

Auftraggeber: Hessisches Ministerium für Wirtschaft,
Energie, Verkehr und Wohnen
Kaiser-Friedrich-Ring 75
65185 Wiesbaden

Redaktionell
geänderte Version
vom 18.09.2024

**Erstellung einer landesweiten Klimaanalyse/
Kaltluftströmungssituation unter Berücksichtigung
des klimawandelbedingten Temperaturanstiegs**

**Datengrundlage für die Regionalplanung / Regionale
Flächennutzungsplanung**

Projektnummer: 15-11-17-FR

Version: 1.1

Umfang: 116 Seiten

Datum: 18.09.2024

Bearbeiter: Dr. Christine Ketterer, M. Sc. in Climate Sciences
Dr. Jost Nielinger, Diplom-Meteorologe
Anerkannter Beratender Meteorologe DMG
Dr. Markus Hasel, Diplom-Meteorologe
Dr. Rainer Röckle, Diplom-Meteorologe

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

Version 1.1: Redaktionelle Änderung der Legende in Abbildung 6-2.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	6
Zusammenfassung.....	9
1 Einführung und Aufgabenstellung	11
1.1 Ziel der landesweiten Klimaanalyse	13
1.2 Anwendungsbereich der landesweiten Klimaanalyse	14
2 Bedeutung von Klima und Luft in der räumlichen Planung.....	15
3 Meteorologische Grundlagen	18
3.1 Skalen in der Meteorologie	18
3.2 Thermische Komponente des Klimas	18
3.2.1 Lufttemperatur	18
3.2.1.1 Urbane Wärmeinsel	19
3.2.1.2 Anthropogener Wärmestrom	19
3.2.2 Human-Biometeorologie	20
3.2.3 Klimatologische Kenntage	21
3.3 Thermisch induzierter Wind	22
3.4 Kaltluftabfluss	23
3.5 Flurwinde	28
3.6 Luftqualität	29
3.6.1 Feinstaub PM10.....	30
3.6.2 Stickoxide NO _x	30
3.7 Definition von Wirkräumen und Ausgleichsräumen.....	31
3.8 Klimawandel und Regionale Klimamodelle	31
4 Datengrundlage und Methodik.....	34
4.1 Datengrundlagen	34
4.1.1 Topographie.....	34
4.1.2 Landnutzung	37
4.1.3 Messdaten	39
4.1.4 Klimadaten	39
4.2 Methodik	40
4.2.1 FITNAH – Modellbeschreibung.....	41
4.2.1.1 Das prognostische Modell FITNAH	41
4.2.1.2 Rechengebiet, räumliche und zeitliche Auflösung.....	41
4.2.1.3 Meteorologische Situation und Anfangszustand	41
4.2.1.4 Berechnete meteorologische Größen.....	42
4.2.1.5 Berücksichtigung des prognostizierten Klimawandels	43
4.2.1.6 Modellvalidierung.....	43
4.2.2 Gunstfaktoren	44

4.2.2.1	Strömungssysteme	44
4.2.2.2	Luftleitbahnen	45
4.2.2.3	Kaltluftproduktionsgebiete	45
4.2.2.4	Klimavielfalt.....	45
4.2.3	Ungunstfaktoren	46
4.2.3.1	Lufthygienische Bedingungen	46
4.2.3.2	Thermische Bedingungen.....	46
4.2.4	Ermittlung der bioklimatisch belasteten Siedlungsgebiete (Wirkräume)	47
4.2.4.1	Ermittlung der Empfindlichkeit der Bevölkerung.....	49
4.2.4.2	Ermittlung der thermischen Bedingungen	50
4.2.4.3	Einstufung der thermischen Betroffenheit	51
4.2.4.4	Ermittlung der lufthygienischen Betroffenheit	52
4.2.5	Ermittlung der regionalplanerisch relevanten thermisch belasteten Siedlungsgebiete	52
4.2.6	Identifikation der belüftungsrelevanten Strömungssysteme (→Ausgleichsräume)	53
5	Ergebnisse der landesweiten Klimaanalyse Hessen.....	56
5.1	Ergebnisse der FITNAH-Simulationen	56
5.1.1	Strömungssysteme (Windrichtung und -geschwindigkeit, Volumenstromdichte).....	56
5.1.2	Kaltluftproduktionsgebiete	65
5.1.3	Lufttemperatur	65
5.1.4	Human-Biometeorologische Bedingungen	68
5.1.5	Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels	69
5.1.5.1	Lufttemperatur	69
5.1.5.2	Anzahl an Sommertagen	72
5.2	Weitere Gunst- und Ungunstfaktoren	76
5.2.1	Luftleitbahnen	76
5.2.2	Klimavielfalt.....	77
5.2.3	Luftqualität	79
5.2.4	Inversionshäufigkeiten	80
5.3	Empfindlichkeit und Betroffenheit der Bevölkerung.....	82
6	Umsetzung der Ergebnisse und Empfehlungen für die Regionalplanung.....	87
6.1	Regionalplanerisch relevante thermisch belastete Siedlungsgebiete	87
6.2	Empfehlungen zur Festlegung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten für besondere Klimafunktionen durch die Regionalplaner	89
7	Glossar	94
8	Literatur	101
Anhang 1:	Messdaten	105
Anhang 2:	Bestandsaufnahme	107
A2.1	Beschreibung der klimatischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet.....	107
A2.2	Lufttemperatur	108
A2.3	Klimatologische Kenntage	109
A2.4	Tage mit Wärmebelastung	112

A2.5 Human-biometeorologische Bedingungen	113
A2.6 Wind.....	115

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Bewertungsskala von PET zur Quantifizierung der thermischen Verhältnisse und des Physiologischen Stresses bei Kälte- und Hitzebelastung (Matzarakis und Mayer, 1997).	21
Tabelle 3-2:	Definition der in dieser Studie untersuchten klimatologischen Kenntage (nach DWD, 2020b).	22
Tabelle 3-3:	Beschreibung der Representative Concentration Pathways RCP.	32
Tabelle 4-1:	Daten für die landesweite Klimaanalyse Hessen: Topographie.	34
Tabelle 4-2:	Landnutzungsstrukturen der Klimamodellierung.....	37
Tabelle 4-3:	Daten für die landesweite Klimaanalyse Hessen: Landnutzung.	38
Tabelle 4-4:	Meteorologische Datengrundlage für die landesweite Klimaanalyse Hessen: Messdaten und Klimadaten.	39
Tabelle 4-5:	Bewertung der Empfindlichkeit des Strömungssystems anhand der Volumenstromdichte als Integral über den Gesamtvolumenstrom (Skala angelehnt an REKLIBO (2009)). ...	44
Tabelle 4-6:	Einstufung der Klimavielfalt.	46
Tabelle 4-7:	Folgende meteorologische Größen wurden als Indikatoren für die Ermittlung der thermischen Bedingungen herangezogen.	46
Tabelle 4-8:	Bewertung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) angelehnt an Matzarakis und Mayer (1997).	47
Tabelle 4-9:	Einstufung der Empfindlichkeit der Bevölkerung.	49
Tabelle 4-10:	Einstufung der Wärmebelastung tagsüber aus PET und der Anzahl an Sommertagen.	50
Tabelle 4-11:	Einstufung der thermischen Bedingungen ermittelt aus der Wärmebelastung tagsüber und der Wärmebelastung nachts.	51
Tabelle 4-12:	Einstufung der thermischen Betroffenheit ermittelt aus den Wertstufen der Tabelle „Empfindlichkeit der Bevölkerung“ und der Tabelle „Thermische Bedingungen“.....	51
Tabelle 4-13:	Einstufung der lufthygienischen Betroffenheit aus den Einstufungen der Tabelle „Empfindlichkeit der Bevölkerung“ und dem lufthygienischen Index LQI.	52
Tabelle 5-1:	Median der Temperaturdifferenzen in Kelvin zwischen den Zeiträumen 2031 – 2060 und 2071 – 2100 bezogen auf den historischen Wert des Zeitraums 1971 – 2000.	71
Tabelle 5-2:	Median der Temperaturdifferenzen in Kelvin (K) der Zeiträume 2031 – 2060 und 2071 – 2100 bezogen auf den historischen Wert des Zeitraums 1971 – 2000 für die einzelnen Jahreszeiten.	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Fließdiagramm zur Veranschaulichung der Berechnung thermischer Indizes (Matzarakis et al. 2016).	20
Abbildung 3-2:	Veranschaulichung der verschiedenen Windsysteme, die sich bei autochthonen Wetterlagen ausbilden.....	22
Abbildung 3-3:	Idealisiertes Berg-Tal Windsystem bei symmetrischem Aufheizen und Abkühlen der Hänge (nach Defant (1949) in Bendix (2004), modifiziert).....	25
Abbildung 3-4:	Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Windgeschwindigkeit (Baumbach, 1994). Der mittlere Pfeil zeigt die Höhe an, in welcher 75 % der übergeordneten Strömungsgeschwindigkeit über dem Stadtzentrum, der Vorstadt und dem offenen Land (von links nach rechts) erreicht wird.....	26
Abbildung 3-5:	Herabmischung der Strömung im Überdachniveau in das Bodenniveau einer Siedlung (idealtypisch, Oke, 1988).	27
Abbildung 3-6:	Idealisiertes Schema eines Kaltluftabflusses an einem Hang mit nachfolgender Ebene. Eingezeichnet ist auch das Höhenprofil der Windgeschwindigkeit.	27
Abbildung 3-7:	Skizze zur Volumenstromdichte.	28
Abbildung 3-8:	Wärmeinsel-Effekt (skizziert): Wärmere urbane Bereiche und wärmere ausgedehnte Industriegebiete sorgen auch bei ebenem Gelände für Flurwinde, die aus dem Umland in Richtung Wärmeinsel strömen.	29
Abbildung 3-9:	Zeitreihe des anthropogenen Strahlungsantriebs (W/m^2) aus historischen Daten (1765-2004) und für die Zukunft die erweiterten RCPs (2005-2100) und die erweiterten RCPs (2100-2500) und die „Gemeinsam genutzten sozioökonomischen Pfade“ SSPs (2005-2100) (Chen et al. 2021).	32
Abbildung 4-1:	Datengrundlage, methodisches Vorgehen und Analysestufen bei der landesweiten Klimaanalyse Hessen.	35
Abbildung 4-2:	Höhenmodell von Hessen.	36
Abbildung 4-3:	Vergleichende Darstellung der Landnutzung in einem Orthofoto und den ATKIS-Daten (Rechengitter 200 m x 200 m für Hessen bzw. 50 m x 50 m für den Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main).	38
Abbildung 4-4:	Skizze des Quaders zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der multiplen linearen Interpolation. Die Quadereckpunkte werden durch Simulation der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit bestimmt. Der terminbezogene Zielwert (blauer Punkt) wird durch eine multiple lineare Interpolation berechnet, wobei die Jahreszeitreihe der EURO-CORDEX-Daten als Eingangsdaten dient.	43
Abbildung 4-5:	Die thermische Betroffenheit ergibt sich aus der Zusammenschau der Empfindlichkeit und der thermischen Bedingungen. Die Empfindlichkeit wird aus der Einwohnerdichte je Hektar und der Ortsgröße berechnet. Die thermischen Bedingungen setzen sich aus der Wärmebelastung tagsüber (PET, 13:00 Uhr), der Anzahl der Sommertage und der Lufttemperatur nachts (04:00 Uhr) zusammen.	48
Abbildung 4-6:	Ermittlung der thermischen Bedingungen.	50
Abbildung 4-7:	Exemplarische Skizze zur Veranschaulichung der Abgrenzung der relevanten Strömungssysteme (nach REKLIBO, 2009).	54
Abbildung 5-1:	Windgeschwindigkeit bodennah (5 m über Grund) in der ersten Nachthälfte (22:00 Uhr).	58
Abbildung 5-2:	Windgeschwindigkeit in Überdachniveau (28 m über Grund) in der ersten Nachthälfte (22:00 Uhr).	59
Abbildung 5-3:	Windgeschwindigkeit bodennah (5 m über Grund) in der zweiten Nachthälfte (04:00 Uhr).....	60
Abbildung 5-4:	Windgeschwindigkeit in Überdachniveau (28 m über Grund) in der zweiten Nachthälfte (04:00 Uhr).	61
Abbildung 5-5:	Volumenstromdichte in der ersten Nachthälfte (22:00 Uhr) bis Überdachniveau (0 bis 28 m) (links) und Gesamtvolumenstromdichte (rechts).	62
Abbildung 5-6:	Volumenstromdichte in der zweiten Nachthälfte (04:00 Uhr) bis Überdachniveau (0 bis 28 m) (links) und Gesamtvolumenstromdichte (rechts).	63

Abbildung 5-7:	Nach Intensität bewertete Volumenstromdichte (siehe Tabelle 4-5) in der ersten und zweiten Nachthälfte.	64
Abbildung 5-8:	Kaltluftproduktionspotential (kWh/m ²) im Zeitraum von 22:00 Uhr bis 04:00 Uhr.	66
Abbildung 5-9:	Simulierte bodennahe Lufttemperatur abends und in der zweiten Nachthälfte in 2 m ü. Grund.	67
Abbildung 5-10:	Hessenweite Betrachtung der menschlichen Hitzebelastung (13:00 Uhr) unter Verwendung der Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET).	68
Abbildung 5-11:	Auswertung der EURO-CORDEX-Daten: Projizierte Entwicklung der Lufttemperatur im 21. Jahrhundert in Hessen. Die Mediane für die jeweilige Jahreszeit sind farbig dargestellt, der graue Bereich wird durch das 15. Perzentil und das 85. Perzentil eingegrenzt.	70
Abbildung 5-12:	Anzahl der Sommertage 1971 – 2000.	73
Abbildung 5-13:	Prognostizierte Anzahl der Sommertage 2031 – 2060 bei Auswertung der Szenarien RCP 4.5 (links) und RCP 8.5 (rechts).	74
Abbildung 5-14:	Prognostizierte Anzahl der Sommertage 2071 – 2100 bei Auswertung der Szenarien RCP 4.5 (links) und RCP 8.5 (rechts).	75
Abbildung 5-15:	Luftleitbahnen als zusammenhängende Gebiete geringer Rauigkeit (blau dargestellt). Die Rauigkeitslänge wird in Meter angegeben.	77
Abbildung 5-16:	Klimavielfalt in Hessen. Klassiert ist die fußläufige Entfernung zu frei begehbaren Grünflächen mit komfortableren thermischen Bedingungen innerhalb von Siedlungsgebieten.	78
Abbildung 5-17:	Luftqualität in Hessen. Dargestellt sind die Größen Stickstoffdioxid NO ₂ und Feinstaub PM ₁₀ , zusammengefasst in Form eines Luftqualitätsindex LQI.	79
Abbildung 5-18:	Häufigkeit an Tagen im Jahr, an denen eine Inversion auftritt.	81
Abbildung 5-19:	Die Empfindlichkeit der Bevölkerung ergibt sich aus der Bewertung der Einwohnerdichte je Hektar und der Ortsgröße.	83
Abbildung 5-20:	Bewertung der thermischen Bedingungen.	84
Abbildung 5-21:	Betroffenheit der Bevölkerung unter Berücksichtigung der thermischen Bedingungen und der Einwohnerdichte/Ortsgröße. Nicht dargestellt sind Gebiete mit weniger als 10 Einwohnern pro Hektar.	85
Abbildung 5-22:	Betroffenheit der Bevölkerung unter Berücksichtigung der Luftqualität und der Einwohnerdichte, sowie der Ortsgröße. Nicht dargestellt sind Gebiete mit weniger als 10 Einwohnern pro Hektar.	86
Abbildung 6-1:	Siedlungsgebiete mit sehr großem und großem Flächenanteil mit mittlerer bis extremer thermischer Betroffenheit.	88
Abbildung 6-2:	Bewertung des Ausgleichsraums, welcher für die Belüftung von Siedlungsgebieten (Wirkraum) mit sehr großem und großem Flächenanteil mit mittlerer bis extremer thermischer Betroffenheit sorgt.	93
Abbildung A2-1:	Höhenlage der DWD-Stationen in Hessen.	107
Abbildung A2-2:	Lufttemperaturen der DWD-Stationen in Hessen. Bezugszeitraum 1981 – 2010.	108
Abbildung A2-3:	Langjährige Durchschnittswerte Lufttemperatur in Hessen. Bezugszeitraum 1981 – 2010 (Quelle: ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/grids_germany/multi_annual/). ...	109
Abbildung A2-4:	Eistage (links) und Frosttage (rechts) in Hessen. Bezugszeitraum 1981 – 2010. (Quelle: ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/grids_germany/multi_annual/).	110
Abbildung A2-5:	Eistage in Hessen. Bezugszeitraum 1981 – 2010.	110
Abbildung A2-6:	Sommertage (links) und Heiße Tage (rechts) in Hessen. Bezugszeitraum 1981 – 2010 (Quelle: ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/grids_germany/multi_annual/).	111
Abbildung A2-7:	Heiße Tage in Hessen. Bezugszeitraum 1981 – 2010.	111
Abbildung A2-8:	Tage mit Wärmebelastung. Bezugszeitraum 1971 – 2000.	112
Abbildung A2-9:	Häufigkeitsverteilung der thermischen Belastungsklassen für die Stationen Kassel (oben), Kleiner Feldberg (Mitte) und Frankfurt/ Main (unten) für den Zeitraum 2003-2015. Die Legende richtet sich nach Tabelle 3-1 (mittlere Spalte).	114
Abbildung A2-10:	Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen an den verschiedenen Stationen des DWD und des HLNUG. Je länger ein Balken, desto öfter kommt der Wind aus dieser Richtung.	115

Abbildung A2-11: Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen (Kaltluftwindrosen) an den verschiedenen Stationen des DWD in den Nachtstunden mit Bewölkung von weniger als 2/8. Blau eingefärbt sind die relativ zum umgebenden Gelände höher gelegenen Messstationen, lila die tiefer gelegenen Messstationen. 116

Zusammenfassung

Durch den anthropogenen Klimawandel wird im 21. Jahrhundert neben dem Anstieg der mittleren Lufttemperaturen auch eine Zunahme der Dauer, Intensität und Häufigkeit von →**Hitzewellen**¹ und Anzahl →**Heißer Tage** erwartet. Da die zunehmende Wärmebelastung mit steigenden Gesundheitsrisiken einhergehen kann, ist während solcher thermisch belastenden Wetterlagen die Abkühlung, insbesondere in den Nachtstunden, für die menschliche Regeneration von besonderer Bedeutung.

Dicht bebaute Siedlungsgebiete weisen nachts u.a. durch die Wärmespeicherfähigkeit von Straßen- und Gebäudeoberflächen bei windschwachen Strahlungswetterlagen eine deutlich höhere Lufttemperatur auf als die des umgebenden Umlandes (Temperaturdifferenzen in Ausnahmefällen bis zu 10 K²). Entsprechend kommt dem Erhalt von Freiflächen, die ein hohes Ausgleichspotenzial für thermisch belastete Siedlungsgebiete aufweisen, d.h. die zu einer nächtlichen Abkühlung der Siedlungsgebiete führen, eine besondere Bedeutung zu. Die vom Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen – als Datengrundlage für die Regionalplanung und die Regionale Flächennutzungsplanung – in Auftrag gegebene landesweite Klimaanalyse Hessen erhebt flächendeckende Daten zur Ermittlung der thermisch belasteten Siedlungsgebiete (→**Wirkraum**) und der ausgleichend wirkenden, regional bedeutsamen →**Strömungssysteme** einschließlich der dazugehörigen kaltluftproduzierenden Freiflächen und →**Luftleitbahnen** (→ **Ausgleichsraum**, vgl. Abbildung 3-8).

Gemäß den landesplanerischen Vorgaben sind in den Regionalplänen „die regional bedeutsamen Luftleitbahnen sowie die für das Siedlungsgebiet bedeutsamen Flächen des Freiraums (→**Kaltluft-** und →**Frischluf**tentstehungsgebiete), die im räumlichen Zusammenhang mit lufthygienisch und/oder thermisch belasteten Siedlungsräumen stehen und wichtige Aufgaben für den Klima- und Immissionsschutz wahrnehmen“, als →**Vorranggebiet** bzw. →**Vorbehaltsgebiet** für besondere Klimafunktionen festzulegen (Planziffer 4.2.3-3 (Z) der 3. Änderung des Landesentwicklungsplans Hessen 2000). Diese Untersuchung stellt eine wesentliche, flächendeckend methodisch einheitliche Datengrundlage für die planerische Sicherung entsprechender klimarelevanter Freiflächen und die Berücksichtigung des Schutzgutes Klima in der Abwägung dar. Die landesweite Klimaanalyse Hessen verfolgt einen anthropozentrischen Ansatz mit dem Ziel, für die ermittelten regionalplanerisch bedeutsamen thermisch belasteten Siedlungsgebiete (regionalbedeutsame Wirkräume) durch raumordnerische Festlegungen eine Aufrechterhaltung der relevanten, zur Abkühlung beitragenden Kaltluftentstehungsgebiete und zugehörigen Luftleitbahnen zu bewirken. Die Festlegung der Vorrang- bzw. Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen³ bleibt dem Träger der Regionalplanung vorbehalten.

Die landesweite Klimaanalyse basiert auf umfangreichen Modellrechnungen mit dem prognostischen mesoskaligen Strömungsmodell FITNAH. Dieses Modell löst die Erhaltungsgleichungen

¹ Die Glossareinträge werden bei ihrem ersten Auftreten referenziert.

² Temperaturdifferenzen werden in Kelvin (K), die absolute Temperatur in Grad Celsius (°C) angegeben.

³ Die Regionalplanung verfügt über zahlreiche freiraumsichernde Instrumente, mit denen weitere klimabedeutsame Freiflächen planerisch gesichert werden können.

für Masse, Impuls und Energie auf einem dreidimensionalen geländefolgenden Raster. Eingangsdaten sind das digitale Höhenmodell, die Landnutzung und der Anfangszustand der Atmosphäre.

Zur Berücksichtigung des Klimawandels werden meteorologische Größen aus mehreren Regionalen Klimamodellen (EURO-CORDEX-Daten) für die Zeiträume 2031 – 2060 und 2071 – 2100 ausgewertet (Multi-Modell-Multi-Szenario-Ensemble, siehe Kapitel 4.1.4).

Thermisch belastende Situationen treten vorzugsweise bei sogenannten →**autochthonen Wetterlagen** auf, d.h. bei windschwachen Wetterlagen mit geringer Bewölkung. Lokalklimatische Besonderheiten können sich unter diesen Bedingungen gut ausbilden (siehe VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1:2015). Deshalb wird diesen Situationen besonderes Augenmerk geschenkt.

Zur Quantifizierung der auf den Menschen wirkenden thermischen Belastungssituationen dienen Methoden der →**Human-Biometeorologie**. Mit Hilfe der auf der menschlichen Energiebilanz basierenden thermischen Indizes, wie der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (→**PET**), kann unter Berücksichtigung der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit und der Strahlungsflüsse die Häufigkeit und Intensität der thermischen Belastung flächendeckend in ganz Hessen quantifiziert werden. Auf der Grundlage der Daten der Regionalen Klimamodelle (Multi-Modell-Multi-Szenario) kann, ausgehend von der jetzigen Belastungssituation, auf die zukünftig zu erwartenden thermischen Bedingungen geschlossen werden.

Im Rahmen der landesweiten Klimaanalyse hängt die Bewertung der Strömungssysteme und der dazugehörigen kaltluftproduzierenden Freiflächen und Luftleitbahnen zum einen von der Qualität des Strömungssystems (→**Volumenstromdichte**), zum anderen von der Belastungssituation und der Empfindlichkeit der belüfteten Flächen ab. Nach Simulation der hoch aufgelösten Strömungs- und Temperaturverhältnisse wurden die thermischen Bedingungen bestimmt. Die Ermittlung der Betroffenheit erfolgt unter Berücksichtigung der Einwohnerdichte und der Ortsgröße (Empfindlichkeit).

Empfindlichkeit <i>(Einwohnerdichte pro Hektar + Ortsgröße)</i>	+ thermische / lufthygienische Bedingungen <i>(PET, Anzahl Sommertage, nächtliche Lufttemperatur / Feinstaub und NO₂)</i>	= Betroffenheit
--	---	-----------------

Je größer das Siedlungsgebiet, je höher die Einwohnerdichte und je ausgeprägter die thermischen / lufthygienischen Belastungen, desto höher ist die Betroffenheit und umso höher wird die Relevanz des zugehörigen Strömungssystems eingestuft.

Auch wenn es zu einzelnen Fragestellungen der Bearbeitung VDI-Richtlinien und Verordnungen gibt, existieren bis heute keine Grenzwerte und Maßstäbe zur Bewertung bzw. zur planerischen Festlegung regional bedeutsamer Kaltluftströmungen. Die Simulationsergebnisse sind immer in Bezug zum jeweils zugrunde liegenden Untersuchungsraum zu interpretieren⁴.

⁴ So ist beispielsweise ein Temperaturwert (z.B. 30 °C) in durchschnittlich wärmeren Gebieten anders zu interpretieren als in durchschnittlich kühleren Gebieten, in denen dieser Temperaturwert nie oder sehr selten erreicht wird.

1 Einführung und Aufgabenstellung

Im Jahr 2020 umfasste die Bevölkerung im Bundesland Hessen ungefähr 6,29 Millionen Einwohner⁵. Über 63 % der Einwohner leben in der Planungsregion Südhessen (Regierungsbezirk Darmstadt), die mit der Finanzmetropole Frankfurt am Main und den Städten Wiesbaden, Darmstadt, Offenbach und Hanau zu den am dichtesten besiedelten Regionen Deutschlands zählt. Gleichzeitig gehören Bereiche der Planungsregion Südhessen (insb. das Rhein-Main-Gebiet) im bundesweiten Vergleich zu den wärmsten Regionen Deutschlands⁶, während in Mittel- und Nordhessen günstigere thermische Verhältnisse angetroffen werden.

Durch den anthropogenen Klimawandel wird im 21. Jahrhundert ein Anstieg der mittleren →**Lufttemperatur**, der Dauer, Intensität und Häufigkeit von Hitzewellen und der Anzahl an heißen Tagen erwartet (Schär et al. 2004; Christidis et al. 2015). Die →**Vulnerabilität** der europäischen und auch deutschen Bevölkerung wurde bereits bei der Hitzewelle 2003 offensichtlich, als die hitzebedingte →**Mortalität** europaweit mit mehreren zehntausend Fällen beziffert wurde (Robine et al. 2008). Während Hitzewellen besonders betroffen sind üblicherweise Kleinkinder, alte und gesundheitlich vorbelastete Menschen oder Menschen mit niedrigerem Sozialstatus, die in Städten leben (Basu, 2009). Das reduzierte Leistungsvermögen wirkt sich zudem negativ auf die Volkswirtschaft aus (Zander et al. 2015).

Das thermische Empfinden des Menschen ist neben der Lufttemperatur von der Windgeschwindigkeit, den Strahlungsflüssen und der Luftfeuchtigkeit abhängig. So empfindet der Mensch eine Hitzewelle, kombiniert mit hoher Luftfeuchtigkeit, als körperlich belastender, da bei einer Lufttemperatur oberhalb der Hauttemperatur Wärme besonders über die Verdunstung von Schweiß abgegeben werden kann. Diese Verdunstungsrate sinkt mit steigender Luftfeuchtigkeit und nachlassender Windgeschwindigkeit.

Für die physiologische Regeneration spielt die nächtliche Abkühlung eine wichtige Rolle. Da die Bevölkerung nachts meist an ihren jeweiligen Wohnort gebunden ist, kommt der Abkühlung der Wohn-/Siedlungsgebiete eine besondere Bedeutung zu. In Städten kühlt die Luft weitaus weniger ab als im umgebenden Umland. Dieses Phänomen wird →**urbane Wärmeinsel** (siehe auch Kapitel 3.2.1.1) genannt. Die Zufuhr von – möglichst unbelasteter – →**Kaltluft** in die urbanen Siedlungsräume ist daher von hohem Stellenwert für die Gesundheit und die Lebensqualität der Stadtbevölkerung. Eine Abkühlung für die städtische Bevölkerung kann durch →**Kaltluftabflüsse** und →**Flurwind** als Teil der Strömungssysteme herbeigeführt werden. Diesen kommt daher besonders in lufthygienisch und/oder thermisch belasteten, dicht besiedelten Gebieten eine große Bedeutung zu. Die vom Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen (oberste Landesplanungsbehörde) beauftragte landesweite Klimaanalyse Hessen stellt eine wesentliche, flächendeckend methodisch einheitliche Datengrundlage für die planerische Sicherung regional/überörtlich bedeutsamer klimarelevanter Freiflächen sowie die Berücksichtigung des

⁵ https://statistik.hessen.de/sites/statistik.hessen.de/files/A16_j20.pdf

⁶ *Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes* (https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html, Stand August 2018)

Schutzgutes Klima in der Abwägung dar. Im Fokus stehen sommerliche austauscharme Wetterlagen mit geringem übergeordnetem Wind und geringer Bewölkung (autochthone Wetterlage), da sich unter diesen Bedingungen lokalklimatische Besonderheiten am deutlichsten herausbilden.

Um relevante Strömungssysteme (Kapitel 4.2.2.1) und die zugrundeliegenden Kaltluftproduktionsgebiete (Kapitel 4.2.2.3) und Luftleitbahnen (Kapitel 4.2.2.2) zu identifizieren, müssen die räumlichen Wirkungszusammenhänge zwischen den thermisch und/oder lufthygienisch belasteten Räumen (→**Wirkraum**) und den ihnen zugeordneten →**Ausgleichsräumen** ermittelt werden.

Die Belastungssituation in den Wirkräumen (Kapitel 4.2.4) wird anhand der in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Parameter (Ungunfstaktoren) ermittelt. Zusammen mit der Empfindlichkeit der Bevölkerung (Kapitel 4.2.4.1), die im Rahmen der landesweiten Klimaanalyse über die Einwohnerdichte pro Hektar und die Ortsgröße abgebildet wird, kann der Grad der Betroffenheit (Kapitel 4.2.4.3) bestimmt werden.

Die thermischen Bedingungen werden für die Tag- und Nachtsituation (mittags um 13:00 Uhr und nachts um 22:00 Uhr und 04:00 Uhr →**Wahre Ortszeit**) simuliert (Kapitel 4.2.1 und 4.2.3.2). Zur Quantifizierung der Wirkung der thermischen Bedingungen auf den Menschen werden humanbiometeorologische Methoden herangezogen (Kapitel 3.2.2). Mit Hilfe eines auf der menschlichen Energiebilanz basierenden thermischen Index, der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (→**PET**), kann unter Berücksichtigung der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit und der Strahlungsflüsse die →**Wärmebelastung** des Menschen flächendeckend quantifiziert werden. Da PET und die Lufttemperatur nachts durch das Fehlen der kurzwelligen Strahlungsflüsse sehr gut korrelieren, wird zur Ermittlung der Nachtsituation (22:00 Uhr und 04:00 Uhr) die Lufttemperatur zur Analyse der thermischen Bedingungen herangezogen.

Auf der Grundlage von Daten „Regionaler Klimamodelle“ (EURO-CORDEX) kann, ausgehend von der jetzigen Belastungssituation, auf die zukünftig zu erwartenden thermischen Bedingungen im Zuge des Klimawandels geschlossen werden (Multi-Modell-Multi-Szenario-Ensemble). Dazu werden die Klimanormalperioden⁷ 2031 – 2060 und 2071 – 2100 betrachtet (siehe Kapitel 4.2.1.5).

Die lufthygienische Belastung wird anhand der aktuell dominierenden Größen Stickstoffdioxid (NO₂) und Feinstaub (PM₁₀) quantifiziert (Kapitel 4.2.3.1). Die Grenzwerte für Stickstoffdioxid werden in vielen Städten an Hauptverkehrsstraßen überschritten. Die Feinstaubkonzentration ist dahingegen rückläufig, allerdings zählen Feinstäube zu den kanzerogenen Stoffen. Die Konzentration anderer Luftschadstoffe wie Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid, Blei und Benzol hat in den letzten Jahren und Jahrzehnten stark abgenommen, sie liegt deutlich unter den in der TA-Luft definierten Grenzwerten.

Die Bewertung der klimarelevanten Flächen in den Ausgleichsräumen erfordert die Betrachtung der Betroffenheit. Die Betroffenheit wird berechnet aus der Zusammenschau der Empfindlichkeit, welche in Form der Einwohnerdichte pro Hektar und der Ortsgröße eingeht, und den thermischen Bedingungen. Die thermischen Bedingungen ergeben sich aus der Intensität (PET und nächtliche

⁷ Die Klimanormalperiode ist ein von der Weltorganisation für Meteorologie festgelegter Zeitraum von 30 Jahren. Für diesen Zeitraum werden statistische Kenngrößen der Klimadaten berechnet und vergleichend herangezogen.

Lufttemperatur) und der Häufigkeit (Anzahl an →**Sommertagen**) belastender Situationen (Kapitel 4.2.4). Im Kapitel 4.2.5 wird dargelegt, wie auf dieser Basis die Auswahl der regionalplanerisch relevanten thermisch belasteten Siedlungsgebiete erfolgt.

Für diese Siedlungsgebiete wurden die für die Belüftung relevanten Strömungssysteme und die dazugehörigen Ausgleichsräume identifiziert (Kapitel 4.2.6). Die Bewertung der Strömungssysteme hängt im Kontext der landesweiten Klimaanalyse vom Ausgleichspotential sowie der Eigenschaften der Strömungssysteme (z.B. Volumenstromdichte) ab. Das Ausgleichspotential wird ermittelt aus der Summe der thermischen Betroffenheit der belüfteten Fläche (Kapitel 4.2.6). Strömungssysteme, die auf Siedlungsgebiete mit hoher Betroffenheit treffen, haben eine größere Relevanz als Strömungssysteme, die gering betroffene Siedlungsgebiete belüften.

Im vorliegenden Bericht werden zunächst die Bedeutung von Klima und Luftqualität in der räumlichen Planung (Kapitel 2) und anschließend die wesentlichen klimatischen Zusammenhänge und Grundlagen erläutert (Kapitel 3). Kapitel 4 stellt die Datenbasis und die Methodik der landesweiten Klimaanalyse Hessen dar, bevor im Kapitel 5 die zentralen Ergebnisse vorgestellt werden. Kapitel 6 erläutert die Übersetzung der Analyseergebnisse in regionalplanerische Gebietskategorien und beschreibt die gutachterlichen Handlungsempfehlungen.

1.1 Ziel der landesweiten Klimaanalyse

Das Ziel der landesweiten Klimaanalyse ist die Ermittlung der thermisch/lufthygienisch belasteten (Siedlungs-)Räume sowie die Identifizierung der möglichst unbelasteten Luftleitbahnen einschließlich der ihnen zugeordneten Kaltluftproduktionsgebiete, die eine ausgleichende Wirkung (Ausgleichsraum) auf die belasteten Wirkräume ausüben können. Darüber hinaus stellen die simulierten meteorologischen Größen (z.B. Windrichtung, Windgeschwindigkeiten und Volumenstromdichte) wichtige Grundlagen für die Berücksichtigung des Schutzgutes Klima in der planerischen Abwägung der Regionalplanung dar.

Es werden sowohl die Gunstfaktoren, wie die Strömungssysteme (→**Kaltluftabfluss** und →**Flurwind**), die Luftleitbahnen, die →**Kaltluftproduktionsgebiete** und die Klimavielfalt als auch die Ungunstfaktoren, wie die Luftqualität und die thermischen Bedingungen, untersucht.

Anschließend erfolgt eine Bewertung der Ausgleichsräume, die für die Belüftung von Siedlungsgebieten (Wirkraum) sorgen. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage zur regionalplanerischen Festlegung von Gebieten für besondere Klimafunktionen, die für die Erhaltung der Strömungssysteme und die Durchlüftung von belasteten Siedlungsgebieten mit großem/sehr großem Flächenanteil mit entsprechend hoher thermischer Betroffenheit von signifikanter Bedeutung sind.

Dabei werden gemäß dem planerischen Vorsorgeprinzip die zu erwartenden Klimaänderungen durch den Klimawandel mitberücksichtigt. Dies erfolgt u.a. durch die entsprechende Gewichtung der Empfindlichkeit (ermittelt aus der Ortsgröße und der Einwohnerdichte) und der thermischen Belastung.

1.2 Anwendungsbereich der landesweiten Klimaanalyse

Die landesweite Klimaanalyse stellt eine wesentliche Datengrundlage im Rahmen der Neuaufstellung der Regionalpläne in Hessen (Maßstab 1:100.000) und des Regionalen Flächennutzungsplans im Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main (Maßstab 1:25.000) dar.

Die FITNAH-Modellrechnungen der meteorologischen Größen (z.B. Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit) wurden mit einer für diese Fragestellung optimierten →**Auflösung** von 200 m x 200 m (Hessen) bzw. 50 m x 50 m (Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main) durchgeführt. Die Auflösung der thematischen Fachkarten wird laut VDI 3787 Blatt 1:2015 den Maßstäben der Regionalplanung (1:100.000) und des Regionalen Flächennutzungsplans (1:25.000) gerecht. Die Eingangsdaten, wie z.B. die Landnutzung und das digitale Geländemodell wurden jedoch in einer deutlich höheren Auflösung berücksichtigt (siehe Tabelle 4-1, Tabelle 4-3).

Die im Rahmen der landesweiten Klimaanalyse erarbeiteten Ergebnisse bilden die Grundlage für Untersuchungen auf den nachgeordneten Planungsebenen, wie z.B. in der Bauleitplanung⁸ oder detaillierten Fachplanungen. Die landesweite Klimaanalyse Hessen erfolgt aus regionaler und überörtlicher Perspektive - einzelfallbezogene Lokalklima-Studien können mit höheren Auflösungen von unter 50 m x 50 m durchgeführt werden, um die vorhandenen feineren Strukturen besser auflösen bzw. abbilden zu können (z.B. Kaltluftstau an Straßen- und Bahndämmen). In der Bauleitplanung/Projektplanung sind →**Mikroklimatische** Untersuchungen empfehlenswert. Dabei können dann auch ggf. weitere Aspekte, wie z.B. eine verfeinerte Bevölkerungsstruktur (z.B. Unterscheidung nach Altersgruppen) oder das Vorhandensein besonders sensibler Nutzungen (z.B. Krankenhäuser und Altenheime) einbezogen werden.

⁸ Für das Gebiet des Ballungsraums Frankfurt/Rhein-Main bezieht sich dies nur auf die verbindliche Bauleitplanung.

2 Bedeutung von Klima und Luft in der räumlichen Planung

Klima und Luft sind Bestandteile des Ökosystems und wirken unter anderem über Niederschlag, Sonneneinstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftqualität auf den →**Landschaftshaushalt**, die Artenvielfalt und das Wohlbefinden, die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit des Menschen. Damit haben klimatische und lufthygienische Bedingungen eine große Bedeutung für Wohn- und Arbeitsverhältnisse, Erholung und Tourismus, für die Landwirtschaft sowie für die Lebensräume von Tieren und Pflanzen.

Belastungen der Umwelt entstehen u.a. durch die Inanspruchnahme von Freiflächen, insbesondere für die Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung, und dem damit einhergehenden Verlust unversiegelter, naturnaher Flächen, einem erhöhten Material- und Energieverbrauch sowie einem Anstieg verkehrsbedingter Emissionen. Deshalb ist der Vorsorgegrundsatz in der raumbezogenen Planung von enormer Bedeutung. Die Herausforderung besteht darin, die auf den jeweiligen Planungsebenen angemessenen und ggf. auf den nachfolgenden Planungsebenen zu konkretisierenden Vorgaben (hier: Schutz klimarelevanter Flächen) zu verankern. Dabei sind Wechselwirkungen mit anderen flächenrelevanten Nutzungen und Funktionen zu berücksichtigen und in Bezug zu anderen Belangen in die Abwägung einzustellen.

Die **Europäische Union** unterstützt die Mitgliedsstaaten in der Raumordnung durch Instrumente und Initiativen wie z.B. die Territoriale Agenda der EU und die Leipzig Charta zur nachhaltigen europäischen Stadt, oder wirkt durch Richtlinien, wie z.B. der FFH-Richtlinie oder der Richtlinie über die Prüfung der Umweltauswirkungen bestimmter Pläne und Programme (Strategische Umweltprüfung, kurz SUP), auf die Planungs- bzw. Prüfmechanismen ein.

Die **Raumordnung in Deutschland** wird durch die föderalistische Staatsordnung mit den drei Ebenen Bund, Länder und Gemeinden bestimmt, wobei die Kompetenz- und Aufgabenverteilung rechtlich, organisatorisch und inhaltlich in den voneinander abgegrenzten Planungsebenen aufgeteilt ist.

Die Raumordnung **des Bundes** beschränkt sich mit wenigen Ausnahmen (z.B. vorbeugender Hochwasserschutz)⁹ im Wesentlichen auf die Entwicklung von Leitbildern und Grundsätzen der Raumordnung.

Die im Raumordnungsgesetz (ROG, 2008, i. d. F v. 2020-06) in § 2 Abs. 2 verankerten Grundsätze der Raumordnung sollen im Sinne der Leitvorstellung einer nachhaltigen Raumentwicklung durch Festlegungen in den Raumordnungsplänen (landesweiter Raumordnungsplan und Raumordnungspläne für die Teilräume der Länder) konkretisiert werden. Die wesentlichen Grundsätze zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel, die in der planerischen Abwägung zunächst gleichwertig neben den weiteren Belangen stehen, sind insbesondere:

- Sicherung klimatisch bedeutsamer Freiräume bzw. Wiederherstellung ihrer klimatischen Funktionen (§ 2 Abs. 2 Nr. 6 ROG).

Am 1. September 2021 ist die Verordnung über die Raumordnung im Bund für einen länderübergreifenden Hochwasserschutz in Kraft getreten.

- Sicherung von Flächen zum vorbeugenden Hochwasserschutz, zur Verbesserung der Siedlungsstruktur durch großräumig übergreifende Freiräume und Freiraumschutz (§ 2 Abs. 2 Nr. 6 ROG).

Den räumlichen Erfordernissen des Klimaschutzes trägt der in § 2 Abs. 2 Nr. 6 ROG verankerte raumordnerische Grundsatz Rechnung. Er unterscheidet zwischen Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, und solchen, die der Anpassung an den Klimawandel dienen. Dabei sind die räumlichen Voraussetzungen für den Ausbau der erneuerbaren Energien, für eine sparsame Energienutzung sowie für den Erhalt und die Entwicklung natürlicher Senken für klimaschädliche Stoffe und für die Einlagerung dieser Stoffe zu schaffen. Die Umsetzung des Grundsatzes erfolgt durch Instrumente der Raumordnung zur Gestaltung von CO₂-armen und energieeffizienten Raumstrukturen.

In den Raumordnungsplänen sind die Grundsätze der Raumordnung des Bundes (§ 2 Abs. 2 ROG) über Festlegungen als Ziele und Grundsätze der Raumordnung zur Entwicklung, Ordnung und Sicherung des Raums, insbesondere zu den Nutzungen und Funktionen des Raums, zu treffen. Die räumliche Konkretisierung durch Gebietsfestlegung erfolgt als Vorrang- bzw. Vorbehaltsgebiete.

Vorranggebiete (Ziel der Raumordnung) sind Gebiete, die für bestimmte raumbedeutsame Funktionen oder Nutzungen vorgesehen sind und andere raumbedeutsame Funktionen und Nutzungen in diesem Gebiet *ausschließen*, soweit diese mit den vorrangigen Funktionen oder Nutzungen nicht vereinbar sind.

Vorbehaltsgebiete (Grundsatz der Raumordnung) sind Gebiete, in denen bestimmten raumbedeutsamen Funktionen oder Nutzungen bei der Abwägung mit konkurrierenden raumbedeutsamen Funktionen und Nutzungen *besonderes Gewicht* beizumessen ist.

Bei der Aufstellung der Raumordnungspläne ist eine Umweltprüfung durchzuführen (§ 8 ROG). In dieser sollen die erheblichen Auswirkungen einer Planung auf die Umwelt (u.a. Festlegungen zur Anpassung an den Klimawandel/Hochwasserschutz) frühzeitig ermittelt, beschrieben und bewertet werden.

Das Hessische Landesplanungsgesetz (HLPG, 2012, i. d. F. v. 2020-05) enthält Regelungen, die das Raumordnungsgesetz ergänzen.

Die **Landesplanung in Hessen** konkretisiert die Grundsätze der Raumordnung des Bundes (§ 2 Abs. 2 ROG) im Landesentwicklungsplan Hessen (landesweiter Raumordnungsplan) und in den Regionalplänen (Raumordnungspläne für die Teilräume des Landes).

Entsprechend den Vorgaben der 3. Änderung des Landesentwicklungsplans Hessen 2000 sind Freiflächen „die im räumlichen Zusammenhang mit lufthygienisch und/oder bioklimatisch belasteten Siedlungsräumen stehen und wichtige Aufgaben für den Klima- und Immissionsschutz wahrnehmen, in den Regionalplänen als Vorrang- bzw. Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen festzulegen“ (Planziffer 4.2.3-3).

Die **kommunale Planungshoheit** umfasst das Recht der Gebietskörperschaften, die jeweilige städtebauliche Entwicklung im Rahmen der Bauleitplanung eigenverantwortlich zu gestalten. Die

Bauleitplanung ist zweistufig aufgebaut: Für das gesamte Gemeindegebiet stellt der Flächennutzungsplan (vorbereitender Bauleitplan) die sich aus der beabsichtigten städtebaulichen Entwicklung ergebende Art der Bodennutzung in den Grundzügen dar. Der Bebauungsplan (verbindlicher Bauleitplan) konkretisiert diese für einzelne Teile des Gemeindegebietes. Die Bauleitpläne sind den Zielen der Raumordnung anzupassen. Für den Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main übernimmt der Regionalplan der Planungsregion Südhessen zugleich die Funktion eines gemeinsamen Flächennutzungsplans nach § 204 BauGB (Regionaler Flächennutzungsplan).

Das **Baugesetzbuch** (BauGB, 1960, i. d. F. v. 2017-11) sieht zur Berücksichtigung von Klimaschutz und Klimaanpassung vor, dass

- bei der Aufstellung von Bauleitplänen insbesondere der Naturhaushalt, Wasser, Luft, Boden, Klima, der Mensch und seine Gesundheit sowie die Bevölkerung insgesamt zu berücksichtigen sind (§ 1 Abs. 6 Nr. 7 BauGB).
- den Erfordernissen des Klimaschutzes sowohl durch Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, als auch durch solche, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, Rechnung getragen werden soll. Der Grundsatz nach Satz 1 ist in der Abwägung nach § 1 Absatz 7 zu berücksichtigen (§ 1a Abs. 5 BauGB).
- im Flächennutzungsplan Flächen einer Gemeinde dargestellt werden können, die dem Klimaschutz oder der Klimaanpassung dienen (§ 5 Abs. 2 BauGB).

Auch in den Bebauungsplänen sind zahlreiche Festsetzungen möglich, die dem Klimaschutz (z.B. § 9 Abs. 1 Nr. 12 BauGB) und der Anpassung an den Klimawandel dienen. Hierbei zeichnen sich zahlreiche Synergien mit dem Hochwasserschutz, dem Schutz von landwirtschaftlich genutzten Flächen, dem Schutz der Biodiversität sowie dem menschlichen Wohlergehen ab.

Während die Luftqualität in europäischen Richtlinien (z.B. Richtlinie 2008/50/EG) und im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG, 2013, i. d. F. v. 2020-06) gesetzlich geregelt und durch die Festlegung von Grenzwerten für Emissionen und Immissionen konkretisiert ist, gibt es bislang keine rechtlich verbindlichen Grenzwerte zur Beurteilung der thermischen sowie human-biometeorologischen Bedingungen. Einzig die Richtlinie für Kur- und Erholungsorte (VDI 3787 Blatt 10:2010) behandelt die Anforderungen an Lärm, Luftgüte und die human-biometeorologischen Bedingungen für die Prädikatisierung von Luftkurorten, Erholungsorten und Heilbrunnen. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung wurden gemäß der VDI 3787 Blatt 2:2008 herangezogen. Die VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5:2003 stellt einen Leitfaden zur Untersuchung der Entstehung und Wirkung der Kaltluft dar und bildet damit eine wichtige Grundlage für die landesweite Klimaanalyse Hessen. Zur Bewertung der thermischen und lufthygienischen Situation und zur Erarbeitung von Planungshinweisen wurde die VDI 3787 Blatt 1:2015 zugrunde gelegt.

3 Meteorologische Grundlagen

In den folgenden Abschnitten werden die für die landesweite Klimaanalyse Hessen relevanten meteorologischen Phänomene beschrieben und die dazugehörigen Fachtermini aus der Meteorologie und Klimatologie definiert und erläutert.

3.1 Skalen in der Meteorologie

Die landesweite Klimaanalyse Hessen, als wesentliche Datengrundlage für die Regionalplanung bzw. Regionale Flächennutzungsplanung, bewegt sich zwischen der mesoklimatischen und mikroklimatischen Skala.

Das →**Mesoklima** wird von großskaligen und kleinskaligen Prozessen beeinflusst. Die Skalen der mesoskaligen Phänomene umfassen etwa eine horizontale Ausdehnung von ca. 1 bis 2.000 km und eine typische Lebensdauer von einer Stunde bis hin zu einer Woche. Geländeform, Hangneigung und Beschaffenheit der Erdoberfläche sind dabei wichtige Parameter. Typische Prozesse des Mesoklimas sind Fronten von Tiefdruckgebieten und Gewitter, aber auch viele Phänomene des Stadt- bzw. Regionalklimas (wie z.B. die urbane Wärmeinsel) können dem Mesoklima zugeordnet werden. Im Allgemeinen bilden sich innerhalb des Mesoklimas zahlreiche differenzierte Mikroklimata durch die auf kleinstem Raum wechselnden Landnutzungsarten aus.

Das Mikroklima beschreibt die meteorologischen/klimatischen Verhältnisse in Bodennähe. Nach Orlanski (1975) werden atmosphärische Prozesse mit einer horizontalen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis einigen hundert Metern der Mikroskala zugeordnet. Es ist somit von großer Bedeutung für die Lebensqualität der Menschen. Das Mikroklima wird von der Oberflächenbeschaffenheit (Bodenart, Vegetation, ...) sowie den lokalen Strahlungsflüssen beeinflusst. In Siedlungsgebieten nehmen die Bauwerke mit ihren Geometrien, Materialien und Farben Einfluss auf die Strahlungsflüsse, auf den Wind (Gebäudeumströmung) und die Ausbildung lokaler Turbulenz. Mikroklimata umfassen Gebiete von wenigen Metern (Schatten von Gebäuden) bis hin zu einigen Kilometern (z.B. ausgedehnte Parkflächen).

