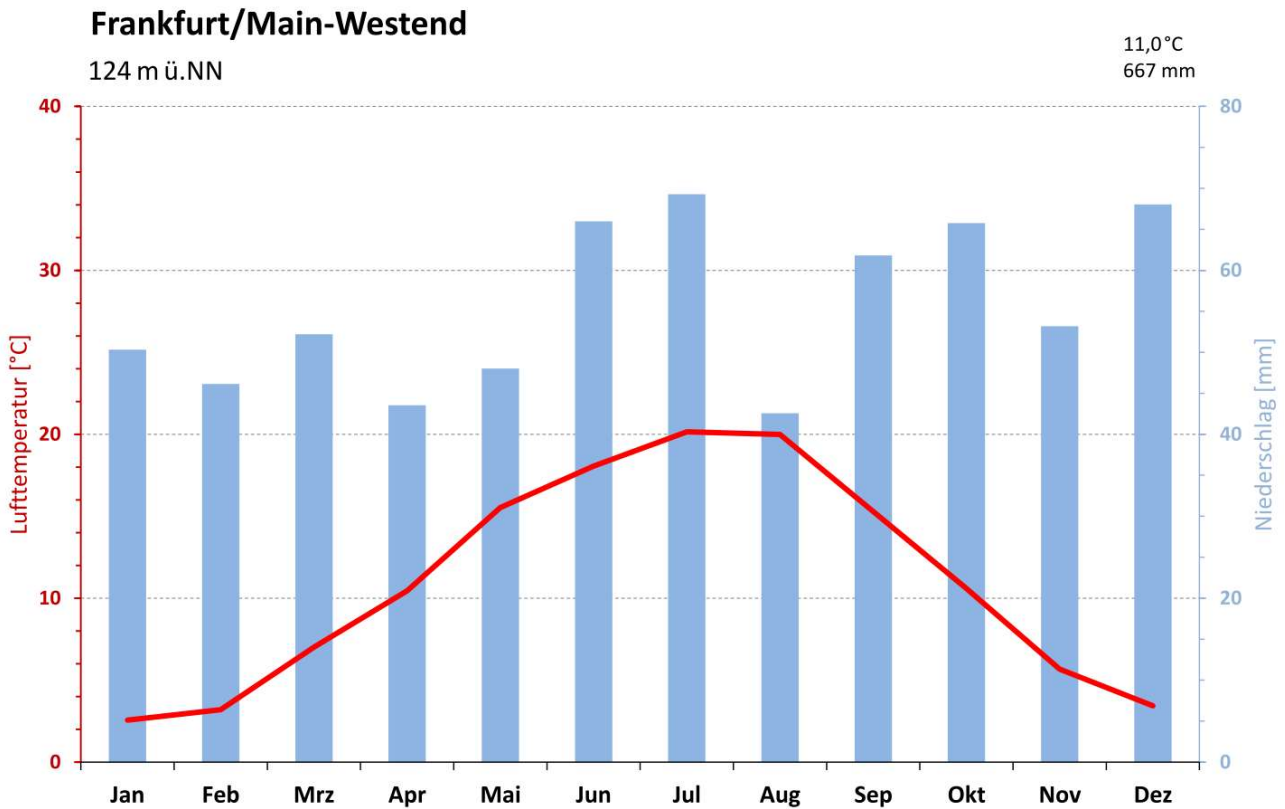


Abb. 3: Mittlere monatliche Lufttemperatur- und Niederschlagswerte für den Zeitraum von 1971-2010 (DWD-Station Frankfurt/Main-Westend; nach DWD 2019b).

Die Lufttemperatur an der Messstation Frankfurt/Westend weist einen ausgeprägten Jahresverlauf mit Maximum im Juli (20,2 °C) auf (s. Abb. 3). Die Minimumtemperatur von 2,6 °C wird im Januar erreicht. Der gemittelte Niederschlag liegt bei etwa 667 mm pro Jahr.

Am häufigsten treten die Windrichtungen Südwest und Nordost analog zur Lage des Taunuskamms und der Wetterau auf (Stadt Frankfurt am Main o.J.). Während bei einer windstarken „Normallage“ der Siedlungsraum Frankfurts gut durchlüftet wird und eine Überwärmung kaum gegeben ist, stellt die windschwache Hochdruckwetterlage mit wolkenlosem Himmel im Sommer eine „Worst Case“-Situation mit einer deutlichen Wärmebelastung dar. Die Lage von Frankfurt am Main im Rhein-Main-Becken begünstigt das Auftreten solcher bioklimatischen Belastungssituationen (Stadt Frankfurt am Main 2016). Dabei zeigen die Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes für das Bundesland Hessen im Zeitraum von 1971 bis 2000, dass die Bevölkerung des Rhein-Main-Gebietes am häufigsten einer Wärmebelastung ausgesetzt ist. Mit über 30 Tagen Wärmebelastung pro Jahr ist diese für Frankfurt a. M. im Vergleich besonders hoch (Umweltatlas Hessen, o.J.). Unter diesen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen aus innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Wärmebelastung in den überwärmten Siedlungsflächen beitragen.

Für die stadtklimatischen Verhältnisse im Untersuchungsraum sind neben dem lokalen Prozessgeschehen, wie den Flurwinden, auch regionale Austauschströmungen wie der Wetterauwind oder die Taunusabwinde von Relevanz. Die Hangabwinde aus dem Taunus oder der Wetterauwind tragen bei einem ausreichenden regionalen Antrieb zur nächtlichen Belüftung der Stadt Frankfurt bei. Der Wetterauwind ist dabei eine bis zu 300 m mächtige Strömung aus Nordost (Stadt Frankfurt am Main, 2016), die nach Sonnenuntergang einsetzt. Dieser regional bedeutsame Wind aus der Wetterau beeinflusst das Strömungsgeschehen vor allem in schwachwindigen Wetterlagen in den Nacht- und frühen Morgenstunden. Die Taunuswinde be-

stimmen vor allem während der ersten Nachthälfte das Strömungsgeschehen. Sie sind bis zu 50 m (GEO-NET, o.J.) mächtig, strömen aus Richtung Taunus und somit (Nord-)Westen. Das gesamte Strömungsgeschehen in Frankfurts Nordwesten wird in der Prinzipskizze (s. Abb. 4) dargestellt.

Fällt während autochthoner Sommernächte die übergeordnete Strömung weniger intensiv aus, reduziert sich die Durchlüftung des Stadtgebiets (umgangssprachlich heißt es dann meist „die Luft steht“), was zu einer höheren thermischen Belastung der Bevölkerung führt. Entsprechend modelliert die vorliegende klimaökologische Untersuchung eine solche Wetterlage, bei der neben Hangabwinden auch Flurwinde als Ausgleichsströmungen in den Vordergrund rücken. In der Vergangenheit traten diese „windschwachen Strahlungsnächte“ im Sommer (Juni, Juli und August) an etwa 7 – 9 Tagen<sup>4</sup> pro Jahr auf (vgl. Abb. A 1).

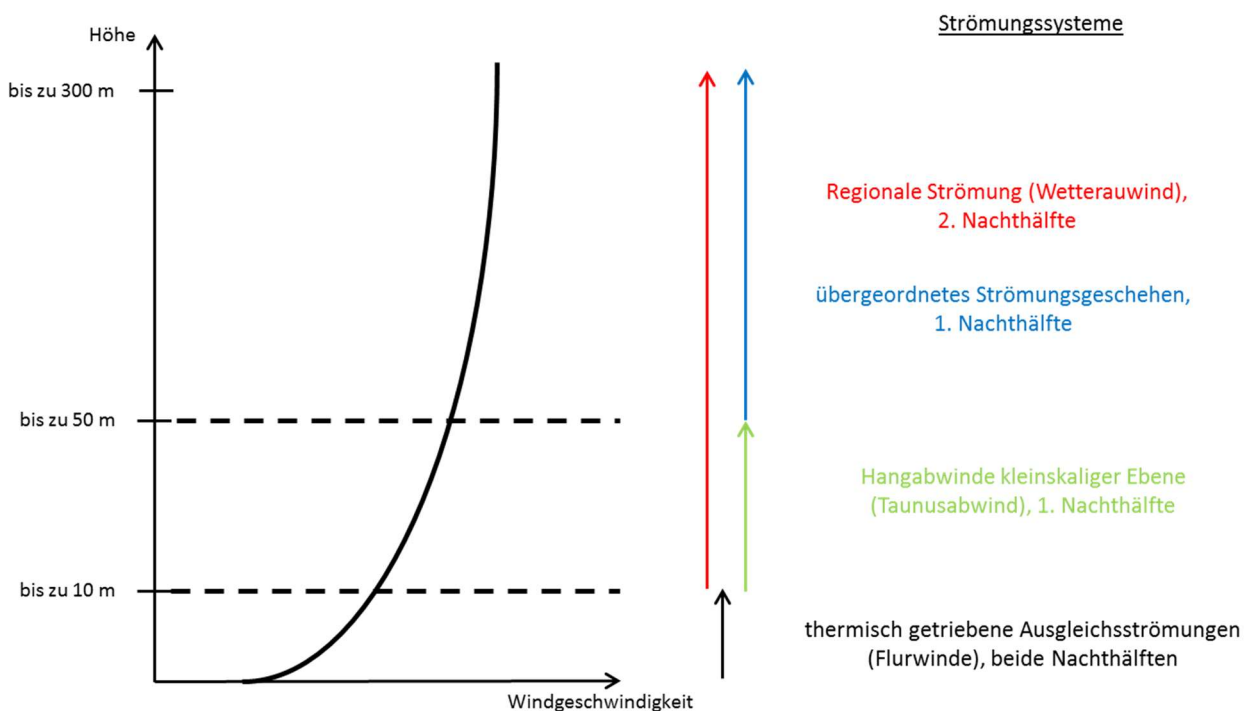


Abb. 4: Prinzipskizze der für Frankfurts Nordwesten in den Nachtstunden relevanten Windsysteme. Dargestellt ist die vertikale Mächtigkeit des jeweiligen Windsystems, wobei die angegebenen Mächtigkeiten exemplarisch zu sehen und nicht exakt derart an jedem Punkt im Untersuchungsgebiet zu finden sind.

<sup>4</sup> Monatliches Mittel der Anzahl windschwacher Strahlungsnächte an der DWD-Station Frankfurt am Main im Zeitraum 1971-2018 anhand folgender Kriterien nach Augter/DWD (1997):

- Windgeschwindigkeit  $\leq 2.7$  m/s in 10 m ü.Gr. und Bedeckungsgrad höchstens vier Achtel in der Nacht
- Kriterien müssen für zehn Stunden innerhalb des Zeitraums 17:00 - 05:00 MEZ (Lücken erlaubt) oder an sieben aufeinanderfolgenden Stunden innerhalb desselben Zeitraums erfüllt sein (ohne Lücke)

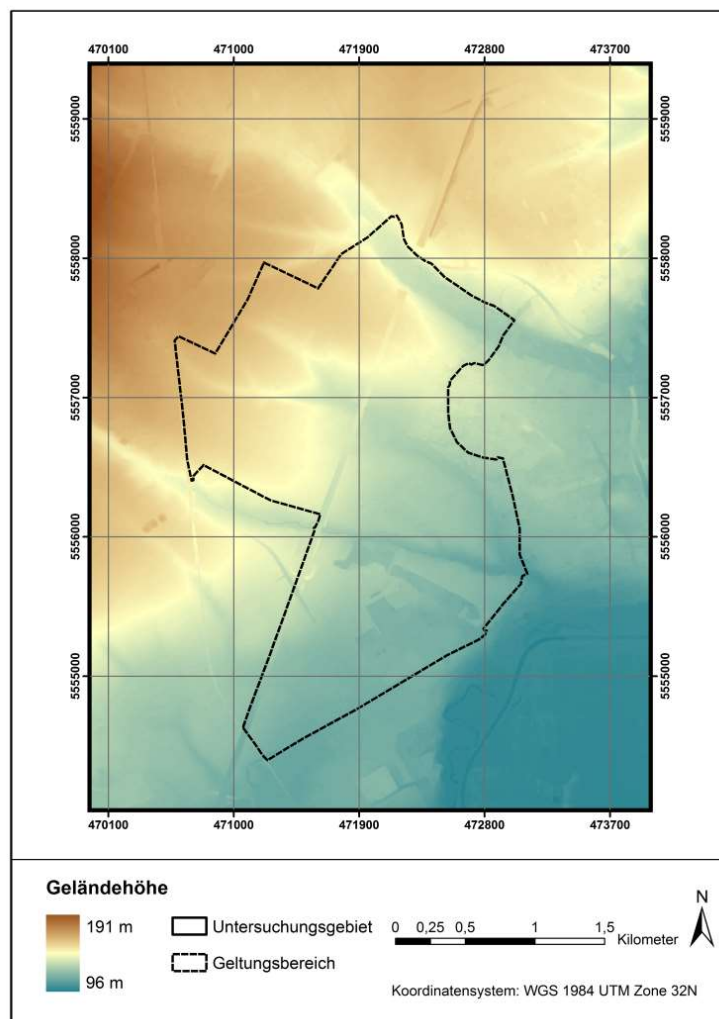


### 3 Methodik der klimaökologischen Untersuchung

#### 3.1 DIE MODELLIERUNG

Das Untersuchungsgebiet liegt im Nordwesten des Stadtgebiets Frankfurt am Main. Es umfasst Teilbereiche von Niederursel, der Nordweststadt und Praunheim sowie der angrenzenden Gemeinden Steinbach und Eschborn sowie von Oberursel-Weißkirchen. Der Geltungsbereich des Untersuchungsgebietes erstreckt sich bei einer maximalen Ausdehnung von 2,4 km in Ost-West bzw. 4,0 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von etwa 9,6 km<sup>2</sup> (Stadtplanungsamt Frankfurt 2018b). Dabei umfasst das Modellgebiet eine Fläche von 21,6 km<sup>2</sup> (4,0 km x 5,4 km). Der Bereich wurde so gewählt, dass die im Umland vorhandenen Siedlungs- und Freiraumstrukturen mit Einfluss auf die klimatische Situation im Geltungsbereich erfasst werden. So hat das großflächig nach Westen und Nordwesten ansteigende Taunusvorland entscheidenden Einfluss auf das Relief und die klimatische Situation im Untersuchungsgebiet.

Die Nutzung im Untersuchungsgebiet setzt sich zum überwiegenden Teil aus intensiv genutzten landwirtschaftlichen Flächen zusammen. Gehölzstrukturen sind nur wenige vorhanden und finden sich zum Großteil entlang der Bachtäler und der BAB A5. Die stark befahrene BAB A5 durchschneidet das Gebiet mittig von Nord nach Süd mit aktuell 6 Fahrspuren plus Standstreifen. Ein weiterer Ausbau der BAB A 5 ist anvisiert. Dabei müssten voraussichtlich auch umfangreiche Lärmschutzanlagen entlang der Autobahn errichtet werden.



Karte 3: Geländehöhen im Untersuchungsgebiet (DGM 10 m).



Die Übersichtsmodellierung wird mit dem Strömungs- und Klimamodell FITNAH durchgeführt. Nutzungsstruktur und Geländehöhe sind dabei wichtige Eingangsdaten für die Windfeldmodellierung, da über die Oberflächengestalt sowie die Höhe der jeweiligen Nutzungsstrukturen und deren Versiegelungsgrad, das Strömungs- und Temperaturfeld entscheidend beeinflusst wird.

Die Modellierung der meteorologischen Parameter beruht auf einem Raster mit einer Zellengröße von 10 m x 10 m. Vom Stadtplanungsamt Frankfurt am Main wurden Informationen zur Geländehöhe und Nutzungsstruktur (z.B. Gebäude) sowie Laserscandaten für die Ermittlung der Strukturhöhe bereitgestellt. Mit der gewählten räumlichen Auflösung von 10 m x 10 m ist es möglich, die Gebäudestrukturen realitätsnah zu erfassen und ihren Einfluss auf den Luftaustausch abzubilden.

Der Modellrechnung liegt, wie bereits vorangehend erläutert, eine sommerliche Strahlungswetterlage zugrunde (wolkenloser Himmel, keine übergeordnete Windströmung), da die klimaökologischen Funktionen eines Raumes hauptsächlich bei einer solchen Wetterlage zum Tragen kommen.

### 3.2 DIE MESSUNGEN

Zusätzlich zu der Modellierung der maßgeblichen klimaökologischen Parameter wurden in zwei bioklimatisch besonders relevanten bzw. geeigneten windschwachen Strahlungsnächten vertiefende Klimamessungen durchgeführt. Neben Rauchschwadenversuchen und Radiosondenaufstiegen zur Untersuchung der Intensität und Mächtigkeit lokaler Kaltluftbewegungen (24./25.07.18) wurden zusätzlich auch Messfahrten zur flächendeckenden Erfassung des örtlichen Lufttemperaturfeldes durchgeführt (24./25.07.18 und 07./08.08.18). Begleitend zu den Messungen erfolgen seit Juli/August 2018 an zwei Standorten stationäre Klimamessungen, die derzeit zur Aufzeichnung einer vollen Sommerperiode noch immer aktiv sind. Mitte September 2019 ist der Abbau der stationären Messungen geplant. Eine Auflistung aller durchgeführten Messungen enthält Tab. 1. Die Messstandorte sind in Abb. A 2 im Anhang dargestellt.

Tab. 1: Standorte der meteorologischen Messungen 2018/2019.

Untersuchung	Standort (Koordinaten)	Datum	Uhrzeit	Höhe über Grund	Messgrößen	Auflösung Messung
Urbane Messstation	Am Stockborn (50.153802, 8.623152)	24.07.- ca. Anfang 09.19	-	4 m 10 m	T <sub>a</sub> , RH WS, WD	600 s
Rurale Messstation	TSG Nordwest (50.156955, 8.608367)	02.08.- ca. Anfang 09.19	-	2 m 10 m	T <sub>a</sub> , RH T <sub>a</sub> , RH, WS, WD	600 s
Messfahrt 1a		24./25.07.	22:05 - 23:37	1,5 m	T <sub>a</sub> , RH	1 s (ca. 6-7 m)
Messfahrt 1b		24./25.08.	03:21 - 04:55	1,5 m	T <sub>a</sub> , RH	1 s (ca. 6-7 m)
Messfahrt 2a		07./08.08.	22:14 - 23:40	1,5 m	T <sub>a</sub> , RH	1 s (ca. 6-7 m)
Messfahrt 2b		07./08.08.	03:26 - 04:57	1,5 m	T <sub>a</sub> , RH	1 s (ca. 6-7 m)
Vertikalsondierung	Nördl.Verlängerung Steinbacher Hohl (50.156421, 8.612288)	24.07.	19:00, 21:00	bis 100 m	T <sub>a</sub> , RH	~ 2 m
Rauchschwaden- beobachtung	Nördl.Verlängerung Steinbacher Hohl (50.155759, 8.611071)	24.07.	19:15 Uhr, 20:40 Uhr	-	WD (qualitative Beobachtung)	-



## 4 Ergebnisse ausgewählter stadtklimatischer Parameter

### 4.1 VORGEHENSWEISE

Im Folgenden werden die Ergebnisse der numerischen klimaökologischen Modellierungen (FITNAH) sowie die Messergebnisse für die stadtklimarelevanten Parameter

- Lufttemperatur (Nachtsituation),
- Kaltluftströmungsfeld (Flurwinde und Hangabwinde) und
- Kaltluftvolumenstromdichte (Nachtsituation) sowie
- thermische Belastung (Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation))

beschrieben und gegenüber gestellt. Die Modellergebnisse beschreiben die klimatischen Verhältnisse in Bodennähe (in 2 m über Grund) und somit für die den Aufenthaltsbereich des Menschen.

Die Parameter der Nachtsituation werden für die beiden Analysezeitpunkte 23:00 Uhr und 04:00 Uhr dargestellt, um sowohl den Einfluss der bereits in der ersten Nachthälfte auftretenden Taunusabwinde (23:00 Uhr) als auch des hauptsächlich in der zweiten Nachthälfte in Erscheinung tretenden Wetterauwindes (04:00 Uhr) erfassen zu können. Beide Strömungssysteme sind für die stadtklimatischen Verhältnisse im Untersuchungsraum bzw. im gesamten Frankfurter Norden/Nordwesten von großer Bedeutung. Aufgrund ihrer verschiedenen räumlichen und zeitlichen Ausprägungen sind sie jedoch auf unterschiedliche Art und Weise von städtebaulichen Entwicklungsprozessen betroffen.

### 4.2 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

Die Simulation des bodennahen Temperaturfeldes mit den heute zur Verfügung stehenden numerischen Modellen ermöglicht es, flächendeckende Analysen des Temperaturverhaltens eines Raums durchzuführen, um Bereiche mit potentiellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen. Zudem lassen sich damit auch die räumliche Ausprägung sowie die Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abschätzen. Hierbei gilt, dass das Ausmaß des hauptsächlich nachts besonders ausgeprägten Temperaturunterschieds zwischen Stadt und Umland vor allem von der Größe der Stadt und der Dichte ihrer Bebauung abhängig ist.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der klimaökologischen Modellierung des nächtlichen Temperaturfeldes mit den Ergebnissen der Messfahrten, während denen die Lufttemperatur entlang einer festgelegten Route durch das Untersuchungsgebiet ermittelt wurde, beschrieben und analysiert. Zusätzlich werden die Lufttemperatur-Messreihen der ruralen und urbanen stationären Station analysiert.

### ERGEBNISSE

Die Messfahrten fanden unter überwiegend stabilen atmosphärischen Bedingungen (Windgeschwindigkeit  $\leq 1$  m/s) statt. Exemplarisch werden im Folgenden die Aufzeichnungen der Messfahrten vom 24. und 25. Juli 2018 mit den Ergebnissen der modellierten Lufttemperaturverteilung verglichen. Eine Berücksichtigung der Messergebnisse des 08. August 2018 ist hingegen nicht möglich, da während der Messungen die Bewölkung, insbesondere in der zweiten Nachthälfte, stark zunahm und sogar lokale Störungen der Strahlungswetterlage durch einzelne Gewitter auftraten. Der Vollständigkeit halber sind die Ergebnisse der Messfahrten am 07./08. August 2018 in Abb. A 3 und Abb. A 4 im Anhang dargestellt, werden aber nicht weitergehend mit der modellierten Lufttemperatur analysiert.

Die Karte 4 und 5 zeigen das flächenhaft modellierte nächtliche Temperaturfeld im Untersuchungsraum, jeweils exemplarisch für die erste (23:00 Uhr) und zweite (04:00 Uhr) Nachthälfte. Ebenfalls dargestellt sind darin die während der Messfahrten um 22:05 Uhr und 3:25 Uhr registrierten Lufttemperaturen entlang der durchfahrenen Straßenzüge und Stadtteile.





Die Abhängigkeit der modellierten räumlichen Lufttemperaturverteilung von den zugrundeliegenden Siedlungs- und Nutzungsstrukturen ist deutlich zu erkennen. Die errechnete räumliche Verteilung der Lufttemperatur stimmt zudem gut mit den Ergebnissen der Klimafunktionskarte des Klimaplanatlases (Stadt Frankfurt am Main 2016) überein und wird auch überwiegend durch die Ergebnisse der Temperaturmessfahrten bestätigt.

