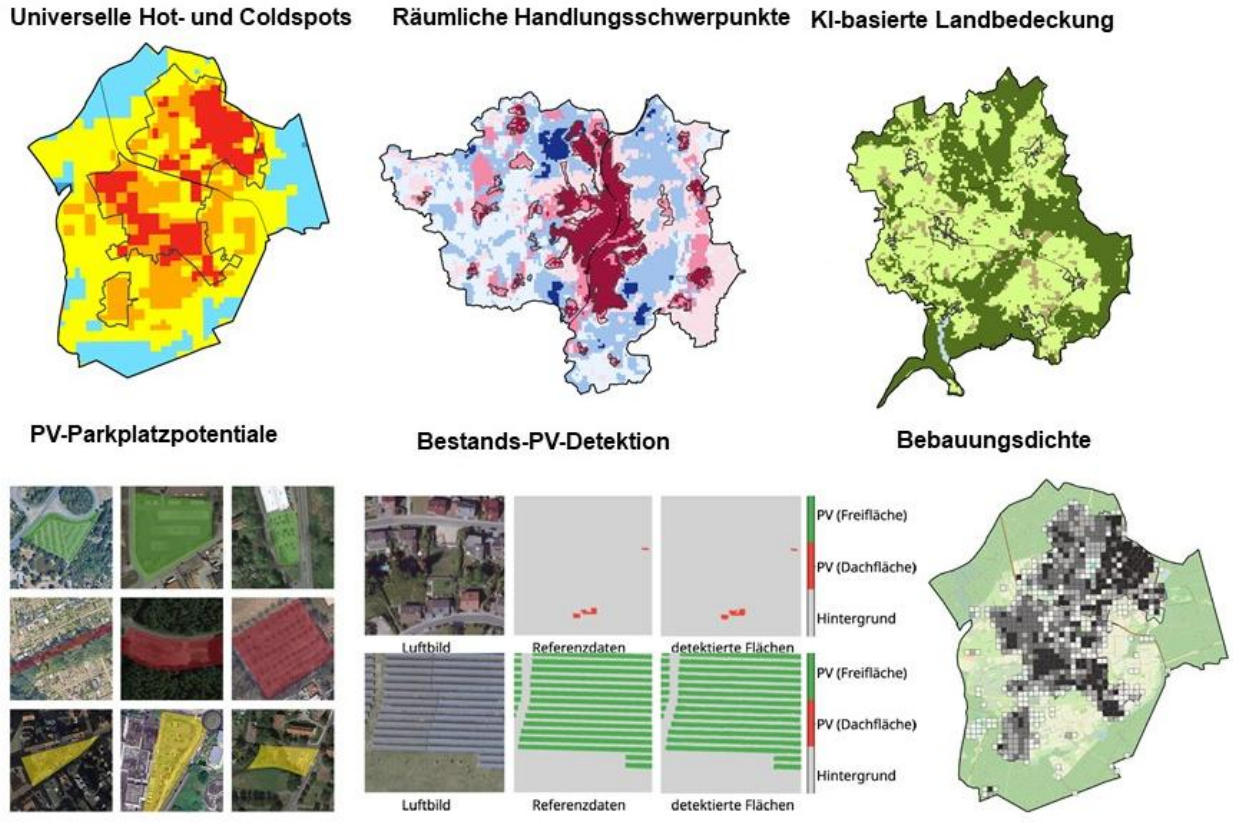
**Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr,
Wohnen und ländlichen Raum (HMWVW)**

HESSEN

Leitfaden

zum Forschungs-Projekt

“Entwicklung von Planungshilfen für Klimaschutz und Klimaanpassung in der räumlichen Gesamtplanung mittels Fernerkundung“



Juni 2025

Leitfaden zum Forschungs-Projekt

Entwicklung von
Planungshilfen für Klimaschutz und Klimaanpassung
in der räumlichen Gesamtplanung
mittels Fernerkundung

Projektbearbeitung und Gestaltung:

KIT Transfer GmbH (KCT)

Projektleitung:	Prof. Dr.-Ing. Stefan Hinz
Projektteam:	PD Dr. Sina Keller, Dr. Susanne Benz, Dr. Sven Wursthorn, Dr. Mathias Jehling, Dr. Denise Böhnke, Dr. Andreas Schenk, Svea Krikau, Claire Gallacher, Madita Walter, Prof. Gerd Hager
Revision:	Auftraggeber HMWVW
Satz & Layout:	Dr. Denise Böhnke

Beratend mitwirkender Projektbeirat aus:

Hessische Landesverwaltung:	HMWVW, HMLU, HLNUG, Landesbetrieb HessenForst sowie die Regierungspräsidien Kassel, Gießen und Darmstadt
Städte/Gemeinde:	u. a. Wiesbaden, Frankfurt am Main, Marburg, Waldeck, Witzenhausen, Darmstadt, Friedberg, Dietzenbach, Mühltal
Weitere:	Vertreter*innen des Hessischen Städte- und Landkreistages, des Hessischen Städte- und Gemeindebundes, des Regionalverbands FrankfurtRheinMain, des Hessischen Landkreistages, der Architekten- und Stadtplanerkammer Hessen
Experten:	Guido Halbig (DWD), Peter Reinartz (DLR), Stefan Emeis (KIT, emeritiert), Hansjörg Kutterer (KIT), Stefan Norra (Uni Potsdam), Holger Westermann (Menschenswetter)

Moderation der Beiratssitzungen:

Dr. Gisela Wachinger (Pro re)

Auftraggeber

Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum (HMWVW)
Referat I 1 „Integrierte Umweltplanung“

Projektleitung

HMWVW, Referat 1 „Integrierte Umweltplanung“
Iris Otto, Lisa Dietrich

Zitierhinweis:

Böhnke, Denise; Hager, Gerd; Jehling, Mathias; Hinz, Stefan (2025): Leitfaden zum Forschungs-Projekt “Entwicklung von Planungshilfen für Klimaschutz und Klimaanpassung in der räumlichen Gesamtplanung mittels Fernerkundung“. Hrsg.: Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum (HMWVW).

Abbildungen entnommen aus:

Keller, Sina; Benz, Susanne; Jehling, Mathias; Böhnke, Denise; Hager, Gerd; Wursthorn, Sven; Gallacher, Claire; Reiter, Denis; Hänchen, Linda; Kistner, Frederick; Krikau, Svea; Schenk, Andres; Hinz, Stefan (2025): Entwicklung von Planungshilfen für Klimaschutz und Klimaanpassung in der räumlichen Gesamtplanung mittels Fernerkundung – Leitfaden. Hrsg.: Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum (HMWVW).

Wiesbaden, Juni 2025

Bildnachweis Titelblatt: © HMWVW

Inhaltsverzeichnis

1 EINFÜHRUNG 7

2 ANWENDUNGSBEREICH DER FORSCHUNGSPROJEKT-ERGEBNISSE 8

3 GRUNDLAGEN DER FERNERKUNDUNG AUF DEN GEBIETEN KLIMAANPASSUNG UND KLIMASCHUTZ 10

3.1 BEITRAG DER FERNERKUNDUNG BEI DER KLIMAANPASSUNG 10
3.2 BEITRAG DER FERNERKUNDUNG BEIM KLIMASCHUTZ 12
3.3 WIRTSCHAFTLICHKEIT DER BEREITGESTELLTEN METHODEN UND DATEN 13

4 BESCHREIBUNG DER THEMENKARTEN AUF DEM GEBIET DER KLIMAANPASSUNG UND DES KLIMASCHUTZES 14

4.1 THEMENKARTE: RÄUMLICHE HANDLUNGSSCHWERPUNKTE (MIT INDIZFUNKTION) 14
4.2 THEMENSCHWERPUNKT: UNIVERSELLE HOT- UND COLDSPOTS 18
4.3 THEMENSCHWERPUNKT: VEREINFACHTE LOKALE KLIMAZONEN 26
4.4 THEMENSCHWERPUNKT: BEVÖLKERUNG UND VULNERABLE GRUPPEN 30
4.5 THEMENSCHWERPUNKT: LANDBEDECKUNG 32
4.5.1 Versiegelungsklassen 35
4.5.2 Klasse der Hausdächer 35
4.5.3 Grünflächen und Gewässer 36
4.6 THEMENSCHWERPUNKT: BLAU-GRÜNE INFRASTRUKTUR 36
4.6.1 NDVI 37
4.6.2 Grünvolumen / Grünvolumendefizit 40
4.6.3 Grünausstattung 45
4.6.4 Grünraumvernetzung 47
4.6.5 Grünerreichbarkeit 48
4.6.6 GPP (Gross Primary Production) 49
4.6.7 Wassererreichbarkeit 52
4.7 THEMENSCHWERPUNKT: STADTSTRUKTURTYP 54
4.7.1 Exkurs: Vergleich der Projektergebnisse mit der Landesweiten Klimaanalyse 58
4.8 THEMENSCHWERPUNKT: KLIMASCHUTZ 60
4.8.1 Analyse von PV-Bestandsflächen (DachfläcHen und Freiflächen) 60
4.8.2 Analyse der FlächenPotenziale für die Photovoltaik-Nutzung im besiedelten Bereich 62
4.8.3 Analyse der Flächenpotenziale für die Photovoltaik-Nutzung im unbesiedelten Bereich 64
4.8.4 Energieeffiziente Siedlungsentwicklung 67

5 UMWELTZIELE 71

5.1 LANDESEBENE 71
5.2 REGIONALE EBENE 72
5.3 KOMMUNALE EBENE 76

6 AUSWAHL UND VERORTUNG VON MAßNAHMENTYPEN 78

6.1 EINFÜHRUNG UND ÜBERSICHT 78
6.2 MAßNAHMENTYPENAUSWAHL ANHAND DER ÜBERGEORDNETEN UMWELTZIELE 79
6.3 MAßNAHMENTYPENAUSWAHL ANHAND VON STADTSTRUKTURTYPEN 82

7 MONITORING 87

7.1 EINFÜHRUNG UND ÜBERBLICK 87
7.2 MONITORING DER MAßNAHMEN (UMSETZUNG) 87

8 HINWEISE ZU DATEN UND ANALYSE-VERFAHREN 88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassende Flächenpotenziale für PV-Anlagen nach Eignungsklassen. 63
Tabelle 2: Verknüpfung von Umweltzielen mit universellen Hot- und Coldspots und der LWKA. 79
Tabelle 3: Übersicht der Fernerkundungsdaten und Deep-Learning-Verfahren zur Bewertung ihrer planerischen Eignung in den jeweiligen Themenbereichen. 89
Tabelle 4: Übersicht vorhandener Datensätze. 90
Tabelle 5: Fernerkundliche Produkte. Hinweis: Der Lebenszyklus der Satellitenmissionen ist häufig begrenzt, jedoch stellen die entsprechenden Programme eine nachhaltige Sicherung der Dateneigenschaften sicher. Der manuelle Aufwand zur Vorverarbeitung und Prozessierung wurde in drei Klassen eingestuft: gering = Daten direkt nutzbar, mittel = Anwendung von bspw. einer Bewölkungsfilterung nötig, und hoch = verschiedene sequenzielle Vorverarbeitungsschritte notwendig. 91

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Übersicht für den Themenschwerpunkt der Klimaanpassung. 12
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen den Methoden der universellen Hot- und Coldspots (links) und der Methode zur Abgrenzung der Handlungsschwerpunkte inkl. deren Priorisierung (rechts) für die verschiedenen räumlichen Ebenen (unten). * Offenlandflächen: Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich. 15
Abbildung 3: Abgrenzung der räumlichen Handlungsschwerpunkte und deren Priorisierung, visualisiert für die Landesebene; Bezugsrahmen für die Berechnungen sind die Regierungsbezirke. Links: Priorisierung der Handlungsschwerpunkte aus den universellen Coldspots, Rechts: Priorisierung der Handlungsschwerpunkte aus den universellen Hotspots. Mitte: Kombinierte Visualisierung. 16
Abbildung 4: Räumliche Handlungsschwerpunkte für die kommunale Ebene. Exemplarische Visualisierung anhand von vier ausgewählten Gemeinden. 17
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Berechnungsmethodik für universelle Hot- und Coldspots. 19
Abbildung 6: Karte der universellen Hot- und Coldspots für ganz Hessen im 100 m-Gitter, klassifiziert pro Regierungsbezirk. *(Offenlandflächen: Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich). 22
Abbildung 7: Universelle Hot- und Coldspots für ausgewählte Gemeinden mit Wald und Landwirtschaft im 100 m-Gitter und klassifiziert pro Regierungsbezirk. *(Offenlandflächen: Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich) 23
Abbildung 8: Universelle Hot- und Coldspots für ausgewählte Gemeinden im Vergleich mit der Verdunstungsfähigkeit und Hitzebelastung; 100 m-Gitter, klassifiziert pro Regierungsbezirk. *(Offenlandflächen: Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich) 24
Abbildung 9: Universelle Hot- und Coldspots überlagert von Gebieten mit besonderer Klimafunktion für ausgewählte Gemeinden. *(Offenlandflächen: Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich) 25
Abbildung 10: Definition der vereinfachten Lokalen Klimazonen (vLCZ) für Hessen. 27
Abbildung 11: Kriterien zur Ableitung der vereinfachten Lokalen Klimazonen (vLCZ). Die prozentualen Flächenanteile beziehen sich auf eine 100 m-Gitterzelle. 27
Abbildung 12: Vereinfachte Lokale Klimazonen (vLCZ) für Hessen. 28
Abbildung 13: Vereinfachte Lokale Klimazonen (vLCZ) für ausgewählte Kommunen. 29
Abbildung 14: a) Bevölkerungsdichte 2022 und b) Anzahl vulnerabler Einrichtungen 2022 (z. B. Altenheime, Krankenhäuser, Kindergärten und Schulen) pro Gitterzelle, dargestellt am Beispiel Frankfurt. 31
Abbildung 15: Themenkarte Landbedeckung für Hessen. 33
Abbildung 16: Themenkarte Landbedeckung für ausgewählte Kommunen. 34
Abbildung 17: Grünindikator “Grünvitalität” (NDVI) für ganz Hessen. 38
Abbildung 18: NDVI für ausgewählte Kommunen. 39
Abbildung 19: Grünindikator „Grünvolumen“ für ganz Hessen. 40
Abbildung 20: Grünindikator "Grünvolumen“ für ausgewählte Kommunen. 41
Abbildung 21: Grünindikator "Grünvolumendefizit“ für ganz Hessen. 43
Abbildung 22: Grünindikator "Grünvolumendefizit“ für ausgewählte Gemeinden. 44
Abbildung 23: Grünindikator „Grünausstattung“ für Hessen. 45
Abbildung 24: Karte der Grünausstattung für ausgewählte Gemeinden. 46
Abbildung 25: Karte der Grünraumvernetzung der Stadt Frankfurt. 47