Bei der Erarbeitung der modellgestützten landesweiten Klimaanalyse Hessen stehen gemäß der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1:2015 austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen im Vordergrund, da bei diesen (sogenannten autochthonen) Wetterlagen lokalklimatische Besonderheiten, wie z.B. die Ausbildung einer Vielzahl von Mikroklimaten auf engstem Raum, begünstigt werden.

3.2 Thermische Komponente des Klimas

3.2.1 Lufttemperatur

Die bodennahe Lufttemperatur weist in Mitteleuropa einen ausgeprägten Jahres- und Tagesgang auf, da sie mit der Energiebilanz der Erdoberfläche direkt verknüpft ist. Somit spielen Landnutzung und Topografie (Geländehöhe, Ausrichtung zur Sonne) eine wichtige Rolle. Die Lufttemperatur nimmt mit der Höhe relativ rasch ab, im Mittel um $-0,65 \text{ K je } 100 \text{ m}$. Auch mit zunehmender geographischer Breite geht die mittlere Lufttemperatur mit ca. $1 \text{ K pro } 1.000 \text{ km}$ zurück. Die bodennahe Lufttemperatur wird entsprechend der Richtlinien der Weltorganisation für Meteorologie

(WMO) und des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2020a) in 2 m über Grund ohne die direkte Einwirkung von Strahlungsflüssen¹⁰ und bei guter Durchlüftung gemessen.

3.2.1.1 Urbane Wärmeinsel

Siedlungsgebiete bewirken eine Störung des physikalischen und chemischen Zustands der Atmosphäre innerhalb der →**Planetaren Grenzschicht**. Als Gebiet mit unregelmäßig erhöhter →**Rauigkeit** stellen sie ein Strömungshindernis dar und bewirken im Allgemeinen eine Verringerung der Windgeschwindigkeit. Anthropogene Emissionen führen zu einer erhöhten Luftbelastung und zu einem erhöhten Wasserdampfgehalt. Zudem sorgt die anthropogene Wärmeproduktion (siehe Kap 3.2.1.2) für höhere Energieeinträge und kann so für ein höheres Lufttemperatur-Niveau ursächlich sein.

Der direkte Anteil der →**Globalstrahlung** nimmt in Siedlungsgebieten im Vergleich zum ländlichen Umland aufgrund des erhöhten Wasserdampfgehalts¹¹ und der Luftverunreinigung um bis zu 10 % ab, während der Anteil der diffusen Strahlung und der →**atmosphärischen Gegenstrahlung** um jeweils 10 % zunehmen (Hupfer und Kuttler, 2005). Die langwellige Ausstrahlung (und damit der Wärmetransport) von der Erdoberfläche in die Atmosphäre wird zudem durch die dreidimensional stark zerklüfteten Oberflächenstrukturen spürbar reduziert (Oke, 1973).

Der Fluss fühlbarer Wärme¹² nimmt in Städten um bis zu 50 % zu (Hupfer und Kuttler, 2005), da durch den hohen Versiegelungsgrad die Wasserspeicherung gering ist und das →**Bowen-Verhältnis** ansteigt. Dadurch kommt es tagsüber zu einem stärkeren Anstieg der Lufttemperatur, weil weniger Energie für die Verdunstung verbraucht wird und dafür mehr Energie für die Aufheizung der Luft zur Verfügung steht.

Das erhöhte Absorptionsvermögen der Baumaterialien sowie die spezifische Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherung führen ebenfalls zu einer Modifizierung der Energiebilanz und damit auch der Lufttemperatur. Die Baumaterialien nehmen tagsüber Energie auf, speichern sie und geben sie nach Sonnenuntergang wieder an die Atmosphäre ab. So bildet sich die sogenannte urbane Wärmeinsel in größeren zusammenhängenden Siedlungsgebieten aus, wenn Luft- und Oberflächentemperatur dort höher bleiben als im abkühlenden ländlichen Umland. Die Lufttemperatur kann zwischen Sonnenuntergang und -aufgang in Siedlungsgebieten in Ausnahmefällen bis zu 10 K höher sein als im Umland (Oke, 1981).

3.2.1.2 Anthropogener Wärmestrom

Der anthropogene Wärmestrom beschreibt die Energiezufuhr durch vom Menschen und insbesondere seine Aktivitäten verursachte Energieeinträge in die bodennahe Atmosphäre (Abwärme entsteht z.B. durch das Heizen von Gebäuden oder Wärmefreisetzung bei industrieller Produktion). Wärmere Luft hat die Tendenz aufzusteigen, da sie spezifisch leichter ist als kühlere Um-

¹⁰ d.h. Messungen der Lufttemperatur erfolgen in „Wetterhütten“, die die direkte Sonnenstrahlung abschatten.

¹¹ Mit steigender Temperatur nimmt der mögliche atmosphärische Wasserdampfgehalt zu.

¹² Aufheizung der bodennahen Luft durch direkte Wärme-Abstrahlung der Oberflächen.

gebungsluft. Dieser Aufstieg wird nachts bei der in der landesweiten Klimaanalyse Hessen zugrunde gelegten Wetter-Situation (siehe Kapitel 4.2.1.3) meist durch eine stabile Schichtung der bodennahen Atmosphäre gedämpft.

3.2.2 Human-Biometeorologie

Die Human-Biometeorologie beschäftigt sich mit dem Einfluss der thermischen, aktinischen¹³ und lufthygienischen Wirkungskomplexe auf den menschlichen Organismus.

Die Stadtbevölkerung ist ihrer z.T. stark belasteten atmosphärischen Umwelt ausgesetzt, die ihre Produktivität, Mortalität, →**Morbidität** und ihr Wohlbefinden beeinflusst (z.B. Fisk, 2000; Koppe et al. 2003; Nastos und Matzarakis, 2012). Wärmebelastungen führen, wenn sie längere Zeit andauern, nicht nur zu gesundheitlichen Problemen, sondern bewirken auch volkswirtschaftliche Schäden in verschiedenen Sektoren (Zebisch, 2005).

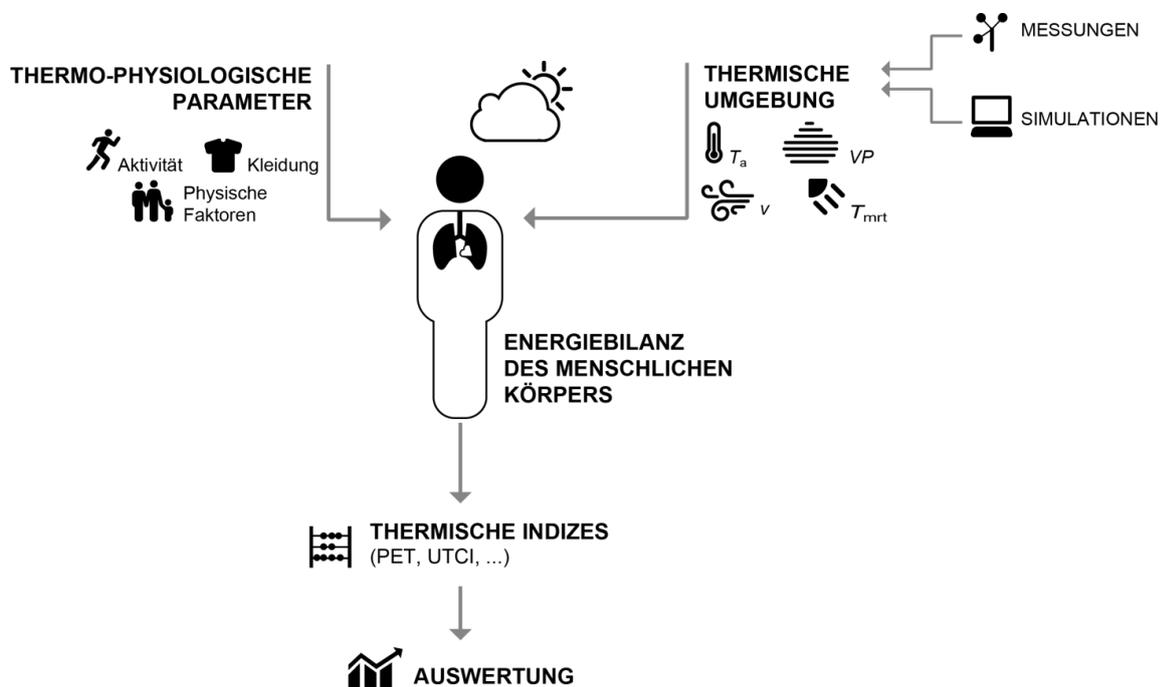


Abbildung 3-1: Fließdiagramm zur Veranschaulichung der Berechnung thermischer Indizes (Matzarakis et al. 2016).

Menschen sind gleichwarme (homoiotherme) Lebewesen mit einer konstanten Kerntemperatur von ca. 37°C, welche durch verschiedene Maßnahmen der Thermoregulation gehalten wird. Die thermische Belastung eines Menschen setzt sich aus der thermophysiologicalen Summenwirkung der meteorologischen Größen Lufttemperatur (T_a), Dampfdruck (v_p), Windgeschwindigkeit (v) und der →**mittleren Strahlungstemperatur** (T_{mrt}) zusammen (Höppe, 1984; Höppe, 1999). Die Gesamtheit der kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse wird durch die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} ¹⁴ parametrisiert.

¹³ durch den sichtbaren und ultravioletten Bereich der Sonnenstrahlung bedingt.

¹⁴ Die mittlere Strahlungstemperatur ist definiert als einheitliche Temperatur einer schwarz strahlenden Umschließungsfläche, die zum gleichen Strahlungsenergiegewinn eines Menschen führt, wie die unter Freilandbedingungen inhomogenen Strahlungsflüsse (Fanger, 1972).

Thermische Indizes, wie die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET (Höppe, 1999)), wurden entwickelt, um die auf den Menschen wirkenden thermischen Umgebungsbedingungen unter Berücksichtigung der menschlichen Energiebilanz und der den Menschen beschreibenden Größen (Größe, Gewicht, Geschlecht, Kleidung) zu berechnen.

Die Physiologisch Äquivalente Temperatur entspricht derjenigen Raumlufttemperatur, bei welcher die menschliche Energiebilanz für ein festgelegtes Innenraumklima dieselbe mittlere Hauttemperatur und Schweißrate aufweist wie für die berechneten Außenbedingungen. Das vergleichbare Innenraumklima ist definiert mit einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s, mit einer mittleren Strahlungstemperatur, die der Lufttemperatur von 20°C entspricht, und mit einem Wasserdampfdruck von 12,5 hPa.

Zur Klassifizierung von Hitze- und Kältestress sowie zur Differenzierung des thermischen Komforts wurde in der landesweiten Klimaanalyse Hessen die PET-Bewertungsskala nach Matzarakis und Mayer (1997) verwendet (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Bewertungsskala von PET zur Quantifizierung der thermischen Verhältnisse und des Physiologischen Stresses bei Kälte- und Hitzebelastung (Matzarakis und Mayer, 1997).

PET (°C)	Thermische Sensitivität	Physiologischer Stress
< 4,1	sehr kalt	extremer Kältestress
4,1 - 8,0	kalt	starker Kältestress
8,1 - 13,0	kühl	moderater Kältestress
13,1 - 18,0	leicht kühl	leichter Kältestress
18,1 - 23,0	komfortabel (neutral)	kein thermischer Stress
23,1 - 29,0	leicht warm	leichter Hitzestress
29,1 - 35,0	warm	moderater Hitzestress
35,1 - 41,0	heiß	starker Hitzestress
> 41,0	sehr heiß	extremer Hitzestress

Die Physiologisch Äquivalente Temperatur ist konform mit der VDI 3787, Blatt 2:2008 und eignet sich aufgrund ihrer Definition besonders für die (Stadt-)Planung, wird aber auch im Bereich der Kurort-Zertifizierung (VDI 3787, Blatt 10:2010) und für den Tourismus angewandt.

3.2.3 Klimatologische Kenntage

Klimatologische Kenntage charakterisieren besonders warme oder kalte Tage, an denen der Tageshöchstwert oder der Tagestiefstwert eine definierte Lufttemperatur über- oder unterschreitet.

Die klimatologischen Kenntage pro Jahr werden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) wie folgt definiert:

Tabelle 3-2: Definition der in dieser Studie untersuchten klimatologischen Kenntage (nach DWD, 2020b).

Bezeichnung	Kriterium
Heißer Tag	Höchstwert der Lufttemperatur $\geq 30^{\circ}\text{C}$
Sommertag	Höchstwert der Lufttemperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$
Frosttag	Tiefstwert der Lufttemperatur $\leq 0^{\circ}\text{C}$
Eistag	Höchstwert der Lufttemperatur $< 0^{\circ}\text{C}$

3.3 Thermisch induzierter Wind

Wind entsteht als Folge großräumiger und regionaler Luftdruckunterschiede. Großräumig werden die Windverhältnisse durch die Lage und Ausprägung der Hoch- und Tiefdruckgebiete bedingt.

Grundlage für die Entstehung von thermisch bedingtem Wind sind unterschiedliche Erwärmungs- und Abkühlungsraten der bodennahen Luft. Ursache ist die unterschiedliche Landnutzung. Die Ausbildung thermischer Windsysteme wird in komplexer Topographie durch Hangneigung und Exposition unterstützt.

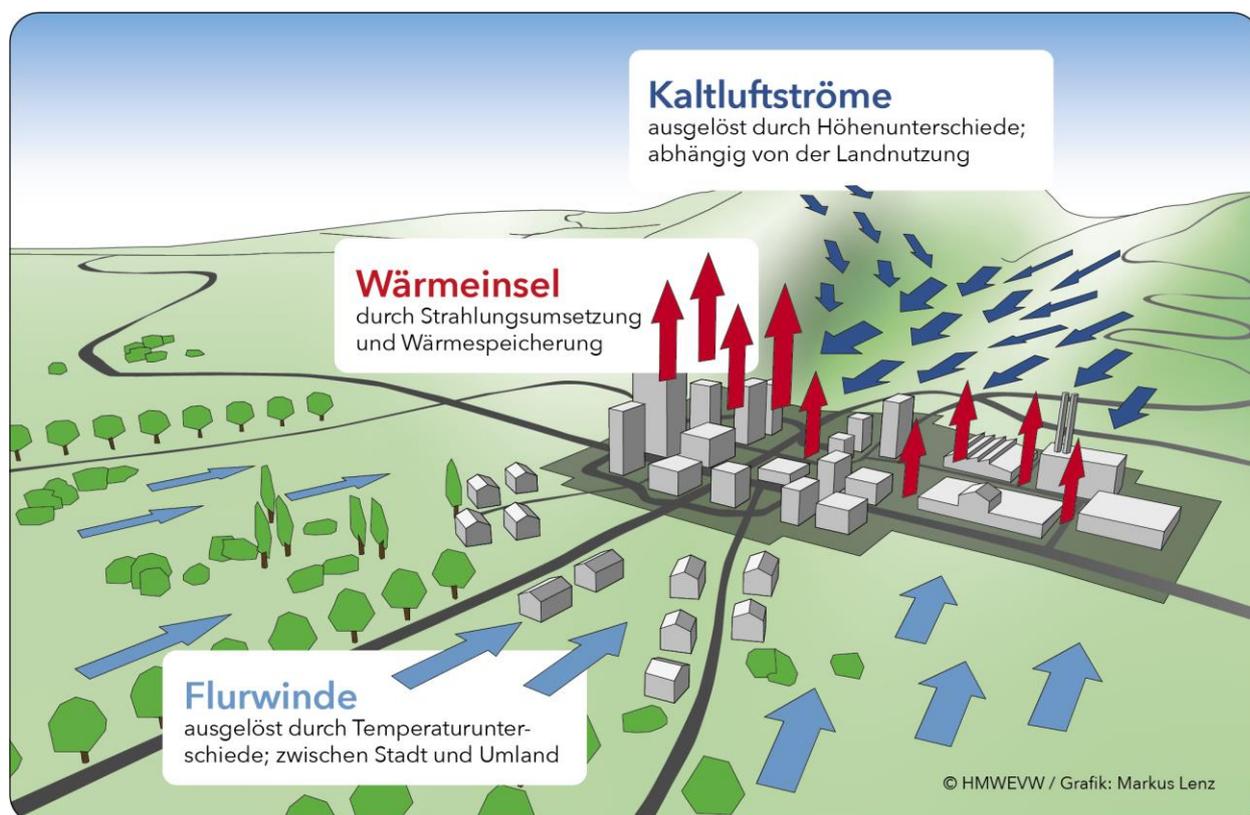


Abbildung 3-2: Veranschaulichung der verschiedenen Windsysteme, die sich bei autochthonen Wetterlagen ausbilden.

Während autochthoner Wetterlagen bilden sich nachts zum einen Kaltluftabflüsse aufgrund von Dichteunterschieden und der Geländeneigung aus und zum anderen Flurwinde infolge temperaturbedingter lokaler Luftdruckunterschiede. In strukturiertem Gelände ist die Dynamik der Kaltluftabflüsse deutlich größer als die der Flurwinde. Ausschließlich Flurwinde (siehe Kapitel 3.5) findet man nur in ebenem Gelände.

3.4 Kaltluftabfluss

Als Kaltluftabfluss wird in der Umweltmeteorologie bodennah gebildete Kaltluft verstanden, die sich durch Dichteunterschiede und aufgrund von Geländeneigung entsprechend des Gefälles in Bewegung gesetzt hat. Die „Kaltluft“ weist an ihren Wirkräumen eine niedrigere Lufttemperatur auf als die dort vorhandene Luft und trägt so zur Abkühlung innerhalb der Siedlungsgebiete bei.

Der Kaltluftabfluss entwickelt sich nach Sonnenuntergang in sogenannten „Strahlungs Nächten“ während autochthoner Wetterlagen. Autochthone Wetterlagen sind in der Regel wolkenlos, wind-schwach und zeichnen sich durch eine hohe Einstrahlung tagsüber und hohe effektive Ausstrahlung nachts aus. Aus diesem Grund können sich Kaltluftabflüsse und Kaltluftströmungssysteme unter den o.g. Bedingungen das gesamte Jahr über in ähnlicher Struktur mit nur leicht variierenden Intensitäten ausbilden. Allerdings kann die Funktion der Strömungen im Siedlungsraum je nach Jahreszeit aufgrund des allgemeinen Jahresgangs der Lufttemperatur stark differieren (VDI 3787, Blatt 5:2003).

Kaltluftproduktion

Die Bildung bodennaher Kaltluft wird durch die Abkühlung der Erdoberfläche aufgrund einer negativen Energiebilanz verursacht. Der Energieverlust sorgt zunächst für eine Abkühlung der Oberfläche und infolgedessen zu einer Abkühlung der darüber befindlichen Luftschicht.

Die Kaltluftproduktion hängt wesentlich von der Landnutzung (Bewuchs und Bebauung), dem Boden, der Topographie und der Wetterlage ab, da diese die Abkühlungsraten der Luft bestimmen (VDI 3787, Blatt 5:2003).

Der Einfluss der Vegetation auf die Kaltluftproduktion ist abhängig von der Art, Höhe und Dichte der Vegetation (z.B. Wiesen-, Kraut-, Strauch- oder Baumvegetation) sowie von ihrem Flächenanteil an der Gesamtfläche.

Die bodenphysikalischen Eigenschaften, welche die Kaltluftproduktionsrate beeinflussen, werden über die Art und den Zustand des Boden-Substrats bestimmt. Bestimmende Faktoren sind hierbei in erster Linie die Dichte, der Luft- und Wassergehalt sowie das Porenvolumen, daneben Bodenfarbe, -struktur und -zusammensetzung.

Exposition und Geländeneigung üben einen weiteren Einfluss auf die →**Kaltluftentstehung** aus (siehe Abbildung 3-3).

Wasser kann sehr viel Wärme speichern, daher ist die Abkühlung von Wasseroberflächen im Verlauf einer Strahlungsnacht äußerst gering. Die Wasseroberflächentemperatur ändert sich gegenüber den Tageswerten kaum. Aus diesem Grund sind stehende Wasseroberflächen später in der Nacht mit am wärmsten.

Die höchsten Kaltluftproduktionsraten weisen unversiegelte Freiflächen (Streuobstwiesen - Wiesen mit einzelnen Obstbäumen, Grünland, Ackerland) auf. In Wäldern verringert der Baumbestand nachts die Abkühlung und den Luftaustausch, was zu einer geringeren Kaltluftproduktionsrate im Vergleich zu Grün- oder Ackerland führt. Bebautes Gebiet hat aufgrund der energetischen Eigenschaften der Oberfläche (Speicherwirkung) und der anthropogenen Wärmeproduktion ein reduziertes Kaltluftproduktionsvermögen.

Jede Veränderung der Oberfläche beeinflusst auf Grund der genannten Einflüsse die Kaltluftentstehung. Flächenumwidmungen können deshalb einen signifikanten Einfluss auf die Kaltluftentstehungsbedingungen haben.

Zu Beginn der Nacht sind die lokalen Kaltluftabflüsse meist am intensivsten, da die Abkühlungsrate über freien Flächen am höchsten ist. Später in der Nacht flacht die Abkühlungskurve ab, und es wird lokal weniger schnell Kaltluft gebildet.

Bei ebenem Gelände entsteht zwar an Orten mit hoher effektiver Ausstrahlung Kaltluft, diese kann jedoch bei fehlender Geländeneigung nicht abfließen. Deshalb ist zwischen Kaltluftproduktionsgebieten zu unterscheiden, aus denen die Kaltluft abfließt (und belüftungswirksam werden kann) und Gebieten, in denen die Kaltluft an Ort und Stelle verharret.

Ursache für Kaltluftströmungen in der Ebene können vier Mechanismen sein:

- Ein in die Ebene hineinreichendes Kaltluftströmungssystem.
- Ein übergeordnetes Regionalwindssystem, das sich ebenfalls bevorzugt bei autochthonen Wetterlagen ausbilden kann.
- Das „Mitnehmen durch“ oder das „von oben Durchgreifen“ einer übergeordneten Strömung aufgrund der geringen Schichtdicke der bodennahen Kaltluft.
- Der Antrieb durch horizontale Temperatur- und damit Luftdichteunterschiede (Flurwind).

Intensität und zeitlicher Verlauf der Kaltluftabflüsse

Der Kaltluftabfluss ist der nächtliche Teil eines thermisch induzierten Strömungssystems, welches Defant (1949) für topographisch bewegtes Gelände in acht Phasen gliedert (siehe Abbildung 3-3). Tagsüber bilden sich nach Sonnenaufgang Hangaufwinde aus (weiße Pfeile in A, B und C), wobei der talwärts orientierte nächtliche → **Bergwind** (schwarz in A), mit fortschreitender Erwärmung des Tals zum Erliegen kommt (B). Aufgrund der stärkeren Erwärmung an den Talhängen im Vergleich zum Vorland ergeben sich Druckunterschiede zwischen dem Vorland und dem hier betrachteten Talraum. Aufgrund dieser Druckunterschiede bildet sich ein bergwärts gerichteter → **Talwind** aus (schwarz in C, D und E), welcher im Laufe des Tags immer mächtiger wird (C, D) und die Talquerzirkulation überprägt (D).

Kurz vor Sonnenuntergang bilden sich Kaltluftabflüsse an den Hängen (Hangabwinde, weiß in E, F und G), welche in den ersten Stunden nach Sonnenuntergang immer mächtiger werden (E, F). Kaltluftabflüsse entstehen vornehmlich an geneigten Hängen, da die Kaltluft eine höhere Dichte besitzt („schwerer ist“) und sich daher geländefolgend in Bewegung setzt. Als Luftleitbahnen des Kaltluftabflusses treten lang gestreckte Hohlformen mit monotonem Gefälle auf, wie Seitentäler, Schluchten und Rinnen. Hindernisse wie Waldränder, Hecken und Dämme können die Richtung von sehr flachen Kaltluftabflüssen beeinflussen.

In den Nachtstunden kommt der tagsüber vorherrschende bergwärts gerichtete Talwind zum Erliegen (F), es bildet sich eine geschlossene, durch die Kaltluftabflüsse initiierte Querzirkulation aus (weiß in F).

Aus dem oberen Teil der nächtlichen Talquerzirkulation wird relativ warme Luft, die noch nicht von der nächtlichen Abkühlung am Talgrund erfasst wurde, gegen die Hänge verlagert und erwärmt diese. Diese sogenannte „warme Hangzone“ kann temporär bis zu 3 K wärmer sein als der Talgrund.

Bei zunehmender Kaltluftansammlung im Tal entwickelt sich ein talwärts gerichteter Bergwind (schwarz in G, H und A), der mit fortschreitender Nacht immer mächtiger wird, die Querzirkulation überprägt (H) und bis nach Sonnenaufgang anhält (A).

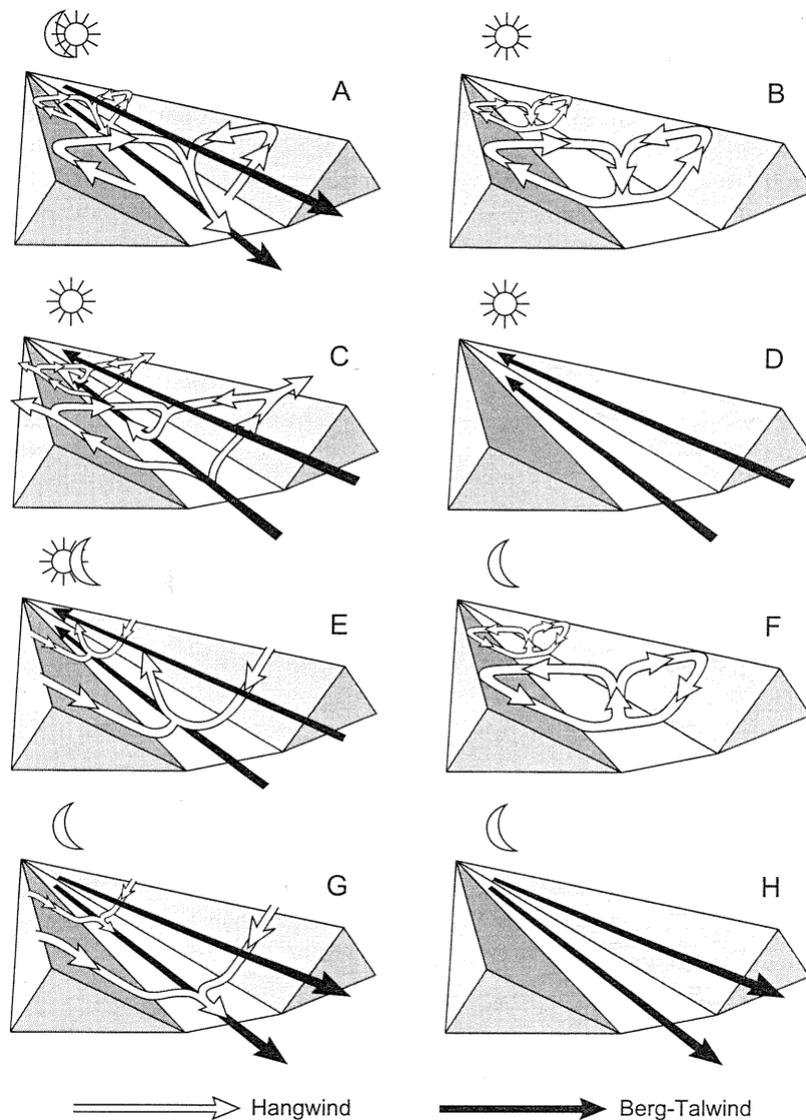


Abbildung 3-3: Idealisiertes Berg-Tal Windsystem bei symmetrischem Aufheizen und Abkühlen der Hänge (nach Defant (1949) in Bendix (2004), modifiziert).

In von Höhenzügen begrenzten Haupttälern können sich so trotz geringer Neigung der Talsohle eindeutig identifizierbare Kaltluftströmungen einstellen (vgl. Abbildung 3-3, G, H). Tritt ein Kaltluftströmungssystem indes in die Ebene hinaus, so verteilt sich die Kaltluft breitflächig, der Impuls nimmt ab und die Reichweite ist begrenzt.

Auch ohne Ausbildung eines talwärts gerichteten Bergwinds kann sich Kaltluft aufgrund ihres Bewegungsimpulses noch etwas in eine Ebene vorschieben. In ebenem Gelände verliert sie allerdings fortwährend an Impuls, so dass sie nach einer bestimmten Distanz zum Stagnieren kommt.

Geschwindigkeit, Mächtigkeit und Volumenstromdichte

Die typische Kaltluft-Strömungsgeschwindigkeit beträgt zwischen 0,5 und 3 m/s. Die Strömungsgeschwindigkeit hängt vor allem von der Lufttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung sowie von der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab. In bebauten Gebieten oder Wäldern kommt es durch die größere Oberflächenrauigkeit zu einer Erhöhung der Turbulenz, einer Verringerung der Windgeschwindigkeit und damit einer Verschlechterung der Durchlüftungsverhältnisse (Abbildung 3-4).

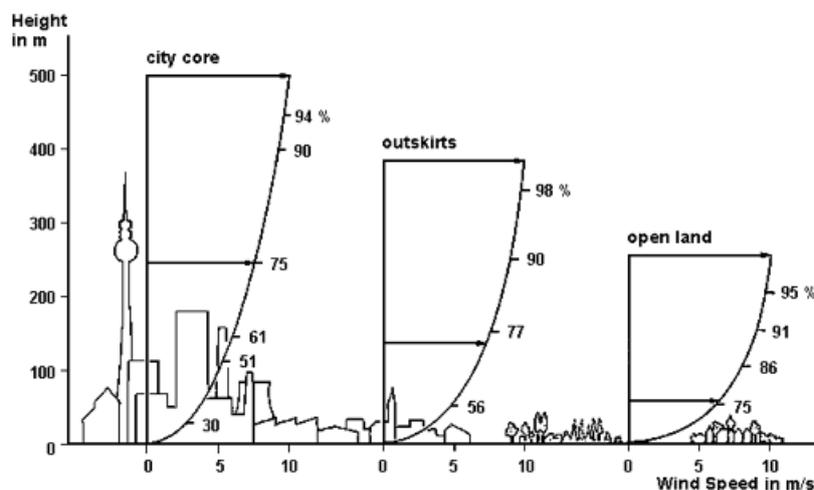


Abbildung 3-4: Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Windgeschwindigkeit (Baumbach, 1994). Der mittlere Pfeil zeigt die Höhe an, in welcher 75 % der übergeordneten Strömungsgeschwindigkeit über dem Stadtzentrum, der Vorstadt und dem offenen Land (von links nach rechts) erreicht wird.

In Städten kommt eine gerichtete bodennahe Strömung mit geringer Kaltluftmächtigkeit oftmals nach wenigen hundert Metern zum Erliegen. Wird der Bereich von einer vertikal mächtigen Strömung erreicht, so spielt für die bodennahe Belüftung die Strömungsgeschwindigkeit im Überdachniveau die entscheidende Rolle. Sie bewirkt durch das Heruntermischen aus dem Überdachniveau eine bodennahe Durchlüftung. Diese hängt von der Bebauungsdichte (vgl. Abbildung 3-5) und der Intensität der Strömung im Überdachniveau ab. In Straßenschluchten kann es zu Wirbelbildungen, häufigeren Calmen (Windstille) oder Kanalisierungseffekten kommen. Deshalb wurde im Rahmen der landesweiten Klimaanalyse die Strömung im bodennahen Niveau und im Überdachniveau betrachtet.

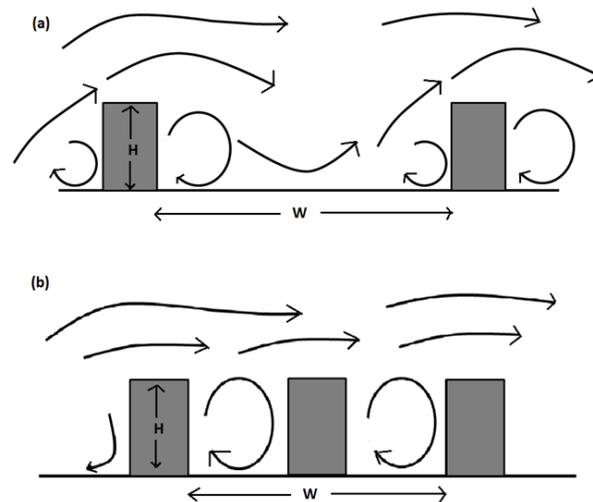


Abbildung 3-5: Herabmischung der Strömung im Überdachniveau in das Bodenniveau einer Siedlung (idealtypisch, Oke, 1988).

Im oberen Teil von Hängen beträgt die Mächtigkeit (Höhe) von Kaltluftströmungen oft nur wenige Meter (Hangabwinde), während in der Talsohle Schichtdicken von mehreren Dekametern entstehen können. Bei einem Kaltluftstau oder in einem Kaltluftsee kann sich die Kaltluft auch auf mehr als 100 m akkumulieren. Die Höhe des Geschwindigkeitsmaximums über Grund wächst häufig mit zunehmender Mächtigkeit des Kaltluftstroms an (Abbildung 3-6).

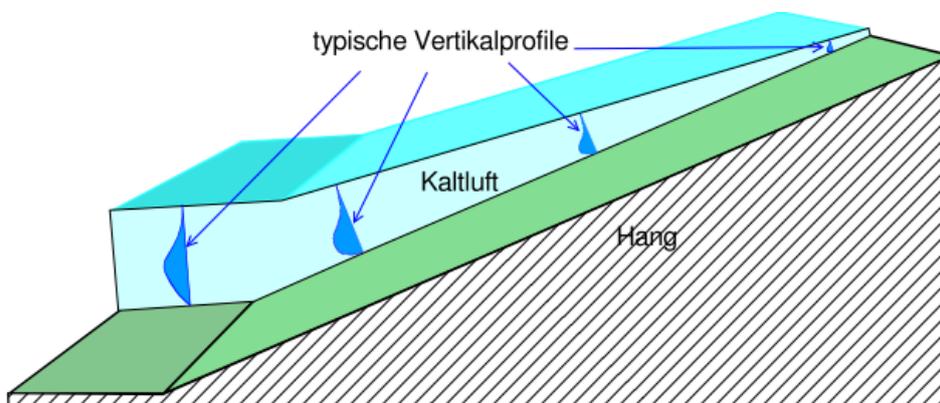


Abbildung 3-6: Idealisiertes Schema eines Kaltluftabflusses an einem Hang mit nachfolgender Ebene. Eingezeichnet ist auch das Höhenprofil der Windgeschwindigkeit.

Mehrere solcher hanggebundenen Kaltluftabflüsse schließen sich im orographisch gegliederten Gelände oft zusammen und bilden ein Kaltluftströmungssystem. Aufgrund der Beiträge vieler kaltluftproduzierender Flächen und Hänge können solche Systeme eine bedeutende vertikale Mächtigkeit erlangen. Diese Systeme bleiben relativ stabil, d.h. sie ändern sich zeitlich nur unwesentlich, man spricht auch von „stationären“ Strömungen (z.B. Bergwinde in Abbildung 3-3).

Kaltluftströmungssysteme mit nennenswerter Mächtigkeit können einzelne, niedrige Geländestrukturen oder Hindernisse (Gebäude, Wälder) vollständig überströmen.

Auf diese Weise können wesentliche Funktionen einer Strömung (Lufttransport, Luftleitbahn) auch im Überdachniveau bzw. oberhalb des Kronenraumes ablaufen. Die Kaltluft kann dann je nach Oberflächenstruktur durch Turbulenz in die Siedlungen heruntergemischt werden.

Der Luftaustausch, den solche Kaltluft-Strömungssysteme bewirken, kann durch den Luftdurchsatz in verschiedenen Höhen analysiert werden. Die Volumenstromdichte (in $\text{m}^3/(\text{s m})$) ist ein Maß für die Menge Kaltluft, die pro Sekunde durch einen Querschnitt von 1 m Breite und der betrachteten Höhe strömt. Die Höhe kann dabei die vertikale Mächtigkeit des Kaltluftstroms (Gesamt volumenstromdichte) oder eine andere Bezugshöhe, z.B. vom bodennah (bis 5 m über Grund) bis ins Überdachniveau (bis 28 m über Grund) sein.

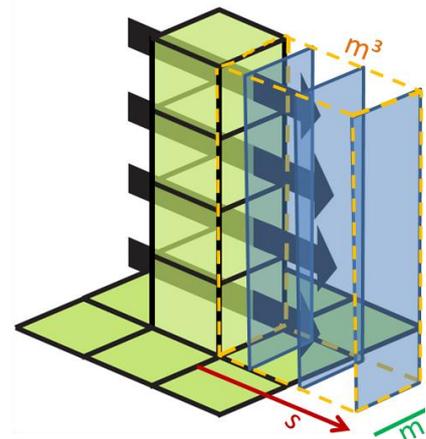


Abbildung 3-7: Skizze zur Volumenstromdichte.

Bei einer höheren Oberflächenrauigkeit, z.B. in Siedlungen, nimmt die Windgeschwindigkeit des Kaltluftvolumenstroms bis weit über die Rauigkeitselemente (z.B. Häuser) ab – und damit auch die Kaltluftvolumenstromdichte (vgl. Abbildung 3-4).

3.5 Flurwinde

In ebenem Gelände kann sich in großräumig windschwachen, klaren Nächten ein weiteres lokales Windsystem mit einer wesentlich geringeren Skalenlänge ausbilden. Gemeint ist hier der zu dicht bebauten Gebieten gerichtete Flurwind, der durch die nächtliche Überwärmung der bebauten Gebiete gegenüber dem Umland und dem daraus resultierenden bodennahen Druckgradienten entsteht. Die Geschwindigkeit eines Flurwinds ist jedoch verglichen mit den hangfolgenden Kaltluftströmungen in der Regel recht gering (um 1 m/s).

Zur Ausbildung eines Flurwindes bedarf es einer größeren, zusammenhängenden Zone mit höheren Temperaturen als im Umland. Dies können größere Siedlungsgebiete oder größere, zusammenhängende Industrieareale sein, die zur Ausbildung einer urbanen „Wärmeinsel“ führen. Diese relativ warme Luft steigt mit geringer Geschwindigkeit nach oben. Hierdurch entsteht ein Sog, der zur Folge hat, dass kühlere Luft aus der Umgebung nachströmt. Dieses Nachströmen wird als Flurwind bezeichnet. Er bildet insbesondere für Großstädte in ebenem Gelände einen wichtigen Belüftungsmechanismus. Die bodennahe Eindringtiefe der Strömung in einen bebauten Bereich ist allerdings aufgrund der i.a. relativ schwachen Dynamik der Flurwinde und wegen der großen Rauigkeit (Gebäude, Bäume) begrenzt. Wenn die bodennahe Kaltluftschicht deutlich mächtiger ist als die Bebauungshöhe, so findet der größte Teil des Belüftungsmechanismus durch Flurwinde eher im Überdachniveau statt. Ein Flurwindssystem sorgt mit seinem Transport kühlerer Luft in die wärmere Zone hinein für eine Belüftung und eine Verringerung der Lufttemperatur. Der Antrieb von Flurwinden ist auch hier die (horizontale) Temperaturdifferenz. Aus diesem Grund können sich Flurwinde unter den o.g. Bedingungen das gesamte Jahr über in ähnlicher Struktur mit nur leicht variierenden Intensitäten ausbilden.

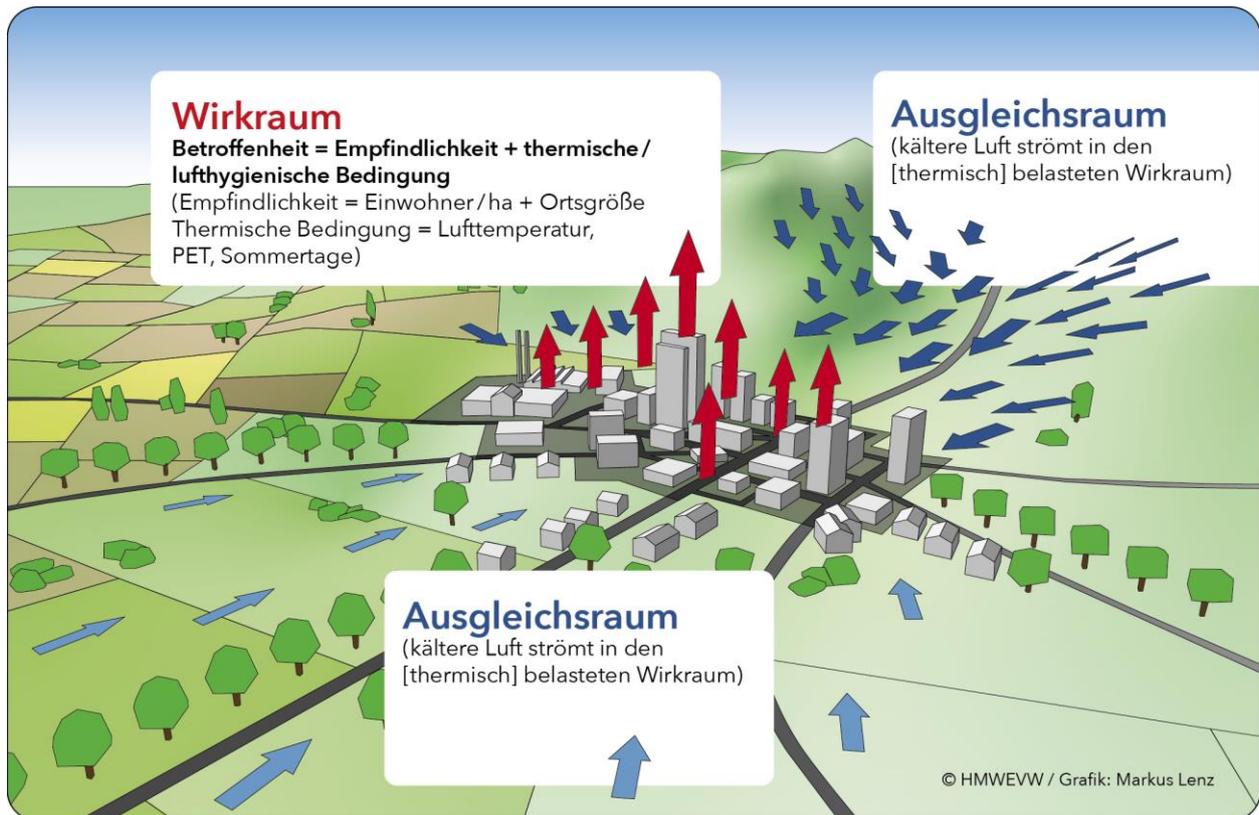


Abbildung 3-8: Wärmeinsel-Effekt (skizziert): Wärmere urbane Bereiche und wärmere ausgedehnte Industriegebiete sorgen auch bei ebenem Gelände für Flurwinde, die aus dem Umland in Richtung Wärmeinsel strömen.

Aufgrund der geringen Mächtigkeit kann ein Flurwind leicht von lokalen, regionalen oder synoptischen (durch großräumige Unterschiede im Luftdruck entstehenden) Strömungen überlagert werden.

Da die größten Temperaturunterschiede zwischen der Stadt und dem Umland in den Nachtstunden auftreten, erreicht auch der Flurwind zu dieser Zeit seine größte Intensität. Tagsüber ist dieses Phänomen nicht zu beobachten, da Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland dann deutlich weniger ausgeprägt sind.

3.6 Luftqualität

Neben den klimatischen Bedingungen (PET, Anzahl an Sommertagen, ...) bestimmt die Luftqualität das menschliche Wohlbefinden und die Gesundheit. Hinsichtlich der Bewertungsmaßstäbe sind in Mitteleuropa Stickoxide, Feinstäube und Ozon die relevantesten Komponenten. Weitere schädliche Bestandteile der Luft sind Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid, Blei und Benzol. Diese spielen aber durch die bereits ergriffenen Luftreinhaltemaßnahmen nur noch eine untergeordnete Rolle. Während Feinstäube und Stickoxide meist anthropogen bedingt sind, wird Ozon sekundär gebildet.

Die lufthygienische Situation wird in Hessen durch die allgemeine Hintergrundbelastung und die Beiträge des Verkehrs (Kfz-Verkehr, Flugverkehr, Schiffsverkehr) bestimmt. Hinzu kommen Emissionen aus dem Hausbrand sowie den gewerblichen und industriellen Quellen.

Belastungen der Bevölkerung ergeben sich insbesondere an stark befahrenen Straßen in bebauten Gebieten. Zum einen erfolgt die Freisetzung der Kfz-bedingten Luftschadstoffe bodennah, zum anderen sind die Luftaustauschbedingungen in Siedlungsgebieten durch die Bebauung oftmals reduziert (Straßenschluchten). Hinsichtlich der Bewertung der Luftbelastung nach der 39. BImSchV (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen) stehen Stickstoffdioxide (NO₂) und die Feinstäube (PM₁₀, PM_{2,5}) derzeit im Vordergrund. Die höchsten Konzentrationen werden seit Jahren in den verdichteten Siedlungsgebieten entlang vielbefahrener Straßen gemessen.

Im Gegensatz dazu werden bei Ozon, das ein sekundär gebildetes Reizgas ist, die höchsten Konzentrationen in den Höhenlagen und im Bereich ausgedehnter, Stickoxid-emissionsarmer Gebiete beobachtet.

Zur Berücksichtigung der Luftqualität wurden in der vorliegenden Untersuchung die flächendeckenden Immissionskarten Hessens für Feinstaub und Stickstoffdioxid herangezogen (IVU, 2017).

3.6.1 Feinstaub PM₁₀

Einatembare Staub, im wesentlichen Schwebstaub, enthält sowohl nicht-lungengängige Anteile (Grobstaub) als auch lungengängige Anteile (Feinstaub, PM₁₀). PM₁₀ ist als Staub definiert, der einen Abscheider passiert, welcher Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 10 µm zu 50 % zurückhält. Untergruppen des PM₁₀ sind Stäube mit einem mittleren aerodynamischen Durchmesser bis 2,5 µm (PM_{2,5}) und darin wiederum Stäube bis 1 µm (PM₁).

Der aerodynamische Teilchendurchmesser der unmittelbar vom Motor eines Kraftfahrzeuges emittierten Partikel liegt unter 1 µm (PM₁). Kleineren Partikeln (feine Partikeln PM_{2,5}) und erst recht ultrafeinen Partikeln (< PM₁) wird eine größere Gesundheitsgefährdung zugesprochen. Sie können ungehindert in das Lungengewebe und damit zum Teil sogar in den Blutkreislauf eindringen, wodurch eine Gesundheitsbelastung insbesondere durch die chemischen Bestandteile des Staubes hervorgerufen werden kann.

In Deutschland sind in der 39. BImSchV Grenzwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit festgelegt. Der über ein Kalenderjahr gemittelte Immissionsgrenzwert für Partikel PM₁₀ beträgt 40 µg/m³ (Mikrogramm pro Kubikmeter). Zudem darf der Wert von 50 µg Feinstaub pro Kubikmeter Luft nicht an mehr als 35 Tagen im Jahr überschritten werden.

3.6.2 Stickoxide NO_x

Stickoxide sind ein Sammelbegriff für gasförmige Oxide des Stickstoffs. Bei Verbrennungsprozessen werden durch die hohen Temperaturen Stickstoff und Sauerstoff aus der Luft in Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) oxidiert. Daneben werden bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe auch immer flüchtige organische Stoffe (Volatile Organic Compounds, VOCs) freigesetzt. Aus NO_x und VOCs bildet sich unter Einwirkung von Sonnenlicht Ozon.

Zum Schutz der menschlichen Gesundheit ist in der 39. BImSchV für NO₂ ein Grenzwert für den Jahresmittelwert von 40 µg/m³ festgelegt.

3.7 Definition von Wirkräumen und Ausgleichsräumen

In Klimaanalysen wird der Stellenwert eines Raumes definiert, indem zwischen Wirkräumen (bebaute Gebiete) und Ausgleichsräumen unterschieden wird (siehe Abbildung 3-8).

Wirkräume sind bebaute und versiegelte Räume, in denen besonders häufig lufthygienische oder thermische Belastungen, meist im Zuge von windarmen Strahlungswetterlagen, auftreten. Während dieser Wetterlagen kann es dort zu einer Akkumulation von Immissionen und zu erhöhten Lufttemperaturen kommen.

Ausgleichsräume sind räumlich und funktional benachbarte, nicht bzw. nur gering versiegelte Räume, welche lufthygienisch geringer belastet sind und zur Kaltluft- und/oder Frischluftproduktion beitragen, die dann in die Wirkräume abfließen kann. Ausgleichsräume können auch tagsüber eine geringere thermische Belastung aufweisen und folglich als Erholungsflächen dienen.

3.8 Klimawandel und Regionale Klimamodelle

Das Klima unterliegt ständigen Schwankungen und Veränderungen. Zusätzlich zu den natürlichen Klimaschwankungen tragen anthropogene Einflüsse erheblich zu Klimaveränderungen bei. So ist seit etwa Mitte des 20. Jahrhunderts eine Zunahme der globalen Lufttemperatur zu beobachten, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Folge der anthropogen bedingten Freisetzung von Treibhausgasen ist.

Eine wichtige Grundlage für die Klimaprojektionen sind die globalen Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre, deren mögliche Entwicklung in so genannten „Emissionsszenarien“ (RCP¹⁵) klassifiziert werden. Es handelt sich bei diesen neuen Szenarien um Konzentrations-Pfade, weil bei ihnen die Treibhausgaskonzentration und der Strahlungsantrieb den Ausgangspunkt bilden. Im 6. IPCC Bericht¹⁶ werden die RCPs durch den „Gemeinsam genutzten sozioökonomischen Pfad“ SSPs ersetzt. In Abbildung 3-9 sind beide Szenarien vergleichend dargestellt.¹⁷

¹⁵ im 5. →IPCC Bericht (IPCC, 2014) werden diese als „Representative Concentration Pathways“, RCPs bezeichnet.

¹⁶ <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>

¹⁷ Bis Januar 2022 lagen noch keine vergleichbaren Ensembledaten von Regionalen Klimamodellen unter Berücksichtigung der SSPs aus dem 6. IPCC Bericht vor.