Allgemein geben sowohl die Messfahrten als auch die modellierten Werte der Lufttemperatur die strahlungsbedingte Abkühlung von der ersten zur zweiten Nachthälfte gut wieder. Dies ist darauf zurückzuführen, dass um 04:00 Uhr der Kaltlufthaushalt, im Gegensatz zum Analysezeitpunkt 23:00 Uhr, nun vollständig ausgeprägt ist und es mit dem Auftreten des Wetterauwindes in der zweiten Nachthälfte zu einem erhöhten Kaltlufttransport im Untersuchungsgebiet kommt.

Wie aus den Karten 4 und 5 ersichtlich wird, treten die niedrigsten Temperaturen mit weniger als 14 °C zu beiden Untersuchungszeitpunkten auf den Ackerflächen und in den Tälern, wie beispielsweise dem Steinbachtal, auf. Sowohl die Messungen als auch die numerischen Modellierungen geben dieses typische räumliche Abkühlungsmuster übereinstimmend wieder. Die höchsten Temperaturen werden in der Modellierung zu beiden Zeitpunkten, unter anderem, für das Gewerbegebiet an der Heerstraße in **Praunheim** prognostiziert. Um 23:00 Uhr beträgt hier die modellierte Lufttemperatur zwischen 20 °C und 21 °C. Um 04:00 Uhr ist sie bereits größtenteils auf unter 20 °C abgesunken. Während der Messfahrten wurden innerhalb des Gewerbegebiets an der Heerstraße Temperaturen zwischen 15 °C bis 18 °C (22:05 Uhr) bzw. 14 °C bis 15 °C (03:25 Uhr) ermittelt. Demnach ist das Gewerbegebiet tatsächlich etwa 4 K kühler, als nach den Ergebnissen der Simulation. Diese Differenz kann darauf zurückgeführt werden, dass das Modell die in der Realität teils unterschiedlich intensiv beanspruchten Betriebsgrundstücke nicht in ihrer gesamten Vielfalt berücksichtigen kann und stattdessen allen Grundstücken einheitliche Eigenschaften zuordnet. Dadurch lässt sich das gerade bei inhomogenen Nutzungsarten auftretende kleinräumige Muster unterschiedlicher Klimaeigenschaften nur bedingt nachbilden. Zudem basiert die Modellierung auf autochthonen Idealbedingungen. Trotz der günstigen Wetterbedingungen während der Messfahrten können deshalb die realen Bedingungen von den pauschalisierten Modellansätzen abweichen.

Für die **Nordweststadt** wird für die beiden Untersuchungszeiten im Mittel eine Temperaturerhöhung von 3 – 4 K gegenüber den angrenzenden landwirtschaftlich genutzten Freiflächen berechnet. Weil der vom Modell erfasste große Baumbestand in der Nordweststadt tagsüber eine starke Aufheizung verhindert, ist auch nachts das Temperaturniveau in diesem Stadtteil mit circa 17 °C vergleichsweise niedrig. Dies wird durch die Lufttemperaturmessungen entlang des Praunheimer Weges bestätigt. Diese vergleichsweise günstigen thermischen Verhältnisse sind zudem auf die Zufuhr von Kaltluft zurückzuführen, welche zum einen über die Tiefenlinie des Urselbachtals räumlich konzentriert in den Stadtteil gelangt, aber auch über die landwirtschaftlichen Freiflächen zwischen Steinbach und der Nordweststadt auf breiter Front herangeführt wird. Davon profitiert hauptsächlich der Siedlungsrand. Deshalb ist vor allem im Bereich zwischen dem Paul-Kornfeld Weg und dem Gerhart-Hauptmann-Ring, ausgehend vom Zustand um 23:00 Uhr zu 04:00 Uhr, eine deutlichere Abkühlung zu erkennen, als sie zwischen ähnlich dichten Siedlungsstrukturen, wie beispielsweise an der Niederurseler Landstraße im Zentrum der Nordweststadt zu verzeichnen ist. Die Messfahrten, insbesondere entlang des südlichen Abschnitts des Praunheimer Weges, bestätigen das verstärkte Eindringen der Kaltluft in die Randzonen der Nordweststadt.

Durch zuströmende Kaltluft entlang des Steinbachtals und über die angrenzenden Freiflächen erfahren auch die Randgebiete **Praunheims** bis wenigstens zur Heerstraße bzw. zur Haingrabenstraße eine stärkere Abkühlung. Auch das Gewerbegebiet an der Heerstraße profitiert offensichtlich von dieser intensiveren Kaltluftzufuhr, wodurch es zumindest in Teilbereichen vergleichsweise stark abkühlt, wie die Ergebnisse der



Temperaturmessfahrten entlang der Stierstädter Straße/Heerstraße belegen, die insbesondere für die zweite Nachthälfte (Karte 5) eine deutliche Temperaturreduzierung zeigen. Diese Abkühlung kann auch für die angrenzenden, offeneren Gewerbegrundstücke und die Wohngebiete links und rechts der Heerstraße angenommen werden (s. o.).

Ferner ist erkennbar, dass in der ersten Nachthälfte in Praunheim der Temperaturunterschied bzw. die Temperaturerhöhung gegenüber der freien Landschaft ausgeprägter als beispielsweise in der Nordweststadt (Karte 4) ist. Hier zeigt sich der kühlende Einfluss des dichten Baumbestandes in der Nordweststadt, der tagsüber den Überhitzungstendenzen entgegenwirkt, so dass das Temperaturniveau schon während der ersten Nachthälfte reduziert ist. Weil ein vergleichbar entwickelter Baumbestand im o.g. Bereich von Praunheim fehlt, heizt sich dieser Stadtteil tagsüber stärker auf, woraus wiederum die deutlichere Überwärmung in der ersten Nachthälfte resultiert. Dieser Nachteil wird erst in der zweiten Nachthälfte durch die einsickernde Kaltluft und durch die in Praunheim bestehenden besseren Ausstrahlungsbedingungen kompensiert. Deshalb sind zu diesem Zeitpunkt die entlang der Heerstraße gemessenen Temperaturen niedriger als im Praunheimer Weg im Bereich der Nordweststadt, deren dichter Baumbestand nun die Abkühlung des Siedlungskörpers behindert.

Die Wohnsiedlungen der Nachbargemeinden Steinbach und Oberursel-Weißkirchen weisen zu beiden Untersuchungszeitpunkten mit im Mittel etwa 17 °C (23:00) bzw. 15 °C (04:00) ein ähnlich geringes Temperaturniveau wie die stark durchgrünte Nordweststadt auf.

Die Messfahrten bestätigen für das Stadtgebiet von Steinbach die beschriebene räumliche Verteilung der Lufttemperatur aus der Modellierung. Dieser Unterschied im Temperaturniveau zwischen den Siedlungsbereichen im Osten und Westen des Untersuchungsgebiets ist vor allem darauf zurückzuführen, dass Steinbach und Weißkirchen um bis zu 50 m höher liegen als die nordwestliche Gemarkung Frankfurts. Zudem entspricht die vorherrschende Bautypologie in den genannten Gemeinden eher einer Einzel- oder Reihen- bzw. Zeilenbebauung. Dieser Bebauungstyp weist prinzipiell einen größeren Anteil an klimaaktiven Grünflächen auf, welche der nächtlichen Überwärmung entgegenwirken.

Die Gewerbegebiete in Steinbach sowie im östlichen Teil Eschborns sind zu beiden Untersuchungszeiträumen mit 20 °C bis 21 °C (23:00) bzw. 19 °C bis 20 °C (04:00) im Mittel rund 3 K bis 4 K wärmer, als die wohnbaulich geprägten Siedlungsbereiche in den jeweiligen Gemeinden. Die Differenz zwischen den Temperaturmesswerten entlang der Ginnheimer Straße in Eschborn und den modellierten Lufttemperaturen kann auch hier wieder auf den Einfluss der einströmenden Kaltluft zurückgeführt werden, ähnlich wie im Gewerbegebiet an der Heerstraße. In der Realität sind deshalb diese Bereiche insbesondere in der zweiten Nachthälfte kühler, als es die Modellergebnisse darstellen. Im Unterschied zum Frankfurter Stadtrand verfügen die Nachbarkommunen jedoch über den Vorteil, dass sie stärker vom aus Nordosten einströmenden Wetterauwind profitieren, der die auf den vorgelagerten Freiflächen produzierte Kaltluft in die luvseitig liegenden Siedlungskörper „hineinschiebt“.

Um einen ergänzenden Eindruck vom Wärmehaushalt im Frankfurter Nordwesten zu erlangen, wurde, neben der Modellierung und den Messfahrten, an den beiden stationären Messstationen „Am Stockborn“ (urban) und im geplanten Siedlungserweiterungsbereich auf dem Gelände des TSG Nordwest (rural) die Lufttemperatur seit dem 02.08.2018 kontinuierlich gemessen<sup>5</sup>. Für einen Vergleich der Messwerte der stationären Stationen mit der modellierten Temperatur kann aufgrund des Messbeginns im August nicht die vorangehend behandelte Nacht des 24./25.7.2018 analysiert werden. Es wird zu diesem Zweck die nächst folgende autochthone Nacht des 06./07.08.2018 betrachtet.

---

<sup>5</sup> Die ausführliche Auswertung der Ergebnisse der Langzeitmessungen erfolgt in einem separaten Messbericht.



Abb. 5 zeigt den Tagesgang der Lufttemperatur an der urbanen sowie der ruralen Station. Erkennbar ist, dass sich der rurale Standort an einem Strahlungstag ebenso stark aufheizen kann wie der urbane, sofern – wie hier der Fall – die Böden durch eine vorhergehende längere Wärmeperiode ausgetrocknet sind. Die unversiegelten Oberflächen im Umkreis der ruralen Messstation kühlen nach Sonnenuntergang aufgrund ihrer geringeren Wärmekapazität schneller aus als die hochversiegelten, städtischen Untergründe. Dies erklärt, warum die Lufttemperatur in der Nacht an der Freilandstation niedriger ist, als im Siedlungsbereich.

Der Vergleich der gemessenen Lufttemperaturen an den stationären Messstationen mit den Modellergebnissen zu den Analysezeitpunkten 23:00 Uhr und 04:00 Uhr zeigt, dass Messung und Modellierung in etwa die gleiche Temperaturdifferenz zwischen urbaner und ruraler Umgebung aufweisen.

Die Messungen haben ergeben, dass für den 23:00 Uhr Zeitpunkt eine Überhitzung von rund 2 K im Bereich der urbanen Station gegenüber der ruralen Station besteht. Einen ähnlichen Unterschied lässt das errechnete Lufttemperaturfeld erkennen.

Für den 04:00 Uhr Zeitpunkt ist in den Modellergebnissen für die urbane Station eine Überhitzung von etwa 1,5 K gegenüber der ruralen Station zu erkennen. Die Messwerte stellen für diesen Zeitpunkt eine Überhitzung von etwa 1 K dar. Somit kann festgehalten werden, dass das Modell die Intensität des Wärmeinseleffekts ausreichend realitätsgetreu darstellen kann.

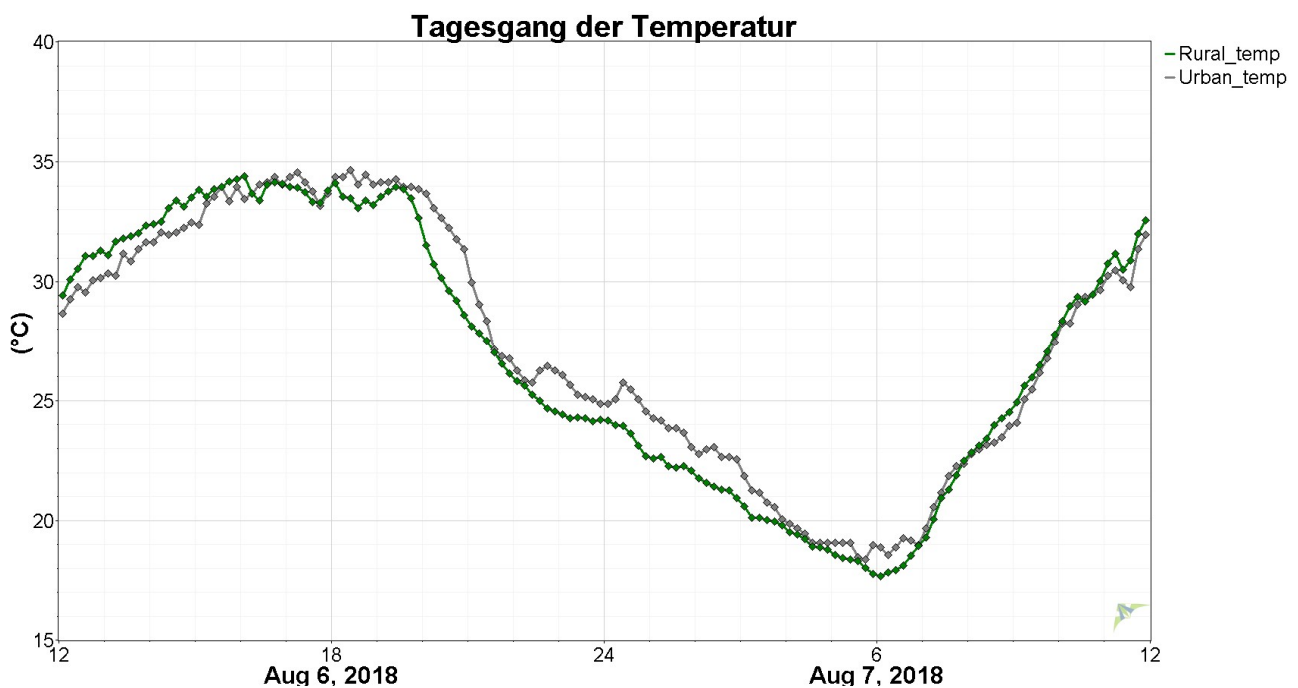
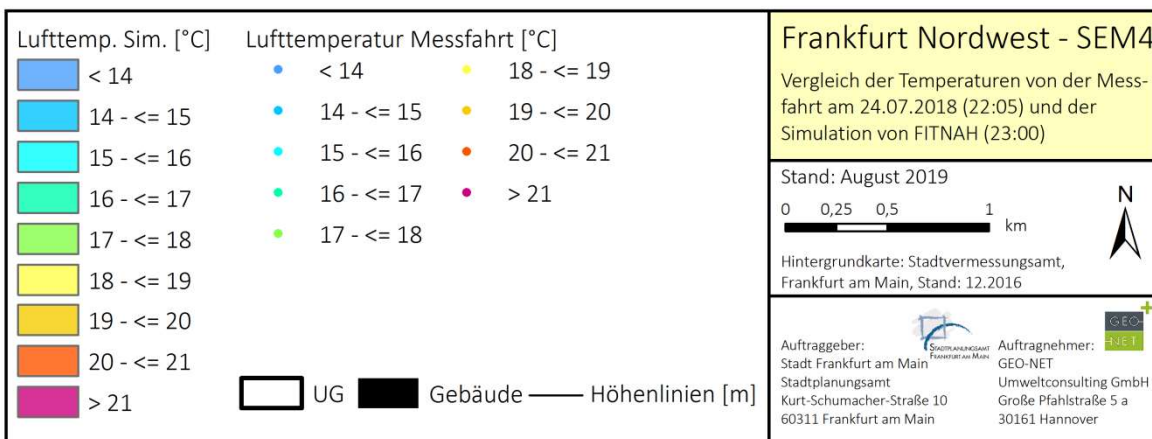
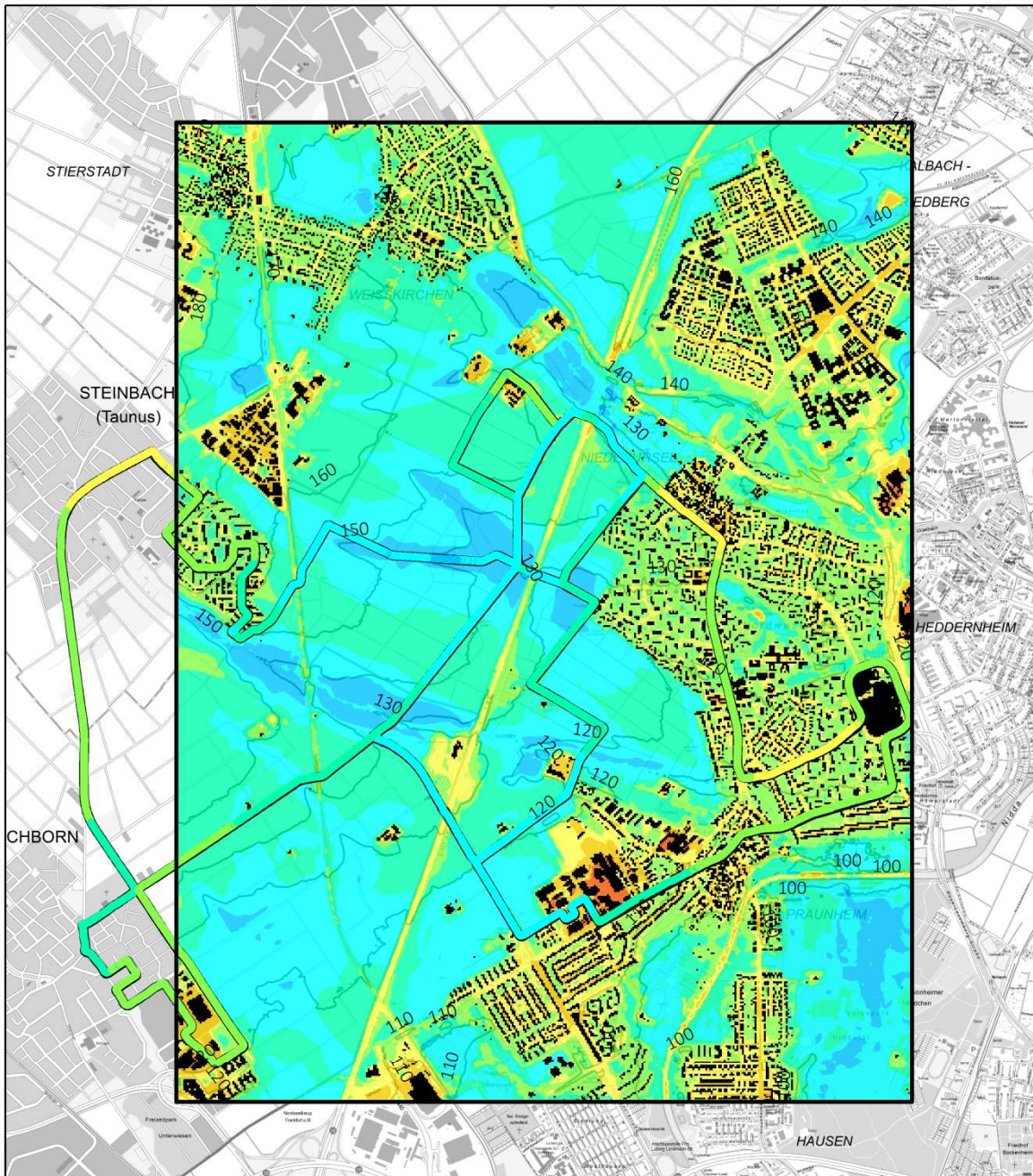
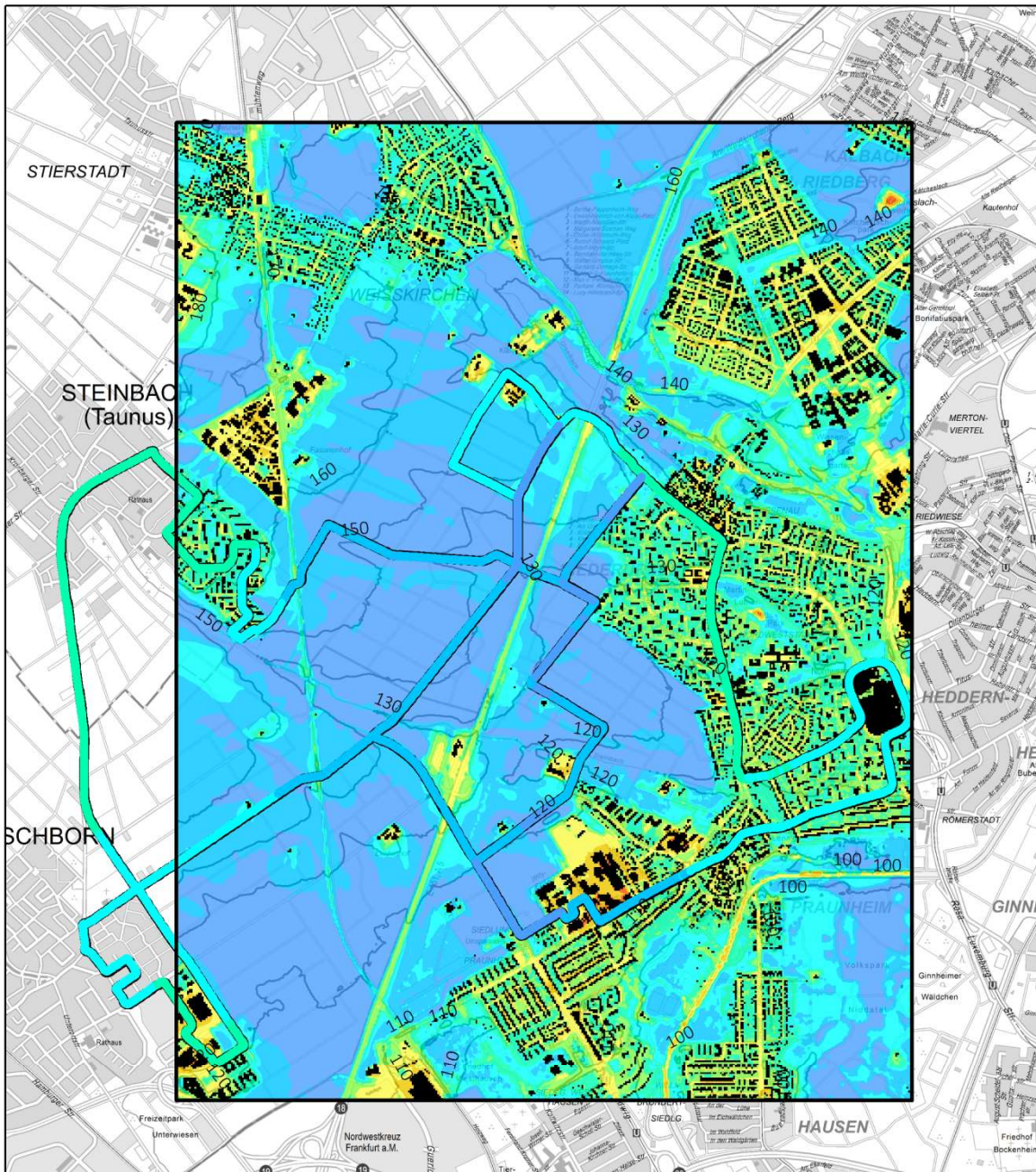


Abb. 5: Tagesgang der Lufttemperatur von urbaner und ruraler Messstation (06.08./07.08.2018).



Karte 4: Vergleich der Temperaturen zwischen der Messfahrt am 24.07.2018 (22:05) und der Modellierung von FITNAH (23:00).