Abbildung 26: Erreichbarkeit von hochwüchsigem Grün in 300 m Luftlinie im Siedlungsbereich der Stadt Marburg. Landbedeckung wird hier ohne die Klasse FF-PV dargestellt. 48
Abbildung 27: Visualisierung der mittleren GPP als Bruttomenge des in der Vegetation aufgenommenen Kohlenstoffs in gm^{-2} für ganz Hessen. 50
Abbildung 28: Visualisierung der mittleren GPP als Bruttomenge des in der Vegetation aufgenommenen Kohlenstoffs in gm^{-2} beispielhaft für ausgewählte Gemeinden. 51
Abbildung 29: Visualisierung der Wassererreichbarkeit für Hessen. Räumliche Einheit ist hierbei die jeweils betrachtete Gitterzelle sowie die 300 m-Nachbarschaft. 52
Abbildung 30: Themenkarte "Wassererreichbarkeit" für ausgewählte Gemeinden. 53
Abbildung 31: Übersicht Stadtstrukturtypen. 55
Abbildung 32: Anteilige Verteilung der universellen Hot- und Coldspotkategorien pro Stadtstrukturtypen. (*Offenlandflächen: Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.) ... 57
Abbildung 33: Aus dem Luftbild (links) automatisch detektierte PV-Flächen (rechts) und Referenz (mittig). Die zum Vergleich manuell digitalisierte Referenzfläche wurde gefunden. Allerdings wurde zusätzlich eine helle Dachkonstruktion des oberhalb abgebildeten Wohngebäudes gefunden. 61
Abbildung 34: Aus dem Luftbild (links) automatisch detektierte PV-Flächen (rechts); Referenz (mittig). Die manuell digitalisierten Referenzflächen wurden bis auf sehr helle PV-Anlagen am rechten Bildrand gefunden. 61
Abbildung 35: Beispielfälle der PV-Detektion: Luftbild (rechts), Referenzdaten (mittig), automatisch detektierte Flächen (rechts). Unterschiedliche PV-Anlagen erfasst das KI-Modell überwiegend richtig. 61
Abbildung 36: Exemplarische Visualisierung von Parkplätzen für PV und deren Klassifizierung. Die erste Reihe zeigt Beispiele der Klasse „geeignet“ und die zweite Reihe der Klasse „ungeeignet“. Die entsprechend eingefärbten Polygone symbolisieren die Parkplatzflächen. 63
Abbildung 37: Schematische Visualisierung der Analyse zu den konfliktarmen Flächenpotenzialen für die FFPV-Nutzung im unbesiedelten Bereich („Zwiebelschalen-Prinzip“) 65
Abbildung 38: Ergebnis der schrittweisen Analyse des konfliktarmen FF-PV-Flächenpotenzials im unbesiedelten Bereich. 66
Abbildung 39: Flächenanteile von Stadtstrukturtypen in räumlichen Handlungsschwerpunkten mit Priorität 1 (universelle Hotspots): Frankfurt (links), Marburg (mittig) und Waldeck (rechts). 68
Abbildung 40: Darstellung von Einwohnerdichte und Stadtstrukturtypen in einem Teilbereich von Dietzenbach. 69
Abbildung 41: Gesamträumliche Auswertung der Flächensparsamkeit, d. h. Grundfläche aller Gebäude pro Einwohnerin/Einwohner (links) sowie der Kompaktheit der Bebauung für die Gemeinde Dietzenbach im Jahr 2022. 70
Abbildung 42: Gesamträumliche Auswertung der Bebauungsdichte, d. h. Gebäudeanteil pro 100 m-Gitter für die Gemeinde Dietzenbach. 70
Abbildung 43: Maßnahmentypenauswahl für den besiedelten Bereich anhand des übergeordneten Umweltziels (hier abgekürzt als "überg. UZ") „Dämpfung der Temperaturmaxima“ - Teil 1. 80
Abbildung 44: Maßnahmentypenauswahl für den besiedelten Bereich anhand des übergeordneten Umweltziels (hier abgekürzt als "überg. UZ") „Dämpfung der Temperaturmaxima“ - Teil 2. 81
Abbildung 45: Von Stadtstrukturtypen zu Maßnahmentypen, Temperatur - Teil 1 (nach Beermann et al. 2014, verändert). 83
Abbildung 46: Von Stadtstrukturtypen zu Maßnahmentypen, Temperatur - Teil 2 (nach Beermann et al. 2014, verändert). 84
Abbildung 47: Von Stadtstrukturtypen zu Maßnahmentypen, Schwammwirkung - Teil 1 (nach HMLU 2022, verändert). 85
Abbildung 48: Von Stadtstrukturtypen zu Maßnahmentypen, Schwammwirkung - Teil 2 (nach HMLU 2022, verändert). Parks/Grünflächen und Straßen/Plätze wurden ergänzend aufgenommen, auch wenn sie keine eigenen SST des FE-Projektes darstellen. 86

1 Einführung

Grundlage des Handlungsleitfadens bildet der Abschlussbericht des zweijährigen Forschungsprojektes „Entwicklung von Planungshilfen für Klimaschutz und Klimaanpassung in der räumlichen Gesamtplanung mittels Fernerkundung“, das im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum (HMWVW) durchgeführt wurde.

Die Schwerpunkte bilden auf dem Gebiet des **Klimaschutzes** die Themen „Photovoltaik“ sowie „energieeffiziente Siedlungsentwicklung“. Auf dem Gebiet der **Klimaanpassung** wird eine umfangreiche Analyse der Ist-Situation u. a. in Bezug auf die Temperaturmuster, die Landnutzung (z. B. Versiegelungsgrad) und die Blau-Grüne-Infrastruktur mittels Fernerkundungs- und Geofachdaten bereitgestellt. Hierauf aufbauend werden Umweltziele und Maßnahmentypen abgeleitet. Die Entwicklung der Inhalte erfolgte in einem iterativen Prozess mit dem Auftraggeber HMWVW sowie einem Projektbeirat, in dem u. a. HMLU, HLNUG, obere Landesplanungsbehörden, der Regionalverband FrankfurtRheinMain, Vertreter von Kommunen und kommunalen Spitzenverbänden, der Architektenkammer Hessen und Fachexperten zu verschiedenen Themenbereichen mitwirkten.

Bei den Arbeiten auf dem Gebiet der Klimaanpassung handelt es sich um einen innovativen Ansatz, bei dem verschiedene Daten der Geoinformation und Fernerkundung integriert werden, z. B. als 10-jährige Zeitreihe erfasste Temperaturdaten, Daten der Landesweiten Klimaanalyse (LWKA), Daten der vereinfachten Lokalen Klimazonen bzw. „local climate zones“ (vLCZ) sowie Informationen zur Landbedeckung (Vegetation, Versiegelung) oder zu den vorhandenen Stadtstrukturen.

In dem nachfolgenden Kapitel 2 wird zunächst der Anwendungsbereich der Forschungs-Projektergebnisse für beide Themenbereiche aufgezeigt. Welche Beiträge die Fernerkundung liefern kann, fasst das Kapitel 3 zusammen. Das Kapitel 4 gibt eine Übersicht, welche Themenkarten bzw. Geofachdaten im Einzelnen zur Verfügung gestellt werden und auf welchen Datengrundlagen bzw. welcher Methodik diese beruhen. Veranschaulicht werden diese Themenkarten beispielhaft für die landesweite und regionale Betrachtung sowie für Beispielkommunen. Die entwickelten Umweltziele werden im Kapitel 5 beschrieben und im Kapitel 6 durch Hilfestellungen zur Auswahl und Verortung von Maßnahmentypen ergänzt. Abschließend gibt das Kapitel 7 eine Übersicht zur Möglichkeit des Monitorings.

2 Anwendungsbereich der Forschungsprojekt-ergebnisse

Das Klimaanpassungsgesetz des Bundes (KAnG) fordert von den Ländern bis Januar 2027 Klimaanpassungsstrategien, die auf der bundesweiten Klimaanpassungsstrategie[1] aufbauen und mit Klimaanpassungskonzepten auf kommunaler Ebene ineinandergreifen. Auf dem Gebiet des Klimaschutzes sieht das Hessische Energiegesetz (HEG) den Ausbau der Photovoltaik auf ca. 1 % der Landesfläche vor, was auf der Grundlage einer landesweiten Potentialstudie[2] je zur Hälfte als Freiflächen- und Dach-Photovoltaik erfolgen soll. Die Umsetzung dieser gesetzlichen Vorgaben soll von der landesweiten bis zur kommunalen Planungsebene über die im Forschungs-Projekt als Planungshilfe bereitgestellten einheitlichen und aktuellen Datengrundlagen sowie Themenkarten erleichtert werden.

Auf dem Gebiet des **Klimaschutzes** stellt das Forschungs-Projekt umfassend Geofachdaten zur Analyse der FF-PV-Flächenpotenziale bereit, die konfliktarme Planungen erleichtern sollen.

Auf dem Gebiet der **Klimaanpassung** stellt das Forschungs-Projekt umfassend Planungshilfen aus einem breiten methodischen Ansatz bereit. Es betrachtet zum einen die vom Satelliten Landsat für den Tag und MODIS für die Nacht erfasste Landoberflächentemperatur (d. h. die Oberflächentemperatur auf Boden-, Gebäude- und Vegetationsoberflächenniveau), die u. a. vom Ausmaß der Verdunstungskühlung der jeweiligen Oberfläche abhängt. Zum anderen werden Daten, die die Hitzebelastung des Menschen abbilden, einbezogen (Tropennacht-Daten des DWD, erfasst in ca. 2 m Höhe sowie die für die Mittagszeit (13:00 Uhr) modellierten PET-Daten der landesweiten Klimaanalyse Hessen[3]). Basierend auf den o. g. Temperaturdaten werden jeweils getrennt die Tag-Nacht-Temperatur-Muster ermittelt (10-Jahres-Mittel der Sommermonate) und anschließend zu universellen Temperatur-Hot- und -Coldspots räumlich überlagert.

Hierdurch liegen in Hessen räumlich gebündelt folgende Informationen für die Klimaanpassung vor:

- **Universelle Hotspots**, die u. a. auf hohen Verdunstungsdefiziten der Landesoberfläche beruhen (hier ist auf der Maßnahmenseite die „Schwammwirkung der Fläche für Niederschläge“ und die verdunstungsaktive Vegetation zu steigern, was der Dämpfung von Starkniederschlagabflüssen und Hitzeextremen gleichermaßen zugutekommt) und/oder auf eine hohe Hitzebelastung des Menschen zurückzuführen sind (hier ist auf der Maßnahmenseite zusätzlich z. B. auf den Erhalt von Kaltluftbahnen und die

[1] S. Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel 2024 (https://www.bmuv.de/download/deutsche-anpassungsstrategie-an-den-klimawandel-2024)

[2] Endbericht - Potenzialstudie Photovoltaik für Hessen 2022 (https://www.lea-hessen.de/mediathek/publikationen/4093)

[3] Landesweite Klimaanalyse Hessen (https://landesplanung.hessen.de/klima/landesweite-klimaanalyse)

Durchlüftung zu achten).

- **Universelle Coldspots**, die nicht nur durch stärkere nächtliche Abkühlung, sondern auch durch relativ ausgeglichene oder geringe Temperaturen am Tag charakterisiert sind (auf der Maßnahmenseite steht hier die Stabilisierung dieser Kühlflächen im Vordergrund).

Mit Hilfe weiterer Daten (z. B. Bevölkerungsdichte, vulnerablen Nutzungen) wurden innerhalb dieser universellen Hot- und Coldspots räumliche Handlungsschwerpunkte für die Klimaanpassung in drei Prioritätsstufen identifiziert. Zusammen mit umfangreichen Daten zur Versiegelung und Grünausstattung - aufrufbar im 100 m-Gitterraster für unterschiedliche Stadtstrukturtypen - wird so in Hessen ein zielgerichteter und effektiver Einsatz begrenzter finanzieller und personeller Ressourcen in der Klimaanpassung ermöglicht.

Folgender konkreter Anwendungsbereich ergibt sich hieraus für die Planung:

1. Die ermittelten räumlichen Handlungsschwerpunkte der Klimaanpassung geben über alle Planungsebenen hinweg einen raschen Überblick über den Handlungsbedarf für die Klimaanpassung. Indem dies auf einer landesweit einheitlichen, aktuellen und umfassenden Datengrundlage sowie einer gebündelten Informations-Darstellung im 100 m-Gitter beruht, können hieraus zusammen mit den umfangreichen Versiegelungs-, Grün- und Stadtstrukturdaten Klimaanpassungsstrategien auf allen Planungsebenen stringent zueinander entwickelt werden.
2. Auf örtlicher Ebene können die Forschungs-Projekt-Daten und Themenkarten unaufwendig für Klimaanpassungskonzepte sowie als Fachgrundlage für die Handreichungen für Stadtklimaanalysen des HLNUG[4] angewendet werden. Auch können sie als Abwägungshilfe bei der Flächennutzungsplan-Fortschreibung oder als grundlegende Hintergrundinformation sowie als Abwägungshilfe für klimaangepasste Festsetzungen in Bebauungsplänen dienen.

Hingegen wurden im Rahmen des Forschungs-Projektes keine lokalen Kaltluftströme und zugehörige Kaltluftentstehungsgebiete erfasst. Stattdessen sind Datensätze der Landesweiten Klimaanalyse (LWKA) zu den regional bedeutsamen Kaltluftströmen nachrichtlich dargestellt, die eine Datengrundlage für die Regionalplanung bilden. Diese können ggf. für eine überschlägige Ermittlung relevanter lokaler Kaltluftströmungen herangezogen werden. Wichtig ist daher auch die Abgrenzung des Forschungs-Projektes zur LWKA. Der LWKA liegt eine eigene Fragestellung mit eigenem methodischen Ansatz zugrunde; die Daten des Forschungs-Projektes können nicht als Grundlage herangezogen werden, wenn z. B. im Rahmen der Siedlungsentwicklungsplanung lokale Klimaanalysen zur Ermittlung der Auswirkungen der Planung auf die Strömungssysteme erforderlich werden. Die LWKA und Forschungs-Projektergebnisse ergänzen sich somit.

[4] https://www.hlnug.de/themen/klimawandel-und-anpassung/handlungshilfen/stadtklimaanalysen: Beschrieben werden darin die Methoden **M 1** „Beurteilung der thermischen Belastung anhand des Versiegelungsgrades und von Baustrukturen“, **M 2** „Beurteilung der thermischen Belastung sowie der Kaltluftsituation aus der Ermittlung von Klimatopen nach VDI 3787 Blatt 1 zur Klimaanalyse sowie **M 3** „Ermittlung von Tages- und Nachttemperaturen, Kaltluftentstehung und -abfluss sowie von Kenntagen mit Stadtklimamodellierungen“ zur Klimamodellierung.

3 Grundlagen der Fernerkundung auf den Gebieten Klimaanpassung und Klimaschutz

3.1 BEITRAG DER FERNERKUNDUNG BEI DER KLIMAANPASSUNG

Auf dem Gebiet der Klimaanpassung leistet die Fernerkundung einen wichtigen Beitrag zur Identifikation von sommerlich stark erhitzen Flächen, die es durch geeignete Klimaanpassungsmaßnahmen zu dämpfen gilt, sowie zur Identifikation von ausgeprägten Kühlflächen, bei denen geeignete Maßnahmen zum Erhalt und Stabilisierung der Kühlfunktion im Vordergrund stehen. Bei der Temperatur-Analyse wird hierbei zwischen Temperaturdaten zur Abbildung der **Hitzebelastung des Menschen** (z. B. abhängig von der Luftfeuchte und Lufttemperatur) und Temperaturdaten zur Abbildung von **Defiziten an Verdunstungskühle der Landoberflächen** differenziert und beides für Hessen erstmals zusammenhängend - dies unter Betrachtung von Tag-Nacht-Temperaturmustern - ausgewertet.