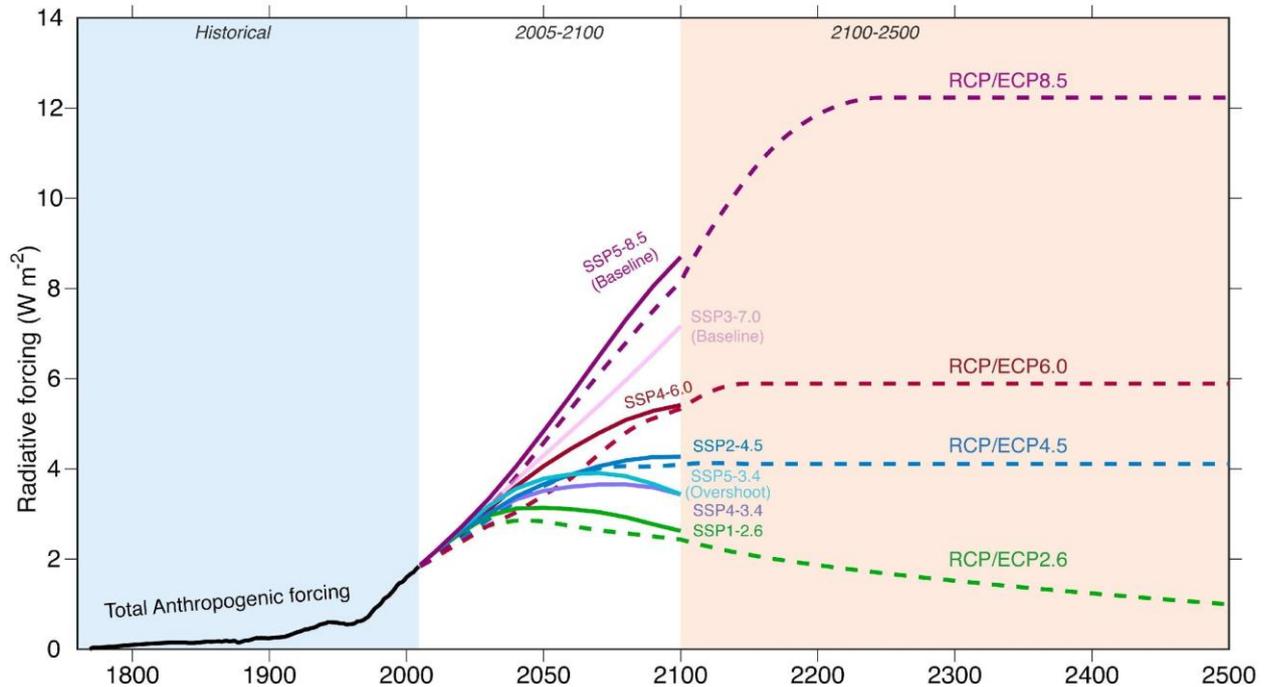


Abbildung 3-9: Zeitreihe des anthropogenen Strahlungsantriebs (W/m^2) aus historischen Daten (1765-2004) und für die Zukunft die erweiterten RCPs (2005-2100) und die erweiterten RCPs (2100-2500) und die „Gemeinsam genutzten sozioökonomischen Pfade“ SSPs (2005-2100) (Chen et al. 2021).

Für den Zeitraum 1860 bis 2005¹⁸ entspricht der Verlauf der Treibhausgas-Konzentrationen den beobachteten Werten. Für die Zeit danach, d.h. von 2006 bis 2100, entsprechen die RCPs verschiedenen möglichen Emissionsszenarien in der Zukunft. Die Grundlage dieser Szenarien bilden Annahmen über verschiedene sozioökonomische Entwicklungen. Jedem Emissionsszenario liegt ein Bewertungsmodell, welches die zukünftige Energieversorgung, Bevölkerungsentwicklung, Nahrungsmittelproduktion, Weltwirtschaft und ihre Wechselwirkung mit dem Klimasystem und der Landnutzung berücksichtigt, zugrunde (Moss et al. 2008, van Vuuren et al. 2011).

Tabelle 3-3: Beschreibung der Representative Concentration Pathways RCP.

Szenario	Beschreibung
RCP8.5	Bis über das Jahr 2100 ansteigender Strahlungsantrieb. Dieser beträgt im Jahr 2100 $8,5 W/m^2$ oder $1370 ppm CO_2$ -Äquivalent.
RCP6.0	Stabilisierung des Strahlungsantriebs im Jahr 2100 bei ca. $850 ppm CO_2$ -Äquivalent, ähnlich dem A1B-Szenario.
RCP4.5	Moderate Entwicklung, ähnlich dem B1-Szenario. Anstieg des CO_2 -Äquivalents bis 2100 auf $650 ppm$.
RCP2.6	„Peak-Szenario“, d.h. Anstieg der Treibhausgasemissionen bis 2020 auf ca. $490 ppm$, danach konstanter Treibhausgasemission- und Strahlungsantriebsrückgang auf etwa $2,6 W/m^2$ im Jahr 2100. Durch den drastischen Rückgang der Emissionen wird eine globale Erwärmung um mehr als $2^\circ C$ im Jahr 2100 sehr wahrscheinlich nicht überschritten. Das Szenario entspricht einem Ziel der Vereinbarungen von Paris.

¹⁸ Die ausgewählten Szenarien wurden im Zeitraum 2006 -2007 publiziert, daher beziehen sich die Angaben auf den Zeitraum bis 2005.

Vom IPCC wurden vier Konzentrationspfade für den 5. Sachstandsbericht ausgewählt (IPCC, 2014): RCP2.6 (relativ niedriger Strahlungsantrieb), RCP4.5 (mittlerer Strahlungsantrieb), RCP6.0 (hoher Strahlungsantrieb) und RCP8.5 (sehr hoher Strahlungsantrieb). Mit RCP8.5 wird ein kontinuierlicher Anstieg der Treibhausgasemissionen beschrieben, der zum Ende des 21. Jahrhunderts einen Strahlungsantrieb von 8.5 W/m^2 erreicht. RCP2.6 beinhaltet sehr ambitionierte Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Er führt zum Strahlungsantrieb von etwa 3 W/m^2 um 2040 und geht dann zum Ende des 21. Jahrhunderts auf einen Wert von $2,6 \text{ W/m}^2$ zurück. Die beiden anderen RCPs bewegen sich im mittleren Bereich (siehe auch Tabelle 3-3).

Globale Klimaprojektionen, berechnet durch globale Klimamodelle, werden für einzelne Regionen mit Hilfe von regionalen Klimamodellen verfeinert, um genauere Aussagen über die Veränderung der mittleren Zustände, aber auch extremer Wetterereignisse zu treffen. Dazu werden regionale Klimamodelle mit globalen Zirkulationsmodellen angetrieben und über statistische oder dynamische Downscaling-Verfahren regionalisiert. In den regionalen Klimamodellen werden komplexe Topographie, die jeweiligen Landnutzungsarten sowie der Unterschied zwischen Ozean und Land besser repräsentiert (Wang et al. 2004). Statistische Regionalmodelle berechnen bestehende Zusammenhänge zwischen der →**Synoptik** und dem lokalen Wetter und wenden diese auf die globale Simulation an. Dynamische Klimamodelle werden fortlaufend durch globale Klimamodelle angetrieben und simulieren die chemischen und physikalischen Prozesse.

Multi-Modell-Multi-Szenario-Ensemblemodelle bündeln die Ergebnisse verschiedener regionaler Klimamodelle für verschiedene RCP-Szenarien und für eine Region (z.B. Europa) und ermöglichen somit eine Abschätzung der Unsicherheiten in den Klimamodellen und deren Parametrisierungen, den Emissionsszenarien und der natürlichen Klimavariabilität (Hewitt, 2004; Murphy et al. 2004).

Konkrete, zeitlich eindeutig zuordenbare regionale Vorhersagen sind jedoch nur bedingt möglich, weshalb die nachfolgend dargestellten Ergebnisse auch nur als Aussagen über die (statistisch betrachtet) wahrscheinliche Klimaentwicklung in Hessen einzustufen sind.

4 Datengrundlage und Methodik

Im Folgenden werden die wesentlichen Datengrundlagen und die Methodik erläutert, die für die landesweite Klimaanalyse Hessen bei den umfangreichen Simulationen und Analysen zum Einsatz kamen. In Abbildung 4-1 ist die Datengrundlage und die Vorgehensweise in einem Flussdiagramm skizziert.

4.1 Datengrundlagen

Die wichtigsten Einflussfaktoren auf das Meso- und Mikroklima (siehe Kapitel 3.1) Hessens sind die Topographie, die Landnutzung und die Oberflächenstruktur.

4.1.1 Topographie

Das Bundesland Hessen ist durch seine zentrale Lage in der geographischen Mitte Deutschlands gekennzeichnet. Hessen verfügt über eine Fläche von 21.115 km² und gehört größtenteils zur Mitteldeutschen Gebirgsschwelle. Dadurch ist ein kleinräumiger Wechsel von Beckenzonen, Senken, Gebirgen und Erhebungen charakteristisch (Abbildung 4-2). Die höchste Erhebung ist die Wasserkuppe in der Rhön mit 950 m ü. NHN und der tiefste Punkt ist Lorchhausen am Rhein mit 72 m ü. NHN.

Eine Bruchzone in der kontinentalen Erdkruste, welche Teil der Mittelmeer-Mjösen-Zone ist, verläuft von Süd-Südwest nach Nord-Nordost durch Hessen. Im Süden reicht der nördlichste Teil des Oberrheingrabens nach Hessen hinein. Nördlich von Alsfeld folgt die Westhessische Senke, welche das vulkanisch geprägte Osthessische Bergland vom Westhessischen Bergland trennt.

Oft reichen Ausläufer von Mittelgebirgen, wie von der Rhön, dem Westerwald, dem Odenwald oder dem Spessart, nach Hessen hinein. Inselhaft verstreut liegen ausgedehntere, z.T. aber auch solitäre Erhebungen, wie z.B. der Vogelsberg, der Taunus, der Kellerwald, der Knüll oder der Meißner.

In Tabelle 4-1 sind die Daten aufgeführt, mithilfe derer das Geländemodell für die FITNAH-Simulationen erstellt wurden. Außerhalb Hessens wurde das digitale Höhenmodell →SRTM¹⁹ in einer Auflösung von etwa 30 m x 30 m (1 Bogensekunde) genutzt.

Tabelle 4-1: Daten für die landesweite Klimaanalyse Hessen: Topographie.

Daten	Auflösung	Bereitgestellt durch
Digitales Geländemodell (DGM)	1 m x 1 m	Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation 2016
Digitales Oberflächenmodell (DOM)	1 m x 1 m	
Digitales Höhenmodell SRTM V 4.1	1 Bogensekunde, etwa 30 m x 30 m	Jarvis et al. 2008, earthexplorer.usgs.gov/

Das digitale Oberflächenmodell wurde zudem verwendet, um die Oberflächenrauigkeit und damit die Luftleitbahnen zu ermitteln.

¹⁹ STS-99 Shuttle Radar Topography Mission

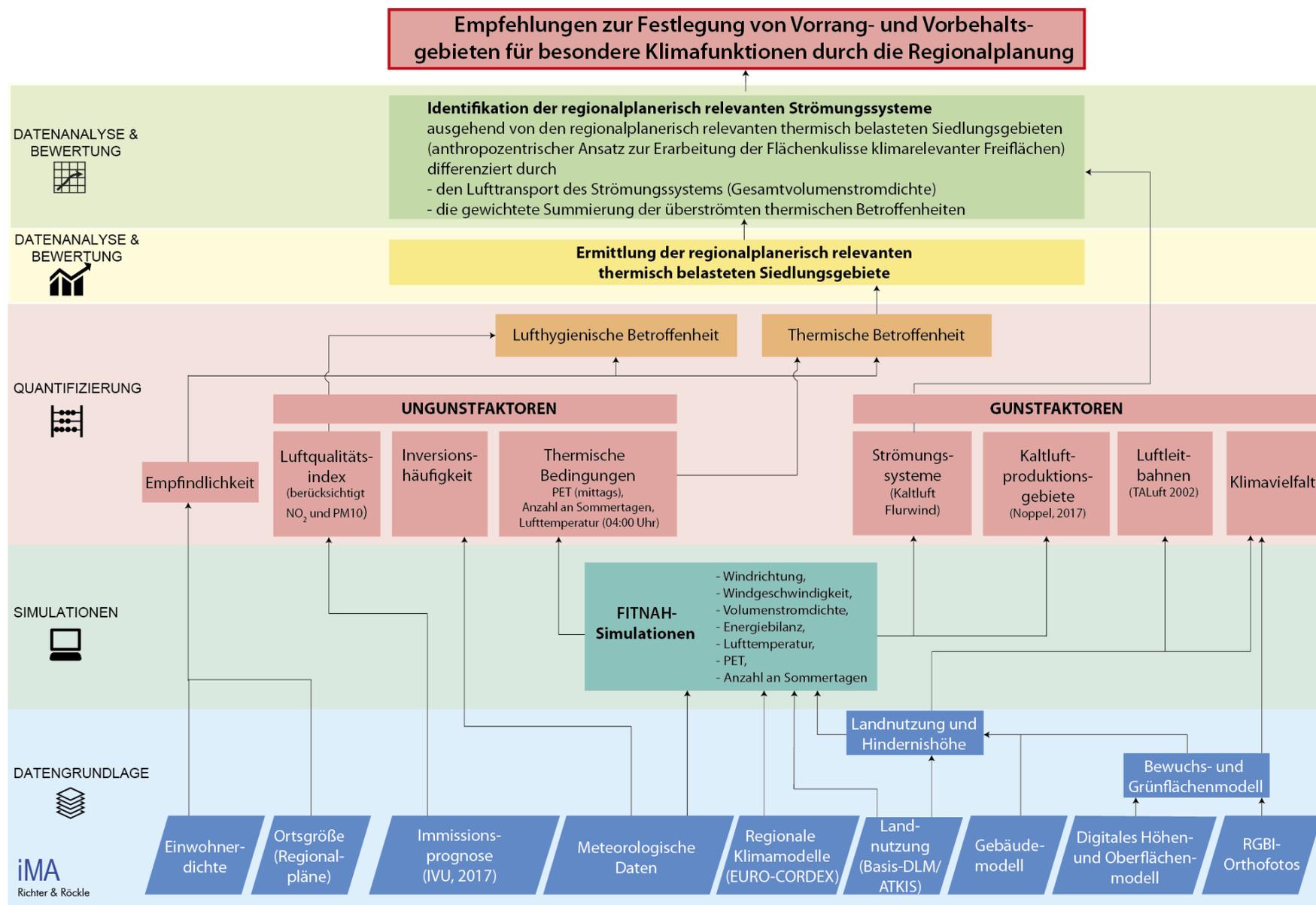


Abbildung 4-1: Datengrundlage, methodisches Vorgehen und Analysestufen bei der landesweiten Klimaanalyse Hessen.

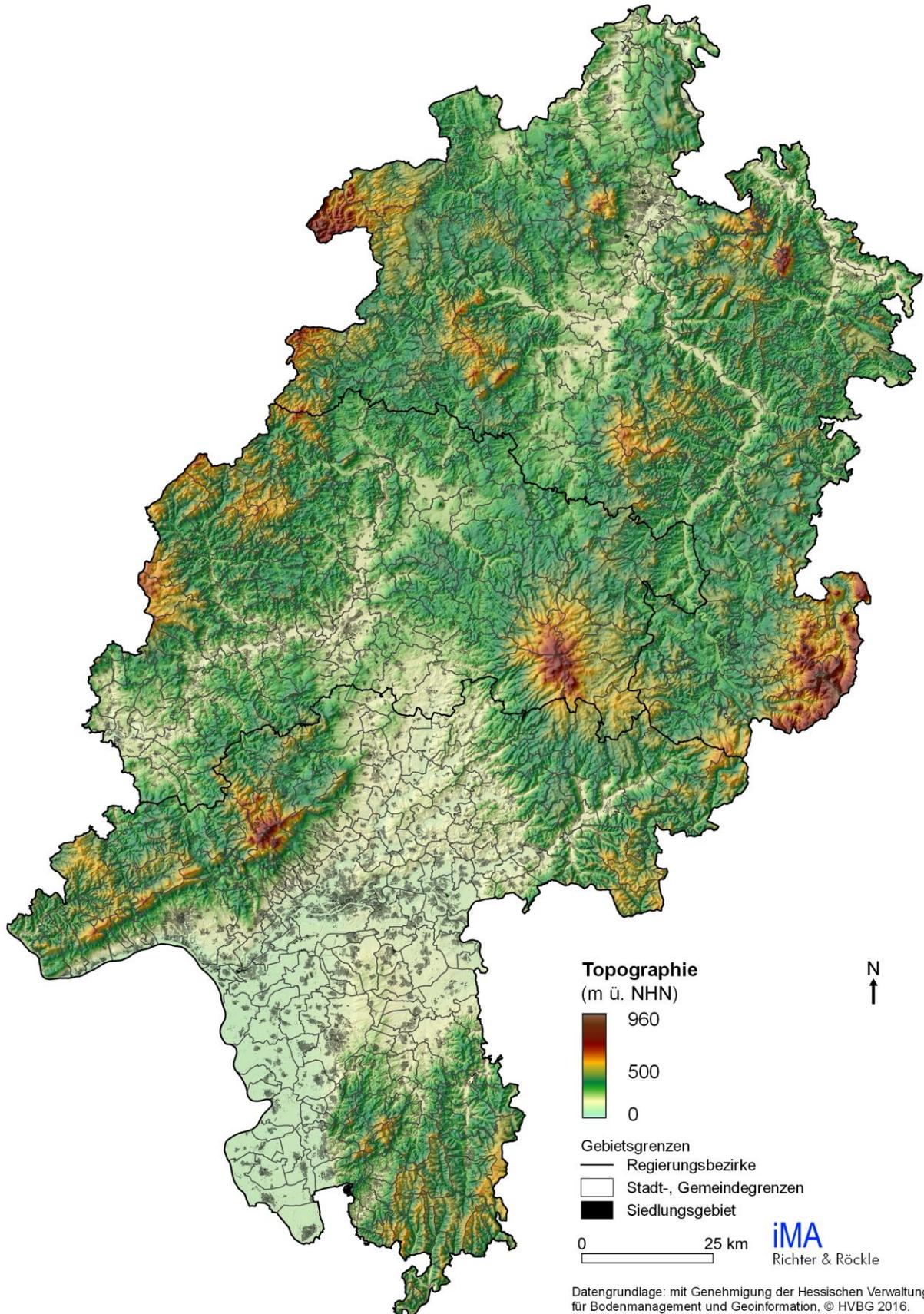


Abbildung 4-2: Höhenmodell von Hessen.

4.1.2 Landnutzung

Wälder und landwirtschaftlich genutzte Flächen dominieren mit über 82,4 % die Landnutzung in Hessen. Gewässer nehmen nur weitere 1,4 % ein. Siedlung und Verkehr haben Anteile von 9,4 % bzw. 6,8 % (Stand 31.12.2020). In Südhessen (Regierungsbezirk Darmstadt) mit den Großstädten Frankfurt am Main, Offenbach am Main und Darmstadt konzentriert sich ein Großteil der hessischen Bevölkerung. In Mittel- und Nordhessen (Regierungsbezirk Gießen und Regierungsbezirk Kassel) ist die Bevölkerungsdichte geringer, größere urbane Zentren sind Gießen, Marburg und Wetzlar sowie Kassel und Fulda.

Landnutzung und Oberflächenbeschaffenheit spielen für die Ausbildung von Mikroklimaten und damit auch für die Klimamodellierung eine elementare Rolle, da die Erdoberfläche als Umsatzfläche für die Energieumsetzung der einfallenden kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse dient (vgl. Kapitel 3.2.1).

Die Klimarelevanz der Oberflächenbeschaffenheit nimmt bei Flächen mit vergleichbaren Landnutzungsstrukturen gleiche Werte ein. Daher wurden die Landnutzungsstrukturen aus klimatischer Sicht definiert (Tabelle 4-2) und die vorhandenen Landnutzungsdaten des ATKIS® Basis-DLM-25-Datensatzes entsprechend in das FITNAH-Simulationsmodell übertragen.

Tabelle 4-2: Landnutzungsstrukturen der Klimamodellierung.

Beschriftung	Beschreibung
Wasser	Still- und Fließgewässer
Freiland	Äcker, Wiesen, Weiden, Gärten, Grünflächen
Wald/Bäume	Nadelbäume/Nadelwald, Laubbäume/Laubwald und Mischwald werden unterschieden
Streuobstwiese	Streuobstwiesen, -äcker, Obstplantagen und Baumschulen
Weinanbau	Weinanbauflächen
Gehölz	Buschartige Gehölzflächen von geringer Höhe
Moor, Sumpf	Moor, Sümpfe, feuchte Grünflächen
Hafenanlage/Schleuse	Bebauung in Gewässer
naturnahe Flächen	Flächen mit geringem versiegeltem Anteil und Grün-, bzw. Baumflächen, wie z.B. Campingplätze
versiegelte Flächen	Parkplätze, Verkehrsflächen etc.
baulich geprägte Grünfläche (<25 % Bebauung)	Grünfläche mit <25 % Bebauung
lockere Bebauung (> 25 % Bebauung)	25-50 % Bebauung
mittlere Bebauung (> 50 % Bebauung)	50-75 % Bebauung
dichte Bebauung (> 75 % Bebauung)	75-85 % Bebauung
Zentrum (> 85 % Bebauung)	>85 % Bebauung
Mischgebiete	Gewerbe- und Wohngebiet
Gewerbe und Industrie	Zeichnet sich durch einen großen versiegelten Flächenanteil neben den Gebäuden aus. Wärmeemissionen von z.B. Kraftwerken werden berücksichtigt.
Deponien, Halden, Tagebau/Bergbau	Zeichnet sich durch verdichteten Boden mit eher geringem Vegetationsbestand aus. Bei stillgelegten Deponien wird die Begrünung berücksichtigt.

Zur Berechnung der Bebauungsdichte und der Gebäudehöhe wurde auf das „3D-Gebäudemodell (LoD1²⁰)“ für Hessen zurückgegriffen. Die Siedlungsklassen aus den ATKIS[®] Basis-DLM-25 Daten wurden damit weiter differenziert.

Tabelle 4-3: Daten für die landesweite Klimaanalyse Hessen: Landnutzung.

Daten	Auflösung/ Dateiformat	Bereitgestellt durch
Basis-DLM-25 (ATKIS)	xml	Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation 2016
DOP (Digitales Orthofoto (RGBI))	0,4 m x 0,4 m	
LoD1 (Gebäude)	gml	
CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover	100 m x 100 m	European Environment Agency (EEA) 2012

Für Flächen außerhalb von Hessen wurde auf CORINE Landnutzungsdaten (EEA, 2012) zurückgegriffen.

Anschließend wurde aus den in Tabelle 4-3 aufgeführten Datengrundlagen der Anteil jeder Landnutzung pro FITNAH-→**Rechengitter**fläche ermittelt und unter Berücksichtigung der in Tabelle 4-2 aufgeführten Klimarelevanz in FITNAH-Landnutzungsklassen übergeben.

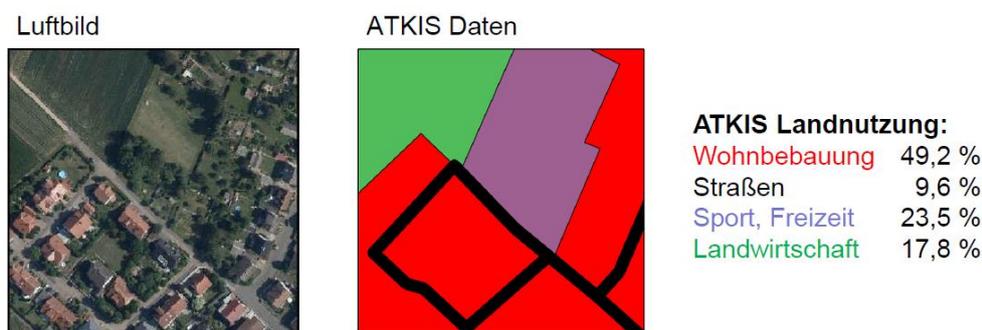


Abbildung 4-3: Vergleichende Darstellung der Landnutzung in einem Orthofoto und den ATKIS-Daten (Rechengitter 200 m x 200 m für Hessen bzw. 50 m x 50 m für den Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main).

Da die Vegetation durch die Verdunstungswirkung und Bäume zudem durch den Schattenwurf, aber auch durch deren Hinderniswirkung von besonderer klimarelevanter Bedeutung sind, wurde deren Vorkommen durch eine RGBI²¹-Luftbildanalyse ermittelt. Die Berechnung des normalisierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI) zur Identifizierung des Grünflächen- und Baumanteils wurde durch Auswertung von digitalen Orthofotos mit einer Auflösung von 0,4 m x 0,4 m durchgeführt.

Die Bewuchshöhe ergab sich auf Grundlage des Höhenunterschieds zwischen dem digitalen Oberflächenmodell (DOM) und dem digitalen Geländemodell (DGM) mit einer Auflösung von 1 m x 1 m bei gleichzeitiger Betrachtung des Vegetationsindex und der ATKIS-Daten.

²⁰ Level of Detail 1: oberirdische Gebäude ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Dachform in Form eines einfachen Klötzchens mit Flachdach

²¹ Rot-Grün-Blau-Infrarot Luftbilder

4.1.3 Messdaten

Die meteorologischen Messdaten für die landesweite Klimaanalyse Hessen wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) und dem Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) bereitgestellt (Tabelle 4-4 und Anhang 1). Vom HLNUG wurden 10-jährige Zeitreihen mit einer stundenfeinen Auflösung zur Verfügung gestellt. Die Daten des DWD stehen ebenfalls als Zeitreihen auf dessen Server zur Verfügung. Darüber hinaus wurden sie zur Validierung der Modellläufe verwendet.

Tabelle 4-4: Meteorologische Datengrundlage für die landesweite Klimaanalyse Hessen: Messdaten und Klimadaten.

Daten	Auflösung	Bereitgestellt durch
Klimadaten der HLNUG	Stundendaten, 10 Jahre	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG)
Messdaten des DWD (Ta ²² , VP, ws, G)	Stundendaten	ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/
EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment – European Domain)	Tagesdaten	https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/

4.1.4 Klimadaten

Zur Beurteilung der Auswirkungen des Klimawandels und möglicher Anpassungsstrategien wurden Daten eines Multi-Modell-Multi-Szenario-Ensembles von Regionalen Klimamodellen auch im Hinblick auf ihre Robustheit und dazugehörigen Unsicherheiten analysiert (siehe Kapitel 4.2.1.5).

Für die landesweite Klimaanalyse Hessen wurden die Ergebnisse der 16 Regionalen Klimamodelle aus dem EURO-CORDEX-Projekt (www.euro-cordex.net) ausgewertet. Diese stehen für den europäischen Raum in einer Auflösung von 12,5 km x 12,5 km zur Verfügung²³.

Um die Spannbreite möglicher klimawandelbedingter Auswirkungen aufzeigen zu können, wurden die Emissionsszenarien RCP8.5 und RCP4.5 (vgl. Kapitel 4.2.1.5) für die Zeiträume 2031 – 2060 (Mitte des 21. Jhd.) und 2071 – 2100 (Ende des 21. Jhd.) analysiert. Mit RCP8.5 wurde das „Worst-Case-Szenario“ abgedeckt und mit RCP4.5 das niedrigere der beiden mittleren Szenarien. Das RCP2.6 liegt den Modellrechnungen, welche eine Erwärmung der Mitteltemperatur von unter 2°C projizieren, zugrunde. Dem Szenario entsprechend müssten die Treibhausgasemissionen bereits ab 2020 abnehmen, was angesichts der aktuell zu beobachtenden Entwicklungen als nicht realistisch einzuschätzen ist.

Die Überführung dieser in einer deutlich geringeren Auflösung vorliegenden Klimadaten auf die der landesweiten Klimaanalyse zugrunde liegende Rechengitterauflösung erfolgte mittels „Quader-Methode“ (vgl. Kapitel 4.2.1.5, Abbildung 4-4).

²² Abkürzungen stehen für Lufttemperatur T_a (air temperature), Wasserdampfdruck VP (Vapor pressure), Windgeschwindigkeit ws (wind speed) und Globalstrahlung G.

²³ Verwendet wurden alle hier aufgeführten Modelle, von welchen Daten für das Szenario RCP 4.5 und 8.5 vorlagen https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimaprojektionen/referenz-ensemble_tabelle.html, Stand 17.01.2022

4.2 Methodik

Basierend auf der in Kapitel 4.1.2 beschriebenen „Umsetzung“ der Landnutzung in Nutzungskategorien (entsprechend ihrer Klimarelevanz) werden in den nachfolgenden Kapiteln insbesondere die mesoskalige Modellierung mit FITNAH (siehe Kapitel 4.2.1) sowie die Vorgehensweise zur Ermittlung und Bewertung der Gunst- und Ungunstfaktoren thematisiert. Des Weiteren werden die wesentlichen Parameter zur Identifizierung der Wirkräume (regional bedeutsame lufthygienisch oder human-bioklimatisch belastete Siedlungsräume, siehe Planziffer 4.2.3-3 der 3. Änderung des Landesentwicklungsplans Hessen 2000) und Ausgleichsräume (Freiräume, die wichtige Aufgaben/Ausgleichsfunktionen für die Wirkräume wahrnehmen) beschrieben. Zur Ermittlung der regional bedeutsamen lufthygienisch und/oder bioklimatisch belasteten Wirkräume bedarf es zudem einer, in der Maßstabsebene der Regionalplanung/Regionalen Flächennutzungsplanung, geeigneten Quantifizierung der Betroffenheit.

Für die Durchlüftung der identifizierten regional bedeutsamen lufthygienisch und/oder bioklimatisch belasteten Wirkräume sind vor allem die Luftleitbahnen (siehe Kapitel 4.2.2.2) wichtig, die an die Siedlungsränder heranreichen und das Potenzial haben, die Siedlungen zu durch- und zu überströmen. Da mit Ausnahme weniger Landnutzungen fast alle Flächen in unterschiedlichem Ausmaß Kaltluft produzieren, ist es erforderlich, aus dem gesamten Strömungssystemgefüge (Kaltluftproduktionsflächen und Luftleitbahnen bzw. Flurwinde) die für die identifizierten Wirkräume *relevanten* Ausgleichsräume/-flächen zu ermitteln und abzugrenzen. Dazu wird zuerst die thermische Betroffenheit in den Wirkräumen quantifiziert (Kapitel 4.2.4) um danach die regionalplanerisch relevanten thermische belasteten Siedlungsräume (Kapitel 4.2.5) zu identifizieren. Kapitel 4.2.6 beschäftigt sich mit der Bewertung der Strömungssysteme.

Die Berechnung der meteorologischen Größen für eine hochsommerliche wolkenarme und wind schwache Wetterlage (autochthone Wetterlagen, siehe Kapitel 3.1) erfolgte mit dem Modell FITNAH. Neben der Bestimmung der Strahlungs- und Energiebilanz wurde auch die zeitliche Entwicklung der meteorologischen Größen in kleinen Zeitschritten (Sekundenbereich) berechnet, so dass z.B. Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, aber auch die zur Berechnung der PET erforderlichen Größen zeitlich hoch aufgelöst vorliegen.

Für die Bewertung der Strömungssysteme (Kaltluftabflüsse und Flurwinde) auf Grundlage der Betroffenheit gibt es keine verbindlichen Kriterien, so dass in einem iterativen Prozess eine hessenweite Bewertung der einzelnen Größen und Parameter erarbeitet wurde. Als Grundlage wurden folgende VDI-Richtlinien herangezogen:

- VDI 3787 Blatt 1: Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen.
- VDI 3787 Blatt 2: Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung.
- VDI 3787 Blatt 5: Leitfaden zur Untersuchung der Entstehung und Wirkung der Kaltluft.
- VDI 3787 Blatt 10: Richtlinien für die Prädikatisierung von Luftkurorten, Erholungsorten und Heilbrunnen.

4.2.1 FITNAH – Modellbeschreibung

4.2.1.1 Das prognostische Modell FITNAH

Der landesweiten Klimaanalyse Hessen liegen Simulationen mit dem Strömungsmodell FITNAH (**F**low over **I**rregular **T**errain with **N**atural and **A**nthropogenic **H**eat-Sources) zugrunde. Das Modell löst u.a. die dreidimensionalen Bewegungsgleichungen zur Berechnung der Strömung. Es basiert auf einem voll-dynamischen Strömungskern auf Basis der Gleichungen für alle drei Windvektoren im 3D-Raum (x-, y- und z-Richtung) sowie auf den Bilanzgleichungen für Temperatur, Feuchte und Turbulenzenergie. Diese Gleichungen werden auf einem geländefolgenden dreidimensionalen Rechengitter in kleinen Zeitschritten fortschreitend gelöst. Unter Berücksichtigung des Sonnenstandes simuliert das Modell die Erwärmung bzw. die nächtliche Abkühlung der bodennahen Luft. Für die Berechnung müssen Eingangsdaten wie z.B. das digitale Höhenmodell, die Landnutzung und ein Anfangszustand der Atmosphäre vorgegeben werden.

4.2.1.2 Rechengebiet, räumliche und zeitliche Auflösung

Die räumliche Auflösung des FITNAH-Rechengitters für das Land Hessen beträgt horizontal 200 m x 200 m. Das Gebiet des Landes Hessen wird dabei vollständig abgedeckt. Bei dieser Auflösung konnte das gesamte Gebiet des Bundeslandes Hessen mit dem Modell FITNAH zusammenhängend simuliert werden. Für den Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main wurden höher aufgelöste Modellrechnungen mit einer horizontalen Auflösung von 50 m x 50 m durchgeführt. Durch die höhere Modellauflösung konnten kleinräumige Unterschiede der Landnutzung, die Bebauung und das Gelände besser aufgelöst bzw. abgebildet werden. Die Landnutzungsdaten gingen, differenziert nach Bestands- bzw. Bebauungshöhen und ihren jeweiligen Flächenanteilen, in jede Rechenzelle des →**Rechengitters** ein.

Um Einflüsse von Höhenzügen, Geländeformationen und Landnutzungen, die außerhalb der Landesgrenze von Hessen liegen, berücksichtigen zu können, wurde das Simulationsgebiet soweit erforderlich durch die angrenzenden Bundesländer erweitert.

Aus dem berechneten Tagesgang wurden drei repräsentative Zeiträume ausgewertet:

- Beginn der Kaltluftsituation in den Abendstunden mit dominierenden lokalen, hangfolgenden Kaltluftabflüssen (2,5 h nach Sonnenuntergang, 22:00 Uhr wahre Ortszeit)
- Voll ausgebildete Kaltluftströmungssysteme später in der Nacht (eine halbe Stunde vor Sonnenaufgang, 04:00 Uhr wahre Ortszeit)
- Thermische Bedingungen mittags (13:00 Uhr wahre Ortszeit).

4.2.1.3 Meteorologische Situation und Anfangszustand

Ausgangslage der FITNAH-Simulation war entsprechend der Empfehlung der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5:2003 eine autochthone Wetterlage. Dies ist eine Wetterlage, bei der die großräumige Luftdruckverteilung kaum Druckunterschiede aufweist. Da aus diesem Grund keine dominierende übergeordnete bzw. überregionale Strömung auftritt, können sich lokale thermische Strömungssysteme wie z.B. nächtliche Kaltluftströmungen im Untersuchungsgebiet besonders prägnant herausbilden.

Die Simulation wurde für einen typischen Hochsommertag durchgeführt, den 1. August. Die Sonne steht mittags um 12:00 Uhr (wahre Ortszeit WOZ) im Zenit (Sonnenhöchststand), der Sonnenuntergang erfolgt an diesem Tag um 19:30 Uhr WOZ, der Sonnenaufgang am nächsten Tag um 4:30 Uhr WOZ.

Die meteorologischen Bedingungen für den Anfangszustand sind:

- bodennahe Lufttemperatur um 15:00 Uhr im Mittel 29°C,
- relative Feuchte (20 %),
- kein übergeordneter (→**Geostrophischer**) Wind und
- wolkenlos.

Die Ergebnisse der FITNAH-Simulation repräsentieren somit typische hochsommerliche Verhältnisse.

4.2.1.4 Berechnete meteorologische Größen

Mit dem FITNAH-Modell sind flächendeckend für ganz Hessen eine Reihe von meteorologischen Größen (z.B. Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Volumenstrom) simuliert worden. Diese liegen mit höherer Auflösung für den Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main vor.

Ergebnisse der FITNAH Simulationen sind Datensätze u.a. zu:

- Windrichtung und Windgeschwindigkeit bodennah (in 5 m über Grund) und im Überdachniveau (in 28 m über Grund) und – zur späteren Bestimmung der Gesamt-Volumenstromdichte – in einigen Höhenniveaus darüber.
Die Datensätze, die Informationen zu Windrichtung und Windgeschwindigkeiten enthalten, werden sprachlich und in diesem Bericht auch als → „**Windfelder**“ bezeichnet.
- Lufttemperatur in 2 m über Grund um 22:00 Uhr und 04:00 Uhr (WOZ).

Im Nachgang aus den FITNAH-Simulationsergebnissen direkt abgeleitete weitere Datensätze sind z.B.:

- Volumenstromdichte²⁴ bodennah (Luftschicht 0 m bis 5 m über Grund), bis ins Überdachniveau (Luftschicht 0 m bis 28 m über Grund) und als Gesamt-Volumenstromdichte in der für Bevölkerung und Bebauung als „bodennah einflussreich“ angesehenen Schicht von 0 m bis 65 m über Grund.
- Kaltluftproduktionspotential der unversiegelten Freiflächen, abgeleitet aus den Ergebnissen der Energiebilanz an der Erdoberfläche.
- PET in 1,1 m über Grund um 13:00 Uhr (WOZ).
- Anzahl an →**Sommertagen** (Tage mit einem Höchstwert der Lufttemperatur in 2 m über Grund $\geq 25^{\circ}\text{C}$).

²⁴ Der Begriff Volumenstromdichte basiert hier auf der Definition der Kaltluft-Volumenstromdichte nach Matzarakis et al. (http://www.stadtklima.de/DE/d_glossar.htm#V, Stand Dezember 2020). Sie ist ein Maß für die Menge an fließender Kaltluft und wird angegeben in Kubikmeter pro Sekunde und Querschnitt der Breite 1 Meter über die gesamte betrachtete Luftschichtmächtigkeit (ausführlichere Erläuterung siehe Kapitel 3.4).

4.2.1.5 Berücksichtigung des prognostizierten Klimawandels

Die EURO-CORDEX-Daten wurden für Hessen mittels der vom Deutschen Wetterdienst entwickelten „Quader“-Methode (Früh, 2011) in eine Auflösung von 200 m x 200 m (hessenweiter Datensatz) bzw. 50 m x 50 m (Ballungsraum Frankfurt/Rhein/Main) überführt.

Die EURO-CORDEX-Daten wurden genutzt, um die möglichen Extremwerte der meteorologischen Größen Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit während der zukünftigen Dekaden zu ermitteln. Die Minima und Maxima dieser drei Klimaparameter beschreiben einen dreidimensionalen Ereignisraum (=Quader). Für die acht Eckpunkte dieses Quaders wurden acht FITNAH-Läufe durchgeführt (siehe Abbildung 4-4). Für die Werte der EURO-CORDEX-Daten wurde innerhalb des Ereignisraumes durch dreifache lineare Interpolation für jeden Punkt im FITNAH-Rechengitter eine Zeitreihe generiert. Damit kann beispielsweise die mittlere jährliche Anzahl klimatischer Kenntage, z.B. die Anzahl an Sommertagen, für die vergangene Klimanormalperiode (1971 – 2000) und unter zukünftig geänderten Klimabedingungen (für die Klimanormalperiode 2031 – 2060, 2071 – 2100) für das RCP4.5 und RCP8.5 (siehe Kapitel 3.8) berechnet werden.

Darauf aufbauend wurde die Zunahme der Häufigkeit von Wärmebelastung für die Mitte und für das Ende des 21. Jahrhunderts abgeleitet. Dies lässt dann Aussagen für die vom Klimawandel besonders betroffenen Bereiche zu.

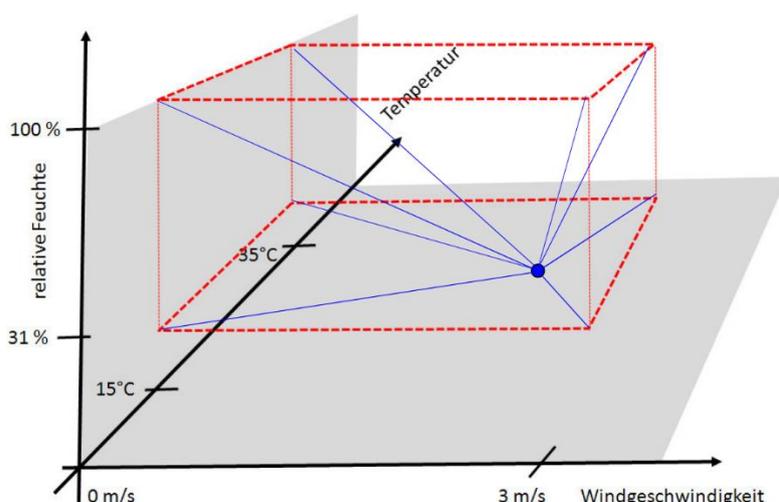


Abbildung 4-4: Skizze des Quaders zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der multiplen linearen Interpolation. Die Quadereckpunkte werden durch Simulation der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit bestimmt. Der terminbezogene Zielwert (blauer Punkt) wird durch eine multiple lineare Interpolation berechnet, wobei die Jahreszeitreihe der EURO-CORDEX-Daten als Eingangsdaten dient.

4.2.1.6 Modellvalidierung

Zur Validierung der FITNAH-Modellergebnisse wurden kontinuierliche Messdaten des HLNUG und des DWD herangezogen (siehe Tabelle 4-4). Die Winddaten wurden, sofern vorhanden, über einen 10-jährigen Zeitraum ausgewertet, wobei das besondere Augenmerk auf den Strömungsverhältnissen zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang während autochthoner Wetterlagen lag.

4.2.2 Gunstfaktoren

Gunstfaktoren im Kontext der landesweiten Klimaanalyse sind die Parameter, die eine bestehende moderate bioklimatische Situation unterstützen bzw. zur Reduktion einer bioklimatischen Belastungssituation beitragen. Gunstfaktoren sind insbesondere die nächtlichen Strömungssysteme (Kaltluftabfluss und Flurwinde, Kapitel 4.2.2.1), die Luftleitbahnen (Kapitel 4.2.2.2) und Kaltluftproduktionsgebiete (Kapitel 4.2.2.3).

Zusätzlich wurde auch die Klimavielfalt (s. Kapitel 4.2.2.4) analysiert. Diese kann einen Ungunstfaktor darstellen, sofern sie nicht vorhanden ist.

4.2.2.1 Strömungssysteme

Für die menschliche Gesundheit ist ein gesunder Schlaf von besonderer Bedeutung. Entsprechend kommt den nächtlichen Kaltluft-Strömungssystemen aufgrund ihrer Ausgleichsfunktion (Durchlüftung) eine besondere Relevanz zu. Zu Beginn der Nacht (22:00 Uhr) sind die lokalen Kaltluftabflüsse meist am intensivsten, da die Abkühlungsrate über freien Flächen am höchsten ist. Später in der Nacht flacht die Abkühlungskurve zwar ab, die Strömungssysteme in der zweiten Nachthälfte (04:00 Uhr) dauern jedoch länger an.

Die Berechnung der Strömungssysteme im FITNAH-Modell wird in verschiedenen Unterkapiteln von 4.2.1 beschrieben.

Die Volumenstromdichte²⁵ ist ein Maß für die Intensität des Strömungssystems. Ein Strömungssystem mit hoher Volumenstromdichte ist in der Lage, kleinere Siedlungen zu überströmen, gut zu durchlüften und unter Umständen auch noch für nachfolgende Siedlungsgebiete Belüftungsfunktionen zu übernehmen. Ein Kaltluftstrom mit hoher Volumenstromdichte ist gegenüber baulichen Eingriffen weniger empfindlich. Die Empfindlichkeit eines Kaltluftstroms gegenüber einer Bebauung nimmt mit abnehmender Volumenstromdichte zu. Ein Kaltluftstrom mit geringer Volumenstromdichte wird durch zusätzliche Bebauung stark gestört und weist somit eine hohe Empfindlichkeit gegenüber baulichen Eingriffen auf (Tabelle 4-5).

Tabelle 4-5: Bewertung der Empfindlichkeit des Strömungssystems anhand der Volumenstromdichte als Integral über den Gesamtvolumenstrom (Skala angelehnt an REKLIBO (2009)).

Volumenstromdichte in $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$	Empfindlichkeit gegenüber einem Eingriff
1 – 30	hoch
> 30 – 60	mittel
> 60	gering

²⁵ Die Volumenstromdichte wurde nur angelehnt an die VDI 3787 Blatt 5:2003 klassifiziert, da der Volumenstrom in der VDI-Richtlinie über einen Talquerschnitt bewertet wird. In der landesweiten Klimaanalyse Hessen wird hingegen die Volumenstromdichte einer Gitterzelle (200 m x 200 m bzw. 50 m x 50 m) des Simulationsgebietes bewertet.

4.2.2.2 Luftleitbahnen

Luftleitbahnen sollen nur in geringem Maße Rauigkeitselemente (Gebäude, höhere Vegetation usw.) aufweisen. Gebiete mit einer geringen Rauigkeit (Rauigkeitslänge < 1 m), wurden durch eine Analyse der ATKIS® Basis-DLM-25 Daten und mit Hilfe der Differenz zwischen digitalem Oberflächenmodell und digitalem Geländemodell lokalisiert. Die Differenz zwischen Oberflächenmodell und Geländemodell ist ein Maß für die Höhe der Strömungshindernisse.

Diese hindernisarmen Gebiete können die Funktion einer Luftleitbahn erfüllen, sofern sie Kaltluftströmungen in Wirkräume (Siedlungsgebiete) leiten.

4.2.2.3 Kaltluftproduktionsgebiete

Die Kaltluftproduktion ist primär abhängig von der Landnutzung, aber auch von der Exposition. Das in Abbildung 5-8 dargestellte →**Kaltluftproduktionspotential** zeigt das Vermögen von Flächen Kaltluft zu bilden. Dies ergibt sich aus dem fühlbaren Wärmestrom zwischen Boden und Atmosphäre, der zwischen 22:00 Uhr und 04:00 Uhr integriert wurde (Methodik siehe Noppel (2017)).

4.2.2.4 Klimavielfalt

Wärmebelastung im Freien tritt insbesondere in den Mittags- und Nachmittagsstunden und bevorzugt von Mai bis Oktober auf. Um einer Wärme- und Hitzebelastung in stark versiegelten Bereichen im Bedarfsfall auszuweichen, sollten Stadtbewohnern tagsüber beschattete und begrünte Plätze aufsuchen können. Grünflächen größer als 0,5 ha²⁶ gelten dabei als klimatisch relevant, d.h. es kann sich dort ein Mikroklima entwickeln, das sich von den benachbarten versiegelten Gebieten unterscheidet.

Je nach Größe und Bewuchs weisen Grünflächen deutlich geringere Temperaturen als die benachbarten versiegelten Flächen auf (Ketterer und Matzarakis, 2014). Das Nebeneinander von verschiedenen Mikroklimaten und thermischen Belastungen kann in Städten über die Betrachtung der sogenannten Klimavielfalt analysiert werden.

Die Berechnung der Klimavielfalt in Städten erfolgte über eine Analyse der Landnutzung und der Lage öffentlich zugänglicher Flächen (z.B. Waldgebiete, Parks, Uferpromenaden). Nicht berücksichtigt wurden Zoos oder Freizeitanlagen (z.B. Golfparcours) sowie Friedhöfe, da diese Bereiche nicht / bzw. nur gegen Entgelt oder eingeschränkt zugänglich sind. Unberücksichtigt blieben auch landwirtschaftliche Wiesen- oder Ackerflächen, da diese im Sommer von der Bevölkerung in der Regel nicht aufgesucht werden dürfen und zudem keine Abschattung aufweisen. Ferner wurden nur Grünflächen größer als 0,5 ha berücksichtigt. Die Distanz zwischen Grünflächen und Bebauung wurde als Luftlinie berechnet. Eine Entfernung zur Bebauung von unter 300 m Luftlinie wird als „sehr gute Klimavielfalt“ und von 300 bis 500 m als „Klimavielfalt vorhanden“ gewertet (vgl. Schumacher et al. 2016, Richter et al. 2016, Mayer, 1989). Zu berücksichtigen ist, dass Aussagen zur Klimavielfalt nur überschlägig möglich sind, da weder Aussagen zur Aufenthaltsqualität noch zur konkreten Qualität der Begrünung, z.B. von Parkanlagen, hessenweit getroffen werden können. Entsprechend ging der Parameter nicht in die Ermittlung des Parameters „Betroffenheit der Bevölkerung“ ein.

²⁶ Deutscher Rat für Landespflege: wohnungsnaher Freiräume (=Grünflächen über 0,5 ha, 4m²/Einwohner, 500 m Entfernung)

Tabelle 4-6: Einstufung der Klimavielfalt.

Distanz zu einer klimarelevanten Grünfläche (Luftlinie)	Beschreibung
< 300 m	Sehr gute Klimavielfalt vorhanden
300 m – 500 m	Klimavielfalt vorhanden
> 500 m	Keine Klimavielfalt in fußläufiger Entfernung vorhanden

4.2.3 Ungunstfaktoren

Ungunstfaktoren können belastende human-biometeorologische, insbesondere lufthygienische und thermische Bedingungen sein.

4.2.3.1 Lufthygienische Bedingungen

Die räumliche Darstellung der Luftqualität wird benötigt, um lufthygienisch belastete Siedlungsgebiete zu identifizieren. Hierzu wurden flächendeckend berechnete Jahresmittelwerte von Stickstoffdioxid (NO₂) und Feinstaub (PM10) herangezogen, die im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (IVU, 2017) erarbeitet wurden.

Für die Auswertungen wird aus den beiden betrachteten Komponenten PM10 und NO₂ ein →**Luftqualitätsindex (LQI)** gebildet. Dazu wurde der Mittelwert aus den Ausschöpfungsgraden (Ausschöpfung des Grenzwertes von jeweils 40 µg/m³) gebildet, d.h. dass beide Luftschadstoffe zu gleichen Maßen gewichtet wurden.

$$LQI = \left(\frac{PM10}{40} + \frac{NO_2}{40} \right) / 2$$

Der Index nimmt den Wert 1 an, wenn beide Konzentrationen den Grenzwert ausschöpfen. Werte > 1 können nur bei Überschreitung mindestens eines Grenzwertes entstehen.

4.2.3.2 Thermische Bedingungen

Zur Analyse der thermischen Bedingungen wurden die meteorologischen Größen Lufttemperatur nachts um 04:00 Uhr sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur PET um 13:00 Uhr und die Anzahl an Sommertagen betrachtet (siehe Tabelle 4-7). Während sich die PET tagsüber – bedingt durch den großen Einfluss der Strahlungsflüsse – stark von der Lufttemperatur unterscheidet, korreliert sie nachts signifikant mit der Lufttemperatur.

Tabelle 4-7: Folgende meteorologische Größen wurden als Indikatoren für die Ermittlung der thermischen Bedingungen herangezogen.