<b>Lufttemp. Sim. [°C]</b> < 14 14 - <= 15 15 - <= 16 16 - <= 17 17 - <= 18 18 - <= 19 19 - <= 20 20 - <= 21 > 21		<b>Lufttemperatur Messfahrt [°C]</b> < 14 14 - <= 15 15 - <= 16 16 - <= 17 17 - <= 18 18 - <= 19 19 - <= 20 20 - <= 21 > 21		<b>Frankfurt Nordwest - SEM4</b> Vergleich der Temperaturen von der Messfahrt am 25.07.2018 (03:25) und der Simulation von FITNAH (04:00) Stand: August 2019 0 0,25 0,5 1 km Hintergrundkarte: Stadtvermessungsamt, Frankfurt am Main, Stand: 12.2016
UG    Gebäude    Höhenlinien [m]		Auftraggeber: Stadt Frankfurt am Main Stadtplanungsamt Kurt-Schumacher-Straße 10 60311 Frankfurt am Main		
		Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH Große Pfahlsstraße 5 a 30161 Hannover		

Karte 5: Vergleich der Temperaturen zwischen der Messfahrt vom 25.07.2018 (03:25) und der Modellierung von FITNAH (04:00).



## ZWISCHENFAZIT – NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

Insgesamt kann gegenwärtig die nächtliche Überwärmung der bestehenden Siedlungsflächen im direkten Umfeld der geplanten Siedlungserweiterungsfläche als gering bis mäßig eingeordnet werden. Dies ist, wie bereits vorangehend genannt, auf den starken Durchgrünungsgrad bzw. die verhältnismäßig poröse Bauweise des Frankfurter Nordwestens und der Nachbargemeinden zurückzuführen. Zusätzlich führen die Kaltluftvolumenströme aus dem Taunus-Vorland in Verbindung mit dem Wetterauwind insbesondere in der zweiten Nachthälfte an den Siedlungsrändern des Frankfurter Nordwestens zu einer lokal stärker ausgeprägten Abkühlung im Vergleich zu innenstadtnahen Gebieten mit ähnlicher Siedlungsstruktur.

Zusätzlich zeigt ein Vergleich zwischen den Mess- und Modellergebnissen, dass das Modell in der Lage ist, die Intensität des Wärmeinseleffekts hinreichend exakt nachzubilden.

### 4.3 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD UND KALTLUFTVOLUMENSTROMDICHTE

Lokalen Strömungssystemen wie Flurwinden oder Hangabwinden kommt eine besondere stadtklimatische Bedeutung zu. Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernisse, sodass die Durchlüftung der Stadtkörper zumeist erheblich herabgesetzt ist. Die Abfuhr überwärmter und schadstoffbelasteter Luftmassen aus den Straßenräumen kann daher deutlich eingeschränkt sein. Vor allem bei austauschschwachen Strahlungswetterlagen wirken sich diese Faktoren bioklimatisch ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr kühlerer und lufthygienisch unbelasteter Frischluft eine bedeutende klimaökologische Ausgleichsleistung für die belasteten Stadträume erbringen.

Weil die Ausgleichsleistung einer begrünten Freifläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der über sie hinweg strömenden Kaltluft resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil auch durch die Mächtigkeit der Strömung bestimmt wird, wird zur Bewertung der klimaökologischen Bedeutung einer Grünflächen die sogenannte **Kaltluftvolumenstromdichte** herangezogen. Sie beschreibt diejenige Menge an Kaltluft (in  $\text{m}^3$ ), die in jeder Sekunde durch den aktiven Strömungsquerschnitt beispielsweise einer Geländevertiefung (Rinne) oder eines Tals fließt.

Während des Abfließens können sich die Mächtigkeit und die Fließrichtung eines Kaltluftvolumenstroms ändern. Die sich letztendlich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz zwischen der vor Ort gebildeten Kaltluft und den sie umgebenden, wärmeren Luftmassen ab (und somit auch von der Stärke der Flurwinde), sowie vor allem auch von der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit. In der Regel nimmt die Mächtigkeit der Kaltluftschicht im Verlauf einer Nacht stetig zu und ist deshalb, wie allgemein bei Luftaustauschprozessen zu beobachten, meist erst in der zweiten Nachthälfte vollständig entwickelt.

Die Eindringtiefe der Kaltluft in den Siedlungskörper hängt folglich, neben der Größe und Dynamik der Strömung selbst, von der Lage des Siedlungskörpers im Raum bzw. von seiner orographischen Verknüpfung mit einem Strömungskorridor sowie insbesondere von der Porosität des Siedlungsrandes ab. Auch die anthropogene Wärmefreisetzung in der Siedlung hat Einfluss auf die Intensität der einströmenden Kaltluft.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellierung des (bodennahen) Strömungsfelds und der Kaltluftvolumenstromdichte dargestellt. Zudem werden die Modellergebnisse mit den Messungen der Windgeschwindigkeit an den beiden stationären Messstation verglichen. Zusätzlich werden die Erkenntnisse aus den Rauchschwadenversuchen zusammen mit den Modellergebnissen analysiert, um die Entwicklung der Kaltluftmächtigkeit im Verlauf der Nachtstunden ableiten zu können.



## KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

Die Kaltluftströmungen, insbesondere von den Hängen und in den Tiefenlinien des angrenzenden Taunus-Vorlandes, sind der wesentlichste Parameter zur Beurteilung des Kaltlufthaushaltes im Frankfurter Nordwesten. Kennzeichnend für das Untersuchungsgebiet ist zudem, dass sich diese Komponente des örtlichen Luftaustauschprozesses mit Hilfe des zeitverzögerten Auftretens des Wetterauwinds erst in der zweiten Nachthälfte zur vollen Mächtigkeit entwickelt.

Die Karte 6 und 7 veranschaulichen das nächtliche Strömungsfeld während den beiden Analysezeitpunkten 23:00 Uhr und 04:00 Uhr. Die dargestellten Windrichtungspfeile beschreiben daher sowohl die Fließrichtung der vor Ort produzierten oder von Nordwesten in das Untersuchungsgebiet hineinströmenden Kaltluft als auch die Einwirkungen des ab der zweiten Nachthälfte aus Nordosten zuströmenden Wetterauwinds. Während in der ersten Nachthälfte die bodennahen (Kalt-)Luftströmungen im Untersuchungsgebiet hauptsächlich aus Nordwesten und so gemäß der allgemeinen Abdachung des Taunus-Vorlandes folgend, nach Südsüdost bzw. Südost strömt (Karte 6), drehen sich die bodennahen Strömungen in der zweiten Nachthälfte vor allem am nördlichen Rand des Untersuchungsgebiets auf Süd bis Südwest (Karte 7). Im weiteren Verlauf wird bereits die strömungsbeeinflussende Wirkung der beiden Siedlungskörper von Oberursel-Weißkirchen im Westen und des Riedberg-Quartiers im Osten erkennbar, wodurch eine Ablenkung des bodennahen Strömungsgeschehens in eher südliche Richtungen erfolgt. Im Geltungsbereich der SEM 4 setzt sich die Dominanz der nach Süden gerichteten Fließrichtungen fort. Sie ist vor allem auf den höher gelegenen Landschaftsbereichen am westlichen Rand des Geltungsbereichs der SEM 4 zu beobachten, während in den das Gebiet durchquerenden Tiefenlinien (Steinbach, Urselbach, etc.) immer noch die bereits aus der ersten Nachthälfte (ohne Wetterauwind-Einfluss) zu erkennende Strömungsrichtung nach Südost anhält.

Es fällt auf, dass auch unter dem Einfluss des Wetterauwinds selbst auf den exponiert liegenden Freiflächen keine ausgeprägte Südwestorientierung des Strömungsbildes erkennbar ist. Nur am westlichen Rand des Untersuchungsgebiets, Richtung Eschborn, lässt sich dies verstärkt beobachten. Offensichtlich ist der Wetterauwind nicht überall in der Lage, die bodennah nach Südosten abfließenden Kaltluftmassen aus dem Taunus-Vorland gemäß seiner Strömungsrichtung nach Südwesten umzulenken. Seine Kraft reicht am Boden lediglich zu einer Umlenkung nach Süden. In den höheren Luftschichten hingegen bestimmt er eindeutig die Windrichtung, wie sich aus den Richtungsaufzeichnungen an der ruralen Mess-Stelle (in 10 Meter Höhe) erkennen lässt (s. Abb. 5). Hier dominieren in der zweiten Nachthälfte nördliche beziehungsweise nordöstliche Winde.

Ferner ist anhand der auf der Freifläche südlich der Nordweststadt ausgeprägten Südostströmung (außerhalb der Tiefenlinien) erkennbar, dass offensichtlich die Nordweststadt einen Lee-Effekt gegenüber dem Wetterauwind erzeugt. Dadurch wird der Wetterauwind über das bodennahe Kaltluftströmungsfeld hinweg gelenkt, so dass das Strömungsgeschehen am Boden weiterhin von der auf breiter Front über die landwirtschaftlichen Flächen nach Südosten abfließenden Kaltluft bestimmt bleibt.

Die Dynamik des bodennahen Strömungsgeschehens wird zudem auch deutlich von den topographischen Begebenheiten im Untersuchungsgebiet beziehungsweise im Geltungsbereich bestimmt. So treten in der ersten Nachthälfte die höchsten Windgeschwindigkeiten im Umfeld der Y-förmigen Geländevertiefung westlich der BAB A 5, im Steinbachtal und auf der großflächigen Abdachungsrampe östlich von Eschborn auf. Die Autobahntrasse erzeugt offensichtlich keine signifikante Strömungsbeeinträchtigung.

Während der zweiten Nachthälfte zeigt sich allgemein ein deutlich dynamischeres Strömungsgeschehen, das zum einen auf den nun immer stärker in Erscheinung tretenden Wetterauwind aber auch auf die größere Kaltluftmasse zurückzuführen ist. Die während der ersten Nachthälfte bestimmenden topographischen



Effekte treten daher zurück. Deshalb ist im Geltungsbereich fast überall das Strömungsgeschehen intensiviert, sogar im Lee der Nordweststadt, südlich des Paul-Kornfeld-Wegs.

Für den Geltungsbereich der SEM 4 wird für die erste Nachthälfte eine mittlere Windgeschwindigkeit von etwa 0,3 m/s errechnet (s. Karte 6). Mit einem Maximalwert von 1,1 m/s finden die intensivsten Windbewegungen in der zentral im Geltungsbereich der SEM 4 liegenden, Y-förmige Geländerinne westlich der A 5 statt. Durch den in der zweiten Nachthälfte (04:00 Uhr) vollständig ausgeprägten Wetterauwind steigt die mittlere Windgeschwindigkeit auf 0,6 m/s, mit einem Maximum von 2,1 m/s auf den höher gelegenen Freiflächen im Geltungsbereich der SEM 4.

Die auf **Niederursel** sowie die **Nordweststadt** zuströmende Kaltluft um 23:00 Uhr wird durch die jeweiligen Siedlungsränder zusätzlich in ihrer Richtung beeinflusst und entweder nach Osten (Niederursel) oder Süden (Nordweststadt) umgelenkt. Zugleich werden die zugeführten Kaltluftmassen durch die Siedlungsränder mit einer Gebäudekörperstellung entgegen der Strömungsrichtung und durch die hohe Baumdichte nahezu vollständig abgebremst. Lediglich für die Ortslage Niederursels wird ein dynamischeres Eindringen der über das Urselbachtal konzentrierter zugeführten Kaltluftströmung prognostiziert, obwohl die Siedlungsstruktur dort deutlich kompakter als in der Nordweststadt ist, wo die Gebäude zwar höher sind, zugleich aber auch die Abstände zwischen den Gebäuden wesentlich größer ausfallen. Dieser Effekt kann ein Indiz für ein zu grobes Modellraster sein. Dadurch könnte die Barrierewirkung des großvolumigeren Gebäudebestands in der Nordweststadt überhöht und gleichzeitig die strömungsfördernde Wirkung der großen Gebäudeabstände unterschätzt werden.

Innerhalb der Stadtteile fällt die errechnete Strömungsgeschwindigkeit überwiegend unter 0,1 m/s ab. Nur für das Umfeld des Martin-Luther-King Parks werden geringe Geschwindigkeitszunahmen berechnet, deren Ursache auf den thermischen Unterschied von Park zu angrenzender Siedlungsfläche zurückzuführen ist.

Die Siedlung **Praunheim** südlich der Heerstraße kann relativ gut von den über die nördlich vorgelagerten Ackerflächen zuströmenden Kaltluftmassen erreicht werden. Wegen der strömungsparallelen Ausrichtung der Baukörper westlich der Ludwig-Landmann-Straße wird dieser Teil Praunheims daher gut mit Kaltluft versorgt. Die Siedlungsfläche östlich der Ludwig-Landmann-Straße wiederum bildet dagegen ein ausgeprägteres Hindernis für die herangeführten Luftmassen, sodass für diesen Bereich Strömungsgeschwindigkeiten unter 0,1 m/s simuliert werden. Das Gewerbegebiet nördlich der Heerstraße ist, wie in der räumlichen Verteilung der Lufttemperatur ersichtlich wird (vgl. Karte 4), gemäß seiner Nutzung wärmer als die umliegenden Freiflächen, weshalb hier die Strömungsgeschwindigkeit aufgrund von thermisch bedingten Beschleunigungseffekten kleinräumig stark zunimmt und die Luftmassen zwischen den großen Hallengebäuden zusätzlich auch noch kanalisiert werden.

Für die Nachbargemeinden Steinbach und Oberursel-Weißkirchen wird ein ähnliches Bild der Kaltluftdynamik wie für die Frankfurter Stadtteile berechnet. Auch hier dringt die von Nordwesten zuströmende Kaltluft nur sehr schwach bis in die alten Ortskerne ein. Die größte Strömungsdynamik wird für den Freibereich zwischen Steinbach und seinem nördlich mit Versatz angeordneten Gewerbegebiet berechnet.

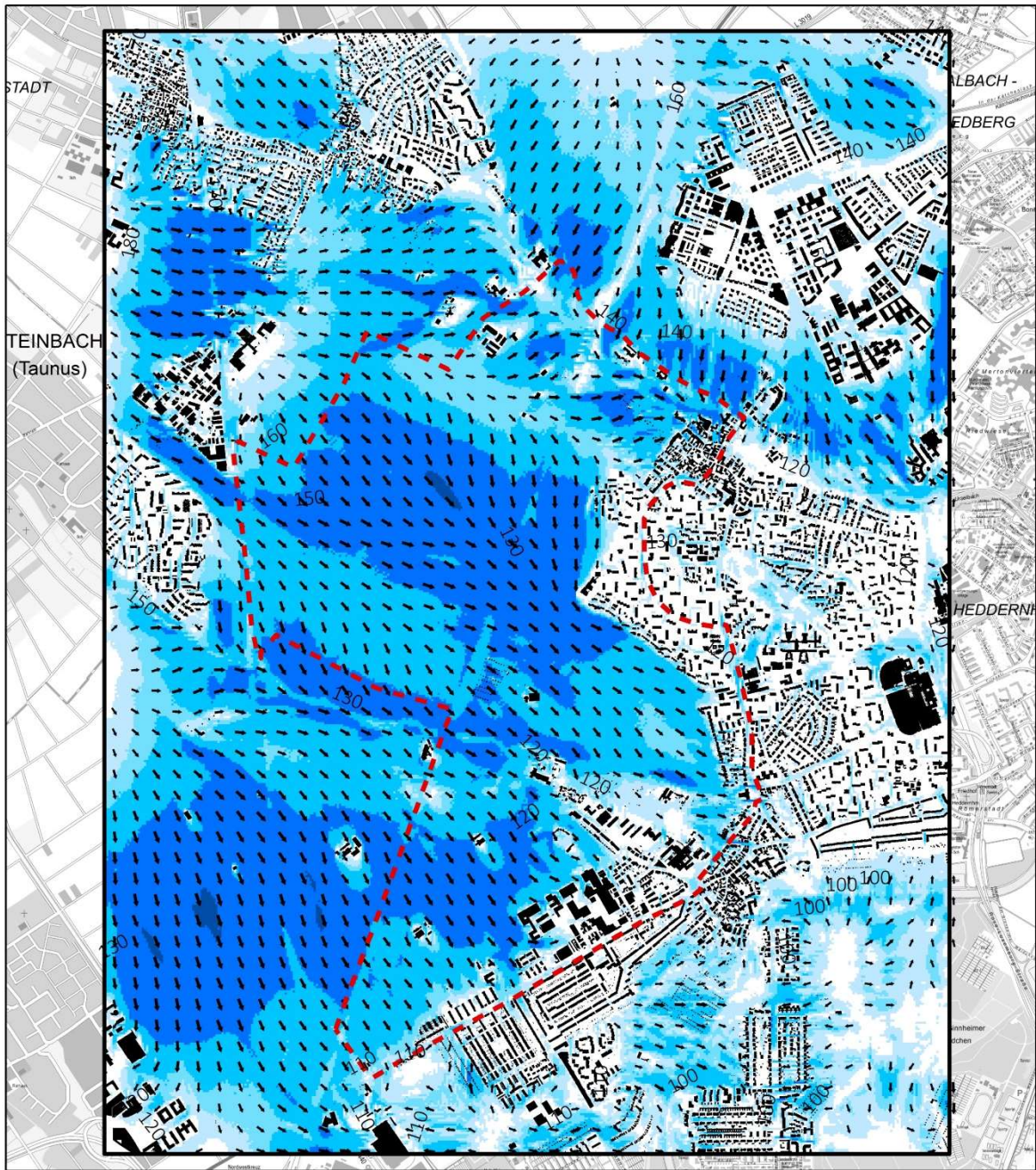
In der **zweiten Nachthälfte** wird das Strömungsgeschehen zunehmend von dem aus Nordosten einströmenden Wetterauwind bestimmt (Karte 7). Die Windgeschwindigkeiten steigen großflächig auf Werte über 1,0 m/s an. Dadurch kommt es auch in den Frankfurter Stadtteilen zu einer größeren Strömungsdynamik, als im Verlauf der ersten Nachthälfte. Ausgeprägter fallen diese in der Siedlung Praunheim westlich der Ludwig-Landmann-Straße aus, während für die Nordweststadt wiederum keine signifikanten Windgeschwindigkeitserhöhungen prognostiziert werden. Lediglich für den nördlichen Abschnitt des Gerhart-Hauptmann-Rings sowie für den südlichen Teil des Praunheimer Wegs sind Windgeschwindigkeitserhöhun-





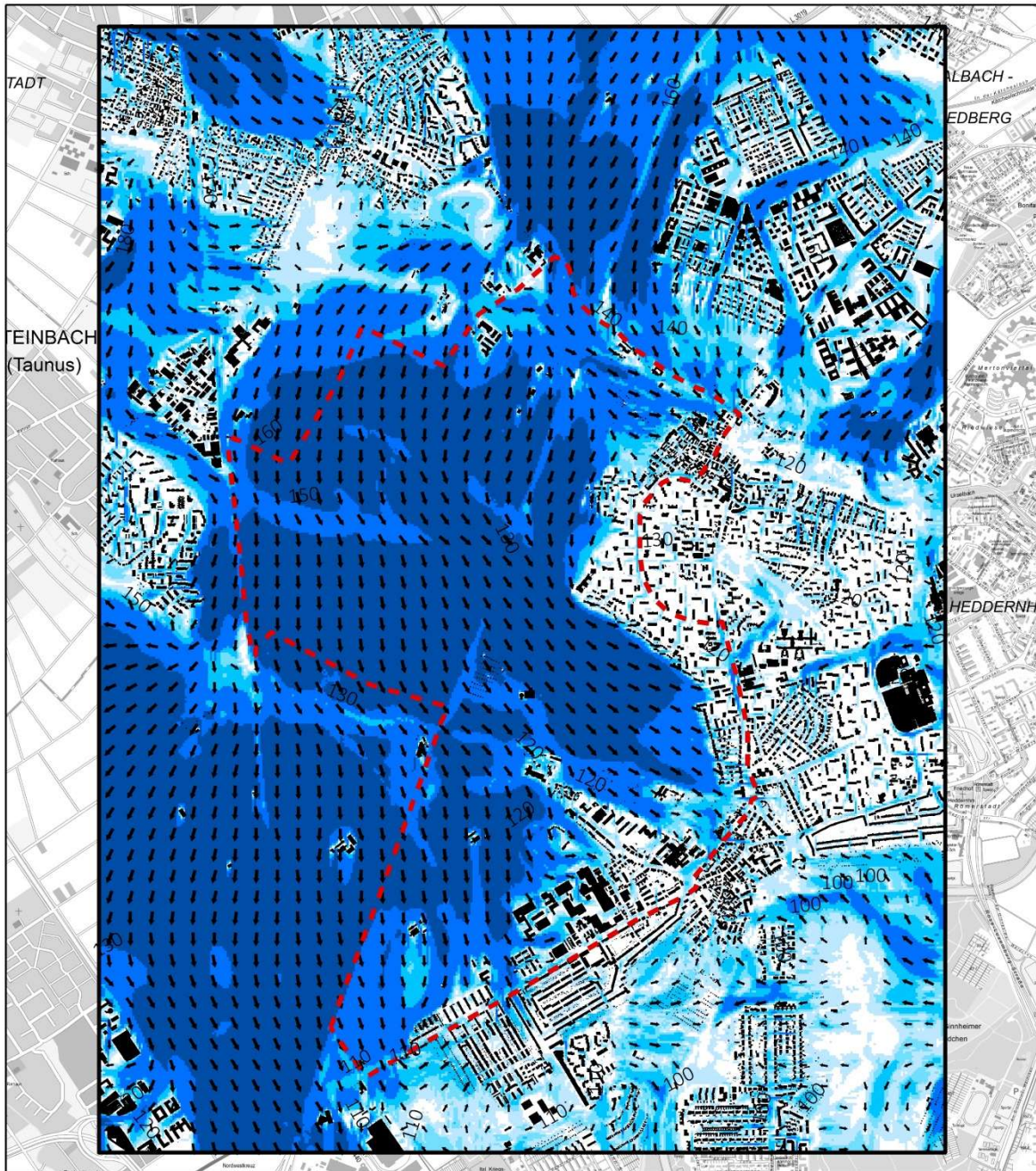
gen erkennbar. Auch in Praunheim sowie in den Nachbargemeinden Eschborn, Steinbach und Oberursel-Weißkirchen macht sich der Einfluss des Wetterauwindes durch eine Zunahme der Windgeschwindigkeit bemerkbar, die dann im Mittel auf bis zu 1,0 m/s ansteigt.

Insgesamt ist die gemäß der Windfeldmodellierungen zu erwartende bodennahe Winddynamik im Untersuchungsgebiet aufgrund des Einflusses der Hangabwinde aus dem Taunusvorland und der ergänzenden Beschleunigungswirkung des Wetterauwindes als günstig einzustufen.