Die *Hitzebelastung des Menschen* wird hierbei durch die in der Landesweiten Klimaanalyse für die hochsommerliche Hitzebelastung des Menschen modellierte physiologisch äquivalente Temperatur (PET) als Tageswert und durch die auf der Lufttemperatur basierenden Tropennächte des DWD als Nachtwert erfasst. Die *Verdunstungsdefizite der Landoberflächen* werden mittelbar über die gemessenen Landoberflächentemperaturen (LST) erfasst. Sie spiegeln als Strahlungsgröße der Erdoberfläche in Abhängigkeit von deren Emissionsgrad u. a. den latenten Wärmestrom und darüber indirekt die Verdunstungseigenschaft der Landoberflächen wider. PET- und LST-Werte erfassen unterschiedliche Temperaturarten und sind daher v. a. am Tag über den verschiedenen Landoberflächen nicht vergleichbar. Die Temperatur-Analysen zur Identifizierung von erhitzten Flächen und Kühlflächen werden daher differenziert für beide Parameter ermittelt (Bezugsraum: Regierungsbezirk). Zur Identifizierung „universeller Hot- und Coldspots“ werden die Tag- und Nachtdaten beider Temperatur-Parameter verschnitten. Hierbei wird kenntlich gemacht, ob ein Temperatur-Hotspot auf hohen PET- oder LST-Werten beruht.

Beide Temperaturarten sind - trotz ihrer o. g. unterschiedlichen Aussagen und ihrer Erfassung in unterschiedlichen Höhen - für die Klimaanpassung von Relevanz. In LST-basierten universellen Hotspots steht bei den Maßnahmen zur Temperatursenkung insbesondere die Erhöhung verdunstungsaktiver hochwüchsiger Vegetation (z. B. Baumpflanzungen) im Vordergrund. Hierdurch wird neben einer vermehrten sommerlichen Kühlung durch Verdunstung am Tag zugleich zur Niederschlagsspeicherung und Minderung des raschen Niederschlagabflusses beigetragen (Steigerung der „Schwammwirkung“ im besiedelten und unbesiedelten Raum). Eine deutliche Erhöhung der Schwammwirkung kann jedoch nur flankierend durch weitere, möglichst großflächige Maßnahmen zur Versickerung und Retention erreicht werden.

Bei den Maßnahmen zur Senkung PET-basierter universeller Hotspots steht insbesondere die Beschattung (Tag) und der Erhalt von Kaltluftbahnen und Kaltluftentstehungsgebieten (Nacht) im Vordergrund

(Maßnahmen zur Minderung der Hitzebelastung des Menschen). Ebenfalls vorgesehene Maßnahmen zur Steigerung der Verdunstungskühlung und Niederschlagsretention dürfen dem nicht entgegenstehen.

Im Rahmen dieses Projektes wurden mittels Fernerkundung neben Temperaturdaten zahlreiche weitere wertvolle Datengrundlagen bereitgestellt. Hierzu zählen Daten zur Landbedeckung, die mithilfe der Fernerkundung über ein aufwändiges Segmentierungsmodell – basierend auf einer KI-gestützten Luftbildauswertung – generiert wurden. Bereitgestellt werden drei Versiegelungsklassen, drei Vegetationsklassen, Gewässer, Dachflächen sowie Dachgrün und Photovoltaik-Bestand. Auch ist es zumindest auf großräumigen Skalen möglich, die Bodenfeuchte mittels satellitengestützter Fernerkundungsdaten zu erfassen (Auflösung: 9 km, siehe Keller et al. 2025, Kap. 11).

Ein Mehrwert der fernerkundungsbasierten Analysen entsteht durch das Hinzufügen von Geofach- oder Zensusdaten und daraus generierter Themenkarten. Durch die Kombination der universellen Hot- und Coldspots u. a. mit Bevölkerungsdaten sowie mit Vulnerabilitätsdaten (z. B. Daten zum Vorkommen von Kindergärten, Altenheimen, Krankenhäusern) konnten Räume mit besonderem Handlungsbedarf für Klimaanpassungsmaßnahmen in unterschiedlicher Dringlichkeitsstufe klassifiziert werden. Darüber hinaus wurden verschiedene Grünindikatoren bestimmt, die aus spezifischen Blickwinkeln den Begrünungszustand eines Raumes hessenweit einheitlich beschreiben und damit Potenziale bzw. Defizite an kühlend wirkender Vegetation ermitteln helfen. Die landesweite Verfügbarkeit gleichartiger und damit vergleichbarer Daten u. a. zu den betrachteten Grünindikatoren stellt einen erheblichen Mehrwert der fernerkundungsbasierten Analysen dar.

Das Vorgehen auf dem Gebiet der Klimaanpassung zeigt Abbildung 1:

Den Ausgangspunkt bilden die sog. **„universellen Hot- und Coldspots“,** die aus verschiedenen Temperaturparametern (Daten zur Abbildung der Hitzebelastung und der Verdunstungsdefizite) abgeleitet werden.

Aus den universellen Hot- und Coldspots werden durch Hinzunahme weiterer Daten, wie Zensus- und Geofachdaten, **räumliche Handlungsschwerpunkte für die Klimaanpassung** identifiziert und priorisiert. Ein dritter Arbeitsschritt führt für diese räumlichen Handlungsschwerpunkte eine **Potenzial- und Defizitanalyse** durch, bei der insbesondere Informationen zu Siedlungsstrukturen, zur Grün- und Versiegelungsausstattung und zu den regionalbedeutsamen Kaltluftentstehungsgebieten und Luftbahnen aus der Landesweiten Klimaanalyse[5] die fachliche Grundlage bilden. Aufbauend auf dieser Defizit- und Potenzial-Analyse werden in einem letzten Arbeitsschritt für die räumlichen Handlungsschwerpunkte **Umweltziele** und **Maßnahmentypen für die Klimaanpassung** entwickelt.

Im Folgenden sind die einzelnen Arbeitsschritte (linksseitig) und die diesen Arbeitsschritten zugrunde liegenden Geofachdaten (Kästchen rechte Seite) schematisch dargestellt.

[5] https://landesplanung.hessen.de/klima/landesweite-klimaanalyse

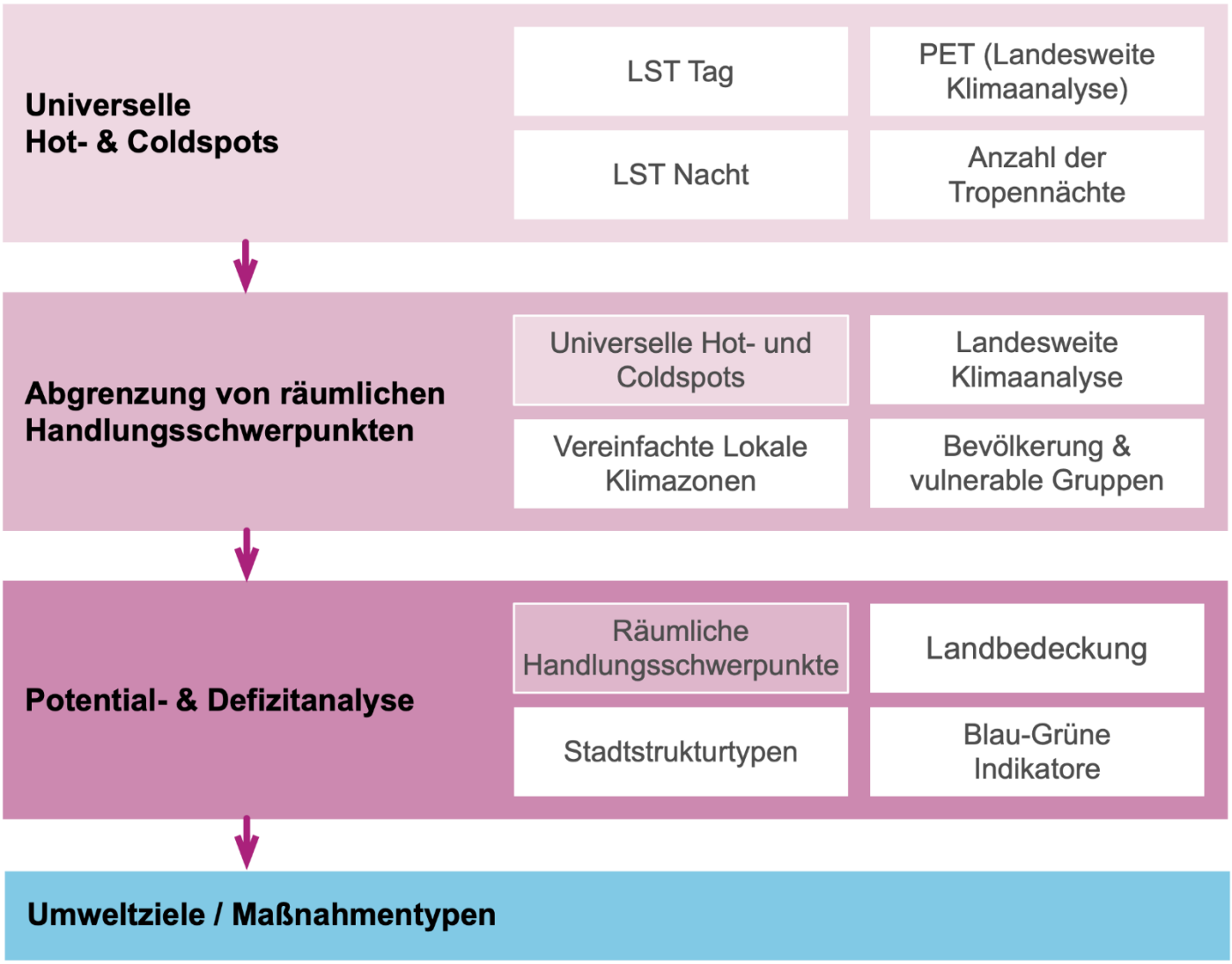


Abbildung 1: Schematische Übersicht für den Themenschwerpunkt der Klimaanpassung.

3.2 BEITRAG DER FERNERKUNDUNG BEIM KLIMASCHUTZ

Im Handlungsleitfaden werden beim Thema Photovoltaik folgende Planungshilfen bereitgestellt:

1. Landesweite Analyse der **Flächenpotenziale für die Photovoltaik-Nutzung**:

a. Im unbesiedelten Bereich werden im landesweiten Betrachtungsmaßstab grundsätzlich geeignete sowie vergleichsweise konfliktarme Flächen für die FF-PV-Nutzung identifiziert.

b. Im besiedelten Bereich wird das Potenzial an Parkplatzfläche mit über 50 Stellplätzen identifiziert, das für den Photovoltaik-Einsatz besonders in Frage kommt.

2. Ermittlung des **Bestandes an FF-PV-Anlagen und Dach-PV-Anlagen**: Ziel ist die möglichst zuverlässige Detektion bestehender Anlagen anhand einer automatisierten datenbasierten Vorgehensweise.

3.3 WIRTSCHAFTLICHKEIT DER BEREITGESTELLTEN METHODEN UND DATEN

Im Zuge der Methodenentwicklung für die Datengrundlagen, die in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt werden, wurden strenge Wirtschaftlichkeitsmaßstäbe angelegt. Alle zugrundeliegenden Fernerkundungsdaten, Geofachdaten oder Bevölkerungsdaten sind aus öffentlich zugänglichen und für staatliche Behörden kostenfreien Quellen entnommen. Insbesondere sind dies:

- Luftbilddaten und Geländemodelle aus Landesbefliegungen
- Kostenfreie Bilddaten von Satellitenmissionen der ESA oder NASA
- Geofachdaten aus ATKIS- oder anderen öffentlichen Geodatenbeständen
- Gebäudedaten des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG)
- Zensus-Daten des Bundes
- Daten der Landesweiten Klimaanalyse Hessen

Diese Grundlagendaten wurden verwendet, um mit automatisierten Methoden Themenkarten zu erstellen, deren Inhalte in den nachfolgenden Kapiteln anhand von Beispielen näher erläutert werden.

4 Beschreibung der Themenkarten auf dem Gebiet der Klimaanpassung und des Klimaschutzes

Die nachfolgend beschrieben Themenkarten werden hessenweit als Online-Karten im 100 m x 100 m-Gitternetz zur Verfügung gestellt. Damit stehen die entsprechenden Informationen kartografisch sowie für jede 100 m x 100 m-Gitterzelle in tabellarischer Form abrufbar bereit. Ferner können alle Geofachdaten als WFS- und WMS-Dienst in Geoinformationssysteme eingebunden und weiterverarbeitet werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, diese mit weiteren kommunalen Daten oder anderen Diensten zu ergänzen und für regionale und kommunale Planungen einschließlich konkreter Maßnahmenplanungen zu nutzen.

4.1 THEMENKARTE: RÄUMLICHE HANDLUNGSSCHWERPUNKTE (MIT INDIZFUNKTION)

Die Themenkarte „Räumliche Handlungsschwerpunkte“ bildet auf dem Gebiet der Klimaanpassung die zentrale Planungsgrundlage (vgl. Kapitel 14 des Abschlussberichtes). Sie priorisiert den Handlungsbedarf für Klimaanpassungsmaßnahmen in drei Dringlichkeitsstufen - differenziert für die universellen Hotspots (d. h. den hier bestehenden Bedarf an kühlend wirkenden Maßnahmen) und für die universellen Coldspots (d. h. den hier bestehenden Bedarf an Maßnahmen zur Schonung und Stabilisierung der Kühlfunktion).

Methodische Grundlage für die Entwicklung der drei Dringlichkeitsstufen bildet die im Vorhaben entwickelte Snakes and Ladders Analysis (SLA). SLA ermöglicht eine differenzierte Gewichtung von verschiedenen Eingangsdaten, um die Relevanz eines Raums präzise abzubilden. Das Vorgehen ist in Abbildung 2 skizziert (s. auch Kapitel 14 des Abschlussberichts).

Der linke obere Bereich der Grafik zeigt die Daten aus der Hotspot- und Coldspot-Analyse. Der rechte obere Bereich symbolisiert die zusätzlichen Daten, die mit den Hot- und Coldspots verschnitten (mittiger Kasten) und durch SLA gewichtet werden. Als Ergebnis erhält man Räume mit differenziertem Handlungs- bzw. Erhaltungsbedarf. Auf der kommunalen Ebene besitzen diese „Räumliche Handlungsschwerpunkte“ lediglich Indizfunktion, da dort weitere Informationen zur eigenen, verfeinerten Priorisierung der Räume durch die Kommunen hinzugezogen werden können.