Parameter/Größe	Grund	Bewertung nach
Lufttemperatur um 04:00 Uhr	stärkste Ausprägung der urbanen Wärmeinsel	Perzentilen (analog vergleichbarer Gutachten z.B. des DWD)
Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) um 13:00 Uhr	Tageshöchstwert der Globalstrahlung und damit auch der PET	Matzarakis und Mayer (1997) VDI 3787 Blatt 2:2008
Anzahl an Sommertagen (Tage ≥ 25°C)	Berücksichtigung der Häufigkeit potenziell belastender Situationen	Perzentilen (analog vergleichbarer Gutachten z.B. des DWD)

Zur Bewertung der PET wurde auf Literaturwerte (Matzarakis und Mayer, 1997) zurückgegriffen.

Tabelle 4-8: Bewertung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) angelehnt an Matzarakis und Mayer (1997).

PET (°C), 13:00 Uhr	Thermisches Empfinden
≤ 29	Kalt, Komfortabel bis leicht warm
29 < PET ≤ 35	warm
35 < PET ≤ 41	heiß
>41	sehr heiß

Bei klimatologischen Untersuchungen ist es üblich, die lokale nächtliche Lufttemperatur in Bezug zum betrachteten Untersuchungsraum zu bewerten. Die Bewertung der nächtlichen Lufttemperatur und der Anzahl an Sommertagen wurde somit über → **Perzentile** vorgenommen (analog vergleichbarer Gutachten des DWD).

Die Verteilung der Lufttemperatur hat ergeben, dass die Einteilung des Wertebereichs oberhalb des 80. Perzentils in 6 Bewertungsstufen ein ausreichend differenziertes Bild liefert.

Die Anzahl an Sommertagen (Höchstwert der Lufttemperatur ≥ 25°C) wurde für ganz Hessen mit Hilfe der Quader-Methode (Früh et al. 2011) auf Grundlage der EURO-CORDEX-Daten für die Klimanormalperiode 1971 – 2000 (Ist-Zustand) sowie für die Zeiträume 2031 – 2060 und 2071 – 2100 auf Basis der Treibhausgaskonzentration-Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 berechnet. Die Anzahl an Sommertagen ist indirekt auch ein Indikator für die Häufigkeit von potentieller Wärmebelastung. Zur Einstufung der Anzahl an Sommertagen wurde der Zeitraum 1971 – 2000 herangezogen.

Die Verteilung der Anzahl an Sommertagen hat ergeben, dass ein Wertebereich oberhalb des 50. Perzentils sinnvoll ist. Sieben Bewertungsstufen sorgen für eine ausreichend differenzierte Betrachtung der potentiellen Wärmebelastung Gesamthessens.

4.2.4 Ermittlung der bioklimatisch belasteten Siedlungsgebiete (Wirkräume)

Die Klimaanalyse verfolgt in ihrer Herangehensweise einen anthropozentrischen Ansatz mit dem Ziel, durch raumordnerische Festlegungen eine Aufrechterhaltung bzw. Verbesserung der bioklimatischen Situation für eine möglichst große Anzahl der Bevölkerung bewirken zu können.

Um die – im Kontext der 3. Änderung des Landesentwicklungsplans Hessen 2000, Planziffer 4.2.3-3 (Z) – relevanten Strömungssysteme und die zugrundeliegenden Kaltluftentstehungsgebiete und Luftleitbahnen zu identifizieren, sind die räumlichen Wirkungszusammenhänge zwischen den thermisch und/oder lufthygienisch belasteten Räumen und den ihnen zugeordneten Ausgleichsräumen zu ermitteln.

Da keine einheitliche bundesweite Bewertungsskala existiert, ab welcher Temperatur und welcher Anzahl betroffener Personen ein Siedlungsraum – im regionalplanerischen Maßstab – als thermisch belastet einzustufen ist, wurde die nachfolgend dokumentierte Einstufungs-Kaskade zugrunde gelegt (siehe Kapitel 4.2.4 und 4.2.5). Diese wurde zusammen mit Akteuren der obersten Landesplanungsbehörde, den oberen Landesplanungsbehörden und des Regionalverbandes FrankfurtRheinMain in iterativen Schritten erarbeitet und auf die siedlungsstrukturellen Verhältnisse Hessens angepasst. Der relative Bezug auf die Teilräume der Planungsregion mit den ver-

gleichsweise höchsten thermischen Belastungen und den vergleichsweise höchsten Betroffenenzahlen ist für die Ermittlung der raumordnerischen Relevanz der dazugehörigen Ausgleichsräume wichtig.

Zur Identifizierung der Wirkräume – hier der human-bioklimatisch und thermisch belasteten Siedlungsgebiete – musste zunächst die „thermische Betroffenheit“ ermittelt und quantifiziert werden (Abbildung 4-5). Die „thermische Betroffenheit“ wurde berechnet mit Hilfe der „Empfindlichkeit“ der Bevölkerung und der „thermischen Bedingungen“ (Abbildung 4-5).

Die Empfindlichkeit der Bevölkerung basiert auf den Angaben zur Einwohnerdichte pro Hektar und der Ortsgröße in Hektar (Abbildung 4-5 links). Die thermischen Bedingungen wurden mit Hilfe der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) um 13:00 Uhr, der Anzahl der Sommertage und der nächtlichen Lufttemperatur um 04:00 Uhr berechnet (siehe Abbildung 4-5 rechts).

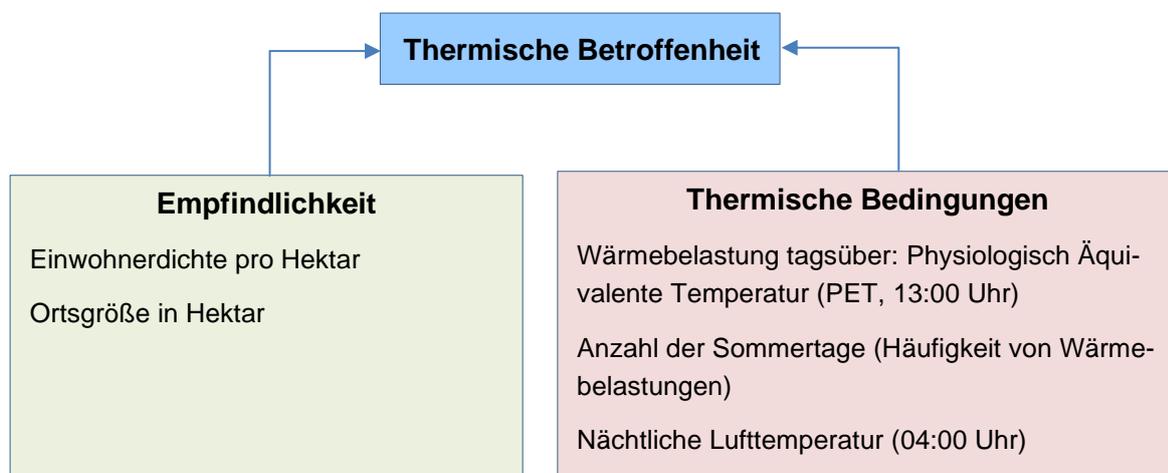


Abbildung 4-5: Die thermische Betroffenheit ergibt sich aus der Zusammenschau der Empfindlichkeit und der thermischen Bedingungen. Die Empfindlichkeit wird aus der Einwohnerdichte je Hektar und der Ortsgröße berechnet. Die thermischen Bedingungen setzen sich aus der Wärmebelastung tagsüber (PET, 13:00 Uhr), der Anzahl der Sommertage und der Lufttemperatur nachts (04:00 Uhr) zusammen.

Je größer das Siedlungsgebiet, je höher die Einwohnerdichte (→ **Empfindlichkeit**) und je belastender die thermischen Bedingungen sind, desto höher ist die thermische Betroffenheit und umso höher wird die Relevanz eines zugehörigen Strömungssystems eingestuft. Entsprechend sind Strömungssysteme nach ihrer Durchlüftungsfunktion und der Ausprägung der Volumenströme für die Siedlungsgebiete zu bewerten.

4.2.4.1 Ermittlung der Empfindlichkeit der Bevölkerung

Die Empfindlichkeit der Bevölkerung wurde im Rahmen der landesweiten Klimaanalyse Hessen aus der Einwohnerdichte pro Hektar und der Ortsgröße²⁷ berechnet (siehe auch Tabelle 4-9).

Tabelle 4-9: Einstufung der Empfindlichkeit der Bevölkerung.

Empfindlichkeit der Bevölkerung							
		Einwohnerdichte pro Hektar					
		≤ 10	11 – 50	51 – 100	101- 200	201 – 500	> 500
Ortsgröße Fläche (ha)	keine Ortslage	–	gering	gering	mittel	mittel	hoch
	≤ 100	gering	gering	mittel	mittel	hoch	hoch
	> 100 – 200	mittel	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch
	> 200 – 400	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	hoch
	> 400 – 1000	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	sehr hoch
	>1000	hoch	hoch	hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch

Es wird generell angenommen, dass einem Kaltluftstrom mit identischen Eigenschaften, der auf eine größere Ortschaft trifft, auch eine größere Bedeutung zukommt, als wenn er auf eine kleinere Ortschaft trifft. Die Einwohnerdichte pro Hektar trägt der inhomogenen Verteilung der Bevölkerung innerhalb einer Ortschaft Rechnung.

Die Einwohnerdaten liegen als Punkte in einem Raster von 100 m x 100 m vor. Die Auswertungen beziehen sich auf dieses Raster und wurden anschließend auf das 200 m x 200 m Raster gemittelt, bzw. den 50 m x 50 m großen Zellen für das Raster des Ballungsraums Frankfurt/Rhein-Main zugeordnet.

²⁷Die Ortsgröße wurde aus der Flächengröße der „Siedlungsgebiete“ aus den aktuellen Regionalplänen (Regionalplan Nordhessen 2009, Regionalplan Mittelhessen 2010, Regionalplan Südhessen/Regionaler Flächennutzungsplan 2010) berechnet.

Dazu wurden zuerst die „Siedlungsgebiete“ aus den in den Regionalplänen festgelegten „Vorranggebieten Siedlung, Bestand“ und „Vorranggebieten Industrie und Gewerbe, Bestand“ ermittelt. Um zusammenhängende, jedoch in den GIS-Daten ggf. durch linienhafte Infrastrukturen „durchschnittene“ Vorranggebiete „zusammenzuführen“, wurden die Vorranggebietsflächen beider Gebietstypen jeweils mit einem 50 m-Puffer umgeben und bei Überschneidung zu einem Siedlungsflächenpolygon verschnitten.

4.2.4.2 Ermittlung der thermischen Bedingungen

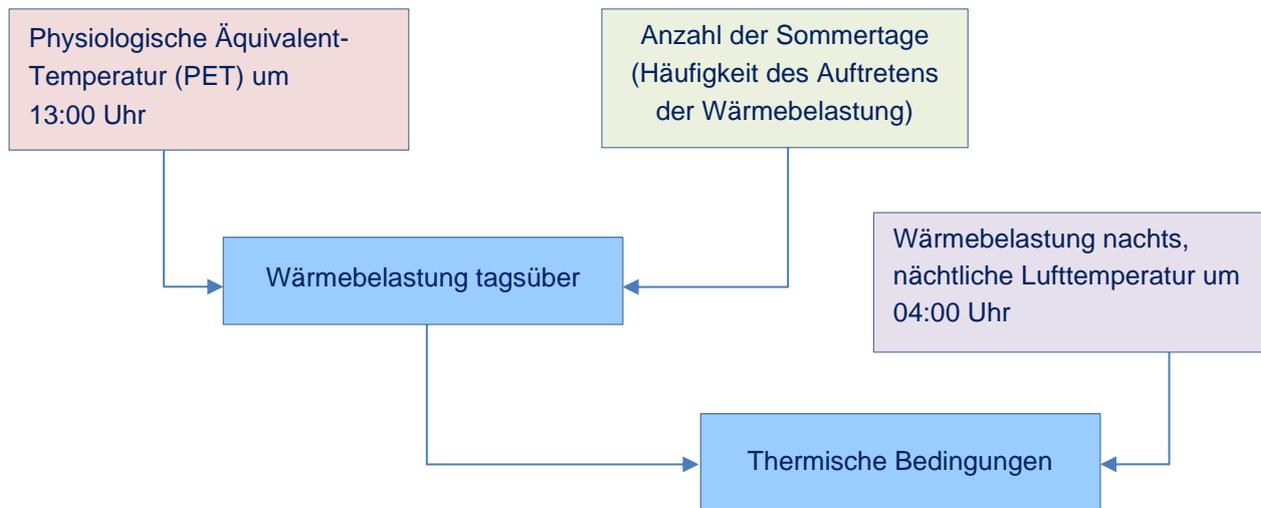


Abbildung 4-6: Ermittlung der thermischen Bedingungen.

Die „thermischen Bedingungen“ (Tabelle 4-11) wurden aus der „Wärmebelastung tagsüber“ (ermittelt aus PET und Anzahl Sommertage, Tabelle 4-10) und der „Wärmebelastung nachts“ (Lufttemperatur um 04:00 Uhr) ermittelt (Abbildung 4-6).

Tabelle 4-10: Einstufung der Wärmebelastung tagsüber aus PET und der Anzahl an Sommertagen.

		Wärmebelastung tagsüber			
		PET (°C), 13:00 Uhr			
		≤29°C	>29°– 35°C	>35°– 41°C	>41°C
Anzahl an Sommertagen	≤ 50 % Perzentil	gering	gering	gering	mittel
	> 50 – 80 % Perzentil	gering	gering	gering	mittel
	> 80 – 90 % Perzentil	gering	gering	mittel	hoch
	>90 – 95 % Perzentil	gering	gering	mittel	hoch
	>95 – 97,5 % Perzentil	gering	mittel	hoch	sehr hoch
	>97,5 – 99 % Perzentil	gering	hoch	sehr hoch	sehr hoch
	>99 % Perzentil	gering	sehr hoch	sehr hoch	extrem

Tabelle 4-11: Einstufung der thermischen Bedingungen ermittelt aus der Wärmebelastung tagsüber und der Wärmebelastung nachts.

Thermische Bedingungen						
Wärmebelastung nachts Lufttemperatur nachts 04:00 Uhr WOZ		Wärmebelastung tagsüber (ermittelt aus PET 13:00 Uhr WOZ und der Anzahl an Sommertagen)				
		gering	mittel	hoch	sehr hoch	extrem
	≤ 80 % Perzentil	gering	gering	gering	gering	mittel
	> 80 – 90 % Perzentil	gering	mittel	mittel	mittel	hoch
	>90 – 95 % Perzentil	mittel	mittel	hoch	hoch	sehr hoch
	>95 – 97,5 % Perzentil	hoch	hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch
	>97,5 – 99 % Perzentil	hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch	extrem
	>99 % Perzentil	hoch **1)	sehr hoch	sehr hoch	extrem	extrem

* betrifft v.a. Wasserflächen, diese sind tagsüber vergleichsweise kühl. Nachts geben die vergleichsweise warmen Wasserflächen Wärme an die Atmosphäre ab.

Die Abbildung 5-20 zeigt flächendeckend die „Einstufung der thermischen Bedingungen“.

4.2.4.3 Einstufung der thermischen Betroffenheit

Die Einstufung der thermischen Betroffenheit ergab sich aus der Zusammenschau der Datensätze „Empfindlichkeit“ und „thermische Bedingungen“. Die Einstufung erfolgte über fünf Wertstufen von gering bis extrem thermisch belastet (Tabelle 4-12).

Tabelle 4-12: Einstufung der thermischen Betroffenheit ermittelt aus den Wertstufen der Tabelle „Empfindlichkeit der Bevölkerung“ und der Tabelle „Thermische Bedingungen“.

Thermische Betroffenheit						
Empfindlichkeit der Bevölkerung (Ortsgröße, Einwohnerdichte)		Thermische Bedingungen Wärmebelastung tagsüber (PET: 13:00 Uhr und Anzahl Sommertage) kombiniert mit der Wärmebelastung (Lufttemperatur) nachts 04:00 Uhr				
		gering	mittel	hoch	sehr hoch	extrem
	gering	gering	mittel	mittel	hoch	sehr hoch
	mittel	mittel	mittel	hoch	sehr hoch	sehr hoch
	hoch	mittel	hoch	sehr hoch	sehr hoch	extrem
sehr hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch	extrem	extrem	

In Abbildung 5-21 ist die resultierende thermische Betroffenheit der Bevölkerung in Hessen dargestellt.

4.2.4.4 Ermittlung der lufthygienischen Betroffenheit

Die Einstufung der lufthygienischen Betroffenheit wurde aus der Zusammenschau der Datensätze Empfindlichkeit und LQI abgeleitet. Den Kombinationen aus dem LQI und der Empfindlichkeit wurden vier Wertstufen von „gering“ bis „sehr hoch“ lufthygienisch betroffen zugewiesen (Tabelle 4-13).

Tabelle 4-13: Einstufung der lufthygienischen Betroffenheit aus den Einstufungen der Tabelle „Empfindlichkeit der Bevölkerung“ und dem lufthygienischen Index LQI.

Lufthygienische Betroffenheit					
Empfindlichkeit der Bevölkerung (Ortsgröße, Einwohnerdichte)		Lufthygienische Bedingungen (LQI)			
		gering LQI ≤ 0,35	mittel 0,35 < LQI ≤ 0,55	hoch 0,55 < LQI ≤ 0,77	sehr hoch LQI > 0,77
	gering	gering	mittel	mittel	hoch
	mittel	gering	mittel	hoch	sehr hoch
	hoch	gering	hoch	sehr hoch	sehr hoch
	sehr hoch	gering	hoch	sehr hoch	sehr hoch

Die Abbildung 5-17 zeigt den flächendeckenden LQI, die Abbildung 5-22 die resultierende flächendeckende „Betroffenheit Luftqualität“.

4.2.5 Ermittlung der regionalplanerisch relevanten thermisch belasteten Siedlungsgebiete

Da die Siedlungsgebiete in ihrer Struktur und Einwohnerdichte teilweise sehr heterogen sind, ist es erforderlich, die vorliegenden Informationen mit Blick auf den regionalplanerischen Maßstab stärker zu aggregieren.

Als ein Kriterium zur Identifizierung und Differenzierung der Wirkräume kann dabei die flächenhafte Ausdehnung des Auftretens der thermischen Betroffenheit innerhalb eines zusammenhängenden Siedlungsgebietes herangezogen werden. Ziel ist es, regionalplanerisch relevante thermisch belastete Siedlungsgebiete zu ermitteln.

Die Ermittlung der regionalplanerisch relevanten thermisch belasteten Siedlungsgebiete erfolgte mittels statistischer Analyse der Häufigkeit mittlerer bis extremer thermischer Betroffenheit (Tabelle 4-12) in den Siedlungsgebieten (Definition siehe Fußnote in Kapitel 4.2.4.1).

Dabei wird unterschieden nach

- a) „Siedlungsgebiete“, die basierend auf der Auswertung der 200 m x 200 m Rechengitter **mindestens 120 ha** aber weniger als 200 ha mit mindestens mittlerer thermischer Betroffenheit aufweisen, wurden als „*thermisch belastetes Siedlungsgebiet mit großem Flächenanteil mit mindestens mittlerer thermischer Betroffenheit*“ eingestuft. Dies sind insbesondere die regionalen Bevölkerungsschwerpunkte mit großflächig dichter Bebauung, häufig die Kernstädte der Mittel- und Oberzentren. Die für das jeweilige Siedlungsgebiet relevantesten Strömungssysteme (Kapitel 4.2.6 und Kapitel 6) können als potentielle **Vorbehaltsgebiete** für besondere Klimafunktionen in den Abwägungsprozess bei der Aufstellung der Regionalpläne eingehen.

- b) „Siedlungsgebiete“, die **mindestens 200 ha** mit mindestens mittlerer thermischer Betroffenheit aufweisen, wurden als „*thermisch belastetes Siedlungsgebiet mit sehr großem Flächenanteil mit mindestens mittlerer thermischer Betroffenheit*“ eingestuft. Die für das jeweilige Siedlungsgebiet relevantesten Strömungssysteme (Kapitel 4.2.6 und 6) haben einen größeren Schutzanspruch. Sie können als potentielle **Vorrang- oder Vorbehaltsgebiete** für besondere Klimafunktionen in den Abwägungsprozess bei der Aufstellung der Regionalpläne eingehen.

Die hessenweit ermittelten regionalplanerisch relevanten thermisch belasteten Siedlungsgebiete (200 m x 200 m) wurden auch der weiteren Analyse für das Gebiet des Ballungsraums Frankfurt/Rhein-Main (50 m x 50 m) zugrunde gelegt.

Der vorsorgende Ansatz der landesweiten Klimaanalyse kommt bei der Ermittlung der thermisch belasteten Siedlungsgebiete insofern zum Tragen, als dass vereinzelt Siedlungsgebiete mit mindestens einem großen Flächenanteil mittlerer bis extremer thermischer Betroffenheit, die in der Klimanormalperiode 1971 – 2000 eine moderate Wärmebelastung aufweisen, als regionalplanerisch relevante thermisch belastete Siedlungsgebiete eingestuft werden. Da in allen Landesteilen von Hessen mit einem Anstieg der Temperaturen zu rechnen ist (siehe Kapitel 5.1.5), stellt die landesweite Klimaanalyse so perspektivisch auch die Siedlungsgebiete dar, in denen mittel- bis langfristig mit thermischen Belastungen zu rechnen ist.

4.2.6 Identifikation der belüftungsrelevanten Strömungssysteme (→Ausgleichsräume)

Ausgehend von dem anthropozentrischen Ansatz sind Strömungssysteme nur dann von planerischer Relevanz, wenn ihnen belastete Siedlungsgebiete (Wirkräume) zugeordnet werden können, die von den Ausgleichsleistungen profitieren. Insofern gilt: je größer die Betroffenheiten, desto (regionalplanerisch) bedeutender sind die Ausgleichsräume.

In Abbildung 4-7 ist eine idealisierte Situation skizziert. Die Grafik zeigt unterschiedlich belastete Wirkräume (hier charakterisiert durch die Bebauungsdichte) und einen Kaltluftstrom, der die Tal-lage von Westen her belüftet. In dieser idealisierten Darstellung ist jedem ersichtlich, dass der Kaltluftstrom, der auf den belasteten Siedlungsraum trifft, eine höhere Ausgleichsrelevanz besitzt, als der identische Kaltluftstrom, der nur die mäßig belasteten Siedlungsgebiete oder das Umland belüftet.

In der Realität sind sowohl die Kaltluftabflussverhältnisse wie auch die Belastungssituation deutlich heterogener. Die Kaltluft kann aus unterschiedlichen Bereichen dem Siedlungsgebiet zuströmen, sie kann unterschiedliche Intensitäten aufweisen und sie kann unterschiedlich belastete Siedlungsbereiche treffen.

Um die Kaltluftströmungen zu detektieren, welche in den Wirkräumen zu einer Verbesserung der thermischen Situation beitragen, wurde im Rahmen der landesweiten Klimaanalyse ein automatisierter, allgemein gültiger, objektiver Algorithmus entwickelt, der auf das gesamte Bundesland angewandt werden kann.

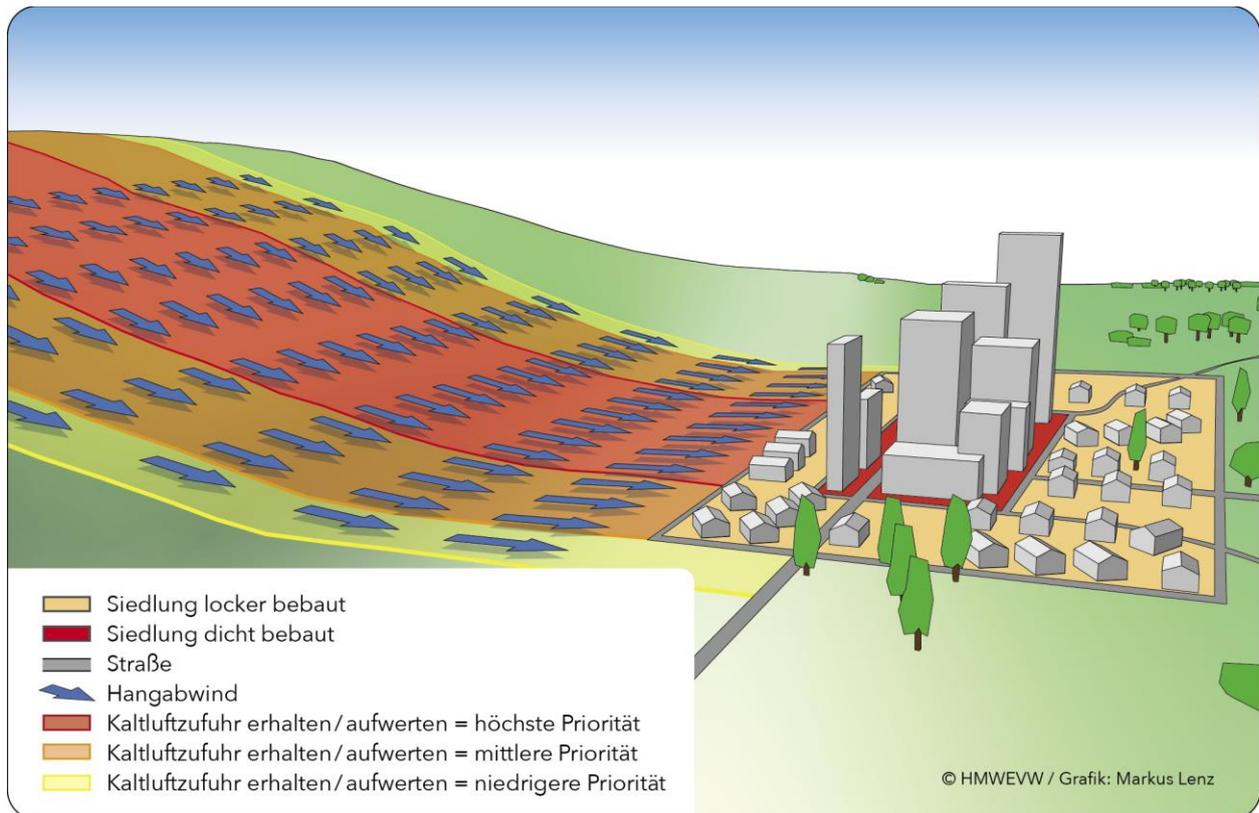


Abbildung 4-7: Exemplarische Skizze zur Veranschaulichung der Abgrenzung der relevanten Strömungssysteme (nach REKLIBO, 2009).

Wesentliche Grundlage sind die mit FITNAH berechneten Windfelder und die flächendeckende Analyse der Belastungssituation. Daraus lassen sich in einem zweistufigen Verfahren die für Siedlungsgebiete relevanten →**Kaltlufteinzugsgebiete** (Ausgleichsräume) und in Zusammenhang mit der Betroffenheit der Wirkräume die Relevanz der Strömung bestimmen.

1. Abgrenzung der für den jeweiligen Wirkraum relevanten Strömungssysteme und der Kaltluftproduktionsgebiete, die für den zugehörigen Wirkraum von Bedeutung sind.
2. Von *allen* Raster-Zellen innerhalb dieser Kaltlufteinzugsgebiete wurden die →**Luftpakete** mit Hilfe von Vorwärts→**trajektorien** verfolgt, um eine Maßzahl aus der Betroffenheit der belüfteten Siedlungsgebiete zu berechnen.

Schritt 1:

Um die für die Wirkräume relevanten Kaltluftströmungen zu ermitteln, wurde – ausgehend vom Siedlungsraum in Richtung Freiraum – der Weg der Luftpakete zurückverfolgt. Dadurch konnte der zu betrachtete Ausgleichsraum abgegrenzt werden.

Bei der Bewertung der Strömung zum Termin 22:00 Uhr, ca. 2,5 Stunden nach Sonnenuntergang, wurde eine Verfolgungszeit von zwei Stunden angesetzt, um die für die Siedlungsgebiete relevanten Einzugsbereiche zu ermitteln. In der zweiten Nachthälfte wurde eine längere Verfolgungszeit von drei Stunden gewählt, um der längeren Fließzeit der Kaltluft Rechnung zu tragen.

Schritt 2:

Im zweiten Schritt wurde aus jeder Rasterzelle, die sich im abgegrenzten Ausgleichsraum befindet, eine Vorwärtstrajektorie gestartet, um so den Weg des jeweiligen Luftpaketes zu verfolgen (vgl. Noppel, 2017). Die Relevanz der jeweiligen Strömung ergibt sich aus der Addition der Werte der thermischen Betroffenheit (siehe Kapitel 4.2.4.3), die von den Luftpaketen auf ihrem Weg überstrichen werden. Je höher die thermische Betroffenheit und je höher die Anzahl der überstrichenen Rechengitter, desto bedeutsamer ist die Strömung.

Die berechnete Maßzahl wurde mit der reziproken Zeitdauer gewichtet, die ein Luftpaket abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit bis zu den jeweiligen Siedlungsgebieten zurückgelegt hat. Somit wurden siedlungsnahen Flächen (kurze Reisezeit) höher bewertet als siedlungserne Flächen (lange Reisezeiten).

5 Ergebnisse der landesweiten Klimaanalyse Hessen

Dieses Kapitel zeigt die Ergebnisse der Simulationen mit dem Strömungsmodell FITNAH (Kapitel 5.1) und die daraus abgeleitete Quantifizierung der Gunst- und Ungunstfaktoren (Kapitel 5.2).

Zu den Gunstfaktoren zählen die Strömungssysteme (Kapitel 5.1.1), die Kaltluftproduktionsgebiete (Kapitel 5.1.2) und die Luftleitbahnen (Kapitel 5.2.1). Ergänzend wurde auch die Klimavielfalt ermittelt (Kapitel 5.2.2).

Zu den Ungunstfaktoren gehören die thermischen Bedingungen nachts (Kapitel 5.1.3) und tagsüber (Kapitel 5.1.4), die lufthygienischen Bedingungen (Kapitel 5.2.3) und die Inversionshäufigkeit (Kapitel 5.2.4). Die Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels für Hessen werden in Kapitel 5.1.5 dargestellt.

Im Kapitel 5.3 wird die Empfindlichkeit und Betroffenheit dargestellt.

5.1 Ergebnisse der FITNAH-Simulationen

5.1.1 Strömungssysteme (Windrichtung und -geschwindigkeit, Volumenstromdichte)

Zur Betrachtung der Durchlüftung ist neben dem bodennahen Wind (hier ausgewertet für den bodennahen Raum in 5 m über Grund) auch der Wind im Überdach-Niveau (hier: 28 m über Grund) von Bedeutung.

Die simulierten Windgeschwindigkeiten um 22:00 Uhr sind in Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 und um 04:00 Uhr in Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 dargestellt. Für die Betrachtung der Intensität einer Strömung ist die Volumenstromdichte die wesentliche Größe. Die bodennahe Volumenstromdichte und die Volumenstromdichte im Überdach-Niveau sind für 22:00 Uhr in Abbildung 5-5 und für den 04:00 Uhr Termin in Abbildung 5-6 dargestellt.

In Hessen stellen sich, besonders aus den Einzugsgebieten der Rhön, des Taunus und des Vogelsbergs kommend, intensive Kaltluftströmungen ein. Die Kaltluftabflüsse weisen um 22:00 Uhr relativ hohe Geschwindigkeiten auf, haben aber noch vergleichsweise geringe Reichweiten (z.B. im Bereich des Wetterauwinds). Dahingegen reichen die Kaltluftvolumenströme um 04:00 Uhr morgens schon weit in die Ebene hinaus. Der Wetterauwind, der besonders im Großraum Frankfurt eine hohe Bedeutung hat, ist in Abbildung 5-6 deutlich zu erkennen.

In Mittelhessen entsteht die großräumig relevante Kaltluft u.a. im Westerwald, dem Rothaargebirge und im Gladenbacher Bergland. Die **→Hangwinde** strömen in die Tallagen, vereinigen sich zu Strömungssystemen und fließen weiter talabwärts, wobei sich ihre Mächtigkeit meist vergrößert. So entsteht insbesondere im oberen Lahntal ein großer Kaltluftvolumenstrom, welcher auch kleinere Geländeerhebungen entlang des Tals überströmt.

In Nordhessen bilden sich besonders ausgeprägte Kaltluftvolumenströme an der Hohen Rhön und der Kuppenrhön sowie im äußersten Nordwesten Hessens an den Hängen des Langenbergs (Rothaargebirge). Auch im Tal der Fulda südlich des Kasseler Beckens, an den Höhen des Knüllgebirges, des Kellerwalds, der Hohen Gras und des Hohen Meißner findet man ausgeprägte Kaltluftströmungen.

Da die bodennahe Kaltluft durch die Oberflächenrauigkeit abgebremst wird, sind sowohl die Windgeschwindigkeit als auch der Volumenstrom geringer als in höheren Schichten. Besonders

in bebauten Bereichen bleibt die Strömung häufig über dem Dachbereich erhalten, auch wenn sie innerhalb der Bebauung zum Erliegen kommt.

Die **Windgeschwindigkeit** der thermischen induzierten Windsysteme (Kaltluftströmungssysteme und Flurwinde) beträgt – basierend auf der FITNAH-Simulation – für Hessen maximal 4,4 m/s in der Luftschicht bis in eine Höhe von 28 m über Grund. Am häufigsten liegt in dieser Höhe jedoch die Windgeschwindigkeit bei ca. 1,5 m/s um 22:00 Uhr (Abbildung 5-2) und bei ca. 1,2 m/s um 04:00 Uhr (Abbildung 5-4).

In 5 m über Grund weisen 95 % der simulierten Kaltluftströme Windgeschwindigkeit unter 2,2 m/s auf (Abbildung 5-1, Abbildung 5-3). Auch hier ist ein Rückgang der Windgeschwindigkeit des Kaltluftstroms von 22:00 bis 04:00 Uhr zu verzeichnen. Gründe dafür sind, dass sich die Täler zunehmend mit Kaltluft füllen und dadurch der Antrieb reduziert wird und dass mit zunehmender Schichtdicke des Kaltluftstroms die Höhe des Geschwindigkeitsmaximums der Kaltluftströmung mehr und mehr angehoben wird.

Das Bewertungsschema der Strömungssysteme auf Basis der Volumenstromdichte und der Empfindlichkeit gegenüber Eingriffen ist in Tabelle 4-5 dargestellt. Die dazugehörigen Ergebnisse zeigt die Abbildung 5-7.

In den Abendstunden sind die größten Volumenstromdichten (dunkelblau) an den Hängen des Taunus, des Odenwaldes, des Lahntals, im Tal der Fulda südlich des Kasseler Beckens und an den Höhen um Kassel zu finden. Auch im Bereich des Vogelsbergs bilden sich im Laufe der Nacht intensive Kaltluftabflüsse aus. In der zweiten Nachthälfte entwickeln sich markante Strömungssysteme im Norden von Hessen entlang des Rothaargebirges bis zum Solling. Das bedeutsamste Strömungssystem ist jedoch der Wetterauwind in Zentral-Hessen, der sich insbesondere in der zweiten Nachthälfte ausbildet.

Strömungssysteme mit mittlerer Volumenstromdichte (hellblau) bilden sich über weiten Teilen von Hessen aus.

Strömungssysteme von geringer Intensität (gelb) zeigen sich überwiegend in Gebieten mit geringer Reliefenergie, starker Rauigkeit und hohem Waldanteil. Dazu gehören viele Gebiete von Waldhessen, der Schwalm oder dem Burgwald.

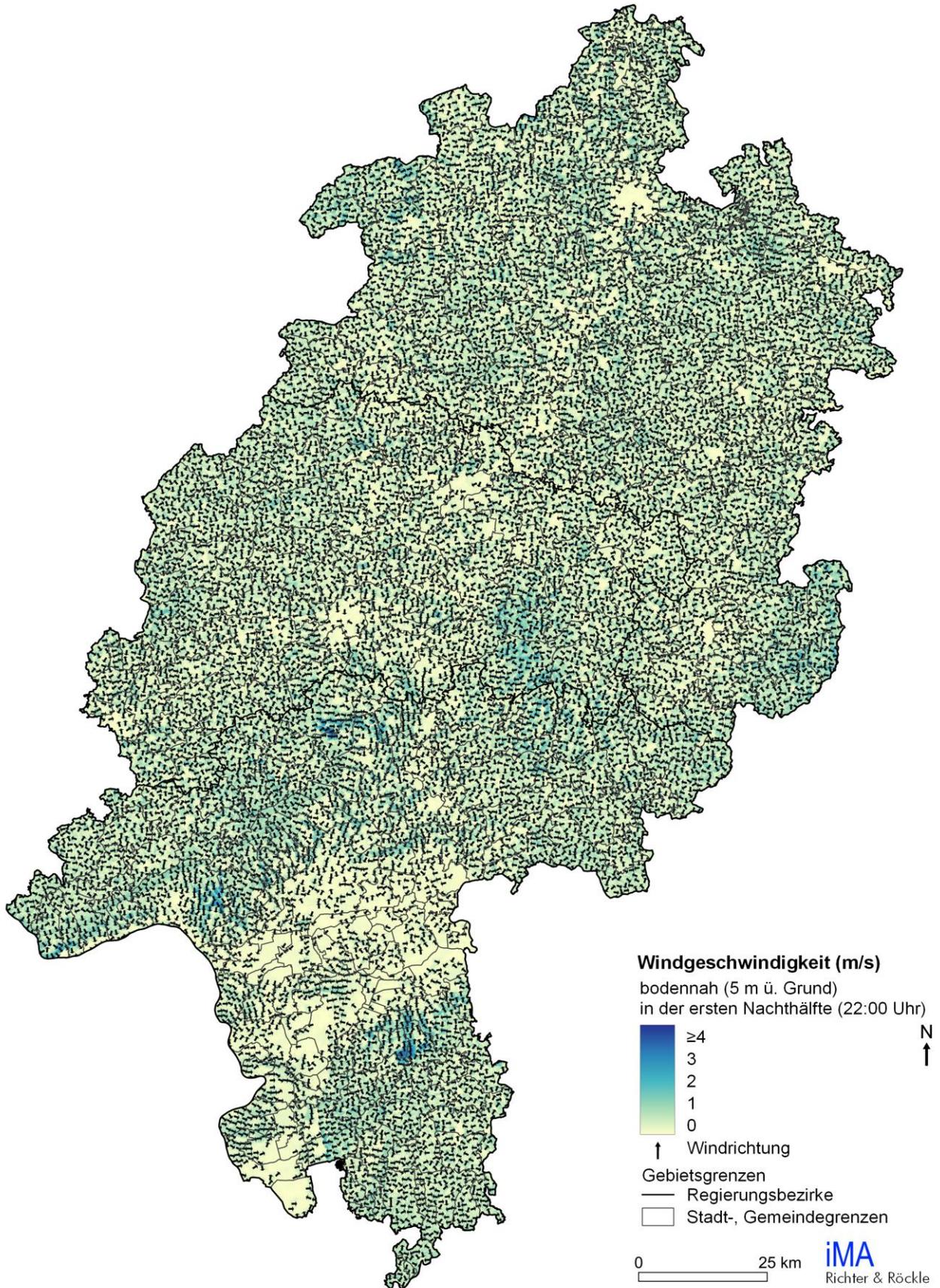


Abbildung 5-1: Windgeschwindigkeit bodennah (5 m über Grund) in der ersten Nachthälfte (22:00 Uhr).

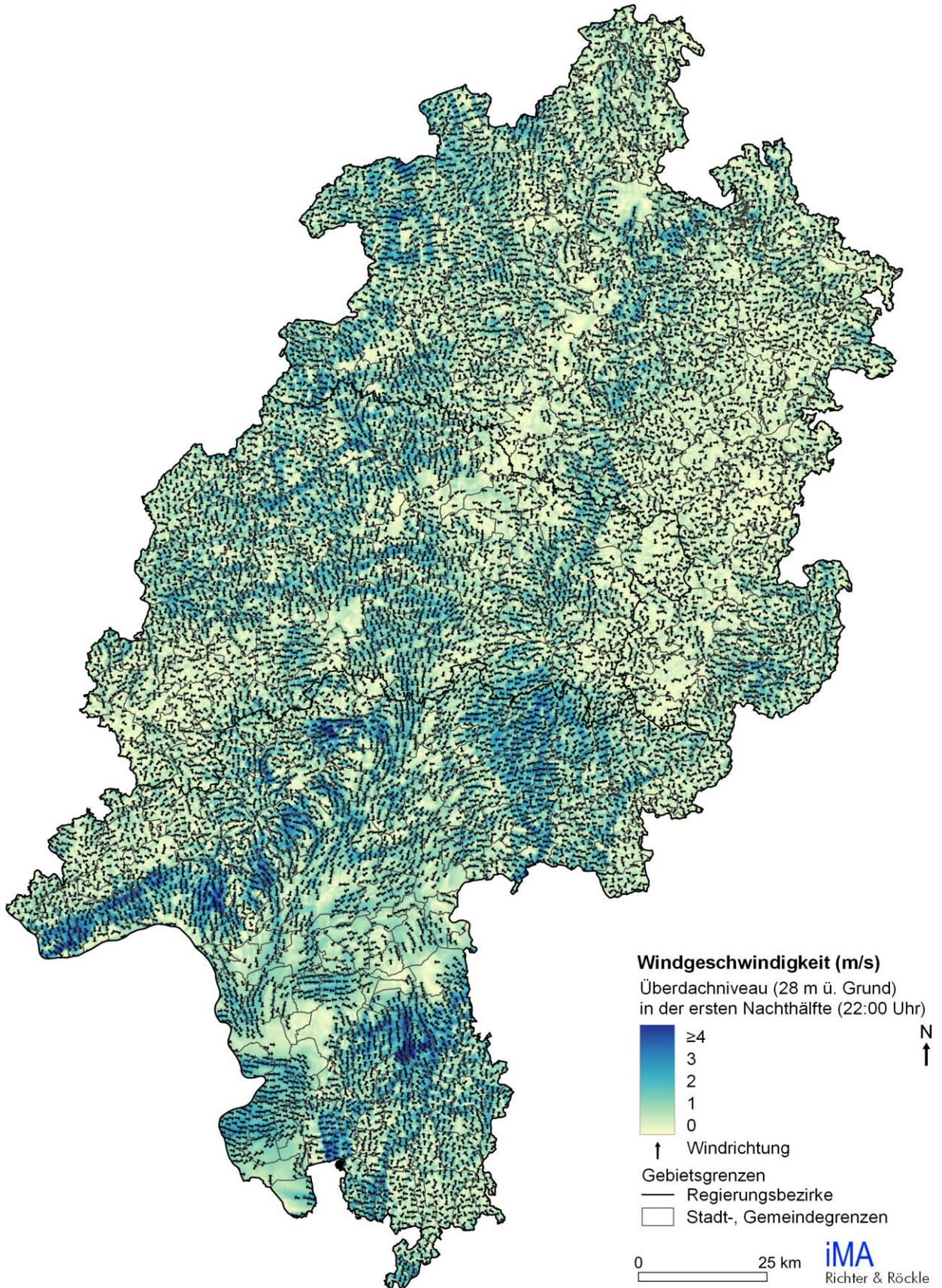


Abbildung 5-2: Windgeschwindigkeit in Überdachniveau (28 m über Grund) in der ersten Nachthälfte (22:00 Uhr).

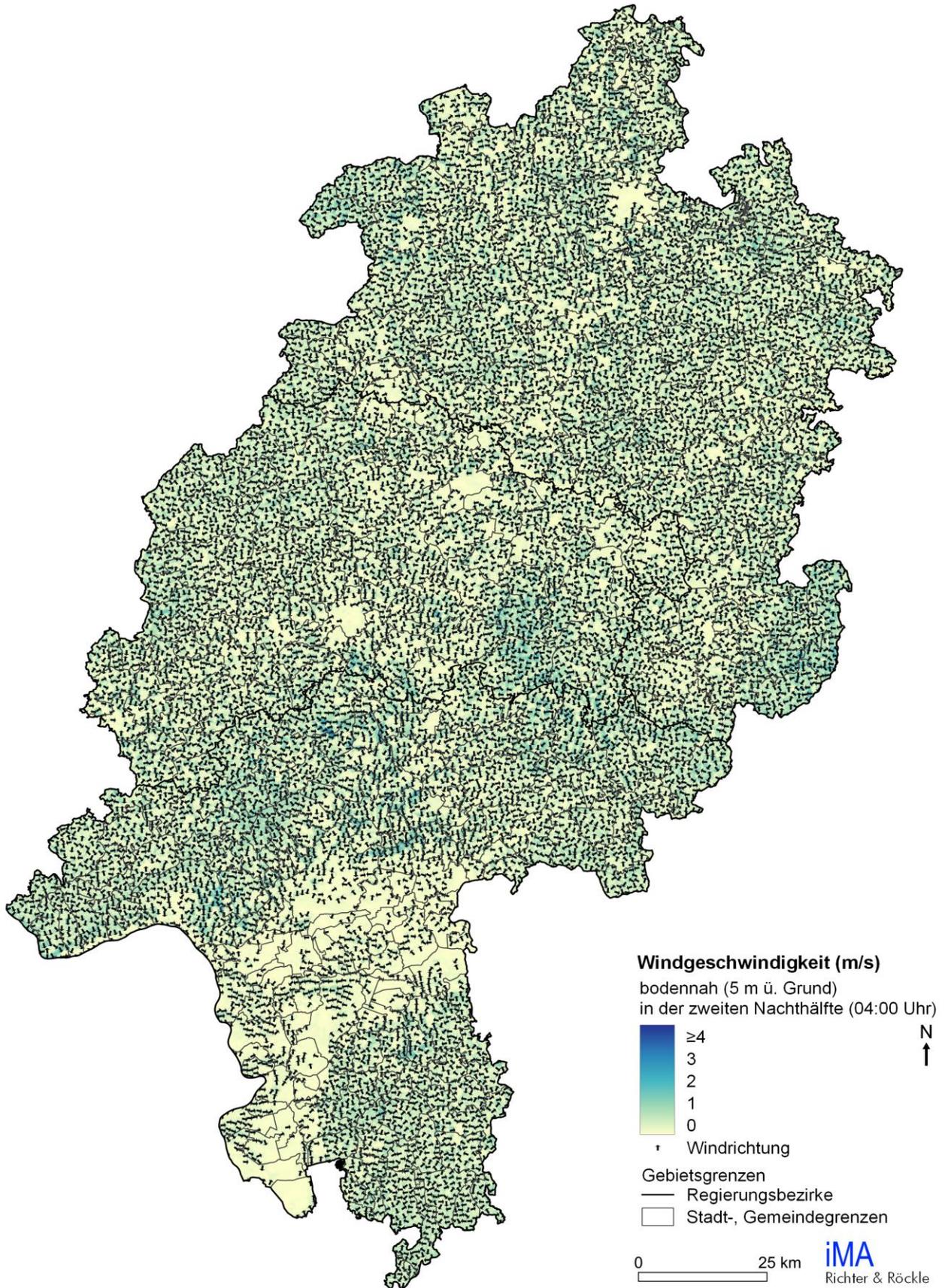


Abbildung 5-3: Windgeschwindigkeit bodennah (5 m über Grund) in der zweiten Nachthälfte (04:00 Uhr).

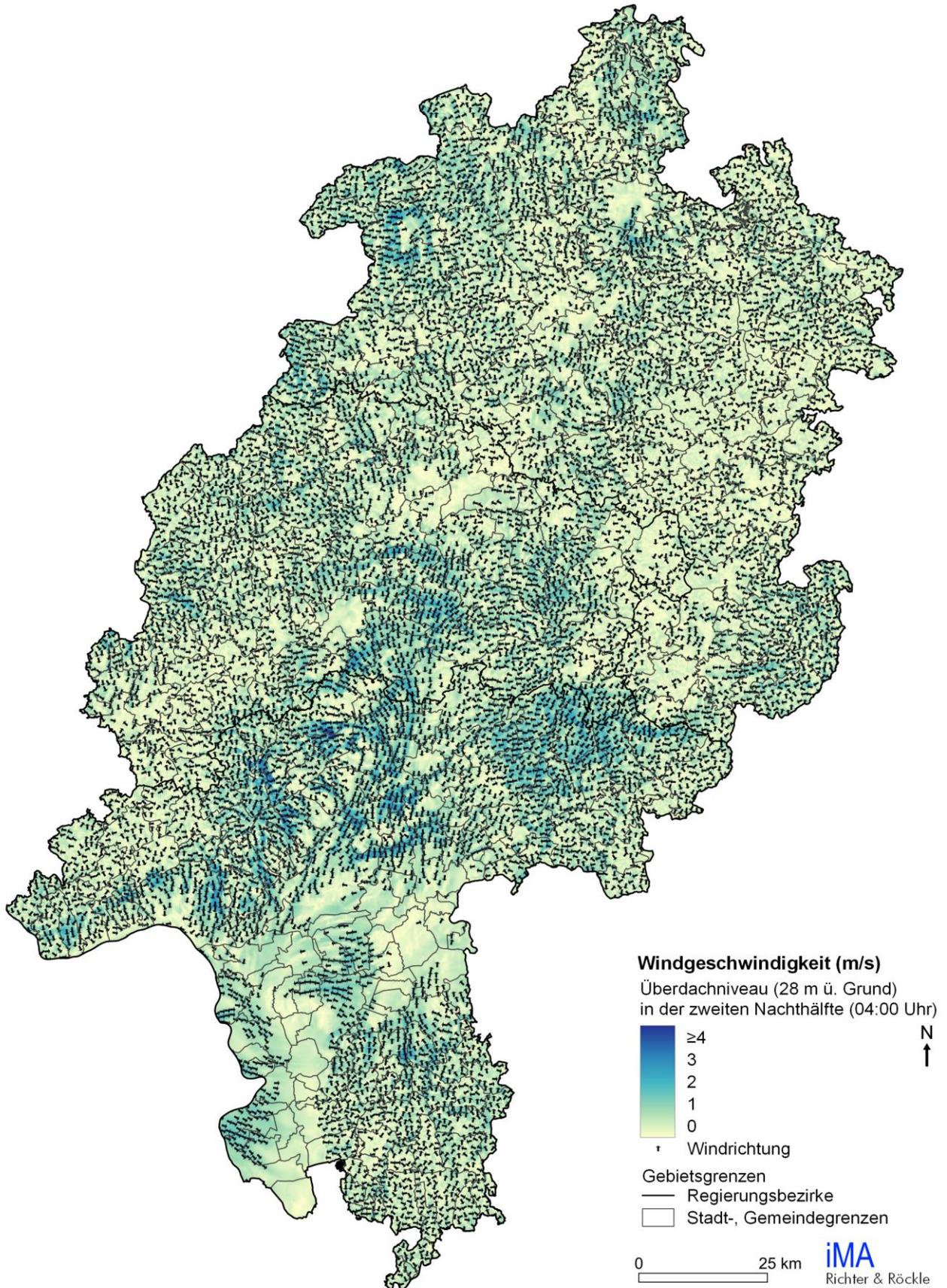


Abbildung 5-4: Windgeschwindigkeit in Überdachniveau (28 m über Grund) in der zweiten Nachthälfte (04:00 Uhr).