<p>Windfeld 2 m ü. Grund [m/s]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: white;"></span> &lt;= 0,1</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: lightblue;"></span> &gt; 0,1 - 0,2</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: blue;"></span> &gt; 0,2 - 0,3</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: darkblue;"></span> &gt; 0,3 - 0,5</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: navy;"></span> &gt; 0,5 - 1,0</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: black;"></span> &gt; 1,0</li> </ul>		<p>Höhenlinien [m]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; border-bottom: 1px solid black;"></span></li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; border: 1px dashed red;"></span> Geltungsbereich SEM 4</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: black;"></span> Gebäude</li> </ul>	
<p><b>Frankfurt Nordwest - SEM4</b></p> <p>Nächtliches Kaltluftströmungsfeld in 2 m Höhe ü. Gr. nach der Simulation von FITNAH um 23:00 Uhr für eine austauscharme, sommerliche Hochdruckwetterlage</p>		<p>Stand: August 2019</p> <p>0 0,25 0,5 1 1,5 2 km</p> <p>Hintergrundkarte: Stadtvermessungsamt, Frankfurt am Main, Stand: 12.2016</p>	
<p>Auftraggeber: Stadt Frankfurt am Main Stadtplanungsamt Kurt-Schumacher-Straße 10 60311 Frankfurt am Main</p>		<p>Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH Große Pfahlstraße 5 a 30161 Hannover</p>	

Karte 6: Nächtliches Strömungsfeld um 23:00 Uhr für eine autochthone Wetterlage.



<p>Windfeld 2 m ü. Grund [m/s]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: white; margin-right: 5px;"></span> &lt;= 0,1</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: lightblue; margin-right: 5px;"></span> &gt; 0,1 - 0,2</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: mediumblue; margin-right: 5px;"></span> &gt; 0,2 - 0,3</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: cyan; margin-right: 5px;"></span> &gt; 0,3 - 0,5</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: blue; margin-right: 5px;"></span> &gt; 0,5 - 1,0</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: darkblue; margin-right: 5px;"></span> &gt; 1,0</li> </ul>		<p>Höhenlinien [m]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; border-bottom: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Höhenlinien [m]</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Untersuchungsgebiet</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; border-bottom: 2px dashed red; margin-right: 5px;"></span> Geltungsbereich SEM 4</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: black; margin-right: 5px;"></span> Gebäude</li> </ul>	
<h3>Frankfurt Nordwest - SEM4</h3> <p>Nächtliches Kaltluftströmungsfeld in 2 m Höhe ü. Gr. nach der Simulation von FITNAH um 04:00 Uhr für eine austauscharme, sommerliche Hochdruckwetterlage</p>			
<p>Stand: August 2019</p>			
<p>0 0,25 0,5 1 1,5 2 km</p>			
<p>Hintergrundkarte: Stadtvermessungsamt, Frankfurt am Main, Stand: 12.2016</p>			
<p>Auftraggeber: Stadt Frankfurt am Main Stadtplanungsamt Kurt-Schumacher-Straße 10 60311 Frankfurt am Main</p>		<p>Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH STADTPLANUNGSAMT, Große Pfahlstraße 5 a FRANKFURT AM MAIN 30161 Hannover</p>	

Karte 7: Nächtliches Strömungsfeld um 04:00 Uhr für eine autochthone Wetterlage.

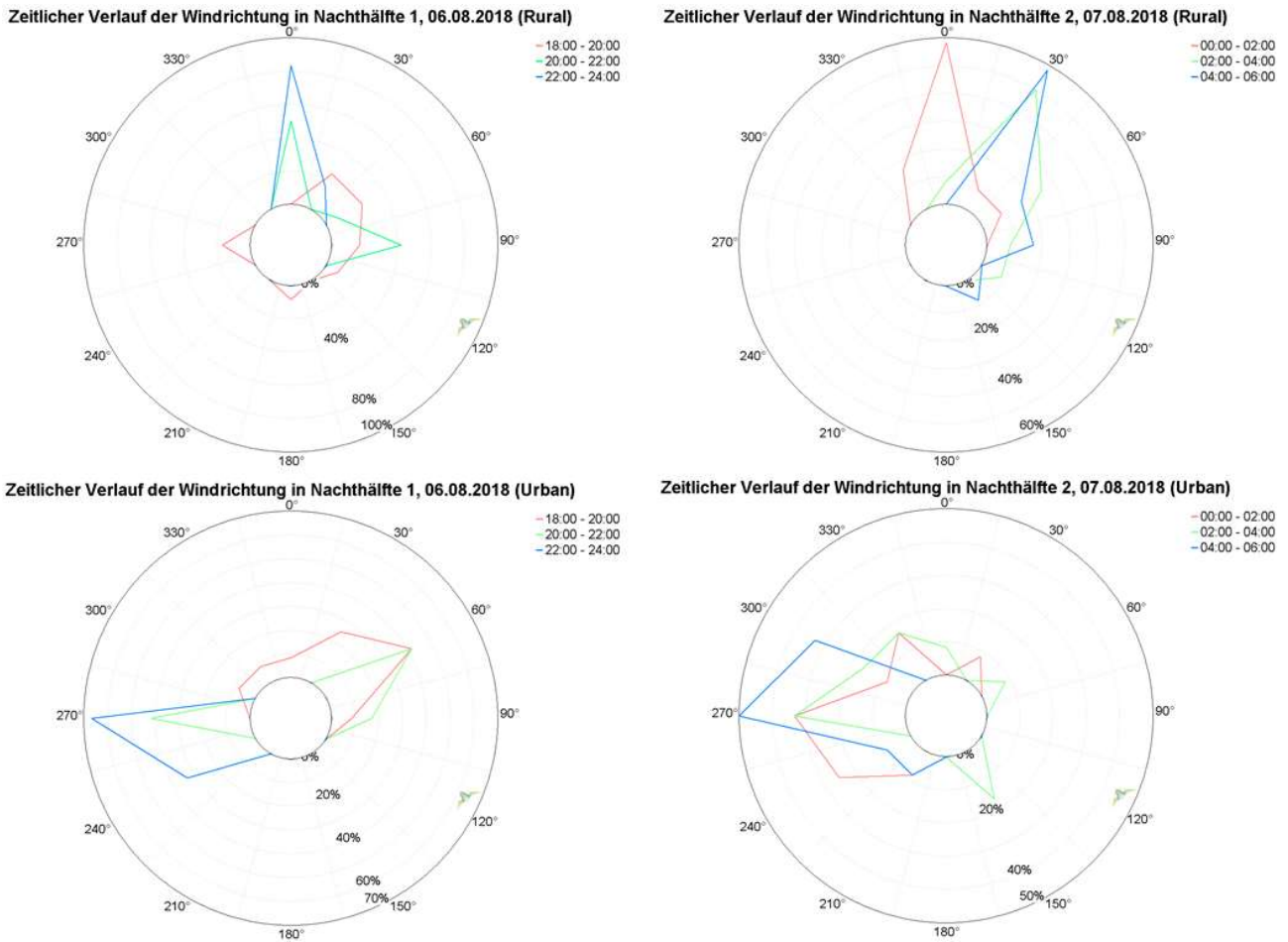


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf der prozentualen Verteilung der Windrichtung der ersten und zweiten Nachthälfte für den ruralen sowie den urbanen Standort.

### KALTLUFTVOLUMENSTROM

Die räumlichen Ausprägungen des Kaltluftvolumenstroms (vgl. Karte 8 und Karte 9) im Untersuchungsgebiet folgen im Wesentlichen der Struktur und der Dynamik des zuvor beschriebenen allgemeinen Strömungsfeldes. In Verbindung mit der hohen Kaltluftproduktivität der landwirtschaftlichen Freiflächen, die sowohl im Untersuchungsgebiet als auch im Geltungsbereich die vorherrschende Nutzungsart darstellen, errechnet sich daraus für den Kaltluftvolumenstrom eine räumliche Figur, die dem oben beschriebenen bodennahen Strömungsfeld weitestgehend entspricht.

Deshalb weisen um 23:00 Uhr die Kaltluftvolumenströme im Geltungsbereich der SEM 4 vor allem in den Tiefenlinien die höchsten Werte auf, während sie um 04:00 Uhr, unter Einfluss des Wetterauwindes, insbesondere über den westlichen Ackerflächen ausgeprägt sind, wo aufgrund der leichteren Zugänglichkeit die dynamischer auftretende Regionalströmung zugleich auch den Kaltluftvolumenstrom intensiviert.

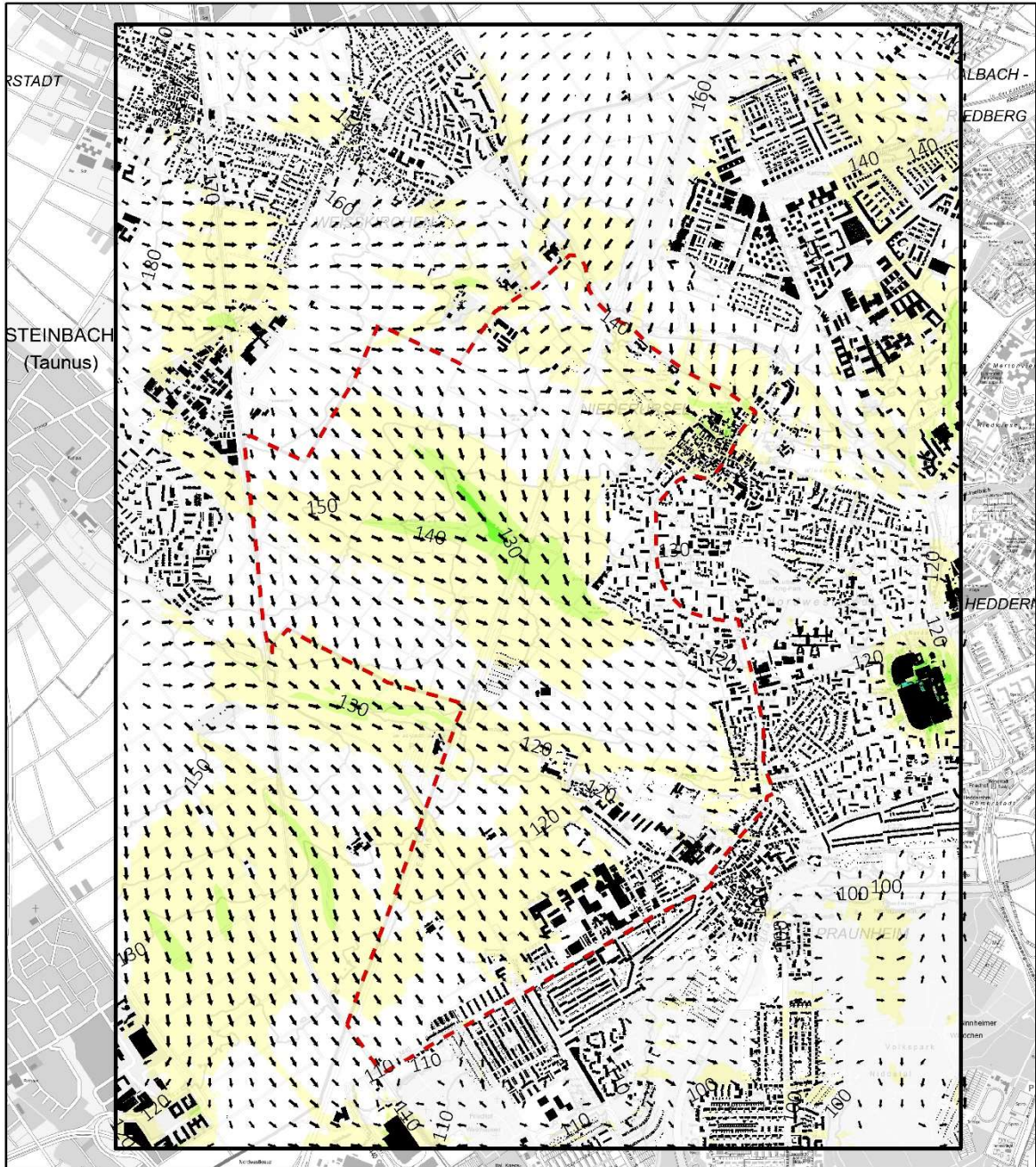
In der **ersten Nachthälfte** lassen sich wichtige planungsrelevante Kaltluftleitsysteme ausmachen: So ist vor allem entlang des Steinbach- und Urselbachtals sowie im Bereich der Y-förmigen Geländeerinne westlich der Autobahn ein für die erste Nachthälfte stark ausgeprägtes Kaltluftprozessgeschehen zu erkennen. In diesen Tiefenlinien sammelt sich die Kaltluft. Sie fließt zusammen mit den aus den höher liegenden Bereichen des Taunus-Vorlands kommenden Hangabwinden in Richtung des nordwestlichen Frankfurter Stadtrands ab. Die Kaltluftzufuhr über das Steinbachtal wirkt vor allem im Bereich der Steinbacher Hohl und des südlichen Praunheimer Wegs. Die Wirkung der Kaltluft des Urselbachtals reicht bis weit nach Niederursel hinein. Die Geländeerinne westlich der Autobahn führt dem Siedlungsbereich am Paul-Kornfeld-Weg zusätzlich Kaltluft



zu. Aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung und der Bäume kann die Kaltluft jedoch nur beschränkt in die Nordweststadt und den nördlichen Bereich Praunheims eindringen. Die Eindringtiefe für die erste Nachthälfte ist in der Klimaanalysekarte dargestellt (s. Karte 11). Es ist nicht auszuschließen, dass durch eine zu grobe Rasterauflösung an dieser Stelle, wie bereits erläutert, die Barrierewirkung der Bebauung zu hoch eingestuft wird.

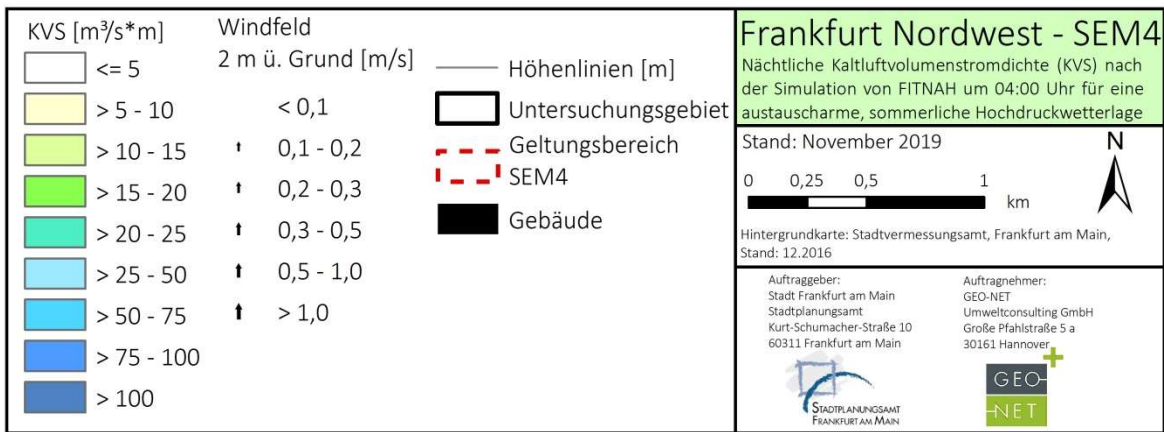
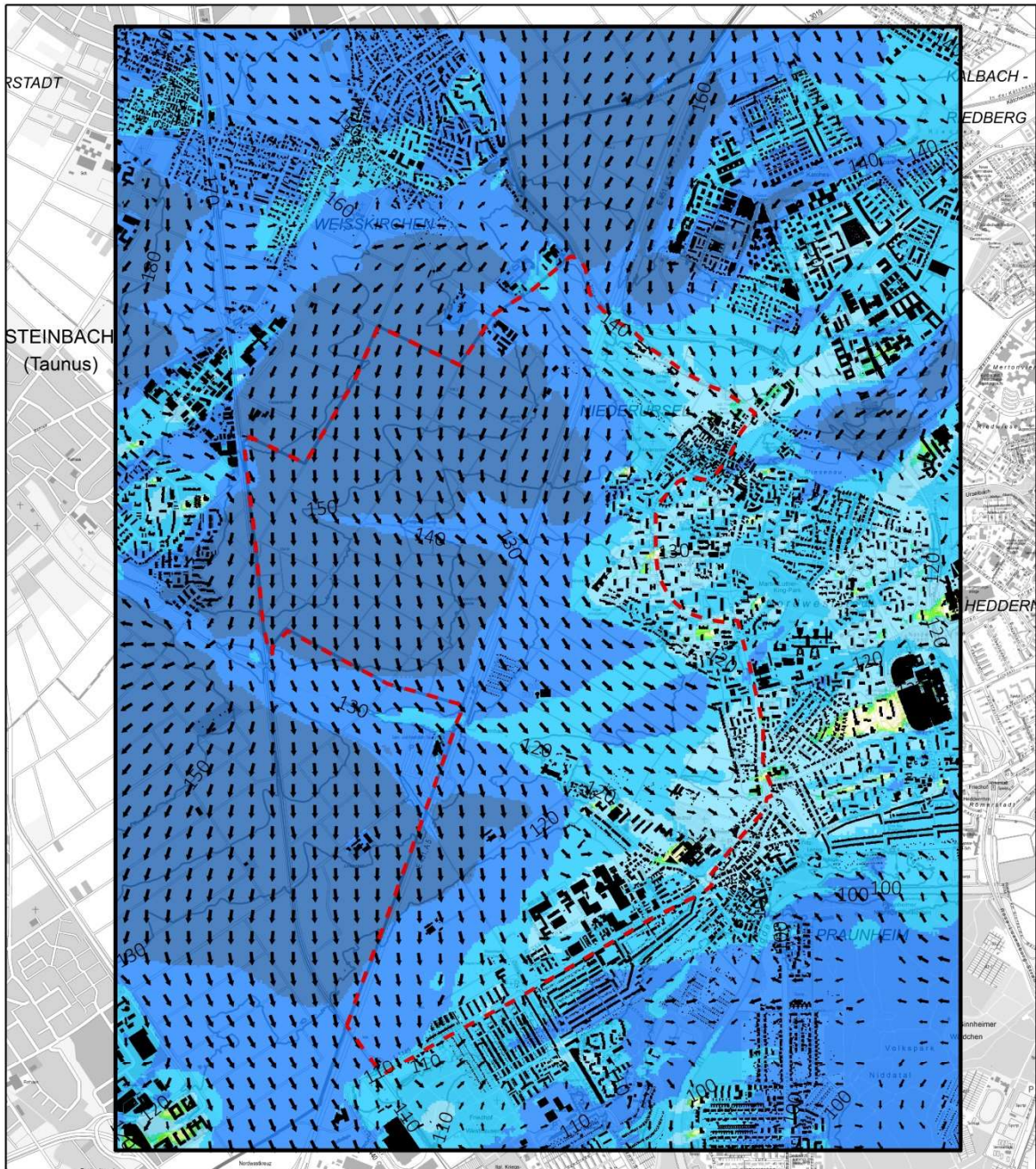
In der **zweiten Nachthälfte** kommt die bodennahe Windströmung aufgrund des Einflusses des Wetterauwindes vor allem über den exponierter gelegenen Freiflächen des Untersuchungsgebiets aus nördlich bis nordöstlichen Richtungen, wodurch zugleich auch das Kaltluftprozessgeschehen intensiviert wird. In den tiefergelegenen Talbereichen zeigt sich hingegen der richtungsbestimmende Einfluss des Wetterauwindes weniger deutlich. Hier sind nach wie vor hauptsächlich nach Südosten ausgerichtete Strömungen, entsprechend der Talrichtung, dominierend. Offensichtlich reicht die Wirkung des Wetterauwindes in den engeren und zugleich quer zu seiner Hauptströmungsrichtung verlaufenden Taunustäler nicht überall bis auf die Geländeoberfläche herab. Er überströmt diese Abflussrinnen ohne der darin abfließenden Kaltluft seine Richtung aufzuprägen.

Alle untersuchten Stadtteile im Frankfurter Nordwesten werden in der zweiten Nachthälfte stärker mit Kaltluft durchströmt. Auch die Nordweststadt und Praunheim sowie die Nachbargemeinden profitieren von der Änderung der Strömungsrichtung und der allgemeinen Strömungsgeschwindigkeit und werden zum Analysezeitpunkt 04:00 Uhr von einem größeren Kaltluftvolumenstrom durchströmt. Allgemein bestätigt sich anhand der für die zweite Nachthälfte für nahezu alle Siedlungskörper des Untersuchungsgebiets berechneten Kaltluftvolumenströme, dass die durch den Wetterauwind unterstützte Kaltluftzufuhr wesentlich weniger durch bauliche Strukturen beeinträchtigt wird, als die in der ersten Nachthälfte auftretenden Hang- und Talabwinde des Taunus-Vorlandes. Für die Ableitung von Planungshinweisen für die SEM 4 sind daher die Eigenschaften und Ausprägungen der während der ersten Nachthälfte aus dem Geltungsbereich selbst und dem angrenzenden Taunus-Vorland auftretenden Kaltluftströme wesentlich.



<p><b>KVS [m<sup>3</sup>/s*m]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: white; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> &lt;= 5</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> &gt; 5 - 10</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightgreen; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> &gt; 10 - 15</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: green; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> &gt; 15 - 20</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: cyan; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> &gt; 20 - 25</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightblue; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> &gt; 25 - 50</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: blue; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> &gt; 50 - 75</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: darkblue; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> &gt; 75 - 100</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: navy; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> &gt; 100</li> </ul>	<p><b>Windfeld</b> 2 m ü. Grund [m/s]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>&lt; 0,1</li> <li>↑ 0,1 - 0,2</li> <li>↑ 0,2 - 0,3</li> <li>↑ 0,3 - 0,5</li> <li>↑ 0,5 - 1,0</li> <li>↑ &gt; 1,0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; border-bottom: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Höhenlinien [m]</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border: 2px solid black; margin-right: 5px;"></span> Untersuchungsgebiet</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; border-bottom: 2px dashed red; margin-right: 5px;"></span> Geltungsbereich SEM4</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: black; margin-right: 5px;"></span> Gebäude</li> </ul>	<p><b>Frankfurt Nordwest - SEM4</b> Nächtliche Kaltluftvolumenstromdichte (KVS) nach der Simulation von FITNAH um 23:00 Uhr für eine austauscharme, sommerliche Hochdruckwetterlage</p> <p>Stand: November 2019</p> <p>0 0,25 0,5 1 km</p> <p>Hintergrundkarte: Stadtvermessungsamt, Frankfurt am Main, Stand: 12.2016</p> <p>Auftraggeber: Stadt Frankfurt am Main Stadtplanungsamt Kurt-Schumacher-Straße 10 60311 Frankfurt am Main</p> <p>Auftragnehmer: GEO.NET Umweltconsulting GmbH Große Pfahlstraße 5 a 30161 Hannover</p> <p> </p>
--	--	--	--

Karte 8: Nächtliche Kaltluftvolumenstrom(-dichte) um 23:00 Uhr für eine autochthone Wetterlage.



Karte 9: Nächtliche Kaltluftvolumenstrom(-dichte) um 04:00 Uhr für eine autochthone Wetterlage.



## Feldversuche

Ergänzend zur numerischen Modellierung der räumlichen Verteilung der Kaltluftvolumenströme im Untersuchungsgebiet wurde mit Rauchschwadenversuchen und Vertikalsondierungen am 24.07.2018 von 19:00 Uhr und 21:00 Uhr die Kaltluftentwicklung in den bodennahen Schichten untersucht. Die Feldversuche wurden auf den Ackerflächen im Geltungsbereich der SEM 4 südöstlich der Turn- und Sportgemeinde Nordwest 1898 Frankfurt/M. e.V. und nördlich des Steinbaches durchgeführt (s. Abb. A 2).