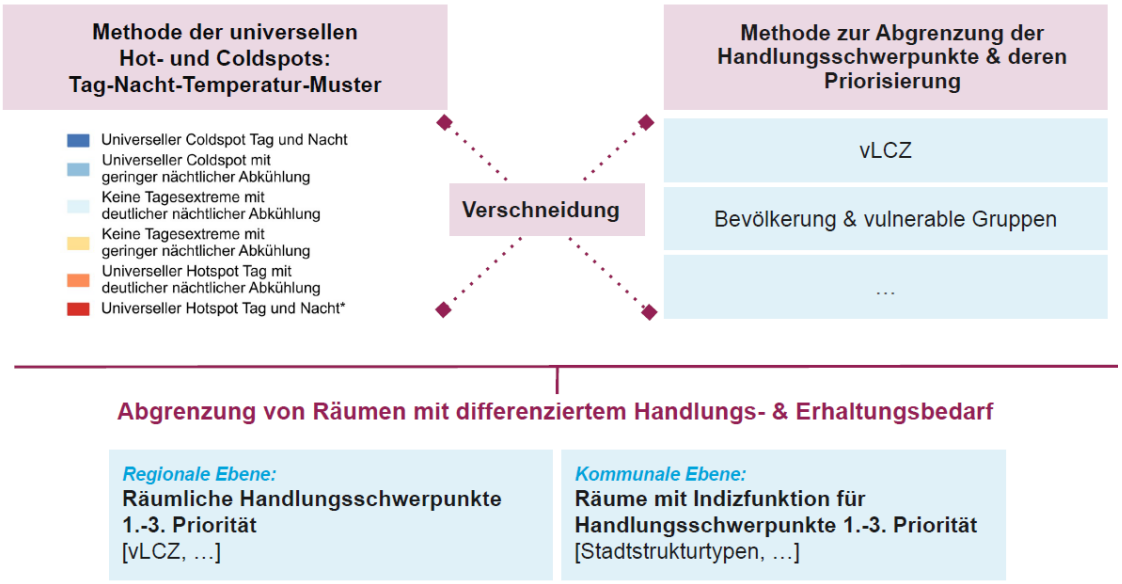


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen den Methoden der universellen Hot- und Coldspots (links) und der Methode zur Abgrenzung der Handlungsschwerpunkte inkl. deren Priorisierung (rechts) für die verschiedenen räumlichen Ebenen (unten). * Offenlandflächen: Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.

Die Ergebnisse der priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkte für Klimaanpassungsmaßnahmen werden nachfolgend für die landesweite Ebene (Abbildung 3) sowie beispielhaft für vier Kommunen (Abbildung 4) grafisch dargestellt.

Auf der kommunalen Ebene sind die Ergebnisse beispielhaft für die Kommunen Frankfurt, Marburg, Waldeck und Witzenhausen in Abbildung 4 dargestellt. Eine rötliche Einfärbung kennzeichnet die räumlichen Handlungsschwerpunkte in den universellen Hotspots, bläuliche Töne die räumlichen Handlungsschwerpunkte in den universellen Coldspots. Je intensiver die Farbe, umso höher ist die Priorität. Zur leichteren Orientierung sind zusätzlich die Umringpolygone der Ortslagen eingeblendet. Wie zu erkennen ist, befinden sich die dreistufig priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkte der Hotspots hauptsächlich in den Ortslagen, wohingegen v. a. Wald und teils auch Offenland in den kleineren Gemeinden mehrheitlich die räumlichen Handlungsschwerpunkte in den Coldspots prägen.

In den nachfolgenden Kapiteln 3.2 ff. werden die der Themenkarte „Räumliche Handlungsschwerpunkte“ zugrunde liegenden Einzel-Themenkarten samt den zugehörigen Geofachdaten beschrieben.

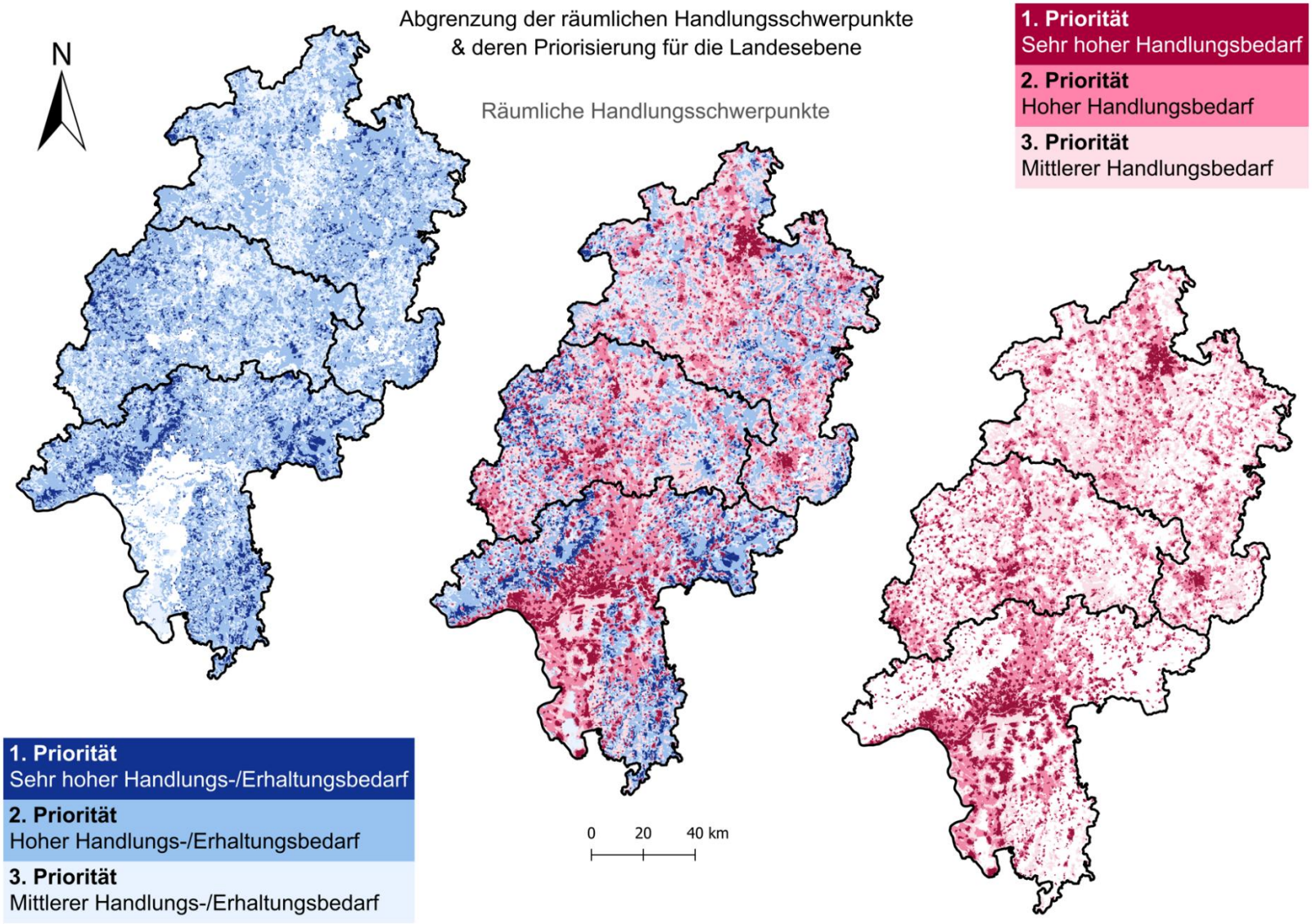


Abbildung 3: Abgrenzung der räumlichen Handlungsschwerpunkte und deren Priorisierung, visualisiert für die Landesebene; Bezugsrahmen für die Berechnungen sind die Regierungsbezirke. Links: Priorisierung der Handlungsschwerpunkte aus den universellen Coldspots, Rechts: Priorisierung der Handlungsschwerpunkte aus den universellen Hotspots. Mitte: Kombinierte Visualisierung.

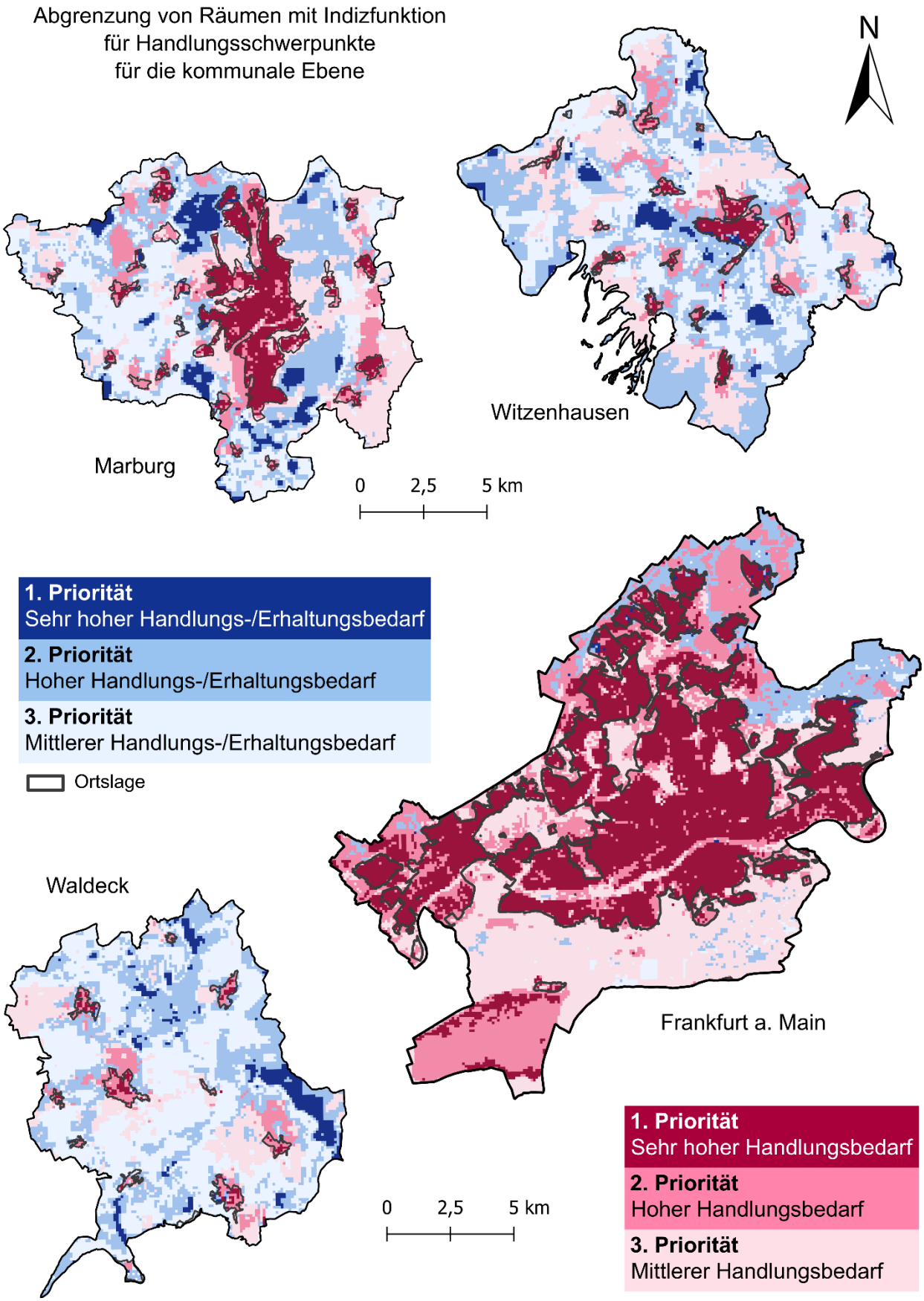


Abbildung 4: Räumliche Handlungsschwerpunkte für die kommunale Ebene. Exemplarische Visualisierung anhand von vier ausgewählten Gemeinden.

4.2 THEMENSCHWERPUNKT: UNIVERSELLE HOT- UND COLDSPOTS

Folgende **Daten und datenbezogene Informationen** liegen den Themenkarten zu den universellen Hot- und Coldspots zugrunde (vgl. auch Kapitel 12 des Abschlussberichts).

Themenkarte Universelle Hot- und Coldspots				
Datengrundlage (Auflösung)	**Abrufbare Auflösung Geoportal**	**Abrufbare Informationen**	**Datenverfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit**	**Monitoringfähigkeit (abhängig von den Erfassungszyklen)**
LST Tag (30 m) LST Nacht (1 km) PET (200 m) Tropennächte (Anzahl mit räuml. Auflösung 1 km)	100 m - Gitter	LST Tag (Rohwert)* LST Tag (Kategorie)** LST Nacht (Rohwert)* LST Nacht (Kategorie)** PET (Rohwert)* PET (Kategorie)** Tropennächte (Rohwert)* Tropennächte (Kategorie)** Klasse des universellen Hot- oder Coldspot	Daten nicht einfach verfügbar, sondern teilweise (PET) aufwendige Modellierung notwendig	Die unterschiedlichen Temperarturdaten können innerhalb weniger Tage aktualisiert werden. Eine Ausnahme bildet PET; für diese umfangreiche Modellrechnung liegt kein fester Aufnahmezyklus vor.
ATKIS		Landwirtschaft oder Wald	Amtlicher Datensatz, verfügbar	Amtliche Fortführungszyklen (werden jeweils veröffentlicht)

* Die **Rohwerte** sind die Originaldaten (Eingangsdaten).

** Die **Kategorien** wurden zur leichteren Interpretation der Temperaturdaten gebildet, indem alle vier Parameter (LST Nacht, LST Tag, #Tropennächte und PET) klassifizierend dargestellt wurden. Die Einteilung beruht auf Perzentilen und wird für jeden Regierungsbezirk individuell durchgeführt.

Erläuterung:

Die universellen Hot- und Coldspots sind in Kapitel 12 des Abschlussberichts näher beschrieben. Sie dienen als **Suchraum für die Abgrenzung räumlicher Handlungsschwerpunkte**. Sie bilden daher einen wichtigen fachlichen Ausgangspunkt der Themenkarte „Räumliche Handlungsschwerpunkte (mit Indizfunktion)“.

Für die Identifikation von universellen Hot- und Coldspots werden die aus einem 10-jährigen Mittel (20132 bis 2022) entwickelten Tag-Nacht-Temperatur-Muster betrachtet (Abbildung 5). Über sie kann das Ausmaß der sommerlichen Temperatur-Extreme transparent dargestellt werden. Betrachtet werden Räume, die

a) **am Tag <u>und</u> in der Nacht stark erwärmt sind** und damit ein Hinweis auf urbane Wärmeinseln sind
b) **tagsüber stark erwärmt und nachts kühl sind**, was Hinweise auf ein Kaltluftentstehungsgebiet bzw. geringe Wärmespeicherung und eine gute Durchlüftung mit Kaltluft liefern kann
c) **keine extremen Temperatur-Schwankungen aufweisen** und insgesamt eher kühl sind; sie können auf ein Kaltluftentstehungsgebiet hinweisen
d) **tagsüber kühl sind und nachts weiter abkühlen,** somit insgesamt kühlend wirken.

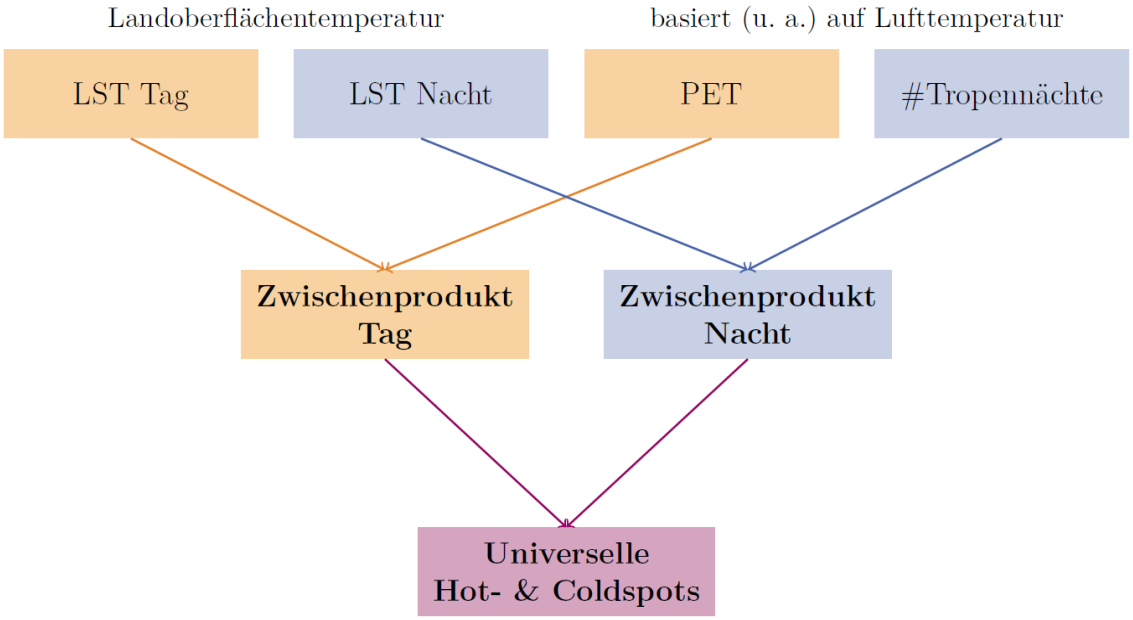


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Berechnungsmethodik für universelle Hot- und Coldspots.