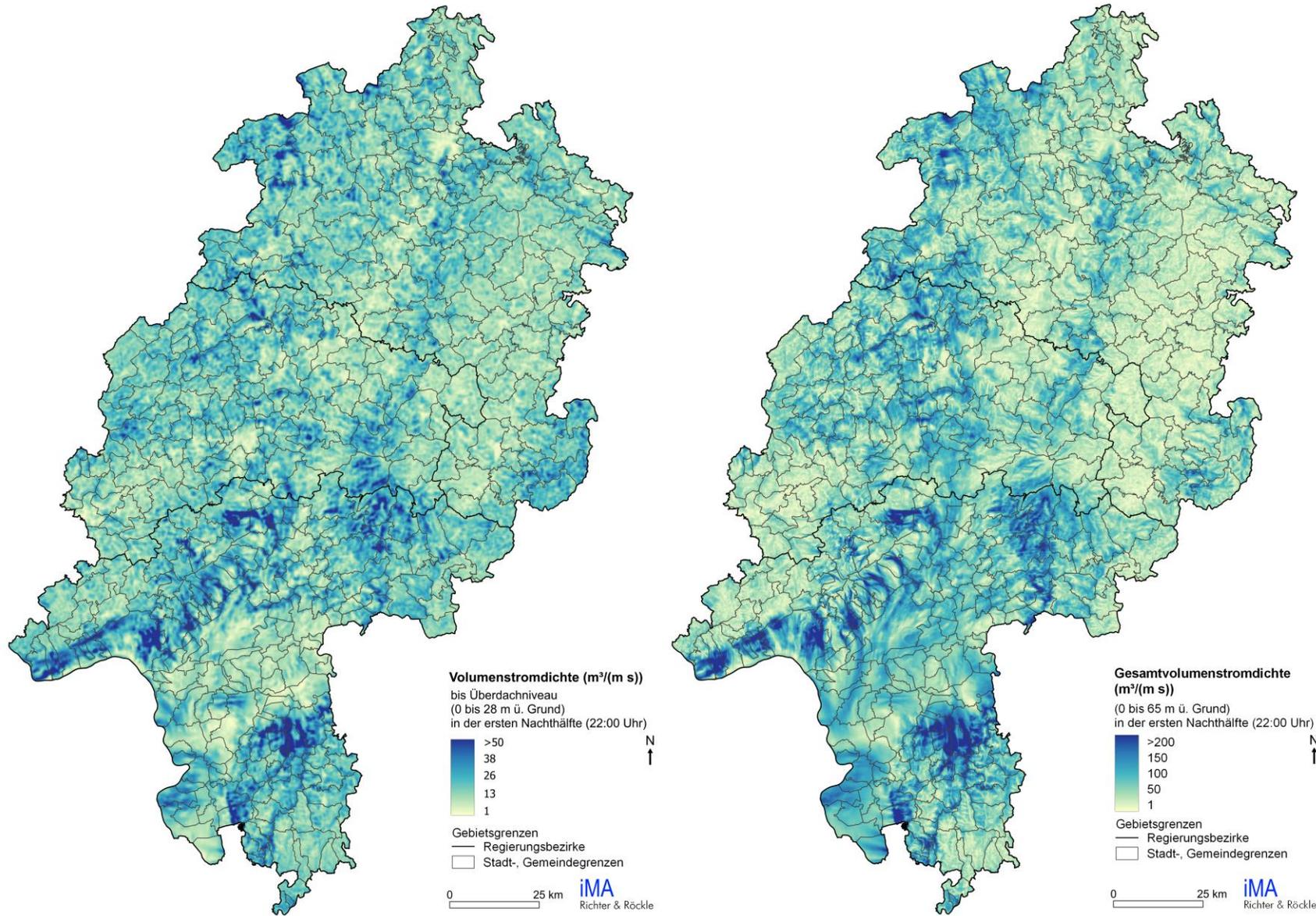


Abbildung 5-5: Volumenstromdichte in der ersten Nachthälfte (22:00 Uhr) bis Überdachniveau (0 bis 28 m) (links) und Gesamtvolumenstromdichte (rechts).

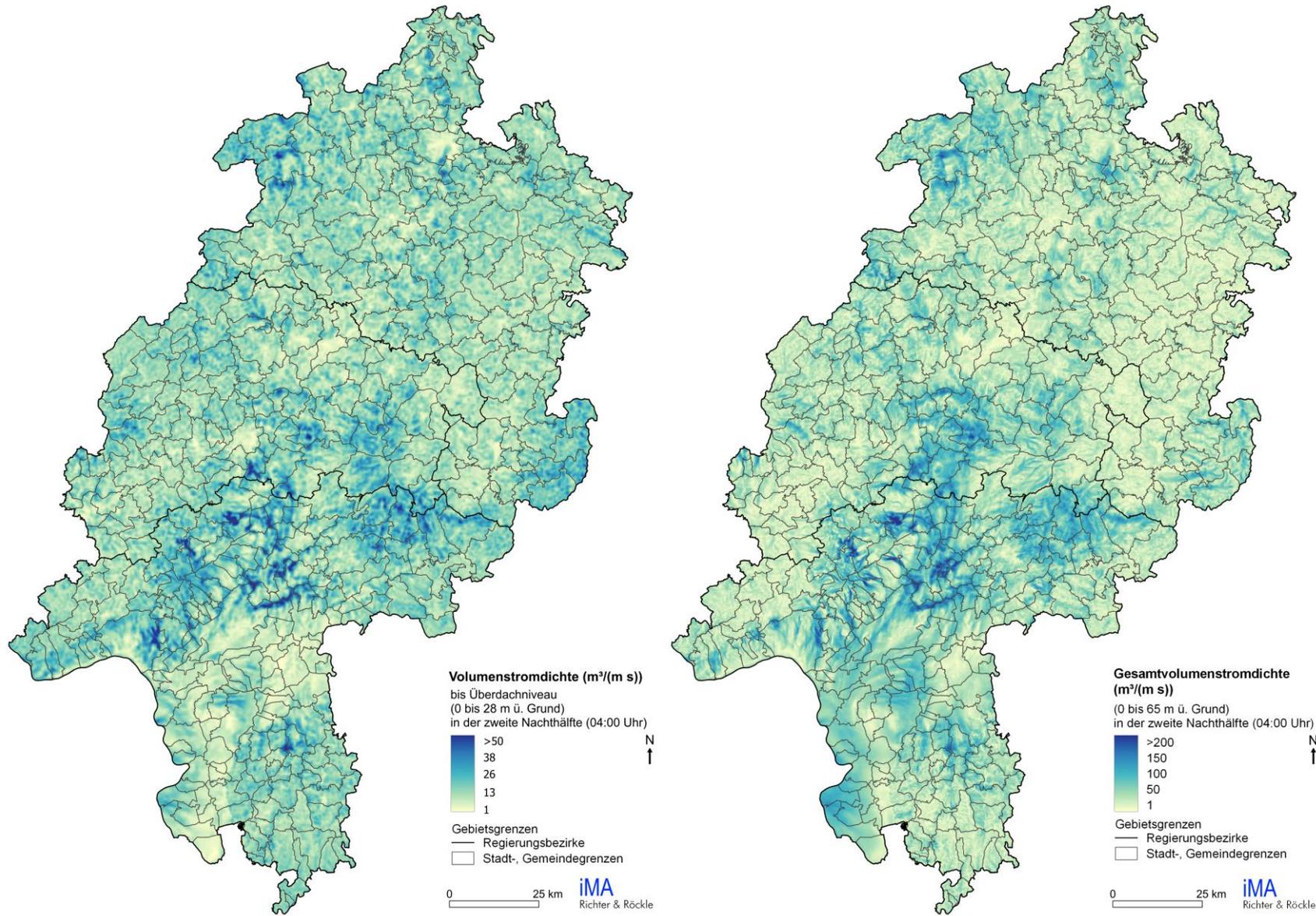


Abbildung 5-6: Volumenstromdichte in der zweiten Nachthälfte (04:00 Uhr) bis Überdachniveau (0 bis 28 m) (links) und Gesamtvolumenstromdichte (rechts).

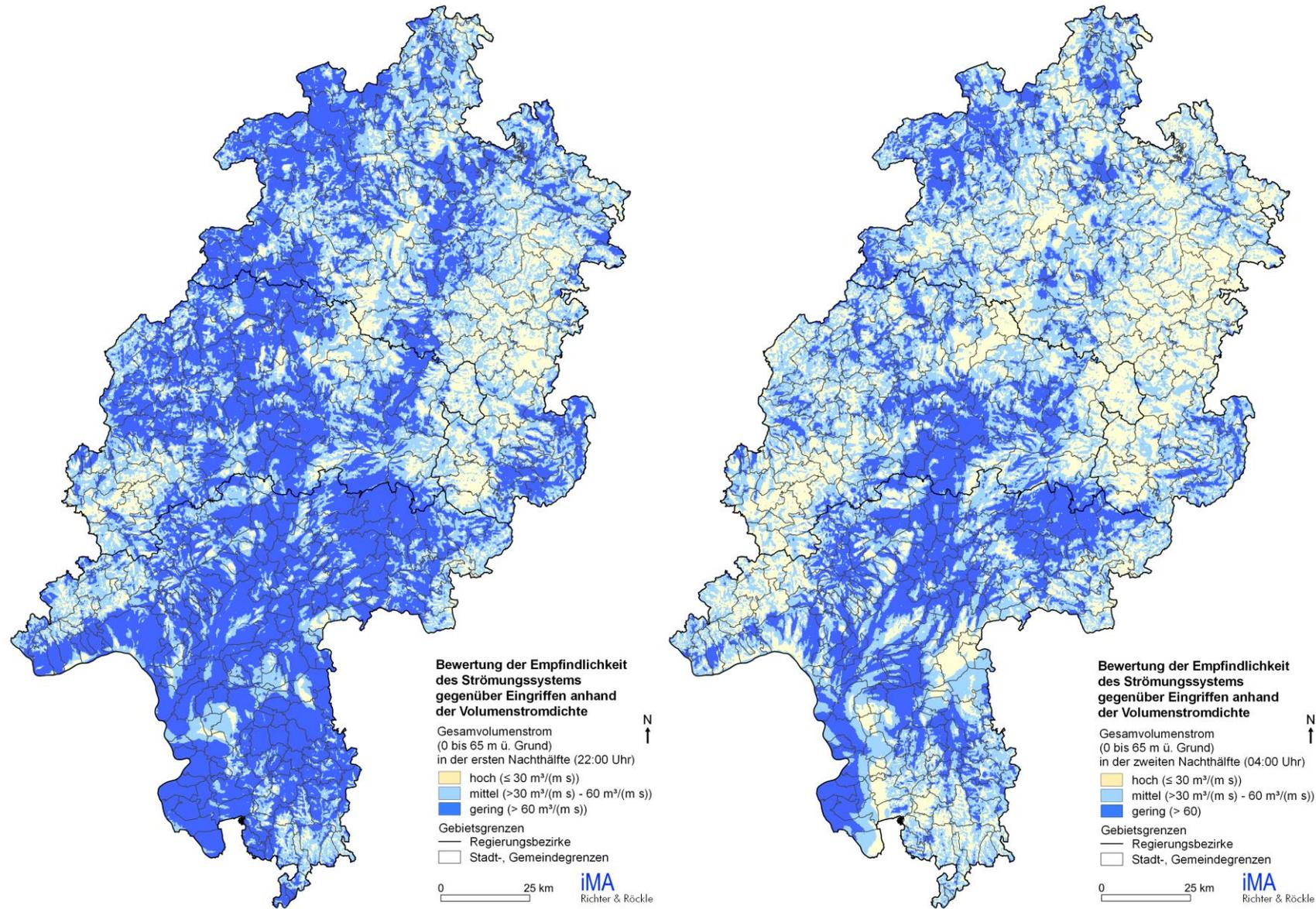


Abbildung 5-7: Nach Intensität bewertete Volumenstromdichte (siehe Tabelle 4-5) in der ersten und zweiten Nachthälfte.

5.1.2 Kaltluftproduktionsgebiete

Die Kaltluftproduktion ist primär abhängig von der Landnutzung (Tabelle 4-2), aber auch von der Topografie, Orografie sowie Lage der Fläche (u.a. Ausrichtung, Hangneigung, Rauigkeit). Das in Abbildung 5-8 dargestellte Kaltluftproduktionspotential zeigt das Vermögen von Flächen Kaltluft zu bilden. Dies ergibt sich aus dem fühlbaren Wärmestrom zwischen Boden und Atmosphäre, welcher zwischen 22:00 Uhr und 04:00 Uhr integriert wurde (Methodik siehe Noppel (2017)).

5.1.3 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur in Hessen in 2 m über Grund zeigt sowohl ein Süd-Nord-Gefälle wie auch eine Abhängigkeit von der Höhenlage und der Landnutzung.

So ist die Lufttemperatur in Südhessen in den Siedlungsgebieten im Rheingraben und entlang des Mains hessenweit am höchsten. Im landesweiten Vergleich weist Darmstadt aufgrund seiner Lage im Oberrheingraben und des für Städte typischen, hohen Versiegelungsgrads die höchste Wärmebelastung auf. Im Bereich des Odenwalds, des Taunus und im nordöstlichen Teil Südhessens (Ausläufer des Spessarts und der Rhön) befinden sich die vergleichsweise kühleren Gebiete.

In Mittelhessen sind die relativ höheren Lufttemperaturen in größeren Städten im Lahntal und Dilltal, aber auch in Lauterbach, Alsfeld, Stadtallendorf oder Kirchhain augenscheinlich. Deutlich kühlere Flächen finden sich am Vogelsberg und im Gladenbacher Bergland.

In Nordhessen befinden sich entsprechend der Höhenlage die kühleren Gebiete in der Rhön (Wasserkuppe), gefolgt von Flächen im Rothaargebirge (Langenberg, Ziegenhelle). In Kassel ist die Lufttemperatur vergleichsweise am höchsten, gefolgt von Fulda und Bad Hersfeld. Auch größere Seeflächen wie der Edersee können sich während der Sommermonate/Hitzewellen stark aufwärmen (siehe Messwerte des Jahres 2018 mit einer Oberflächenwassertemperatur von über 25 °C im August)²⁸. Da größere Seeflächen nachts nur gering abkühlen, liegt dort die Lufttemperatur nachts 2 bis 3 K über der Umgebungstemperatur.

Wälder sind tagsüber durch die Verschattung vergleichsweise kühler, verzeichnen jedoch in den Nachtstunden eine vergleichsweise geringere Abkühlrate als Freiflächen (Wiesen, Äcker), da die langwellige Ausstrahlung in die Atmosphäre durch den Kronenraum behindert wird.

²⁸ <http://www.edersee.de/wasserstand/monat.aspx>

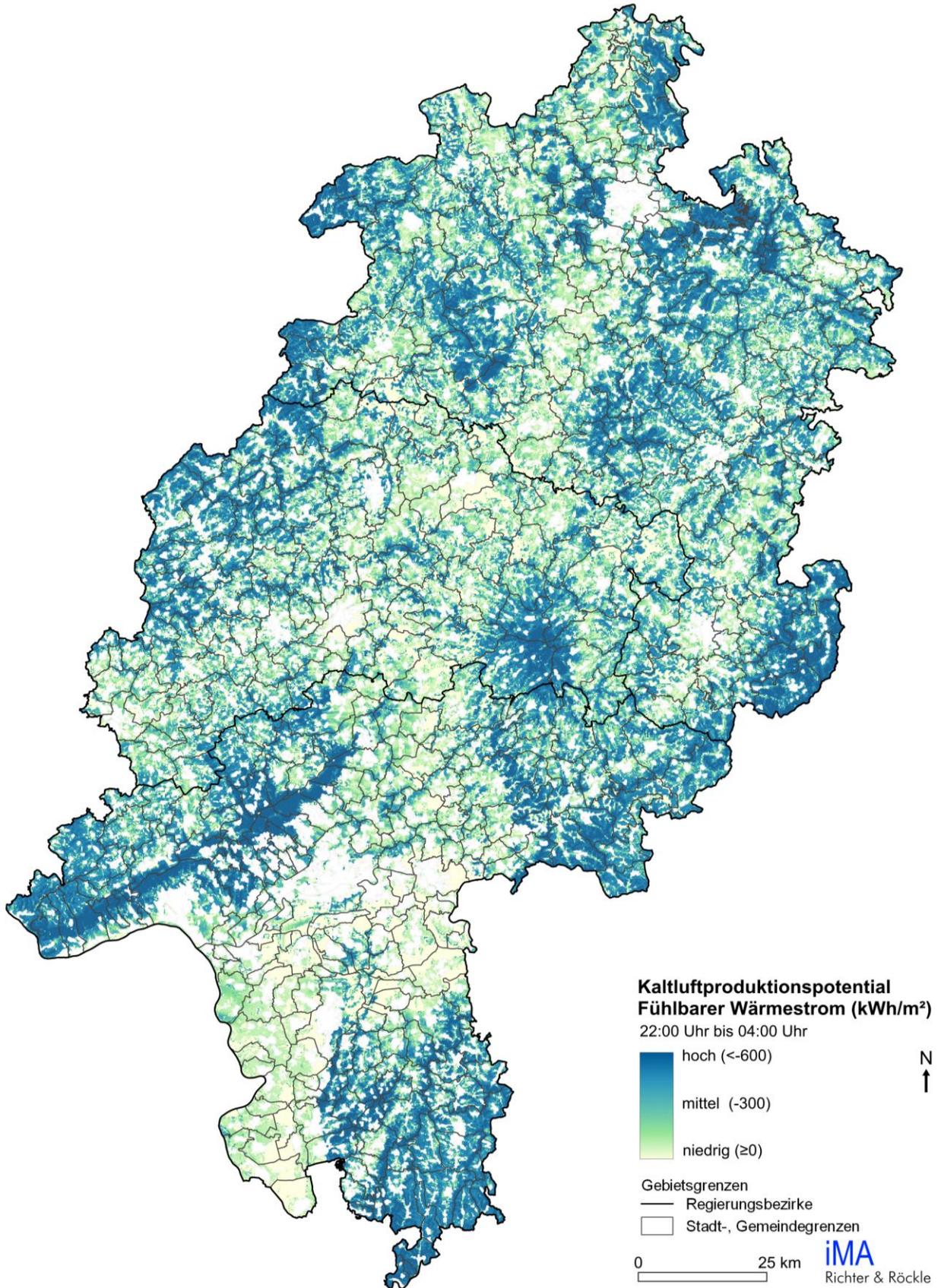


Abbildung 5-8: Kaltluftproduktionspotential (kWh/m²) im Zeitraum von 22:00 Uhr bis 04:00 Uhr.

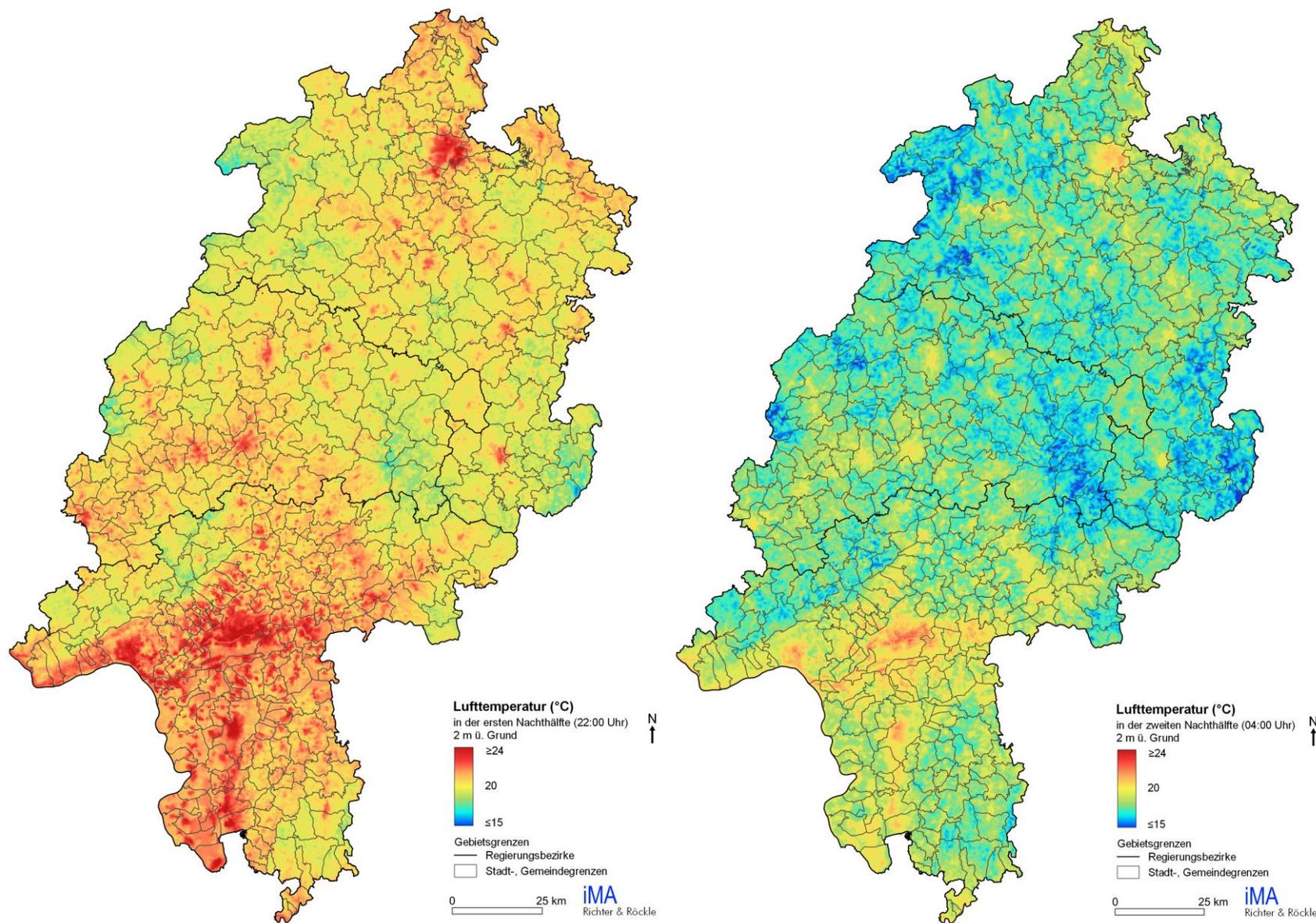


Abbildung 5-9: Simulierte bodennahe Lufttemperatur abends und in der zweiten Nachthälfte in 2 m ü. Grund.

5.1.4 Human-Biometeorologische Bedingungen

Die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) ist tagsüber ein Indikator für die Wärmebelastung des Menschen. Sie zeigt einen deutlichen Zusammenhang mit der kurzweiligen Strahlung. PET wurde für die Mittagssituation an einem repräsentativen Sommertag berechnet.

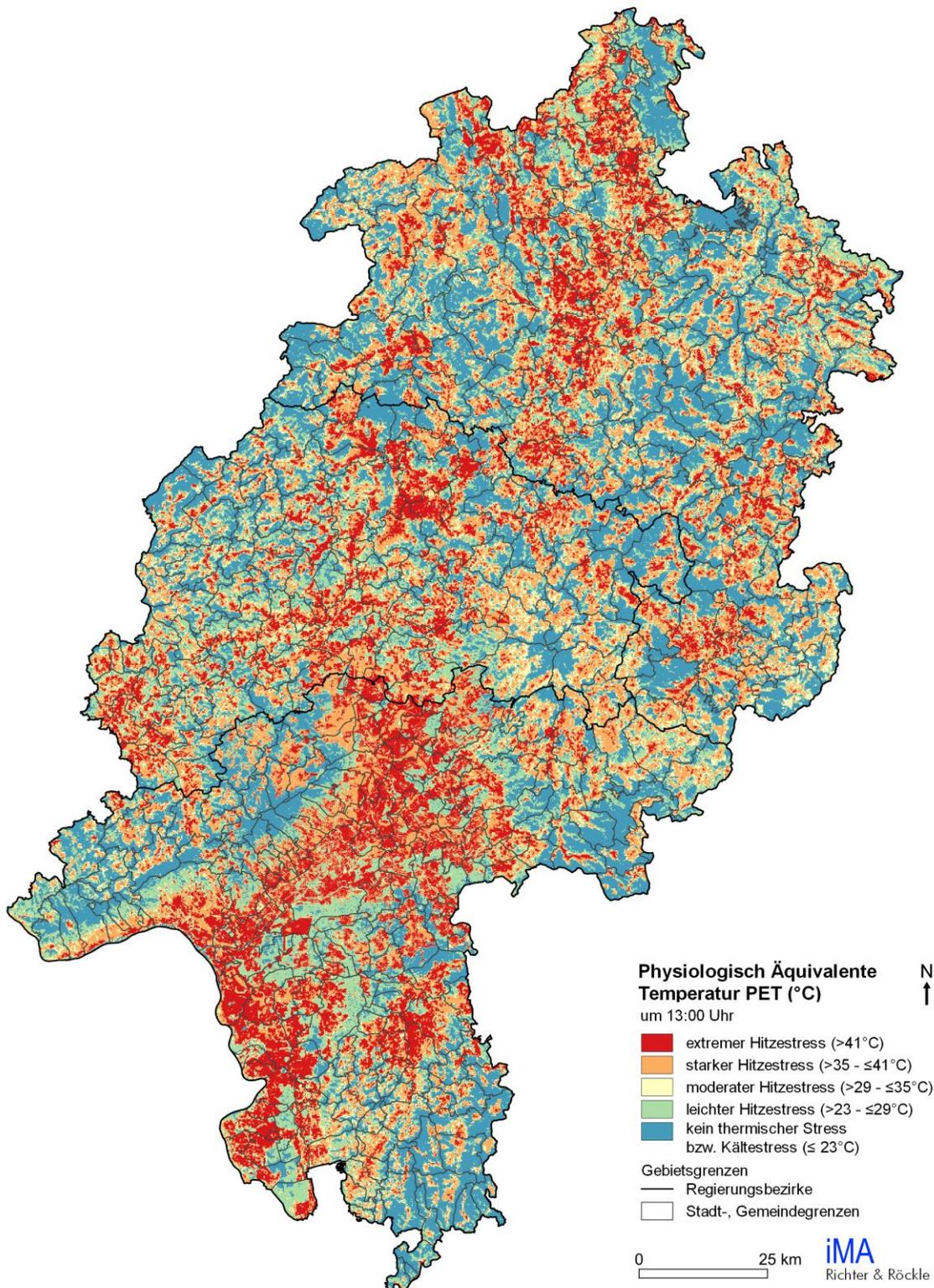


Abbildung 5-10: Hessenweite Betrachtung der menschlichen Hitzebelastung (13:00 Uhr) unter Verwendung der Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET).

Die Höhe der PET Werte korrelieren stark mit der kurzweiligen Sonneneinstrahlung. Somit ist eine starke Wärmebelastung nicht nur in Städten, und dort besonders auf großen versiegelten, nicht abgeschatteten Flächen (z.B. Parkplätze oder Gleisanlagen), sondern auch im ländlichen Umland (z.B. auf landwirtschaftlichen Flächen – aufgrund der fehlenden Abschattung) zu finden. Industrie- und Gewerbeflächen fallen durch eine extreme Wärmebelastung auf. Dies ist bedingt durch den hohen Versiegelungsgrad und einen geringen Anteil an Verschattung durch wenig Baumbestand und oftmals einheitliche Gebäudehöhen. Die Wärmebelastung in Siedlungsgebieten variiert je nach Siedlungsdichte und Grünanteil.

Auch Freiflächen können, je nach Höhenlage, eine extreme Wärmebelastung aufweisen. In Wäldern ist aufgrund der Abschattung und je nach Höhenlage thermischer Komfort oder nur leichte Wärmebelastung zu finden.

5.1.5 Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels

5.1.5.1 Lufttemperatur

Weltweit wird durch den Klimawandel ein Anstieg der Lufttemperaturen erwartet. Lokal können sich jedoch Verhältnisse einstellen, die von weltweit prognostizierten mittleren Werten abweichen. An dieser Stelle sei auch angemerkt, dass weniger die Mittelwerte als vielmehr die Extreme für den Menschen und die Umwelt ein Problem darstellen. In unseren Breiten verschiebt sich die Verteilung der Temperaturen nicht nur zu höheren Werten hin, sie wird auch flacher. Eine flachere Verteilung bedeutet, dass sowohl die Extremtemperaturen im Sommer ansteigen, wie auch winterliche Kältephasen ausgeprägter auftreten, können²⁹.

Die zeitliche Entwicklung der Lufttemperatur in den verschiedenen Jahreszeiten ist unter Berücksichtigung der RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in Abbildung 5-11 dargestellt. Die Auswertung beruht auf den originalen EURO-CORDEX-Daten. Die Erhöhung der mittleren Lufttemperatur fällt im Frühjahr und Sommer etwas geringer aus als im Herbst und im Winter.

In der Tabelle 5-1 werden die Temperaturdifferenzen bezogen auf die zukünftigen Klimanormalperioden, d.h. den 30-jährigen Zeiträumen der Klimamodellierung (2031 – 2060 und 2071 – 2100) und dem historischen Zeitraum 1971 – 2000 aufgeführt. Die Auswertung zeigt jeweils den →**Median** der FITNAH-Simulation der Ensemble-Ergebnisse (Ergebnisse aller einzelnen Klimamodelle zusammengefasst) und das 15. und 85. Perzentil³⁰ (siehe Abbildung 5-11). Der Fokus liegt im Folgenden auf den Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 (siehe Kapitel 4.2.1.5).

²⁹ Vgl. auch https://www.zamg.ac.at/cms/de/images/klima/bild_ip-klimawandel/klimavergangenheit/neoklima/3-2-4_1_ipcc_srex_spm_grafik_deutsch Stand: März 2022

³⁰ Ein Perzentil ist ein Schwellenwert, bei dem ein bestimmter Anteil der Werte aus den Stichproben kleiner ist als das Perzentil, der Rest ist größer. Bei dem 15. Perzentil sind 15 % der Werte aus den Stichproben kleiner und 85 % größer als der Wert des 15. Perzentils.

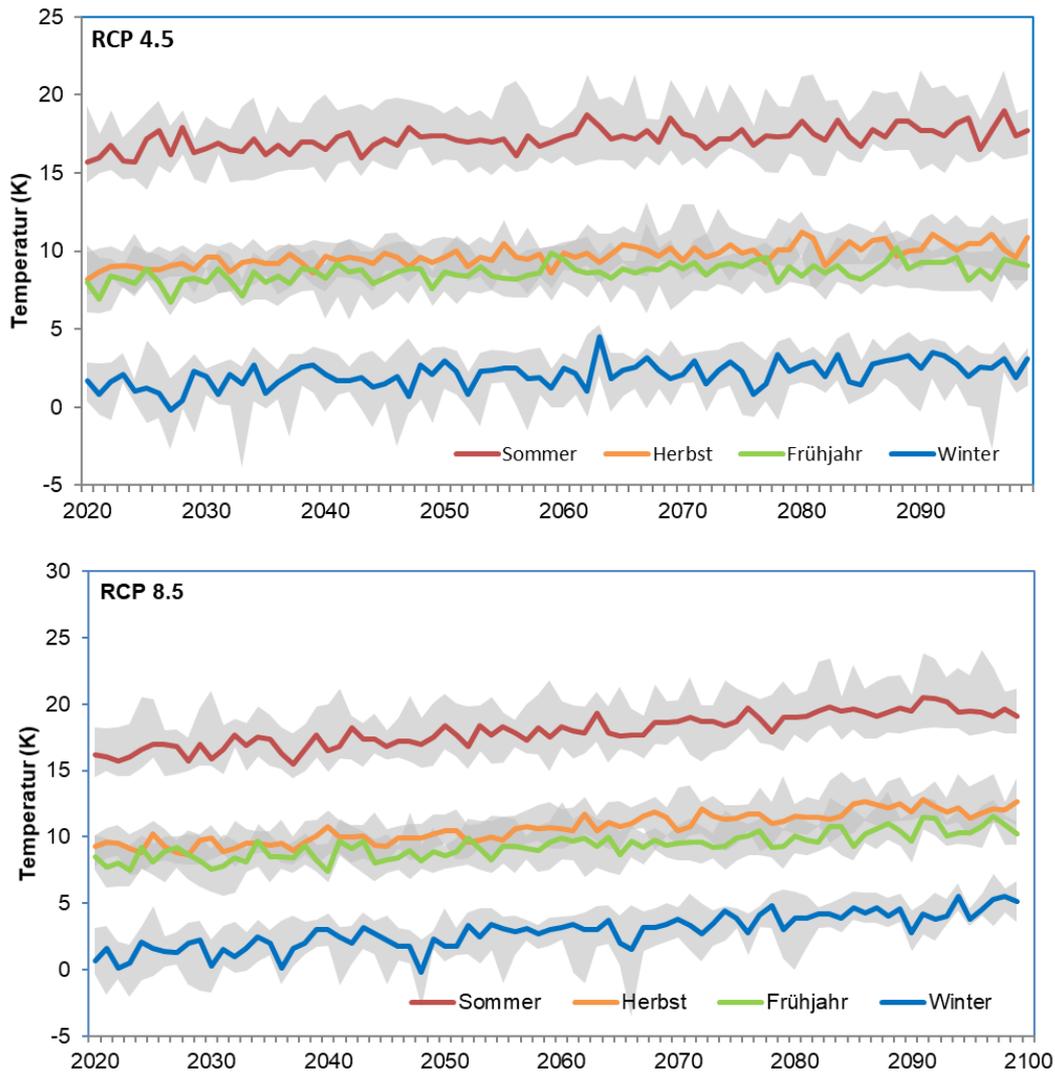


Abbildung 5-11: Auswertung der EURO-CORDEX-Daten: Projizierte Entwicklung der Lufttemperatur im 21. Jahrhundert in Hessen. Die Mediane für die jeweilige Jahreszeit sind farbig dargestellt, der graue Bereich wird durch das 15. Perzentil und das 85. Perzentil eingegrenzt.

Während der Median des Szenarios RCP 2.6 eine mittlere Zunahme um 1,2 K bis Mitte des 21. Jahrhunderts zeigt, stagniert der Anstieg bis Ende des 21. Jahrhunderts durch den raschen Rückgang der Treibhausgasemissionen. Im Gegensatz dazu soll die Lufttemperatur nach dem RCP 4.5 Szenario bis Mitte des Jahrhunderts um 1,3 K und bis Ende des Jahrhunderts um 2,0 K ansteigen. Und im Szenario RCP 8.5 wurde von den Klimamodellen ein Temperaturanstieg von 1,8 K bis Mitte des Jahrhunderts und sogar von 3,5 K bis zum Ende des Jahrhunderts berechnet (Tabelle 5-1).

Zum Ende des Jahrhunderts liegen 85 % der Lufttemperaturzunahmen beim RCP 4.5 noch unter 2.4 K, bei RCP 8.5 kann die Grenze zur Erfassung von 85 % der Werte erst bei 4.2 K Lufttemperaturzunahme gezogen werden (Tabelle 5-2).

Tabelle 5-1: Median der Temperaturdifferenzen in Kelvin zwischen den Zeiträumen 2031 – 2060 und 2071 – 2100 bezogen auf den historischen Wert des Zeitraums 1971 – 2000.

Emissions-szenario		Median	15. Perzentil	85. Perzentil
RCP 2.6	2031 – 2060	1.2	0.8	1.6
	2071 – 2100	1.1	0.8	1.4
RCP 4.5	2031 – 2060	1.3	0.9	1.9
	2071 – 2100	2.0	1.4	2.4
RCP 8.5	2031 – 2060	1.8	1.3	2.3
	2071 – 2100	3.5	2.9	4.2

Tabelle 5-2: Median der Temperaturdifferenzen in Kelvin (K) der Zeiträume 2031 – 2060 und 2071 – 2100 bezogen auf den historischen Wert des Zeitraums 1971 – 2000 für die einzelnen Jahreszeiten.

Emissions-szenario	Änderung der Lufttemperatur (K)	Median	15. Perzentil	85. Perzentil	
RCP 2.6	Winter	2031 – 2060	1.3	1.0	1.5
		2071 – 2100	1.2	1.1	1.7
	Frühjahr	2031 – 2060	0.9	0.5	1.4
		2071 – 2100	1.0	0.7	1.2
	Sommer	2031 – 2060	1.2	0.5	1.6
		2071 – 2100	1.1	0.9	1.2
	Herbst	2031 – 2060	1.4	0.8	2.1
		2071 – 2100	1.3	0.5	1.6
RCP 4.5	Winter	2031 – 2060	1.6	0.8	2.2
		2071 – 2100	2.2	1.6	2.8
	Frühjahr	2031 – 2060	1.4	0.6	1.5
		2071 – 2100	1.7	1.1	2.0
	Sommer	2031 – 2060	1.4	1.1	1.6
		2071 – 2100	1.9	1.6	2.2
	Herbst	2031 – 2060	1.4	0.9	2.0
		2071 – 2100	2.2	1.6	2.9
RCP 8.5	Winter	2031 – 2060	1.8	1.2	2.7
		2071 – 2100	3.7	3.2	4.5
	Frühjahr	2031 – 2060	1.2	0.9	1.9
		2071 – 2100	2.7	2.1	3.4
	Sommer	2031 – 2060	1.7	1.5	2.2
		2071 – 2100	3.6	3.1	4.2
	Herbst	2031 – 2060	2.0	1.4	2.7
		2071 – 2100	4.0	3.1	5.1

5.1.5.2 Anzahl an Sommertagen

Die Anzahl der Sommertage (Höchstwert $\geq 25^{\circ}\text{C}$) in der historischen Klimanormalperiode 1971 – 2000 ist in Abbildung 5-12 dargestellt. Die mittlere Anzahl an Sommertagen betrug hessenweit 12,9 Tage. Der Nord-Süd-Gradient und ein Höhengradient sind dabei augenscheinlich. Während in Nordhessen die Anzahl der Sommertage unter 18 lag, wurde in Südhessen etwa die doppelte Anzahl erreicht, vereinzelt lag die maximale Anzahl an Sommertagen bei 44 Tagen.

Durch den Klimawandel wird erwartet, dass die Anzahl der Sommertage in der Klimanormalperiode 2031 – 2060 zur Mitte des Jahrhunderts im hessenweiten Mittel um 9,0 (RCP4.5) bzw. 9,6 Tage (RCP8.5) ansteigt (Abbildung 5-13). Das (untere) 15 %-Perzentil der Ensemblemodelle liegt dabei bei 5,1 (RCP4.5) bzw. 6,7 Tagen (RCP8.5). Das (obere) 85 %-Perzentil liegt bei 11,8 (RCP4.5) bzw. 13,8 Tagen (RCP8.5).

In Abbildung 5-14 ist die Anzahl an Sommertagen in der Klimanormalperiode 2071 – 2100 zum Ende des Jahrhunderts abgebildet. Im hessenweiten Mittel wird ein Anstieg der Anzahl der Sommertage um 11,6 (RCP4.5) bzw. 23,2 Tage (RCP8.5) prognostiziert. Das (untere) 15 %-Perzentil der Ensemblemodelle liegt dabei bei 8,0 (RCP4.5) bzw. 18,6 Tagen (RCP8.5). Das (obere) 85 %-Perzentil der Ensemblemodelle beträgt 17,3 (RCP4.5) bzw. 35,3 Tage (RCP8.5).

Dabei nimmt die Anzahl an Sommertagen im schon jetzt stärker belasteten Südhessen stärker zu als im hessenweiten Mittel. Auf den Höhenlagen nimmt die Anzahl an Sommertagen dagegen nur in sehr geringem Umfang zu. Ursache ist die Zählschwelle, die der Größe „Sommertag“ zugrunde liegt. Die Tageshöchsttemperatur steigt zwar auch dort an, aber der Schwellwert von 25°C für einen Sommertag wird trotz des Anstieges nicht erreicht bzw. seltener erreicht.

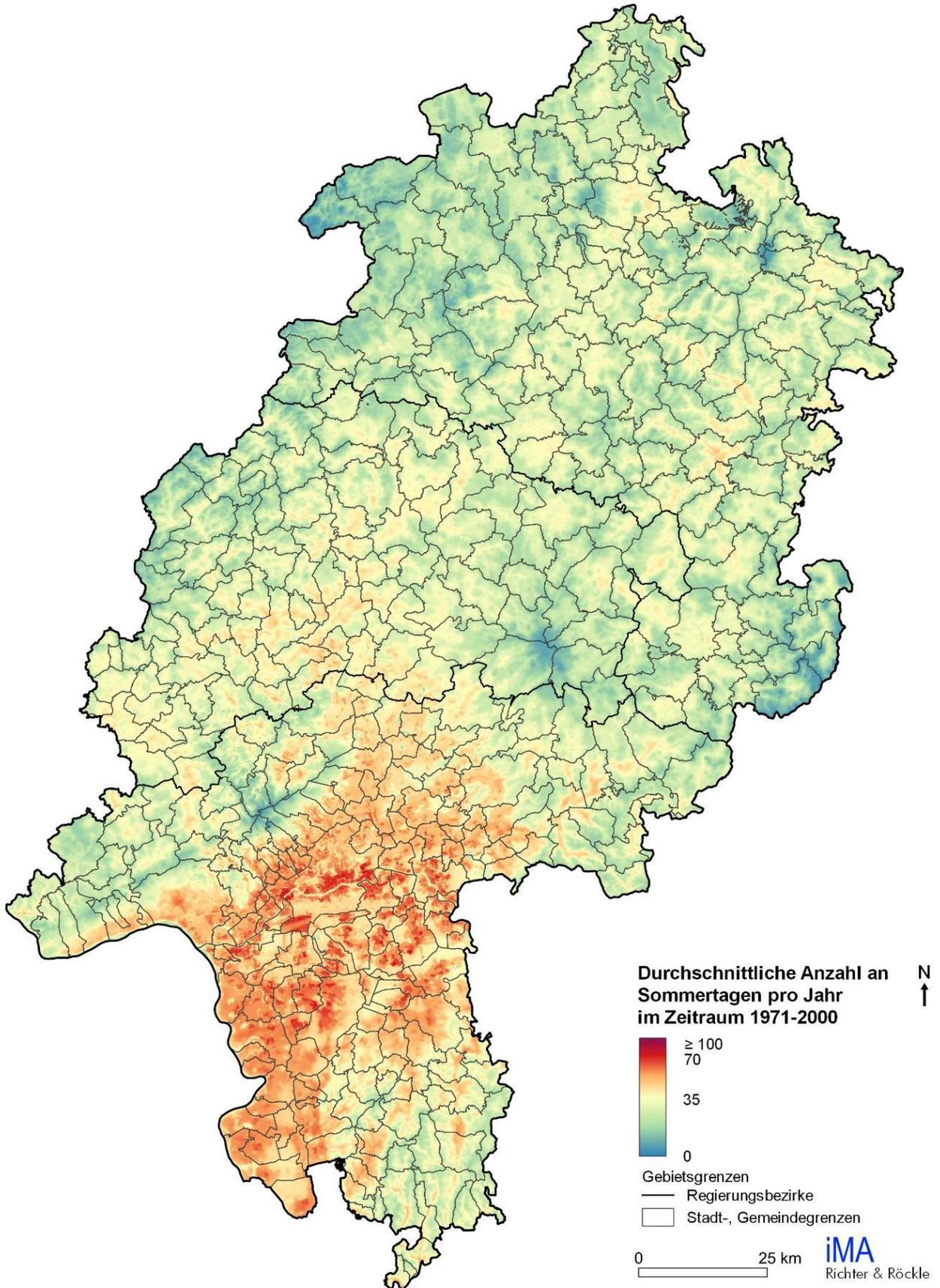


Abbildung 5-12: Anzahl der Sommertage 1971 – 2000.

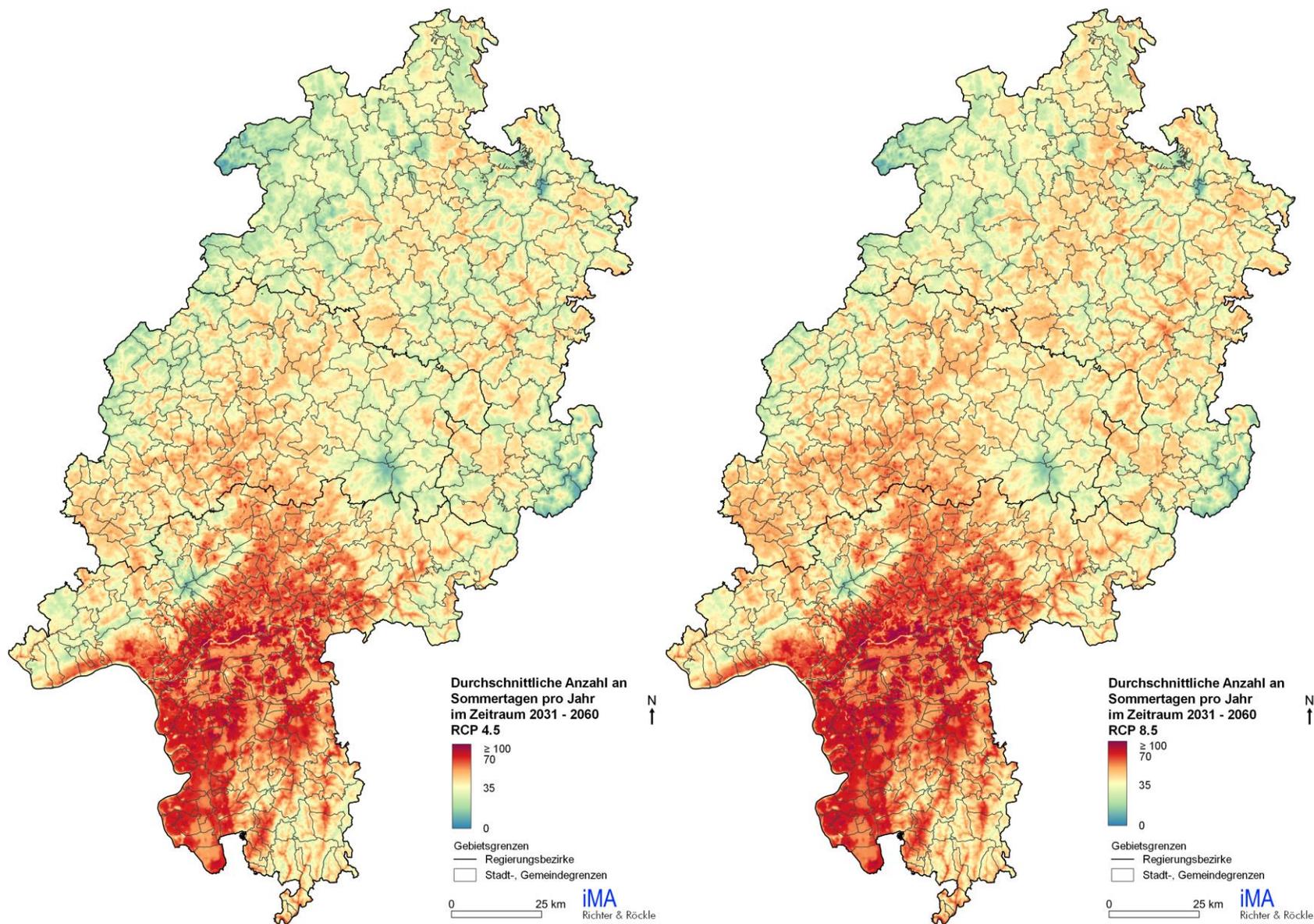


Abbildung 5-13: Prognostizierte Anzahl der Sommertage 2031 – 2060 bei Auswertung der Szenarien RCP 4.5 (links) und RCP 8.5 (rechts).

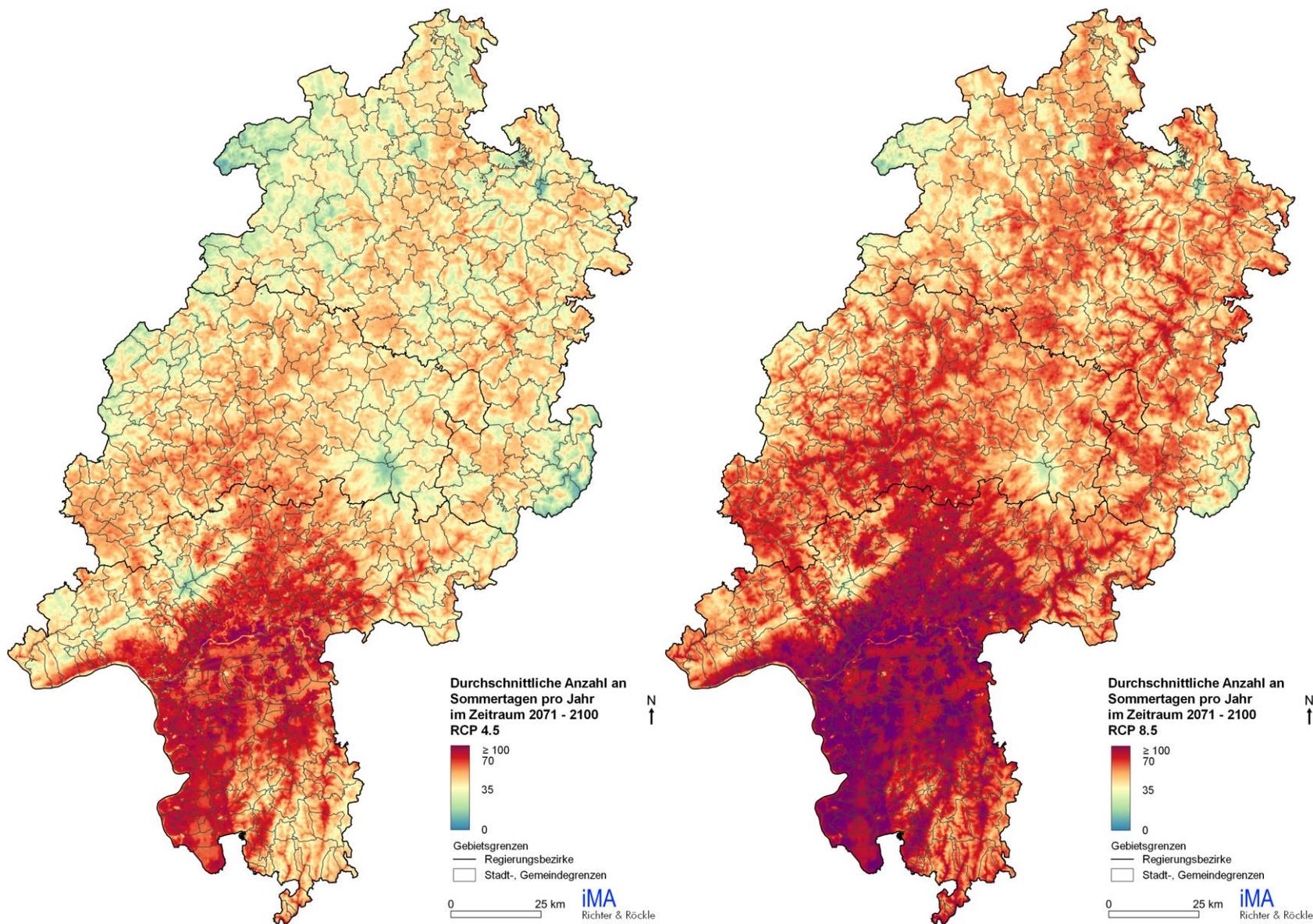


Abbildung 5-14: Prognostizierte Anzahl der Sommertage 2071 – 2100 bei Auswertung der Szenarien RCP 4.5 (links) und RCP 8.5 (rechts).