Abb. 7 zeigt die Entwicklung der Temperaturschichtung in den ersten 100 m Höhe über dem Messpunkt der Vertikalsondierungen. Es ist ersichtlich, dass um 19:00 Uhr die Temperatur mit der Höhe abnimmt. Da der Temperaturgradient zwischen dem Boden und den höheren Luftschichten mit ca. 2 K bis 100 m gering ist, entwickelt sich eine vergleichsweise schwache vertikale Strömung. Bodennahe Turbulenz führt zusätzlich dazu, dass sich eine gut durchmischte bodennahe Luftschicht ausprägt. Dies ist an der gleichmäßigen vertikalen Rauchverteilung gut zu erkennen (s. Abb. A 5). Kurz vor Sonnenuntergang gegen 21 Uhr entsteht bereits erste Kaltluft über den Feldern (s. Abb. 7). Diese ist schwerer als die wärmere Umgebungsluft. Sie fließt daher in Richtung des tiefer gelegenen Steinbachtals nach Süd-Südwest ab. Die Höhe der am Messpunkt entstehenden Kaltluftschicht kann zu dieser Zeit auf etwa 5 m – 10 m geschätzt werden, da ab dieser Höhe die Temperatur nur noch in sehr geringem Maße zunimmt. In der Bildfolge Abb. A 6 im Anhang wird erkennbar, dass sich die Luft zunächst durch Turbulenz gleichförmig verteilt und anschließend beim Überqueren der Senke durch die darin stehende Kaltluft angehoben wird.

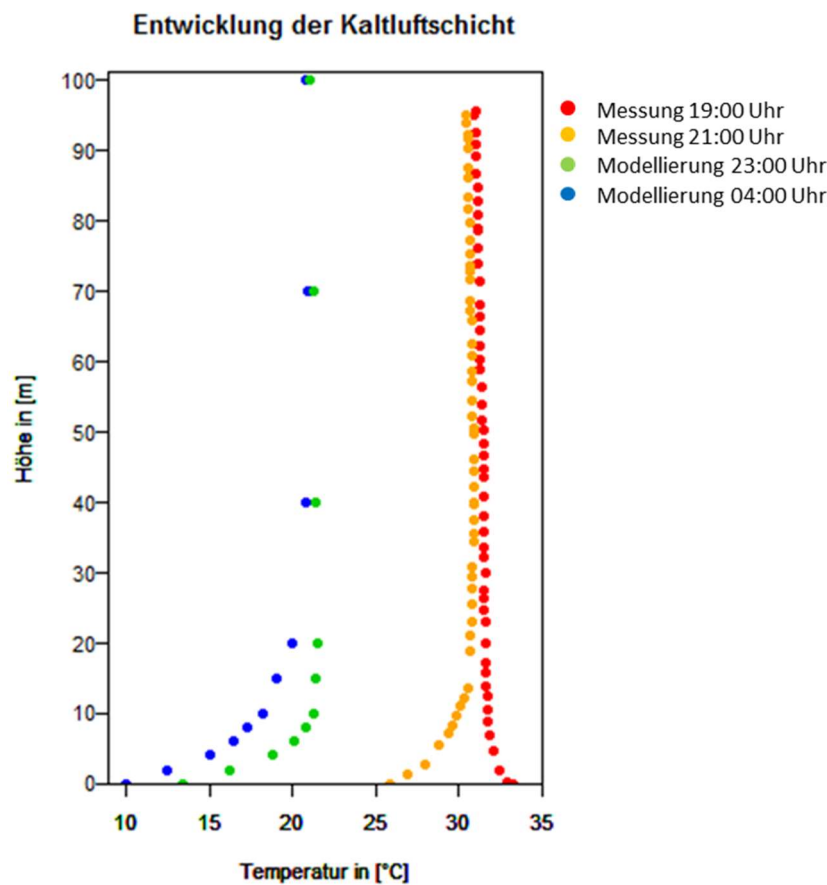


Abb. 7: Temperaturprofile der Vertikalsondierungen (19:00 Uhr und 21:00 Uhr) und der Modellierung (23:00 Uhr und 04:00 Uhr) am Punkt der Vertikalsondierungen.





Eine Luftschicht, deren Temperatur mit der Höhe ansteigt, wird als Inversionsschicht oder stabile Schichtung bezeichnet. Da sich oberhalb des betrachteten, durch Rauch kenntlich gemachten Luftpaketes wärmere Luft befindet, wird dieses am weiteren Aufsteigen gehindert.

Im weiteren Verlauf der Nacht nimmt die Höhe der Kaltluftschicht weiter zu, bis sie über 23:00 Uhr mit circa 15 m Höhe um 04:00 Uhr zu ihrer maximalen Ausdehnung von etwa 25 m angewachsen ist. Diese Ausprägung der Kaltluftschicht bestätigt ebenfalls die planerische Relevanz des Kaltluftgeschehens während der ersten Nachthälfte. Denn die in diesem Zeitabschnitt entwickelte Mächtigkeit der Kaltluftschicht reicht nicht aus, um selbst niedrigere Gebäude zu überströmen. Neue Siedlungsstrukturen könnten deshalb einen Kaltluftstrom zum Erliegen bringen oder ihn in andere Bereiche umlenken, so dass er in den bisher versorgten Bestandsgebieten ausfällt.

### FAZIT KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD UND KALTLUFTVOLUMENSTROM

Die Ergebnisse der Untersuchung des Kaltluftströmungsfeldes zeigen die Drehung der aus Nordwest einströmenden Taunusabwinde in der ersten Nachthälfte auf eine überwiegend nach Süden, teils auch nach Südwesten orientierte Richtung, ausgelöst durch den Wetterauswind in der zweiten Nachthälfte. Zum Analysezeitpunkt 23:00 Uhr werden Niederursel und Praunheim verhältnismäßig gut durchlüftet, wohingegen die Bebauung der Nordweststadt die Strömung bei Eintritt in den Siedlungskörper stark abbremst. Dies könnte auch in der Wahl einer zu groben Rasterauflösung bedingt sein. Durch die Rasterauflösung von 10 m könnte die Hinderniswirkung der Gebäude für die Strömung am Siedlungsrand der Nordweststadt als zu hoch bewertet worden sein. In den Nachbargemeinden Steinbach, Oberursel-Weißkirchen und Eschborn ist ebenso wie in Niederursel und der Nordweststadt eine Blockierung der Strömung durch den Siedlungskörper erkennbar.

In der zweiten Nachthälfte ist aufgrund des Einflusses des Wetterauswindes eine allgemeine Intensivierung des bodennahen Strömungsgeschehens zu erkennen. Somit sind moderate Strömungsgeschwindigkeiten selbst in der während der ersten Nachthälfte kaum durchströmten Nordweststadt und in Niederursel sowie in den erfassten Nachbargemeinden zu verzeichnen.

Durch das Strömungsgeschehen beeinflusst, lassen sich in der ersten Nachthälfte drei wichtige Kaltluftkorridore entlang des Ursel- und Steinbachtals sowie der zentral im Geltungsbereich der SEM 4 liegenden Y-förmigen Geländeerinne westlich der A 5 identifizieren. Diese Systeme tragen Kaltluft weit in die betrachteten Frankfurter Siedlungsbereiche im Nordwesten hinein.

In der zweiten Nachthälfte profitieren alle Siedlungsflächen im Untersuchungsgebiet von der Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit infolge des Wetterauswindes und somit von dem effektiveren Kaltluftvolumentransport. Die Ergebnisse zeigen die Wichtigkeit einer auf die klimaökologischen Verhältnisse während der ersten Nachthälfte gestützten Analyse für die Ableitung von Planungshinweisen an, da der mächtigere Wetterauswind weniger auf Siedlungserweiterungen als die geringmächtigeren Taunusabwinde reagiert.

## 4.4 THERMISCHE BELASTUNG AM TAG

### ALLGEMEINES

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das thermische Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung der Wärmebelastung werden verschiedene Indizes (Kenngrößen) verwendet, die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so



die Wärmebelastung eines Menschen realitätsgetreuer beschreiben. Beispiele für solche Kenngrößen sind der PMV-Wert (*Predicted Mean Vote*) und der UTCI (*Universal Thermal Climate Index*).

In der vorliegenden klimaökologischen Untersuchung wird zur Bewertung der bioklimatischen Verhältnisse während des Tages der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (*Physiologisch Äquivalente Temperatur*; vgl. Höppe und Mayer 1987. Da die PET in besonderem Maße von der Strahlungstemperatur (Kuttler 1999) beeinflusst wird, ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien am Tage geeignet. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifiziert (z.B. *starke Wärmebelastung* ab PET 35 °C; vgl. Tab. A 1; VDI 2004).

## ERGEBNISSE

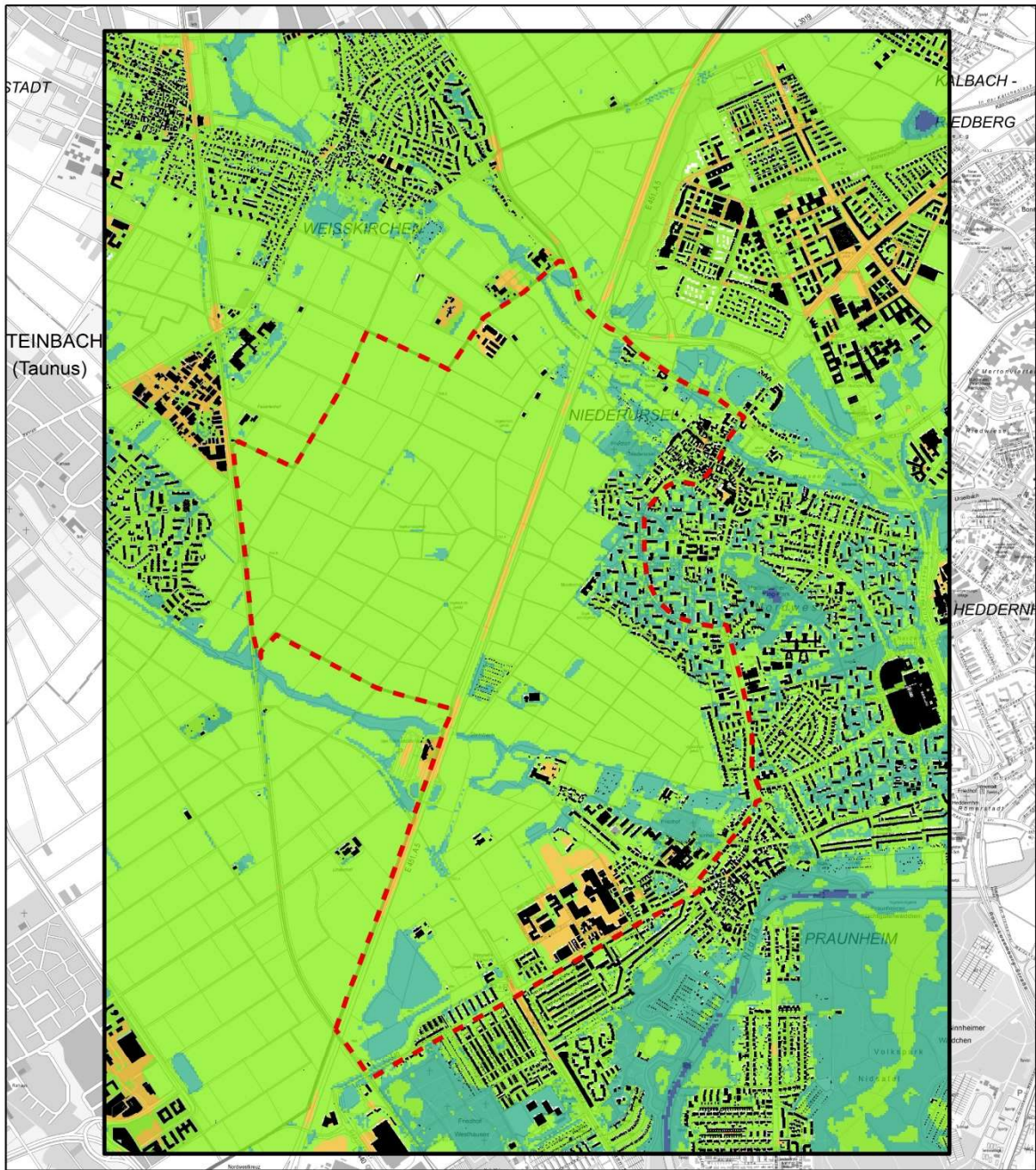
Karte 10 zeigt, dass auf den großräumigen freien Ackerflächen im Mittel ein PET-Wert von über 29 °C auftritt und dort somit eine mäßige Wärmebelastung anzutreffen ist. PET-Werte  $\leq 23$  °C (keine Wärmebelastung) stellen eine Ausnahme dar und sind einzig über Gewässern zu finden, die tagsüber eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung haben (siehe Regenrückhaltebecken/Teich im Kätcheslachpark). Als Flächen mit einer *schwachen Wärmebelastung* (PET  $\leq 29$  °C) stellen sich die im Geltungsbereich der SEM 4 und darüber hinaus vorhandenen größeren Gehölzbereiche dar, weil die direkte Sonneneinstrahlung durch belaubte Bäume gedämpft wird. Laubbäume, möglichst mit geschlossenem Kronenraum, stellen deshalb ein sehr effektives Mittel zur Verbesserung des thermischen Wohlbefindens im Freien (Straßen, Plätze, etc.) dar.

Werte unter 22°C sind im Untersuchungsgebiet nicht anzutreffen.

Die höchsten PET-Werte werden innerhalb der großflächig versiegelten Gewerbegebieten (z.B. Gewerbegebiet nördlich der Heerstraße) und teilweise in den Straßenräumen erreicht (mehr als 35 °C PET; *starke Wärmebelastung*). Innerhalb der Siedlungsgebiete Praunheims sowie Steinbachs und Oberursel-Weißkirchens herrscht derzeit größtenteils eine mäßige Wärmebelastung vor. Im Bereich der Berliner Straße in Steinbach sowie der Mauerfeldstraße in Oberursel-Weißkirchen ist eine großflächig hohe Baumdichte zu finden, weshalb die Wärmebelastung hier schwach ausgeprägt ist. Auch die stark durchgrünte Nordweststadt Frankfurts weist tagsüber meist eine schwache Wärmebelastung auf. Insgesamt ist das Maß der derzeitigen Wärmebelastung im Untersuchungsgebiet der klimaökologischen Untersuchung als gering einzustufen.

## ZWISCHENFAZIT PET

Die Wärmebelastung ist auf den Freiflächen sowie innerhalb der Wohnbebauung großflächig als mäßig einzuordnen. Die Gewerbegebiete Steinbachs und Praunheims weisen eine starke Wärmebelastung auf. Große Teile der Nordweststadt sowie Niederursels sind aufgrund ihres hohen Durchgrünungsgrades schwach wärmebelastet. Insgesamt ist das Maß der derzeitigen Wärmebelastung im Untersuchungsgebiet als gering einzustufen.



<b>PET</b> 2 m ü. Gr. [°C]		<b>Frankfurt Nordwest - SEM4</b> Wärmebelastung(PET) am Tage (14:00 Uhr) in 2 m Höhe ü. Gr. nach der Simulation von FITNAH 3D für eine austauscharme, sommerliche Hochdruckwetterlage	
≤ 23 keine Wärmebelastung	> 23 - 29 schwache Wärmebelastung	> 29 - 35 mäßige Wärmebelastung	> 35 - 41 starke Wärmebelastung
> 41 extreme Wärmebelastung	Stand: August 2019		
[Black Box] Untersuchungsgebiet [Red Dashed Box] Geltungsbereich SEM 4 [Black Box] Gebäude	0 0,25 0,5 1 1,5 2 km		
Hintergrundkarte: Stadtvermessungsamt, Frankfurt am Main, Stand: 12.2016			
Auftraggeber: Stadt Frankfurt am Main Stadtplanungsamt Kurt-Schumacher-Straße 10 60311 Frankfurt am Main		Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH Große Pfahlstraße 5 a 30161 Hannover	

Karte 10: Wärmebelastung am Tage um 14:00 Uhr nach der Simulation von FITNAH 3D für eine austauscharme, wolkenlose, sommerliche Hochdruckwetterlage.



## 4.5 KLIMAANALYSEKARTE

### VORGEHENSWEISE

Die Klimaanalysekarte<sup>6</sup> für die Nachtsituation um 23:00 Uhr (siehe Karte 11) bildet die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Luftaustausches im gesamten Untersuchungsraum ab (Strömungsfeld, Kaltluftleitbahnen). Für Siedlungs- und Gewerbeflächen stellt sie die nächtliche Überwärmung dar, basierend auf der bodennahen Lufttemperatur in einer autochthonen Sommernacht um 23:00 Uhr.

Die Taunusabwinde, welche in der ersten Nachthälfte vorrangig - neben den kleinräumig auftretenden **Flurwinden** - die Kaltluft an die Frankfurter Stadtgrenze herantragen, sind aufgrund ihrer geringeren vertikalen **Mächtigkeit** anfälliger für bebauungsbedingte Aufstauungen, Umlenkungen oder Blockierungen als der weitaus mächtigere Wetterauwind. Dieses Regionalwindssystem wird daher durch bestehende wie auch neue Siedlungsstrukturen insgesamt weniger stark beeinträchtigt. Es überströmt den gesamten Stadtkörper Frankfurts, wie Messungen z. B. im Bereich des Frankfurter Westhafens bestätigt haben. Die auf der Klimaanalysekarte (Karte 11) basierenden Planungshinweise, die in Kapitel 6 gegeben werden, sind somit in erster Linie auf die Aufrechterhaltung der Taunuswinde ausgerichtet. Ihre bevorzugte planerische Berücksichtigung ist nicht nur wegen ihrer störungsempfindlicheren Ausprägung erforderlich, sondern auch, weil sie bereits kurz nach Sonnenuntergang in Erscheinung treten können. Sie sind daher für die bioklimatisch gewünschte rasche Abkühlung des städtischen Siedlungsbereichs in der ersten Nachthälfte wichtiger als der Wetterauwind, der erst gegen Ende der ersten Nachthälfte verstärkt in Erscheinung tritt. Wegen dieser funktionalen und zeitlichen Eigenarten der Taunuswinde beschränken sich die folgenden Darstellungen der Klimaanalysekarte ausschließlich auf die Verhältnisse während der ersten Nachthälfte (23:00 Uhr). Im Vordergrund stehen dabei die Auswirkungen auf die bioklimatischen Verhältnisse in den nordwestlichen Frankfurter Stadtteilen Niederursel, Nordweststadt sowie Praunheim. Eine spezielle Fokussierung auf die stadtklimatischen Auswirkungen in den Frankfurter Nachbargemeinden im Westen ist hingegen nicht begründbar, da deren Kaltfluthaushalt durch eine Siedlungserweiterung innerhalb des Geltungsbereichs der SEM 4 nicht signifikant beeinflusst werden würde, weil die Nachbargemarkungen entweder hangaufwärts liegen (Steinbach, Oberursel) oder soweit abseitig, dass sie nicht mehr mit den Kaltluftströmungen des SEM 4-Gebiets korrespondieren.

### NÄCHTLICHE BIOKLIMATISCHE BELASTUNG INNERHALB DER SIEDLUNGSFLÄCHEN (WÄRMEINSELEFFEKT)

Das Ausmaß der nächtlichen Überwärmung definiert sich über den Temperaturunterschied zwischen den unversiegelten Freiflächen und den bebauten Bereichen im Untersuchungsgebiet. Die landwirtschaftlichen Freiflächen im Geltungsbereich der SEM 4 weisen unter den angenommenen Bedingungen eine mittlere Lufttemperatur von ca. 16,2 °C auf. Die Intensität des städtischen **Wärmeineffekts** ergibt sich somit aus der Abweichung von diesem Bezugswert.

Die mittlere nächtliche Lufttemperatur über allen Siedlungs- und Gewerbeflächen im Untersuchungsgebiet liegt bei etwa 17,9 °C. Wie der Karte 11 zu entnehmen ist, zeichnet sich ein Großteil dieser Flächen um 23:00 Uhr durch einen geringen Wärmeineffekt/Überwärmung aus (ca. 79 % der Flächen). Lediglich 19 % der Flächen weisen um 23:00 Uhr eine geringe bis mäßige Überwärmung zwischen 2 K und 3 K auf. Dies betrifft vor allem hoch versiegelte oder dicht bebaute Flächen wie den Großteil des Straßenraums im Frankfurter Nordwesten oder die Siedlungen südöstlich der Heerstraße in Praunheim. Nur 2 % der Flächen, vor allem Gewerbe- und Industriestandorte wie das Gewerbegebiet nördlich der Heerstraße in Praunheim weisen um 23:00 Uhr eine mäßige Überwärmung von mehr als 3 K und weniger als 4 K auf.

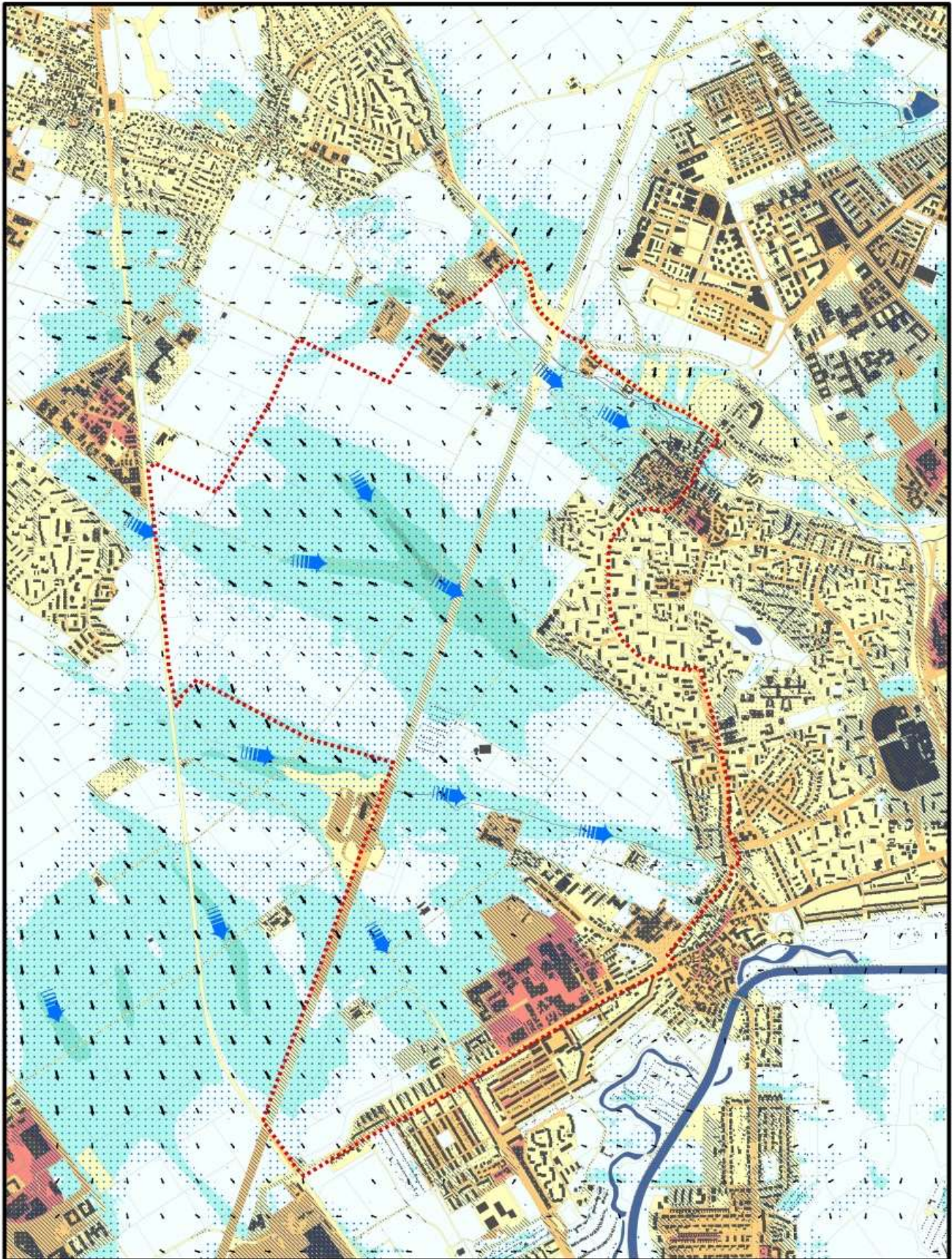
<sup>6</sup> Die Klimaanalysekarte ersetzt nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 die ehemalige synthetische Klimafunktionskarte (VDI 2014).