Die klassifizierten Ergebnisse dieser Tag-Nacht-Temperatur-Analyse für Hessen sind der Legende von Abbildung 6 zu entnehmen.

Die Ausgangsdaten bilden die gemessenen **LST-Daten**, die u. a. indirekt die Fähigkeit der Landoberfläche zur Verdunstungskühlung beschreiben, sowie die **u. a. auf der Lufttemperatur basierenden Hitze-belastungsdaten des Menschen** (modellierte PET aus der Landesweiten Klimaanalyse, gemessene Tropennacht-Lufttemperaturdaten des DWD). Von beiden Temperatur-Parametern werden jeweils zunächst die Tagdaten und die Nachtdaten miteinander verschnitten (Ergebnis: „Zwischenprodukt“ Tag/Nacht).

Nachfolgend wird das Zwischenprodukt Tag und Nacht miteinander verschnitten, so dass **universelle Hotspots und Coldspots** entstehen (s. Abbildung 5 und klassifizierte Darstellung in der Legende in Abbildung 6).

Die Berechnungs- bzw. der räumliche Bezugsrahmen für die Festlegung der Schwellwerte zwischen unterschiedlichen Kategorien (Perzentile) bildet die Ebene der Regierungsbezirke. Ganz Hessen als Berechnungs- bzw. Bezugsrahmen zu wählen ist aufgrund der unterschiedlichen, vom Breitengrad abhängigen Bedingungen zwischen Nord- und Südhessen (z. B. besondere klimatische Situation des Oberrheingrabens) nicht sinnvoll.

Bezüglich der **Kategorie „universeller Hotspot Tag und Nacht“** ist zu beachten, dass hierunter nicht nur typischerweise dicht bebaute und versiegelte Innenstadtgebiete fallen, sondern im Einzelfall auch **vegetationsfreie Offenlandbereiche**, wie z. B. Äcker. Ob im Offenlandbereich bei genauerer Betrachtung nächtliche Kaltluftentstehungsgebiete vorliegen, kann im landesweiten Betrachtungsmaßstab aufgrund der räumlichen Auflösung der verwendeten Temperaturdaten für die Nacht (1 km) sowie der Perzentilbildung (Grenzbereiche zwischen zwei Perzentilen) nicht erfasst werden. **Daher wird bei den universellen Hotspot-Bereichen des Offenlandes auf die maßstabsbedingt nicht mögliche Klärung einer potenziellen Kaltluftentstehungsfläche hingewiesen**. Weiterhin ist wichtig festzuhalten, dass die ursprünglichen Daten durch die Verschneidung bis hin zu den universellen Hot- und Coldspots zwar zunehmend aggregiert werden, dennoch jede Gitterzelle eine Rückverfolgung bis hin zum jeweiligen Ausgangsdatensatz der Aggregierung und damit im Bedarfsfall detaillierte Analysen über die Ursachen eines universellen Hot- oder Coldspots ermöglicht. Daher wird das Ergebnis der Perzentilbildung für jeden verwendeten Temperaturparameter ebenfalls bereitgestellt.

Beispielhafte graphische Darstellungen (Land, Regionen und Kommunen):

Das Ergebnis bei der Identifikation von universellen Hot- und Coldspots ist für die Ebene des **Landes und der Regionen** in der nachfolgenden Abbildung 6 dargestellt**.**

Für die Ebene der **Kommunen** sind die Räume der universellen Hot- und Coldspots etwas differenzierter beschrieben - einmal im Vergleich zum Vorliegen von Wald- und Landwirtschaftsnutzung (Abbildung 7) und einmal im Vergleich zum Vorliegen von LST- und PET-Hotspots (Abbildung 8).

Im Ergebnis gibt die **Karte der universellen Hot- und Coldspots** v. a. einen Überblick über die anhand verschiedener Temperaturparameter ermittelten lokalen Temperaturmuster. Zusätzlich werden mittels Schraffur die höchste Prioritätsstufe der LST am Tag für potenziell niedrige Verdunstungsfähigkeit sowie die höchste Prioritätsstufe der PET-Daten für hohe Hitzebelastung verdeutlicht, wie in der Abbildung 8 beispielhaft veranschaulicht. Hierdurch sind in Hessen auf Ebene des Landes, der Regionen und der Kommunen auf einheitlicher Datengrundlage zielgerichtete Maßnahmenplanungen auf dem Gebiet der Klimaanpassung erleichtert möglich.

Wie Abbildung 9 beispielhaft zeigt, wurden die Ergebnisse der Landesweiten Klimaanalyse (LWKA) nachrichtlich im Leitfaden des Forschungsprojektes dargestellt. Hierbei handelt es sich um die in der LWKA gutachterlich vorgeschlagenen Flächen zur Ausweisung von Vorranggebieten bzw. Vorbehaltsgebieten für besondere Klimafunktionen. Sie bilden die Ausgleichsräume von **sehr hoher regionalplanerischer Bedeutung** bzw. die **Ausgleichsräume von hoher regionalplanerischer Bedeutung für besondere Klimafunktionen**. Diese Ausgleichsräume der LWKA wurden mit den universellen Hot- und Coldspots des Forschungsprojektes auf Gemeindeebene überlagert. Genaue Definitionen der verschiedenen Flächentypen sind in Kapitel 12.2 des Abschlussberichtes zu finden.

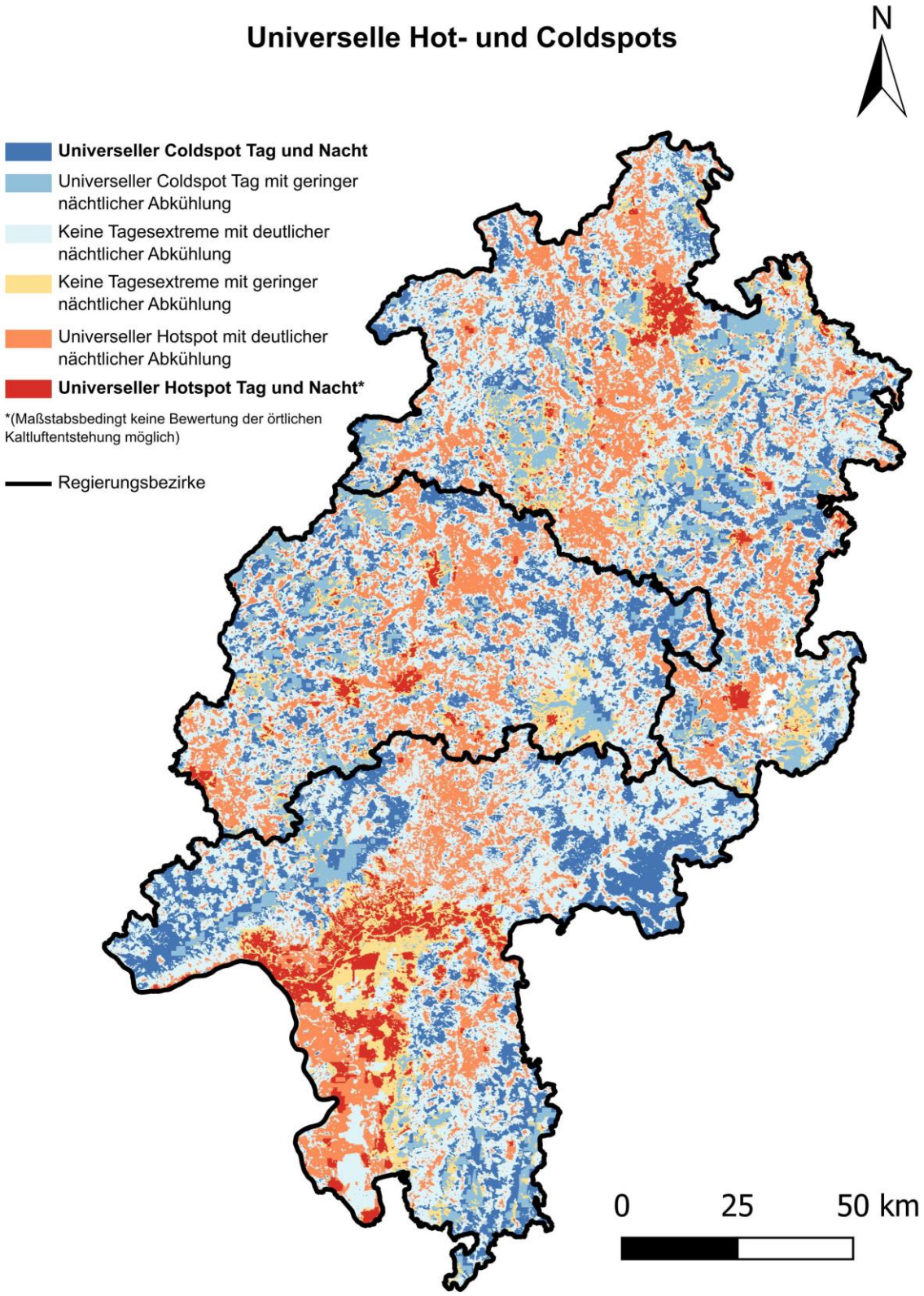


Abbildung 6: Karte der universellen Hot- und Coldspots für ganz Hessen im 100 m-Gitter, klassifiziert pro Regierungsbezirk. *(Offenlandflächen: Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich).

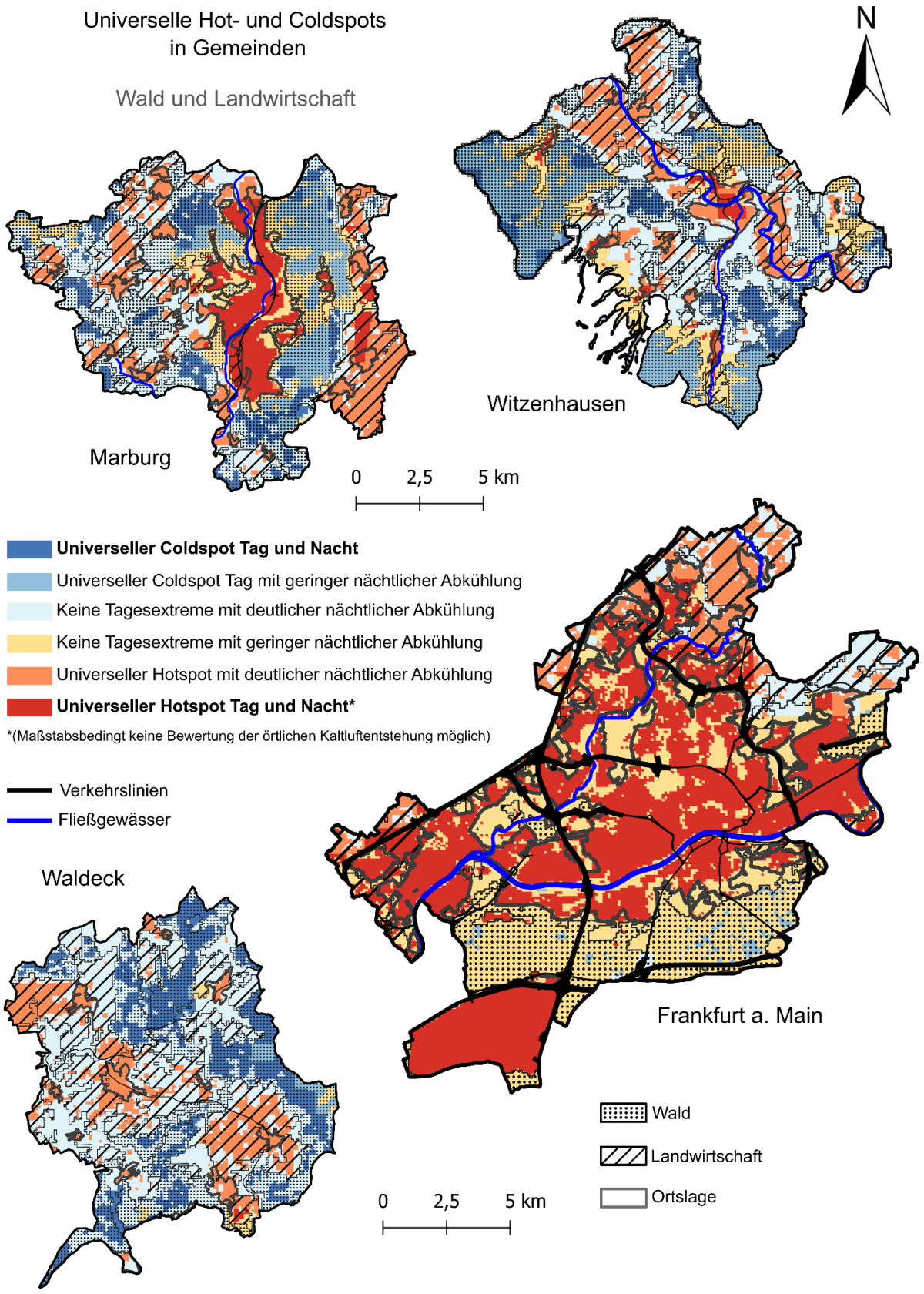


Abbildung 7: Universelle Hot- und Coldspots für ausgewählte Gemeinden mit Wald und Landwirtschaft im 100 m-Gitter und klassifiziert pro Regierungsbezirk. *(Offenlandflächen: Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich)