5.2 Weitere Gunst- und Ungunstfaktoren

Nachfolgend werden folgende weitere Gunst- und Ungunstfaktoren aufgeführt: Dies sind die Luftleitbahnen (Kapitel 5.2.1), die Klimavielfalt, die Luftqualität (Kapitel 5.2.3) und die Inversionshäufigkeit (Kapitel 5.2.4).

5.2.1 Luftleitbahnen

Als potentielle Luftleitbahn gilt ein Bereich, der eine geringe Oberflächenrauigkeit über eine größere zusammenhängende Fläche aufweist. In Gebieten mit geringer Rauigkeit ist ein effizienter bodennaher Transport von Frisch- oder Kaltluft möglich. Bei höherer Rauigkeit wird die Strömung in höhere Luftschichten abgedrängt. Bei hoher Kaltluftmächtigkeit kann eine Entkopplung stattfinden, d.h. bodennah treten dann kaum noch Luftbewegungen auf.

Eine Luftleitbahn ist für sich betrachtet noch nicht zwingend planerisch schützenswert. Leitet sie jedoch Kaltluft, oder sogar lufthygienisch unbelastete Kaltluft (→**Frischluf**t), in thermisch belastete Siedlungsgebiete, kann ihr im Kontext der landesweiten Klimaanalyse eine hohe planerische Bedeutung zukommen.

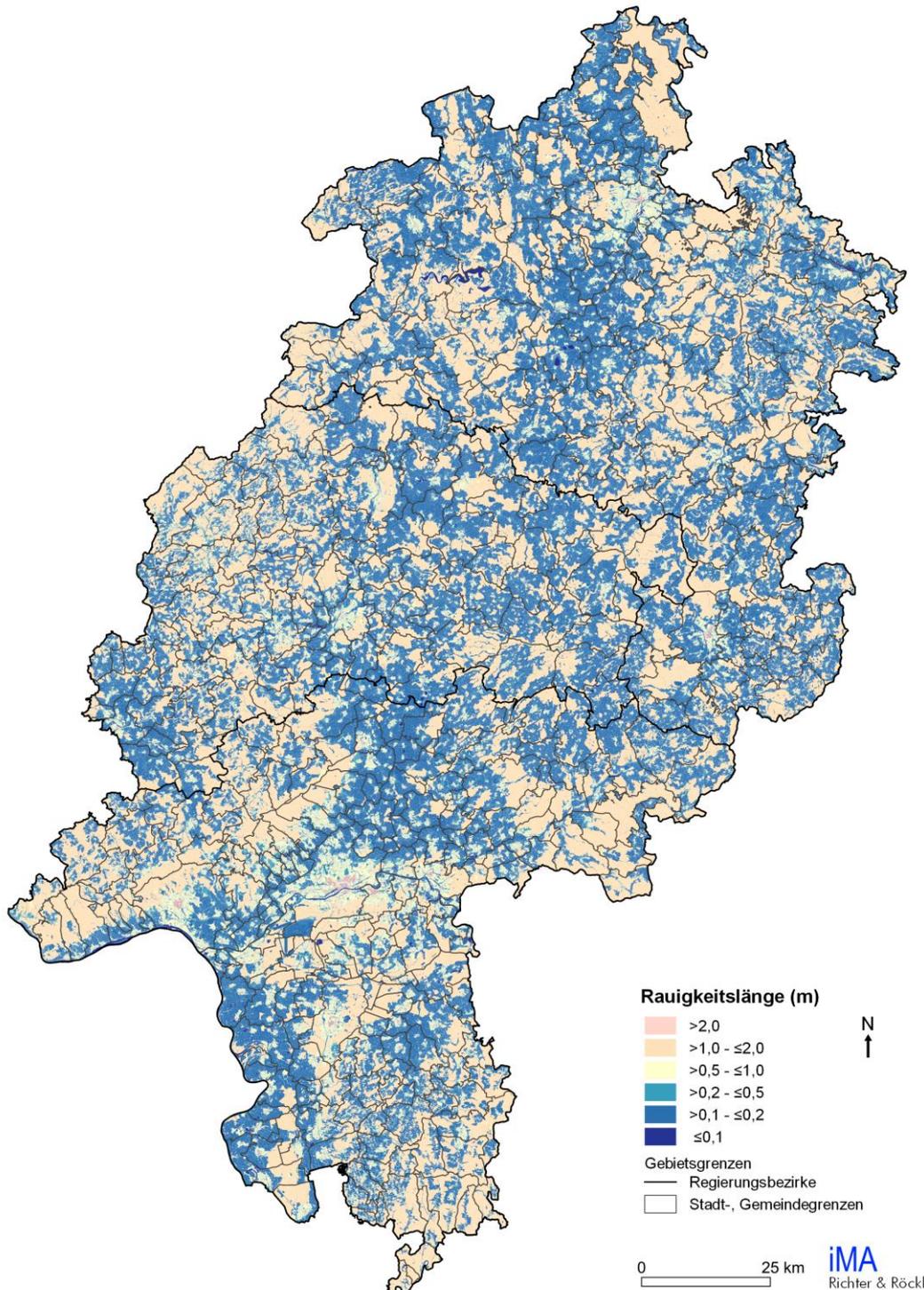


Abbildung 5-15: Luftleitbahnen als zusammenhängende Gebiete geringer Rauigkeit (blau dargestellt). Die Rauigkeitslänge wird in Meter angegeben.

5.2.2 Klimavielfalt

Der Gunstfaktor „Klimavielfalt“, welcher als Distanz (Luftlinie) zur nächsten öffentlich zugänglichen Grünfläche innerhalb der Siedlung / in unmittelbarer Siedlungsnähe berechnet wurde, beschreibt die Möglichkeit von Anwohnern in Städten, während Hitzewellen Grünflächen mit thermisch komfortableren Temperaturen aufzusuchen. Da im landesweiten Maßstab keine Aussagen zur Aufenthaltsqualität der Grünflächen getroffen werden können, stellt die Abbildung 5-16 eine

für einzelne Fragestellungen ggf. interessante Datengrundlage dar. In Gegenden mit Ein- und Mehrfamilienhäusern haben Parkanlagen aufgrund der oftmals ans Haus anschließenden Gartennutzung weniger Bedeutung. Für größere Siedlungsgebiete mit mehrgeschossigen Häusern ist diese Analyse von größerer Relevanz.

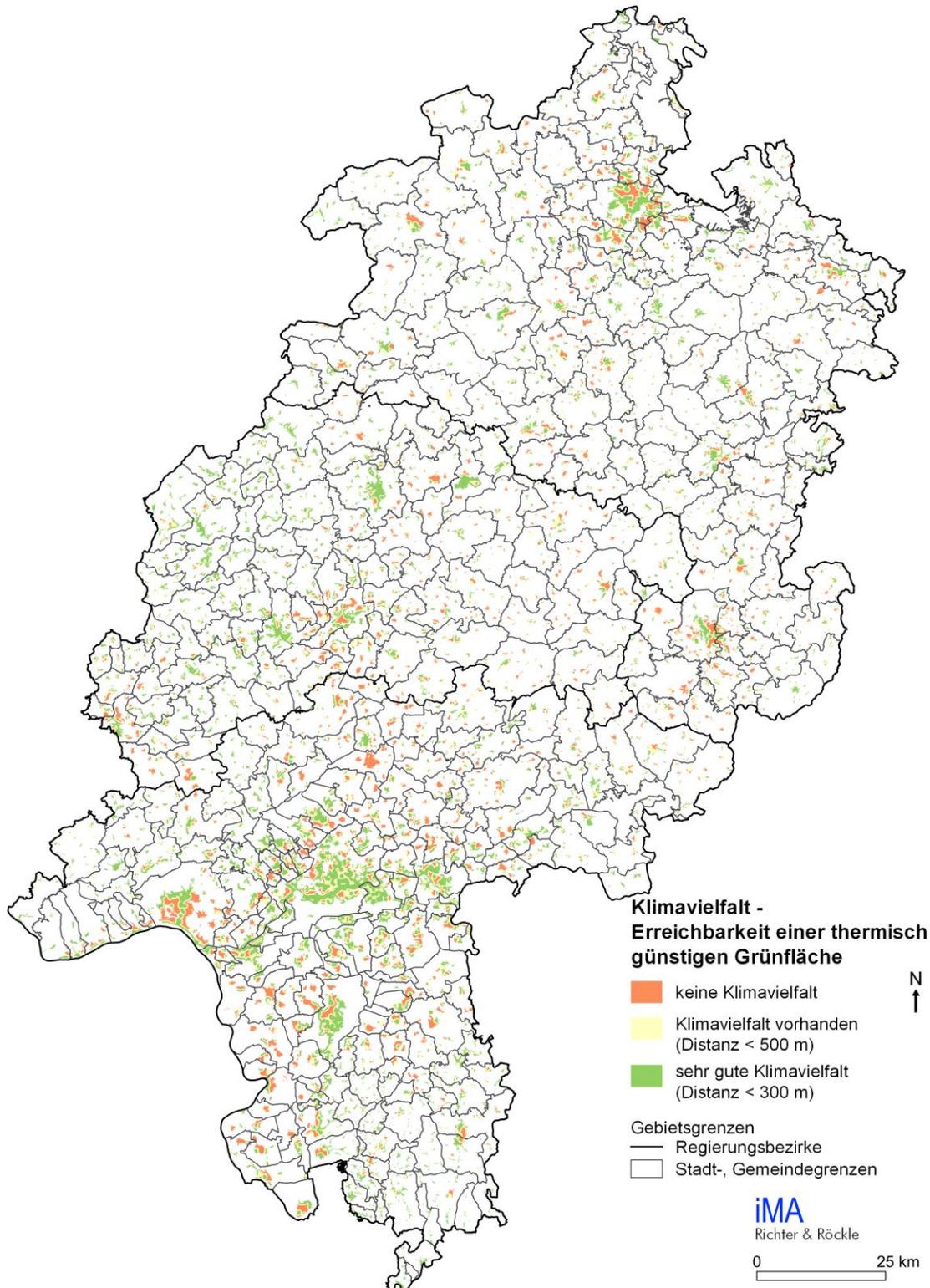


Abbildung 5-16: Klimavielfalt in Hessen. Klassiert ist die fußläufige Entfernung zu frei begehbaren Grünflächen mit komfortableren thermischen Bedingungen innerhalb von Siedlungsgebieten.

5.2.3 Luftqualität

Die Jahresmittelwerte der NO₂- und PM₁₀-Belastung zeigen vergleichbare Verteilungen. Der aus beiden Komponenten berechnete Luftqualitätsindex LQI zeigt daher analog zu den Jahresmittelwerten von NO₂ und PM₁₀ hohe Belastungen entlang der großen, stark frequentierten Verkehrsachsen (vgl. Abbildung 5-17).

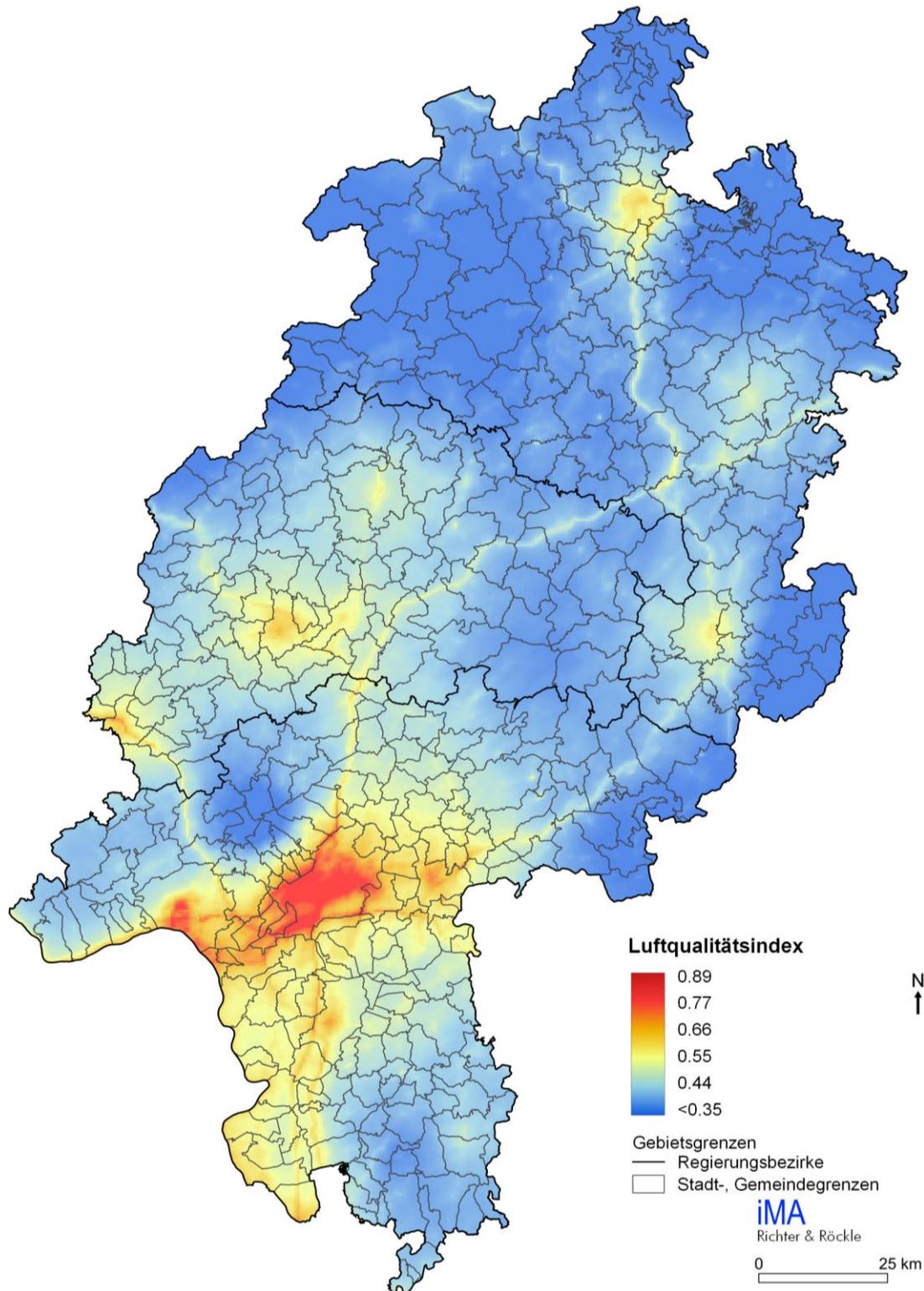


Abbildung 5-17: Luftqualität in Hessen. Dargestellt sind die Größen Stickstoffdioxid NO₂ und Feinstaub PM₁₀, zusammengefasst in Form eines Luftqualitätsindex LQI.

Dies sind vor allem die Autobahnen, aber auch der Rhein als bedeutende Bundeswasserstraße. Erhöhte Jahresmittelwerte treten in den größeren Städten und insbesondere im gesamten Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main auf. Geringe Belastungen treten in den ländlichen Räumen, insbesondere in Nordhessen, aber auch in den höheren Lagen des Taunus und des Odenwalds auf.

5.2.4 Inversionshäufigkeiten

Die Analyse der Inversionshäufigkeit dient der Lokalisierung von Gebieten mit reduziertem Luftaustausch während windschwacher Tage und der damit einhergehenden möglichen Anreicherung von Luftschadstoffen. Da jedoch flächendeckende Kartierungen der Luftqualität in Form der NO₂- und PM₁₀-Jahresmittelwerte für Hessen (IVU, 2017) vorliegen, wurde die Inversionshäufigkeit nicht in die Bewertung der Flächen mit einbezogen. Informell und zur Orientierung ist die Inversionshäufigkeit aber in der folgenden Abbildung 5-18 dargestellt.

Die Inversionshäufigkeit ist von der Topographie abhängig. Die Berechnung wurde angelehnt an die in Daly et al. 2002 beschriebene Geländeanalyse und einer Regressionsanalyse der Tagesminimumtemperatur (Datengrundlage DWD) durchgeführt.

Die größten Inversionshäufigkeiten zeigen sich in der Niederhessischen Senke, im Tal der Fulda, der Werra sowie im Tal von Diemel, Warme und Twiste mit bis zu 250 Tagen im Jahr. In Mittelhessen ist das Lahntal am häufigsten (meist bis zu ca. 230, vereinzelt mit bis zu 250 Tagen im Jahr) von den schlechten Austauschbedingungen betroffen. In Südhessen weisen das Rhein-Main-Gebiet, die Wetterau und die Niederungen bis zur Bayrischen Grenze eine besonders hohe Inversionshäufigkeit mit maximal 250 Tagen im Jahr auf.

Auf den Höhenlagen ist die Anzahl an Tagen, an welchen eine Inversion auftritt geringer. Auf der Wasserkuppe oder dem großen Feldberg tritt eine Inversion an maximal 50 Tagen pro Jahr auf.

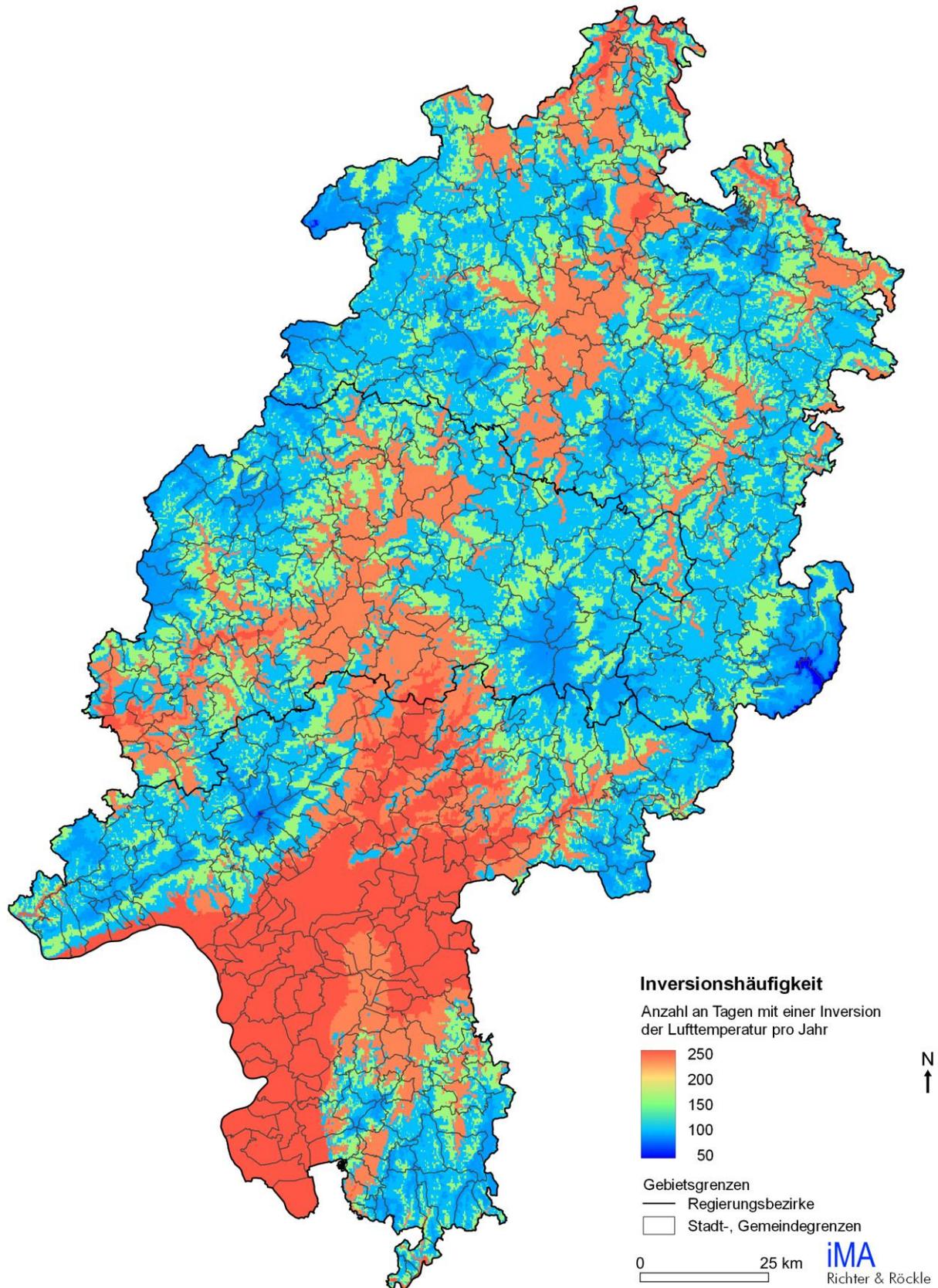


Abbildung 5-18: Häufigkeit an Tagen im Jahr, an denen eine Inversion auftritt.

5.3 Empfindlichkeit und Betroffenheit der Bevölkerung

Da mit der landesweiten Klimaanalyse Hessen die für die thermisch / lufthygienisch belasteten Siedlungsgebiete relevanten Strömungssysteme und dazugehörigen Freiflächen ermittelt werden sollten, wurde neben den klimatischen und lufthygienischen Aspekten auch die Empfindlichkeit der Bevölkerung in die Untersuchung mit aufgenommen. Sie wurde auf Basis der Einwohnerdichte pro Hektar und unter Berücksichtigung der Ortsgröße ermittelt (siehe Tabelle 4-9). Flächen ohne Bevölkerung oder mit sehr geringer Bevölkerungsdichte weisen eine geringere Empfindlichkeit und i.d.R. eine geringere thermische / lufthygienische Betroffenheit auf. Je größer der Ort und je höher die Einwohnerdichte ist, desto höher wird die Empfindlichkeit eingestuft.

Siedlungen mit hoher Empfindlichkeit konzentrieren sich auf Südhessen und umfassen den Frankfurter Großraum, Wiesbaden, die Städte entlang der Bergstraße und die Bereiche von Viernheim.

In Mittelhessen konzentrieren sich Siedlungen mit hoher Empfindlichkeit auf das Lahntal (Marburg, Gießen, Wetzlar, Weilburg und Limburg), das Dilltal (Haiger, Dillenburg, Herborn, Aßlar), sowie auf die Städte Alsfeld, Stadtallendorf und Lauterbach.

In Nordhessen zeigen sich die folgenden Ortschaften mit größeren zusammenhängenden Siedlungsflächen als Bereiche mit hoher Empfindlichkeit: Großraum Kassel, Fulda, Hünfeld, Bad Hersfeld, Rotenburg an der Fulda, Eschwege, Witzenhausen, Hessisch Lichtenau, Melsungen, Homberg (Efze), Fritzlar, Schwalmstadt, Frankenberg (Eder), Bad Wildungen, Korbach, Hofgeismar sowie Bad Arolsen.

Die Einstufung der thermischen und lufthygienischen Belastung (wie in Kapitel 4.2.4 beschrieben) sind in Abbildung 5-20 bzw. Abbildung 5-17 dargestellt.

Die Berechnung der **Betroffenheit** der Menschen durch thermische und lufthygienische Belastungen wird in Kapitel 4.2.4.3 und 4.2.4.4 erläutert. Je höher die Einwohnerdichte und Ortsgröße und je größer die thermische und lufthygienische Belastung, desto schützenswerter sind die entlastenden Faktoren für das jeweilige Gebiet einzustufen. Flächen mit einer Einwohnerdichte von weniger als 10 Einwohner je Hektar werden aufgrund der fehlenden überörtlichen Relevanz in der Karte nicht dargestellt.

Die höchsten Werte der thermischen Betroffenheit kommen in Südhessen entlang des Rheins und im Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main vor (Abbildung 5-21).

Im Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main ist auch die lufthygienische Belastung sehr hoch. Hohe lufthygienische Betroffenheiten finden sich zudem in den Städten entlang der Hauptverkehrsachsen A3, A4, A5, A7 und A67, und insbesondere in den Großräumen Viernheim, Darmstadt, Wetzlar, Limburg, Fulda, Bad Hersfeld, Kassel und im Lahntal (Abbildung 5-22).

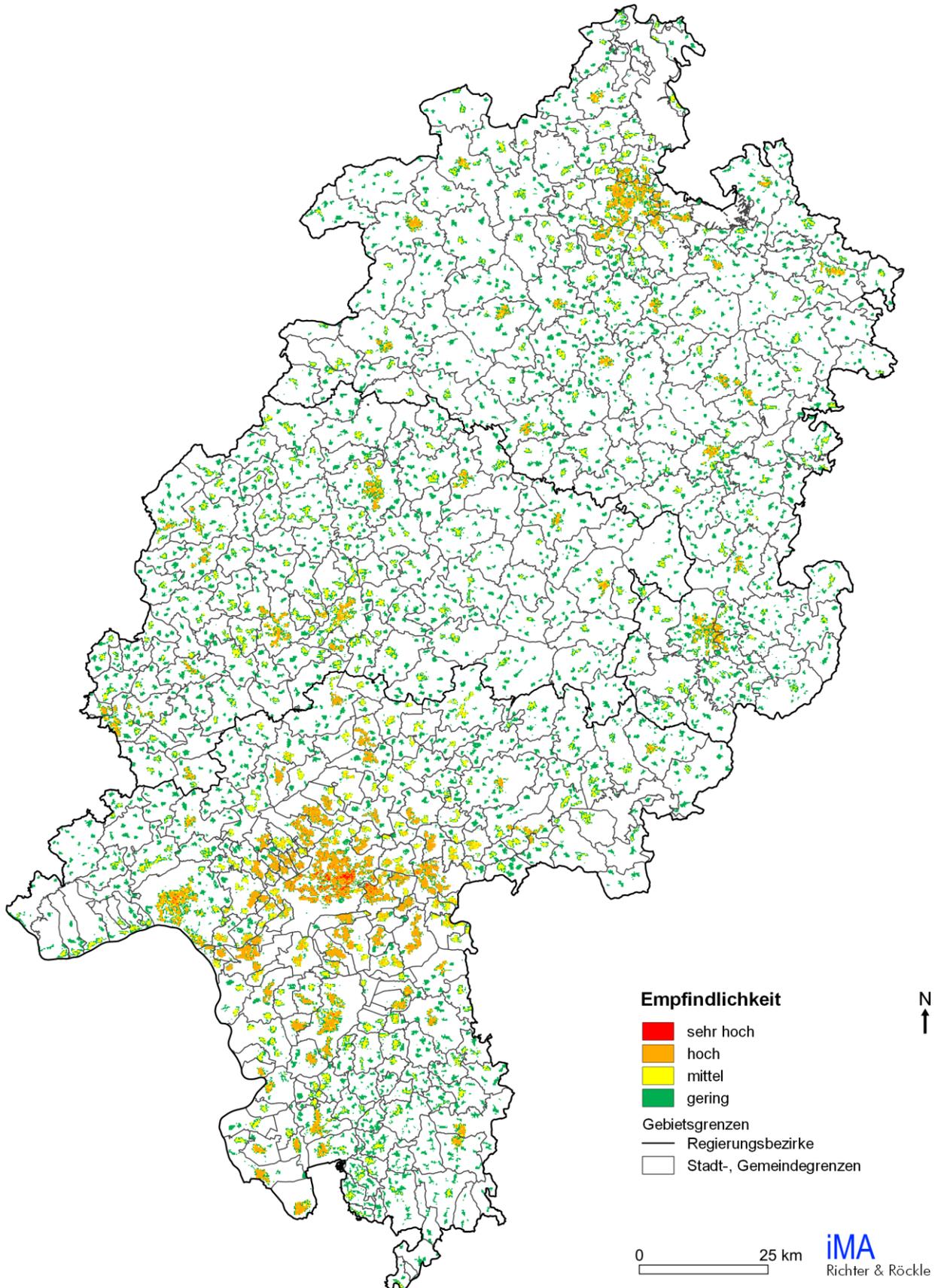


Abbildung 5-19: Die Empfindlichkeit der Bevölkerung ergibt sich aus der Bewertung der Einwohnerdichte je Hektar und der Ortsgröße.

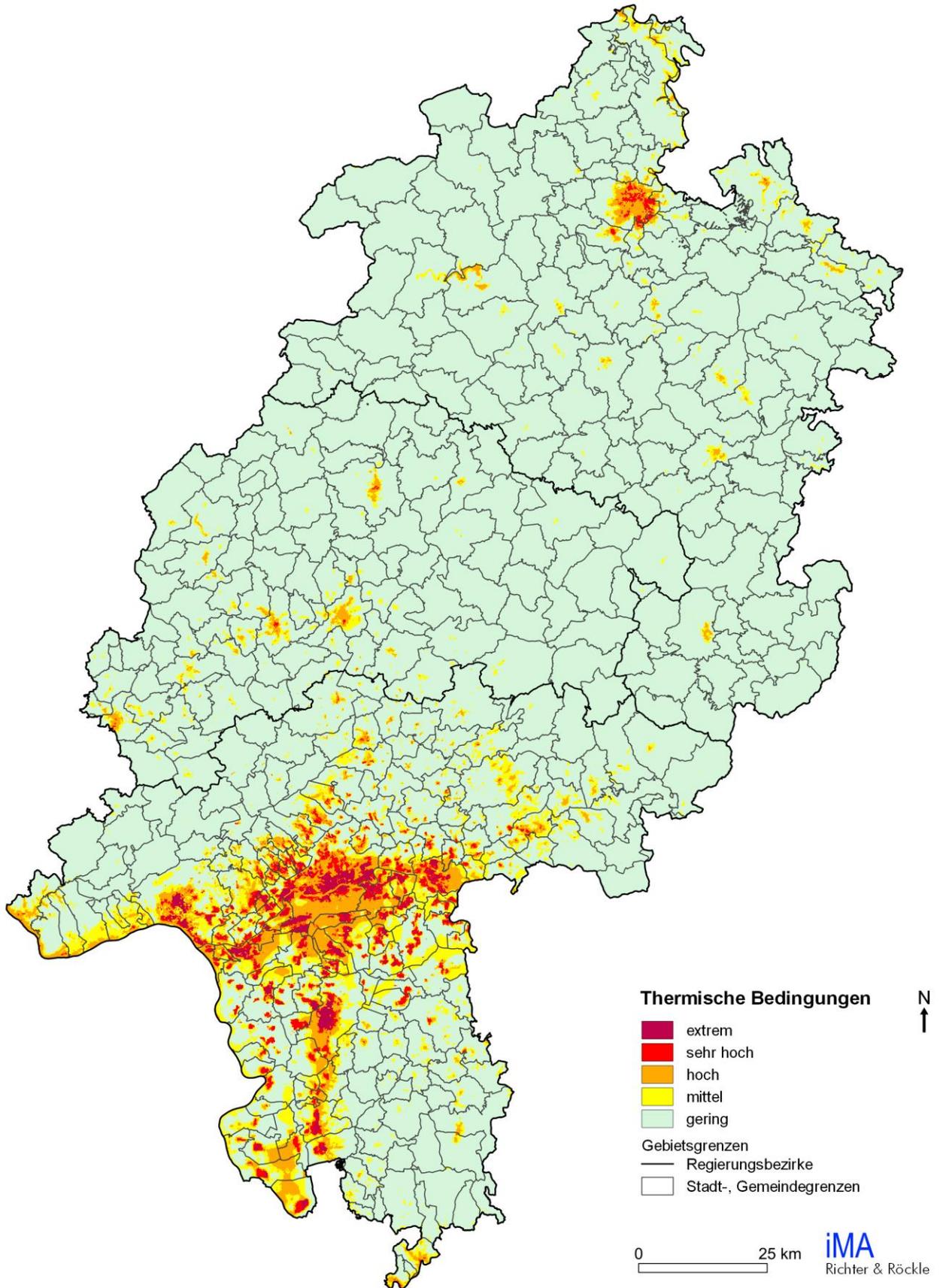


Abbildung 5-20: Bewertung der thermischen Bedingungen.

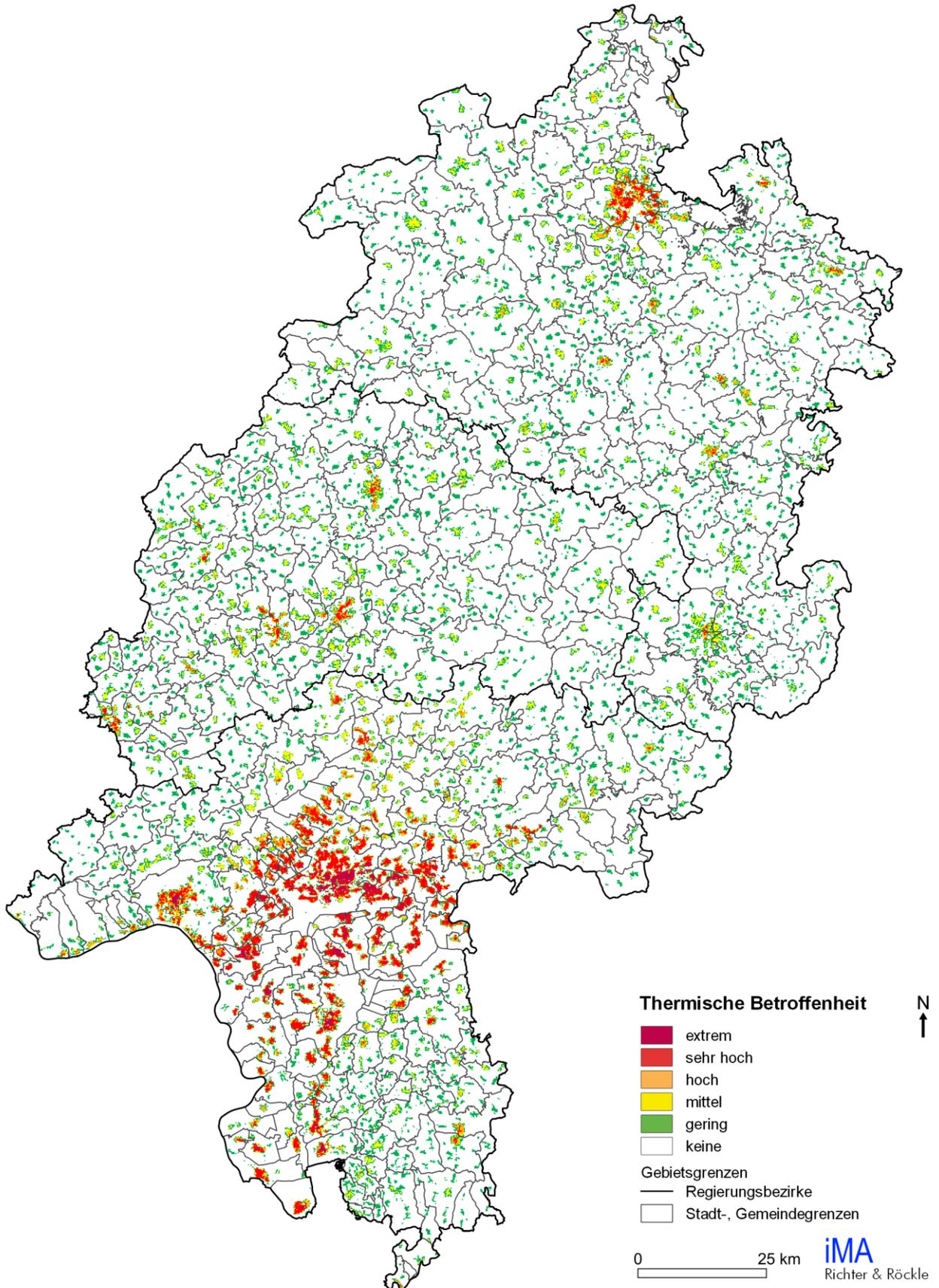


Abbildung 5-21: Betroffenheit der Bevölkerung unter Berücksichtigung der thermischen Bedingungen und der Einwohnerdichte/Ortsgröße. Nicht dargestellt sind Gebiete mit weniger als 10 Einwohnern pro Hektar.

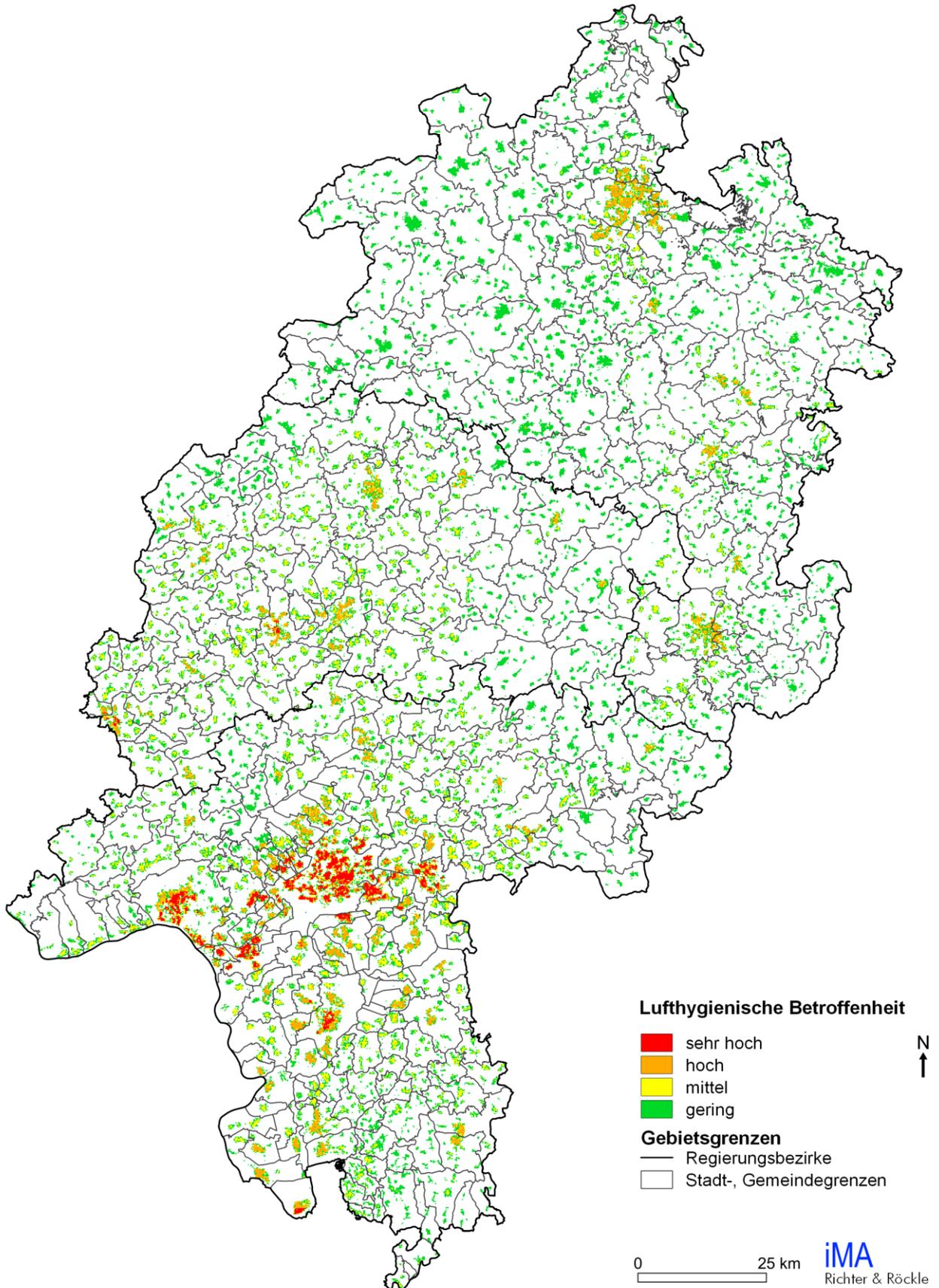


Abbildung 5-22: Betroffenheit der Bevölkerung unter Berücksichtigung der Luftqualität und der Einwohnerdichte, sowie der Ortsgröße. Nicht dargestellt sind Gebiete mit weniger als 10 Einwohnern pro Hektar.

6 Umsetzung der Ergebnisse und Empfehlungen für die Regionalplanung

Die 3. Änderung des Landesentwicklungsplans Hessen 2000 legt fest, dass in den Regionalplänen die regional bedeutsamen Luftleitbahnen sowie die für das Siedlungsklima bedeutsamen Flächen des Freiraums, die im räumlichen Zusammenhang mit lufthygienisch und/oder bioklimatisch belasteten Siedlungsräumen stehen und wichtige Aufgaben für den Klimaschutz wahrnehmen, planerisch zu sichern sind. Entsprechend müssen die im Rahmen der landesweiten Klimanalyse Hessen simulierten Strömungssysteme in „regional bedeutsam“ und „lokal bedeutsam“ unterschieden werden.

Ausgehend von dem anthropozentrischen Ansatz der Bewertung im Rahmen der landesweiten Klimanalyse sind Strömungssysteme für die Festlegung von Vorranggebieten und Vorbehaltsgebieten für besondere Klimafunktion nur dann von planerischer Relevanz, wenn ihnen thermisch belastete Siedlungsgebiete (Wirkräume) zugeordnet werden können, die von den Ausgleichsleistungen profitieren. Insofern gilt: Je größer die thermische Betroffenheit in einem regionalplanerisch relevanten Siedlungsgebiet ist, desto relevanter ist ein dieses Gebiet erreichendes Strömungssystem.

Da erwartet wird, dass sich die Luftbelastung in Zukunft weiter verbessert, während sich – bedingt durch den Klimawandel – die thermischen Belastungen voraussichtlich verschlechtern, ist die Auswertung der Strömungssysteme im Hinblick auf ihre Ausgleichsfunktion thermisch belasteter Siedlungsgebiete ein zentraler Bestandteil der landesweiten Klimanalyse.

6.1 Regionalplanerisch relevante thermisch belastete Siedlungsgebiete

Als regionalplanerisch relevant werden die Siedlungsgebiete gewertet, die eine gewisse Mindesthäufigkeit von mittlerer bis extremer thermischer Betroffenheit aufweisen (s. Kapitel 4.2.6). Diese Einstufung erfolgte in einem iterativen Prozess mit dem Auftraggeber HMWEVW, den oberen Landesplanungsbehörden und dem Regionalverband FrankfurtRheinMain für die Gegebenheiten im Bundesland Hessen.

Die primäre Abgrenzung zwischen einer regional bedeutsamen Ausgleichsströmung, welche durch Festlegung als Vorranggebiet oder Vorbehaltsgebiet für besondere Klimafunktionen in den Regionalplänen einschließlich dem Regionalen Flächennutzungsplan geschützt werden soll, erfolgt über die thermische Betroffenheit (Kapitel 4.2.4.3) und den Flächenanteil der Siedlungsgebiete, die eine mindestens mittlere thermische Betroffenheit der Bevölkerung aufweist. Siedlungsgebiete, die auf über 200 ha eine mindestens mittlere thermische Betroffenheit aufweisen, werden als „Siedlungen mit sehr großen Flächenanteil“ eingestuft, Siedlungsgebiete, die auf mindestens 120 ha aber weniger als 200 ha eine mindestens mittlere thermische Betroffenheit aufweisen, werden als „Siedlungen mit großem Flächenanteil“ bezeichnet (vgl. Abbildung 6-1).

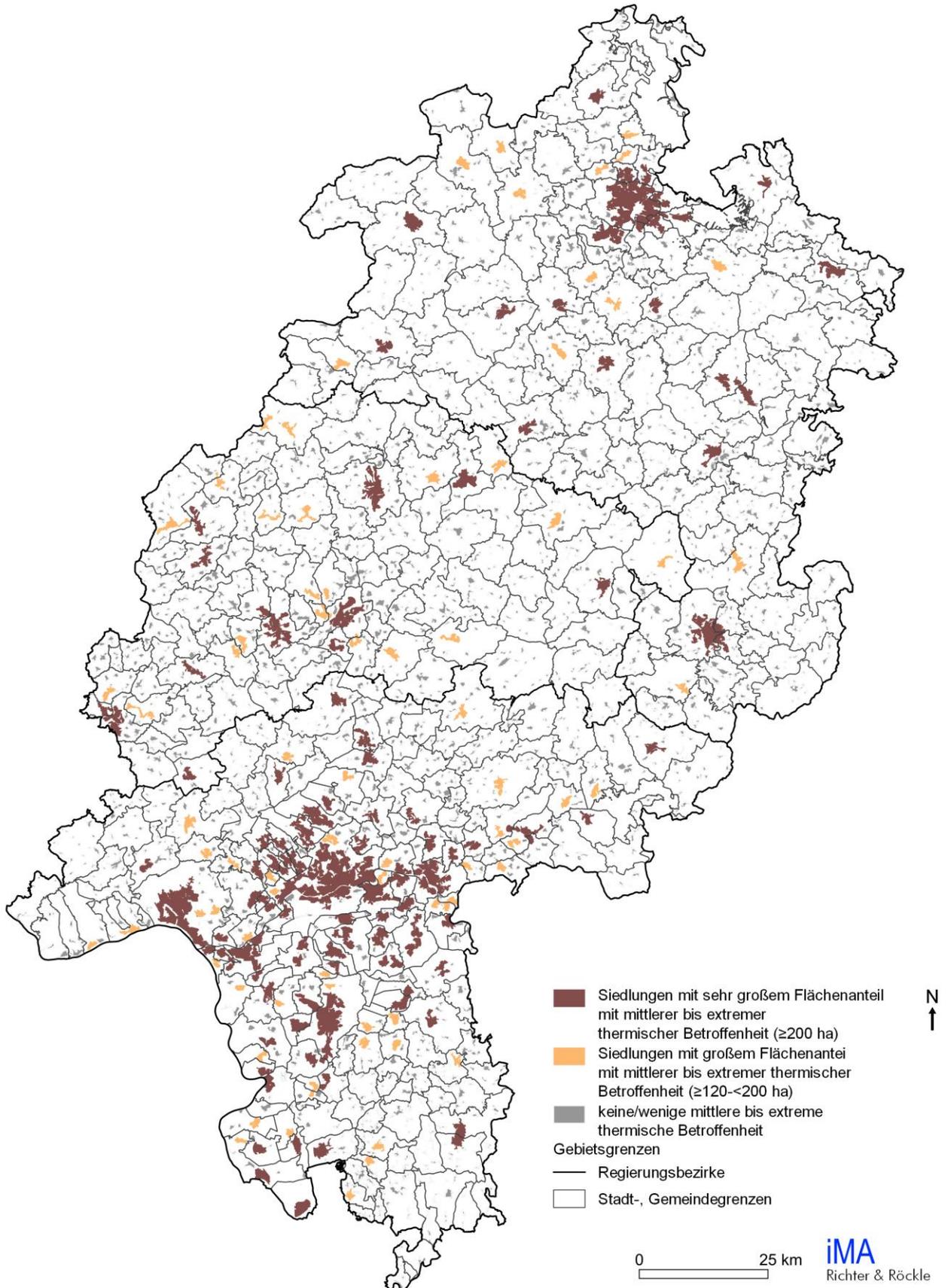


Abbildung 6-1: Siedlungsgebiete mit sehr großem und großem Flächenanteil mit mittlerer bis extremer thermischer Betroffenheit.

6.2 Empfehlungen zur Festlegung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten für besondere Klimafunktionen durch die Regionalplaner

Mit der landesweiten Klimaanalyse Hessen liegt erstmalig eine objektive, den fachlichen Standards und dem allgemeinen Stand der Wissenschaft sowie den Konkretisierungs- und Bestimmtheitsgrad von Zielfestlegungen entsprechende Datengrundlage vor, die es dem Träger der Regionalplanung ermöglicht, in den neu aufzustellenden Regionalplänen nicht nur Vorbehaltsgebiete, sondern auch Vorranggebiete für besondere Klimafunktionen festzulegen. In diesen Gebieten „hat der Schutz der Kaltluftentstehungsgebiete und Luftleitbahnen Vorrang vor entgegenstehenden Nutzungen. Maßnahmen, welche die Kaltluftentstehung oder Durchlüftung verschlechtern können, sind nicht zulässig“ (vgl. Planziffer 4.2.3-4 (Z) der 3. Änderung des Landesentwicklungsplans Hessen 2000).

Basierend auf den direkten und abgeleiteten FITNAH-Simulationsergebnissen, den Einstufungen, die zur Identifizierung der thermisch belasteten Siedlungsgebiete geführt haben und mit Hilfe der zuletzt dokumentierten Bestimmung der relativen Bedeutung der Ausgleichsräume für diese Siedlungsgebiete, folgen hier Empfehlungen zur Festlegung der Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen.

Die Ermittlung der regionalplanerisch relevanten thermisch belasteten Siedlungsgebiete erfolgte auf Basis der Auswertung des Flächenanteils mit mindestens mittlerer thermischer Betroffenheit innerhalb der „Siedlungsgebiete“ (Kapitel 4.2.6). Im Ergebnis zeigen sich die regionalen Bevölkerungsschwerpunkte mit regelmäßig dichterem Bepflanzung und damit häufig die Kernstädte der Mittel- und Oberzentren.

Planerische Setzungen

Basierend auf den Ergebnissen zahlreicher Simulationsergebnisse der Klimaanalyse und der Prämisse der Raumbedeutsamkeit, erfolgt die Empfehlung zur Abgrenzung der potenziellen Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen grundsätzlich anhand folgender planerischer Setzungen:

- Beschränkung auf die Sicherung raumbedeutsamer Ausgleichsräume mit Ausgleichswirkung auf Bereiche mit hoher thermischer Belastung. Deren Raumbedeutsamkeit kann sich dadurch ergeben, dass der für ein belastetes Siedlungsgebiet wichtige Ausgleichsraum über das Hoheitsgebiet der jeweiligen Kommune hinausgeht

oder

- der Ausgleichsraum zwar nicht (zwangsläufig) über die Gemeindegrenze hinausgeht, aber einer großen Betroffenenanzahl mit einer hohen thermischen Belastung zugutekommt. Das trifft im Wesentlichen auf die Kernstädte der Mittel- und Oberzentren als regionale Bevölkerungsschwerpunkte mit regelmäßig dichterem Bepflanzung und hoher Bedeutung als Träger zahlreicher überörtlicher Aufgaben der Daseinsvorsorge zu.
- Fokus auf die thermische Belastung. Während die lufthygienische Belastung zukünftig weiter zurückgeht, wird die thermische Belastung aufgrund der zu erwartenden Folgen des Klimawandels weiter ansteigen.
- Fokus auf Strömungssysteme der zweiten Nachthälfte (4:00 Uhr). Diese dauern länger an und erfassen meist auch größere Räume als diejenigen zu Beginn der Nacht. Häufig sind

die lokalen Strömungen der ersten Nachthälfte auch noch in der zweiten Nachthälfte präsent, dann eingebettet in ein Strömungssystem größeren Umfangs.