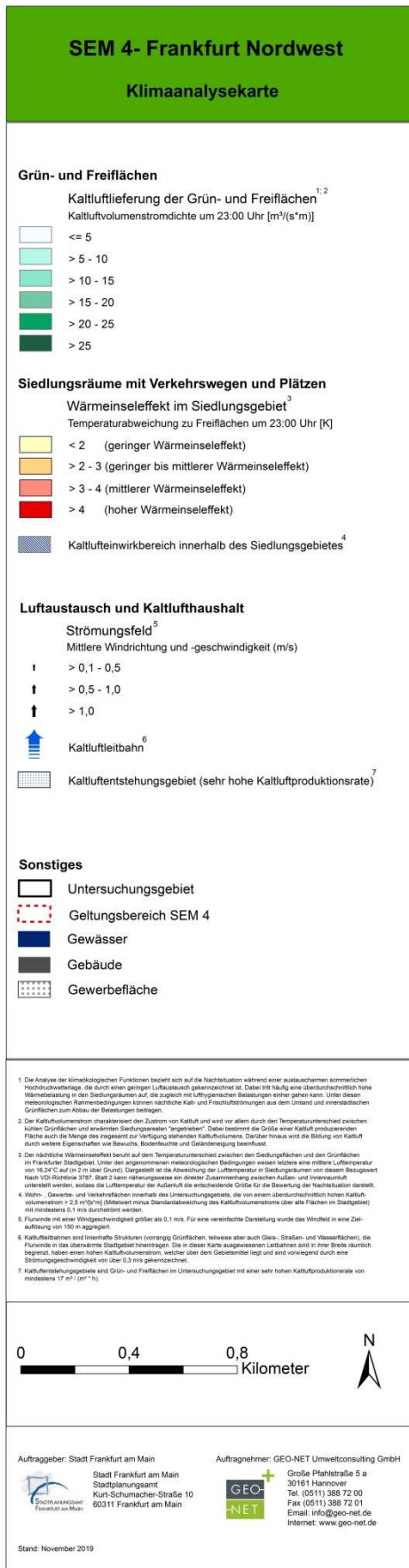
Anzumerken ist, dass während der zweiten Nachthälfte der Wärmeinseleffekt weiter zunimmt, da die offenen Freiflächen deutlich stärker abkühlen als die versiegelten und/oder dicht bebauten Siedlungsgebiete. Die maximale Ausprägung des Wärmeinseleffekts bzw. der maximale Temperaturunterschied zwischen bebauten und unbebauten Flächen wird somit erst um etwa 4 Uhr morgens erreicht. Gleichwohl liefert bereits der betrachtete frühe Analysezeitpunkt (23:00 Uhr) einen hinreichenden Eindruck von der vorherrschenden Überwärmung in den nordwestlichen Frankfurter Stadtgebieten.

Insgesamt können die Überwärmungstendenzen in Niederursel, der Nordweststadt sowie in Praunheim jedoch als eher gering eingestuft werden, da alle Stadtteile über eine geringe Bebauungsdichte verfügen und/oder, wie insbesondere die Nordweststadt, stark durchgrünt sind.

Der Vergleich der Klimaanalysekarte mit der Klimafunktionskarte des Klimaplanatlas (Stadt Frankfurt am Main 2016) zeigt ähnliche Charakteristika auf. Somit ordnen sich die Ergebnisse der vorliegenden klimaökologischen Stellungnahme in feinerer Auflösung in das Gesamtbild der bisherigen Untersuchungen ein.



Karte 11: Klimaanalysekarte für eine austauscharme, wolkenlose, sommerliche Hochdruckwetterlage auf Basis der simulierten Daten nach FITNAH 3D für 23:00 Uhr.



Karte 12: Legende der Klimaanalysekarte für eine austauscharme, wolkenlose, sommerliche Hochdruckwetterlage auf Basis der simulierten Daten nach FITNAH 3D für 23:00 Uhr.



## KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN ÜBER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

In der Klimaanalysekarte werden Grün- und Freiflächen hinsichtlich ihres Kaltluftliefervermögens charakterisiert. Als Kaltluft produzierende Bereiche gelten insbesondere unversiegelte Freiflächen (z.B. Ackerflächen) sowie durch aufgelockerten Vegetationsbestand geprägte Grünflächen wie z.B. Parkareale, Kleingärten und Friedhofsanlagen (sowohl innerhalb als auch außerhalb der Siedlungsräume). Auch Wälder können als Kaltluftentstehungsgebiete fungieren. Für die Charakterisierung und Bewertung der Ausgleichsleistung wird in der Klimaanalysekarte der Kaltluftvolumenstrom herangezogen.

In der Klimaanalysekarte wird das Prozessgeschehen des Kaltlufthaushalts dargestellt, d.h. der Kaltluftvolumenstrom wird in Form quantitativer Angaben in abgestufter Flächenfarbe abgebildet. Zudem werden über Grünflächen und Gewässern sowie Straßen- und Gleisflächen **Flurwinde** und **Hangabwinde** ab einer (als wirksam angesehenen) Windgeschwindigkeit von  $0,1 \text{ m s}^{-1}$  durch Pfeilsignatur in Hauptströmungsrichtung gezeigt, sofern sie eine bedeutende Rolle für das Kaltluftprozessgeschehen spielen.

**Kaltluftleitbahnen** verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Definition der Leitbahnen orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation. Als geeignete Oberflächenstrukturen innerhalb von Siedlungsräumen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung erleichtern, dienen sowohl gering bebaute, vegetationsgeprägte Freiflächen, Kleingärten und Friedhöfe als auch Gleisareale, Wasserflächen und breite Straßenräume. Innerhalb des Siedlungsbereichs zeigt sich die Kaltluftleitbahn häufig durch das tiefe Eindringen der Kaltluft in die Bebauung. Die Bereiche, die gut mit Kaltluft beliefert werden, sind in der Klimaanalysekarte als Kaltlufteinwirkungsbereich gekennzeichnet (s. nächsten Abschnitt).

Insgesamt sind im Untersuchungsgebiet drei Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftleitbahnbereiche nachweisbar, die aufgrund ihrer Lage und Charakteristika als besonders wichtig für die Durchlüftung des Gebiets gesehen werden. Diese sind das Urselbachtal im Norden, die zentral im Untersuchungsgebiet gelegenen Y-förmigen Tiefenlinien (Geländerinnen) innerhalb der Ackerflächen westlich der BAB A5 sowie das Steinbachtal im Süden. Wie zuvor beschrieben, wirken diese Hauptströmungskorridore der Kaltluft auf die bioklimatischen Verhältnisse im Siedlungsgebiet der Nordweststadt, in Niederursel sowie in Praunheim ein. Daneben gibt es verschiedene Bereiche, in denen die Flurwinde lokal eine wichtige Durchlüftungsfunktion erfüllen. Dies betrifft die Freiflächen, welche sich nordwestlich des Praunheimer Gewerbegebiets und südlich des Steinbachtals befinden. Auch erfolgt ein wichtiger flächenhafter Kaltluftabfluss über die Freiflächen zwischen dem Steinbachtal im Süden und dem Rand der Nordweststadt entlang des Paul-Kornfeld-Wegs.

Aufgrund ihrer hohen Bedeutung für die Kaltluftzuführung in die bestehenden Siedlungen sind deshalb die Bereiche der Kaltluftleitbahnen von jeglicher Bebauung freizuhalten.

Die landwirtschaftlichen Freiflächen, über die heute großflächig Kaltluft in Richtung der angrenzenden Frankfurter Stadtteile abfließt, können hingegen bei Aufrechterhaltung der Durchströmbarkeit bebaut werden. Jedoch sollten dabei entsprechend ausgerichtete Grünachsen in Strömungsrichtung freigehalten werden, um den Kaltlufttransport in die Bestandssiedlungen weiterhin zu ermöglichen, um somit zu einer Verstärkung des derzeitigen Wärmeinseleffekts entgegenzuwirken.

**Kaltluftentstehungsgebiete** kennzeichnen Grün- und Freiflächen mit einer sehr hohen Kaltluftproduktionsrate von mindestens  $17 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ , welche die Kaltluftleitbahnen speisen oder die Siedlungsgebiete direkt beliefern. Im Untersuchungsgebiet sind etwa 58 % der Grün- und landwirtschaftlichen Flächen Kaltluftentstehungsgebiete. Auf den restlichen Freiflächen ist hingegen die Kaltluftproduktion zu gering, um das Kriterium eines Kaltluftentstehungsgebiets zu erfüllen. Diese Flächen sind daher weniger relevant für die Auf-





rechterhaltung des Kaltlufthaushalts im betrachteten Gebiet sind. Die hochproduktiven Kaltluftentstehungsgebiete im Geltungsbereich des Projekts SEM 4 sind möglichst so zu bebauen, dass weiterhin ausreichend Kaltluft entstehen kann. Statt vieler einzelner Grünflächen sollten daher möglichst große und räumlich zusammenhängende Kaltluftproduktionsflächen, vorzugsweise in der Nähe der Leitbahnen, erhalten bleiben beziehungsweise entwickelt werden.

### **KALTLUFTEINWIRKBEREICH**

Allgemein lassen sich Siedlungsräume in ausreichend durchlüftete Areale und damit meist klimatisch günstige Siedlungsstrukturen sowie klimatische Belastungsbereiche untergliedern. Der **Kaltlufteinwirkungsbereich** kennzeichnet das bodennahe Einströmen der Kaltluft von den Grünflächen in die angrenzende Bebauung während einer autochthonen Sommernacht. Damit geht einher, dass die im Einwirkungsbereich befindliche Bebauung in der Nacht vergleichsweise günstigere bioklimatische Verhältnisse aufweist.

Als Kaltlufteinwirkungsbereich sind in der Klimaanalysekarte Siedlungs- und Gewerbeflächen sowie Straßen innerhalb des Untersuchungsgebietes gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstromdichte  $> 2,6 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  durchflossen werden.

Innerhalb des Untersuchungsgebietes gelten etwa 38 % der Siedlungs- und Gewerbeflächen sowie der Straßenflächen als Kaltlufteinwirkungsbereich. Vor allem der nördliche Teil von Niederursel profitiert von der Kaltluftleitbahn des Urselbachtals. Die Kaltluft kann hier bis zum westlichen Ende der Straße Alt Niederursel vordringen. Die gekennzeichneten Kaltlufteinwirkungsbereiche nordöstlich des Martin-Luther-King-Parks und südlich des Urselbaches in Niederursel werden durch die jeweilig angrenzenden lokalen Grünflächen bedingt. Das südwestliche Randgebiet der Nordweststadt entlang des Paul-Kornfeld-Weges wird von der zentralen Kaltluftleitbahn des Untersuchungsgebiets gespeist. Jedoch kann die Kaltluft hier lediglich bis etwa zur zweiten Häuserreihe in die Nordweststadt einwirken, da hier die Gebäude ungünstig zur Strömung ausgerichtet sind und somit den Kaltluftvolumenstrom blockieren.

Praunheim liegt im direkten Einflussbereich der Kaltluftleitbahn des Steinbachtals. Durch die geringe Bebauungsdichte und die günstige Ausrichtung der Gebäude in Strömungsrichtung kann die Kaltluft nahezu auf den gesamten Siedlungskörper Praunheims einwirken. Das Gewerbegebiet nördlich der Heerstraße unterbindet allerdings den Kaltluftzustrom in gewissem Umfang. Zusätzlich heizt sich hier die Luft beim Überströmen des vergleichsweise warmen Gewerbegebiets stärker auf, sodass die Siedlungsbereiche südlich der Heerstraße kaum noch von der Kaltluftleitbahn des Steinbachs profitieren können.

### **FAZIT KLIMAANALYSEKARTE**

Derzeit ist die Überwärmung der Siedlungsbereiche und somit der Wärmeinseleffekt im Frankfurter Nordwesten gegenüber den angrenzenden Frei- bzw. Grünflächen lediglich gering ausgeprägt. Ähnlich verhält es sich in den Nachbargemeinden Steinbach, Oberursel-Weißkirchen und Eschborn.

Die Acker- und Freiflächen im Nordwesten Frankfurts weisen eine hohe Kaltluftproduktivität auf. Essentielle Kaltluftleitbahnen stellen das Urselbach- und das Steinbachtal dar, ergänzt um die zentral im Untersuchungsgebiet liegende, Y-förmige Geländeerinne westlich der BAB A 5. Über diese Tiefenlinien wird konzentriert Kaltluft in die räumlich verknüpften Stadtbereiche transportiert. Eine Überbauung der Freiflächen hätte eine Erwärmung, vorzugsweise im Bereich der heutigen Siedlungsränder zur Folge, deshalb sind bei der städtebaulichen Planung im Geltungsbereich der SEM 4 die in Kapitel 6 dargestellten Planungshinweise zu beachten (s. Planungshinweiskarte).



## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende klimaökologische Analyse im Rahmen der Voruntersuchungen für die städtebauliche Entwicklungsmaßnahme (SEM 4) beurteilt die klimatische Relevanz der Freiflächen zwischen Steinbach a. T. und Praunheim/Niederursel. Das verwendete 10 m x 10 m-Raster entspricht einem mikroskaligen Ansatz und erlaubt die Integration von Strömungshindernissen wie beispielsweise Gebäuden und Lärmschutzwänden. Zusammen mit der kleinräumigen Erfassung von Grünstrukturen samt deren individueller Strukturhöhe, können detaillierte Aussagen zum Einfluss einer geplanten Siedlungserweiterung auf das Mikroklima und insbesondere das örtliche Strömungsfeld getroffen werden.

Mittels des numerischen Stadtklimamodells FITNAH 3D wurden flächendeckend die wichtigsten meteorologischen Parameter (Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung und Kaltluftvolumenstrom für die Nachtsituation bzw. Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) für die Tagsituation) berechnet. Zusätzlich wurden durch Messfahrten und durch Langzeitmessungen die stadtklimatisch relevantesten Parameter vor Ort ermittelt und mit den Ergebnissen der numerischen Modellierungen verglichen. Den durchgeführten Klimasimulationen liegen immer autochthone sommerliche Wetterlagen zugrunde (herabgesetzter Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht, hohe Ein- und Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel).

Es zeigt sich anhand der Ergebnisse, dass die bestehende Wärmebelastung in den Frankfurter nordwestlichen Stadtteilen ebenso wie in den Nachbargemeinden derzeit als **gering** einzuschätzen ist. Die Kaltluftleitbahnen des Ursel- und Steinbachtals sowie die zentrale Y-förmige Tiefenlinie des Untersuchungsgebiets transportieren während der ersten und zweiten Nachthälfte kühlerer Luftmassen in das untersuchte Frankfurter Stadtgebiet hinein und bedingen so eine stärkere Abkühlung der an die Kaltluftleitbahnen angrenzenden Siedlungsbereichen. In der zweiten Nachthälfte dominiert der Wetterauwind das Strömungsgeschehen. Die Kaltluft wird dadurch zusätzlich verstärkt in die Siedlungsbereiche Praunheims und Niederursels hineintransportiert. Durch die im Untersuchungsgebiet vorherrschenden Strömungsrichtungen ergibt sich, dass eine Bebauung der Freiflächen im Geltungsbereich der SEM 4 keinen beziehungsweise einen nur sehr geringen Einfluss auf das Kaltluftprozessgeschehen in den Nachbargemeinden Steinbach, Eschborns sowie Oberursel-Weißkirchens haben wird.

Die Ergebnisse des Kaltluftprozessgeschehens zeigen deutlich die Wichtigkeit der planerischen Berücksichtigung der Strömungssysteme, die vor allem in der ersten Nachthälfte aktiv sind, da sie empfindlicher auf eine Bebauung reagieren. Das Prozessgeschehen der zweiten Nachthälfte, das durch den Wetterauwind dominiert wird, ist hingegen weniger anfällig gegenüber städtebaulichen Entwicklungen.

Die Klimaanalysekarte für 23:00 Uhr spiegelt die Überwärmung der Siedlungsflächen und das Kaltluftprozessgeschehen im gesamten Untersuchungsgebiet wider. Sie veranschaulicht den städtischen Wärmeinsellekt (bis zu 4 K höhere Temperaturen im Stadtkern Niederursels verglichen mit siedlungsfernen Freiflächen), bildet die in einer autochthonen Sommernacht entstehenden Ausgleichsströmungen ab (Flurwinde und Hangabwinde) und identifiziert die drei für den Kaltlufttransport besonders wichtigen Leitbahnen. Generell zeigt die Klimaanalysekarte derzeit überwiegend geringe Überwärmungstendenzen für die im Untersuchungsgebiet vorhandenen Siedlungskörper auf.

Eine Untersuchung des Einflusses potentieller Lärmschutzwände, welche bei dem angedachten Ausbau der BAB A5 voraussichtlich vorzusehen sind, auf den Kaltluftvolumentransport und das Strömungsfeld zeigt, dass durch den Bau einer Lärmschutzwand (H = 8 m, überwiegend einseitig entlang der BAB 5) kein relevanter Einfluss auf die genannten Parameter zu erwarten ist. Die Beeinträchtigung des Kaltluftvolumenstroms bzw. der bodennahen Winddynamik beschränkt sich auf die nähere Umgebung des Hindernisses bis zu ei-



nem Abstand von circa 50 bis 150 m (s. Kapitel 8). Falls die Lärmschutzwand auf 10 m erhöht werden sollte, ist aufgrund der Mächtigkeit der Kaltluftschicht (23:00 Uhr ca. 15 m, 04:00 Uhr ca. 25 m) mit keiner signifikant stärkeren Beeinträchtigung des Kaltluftprozessgeschehens gegenüber der 8 m-Variante zu rechnen.

Die Ergebnisse der Messung und Modellierung der klimaökologischen Parameter lassen den Schluss zu, dass eine Überbauung der Freifläche im Geltungsbereich der SEM 4 den Kaltluftvolumentransport in die angrenzenden Stadtteile Niederursel sowie Praunheim und die Nordweststadt erheblich vermindern würde. Ohne Berücksichtigung der Planungshinweise bei der Entwicklung zukünftiger städtebaulicher Konzepte ist deshalb nicht auszuschließen, dass die bisher überwiegend eher mäßige Überwärmung der nordwestlichen Frankfurter Stadtteile deutlich zunehmen würde. Durch Freihaltung der in der Klimaanalysekarte ausgewiesenen Kaltluftleitbahnen und eine ausschließlich lockere Bebauung mit einem ausreichenden Anteil an zusammenhängenden, strömungsaktiven Grün- und Freiflächen könnte weiterhin eine ausreichende Kaltluftproduktion und -zufuhr in die angrenzenden Stadtteile Frankfurts sichergestellt werden.



## 6 Planungshinweise

Die Karte 11 zeigt, dass sich der Geltungsbereich des Projekts SEM 4 über einen für die Kaltluftentstehung sowie den Kaltlufttransport sensiblen und wichtigen Bereich im Nordwesten Frankfurts erstreckt. Eine Bebauung in diesem Gebiet kann deshalb zu erheblichen Einschränkungen des Kaltfluthaushalts führen und in der Folge die örtlichen stadt- bzw. bioklimatischen Verhältnisse beeinträchtigen, sofern die spezifischen räumlichen und funktionalen Ausprägungen der das Kaltluft- und Strömungsgeschehen im Geltungs- bzw. Untersuchungsgebiet prägenden Windsysteme (Taunuswinde, Wetterauwind) nicht hinreichend beachtet werden.

Aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit wären vor allem die aus dem Taunus-Vorland einströmenden sowie auch die vor Ort initiierten Kaltluftströmungen in besonderem Maße von einer Bebauung betroffen. Um sowohl die Kaltluftproduktion im Geltungsbereich als auch den Zustrom weiterhin in ausreichendem Maß gewährleisten zu können, ist es notwendig, die Bebauung innerhalb der lokalen Kaltluftentstehungsgebiete so anzuordnen, dass die verbleibenden Frei- und Grünflächen den Kaltlufttransport in den angrenzenden Tälern und Tiefenlinien auch zukünftig gezielt unterstützen können. Quartiersbezogene Grün- und Parkflächen sowie Hausgärten sollten deshalb vorzugsweise begleitend zu den identifizierten Strömungskorridoren verortet werden, um den effektiven Strömungsquerschnitt zu vergrößern und den lokalen Kaltluftzufluss zu verstärken.

Damit bei einer Bebauung der heutigen landwirtschaftlichen Flächen im Geltungsbereich der SEM 4 dennoch ausreichend Kaltluft entstehen kann, ist es erforderlich, einen möglichst großen Anteil an kaltluftaktiven Grün- und Freiflächen freizuhalten. Dabei wird, wie in der Planungshinweiskarte dargestellt, empfohlen, in den orange markierten Gebieten im Untersuchungsgebiet etwa 60 Prozent der Gesamtfläche als strömungsdynamische Freiflächen zu belassen und davon mindestens die Hälfte als zusammenhängende kaltluftaktive Grünflächen zu gestalten (s. Karte 13).

Für die gelb markierten Gebiete wird ein geringerer Anteil an strömungsaktiven Freiflächen von etwa 50 Prozent an der Gesamtfläche und mindestens die Hälfte davon als kaltluftaktive Grünflächen empfohlen.

Zur Unterstützung der allgemeinen Quartiersbelüftung in der ersten Nachthälfte ist es zudem sinnvoll, mittels der Gebäudeausrichtung und der Lage des Straßennetzes die neuen Stadtquartiere so zu strukturieren, dass sie von den Taunusabwinden durchströmt werden können. Auf eine ausreichende Porosität, insbesondere der westlichen Siedlungsränder, ist daher zu achten. Eine intensive Durchgrünung der Quartiere inklusive einer Dach- und Fassadenbegrünung ist im Hinblick auf die Anpassung an den Klimawandel anzustreben.

Die in der Planungshinweiskarte ausgewiesenen Kaltluftleitbahnen stellen heute die wichtigsten Strömungskorridore im Untersuchungsraum dar. Um diese Funktion nicht einzuschränken, sind diese Bereiche von jeglicher Überbauung freizuhalten, damit die Kaltluft weiterhin in die räumlich mit ihnen verknüpften Frankfurter Stadtteile geleitet werden kann. Um eine effektive Durchströmbarkeit zu gewährleisten, ist im Ursel- und Steinbachtal ein Querschnitt mit einer Breite von mindestens 300 m freizuhalten. Die Y-förmige Tiefenlinie westlich der Autobahn sollten auf einer Breite von jeweils etwa 150 m freigehalten werden. Dabei wird die Breite des westlich angrenzenden Grünzugs in der Gemeinde Steinbach aufgegriffen.