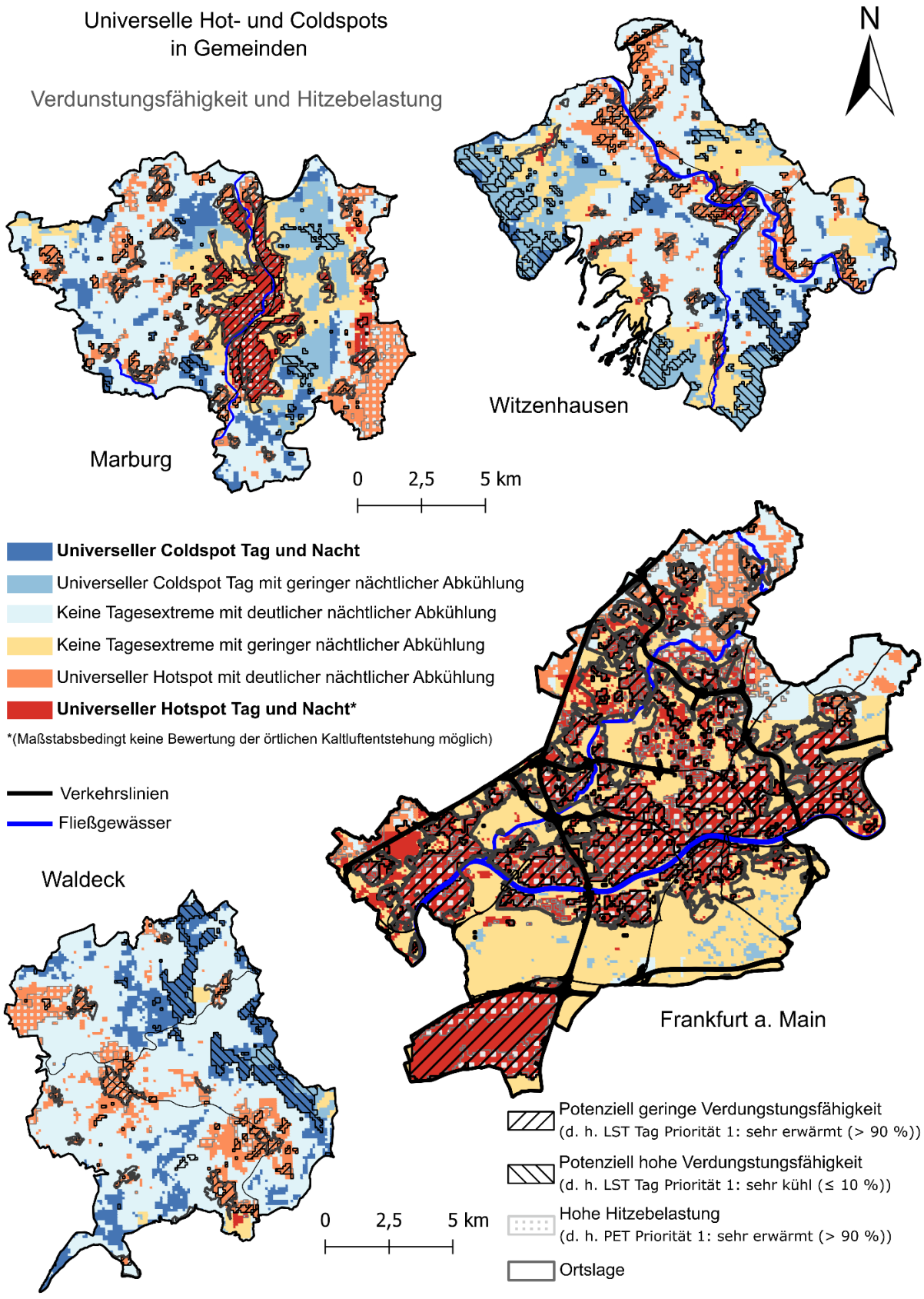


Abbildung 8: Universelle Hot- und Coldspots für ausgewählte Gemeinden im Vergleich mit der Verdunstungsfähigkeit und Hitzebelastung; 100 m-Gitter, klassifiziert pro Regierungsbezirk. *(Offenlandflächen: Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich)

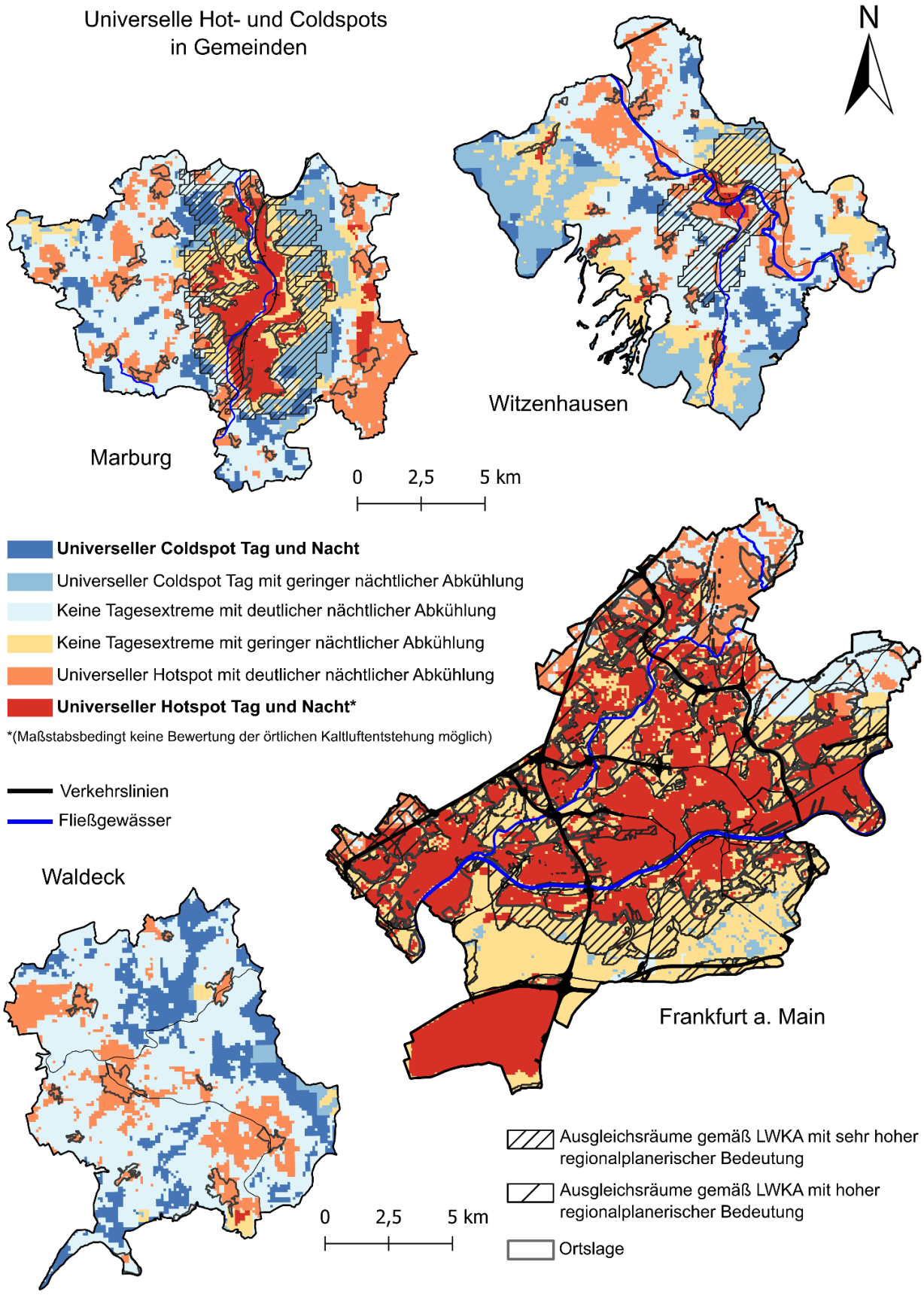


Abbildung 9: Universelle Hot- und Coldspots überlagert von Gebieten mit besonderer Klimafunktion für ausgewählte Gemeinden. *(Offenlandflächen: Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich)

4.3 THEMENSCHWERPUNKT: VEREINFACHTE LOKALE KLIMAZONEN

Die Entwicklung der (vereinfachten) Lokalen Klimazonen (LCZ) ist in Kapitel 5 des Abschlussberichts näher beschrieben.

Folgende **Daten und datenbezogene Informationen** liegen der Themenkarte zu den vereinfachten Lokalen Klimazonen zugrunde (vgl. Kapitel 5 im Abschlussbericht).

Themenkarte vereinfachte Lokale Klimazonen				
Datengrundlage (Auflösung)	**Abrufbare Auflösung Geoportal**	**Abrufbare Informationen**	**Datenverfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit**	**Monitoringfähigkeit (abhängig von den Erfassungszyklen)**
100 m-Gitter	100 m-Gitter	Klasse der jeweiligen lokalen Klimazone	Anpassung der LCZ für den Bezugsraum Hessen mit neuen Daten durch Anwendung u. a. des Segmentierungsmodells und weiterer Algorithmen möglich	wird in unregelmäßigen Abständen nachjustiert

Erläuterung:

Bei den „*Local climate zones* (LCZ)“ handelt es sich um eine Klassifikation von natürlichen und städtischen Landschaften auf der Grundlage klimarelevanter Oberflächeneigenschaften, die unter dem Blickwinkel globaler Kriterien und Datenverfügbarkeiten entwickelt wurden. Diese dem internationalen Standard entsprechende Klassifikation stellt für Städte weltweit eine konsistente Informationsbasis bereit. Hierzu sind zehn urbane und sieben ländliche Klassen definiert.

Für die hier erarbeitete Themenkarte wurde die Klassifikation der LCZ auf die Gegebenheiten in Hessen angepasst. Die originalen LCZ-Klassen wurden zu insgesamt sieben Klassen vereinfacht, die sog. ***Vereinfachten Lokalen Klimazonen (vLCZ)***. Hierbei wurden die aus den Luftbilddaten erzielten Segmentierungsergebnisse zugrunde gelegt. Die hier vorgestellte Themenkarte ist eine der Grundlagen für die räumlichen Handlungsschwerpunkte (vgl. Abbildung 1).

Abbildung 10 zeigt die Definition der sieben vLCZ-Klassen und Abbildung 11 die Kriterien der jeweiligen Klassendefinition.

Beispielhafte graphische Darstellungen (Land, Regionen und Kommunen):

Abbildung 12 zeigt die räumliche Verteilung der vereinfachten Lokalen Klimazonen für die landesweite und regionale Betrachtungsebene mit den unterschiedlichen Klimazonen für urbane und ländliche Regionen. Die Klimazonen eignen sich aufgrund ihrer Auflösung und der verwendeten Klassen insbesondere für **landesweite und regionale Fragestellungen** der Klimaanpassung.

- **Klasse 1:** Geringe Oberflächenrauigkeit (besiedelter/unbesiedelter Bereich)
- **Klasse 2:** Wald und Gehölze
- **Klasse 3:** Lockere, niedrige Bebauung
- **Klasse 4:** Kompakte, niedrige Bebauung
- **Klasse 5:** Lockere, mittelhohe bis hohe Bebauung
- **Klasse 6:** Kompakte, mittelhohe bis hohe Bebauung
- **Klasse 7:** Niedrige Bebauung mit hohem Versiegelungsgrad

Abbildung 10: Definition der vereinfachten Lokalen Klimazonen (vLCZ) für Hessen.

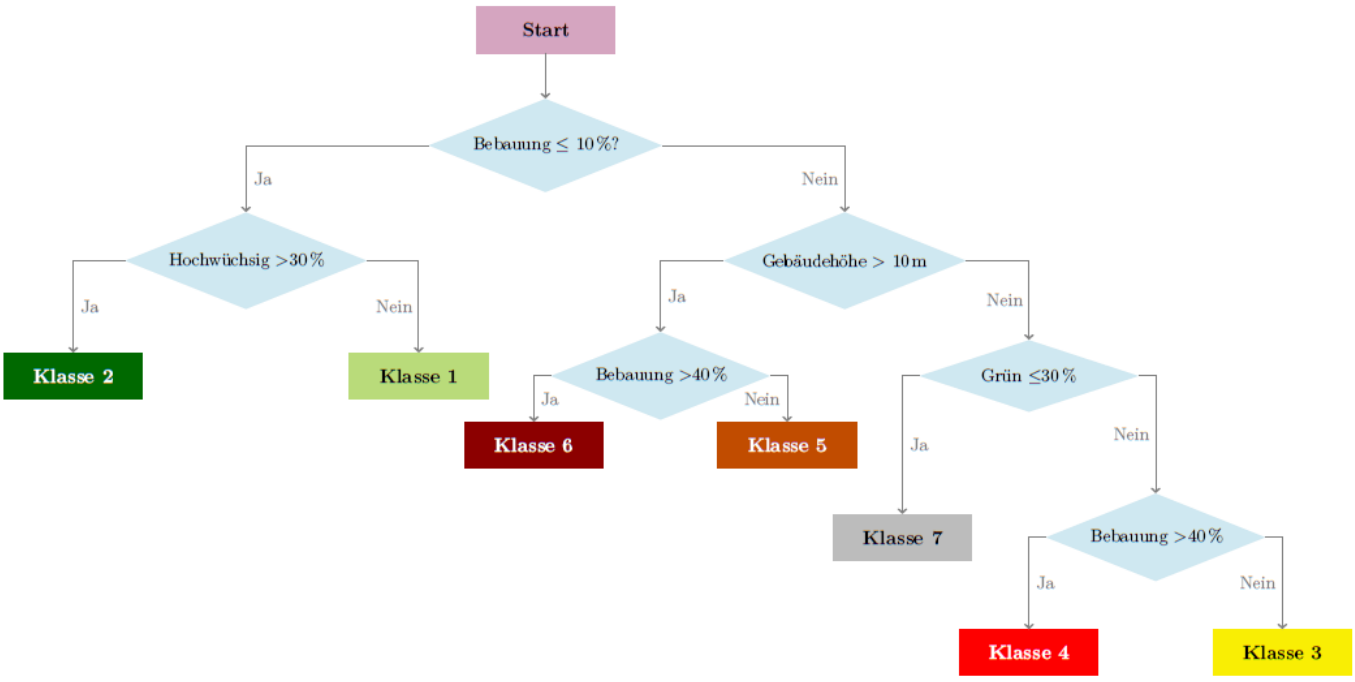


Abbildung 11: Kriterien zur Ableitung der vereinfachten Lokalen Klimazonen (vLCZ). Die prozentualen Flächenanteile beziehen sich auf eine 100 m-Gitterzelle.

Abbildung 13 zeigt ergänzend die räumliche Verteilung der vereinfachten Lokalen Klimazonen für die kommunale Ebene.

Im Ergebnis gibt die Karte der vereinfachten Lokalen Klimazonen einen flächenhaften Überblick über die Struktur und Kompaktheit bebauter, offener und bewaldeter Gebiete und hierüber über ihre oberflächenbedingte klimatologische Wirkung. Sie ist damit v. a. als Fachgrundlage für eine Potenzial- und Defizitanalyse sowie die Ableitung passender Maßnahmentypen auf dem Gebiet der Klimaanpassung hilfreich.