- Zuordnung der Strömungssysteme zu den belasteten Siedlungsgebieten auf Basis der *bodennahen Strömungsverhältnisse*. Eine Bebauung bestehender Freiflächen wirkt sich am meisten direkt in Bodennähe aus, weshalb die Regionalplanung hier am wirksamsten mit Steuerungsmaßnahmen vorbeugen kann, wenn es erforderlich erscheint. Strömungen im Überdachniveau (28 m über Grund) werden durch bauliche Maßnahmen i.d.R. weniger beeinflusst.
- Da Strömungssysteme von *geringer* Gesamtvolumenstromdichte aufgrund ihrer schwachen Dynamik durch eine Erhöhung der Rauigkeit (z.B. durch Bebauung) stärker geschwächt oder gar zum Erliegen kommen können, werden diese mit Blick auf die Festlegung von *Vorranggebieten* für besondere Klimafunktionen als *planerisch schützenswerter* eingestuft als solche mit großer Gesamtvolumenstromdichte, die gegenüber Veränderungen robuster sind.
(Dem Träger der Regionalplanung stehen im Bedarfsfall auch eine ganze Anzahl weiterer freiraumsichernder Instrumente zur Verfügung, mit denen auch Strömungssysteme höherer Dynamik geschützt werden können).
- Einem identifizierten thermisch belasteten Siedlungsgebiet werden diejenigen Strömungssysteme zugeordnet, die zu dessen Belüftung beitragen. Dabei werden die Strömungssysteme berücksichtigt, die gemäß der Analyse nach Kapitel 4.2.6 entsprechende Beiträge leisten.

Die umfangreichen und kleinräumigen FITNAH-Eingangsdaten ermöglichten im Rahmen der landesweiten Klimaanalyse Hessen sehr detaillierte Simulationen und Auswertungen. Basierend auf den planerischen Setzungen (s.o.) können entsprechend die Wirkräume sowie die diese Räume entlastenden Strömungssysteme z.B. hinsichtlich ihrer Belüftungswirkung sehr differenziert dargestellt werden. Diese Ausdifferenzierung bietet – unter Berücksichtigung der jeweiligen regionalen und teilräumlichen Besonderheiten – zum einen die Möglichkeit, die gutachterlich ermittelte Vorrang- und Vorbehaltsgebietskulisse in Einzelfällen anzupassen, zum anderen eröffnet sie dem Träger der Regionalplanung im Abwägungsprozess von konkurrierenden Flächennutzungen bei der Erstellung der Regionalpläne weitere Entscheidungsspielräume.

Vorranggebiete für besondere Klimafunktionen

Nach den zuvor dokumentierten Setzungen wird empfohlen **Vorranggebiete** für besondere Klimafunktionen für schwache bis mittlere, bodennahe Strömungssysteme (ausgewertet in 5 m über Grund) mit geringem Luftdurchsatz (Gesamtvolumenstromdichte $\leq 60 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})^{31}$), aber mit sehr hoher Bedeutung hinsichtlich ihrer Durchlüftungsfunktion für die thermisch belasteten Siedlungsgebiete mit *sehr großem Flächenanteil* mittlerer bis extremer thermischer Betroffenheit festzulegen.

³¹ Dieser Wert wird z.B. in der Klimastudie REKLIBO (2010) verwendet und wurde hier übernommen. Ab diesem Wert wird davon ausgegangen, dass siedlungstypische Bebauung ohne vollständige Aufzehrung durch Turbulenz überströmt werden kann.

Entscheidungsmöglichkeit(en) Vorranggebiete als Vorbehaltsgebiete einzustufen

- a) Es gibt Flächen, die alle vorgenannten Kriterien für Vorranggebiete erfüllen, mit der einzigen Ausnahme, dass die Gesamtvolumenstromdichte größer ist als $60 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$. Da es sich somit dort um relativ kräftige, intensive Strömungssysteme handelt, die bei einer maßvollen³² Bebauung nicht zwingend zum vollständigen Erliegen der Belüftungsfunktionen und damit der thermischen Entlastungsfunktion führen, soll für die Träger der Regionalplanung in diesen Fällen eine Entscheidungsmöglichkeit eingeräumt werden, diese Flächen statt als Vorranggebiet als Vorbehaltsgebiet einzustufen.
- b) Es bleibt dem Träger der Regionalplanung vorbehalten, ermittelte potentielle Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen, die nicht oder nur geringfügig über das Hoheitsgebiet der jeweiligen Kommune hinausgehen, ausschließlich als lokal bedeutsame klimarelevante Flächen einzustufen. Zudem kann es vorkommen, dass bei einzelnen Kommunen in einer einzelnen Richtung ein als bedeutsam bewerteter Kaltluftstrom über die Grenze hinaus geht und gesondert bewertet werden muss, während die Beiträge aus den anderen Richtungen innerhalb des kommunalen Bereiches bleiben und daher regionalplanerisch nicht ausgewiesen werden müssen.
- c) Die Heterogenität der Siedlungs- und Freiraumstrukturen spiegelt sich sowohl in unterschiedlichen Belastungssituationen wie auch in Unterschieden der Kaltluftströmungen wider. Um dieser Heterogenität Rechnung zu tragen, können innerhalb der ermittelten Vorranggebietskulisse für besondere Klimafunktionen Kaltluftströmungen von in Relation geringerer Bedeutung (z.B. aufgrund vergleichsweise geringerer Eindringtiefe der Luftpakete, geringerer Einwohnerzahlen, die entlastet werden) als Vorbehaltsgebiete festgelegt werden. Ein hessenweit einheitlicher (Schwellen-)Wert für die „Abstufung“ von Vorranggebieten zu Vorbehaltsgebieten kann aus gutachterlicher Sicht nicht vorgeschlagen werden, da die Einstufung immer im Einzelfall unter Berücksichtigung der jeweiligen räumlichen Situation und der vorherrschenden Strömungssysteme erfolgen sollte.

Aufgrund des (zeitlichen) Wichtungsfaktor wird in der landesweiten Klimaanalyse siedlungsnahen Ausgleichsflächen eine „höhere Wertigkeit“ zugewiesen, da sie i.d.R. schneller zur Entlastung des thermisch belasteten Siedlungsgebietes beitragen, während siedlungsfernere Ausgleichsflächen bei Überstreichen derselben Betroffenheit eine „geringere“ Wertigkeit zugewiesen bekommen. Tragen jedoch siedlungsferne Kaltluftentstehungsgebiete zur Mächtigkeit eines bedeutsamen Kaltluftstroms bei, können diese – auch bei geringer Wertigkeit – schützenswert sein, teilweise schützenswerter als siedlungsnaher Kaltluftströme, die im Vergleich Rasterzellen mit geringerer Betroffenheit erreichen (z.B. Industrie- und Gewerbegebiete) bzw. nicht so tief in das Siedlungsgebiet eindringen.

Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen

Die aus diesen planerischen Setzungen resultierenden Empfehlungen zur Festlegung von **Vorbehaltsgebieten** für besondere Klimafunktionen umfassen bodennahe Strömungssysteme (ausgewertet in 5 m über Grund), die auf thermisch belastete Siedlungsgebiete mit einem *großen Flächenanteil* mittlerer bis extremer thermischer Betroffenheit treffen.

³² Z.B. eine die Luftleitbahnen berücksichtigende und zumindest Teil-Bereiche der Flächen frei lassende Bebauung.

Während in den Vorranggebieten für besondere Klimafunktionen der Schutz der Kaltluftentstehungsgebiete und der Luftleitbahnen Vorrang vor entgegenstehenden Planungen und Maßnahmen hat und beispielsweise eine Bebauung i.d.R. unzulässig ist, sollen in den Vorbehaltsgebieten für besondere Klimafunktionen Planungen und Maßnahmen möglichst unterbleiben, die zu einer Verschlechterung der Durchlüftung der thermisch belasteten Siedlungsgebiete führen. Ist in den Vorbehaltsgebieten für besondere Klimafunktionen im Einzelfall eine Bebauung zulässig, muss diese entsprechend klimaverträglich³³ erfolgen.

Eine klimaverträgliche Bebauung bedeutet:

- Bebauungshöhe sollte unter der Höhe der angrenzenden Bebauung liegen,
- keine Gebäude mit ihrer Längsrichtung quer zum Kaltluftabfluss (Riegelbebauung),
- Wärmedämmung der Gebäude nach aktuellen Standards,
- starke Durchgrünung bei geringer Gesamtversiegelung schaffen,
- Retentionsmöglichkeiten einplanen (Dachbegrünungen, Zisternen) – Wasser wird zukünftig für Grün in den Städten eine herausragende Rolle spielen,
- möglichst keine emittierenden Betriebe ansiedeln (ggf. Immissionsprognosen für Gase, Stäube, Gerüche erforderlich),
- Holzfeuerungen (Scheitholz) unterbinden (Geruchsbeschwerden wahrscheinlich).

Abbildung 6-2 zeigt die auf Basis der planerischen Setzungen in der landesweiten Klimaanalyse gutachterlich ermittelten und hinsichtlich ihrer Ausgleichsfunktion für thermisch belastete Siedlungsgebiete bewerteten Ausgleichsräume. Die Flächenkulisse konzentriert sich auf die Flächen, die zur Belüftung und damit zur Abkühlung von Siedlungsgebieten mit einem großen/sehr großen Flächenanteil mit mittlerer bis extremer thermischer Betroffenheit beitragen.

Die letztendliche Ausweisung als Vorrang-/Vorbehaltsgebiet obliegt dem Träger der Regionalplanung, der im Rahmen eines Abwägungsprozesses auch weitere, teils konkurrierende Belange zu berücksichtigen hat.

³³ „Klimaverträglich“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sie so erfolgen sollte, dass die Belüpfungsfunktionen für die bestehenden Siedlungsgebiete gar nicht oder nur wenig eingeschränkt werden. Dies wird in der Regel durch gesonderte und entsprechend hochauflösende Klima-Untersuchungen für das Plangebiet nachgewiesen bzw. überprüft.

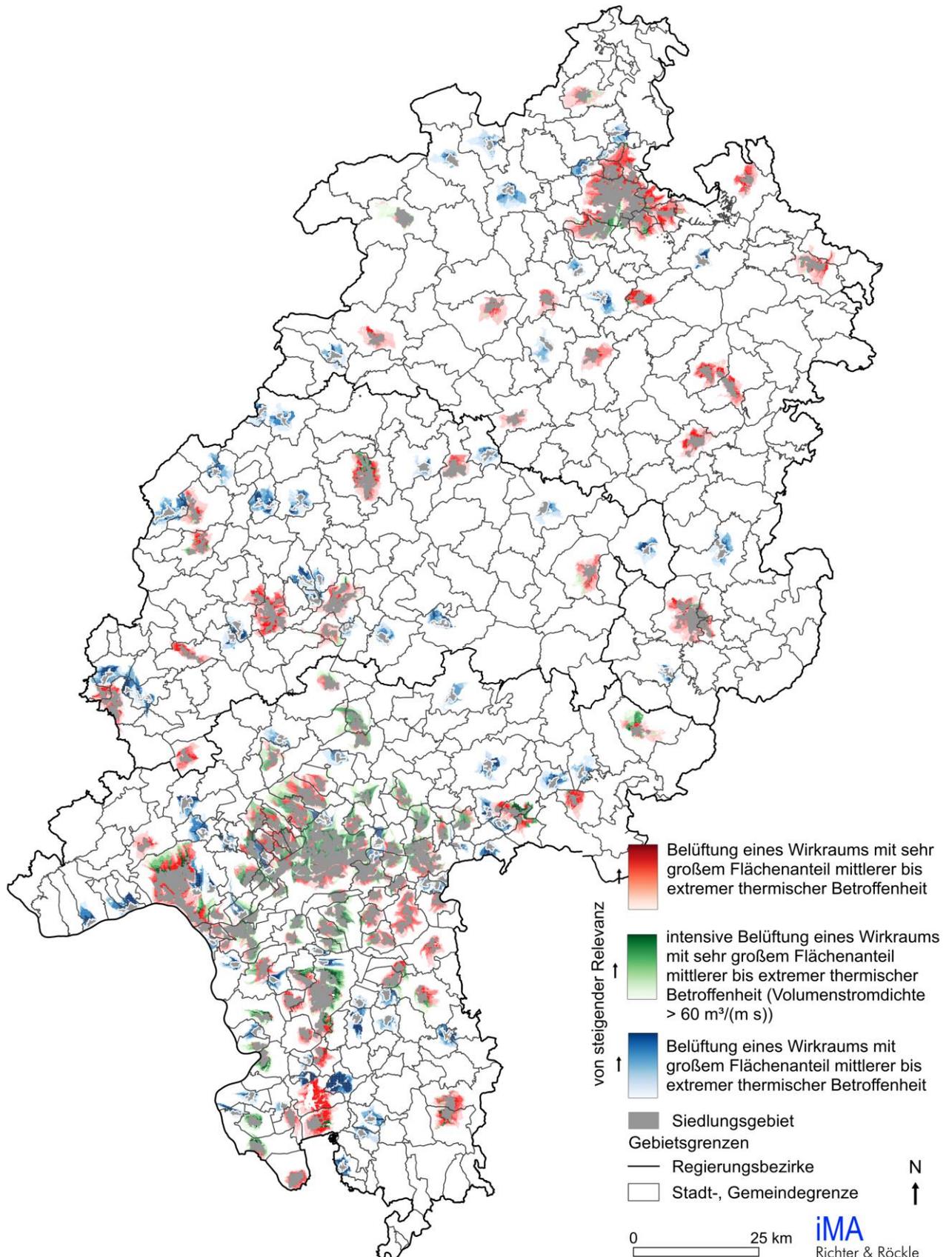


Abbildung 6-2: Bewertung des Ausgleichsraums, welcher für die Belüftung von Siedlungsgebieten (Wirkraum) mit sehr großem und großem Flächenanteil mit mittlerer bis extremer thermischer Betroffenheit sorgt.

7 Glossar

atmosphärische Gegenstrahlung	ist der Anteil der langwelligen Strahlung, der aus der Atmosphäre in Richtung der Erde gerichtet ist.														
Auflösung	Die Auflösung von Daten und Simulationen beschreibt die horizontale Größe eines Rasterdatenpunktes (z.B. 1 m x 1 m bei einem digitalen Geländemodell).														
Ausbreitungsklassen	<p>Die Ausbreitungsklasse nach Klug-Manier charakterisiert die thermische Schichtung der unteren Atmosphäre. Die thermische Schichtung bestimmt neben der Bodenrauigkeit die atmosphärische Turbulenz, die ein Maß für das „Verdünnungsvermögen“ der Atmosphäre ist.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Klasse</th> <th>Beschreibung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>I</td> <td>sehr stabile atmosphärische Schichtung, ausgeprägte Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre</td> </tr> <tr> <td>II</td> <td>stabile atmosphärische Schichtung, Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre</td> </tr> <tr> <td>III₁</td> <td>stabile bis neutrale atmosphärische Schichtung, zumeist windiges Wetter</td> </tr> <tr> <td>III₂</td> <td>leicht labile atmosphärische Schichtung</td> </tr> <tr> <td>IV</td> <td>mäßig labile atmosphärische Schichtung</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>sehr labile atmosphärische Schichtung, hohe Sonneneinstrahlung, starke vertikale Durchmischung der Atmosphäre</td> </tr> </tbody> </table>	Klasse	Beschreibung	I	sehr stabile atmosphärische Schichtung, ausgeprägte Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre	II	stabile atmosphärische Schichtung, Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre	III ₁	stabile bis neutrale atmosphärische Schichtung, zumeist windiges Wetter	III ₂	leicht labile atmosphärische Schichtung	IV	mäßig labile atmosphärische Schichtung	V	sehr labile atmosphärische Schichtung, hohe Sonneneinstrahlung, starke vertikale Durchmischung der Atmosphäre
Klasse	Beschreibung														
I	sehr stabile atmosphärische Schichtung, ausgeprägte Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre														
II	stabile atmosphärische Schichtung, Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre														
III ₁	stabile bis neutrale atmosphärische Schichtung, zumeist windiges Wetter														
III ₂	leicht labile atmosphärische Schichtung														
IV	mäßig labile atmosphärische Schichtung														
V	sehr labile atmosphärische Schichtung, hohe Sonneneinstrahlung, starke vertikale Durchmischung der Atmosphäre														
Ausgleichsraum	<p>Landschaftsraum mit möglichst intakten Umweltbedingungen, der gegenüber Gebieten mit beeinträchtigten Umweltbedingungen eine Ausgleichsfunktion wahrnehmen soll (z.B. Erholung, Klimaausgleich, Biotop- und Artenschutz).</p> <p>Im Rahmen der landesweiten Klimaanalyse werden als Ausgleichsräume die regional bedeutsamen Luftleitbahnen sowie die für das Siedlungsklima bedeutsamen Flächen des Freiraums betrachtet.</p>														
autochthone Wetterlagen	<p>Autochthone Wetterlagen sind bewölkungsarme, großräumig wind-schwache Wetterlagen, fast immer unter Hochdruckeinfluss. Sie werden auch „Strahlungswetterlagen“ genannt, weil die nächtliche langwellige Ausstrahlung der Erdoberfläche wegen der fehlenden Bewölkung nahezu ungehindert ins Weltall abgestrahlt wird.</p> <p>Die Wetterlage erlaubt die Ausbildung des →Mikro- und →Mesoklimas, sie erlaubt die markanteste Ausprägung lokaler und regionaler thermischer Windsysteme.</p> <p>In den Nachtstunden entwickelt sich oft eine Bodeninversion, eine stabile Schichtung mit gehemmter Durchmischung, weshalb sie auch als „austauscharme Wetterlage“ bezeichnet wird.</p>														
Bergwind	Talabwind (VDI 3787 Blatt 1:1997). Nachts kühlt sich die Luft in Tälern stärker ab als über der Ebene. Die vergleichsweise schwere Kaltluft fließt zunächst die Berghänge hinunter und schließlich talabwärts. Der Bergwind beginnt 2 bis 3 Stunden nach Sonnenuntergang und dauert bis kurz nach Sonnenaufgang.														
Bowen-Verhältnis	beschreibt das Verhältnis zwischen fühlbarer und latenter Wärme. Es kann im innerstädtischen Bereich den Wert 2:1 annehmen, während es im Umland 1:2 beträgt (Häckel 2005).														

Flurwind	Flurwinde sind eine thermisch bedingte kleinräumige Ausgleichsströmung, welche im Idealfall auf das Stadtzentrum ausgerichtet ist und nachts bzw. frühmorgens auftritt. Höhere Temperaturen in der Stadt (Wärmeinsel) als im Umland sorgen für einen konvektiven Aufstieg der warmen Luft über der Stadt, wodurch kühlere Luft aus dem Umland in Bodennähe nachströmt.
Frischluff	Weist eine (zugeführte) Luftmasse eine deutlich geringere Belastung mit Luftschadstoffen auf als eine vorhandene Luftmasse oder als die umgebende Luftmasse, so wird diese gering belastetere Luft häufig als „Frischluff“ bezeichnet.
Fühlbarer Wärmestrom	Der turbulente Strom fühlbarer Wärme wird von warmen Oberflächen durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung besonders aber durch turbulente Luftbewegungen (Konvektion) abgeführt. Die Terme sind positiv, wenn sie zur Umsatzfläche hingerichtet sind (=Erwärmung), negativ, wenn sie von ihr weggerichtet sind (=Abkühlung).
Geostrophischer Wind	Wind, der außerhalb der Reibung der Erdoberfläche weht und sich mit dem Luftdruckgradienten und der Coriolis-Kraft im Gleichgewicht befindet.
Globalstrahlung	ist die Summe der direkten und der diffusen Sonnenstrahlung, die auf eine horizontale Fläche auf der Erde trifft.
Hangwind	Hangabwind/Hangaufwind sind Teil der Berg-/Talwindzirkulation. Sie setzen schon kurz nach Beginn der abendlichen Abkühlung bzw. nach Einsetzen der Sonneneinstrahlung am Morgen ein. Nach einigen Stunden Verzögerung treten dann Ausgleichsströmungen zwischen Tal und Vorland als → Bergwind (nachts) bzw. → Talwind (tags) ein.
Heißer Tag	Ein Tag wird in den amtlichen Statistiken als „heißer Tag“ registriert, wenn die Tageshöchsttemperatur 30,0 °C erreicht oder überschreitet.
Hitzestress	Als „Hitzestress“ wird die durch Hitze bedingte Belastung des menschlichen, tierischen oder pflanzlichen Organismus bezeichnet, häufig mit negativem Einfluss auf den Stoffwechsel, insbesondere auf den Wasserhaushalt (Gefahr der Austrocknung). Bei Menschen und Tieren ist zudem das Herz-Kreislaufsystem betroffen. Hitzestress stellt vor allem für Risikogruppen wie ältere Menschen oder Kinder eine ernste gesundheitliche Gefahr dar und vermindert allgemein die Leistungsfähigkeit.
Hitzewelle	Als „Hitzewelle“ wird eine längere Periode mit ungewöhnlich hohen Temperaturen bezeichnet. Es gibt keine allgemein gültige Definition für eine Hitzewelle, da der Begriff vom üblichen Wetter der jeweiligen Region abhängig ist. Was in einem heißen Klima als normales Wetter erscheint, wird in einem kühleren Klima als Hitzewelle erlebt. Für Deutschland wird von manchen Forschern eine Folge von mindestens fünf Tagen mit einem Tagesmaximum von im Mittel mindestens 30°C als Hitzewelle verstanden. Hitzewellen können ernsthafte Auswirkungen auf die Landwirtschaft haben, Waldbrände begünstigen und die Gesundheit von Menschen gefährden (siehe Hitzestress). (Bildungswiki Klimawandel (2013))
Human-Biometeorologie	Die Human-Biometeorologie ist ein Teilgebiet der Meteorologie, das sich mit der Wirkung des Klimas, der Luftschadstoffe und der Strahlung auf den Menschen beschäftigt.
Indifferente Schichtung	Ein Luftpaket hat bei Vertikalbewegungen immer dieselbe Temperatur wie die Umgebungsluft.
IPCC	Der <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (IPCC) ist eine Institution der Vereinten Nationen. In seinem Auftrag tragen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler weltweit den aktuellen Stand der Klimaforschung zusammen und bewerten anhand anerkannter Veröffentlichungen den jeweils neuesten Kenntnisstand zum Klimawandel. Der IPCC

	bietet Grundlagen für wissenschaftsbasierte Entscheidungen der Politik, ohne jedoch konkrete Lösungswege vorzuschlagen oder politische Handlungsempfehlungen zu geben.
Kaltluft	Unter lokaler Kaltluft versteht man bodennahe Luft, die kälter als die Luft in ihrer Umgebung ist. Kaltluft wird entweder vor Ort auf Grund des Energieumsatzes an der Erdoberfläche gebildet oder durch kleinräumige Zirkulation transportiert. Kaltluftentstehung und -abfluss hängen von den meteorologischen Verhältnissen, der Flächennutzung sowie von der Geländeform und -exposition ab (Meyers Kl. Lexikon, Lex. D. Geogr.).
Kaltluftabfluss	Unter Kaltluftabfluss versteht man den orographisch bedingten nächtlichen Abfluss von örtlich gebildeter Kaltluft, dabei wird genügend Gefälle vorausgesetzt. Dies trifft insbesondere an unbewaldeten und unbebauten Hängen zu.
Kaltlufteinzugsgebiet	Das Kaltlufteinzugsgebiet umfasst nur diejenigen Kaltluftproduktionsgebiete, in denen Kaltluft gebildet wird, die für einen bestimmten Standort oder eine Siedlung (Wirkraum) von Bedeutung sind. (VDI 3787 Blatt 5: 2003)
Kaltluftentstehung/ Kaltluftbildung (Kaltluftproduktion)	Bei windschwachen Strahlungswetterlagen infolge nächtlicher Ausstrahlung örtlich entstehende Kaltluft. Die durch Ausstrahlung abkühlende Erdoberfläche kühlt ihrerseits die darüber liegende bodennahe Luftschicht ab. Es bildet sich bodennahe Kaltluft. Die Kaltluftbildung ist abhängig von den physikalischen (z.B. Wärmeleitung) und topographischen (z.B. Bewuchs, Bebauung, Geländeform) Eigenschaften der Erdoberfläche.
Kaltluftproduktionsrate Kaltluftproduktionspotential	Bei wolkenarmen und windschwachen Wetterlagen führt die nächtliche Ausstrahlung der Erdoberfläche zur → Kaltluftbildung. Die Angabe der Stärke der Kaltluftbildung (Kaltluftproduktionsrate) erfolgt als über das pro Sekunde abgekühlte Luftvolumen pro Grundfläche (m ³ /s). Alternativ verwenden Kaltluftabflussmodelle auch ein Kälteproduktionspotential (Energieflussdichte) an der Oberfläche in Kilowattstunde pro Quadratmeter (kWh/m ³).
Landschaftshaushalt	Gesamtbetrachtung des Ein- und Austrags in einem Gebiet über den Transport von Energie, Wasser und Stoffen und der dabei stattfindenden Stoffumwandlungsprozesse.
latenter Wärmefluss	Umsetzung der Einstrahlung in die Verdunstung von Wasser, ohne eine Änderung der Lufttemperatur zu bewirken.
Luftleitbahn	Parallel zur Windrichtung ausgerichtete Fläche von geringer → Rauigkeit, d.h. frei von flächenhafter Bebauung und hoher, dichter Vegetation (z.B. Wälder).
Luftpaket	Ein Luftpaket ist ein begrenztes Luftvolumen, das mit der Strömung transportiert wird.
Luftqualitätsindex	Luftqualitätsindex (LQI) wird aus dem Mittelwert aus den Ausschöpfungsgraden (Ausschöpfung des Grenzwertes von jeweils 40 µg/m ³) von Feinstaub (PM10) und Stickstoffdioxid (NO ₂) berechnet. $LQI = \left(\frac{PM10}{40} + \frac{NO_2}{40} \right) / 2$
Lufttemperatur	Physikalisch betrachtet ist die Lufttemperatur ein Maß für den Wärmezustand eines Luftvolumens. Dieser wird bestimmt durch die mittlere kinetische Energie der ungeordneten Molekularbewegung in der Luft. Je größer die mittlere Geschwindigkeit aller Moleküle in einem Luftvolumen ist, umso höher ist auch seine Lufttemperatur.
Maschenweite	Bei den numerischen Simulationen wird das Rechengebiet mit einem Gitternetz mit einem definierten horizontalen Abstand des Netzes überzogen.

Median	<p>Der Median ist der zentrale Wert in der Mitte einer Daten-Verteilung, wenn die Daten nach Größe sortiert werden. Die eine Hälfte aller Werte ist kleiner als der Median, die andere Hälfte der Werte ist größer.</p> <p>Der Wert darf nicht mit dem Mittelwert verwechselt werden, wie aus dem folgenden Beispiel deutlich wird:</p> <p>Werte-Sortierung: 1, 2, 3, 4, 8, 9, 9, 10, 10</p> <p>Der Median dieser Verteilung ist 8, der Mittelwert über alle Werte wäre 6,2.</p>						
Mesoklima	<p>Das Mesoklima (z.B. Stadt-, Gelände- und Regionalklima) erstreckt sich subregional bis lokal innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht und schließt Städte, Berge und Täler ein. Es wird von Relief, Klima, Oberflächenbedeckung und menschlichen Aktivitäten geprägt (Weischert & Endlicher 2008).</p>						
Mikroklima	<p>Atmosphärische Prozesse der bodennahen Luftschicht mit einer horizontalen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis einigen hundert Metern. Der atmosphärische Zustand in diesem Bereich wird von den Eigenschaften der Oberfläche maßgebend geprägt, ist aber dennoch in das Großklima eingebettet. Die mikroklimatischen Phänomene sind bei autochthonen Wetterlagen am stärksten ausgeprägt.</p>						
Morbidität	Häufigkeit der Erkrankungen innerhalb der Bevölkerung.						
Mortalität	Sterblichkeit, Sterberate der Bevölkerung.						
Planetare Grenzschicht	<p>Als planetarische Grenzschicht wird die Schicht bezeichnet, die vom Erdboden bis zu einer Obergrenze von ca. 50 – 2.000 m der Atmosphäre reicht, wobei die Höhe der Schicht von der Rauigkeit des Untergrundes, der vertikalen Temperaturschichtung und der Windgeschwindigkeit abhängt. Der Mittelwert der Höhe beträgt ca. 1.000 m. In der planetarischen Grenzschicht findet ein Großteil des turbulenten vertikalen Austauschs von Wärme (Energie) und Wasserdampf zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre statt.</p>						
Perzentil	<p>Ein Perzentil ist ein statistischer Wert auf einer Skala von Null bis Hundert, der den Prozentsatz an Datensatzwerten angibt, der gleich oder niedriger als er selbst ist. Das Perzentil wird oft genutzt, um die Extremwerte einer Verteilung abzuschätzen. So kann z.B. das 90. (10.) Perzentil verwendet werden, um die Schwelle für die oberen (unteren) Extremwerte zu bezeichnen. So ist bspw. das 90 % Perzentil der Wert, der von nur 10 % der Stichprobe überschritten werden darf. Der Maximalwert ist für zahlreiche Fragestellungen weniger aussagekräftig, da er keinen Hinweis auf die Häufigkeit gibt.</p> <p>Beispiel: Beträgt der Perzentilwert für die Anzahl von Sommertagen an einem Ort 95 %, so gibt es 5 % Orte, an denen eine höhere Anzahl von Sommertagen vorliegt, während bei 95 % der Orte eine geringere Anzahl der Sommertage auftritt.</p>						
PET	<p>Physiological Equivalent Temperature. Ein Index zur Beschreibung des thermischen Empfindens in Abhängigkeit von Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit sowie der Strahlungsflüsse unter Berücksichtigung der menschlichen Energiebilanz.</p>						
Rauigkeit	<p>Charakterisierung der durchschnittlichen Unebenheit der Erdoberfläche, die die Reibung der Luftströmung am Boden beeinflusst. Maß der Rauigkeit, die Rauigkeitslänge ist der z_0-Wert, der in Meter angegeben wird.</p> <p>Tabelle: Mittlere Rauigkeitslänge in Abhängigkeit von den Landnutzungsklassen des CORINE-Katasters (TA Luft Anhang 3 Punkt 5)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>z_0 in m</th> <th>CORINE-Klasse</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,01</td> <td>Sandflächen, Wasserflächen</td> </tr> <tr> <td>0,02</td> <td>Deponien, Wiesen und Weiden, natürliches Grünland, Gewässerläufe, Flächen mit spärlicher Vegetation</td> </tr> </tbody> </table>	z_0 in m	CORINE-Klasse	0,01	Sandflächen, Wasserflächen	0,02	Deponien, Wiesen und Weiden, natürliches Grünland, Gewässerläufe, Flächen mit spärlicher Vegetation
z_0 in m	CORINE-Klasse						
0,01	Sandflächen, Wasserflächen						
0,02	Deponien, Wiesen und Weiden, natürliches Grünland, Gewässerläufe, Flächen mit spärlicher Vegetation						

	0,05	Abbauf Flächen, Sport- und Freizeitanlagen, nicht bewässertes Ackerland
	0,10	Flughäfen, Sümpfe, Torfmoore, Meere und Ozeane
	0,20	Straßen, Eisenbahn, Weinbau, (Moor)Heide, Felsflächen ohne Vegetation, städtische Grünanlage, komplexe Parzellenstrukturen, Landwirtschaft und natürliche Bodenbedeckung
	0,50	Hafen, Obst- und Beerenobst, Wald-Strauch-Übergangsstadien
	1,00	Nicht durchgängig städtische Prägung, Industrie- und Gewerbeflächen, Nadelwälder, Baustellen
	1,50	Laub- und Mischwälder
	2,00	Durchgängig städtische Prägung
RCP 4.5 / RCP 8.5	Representative Concentration Pathways (RCP) – Repräsentative Konzentrationspfade: Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre. Sie sind Grundlage für den 5. Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). RCP 4.5: Moderate Entwicklung / RCP 8.5 entspricht einem „Weiter-so-wie-bisher“-Szenario.	
Rechengitter	Bei den numerischen Simulationen wird das Rechengebiet mit einem Gitternetz überzogen, an dessen Knotenpunkte die meteorologischen Variablen mit dem zugrundeliegenden Gleichungssystem berechnet werden.	
sensibler Wärmefluss	Umsetzung der Einstrahlung in einen fühlbaren thermischen Wärmefluss, welcher sich in einer Änderung der Lufttemperatur äußert.	
Sommertag	Ein Tag, an dem die Tageshöchsttemperatur 25,0 °C erreicht oder überschreitet.	
SRTM-Daten	Digitales Geländemodell, welches bei der STS-099 Shuttle Radar Topography Mission im Februar 2000 (Dauer 11 Tage, 6 h) aufgezeichnet wurde.	
Stadtklima	<p>Unter Stadtklima versteht man das gegenüber dem Umland durch die Bebauung und anthropogene Emissionen (wie z.B. Luftschadstoffe oder Abwärme) modifizierte Klima von Städten und Ballungsräumen.</p> <p>Während windschwacher Hochdruckwetterlagen reichert sich über der Stadt die Luftschadstoffkonzentration an. Das Stadtklima ist insbesondere durch die Eigenschaften von Baustoffen bezüglich Wärmespeicherung und Reflexion von Sonnenstrahlung, durch die starke Versiegelung des Bodens und durch das Fehlen von Vegetation gekennzeichnet. Am Nachmittag bildet sich deshalb eine urbane Wärmeinsel aus, welche nachts im Vergleich zur Umgebung am ausgeprägtesten ist. Im Sommer kann die Wärmeinsel zu einer erhöhten Wärmebelastung gegenüber dem Umland beitragen und die nächtliche Regeneration der Stadtbevölkerung beeinträchtigen.</p> <p>Die Windgeschwindigkeit wird durch die hohe Hinderniswirkung der Bebauung gegenüber dem Umland im Mittel reduziert, die Turbulenz jedoch erhöht. Aufgrund der vielfältigen Landnutzungen und Bebauungsstrukturen weist das kleinräumige Klima innerhalb der Stadt allerdings eine hohe räumliche Variabilität auf.</p> <p>Durch die tagsüber stärkere Konvektion über der Stadt kann es lokal zu stärkeren konvektiven Niederschlagsereignissen kommen.</p>	
mittlere Strahlungstemperatur	Die mittlere Strahlungstemperatur ist die Temperatur der auf den Wärmehaushalt des Menschen (bzw. den Messpunkt) einwirkenden Wärmestrahlung aller Umschließungsflächen in Abhängigkeit von deren Emissionsvermögen.	

Strömungssystem	Stabil ausgebildete Kaltluftabflüsse und Flurwinde
Synthetische Winddaten	Wind- und → Ausbreitungsklassenstatistiken , welche auf Basis von Re-analysedaten mit einem prognostischen nicht-hydrostatischen Strömungsmodell berechnet wurden. Die Daten beziehen sich meist auf eine Anemometerhöhe von 10 m über Grund.
Synoptik	Synoptik (griechisch: synopsis = Übersicht, Überblick) ist ein Teilgebiet der Meteorologie, das in einer großräumigen Zusammenschau die Wetterzustände in ihrer räumlichen Verteilung und zeitlichen Änderung für einen gegebenen Zeitpunkt untersucht (Analyse oder Wetterlage). (Quelle: DWD 2020b).
Talwind	Bei Sonneneinstrahlung erwärmt sich die Luft im Gebirge stärker als über der Ebene. Dadurch steigt die Luft nach oben und der Luftdruck sinkt über dem Gebirge. Zum Ausgleich beginnt die Luft unterhalb der Gipfel von außen - also durch die Täler - ins Gebirge einzuströmen. Diese im Tagesgang immer stärker werdende Luftströmung wird als Talwind bezeichnet. Er setzt meist 2 bis 3 Stunden nach Sonnenaufgang ein und erlischt erst kurz nach Sonnenuntergang (Quelle: DWD 2020b).
Trajektion	Im FITNAH-Simulationsmodell ist es möglich, mittels Kaltlufttrajektion die Fließrichtung der abfließenden Kaltluft sowie den Bereich aus dem die Kaltluft kommt, zu ermitteln.
Urban boundary layer	Bezeichnung für den Teil der bodennahen Luftschicht, der durch städtisch bebaute Gebiete beeinflusst wird.
Urban canopy layer	Luftschicht zwischen dem Boden und der mittleren Höhe der Gebäude und Bäume, in welchen mikroskalige Prozesse, wie Mehrfachreflexion oder Turbulenz, dominieren.
urbane Wärmeinsel	Siedlungsraum, der vor allem abends und nachts während → autochthoner Wetterlagen eine höhere Lufttemperatur aufweist als die ländliche Umgebung.
Ventilationsbahn	Luftleitbahn, die bei Schwachwindlagen lufthygienisch belastete oder unbelastete Luftmassen mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften in die Stadt transportiert werden. Die herangeführte Belastung der Luft (thermisch oder lufthygienisch) spielt hier keine Rolle. Die Funktion wird ausschließlich durch den geringen Strömungswiderstand erfüllt (Mayer et al. 1994).
Volumenstromdichte	Die Kaltluft-Volumenstromdichte, die das Produkt aus Geschwindigkeit und Schichtdicke ist, ist ein Maß für die Menge an abfließender Kaltluft. Sie wird angegeben in Kubikmeter pro Sekunde und Querschnitt der Breite 1 Meter über die gesamte betrachtete Luftschichtmächtigkeit. In der vorliegenden Untersuchung wurde sie ausgegeben für: <ul style="list-style-type: none"> ▪ bodennahe Verhältnisse (math. Integral vom Boden bis in 5 m über Grund), ▪ vom Boden bis ins Überdachniveau (math. Integral vom Boden bis in 28 m über Grund) und ▪ als „Gesamtvolumenstrom“ (math. Integral vom Boden bis in 65 m Höhe über Grund – dieser Bereich soll die für die Bevölkerung und die Bebauung einflussreiche belüftungswirksame bodennahe Schicht erfassen).
Vorbehaltsgebiet	Vorbehaltsgebiete messen in den jeweiligen Gebieten bestimmten raumbedeutsamen Funktionen oder Nutzungen für nachfolgende Abwägungen mit konkurrierenden raumbedeutsamen Nutzungen ein besonderes Gewicht bei. Sie schließen aber die Zulassung entgegenstehender Nutzungen nicht vollständig aus. Es handelt sich bei Vorbehaltsgebieten um Grundsätze der Raumordnung. Solche Grundsätze sind gemäß § 4 ROG zu berücksichtigen, d.h.

	ihre inhaltliche Ausrichtung ist bei weiteren, auf der Ebene der Raumordnung noch nicht abschließend vollzogenen Abwägungen mit anderen örtlichen oder sektoralen Belangen zu berücksichtigen.
Vorranggebiet	Vorranggebiete geben bestimmten raumbedeutsamen Funktionen oder Nutzungen Priorität und schließen andere raumbedeutsame Nutzungen in diesem Gebiet aus, soweit Letztere mit den vorrangigen Funktionen, Nutzungen oder Zielen der Raumordnung nicht vereinbar sind. Es handelt sich dabei um Ziele der Raumordnung. Ziele der Raumordnung sind gemäß § 4 ROG zu beachten. Dies bedeutet, dass sie bereits letztverbindlich abgewogen sind. Sie können deshalb in Bauleitplänen und in Fachplanungen nicht erneut abgewogen (respektive: „weggewogen“) werden, sondern nur noch in dem jeweiligen Planungsmaßstab entsprechend konkretisiert werden.
Vulnerabilität	Vulnerabilität beschreibt, wie empfindlich das jeweilige Objekt auf innere und äußere Störereignisse reagiert. Dies schließt die Wahrscheinlichkeit für mögliche Schäden ein (Turner et al. 2003), aber auch die Fähigkeit, wie das System mit den Einflüssen umgeht, um die Systemdienstleistungen weiterhin aufrechterhalten zu können (Birkmann et al. 2013). In Bezug auf den Klimawandel, kann die Vulnerabilität als ein Maß dafür verstanden werden, inwieweit ein System anfällig für die Auswirkungen von Klimaextremen, -schwankungen und -veränderungen ist bzw. nicht fähig ist, diese zu bewältigen (Parry et al. 2007). Gemäß dieser Definition setzt sich die Vulnerabilität aus den Teilen Exposition (z. B. veränderte Niederschlags- oder Temperaturbedingungen), Sensitivität (Empfindlichkeit) und Anpassungskapazität zusammen.
Wahre Ortszeit	Die wahre Ortszeit beschreibt die Sonnenzeit bezogen auf einen bestimmten Ort, hier: im Berechnungsgebiet. Charakteristisch für die wahre Ortszeit ist, dass zum Mittagstermin – 12:00 Uhr – der Sonnenhöchststand eintritt (Durchgang der Sonnenmitte durch den lokalen Meridian).
Wärmebelastung (des Menschen)	Um weder zu stark auszukühlen noch aufzuheizen, müssen sich Wärmegewinn und Wärmeabgabe des Menschen die Waage halten. Dazu besitzt der Organismus eine Reihe unwillkürlich ablaufender Regulationsmechanismen. Die gesundheitliche Bedeutung hängt insbesondere mit der engen Vernetzung von Thermo- und Kreislaufregulation zusammen. Ist die Wärmeabgabe behindert – was hauptsächlich bei sommerlichen, gering bewölkten Wetterlagen mit hohen Temperaturen, hoher Luftfeuchte und schwachem Wind der Fall ist – droht Überhitzung und die Thermoregulation muss verstärkt wirksam werden. Die Umgebung wird dann als belastend empfunden, man spricht von Wärmebelastung.
Windfeld	Als „Windfeld“ wird ein für einen bestimmten Zeitraum gültiger Datensatz im dreidimensionalen Rechengitter bezeichnet, der Informationen zu Windrichtung und Windgeschwindigkeiten enthält. Das Windfeld wird auch als „Strömungsfeld“ bezeichnet.
Wirkraum	Besiedelter Raum, in den die Kaltluft oder Frischluft eindringt. Er kann thermisch und/oder lufthygienisch belastet sein. Im Rahmen der landesweiten Klimaanalyse werden als Wirkräume die regionalplanerisch relevanten thermisch belasteten Siedlungsgebiete betrachtet.

8 Literatur

- 39. BImSchV:** Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065), die zuletzt durch Artikel 112 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.
- Basu, R.** (2009): High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environmental Health* 8 (1), 40 S.
- Baugesetzbuch** in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634), das zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 10. September 2021 (BGBl. I S. 4147) geändert worden ist.
- Birkmann, J., H. R. Böhm, F. Buchholz, D. Büscher, A. Daschkeit, S. Ebert, M. Fleischhauer, B. Frommer, S. Köhler, W. Kufeld, S. Lenz, G. Overbeck, J. Schanze, S. Schlipf, P. Sommerfeldt, M. Stock, M. Vollmer und O. Walkenhorst** (2013): Glossar Klimawandel und Raumentwicklung (2. üb. Fassung), - E-Paper der ARL Nr. 10. Hannover, 33 S.
- Bundesraumordnungsprogramm**, Bundestagsdrucksache 7/3584 vom 3.4.1975.
- Bundes-Immissionsschutzgesetz** in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 24. September 2021 (BGBl. I S. 4458) geändert worden ist
- Baumbach, G.** (1994): Luftreinhaltung Entstehung, Ausbreitung und Wirkung von Luftverunreinigungen -- Meßtechnik, Emissionsminderung und Vorschriften. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 484 S.
- Bendix, J.** (2004): Geländeklimatologie. Berlin; Stuttgart: Borntraeger. 282 S.
- Chen, D., M. Rojas, B.H. Samset, K. Cobb, A. Diongue Niang, P. Edwards, S. Emori, S.H. Faria, E. Hawkins, P. Hope, P. Huybrechts, M. Meinshausen, S.K. Mustafa, G.-K. Plattner und A.-M. Tréguier,** 2021: Framing, Context, and Methods Supplementary Material. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu und B. Zhou (Hrsg.)]. 15 S.
- Christidis, N., G. S. Jones und P.A. Stott** (2015): Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nature Climate Change* 5, S. 46–50.
- Daly, C., W. P. Gibson, G. H. Taylor, G. L. Johnson und P. Pasteris** (2002): A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate. *Climate Research* 22 (2), S. 99–113.
- Defant, F.** (1949): Zur Theorie der Hangwinde, nebst Bemerkungen zur Theorie der Berg- und Talwinde- Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie Serie A (1), S. 421–450.
- DWD** (2020a): Richtlinie: Automatische nebenamtliche Wetterstationen im DWD, Offenbach am Main. September 2020.
- DWD** (2020b): Wetterlexikon, https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html. Zuletzt aufgerufen 01/2022
- Fanger, P. O.** (1972). Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering. New York: McGraw-Hill. 244 S.
- Fisk, W. J.** (2000): Health and productivity gains from better indoor environments and their relationship with building energy efficiency. *Annual Review of Energy and the Environment* 25 (1), S. 537–566.
- Früh, B., P. Becker, T. Deutschländer, J.-D. Hessel, M. Kossmann, I. Mieskes, J. Namyslo, M. Roos, U. Sievers, T. Steigerwald, H. Turau und U. Wienert** (2011): Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. *The Journal of Applied Meteorology and Climatology* 50, S. 167–184.

- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie HLNUG** (2021): Umweltatlas Hessen (<http://atlas.umwelt.hessen.de/atlas/>). Zuletzt aufgerufen 01/2022
- Hessisches Landesplanungsgesetz** (HLPG) vom 12. Dezember 2012 (GVBl. I S. 590), das zuletzt durch Artikel 15 des Gesetzes vom 7. Mai 2020 (GVBl. S. 318) geändert worden ist.
- IPCC** (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IVU** (2017): Ausbreitungsberechnungen zur flächendeckenden Ermittlung der Luftqualität in Hessen als Grundlage der Luftreinhalteplanung. Für das Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz HMUKLV (Auftraggeber). 180 S.
- Hessisches Statistisches Landesamt** (2018): Die Bevölkerung der hessischen Gemeinden am 30. Juni 2017. https://statistik.hessen.de/sites/statistik.hessen.de/files/AI2_All_AIII_AV-17_1hj.pdf
- Höppe, P. R.** (1984): Die Energiebilanz des Menschen. Bd. 49. Wissenschaftliche Mitteilungen der Universität München. Ludwig-Maximilians Universität München. 216 S.
- Höppe, P. R.** (1993): Heat balance modelling. Cellular and Molecular Life Sciences 49 (9), S. 741–746.
- Höppe, P. R.** (1999): The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. International Journal of Biometeorology 43 (2), S. 71–75.
- Höppe, P. R.** und H. Mayer (1987): Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. Landschaft und Stadt 19 (1), S. 22–30.
- Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson und E. Guevara** (2008): Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT) (<http://srtm.csi.cgiar.org>).
- Koppe, C., G. Jendritzky und G. Pfaff** (2003): Die Auswirkungen der Hitzewelle 2003 auf die Gesundheit. Klimastatusbericht 2003, S. 152–162.
- Ketterer, C.** und A. Matzarakis (2014): Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany. Landscape and Urban Planning (122): S. 78–88.
- Landesentwicklungsplan Hessen** vom 13. Dezember 2000 (GVBl. I 2001 S. 2), der zuletzt durch die dritte Verordnung vom 10.09.2018 (GVBl. S. 398) geändert worden ist.
- Matzarakis, A.** und H. Mayer (1997): Heat stress in Greece. International Journal of Biometeorology 41 (1), S. 34–39.
- Matzarakis, A., L. Martinelli und C. Ketterer** (2016): Relevance of Thermal Indices for the Assessment of the Urban Heat Island. In F. Musco (Ed.), Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario. Cham: Springer International Publishing. S. 93–107.
- Mayer, H.** (1989): Workshop "Ideales Stadtklima" am 26. Oktober 1988 in München. DMG Mitteilungen 3: S. 52–54.
- Mayer, H.** und P. R. Höppe (1987): Thermal comfort of man in different urban environments. Theoretical and Applied Climatology 38 (1), S. 43–49.
- Mayer, H., W. Beckröge und A. Matzarakis** (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-Report 5/94. S. 265–267.
- Moss R., M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, L. Erda, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J. F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O'Neill, R. Pichs, K. Riahi, S. Rose, P. Runci, R. Stouffer, D. van Vuuren, J. Weyant, T. Wilbanks, J. P. van Ypersele und M. Zurek** (2008): Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. IPCC Expert Meeting Report on New Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change, Noordwijkerhout. 124 S.

- Murphy**, J.M., D.M.H. Sexton, D.N. Barnett, G.S. Jones, M.J. Webb, M. Collins und D.A. Stainforth (2004): Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature* 430, S. 768–772.
- Nastos**, P. T. und A. Matzarakis (2012): The effect of air temperature and human thermal indices on mortality in Athens, Greece. *Theoretical and Applied Climatology* 108 (3-4), S. 591–599.
- Noppel**, H. (2017): Modellbasierte Analyse des Stadtklimas als Grundlage für die Klimaanpassung am Beispiel von Wiesbaden und Mainz: Abschlussbericht zum Arbeitspaket 3 des Projekts KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz - Stadtklima in der kommunalen Praxis. 101 S.
- Oke**, T.R. (1973): City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7 (8), S. 769–779.
- Oke**, T.R. (1981): Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology* 1 (3), S. 237–254.
- Oke**, T.R. (1988): Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*. 11 (1–3): S. 103–113.
- Orlanski**, I. (1975): A rational subdivision of scales for atmospheric processes. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 56, S. 527–530.
- Parry**, M. L., O. F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden und C.E. Hanson (eds.) (2007): Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 976 S.
- Raumordnungsgesetz** vom 22. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2986), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 3. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2694) geändert worden ist.
- Richter**, B., K. Grunewald und G. Meinel (2016): Analyse von Wegedistanzen in Städten zur Verifizierung des Ökosystemleistungsindikators „Erreichbarkeit städtischer Grünflächen“ AGIT – *Journal für Angewandte Geoinformatik*, 2-2016, S. 472–48.
- Richtlinie 2008/50/EG** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa, OJ L 152, 11.6.2008, S. 1–44.
- REKLIBO** (2009): Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben: Wissenschaftlicher Abschlussbericht Band 3. <https://www.rvbo.de/Projekte/Regionale-Klimaanalyse>. Zuletzt aufgerufen 01/2022.
- Robine**, J.-M., S.L.K. Cheung, S. Le Roy, H. Van Oyen, C. Griffiths, J.-P. Michel und F.R. Herrmann (2008): Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies* 331 (2), S. 171–178.
- Schär**, C. et al. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427, S. 332–336.
- Schumacher**, U., I. Lehmann und M. Behnisch (2016): Modellansatz zur geotopographischen Analyse von Wohngebieten und urbaner grüner Infrastruktur. AGIT – *Journal für Angewandte Geoinformatik*, 2-2016, 540-545
- Turner II**, B. L., R. E. Kasperson, P. A. Matsoon, J. J. McCarthy, R. W. Corell, L. Christensen, N. Eckley, J. X. Kasperson, A. Luers, M. L. Martello, C. Polsky, A. Pulsipher und A. Schiller (2003): A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science. - *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100 (14), S. 8074–8079.
- van Vuuren**, D.P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G.C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S.J. Smith und S.K. Rose (2011): The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 5 (109), S. 1573–1480.
- VDI 3785 Blatt 1**: Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima. 2008.
- VDI 3787 Blatt 1**: Umweltmeteorologie - Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. 2015.