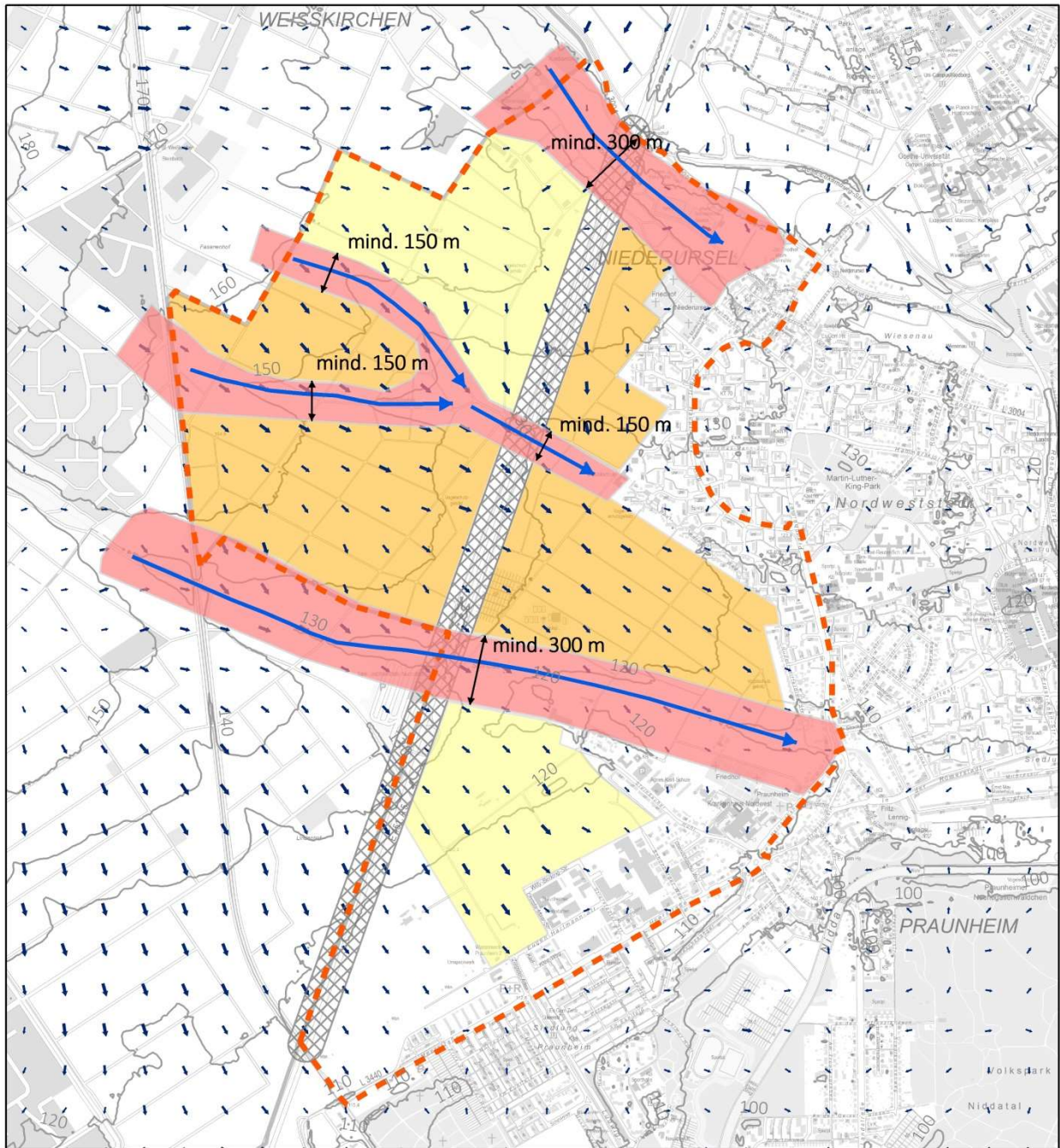
Zusätzlich ist es aus lufthygienischen Gründen erforderlich, beidseits der Autobahn einen mindestens 150 m tiefen Schutzabstand zu beachten.

Der mehrere 100 Meter mächtige Wetterauwind, der die bioklimatischen Verhältnisse in der zweiten Nachthälfte wesentlich bestimmt, reagiert auf bauliche Veränderungen weniger empfindlich. Eine groß-



räumige Blockierung oder Umlenkung dieser Regionalströmung durch eine städtebauliche Weiterentwicklung des Frankfurter Nordwestens ist deshalb nicht zu erwarten. Jedoch ist es wichtig, dass auch diese Luftmassen die neuen städtebaulichen Strukturen durchströmen können, damit vor allem die Quartiersbereiche davon profitieren können, die aufgrund ihrer Höhenlage von den Kaltluftabflüssen des Taunus-Vorlandes weniger intensiv tangiert werden.

Eine detaillierte klimaökologische Untersuchung und Bewertung möglicher städtebaulicher Konzepte wird nach Vorlage von Konzepten mit weiterem Vorschreiten des Projekts erfolgen.



<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #f08080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Kaltluftleitbahn - von Bebauung freizuhalten</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #ffa500; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> ca. 60% der Fläche als strömungsaktive Freiflächen vorsehen, davon mind. die Hälfte als zusammenhängende kaltluftaktive Grünflächen; zusätzlich poröse Bebauung zur Erhaltung der Durchströmbarkeit</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #ffff00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> ca. 50% der Fläche als strömungsaktive Freiflächen vorsehen, davon mind. die Hälfte als zusammenhängende kaltluftaktive Grünflächen; zusätzlich poröse Bebauung zur Erhaltung der Durchströmbarkeit</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, blue 2px, blue 4px); border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Richtung Taunusabwinde - Berücksichtigung bei der Ausrichtung der Bebauung</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background: repeating-linear-gradient(-45deg, transparent, transparent 2px, blue 2px, blue 4px); border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Abschätzung Abstandsfläche Immissionsschutz (mit geplanter Erweiterung der BAB A5)</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 2px dashed orange; margin-right: 5px;"></span> Geltungsbereich SEM 4</li> </ul>	<h2 style="margin: 0;">Frankfurt Nordwest - SEM4</h2> <h3 style="margin: 0;">Planungshinweise Klima</h3> <p style="margin: 0;">Stand: September 2019</p> <div style="margin: 5px 0;"> <p>0 <span style="margin-left: 100px;">0,75</span> <span style="margin-left: 100px;">1,5</span> km</p> </div> <p style="margin: 0; font-size: small;">Hintergrundkarte: Stadtvermessungsamt, Frankfurt am Main, Stand: 12.2016</p> <table style="width: 100%; font-size: x-small;"> <tr> <td style="width: 50%;">                 Auftraggeber:                  Stadt Frankfurt am Main                  Stadtplanungsamt                  Kurt-Schumacher-Straße 10                  60311 Frankfurt am Main             </td> <td style="width: 50%; text-align: right;">                 Auftragnehmer:                  GEO-NET                  Umweltconsulting GmbH                  Große Pfahlstraße 5 a                  30161 Hannover             </td> </tr> </table> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center; margin-top: 10px;"> </div>	Auftraggeber: Stadt Frankfurt am Main Stadtplanungsamt Kurt-Schumacher-Straße 10 60311 Frankfurt am Main	Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH Große Pfahlstraße 5 a 30161 Hannover
Auftraggeber: Stadt Frankfurt am Main Stadtplanungsamt Kurt-Schumacher-Straße 10 60311 Frankfurt am Main	Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH Große Pfahlstraße 5 a 30161 Hannover		

Karte 13: Planungshinweiskarte Klima.





## 7 Anhang Teil A

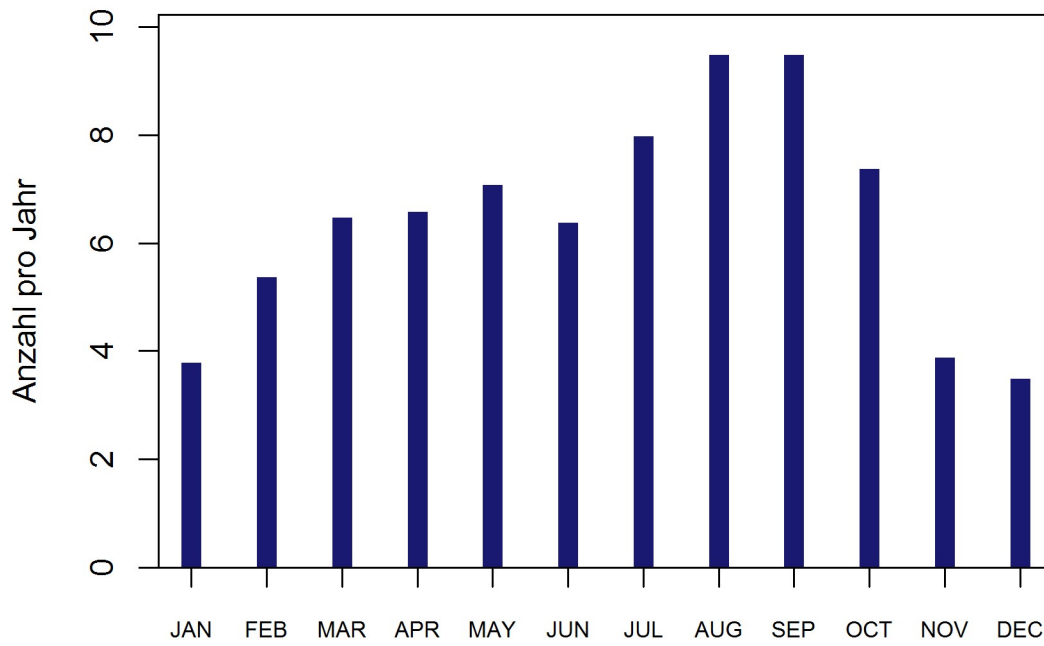


Abb. A 1: Langjähriges Monatsmittel der Anzahl autochthoner Nächte an der DWD-Station Frankfurt am Main (1971 – 2018, Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2019b)



Abb. A 2: Standorte der meteorologischen Messungen.



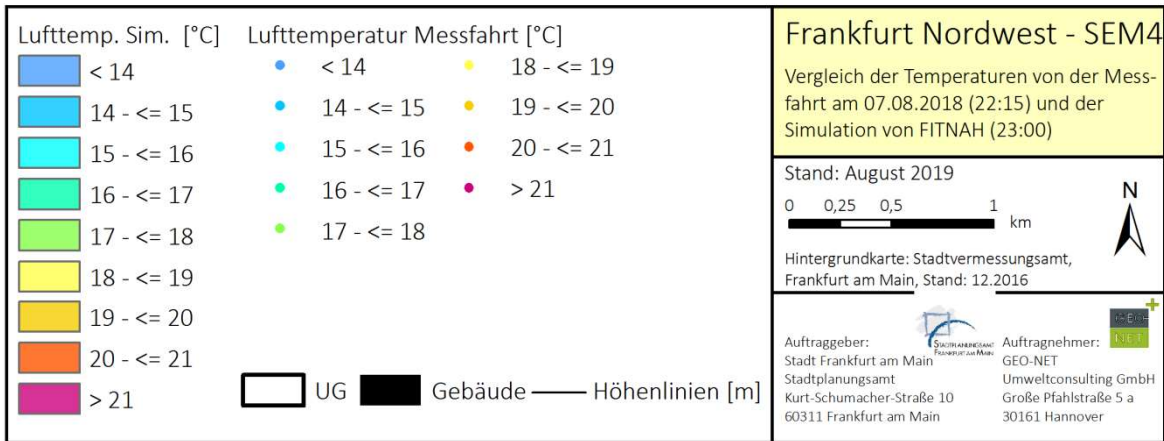
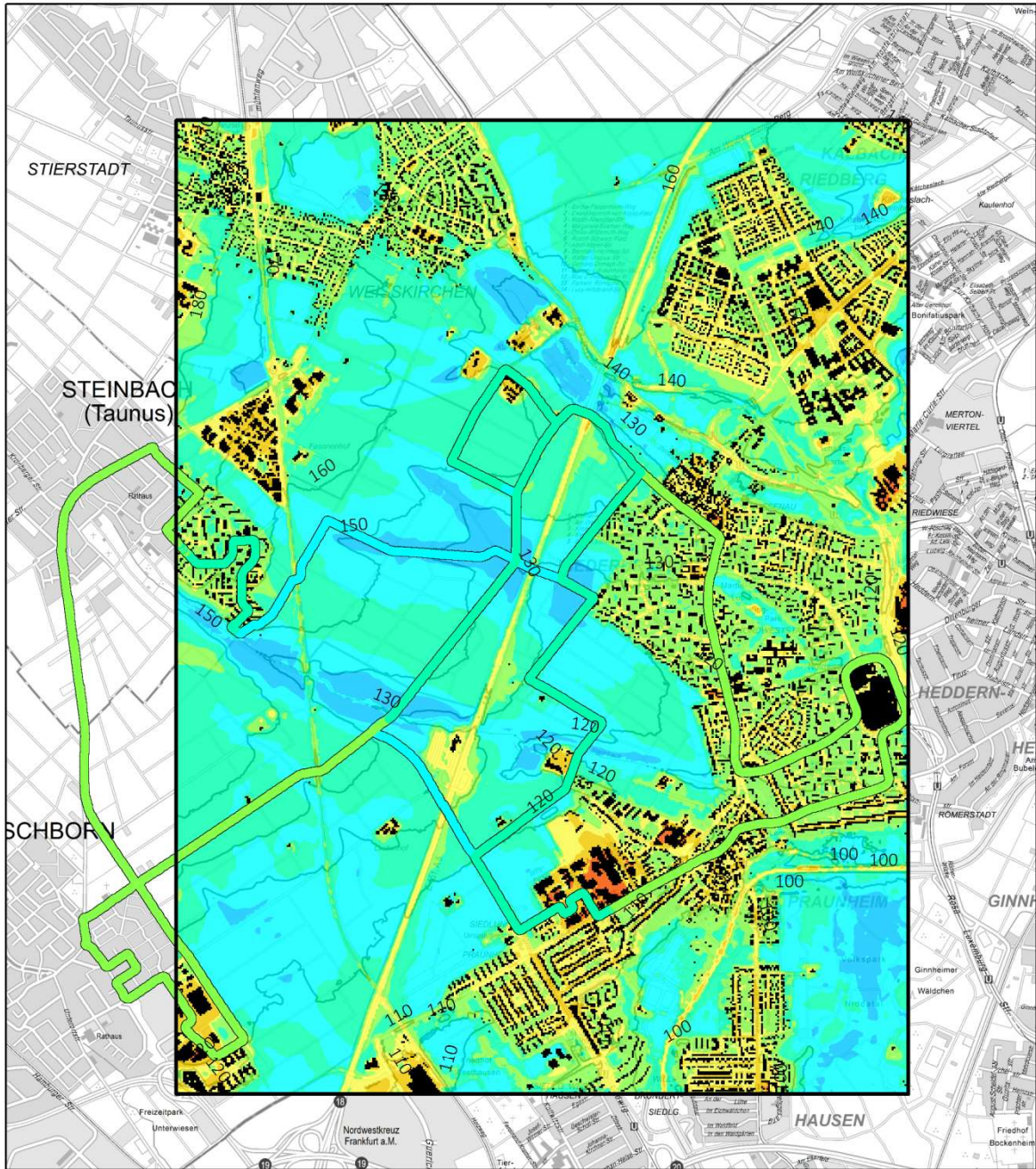


Abb. A 3: Vergleich der Temperaturen zwischen der Messfahrt am 07.08.2018 (22:15) und der Modellierung (23:00).

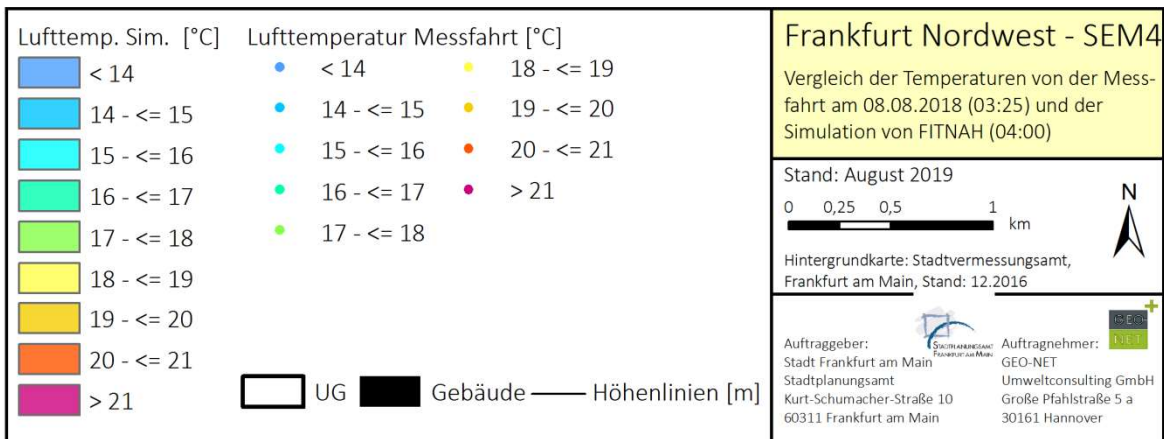
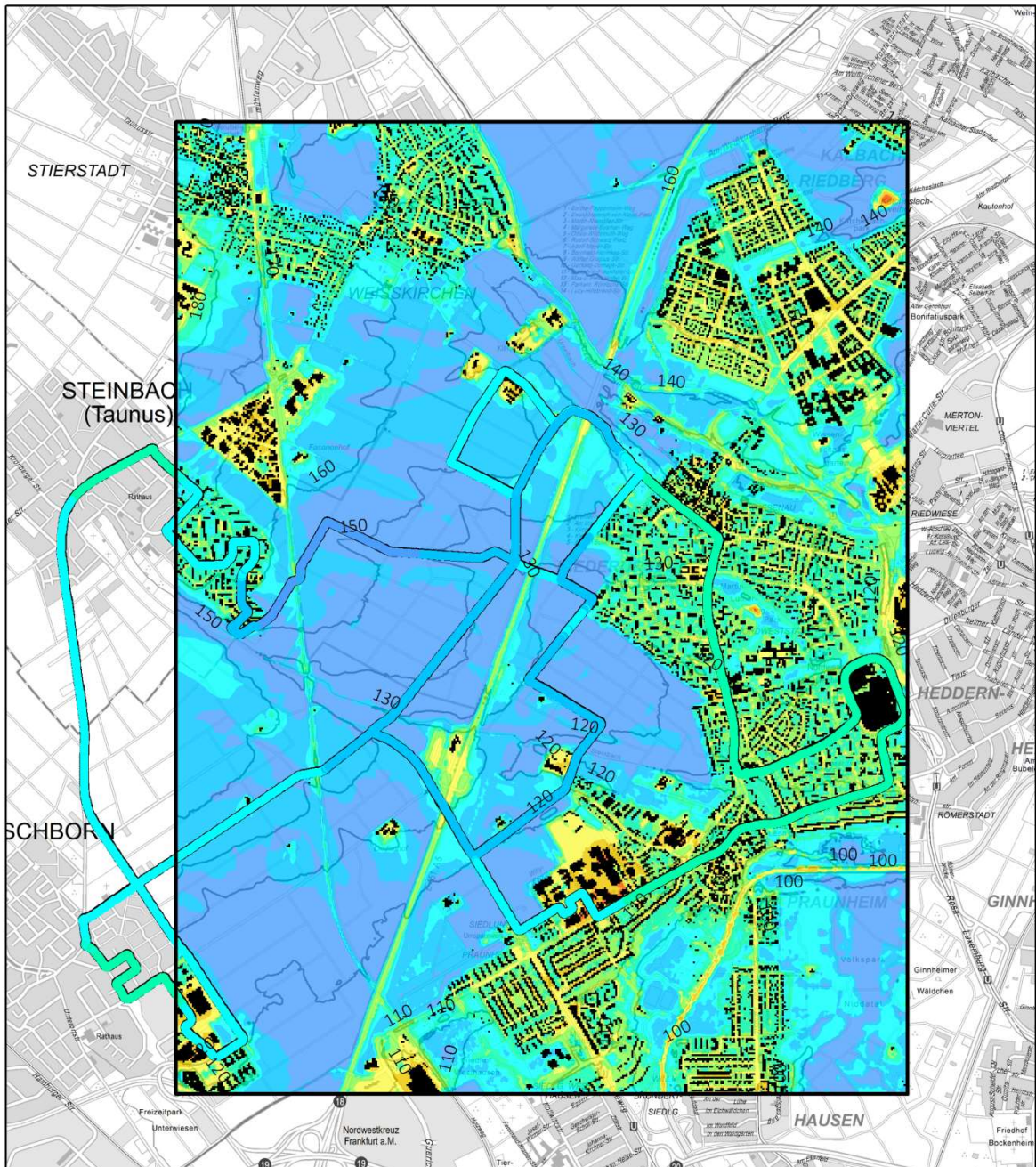


Abb. A 4: Vergleich der Temperaturen zwischen der Messfahrt am 08.08.2018 (03:25) und der Modellierung (04:00).

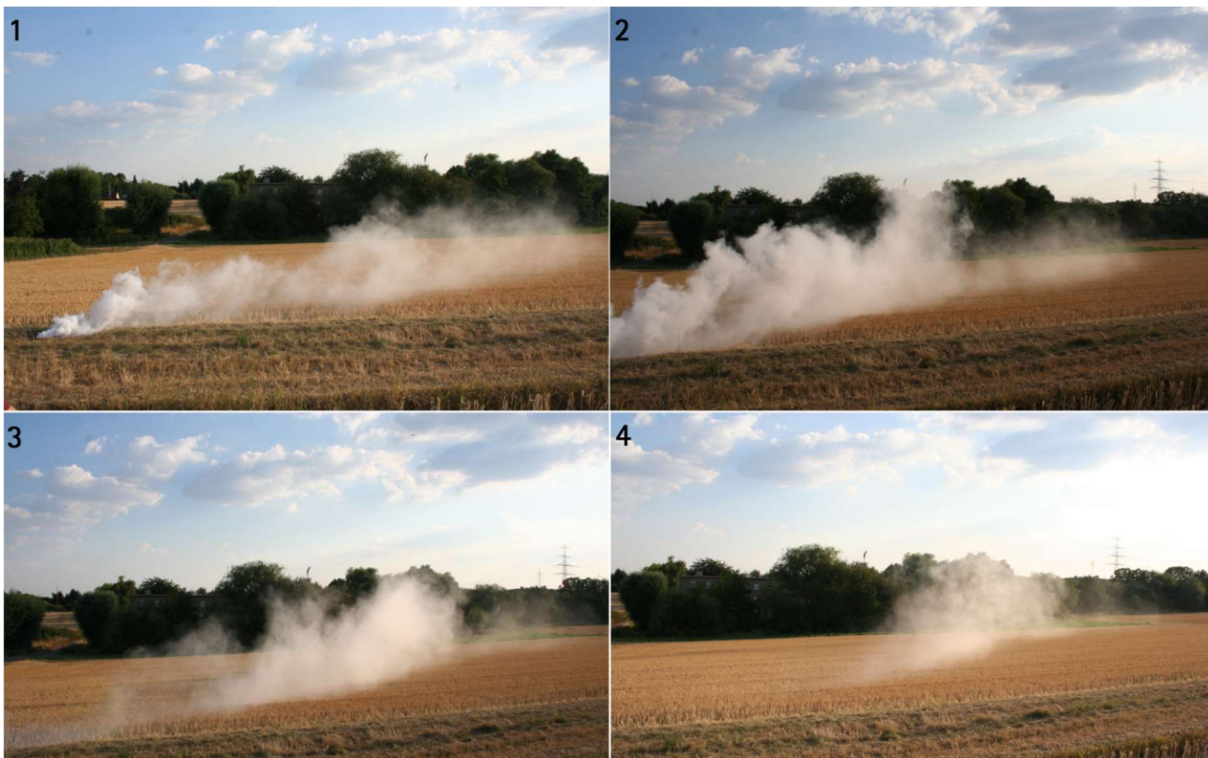


Abb. A 5: Rauchschwadenversuch des 24.07.2018 um 19:00 Uhr.