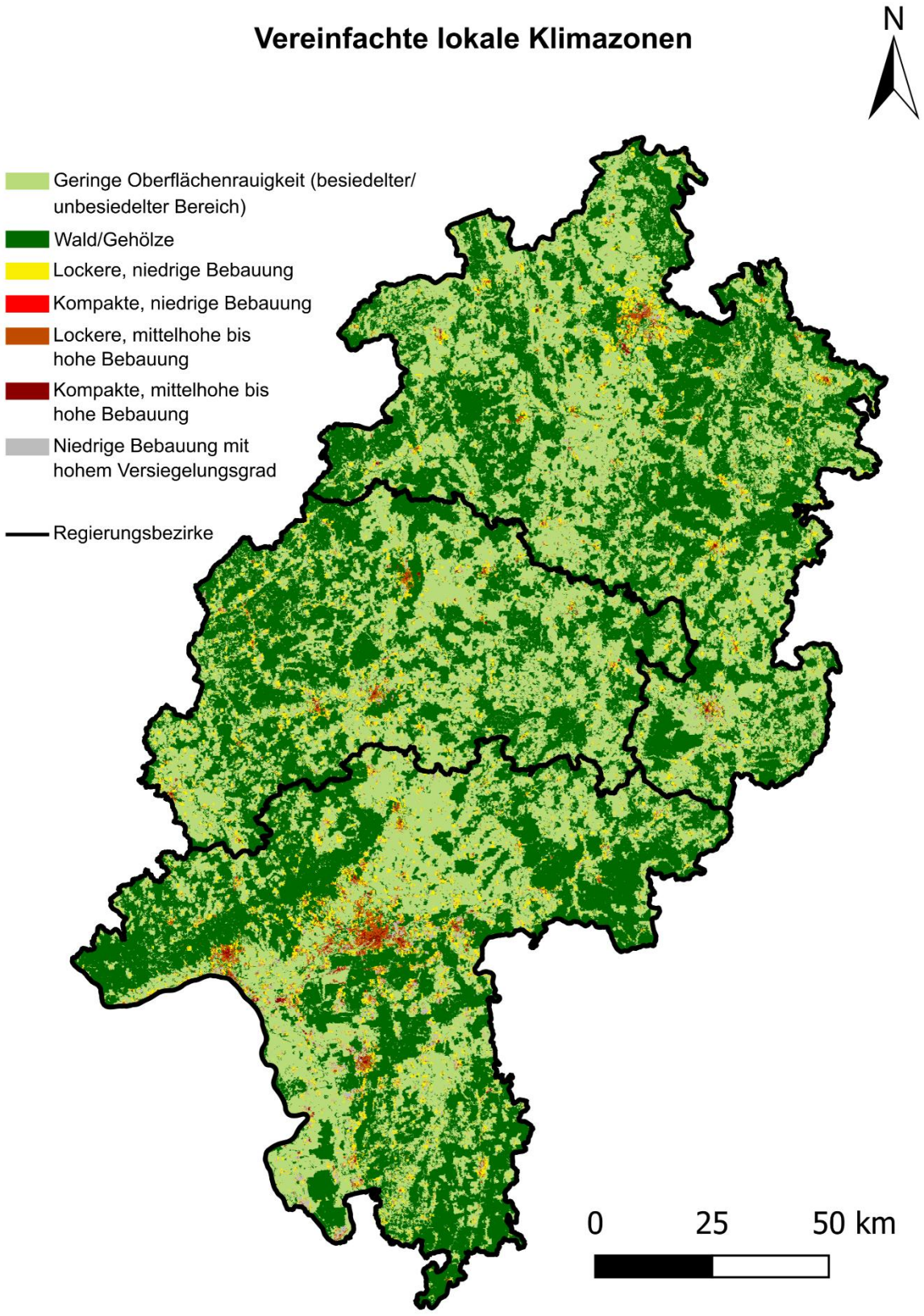


Abbildung 12: Vereinfachte Lokale Klimazonen (vLCZ) für Hessen.

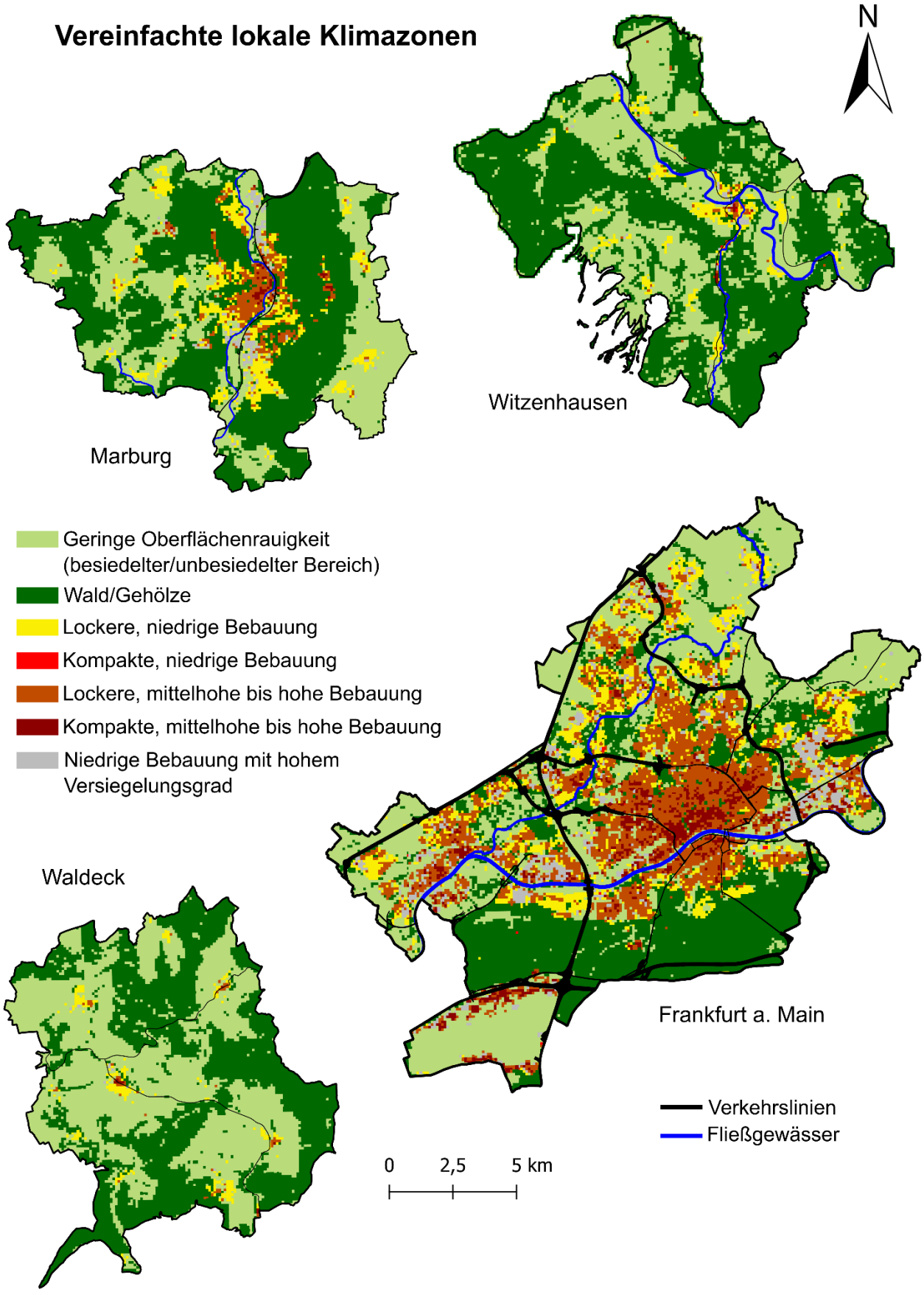


Abbildung 13: Vereinfachte Lokale Klimazonen (vLCZ) für ausgewählte Kommunen.

4.4 THEMENSCHWERPUNKT: BEVÖLKERUNG UND VULNERABLE GRUPPEN

Die Art der Einbeziehung von Daten zur Bevölkerung (Bevölkerungsdichte, -entwicklung) und vulnerabler Nutzungen ist in Kapitel 6 des Abschlussberichtes näher beschrieben.

Folgende **Daten und datenbezogene Informationen** liegen zum Themenschwerpunkt „Bevölkerung und vulnerable Gruppen“ vor (vgl. Kapitel 9 des Abschlussberichts).

Themenkarten Bevölkerung und vulnerable Gruppen				
Datengrundlage (Auflösung)	**Abrufbare Auflösung Geoportal**	**Abrufbare Informationen**	**Datenverfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit**	**Monitoringfähigkeit (abhängig von den Erfassungszyklen)**
Zensus-Daten 2022 (100 m)	100 m-Gitter	Bevölkerungsanzahl, Bevölkerungsdichte	Öffentlich zugänglich	Zensusabhängig, typischerweise etwa 10 Jahre
ATKIS	Gebäude-scharf oder Punktdaten	Einrichtungen vulne-rabler Gruppen (Kindergärten, Altenheime, etc.)	Öffentlich zugänglich	Amtliche Fortfüh-rungszyklen (werden jeweils veröffentlicht)

Erläuterung:

Bei der Priorisierung von räumlichen Handlungsschwerpunkten in universellen Hot- und Coldspots kommt den Informationen zur Bevölkerungsdichte sowie dem Anteil an vulnerablen Bevölkerungsgruppen besondere Bedeutung zu. Vulnerabilität bedeutet in diesem Zusammenhang, dass bestimmte Bevölkerungs-gruppen eine höhere Anfälligkeit für negative Auswirkungen durch die Hitze aufweisen, wie insbesondere hochbetagte, kranke oder sehr junge Personen. Zu vulnerablen Einrichtungen gehören daher beispielsweise Altenheime, Krankenhäuser, Kindergärten und Schulen. Ziel ist daher eine Priorisierung innerhalb universellen Hotspots (siehe z. B. Abbildung 8) anhand der Dichte der Bevölkerung und vulnerabler Einrichtungen. Entsprechend ist die hier vorgestellte Themenkarte eine der Grundlagen für die Identifizierung räumlicher Handlungsschwerpunkte (vgl. Abbildung 1).

Für die kommunale Planungsebene steht die Bevölkerungsdichte und die Anzahl vulnerabler Einrichtungen **pro 100 m-Gitterzelle**, für die Landes- und Regionalebene in einem **1.000 m-Gitter sowie pro Gemeinde** zur Verfügung. Die Bevölkerungsdaten zum Zensus 2021/2022 sind seit dem Frühjahr 2024 verfügbar und können bspw. in Verbindung mit dem Zensus 2011 auch für Veränderungsanalysen verwendet werden. Ergänzend stehen Daten des Hessischen Statistischen Landesamtes zur zukünftigen Einwohnerentwicklung in Hessen zur Verfügung.

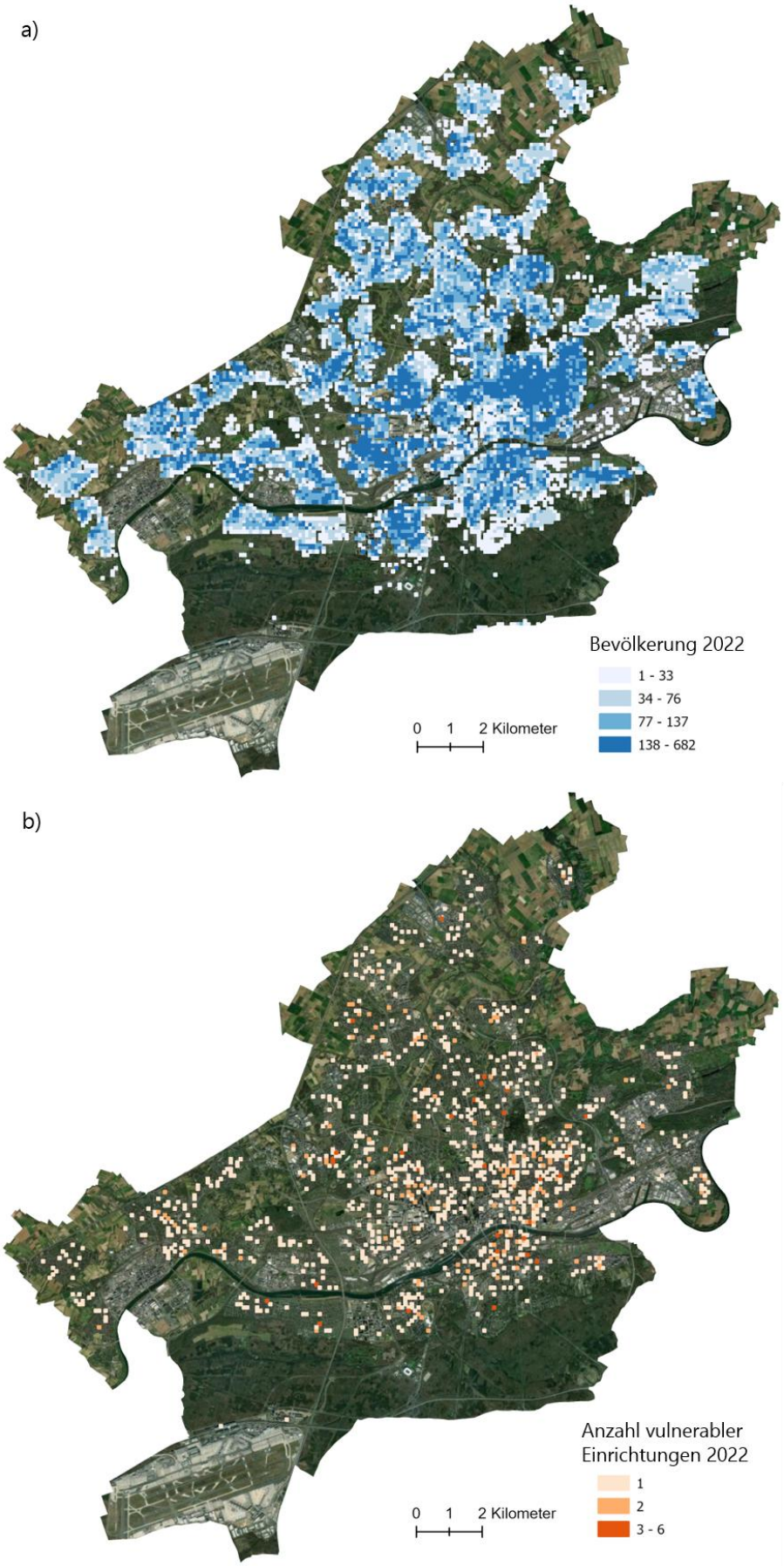


Abbildung 14: a) Bevölkerungsdichte 2022 und b) Anzahl vulnerabler Einrichtungen 2022 (z. B. Altenheime, Krankenhäuser, Kindergärten und Schulen) pro Gitterzelle, dargestellt am Beispiel Frankfurt.

Zusätzlich zur Darstellung der gegenwärtigen Situation könnte dieser Ansatz auch in Zukunft genutzt werden, um auf Basis aktualisierter Daten kontinuierlich Anpassungsstrategien zu optimieren. Der Einbezug von weiteren Datenquellen, wie z. B. spezifische Gesundheits- und Sozialdaten, könnte den zielgerichteten Einsatz von Klimaanpassungsmaßnahmen weiter erhöhen.

Beispielhaft sind diese Einwohnerzahlen und die Anzahl vulnerabler Einrichtungen in Abbildung 14 für Frankfurt dargestellt. Nach den Meldedaten des Zensus 2022 sind diese vor allem auf die Wohnorte der Bevölkerung bezogen. Es lässt sich erkennen, dass zwar hohe Dichten an Bevölkerung in zentralen Lagen des Stadtgebiets vorzufinden sind, jedoch ein Großteil der Bevölkerung in weniger zentralen Orten verteilt ist. Auffällig sind hier beispielsweise Zeilsheim, Frankfurt-Riedberg oder Bergen-Enkheim. In Kombination mit Abbildung 14 b) zur Anzahl an vulnerablen Einrichtungen am Beispiel von Frankfurt fällt hingegen auf, dass sich vulnerable Einrichtungen stärker zentrieren.

Im Ergebnis hilft die Betrachtung der Bevölkerungsdichte und Anzahl vulnerabler Einrichtungen, Klimaanpassungsmaßnahmen möglichst effizient und zielgerichtet vorzusehen und zu priorisieren.

4.5 THEMENSCHWERPUNKT: LANDBEDECKUNG

Die Beschreibung der Einbeziehung der Landbedeckungsdaten ist in Kapitel 7 des Abschlussberichtes näher beschrieben.