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

VDI 3787 Blatt 5: Umweltmeteorologie - Lokale Kaltluft. 2003.

VDI 3787 Blatt 10: Umweltmeteorologie - Human-biometeorologische Anforderungen im Bereich Erholung, Prävention, Heilung und Rehabilitation. 2010.

Wang, Y., L.R. Leung, J.L. McGregor, D.-K. Lee, W.-C. Wang, Y. Ding und F. Kimura (2004): Regional Climate Modeling: Progress, Challenges, and Prospects. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 82 (6), S. 1599–1628.

Zander, K. K. W.J.W. Botzen, E. Oppermann, T. Kjellstrom und S.T. Garnett (2015): Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia *Nature Climate Change* 5, S. 647–651.

Zebisch, M., T. Grothmann, D. Schröter, C. Hasse, U. Fritsch und W. Cramer (2005): Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. In: *Climate Change 08 (05)*. Umweltbundesamt (Hrsg.). 203 S.

Anhang 1: Messdaten

Tabelle A1- 1: Stationen des Deutschen Wetterdienstes in Hessen

Bezeichnung	ID	von	bis	Höhe [m]	geogr. Breite	geogr. Länge
Alsfeld	90	19880219	20160312	305	50.756	9.258
Arolsen-Neu Berich	193	19790901	19871231	232	51.385	9.082
Arolsen-Volkhardinghausen	197	19900801	20160312	365	51.322	9.056
Beerfelden	330	19770301	20080531	450	49.562	8.967
Eschwege	1297	19801201	19850731	170	51.183	10.064
Frankfurt (07W)	1415	19760601	19881231	100	50.033	8.533
Frankfurt (18W)	1416	19840401	19871231	97	50.017	8.533
Frankfurt/Main	1420	19670101	20160312	100	50.026	8.521
Frankfurt (Henninger Turm)	1422	19730801	19890430	114	50.097	8.694
Frankfurt/Main (Terminal)	1423	19720501	19871231	111	50.050	8.589
Frankfurt/Main (Feldbergstr.)	1425	19510501	19621231	109	50.121	8.660
Fritzlar-Kasseler Warte	1505	19750101	20071031	222	51.133	9.283
Fulda	1526	19770301	19930731	255	50.534	9.675
Geisenheim	1580	19510101	20160312	110	49.986	7.955
Gießen/Wettenberg	1639	19390101	20160312	203	50.602	8.644
Hersfeld, Bad	2171	19760401	20160312	272	50.852	9.738
Kassel	2532	19540101	20131101	231	51.296	9.442
Kleiner Feldberg/Taunus	2601	19660101	20160312	826	50.222	8.447
Langen (BTZ)	2843	19900719	20160302	125	50.008	8.655
Lautertal-Hörgenau	2897	19900830	20160312	522	50.581	9.286
Michelstadt-Vielbrunn	3287	19871001	20160312	453	49.718	9.100
Mittel-Gründau	3300	19781201	19930531	155	50.229	9.106
Nauheim, Bad	3442	19730101	19770531	149	50.357	8.751
Offenbach/Main (Zentrallabor)	3775	19780101	19981231	100	50.103	8.747
Wasserkuppe	5371	19590101	20160312	921	50.497	9.943
Willingen/Upland	5582	19841101	20051231	580	51.294	8.603
Frankenberg-Geismar	5851	19970312	20160312	392	51.081	8.877
Dillenburg-Niederscheld (KA)	6136	19820801	19950430	220	50.698	8.330
Runkel-Ennerich	6344	20101001	20160312	168	50.394	8.142
Offenbach-Wetterpark	7341	20050801	20160312	119	50.090	8.786
Beerfelden-Vogelherd	7391	20120201	20160312	443	49.556	8.967
Hoherodskopf/Vogelsberg	7396	20080501	20160312	743	50.508	9.225
Neu-Ulrichstein	7410	20110201	20160312	350	50.752	9.023
Eschwege-Eltmannshausen	13701	20080901	20160312	250	51.195	9.989
Soden, Bad-Salmünster (Kläranl.)	13900	19950101	20160312	145	50.269	9.358
Schauenburg-Elgershausen	15207	20131101	20160312	317	51.284	9.359

Tabelle A-2: Stationen der HLNUG.

Bezeichnung	ID	von	bis	Höhe [m]	geogr. Breite	geogr. Länge
Bad Arolsen		20050101	20151231	360	51.432	8.928
Bebra		20050101	20151231	204	50.974	9.797
Burg Herzberg		20100907	20151231	491	50.772	9.461
Darmstadt		20050101	20151231	157	49.873	8.665
Frankfurt-Höchst		20050101	20151231	101	50.103	8.542
Frankfurt-Ost		20050101	20151231	102	50.127	8.749
Frankfurt-Sindlingen		20080605	20141231	99	50.081	8.516
Fulda-Mitte		20050922	20151231	285	50.550	9.684
Fürth/Odenwald		20050101	20151231	475	49.653	8.816
Grebenau		20050101	20151231	373	50.761	9.466
Hanau		20050101	20130413	103	50.136	8.919
Kassel-Mitte		20071213	20071213	181	51.314	9.483
Kellerwald		20051009	20151231	460	51.155	9.032
Kleiner Feldberg'		20050106	20151231	810	50.225	8.441
Linden		20050101	20151231	173	50.534	8.687
Limburg		20050101	20151231	128	50.383	8.061
Marburg		20050101	20151231	202	50.805	8.772
Michelstadt		20050101	20151231	205	49.674	9.003
Raunheim		20050101	20151231	90	50.011	8.453
Riedstadt		20050101	20151231	89	49.826	8.517
Spessart		20050105	20151231	490	50.164	9.403
Wasserkuppe		20050101	20151231	938	50.499	9.937
Wetzlar		20050101	20151231	150	50.552	8.502
Wiesbaden-Süd		20050101	20151231	130	50.052	8.246
Witzenhausen/Wald		20050101	20151231	600	51.294	9.776
Zierenberg		20130507	20151231	489	51.361	9.271
Flörsheim		20130627	20140731	93	50.019	8.429
Frankfurt-Lerchesberg		20050101	20130625	143	50.081	8.683
Mörfelden		20140826	20150901	99	49.965	8.566

Anhang 2: Bestandsaufnahme

A2.1 Beschreibung der klimatischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet

Deutschland gehört zur gemäßigten Klimazone Mitteleuropas, die zwischen dem maritimen Klima in Westeuropa und dem kontinentalen Klima in Osteuropa liegt. Der maritime Einfluss, der von Nordwest nach Südost abnimmt, sorgt für milde Winter und nicht zu heiße Sommer. Die überwiegend westlichen Winde sorgen dafür, dass das ganze Jahr über feuchte Luft vom Atlantik herangeführt wird, was häufig zu Niederschlägen führt.

Die topographische Struktur Hessens führt zur Ausbildung zahlreicher, sich unterscheidender Klimate. Dominierend ist die Abhängigkeit von der Geländehöhe, insbesondere für die Temperatur³⁴. Da die Witterung von Jahr zu Jahr variiert, ist zur Bestimmung klimatologisch aussagekräftiger Werte eine Mittelbildung über einen längeren Zeitraum notwendig. International hat man sich auf 30-jährige Perioden geeinigt. Dieser Zeitraum ist lange genug, um stabile Mittelwerte zu erhalten.

Das Klima ist eine statistische Beschreibung des mittleren Zustandes und seiner Schwankungen an einem Ort. Es beinhaltet also neben den Mittelwerten über einen langen Zeitraum auch die mittlere Variabilität und die Extreme. Um zu bestimmen, ob sich das Klima ändert, werden daher die Mittelwerte, die Variabilität und die Häufigkeiten von Temperatur, Niederschlag, Wind usw. von 30-jährigen Zeiträumen miteinander verglichen.

Im Folgenden wird mit Blick auf die Zielsetzung der landesweiten Klimaanalyse Hessen hauptsächlich auf die thermische Situation in Hessen eingegangen. Die Lufttemperaturmessstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sind in Abbildung A2-1 aufgelistet und nach Höhenlage sortiert.

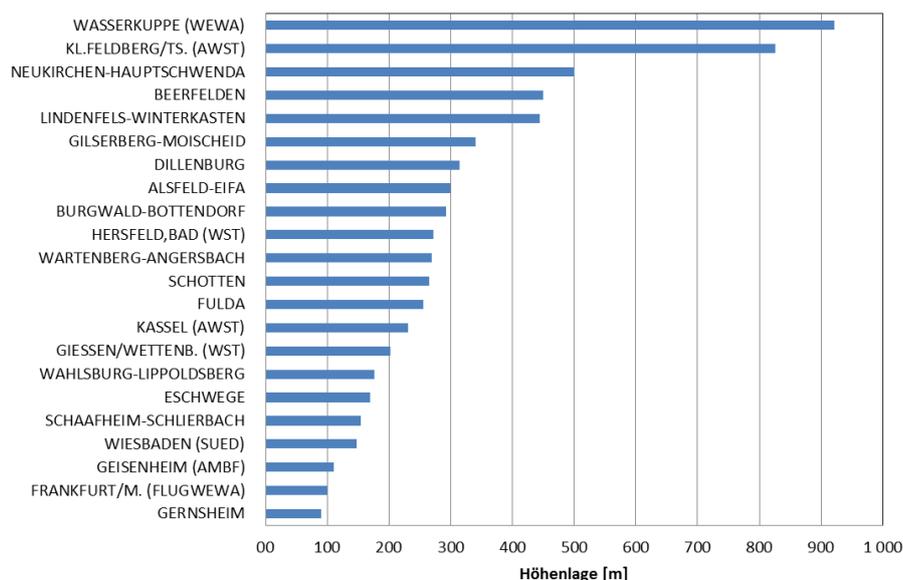


Abbildung A2-1: Höhenlage der DWD-Stationen in Hessen.

³⁴ http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/klima/einleitung_txt.htm

A2.2 Lufttemperatur

Vom Deutschen Wetterdienst sind u.a. die Lufttemperatur-Werte für den Bezugszeitraum 1981 – 2010 veröffentlicht³⁵. In Abbildung A2-3 ist die Lufttemperaturverteilung über das ganze Jahr gemittelt für den Zeitraum 1981 – 2010 in Hessen dargestellt. Die höchsten Temperaturen treten in den Niederungen, speziell am Rhein, und die niedrigsten Temperaturen in den Höhenlagen, insbesondere im Vogelsberg, in der Rhön, auf dem Hohen Meißner und im Rothaargebirge auf.

Für diesen Bezugszeitraum (1981 – 2010) sind die Daten darüber hinaus in Form von Balkendiagrammen dargestellt (u.a. Abbildung A2-2).

Abbildung A2-2 zeigt die langjährig gemittelten Lufttemperaturen für die nach der Höhenlage sortierten DWD-Stationen (gleiche Reihenfolge wie in Abbildung A2-1). Die am tiefsten gelegene Station Gernsheim weist mit 10,6 °C die höchste mittlere Lufttemperatur auf, die Station Wasserkuppe zeigt im 30-jährigen Mittel dagegen nur 5,5 °C.

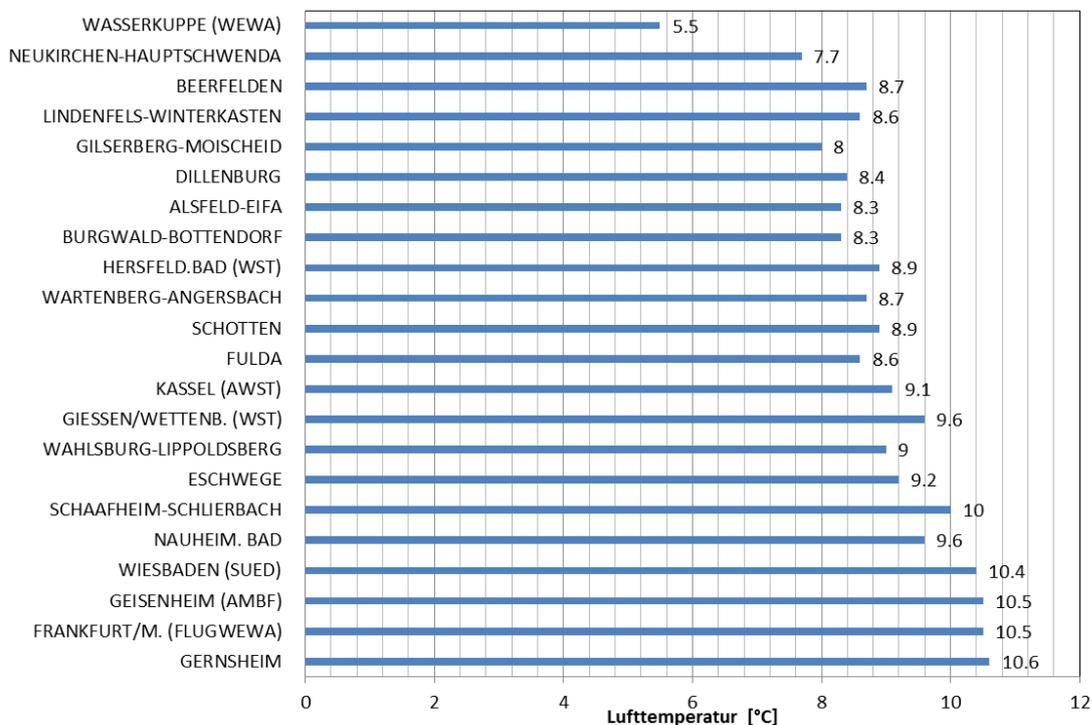


Abbildung A2-2: Lufttemperaturen der DWD-Stationen in Hessen. Bezugszeitraum 1981 – 2010.

³⁵ ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/grids_germany/multi_annual/

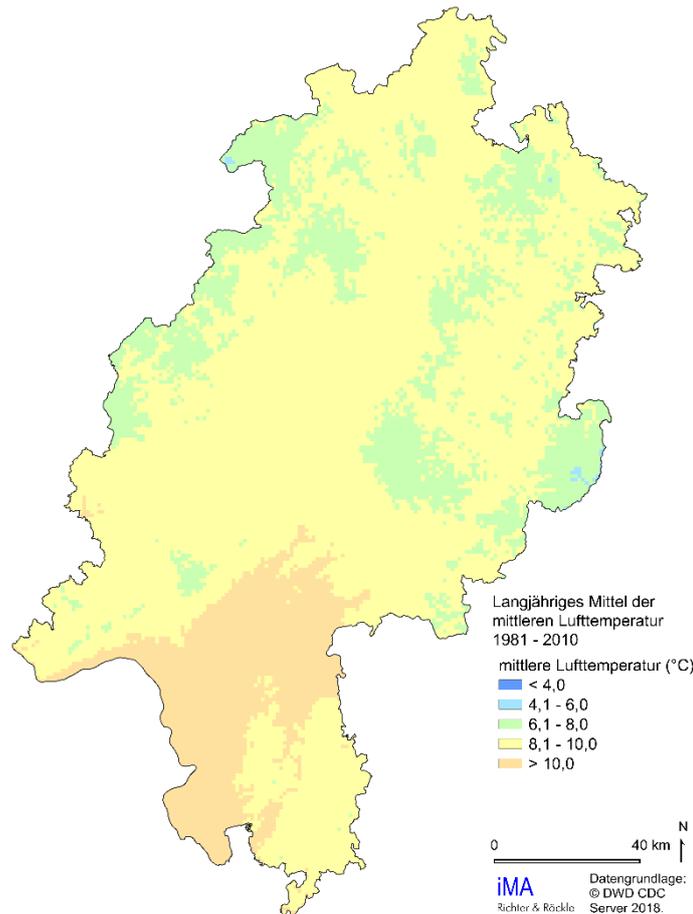


Abbildung A2-3: Langjährige Durchschnittswerte Lufttemperatur in Hessen. Bezugszeitraum 1981 – 2010 (Quelle: ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/grids_germany/multi_annual/).

A2.3 Klimatologische Kenntage

Um thermische Belastungen einzuschätzen, sind Überschreitungshäufigkeiten von Temperaturschwellen, sogenannte klimatologische Kenntage, besonders gut geeignet.

Die Definition der klimatologischen Kenntage ist in Kapitel 3.2.3 aufgeführt. Zur Charakterisierung der Kältebelastung sind die Eis- und Frosttage geeignet. Für die Wärmebelastungen sind Sommertage und Heiße Tage maßgebend.

In Abbildung A2-4 ist zu erkennen, dass die Anzahl von Tagen mit niedrigeren Temperaturen (Unterschreitung des Temperaturschwellwertes 0° C) mit zunehmender Höhenlage zunimmt.

Exemplarisch sind für den Bezugszeitraum 1981 – 2010 die Eistage der DWD-Stationen in Hessen aufgeführt (Höchsttemperatur < 0°C, Abbildung A2-5). Die Spannweite erstreckt sich von 11 Tagen in den Niederungen bis zu 60 Tagen in den höchsten Lagen.

Bei Klimaanalysen steht häufig die Wärmebelastung im Fokus, weil die Anpassung an die Kältebelastung dem Menschen leichter fällt (z.B. durch das Tragen entsprechender Kleidung), und weil die Tage mit Kältebelastung in Deutschland zukünftig voraussichtlich zurückgehen werden. In Abbildung A2-6 und Abbildung A2-7 sind die räumlichen Verteilungen der Sommertage (Höchstwerte $\geq 25^{\circ}\text{C}$) und der Heißen Tage (Höchstwerte $\geq 30^{\circ}\text{C}$) für den Bezugszeitraum 1981 – 2010 dargestellt.

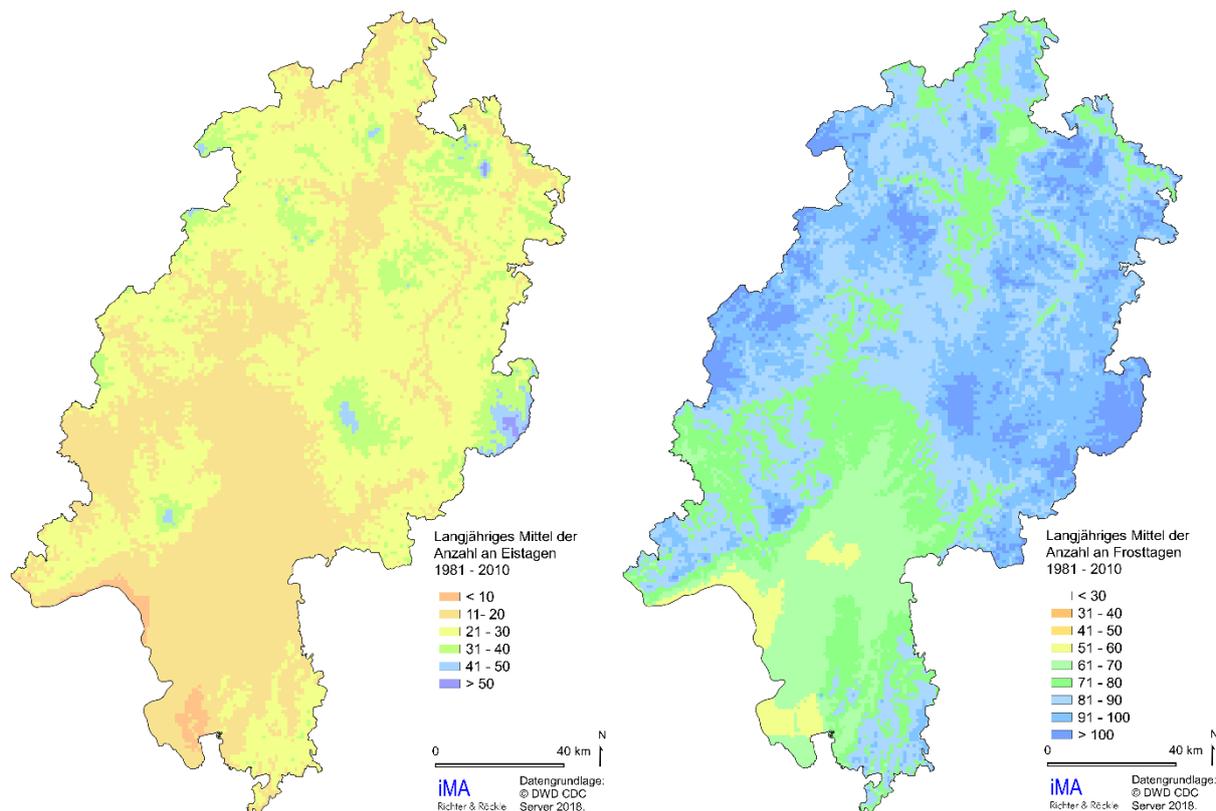


Abbildung A2-4: Eistage (links) und Frosttage (rechts) in Hessen. Bezugszeitraum 1981 – 2010. (Quelle: ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/grids_germany/multi_annual/).

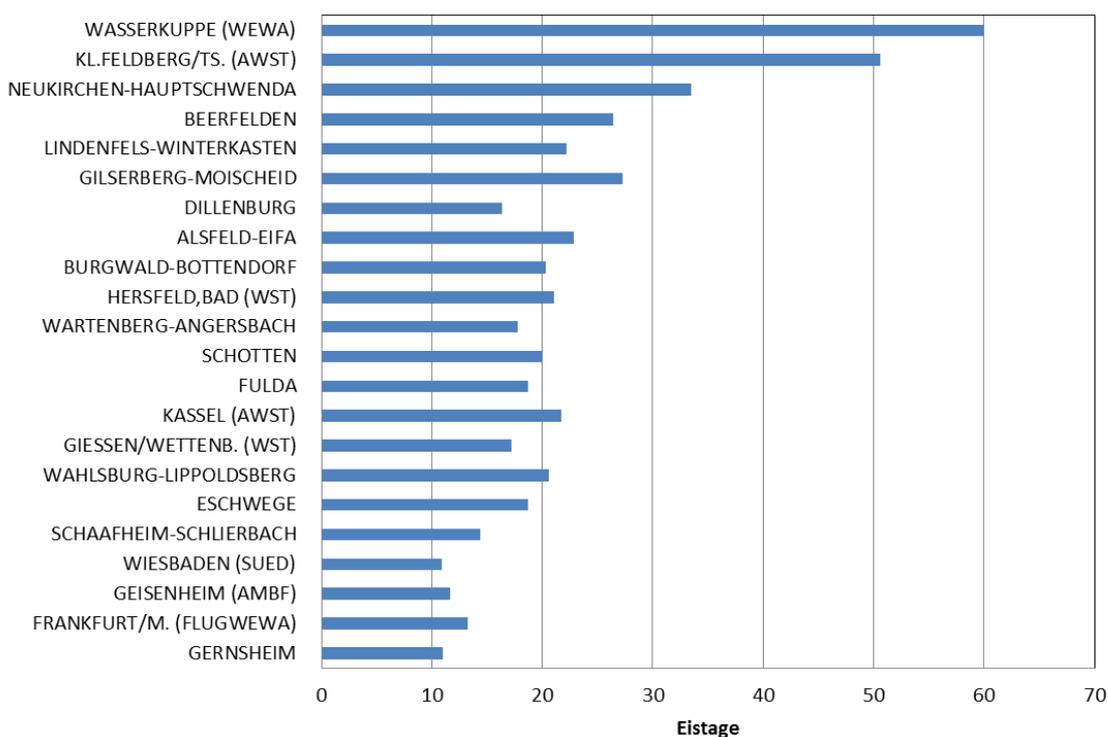


Abbildung A2-5: Eistage in Hessen. Bezugszeitraum 1981 – 2010.

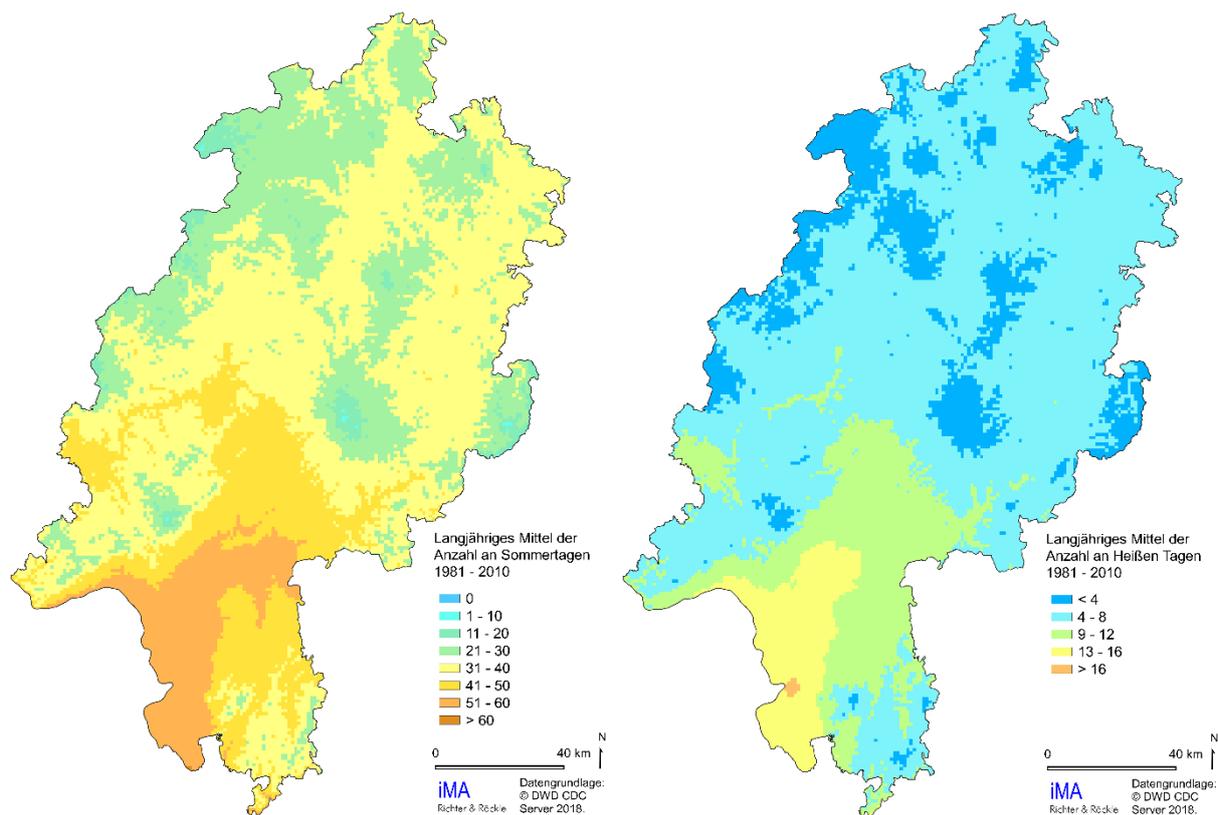


Abbildung A2-6: Sommertage (links) und Heiße Tage (rechts) in Hessen. Bezugszeitraum 1981 – 2010 (Quelle: ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/grids_germany/multi_annual/).

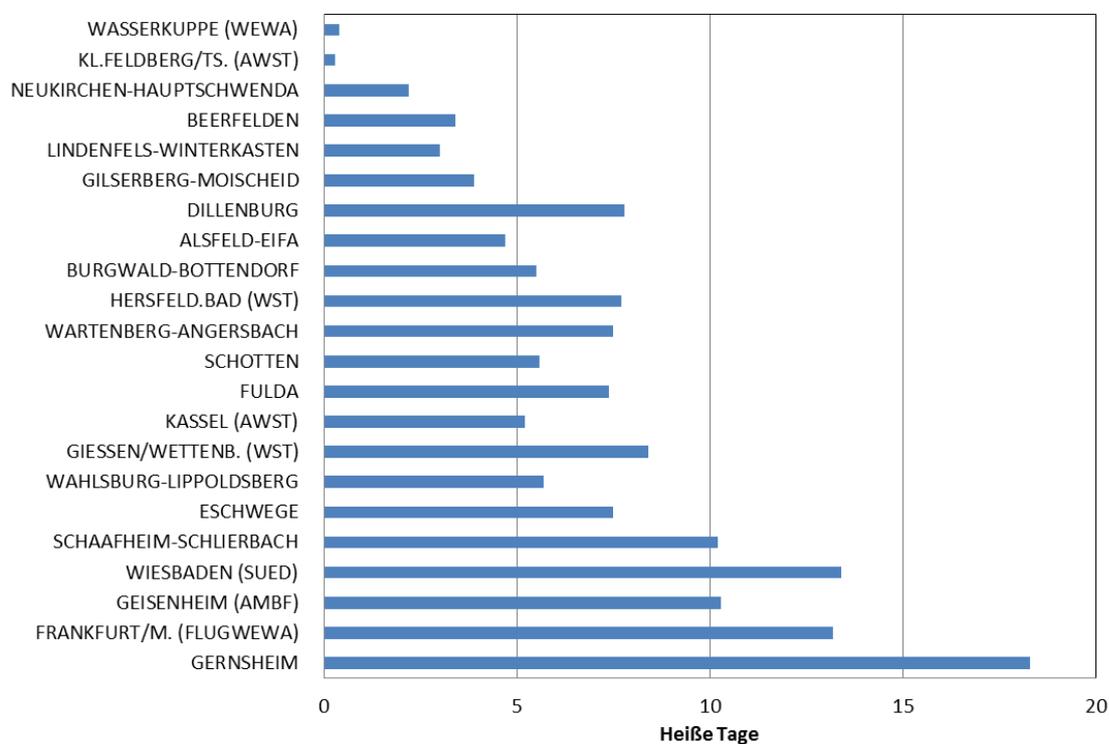


Abbildung A2-7: Heiße Tage in Hessen. Bezugszeitraum 1981 – 2010.

In Abbildung A2-6 ist die Zahl der Heißen Tage in Hessen für den Bezugszeitraum 1981 – 2010 dargestellt. Auch hier zeigt sich eine deutliche Höhenabhängigkeit. Einfluss auf die Messergebnisse hat auch die Lage der Messstation. So weist Wiesbaden-Süd in städtischer Umgebung z.B. 3 Heiße Tage mehr auf als die in vergleichbarer Höhenlage liegenden Stationen Geisenheim und Schaafheim, die in wenig bebautem Umfeld liegen.

A2.4 Tage mit Wärmebelastung

Zur Erfassung der wärmebelasteten Bereiche wurde vom Deutschen Wetterdienst die Häufigkeit des Auftretens von Wärmebelastung tagsüber (Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang) unter Berücksichtigung jeweils angepasster Bekleidung verwendet (siehe Abbildung A2-8). Unter einem „Tag mit Wärmebelastung“ versteht man einen Tag, an dem tagsüber ein „fester Wert der gefühlten Temperatur³⁶ überschritten wird“. Wärmebelastung tritt hauptsächlich bei sommerlichen, wolkenarmen Hochdruckwetterlagen mit geringer Luftbewegung auf.

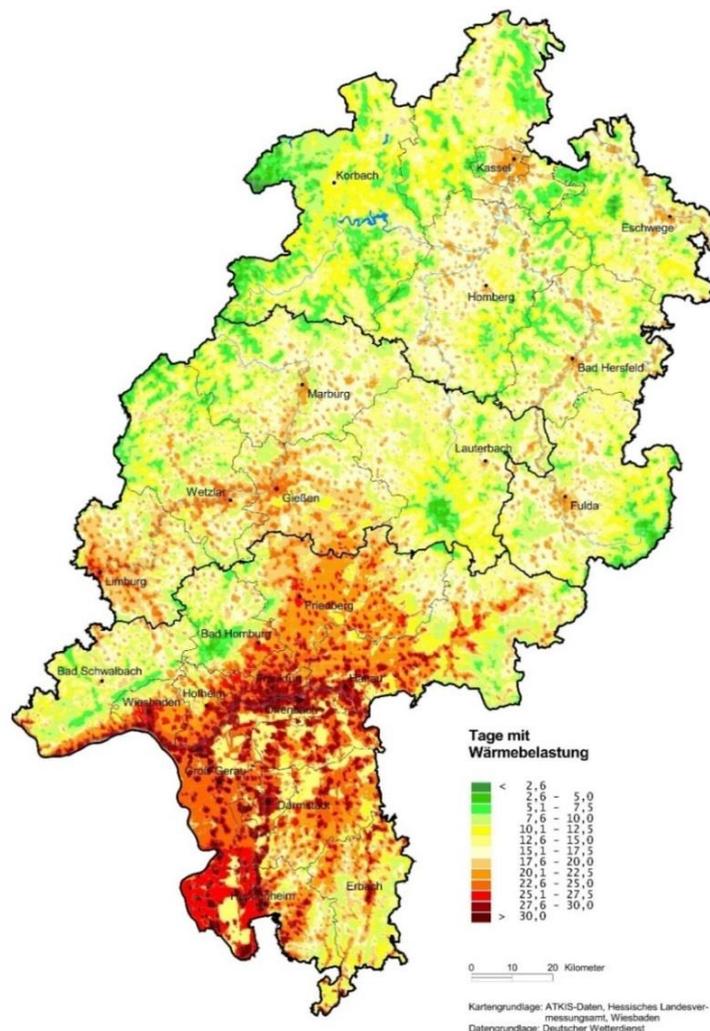


Abbildung A2-8: Tage mit Wärmebelastung. Bezugszeitraum 1971 – 2000.³⁷

³⁶ Die gefühlte Temperatur ist, wie PET, eine Äquivalenttemperatur und wird aus denselben Eingangsdaten, allerdings mit einer anderen Prozedur berechnet.

³⁷ Die Zeiträume variieren aufgrund unterschiedlicher Datenverfügbarkeit und Publikationen.

Am häufigsten ist in Hessen mit mehr als 30 Tagen das Rhein-Main-Gebiet wärmebelastet. Die mittleren Höhenlagen sind mit 12 bis 20 Tagen schon deutlich weniger und die Hochlagen der Mittelgebirge (z.B. Taunus, Rhön, Westerwald, Rothaargebirge) sind kaum belastet. Damit liegen in Hessen die bevölkerungsreichsten Gebiete in Zonen mit hoher Wärmebelastung. Auch hier spiegelt sich die Höhenabhängigkeit der Wärmebelastung deutlich wieder. Gut zu erkennen ist der Einfluss des Klimafaktors "geographische Lage", der sich in einem Süd-Nord-Gefälle zeigt: Bei gleicher Höhenlage und Nutzung ist im Süden häufiger mit Wärmebelastung zu rechnen als im Norden (HLNUG, 2013: Klimaatlas Hessen³⁸).

A2.5 Human-biometeorologische Bedingungen

Exemplarisch wurden für die Stationen Frankfurt/Main, Kleiner Feldberg und Kassel aus Messdaten des Deutschen Wetterdienstes und des Hessisches Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie über einen Zeitraum zwischen 2003 und 2015³⁹ die thermischen Belastungsklassen von PET in stündlicher Auflösung (Tabelle 4-8) ermittelt.

In Abbildung A2-9 sind die Häufigkeitsverteilungen der thermischen Belastungsklassen für jeden Monat dargestellt. Kältestress (Definition siehe Kapitel 3.2.2, insb. Tabelle 3-1) stellt im Winterhalbjahr für alle Stationen die häufigste Klasse dar. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass Tag- und Nachtstunden in die Berechnungen miteinfließen. Der thermische Komfortbereich des Menschen kann durch den Bekleidungsfaktor ausgedehnt werden, sodass die Klassen leicht kühl bis leicht warm dem Komfortbereich (siehe Tabelle 3-1) zugeordnet werden können.

Stunden mit starkem oder extremen Hitzestress (heiß und sehr heiß) treten in Südhessen häufiger auf als in Nordhessen. Beispielsweise kommt starker Hitzestress in Frankfurt am Main in den Sommermonaten Juni, Juli und August fast doppelt so oft vor als in Kassel. Im Juli sind das in Frankfurt am Main etwa 5,5 % der monatlichen Stunden, in Kassel nur ca. 3 %. Bei beiden Stationen ist in diesem Sommerzeitraum der Komfortbereich mit etwa 50 % in Frankfurt/Main und 44 % in Kassel sehr ausgeprägt. Die Abbildung A2-9 zeigt außerdem, dass in Frankfurt starker bzw. extremer Hitzestress (heiß und sehr heiß) an ca. 0,7 % der Stunden bereits im Mai auftritt, in Kassel sind es erst im Juni 1 % der Stunden.

Der Vergleich der Stationen Frankfurt/Main und Kleiner Feldberg illustriert darüber hinaus die Bedeutung der Geländehöhe. Während in Frankfurt/Main starker bzw. extremer Hitzestress an 1 % der Stunden im Jahr auftreten, sind es am Kleinen Feldberg statistisch gesehen im Mittel gerade noch 0,1 % der Stunden im Jahr. Hier dominieren selbst im Juli noch die kälteren Verhältnisse mit fast 60 %. Lediglich sieben Stunden weisen im Juli Temperaturen auf, die als starker Hitzestress gewertet werden.

³⁸ http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/tlas/klima/bio/bioklima_txt.html

³⁹ Dieser Zeitraum wurde aufgrund der Datenverfügbarkeit gewählt.

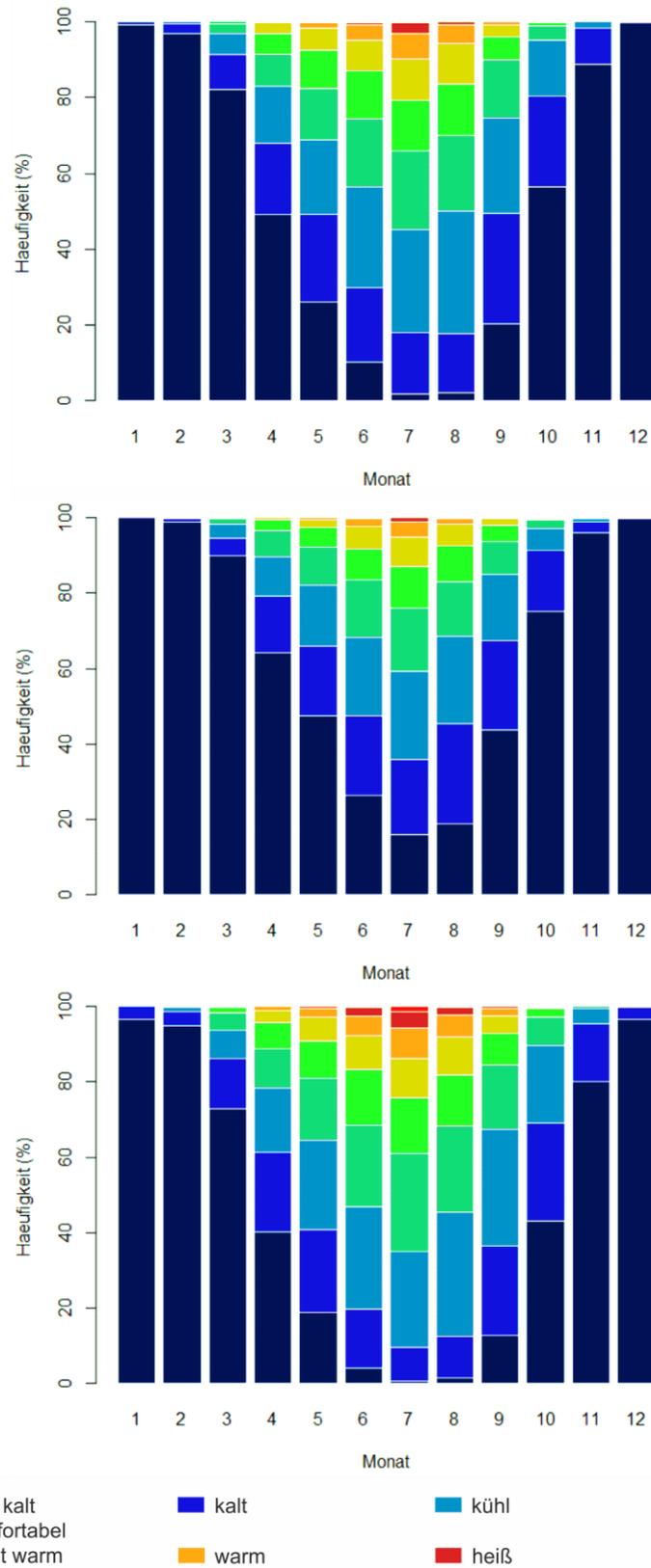


Abbildung A2-9: Häufigkeitsverteilung der thermischen Belastungsklassen für die Stationen Kassel (oben), Kleiner Feldberg (Mitte) und Frankfurt/ Main (unten) für den Zeitraum 2003-2015. Die Legende richtet sich nach Tabelle 3-1 (mittlere Spalte).

A2.6 Wind

Die Abbildung A2-10 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen an ausgewählten Stationen in Hessen. Die übergeordnete Verteilung der Windrichtungen, die eher von der Großwetterlage abhängt und weniger durch das Gelände beeinflusst wird, kann den hoch gelegenen Messorten „Kleiner Feldberg“ (Taunus), „Hoherodskopf“ am Vogelsberg und „Kahler Asten“, nahe der Nordwestgrenze von Hessen im Sauerland/NRW gelegen, entnommen werden (siehe Abbildung A2-10). Bei den anderen Messstationen ist die Windrichtung bodennah häufig durch Geländeeinflüsse, z.B. durch die Leitwirkung von Höhenrücken oder die Kanalisierung in Tälern, modifiziert.

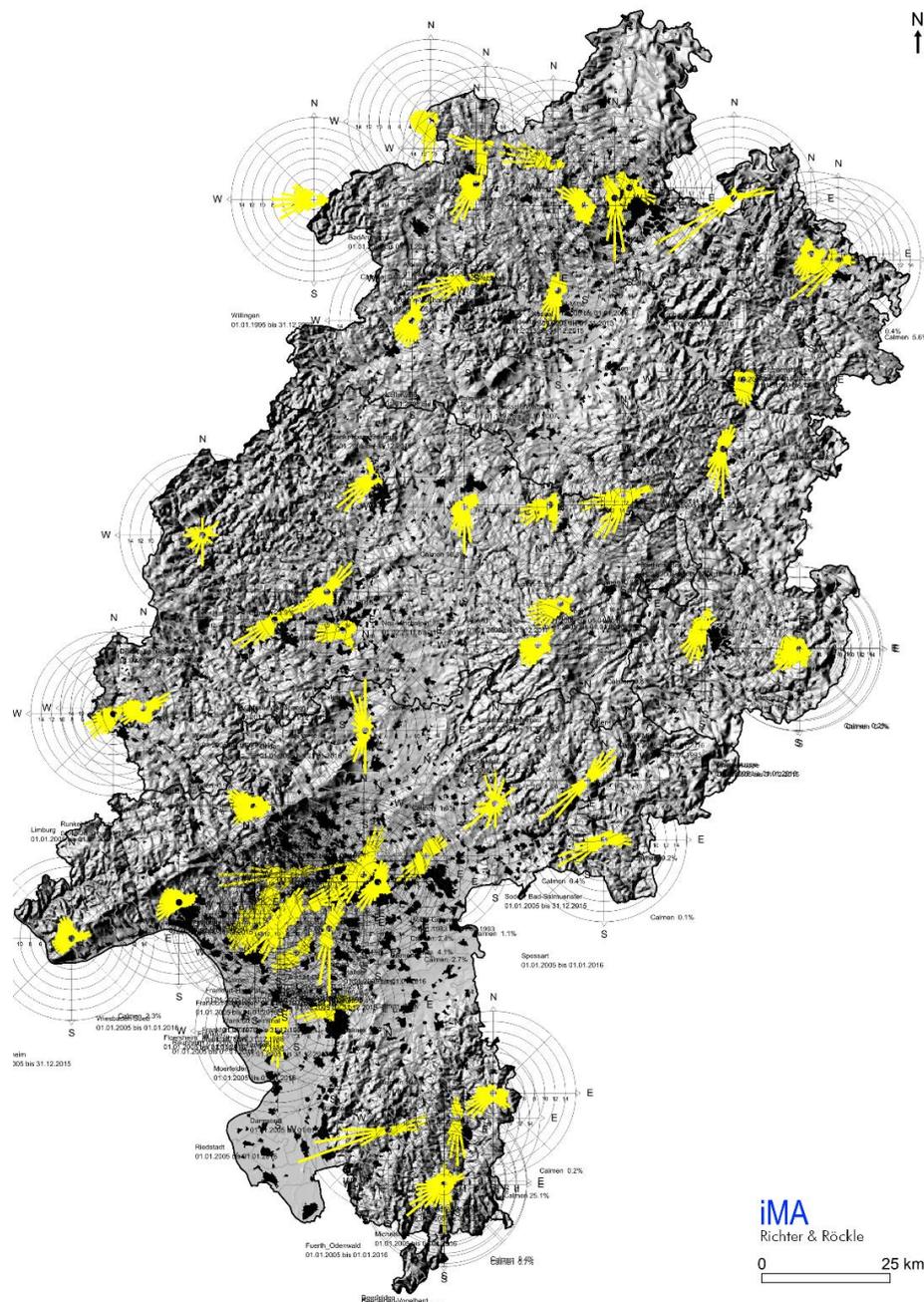


Abbildung A2-10: Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen an den verschiedenen Stationen des DWD und des HLNUG. Je länger ein Balken, desto öfter kommt der Wind aus dieser Richtung.

Die Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen in den Nachtstunden bei autochthonen Wetterlagen, bei denen sich Kaltluftströmungen ausbilden können, sind in Abbildung A2-11 dargestellt. Je nach örtlicher Geländesituation findet man in diesen Verteilungen Strömungen nur noch aus einem begrenzten Richtungs-Sektor, aus welchem die Kaltluft kommt. In höher gelegenen Stationen dominiert während autochthonen Wetterlagen ein leichter übergeordneter Ostwind.

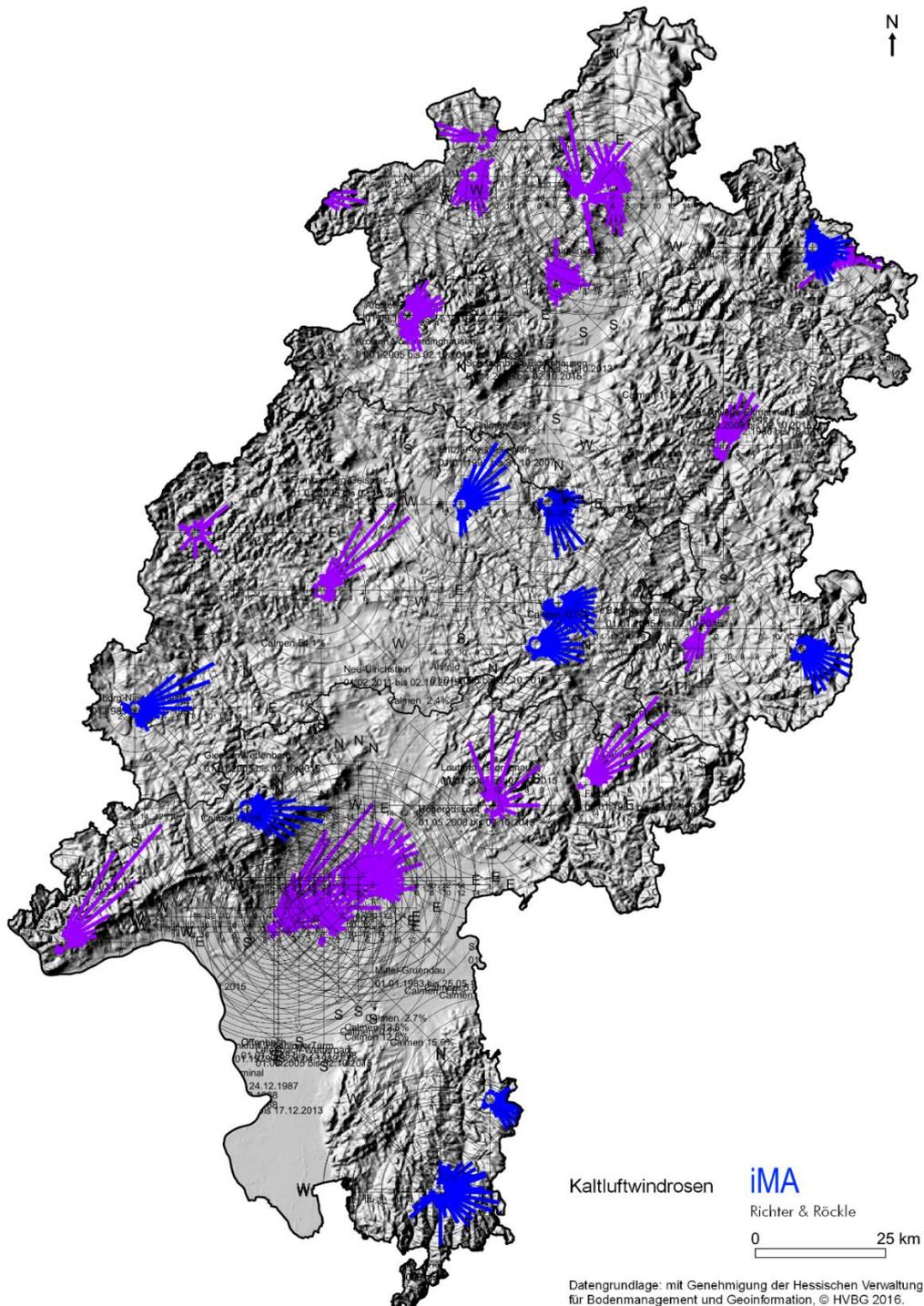


Abbildung A2-11: Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen (Kaltluftwindrosen) an den verschiedenen Stationen des DWD in den Nachtstunden mit Bewölkung von weniger als 2/8. Blau eingefärbt sind die relativ zum umgebenden Gelände höher gelegenen Messstationen, lila die tiefer gelegenen Messstationen.