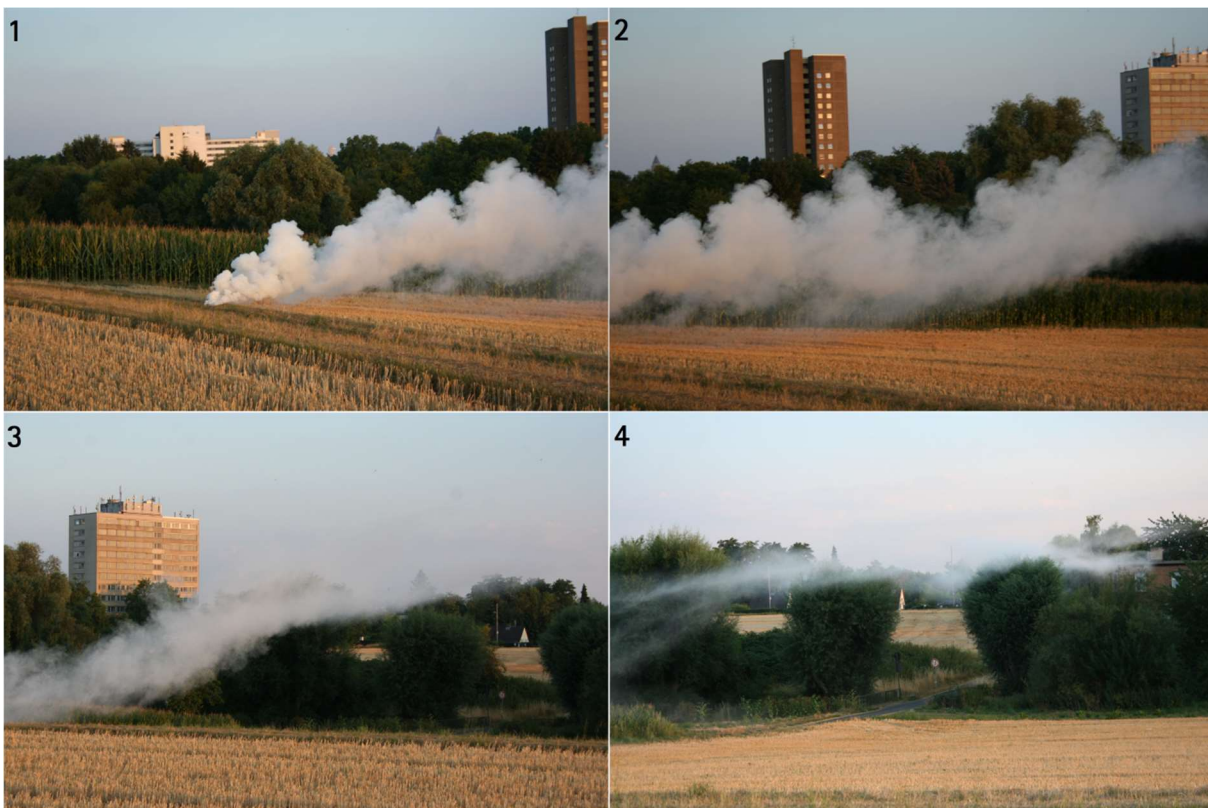


Abb. A 6: Rauchschwadenversuch des 24.07.2018 um 21:00 Uhr



Tab. A 1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET in den Tagesstunden (Auszug nach VDI 2004).

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
20 °C	Behaglich	Keine Wärmebelastung
23 °C	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
29 °C	Warm	Mäßige Wärmebelastung
35 °C	Heiß	Starke Wärmebelastung
41 °C	Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung



## 8 Anhang Teil B

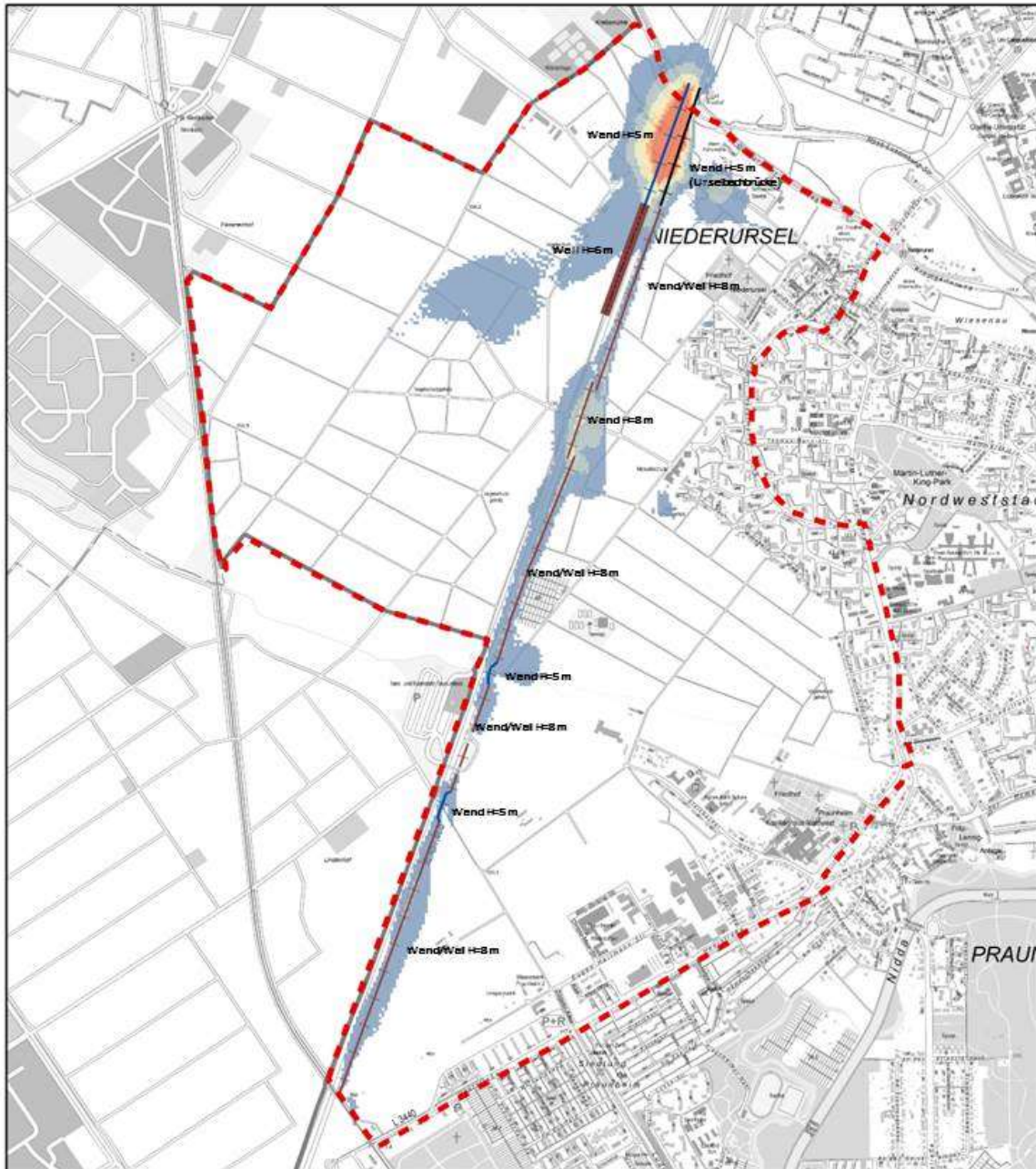
### WIRKUNG DER PROJEKTIERTEN LÄRMSCHUTZWÄNDE

Anders als bei Belastungen durch Luftschadstoffe oder Verkehrslärm, für die in Verordnungen konkrete Grenz- oder Richtwerte genannt werden, gibt es für die Beeinflussung des Kaltlufthaushaltes keine allgemeingültigen Bewertungsmaßstäbe. Lediglich in der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5 (VDI 2003) wird ein quantitatives „Maß der Beeinflussung“ vorgeschlagen, das eine Reduktion der Abflussvolumina um mehr als 10 % im Umfeld von bioklimatisch belasteten Siedlungsgebieten als „hohe vorhabenbedingte Auswirkung“ ausweist. Eine Verringerung um 5 – 10 % wird als „mäßige Auswirkung“ eingestuft, unterhalb von 5 % wird die Auswirkung einer Volumenstromverringerung als „geringfügig“ angesehen.

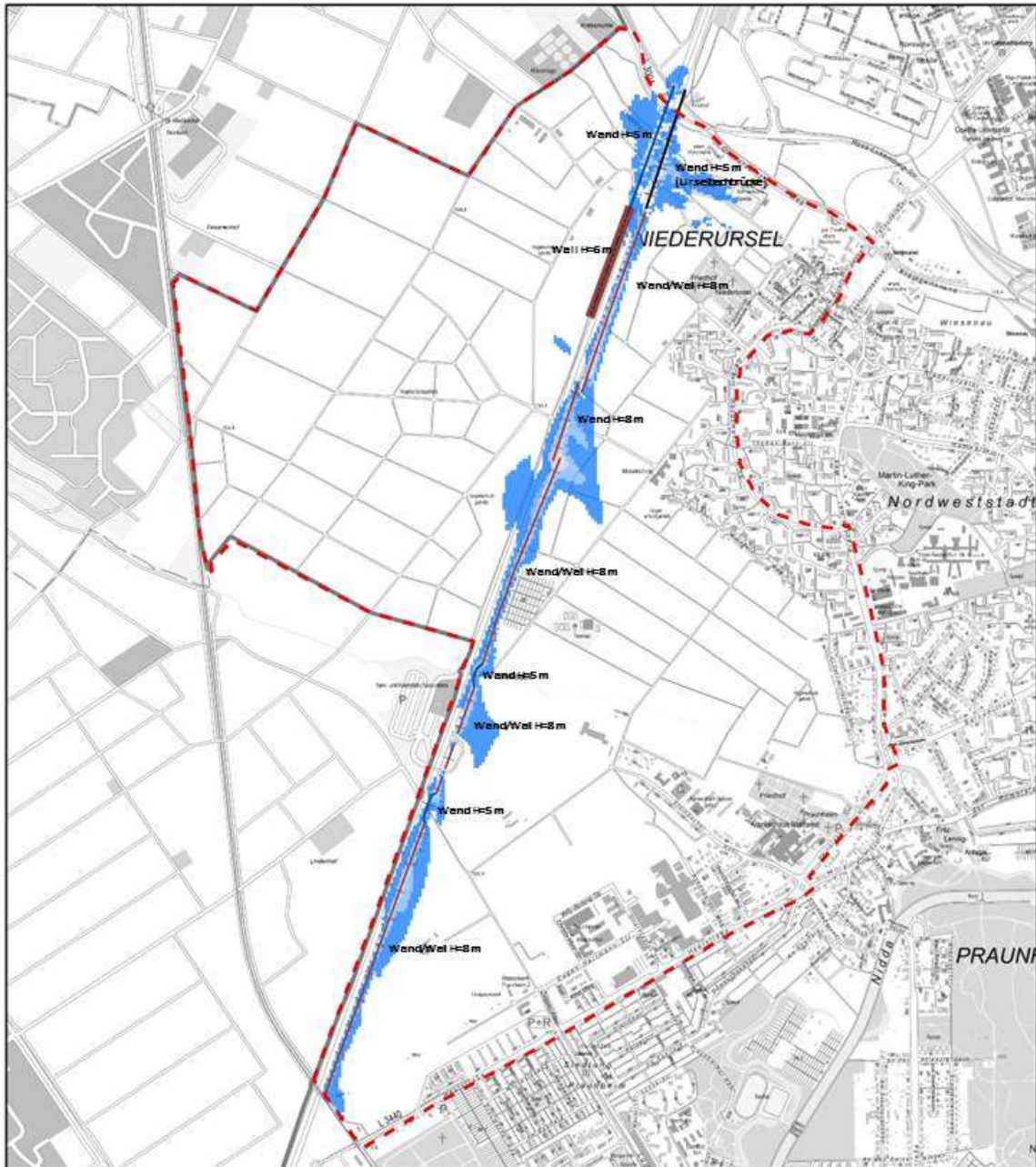
Karte B 1 zeigt die prozentuale Änderung des Kaltluftvolumenstroms unter Berücksichtigung der potentiellen Lärmschutzwände/-wälle (Höhe: 8 m), wie sie im Rahmen eines 8-spurigen Ausbaus der BAB A5 von Hessen Mobil angedacht waren. Auffällig sind zunächst die erhöhten Änderungswerte im Bereich der Urselfachbrücke im Norden des Untersuchungsgebietes. Diese signifikante Änderung ist durch die geplante Lärmschutzwand westlich und die vorhandene Lärmschutzwand im Osten der Autobahn begründet. Durch die doppelt aufeinanderfolgende Lärmschutzwand wird der Strömung auch ein doppelter Widerstand entgegengesetzt, weshalb die Auswirkungen in dem genannten Bereich signifikanter sind als im sonstigen Verlauf der BAB A5. Ein Unter- bzw. Überströmen der Urselfachbrücke ist jedoch weiterhin möglich und die deutlich hervorgehobene Änderung des Kaltluftvolumenstroms ist für die bestehende sowie geplante Bebauung nicht relevant. Auch die zu erwartende Änderung des Kaltluftvolumenstroms innerhalb der angeordneten nordwestlichen Siedlungserweiterungsflächen ist zu vernachlässigen, da diese Beeinträchtigung zwar als „mäßige Auswirkung“ eingestuft wird, allerdings deutlich am unteren Ende dieser Klasse liegt.

Die simulierten Ergebnisse zeigen um 23:00 Uhr eine Kaltluflhöhe von etwa 15 m. Es ist somit davon auszugehen, dass zu diesem Zeitpunkt die Überströmung der Lärmschutzwände bereits eingesetzt hat. Insgesamt zeigt sich, dass die geplanten Lärmschutzwände/-wälle mikroklimatisch eine mäßige bis hohe Auswirkung auf den Kaltluftvolumenstrom besitzen, deren Abschwächung jedoch nur lokal zur Geltung kommt. Dies ist auch an der Änderung der Windgeschwindigkeit erkennbar (Karte B 2).

Hervorzuheben ist, dass der Einfluss der Lärmschutzwände lediglich auf die nähere Umgebung der Hindernisse beschränkt ist (etwa 50 m). Stellenweise kann maximal ein Einflussbereich von 150 m erkannt werden. Anhand der Karten ist erkennbar, dass die Verringerung des Kaltluftvolumenstroms durch die Lärmschutzwände bzw. -wälle mit zunehmendem Abstand abnimmt. Eine ausreichende Versorgung mit Kaltluft ist folglich auch mit den geplanten Lärmschutzwänden/-wällen weiterhin gegeben.



Karte B 1: Prozentuale Änderung des Kaltluftvolumenstroms während einer austauscharmen, wolkenlosen, sommerlichen Hochdruckwetterlage infolge des Einflusses von Lärmschutzwänden/-wällen entlang der BAB A 5.



<p>Änderung der Windgeschwindigkeit in 2 m ü. Grund [m/s]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #f8d7da; border: 1px solid #c0392b; margin-right: 5px;"></span> &lt; - 1,00</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #d1ecf1; border: 1px solid #17a2b8; margin-right: 5px;"></span> &gt; -1,00 - -0,75</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #bee5eb; border: 1px solid #17a2b8; margin-right: 5px;"></span> &gt; -0,75 - -0,50</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #90caf9; border: 1px solid #17a2b8; margin-right: 5px;"></span> &gt; -0,50 - -0,25</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #fff; border: 1px solid #17a2b8; margin-right: 5px;"></span> &gt; -0,25</li> </ul>		<p><span style="border: 2px dashed red; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; margin-right: 5px;"></span> Geltungsbereich</p> <p>—+— Lärmschutz Bestehender Lärmschutz</p> <p>—+— Lärmschutzwand Projektiertes Lärmschutz</p> <p>—+— Lärmschutzwand Lärmschutzwand</p> <p>—+— Lärmschutzwall Lärmschutzwand und -wall</p>
<p><b>Frankfurt Nordwest - SEM4</b></p> <p>Änderung der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe ü. Gr. nach der Simulation von FITNAH für eine austauscharme, sommerliche Hochdruckwetterlage</p> <p>Maßstab: 1:19 000 (bezogen auf DIN A4)</p> <p>0 0,25 0,5 1 km </p> <p>Hintergrundkarte: Stadtvermessungsamt, Frankfurt am Main, Stand: 12.2016</p>		
<p>Auftraggeber: Stadt Frankfurt am Main Stadtplanungsamt Kurt-Schumacher-Straße 10 60311 Frankfurt am Main</p>	<p>Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH Große Pfahlstraße 5 a 30161 Hannover</p>	

Karte B 2: Änderung der bodennahen Windgeschwindigkeiten während einer austauscharmen, wolkenlosen, sommerlichen Hochdruckwetterlage infolge des Einflusses von Lärmschutzwänden/-wälle entlang der BAB A 5.



## Quellenverzeichnis

- DFG (1988) – Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- DWD (2019a) – Deutscher Wetterdienst: Wetterlexikon. Online: [www.dwd.de/lexikon](http://www.dwd.de/lexikon)
- DWD (2019b) – Deutscher Wetterdienst: Climate Data Center (freier Online-Zugang zu Klimadaten). Online: <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/> (Zugriff 20.08.2019)
- Häckel, H. (2012): Meteorologie. 7. Auflage. Stuttgart.
- HBEFA (2017) – Handbuch für Emissionsfaktoren im Straßenverkehr: HBEFA Version 3.3. Hintergrundbericht. Online: [www.hbefa.net/e/documents/reports.html](http://www.hbefa.net/e/documents/reports.html)
- Hergert (1991): Klimatische und lufthygienische Situation am Kronsberg und die Beeinträchtigung der klimaökologischen Ausgleichswirkung durch Bebauung. Diplomarbeit an der Universität Hannover.
- Hessischer Umweltatlas (o.J.): Bioklimakarte. Online: [http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/klima/bio/d\\_8\\_1\\_1.htm](http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/klima/bio/d_8_1_1.htm) (Zugriff 22.10.2018)
- Hessischer Umweltatlas (2013): Die Naturräume Hessens und ihre Haupteinheiten. Online: <http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/naturschutz/naturraum/texte/ngl-rm.htm> (Zugriff 28.08.2018)
- Hessischer Umweltatlas (o.J.): Bioklimakarte. Online: [http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/klima/bio/d\\_8\\_1\\_1.htm](http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/klima/bio/d_8_1_1.htm) (Zugriff 22.10.2018).
- HMUELV (2011): Luftreinhalteplan für den Ballungsraum Rhein-Main (1. Fortschreibung).
- HNLUG (o.J.): Bioklimakarte. Online: <http://windrosen.hessen.de/mapapps/resources/apps/windrosen/index.html?lang=de> (Zugriff 23.10.2018).
- Höppe, P. und H. Mayer (1987): Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. Landschaft und Stadt 19 (1): S. 22-29.
- Jendritzky, G., et al. 1990. Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan. Nr. 114.
- Kiese, O. (1988): Die Bedeutung verschiedenartiger Freiflächen für die Kaltluftproduktion und die Frischluftversorgung von Städten. Landschaft + Stadt 20, H.2: S. 67-71.
- Kuttler, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig. Band 13.
- Kuttler, W. (2009): Klimatologie. Paderborn.
- Kuttler, W. (2011): Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 2, Maßnahmen. Environmental Sciences Europe 2011: 23:21.





- Malberg, H. (2002): Meteorologie und Klimatologie- Eine Einführung. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg.
- Mosimann et al. (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Natur-schutz Niedersachsen. Heft 4/99: S. 202-275.
- MUNLV (2010) – Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel.
- MVI (2012) - Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg: Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- Oke, T. R. (1973): City size and the urban heat island. Atmospheric Environment (1967), Volume 7, Issue 8: S. 769-779.
- Regionalverband FrankfurtRheinMain (2011): Kommunen im Klimawandel – Wege zur Anpassung.
- Schönwiese, C.- D. (2008): Klimatologie. 3. Auflage. Stuttgart.
- Sonnenverlauf (2017): Online-Dienst zu Solardaten verschiedener Standorte. Online: [www.sonnenverlauf.de](http://www.sonnenverlauf.de)
- Stadt Frankfurt am Main (o.J.): Stadtklima. Online: [https://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=4564&ffmparf\\_id\\_inhalt\]=30232](https://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=4564&ffmparf_id_inhalt]=30232) (Zugriff 28.08.2018).
- Stadt Frankfurt am Main (2014): Frankfurter Anpassungsstrategie an den Klimawandel
- Stadt Frankfurt am Main (2016): Klimaplanatlas.
- Stadt Frankfurt am Main (2018a): Bundesumweltministerium zeichnet Frankfurt sowie weitere 18 Kommunen als Spitzenreiter im Klimaschutz aus. Online: [https://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=3076&ffmparf\\_id\\_inhalt\]=34463312](https://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=3076&ffmparf_id_inhalt]=34463312) (Zugriff 25.10.2018).
- Stadt Frankfurt am Main (2018b): Stadtplanungsamt Frankfurt. Frankfurts neuer Stadtteil im Nordwesten. Online; Stadt Frankfurt am Main (o.J.): Stadtklima. Online: <https://www.stadtplanungsamt-frankfurt.de/index.php?id=16478&psid=vpkd9tlpka98a1h4e6le64rtr1> (Zugriff 28.08.2018).
- Stadt Karlsruhe (2014): Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung für die Stadt Karlsruhe (Teil II). Forschungsbericht KLIMOPASS.
- Stadt Offenbach (2007): Begründung zum Bebauungsplan Nr. 563 A.
- Strahler, A.H. & A.N. (2009): Physische Geographie.
- UBA (2016) - Umweltbundesamt: Heizen, Raum-temperatur. Online: [www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltbewusstleben/heizen-raumtemperatur](http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltbewusstleben/heizen-raumtemperatur)
- Umweltamt Stadt Frankfurt am Main (2012): Wirksamkeit der Umweltzone Frankfurt am Main.
- VDI (2004): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9. Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene.



VDI (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.

VDI (2008b): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.

VDI (2014): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen.

Werner, G. (1979): Regionale Luftaustauschprozesse und ihre Bedeutung für die räumliche Planung. Schriftenreihe Raumordnung des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, 06.032 Bonn, 116 S.