Folgende **Daten und datenbezogenen Informationen** liegen zum Themenschwerpunkt „Landbedeckung“ vor (vgl. Kapitel 7 des Abschlussberichts).

Themenkarten Landbedeckung				
Datengrundlage (Auflösung)	**Abrufbare Auflösung Geoportal**	**Abrufbare Informationen**	**Datenverfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit**	**Monitoringfähigkeit (abhängig von den Erfassungszyklen)**
Luftbilddaten (20 cm) Digitales Höhenmodell (20 cm)	1 m	Landbedeckungsklassen: • Gewässer • vollversiegelt • teilversiegelt • unversiegelt • niedrige Vegetation (< 50 cm) • mittelhohe Vegetation (50 cm bis 2 m) • hohe Vegetation (> 2 m) • Dachflächen • Dachflächen begrünt • Dachflächen mit PV • Freiflächen-PV	Luftbilddaten und Digitales Höhenmodell sind öffentlich verfügbar Die Klassifikation muss für neue Daten neu durchgeführt werden.	Abhängig von Befliegungszyklen (i.d.R. 2-3 Jahre)

Erläuterung:

Die aus den Luftbild- und Höhendaten ermittelten Landbedeckungsklassen werden in der ursprünglichen Auflösung von 20 cm klassifiziert und fließen an mehreren Stellen in weitere Datenauswertungen ein. Der Klassenkatalog ist so gewählt, dass Bilddaten flächendeckend klassifiziert werden können:

a. **Dachflächen** werden in die drei Klassen „Dach“, „Begrüntes Dach“ und „Dach mit Photovoltaik“ unterteilt
b. **Vegetationsbereiche** werden in die drei Wuchshöhenklassen „< 0,5 m“, „0,5 m - 2 m“, „> 2 m“ unterteilt
c. **Versiegelungsbereiche** werden in die drei Klassen „vollversiegelt“, „teilversiegelt“ und „unversiegelt“ unterteilt. Dies erfolgte mit Hilfe von Trainingsdaten von Objektklassen mit folgenden Abflussbeiwerten:
    - Abflussbeiwert 1,0 bis 0,7 - Vollversiegelte Fläche
    - Abflussbeiwert 0,6 bis 0,1 - Teilversiegelte Fläche
    - Abflussbeiwert 0 - Unversiegelte Fläche
d. **Freiflächen-PV**, nachträglich integriert. Detaillierte Informationen hierzu gibt Kapitel 4.8.3.

Die Landbedeckungsklassen bildeten für mehrere Themenkarten der **Klimaanpassung** eine wichtige Datengrundlage, z. B. der Themenkarte der vereinfachten Lokalen Klimazonen, der Themenkarte zu den räumlichen Handlungsschwerpunkten für die Klimaanpassung sowie den Themenkarten zur Potenzial- und Defizitanalyse in den räumlichen Handlungsschwerpunkten. Beispielsweise ermöglichen die Landbedeckungsklassen in der Potenzial- und Defizitanalyse die zielgerichtete Identifizierung geeigneter Räume für Klimaanpassungsmaßnahmen (z. B. auf dem Gebiet der Entsiegelung, der Verdichtung, der Grünausstattung oder Erhöhung der Grünvolumina, ebenso auf dem Gebiet der Schonung von kühlend wirkenden Flächen). Im **Klimaschutz** dienen die Informationen zur Landbedeckung der Erfassung u. a. von Dachflächen mit PV-Anlagen oder von vorhandenen FF-PV-Anlagen.

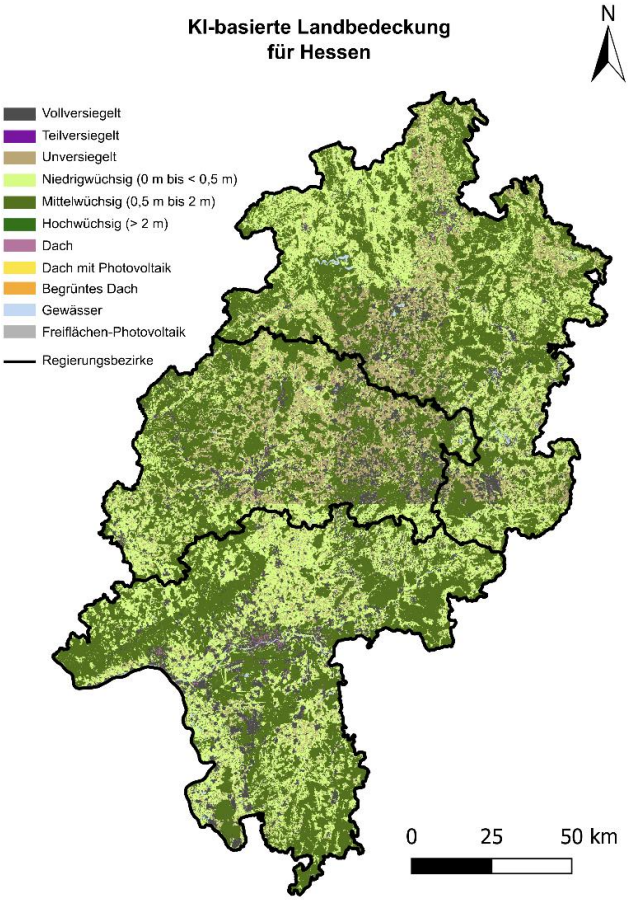


Abbildung 15: Themenkarte Landbedeckung für Hessen.

Beispielhafte graphische Darstellungen (Land, Regionen und Kommunen):

Die Ergebniskarte zur Landbedeckung ist für die Ebene des **Landes und der Regionen** in Abbildung 15 dargestellt**.** Abbildung 16 bietet eine detailliertere Darstellung der Landbedeckung auf Ebene der **Kommune** beispielhaft für Frankfurt, Marburg, Witzenhausen und Waldeck. Die Themenkarten bilden eine zentrale Grundlage für die Defizit- und Potenzialanalyse (siehe Abbildung 1).

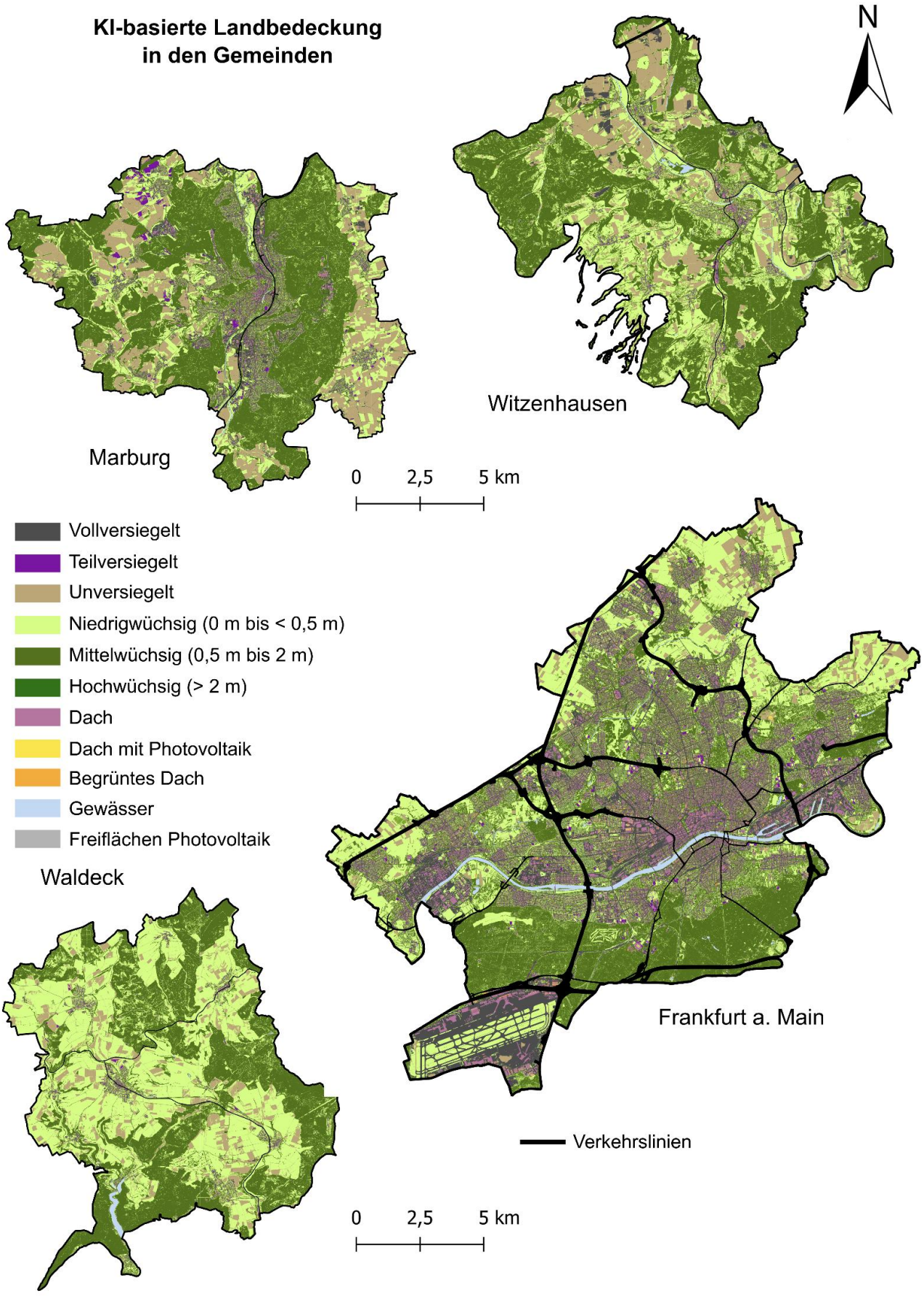


Abbildung 16: Themenkarte Landbedeckung für ausgewählte Kommunen.

4.5.1 VERSIEGELUNGSKLASSEN

Die Versiegelung kann zwischen den Extrema „vollversiegelt“ und „unversiegelt“ eine verschieden starke Ausprägung aufweisen. Die Ergebnisse durch Fernerkundung können hierzu nur eine grobe Annäherung an die Realität - dies im Hinblick auf die Versickerungsfähigkeit des Bodens - darstellen. Dies liegt v. a. daran, dass mittels FE-Methoden lediglich die (sichtbare) Oberfläche analysiert werden kann. Ein Rückschluss auf die Wirkung der Bodenoberfläche, beispielsweise auf konkrete Versickerungseigenschaften, kann daher alleine mittels FE-Methodik nicht gezogen werden. Insbesondere unter Straßenräumen mit Baumreihen oder Alleen wird hierbei die tatsächliche Versiegelung deutlich unterschätzt. Dies liegt u. a. daran, dass großkronige Bäume einen Teil der versiegelten Fläche überdecken, die FE-Verfahren jedoch von oben betrachtend nur die Baumkrone „sehen“ und die darunterliegende Fläche entsprechend als unversiegelt werten. Der Anteil der unterschätzten Versiegelungsfläche ist dabei v. a. von der unversiegelten, den Stamm umgebenden „Baumscheibe“ abhängig. Eine Abschätzung dieses Effekts hängt stark von den örtlichen Gegebenheiten ab, so dass für eine **genaue Quantifizierung eine in-situ Begehung** angebracht ist.

Die Klassifizierung in die drei Klassen vollversiegelt, teilversiegelt und unversiegelt ist unter Beachtung der zuvor genannten Eigenschaften für eine Einschätzung der Versiegelungscharakteristik dennoch sehr hilfreich; dies gilt insbesondere für umfangreichere statistische Auswertungen, da durch die Intervall- und Mittelbildungen etwaige Unschärfen reduziert werden. Das methodische Vorgehen ist in Kapitel 7.2 des Abschlussberichtes näher beschrieben.

4.5.2 KLASSE DER HAUSDÄCHER

Hausdächer wurden hinsichtlich ihrer Wirkung und Funktion mittels Fernerkundung detektiert und wie folgt klassifiziert:

- Dach
- Dach mit PV-Anlage
- Begrüntes Dach

PV-Dächer wurden mit einem speziell entwickelten Ansatz detektiert. Begrünte Dächer können aufgrund verschiedener Bepflanzungsformen nicht unmittelbar einer Versiegelungsart zugewiesen werden; sie nehmen zudem einen sehr geringen Flächenanteil ein. Wie auch die Dächer mit PV-Anlagen werden begrünte Dächer später in die Berechnung von Versiegelungsanteilen einfließen. Die höchst seltenen Ausnahmen, dass begrünte Dächer mit einer PV-Anlage ausgestattet sind, werden nicht näher betrachtet.

4.5.3 GRÜNFLÄCHEN UND GEWÄSSER

Die Klassifizierung von Grünflächen erfolgt in Bezug auf die Vegetationswuchshöhe. Bei dem im Projekt genutzten photogrammetrisch erstellten Höhenmodell muss von einer Genauigkeit ausgegangen werden, die eine robuste Unterteilung von Vegetationshöhen-Niveaus etwa im Bereich von einem halben Meter erlaubt. Dementsprechend wurden für die Klassen der Vegetationswuchshöhe folgende Wertebereiche festgelegt:

- Niedrigwüchsig: 0 m bis 0,5 m Wuchshöhe
- Mittelwüchsig: 0,5 m bis 2 m Wuchshöhe
- Hochwüchsig: 2 m und höher

Klassenbezeichnung	Einstufung
Laubwald	Hochwüchsig
Nadelwald	Hochwüchsig
Mischwald	Hochwüchsig
Gehölze	Hochwüchsig
Sukzessions- und Ruderalflächen	Mittelwüchsig
Röhrichte	Mittelwüchsig
Sträucher	Mittelwüchsig
Rasen	Niederwüchsig
Wiese	Niederwüchsig
Extensives Dachgrün	Gebäudegrün
Intensives Dachgrün	Gebäudegrün
Fassadengrün	Gebäudegrün
Stillgewässer	Gewässer
Fließgewässer	Gewässer

Die räumliche Auflösung bei der Klassifikation der Vegetationswuchshöhen beträgt 0,2 m und ist damit sehr hoch. Sie ist grundsätzlich, ggf. durch räumliche Aggregation, auf allen Planungsebenen anwendbar. Hierfür sind jedoch hohe Rechenkapazitäten notwendig, die in einer Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beachtet werden sollten.

4.6 THEMENSCHWERPUNKT: BLAU-GRÜNE INFRASTRUKTUR

Der Themenschwerpunkt Blau-Grüne Infrastruktur beruht auf sieben Grün-Indikatoren und einem „blauen“ Indikator. Sie sind in Kapitel 9 des Abschlussberichtes näher beschrieben und werden im Folgenden zusammenfassend vorgestellt. Der hier vorgestellte Themenschwerpunkt ist eine der Grundlagen für die Defizit- und Potenzialanalyse (vgl. Abbildung 1).

Folgende **Daten und datenbezogenen Informationen** liegen zum Themenschwerpunkt „Blau-grüne Infrastruktur“ vor (vgl. Kapitel 9 im Abschlussbericht).

Themenkarten Blau-Grüne Infrastruktur				
Datengrundlage (Auflösung)	**Abrufbare Auflösung Geoportal**	**Abrufbare Informationen**	**Datenverfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit**	**Monitoringfähigkeit (abhängig von den Erfassungszyklen)**
Sentinel-2 Multispektral-Daten (10 m) MODIS (für GPP)	100 m-Gitter	• Mittlerer NDVI • Grünvolumen bzw. Grünvolumendefizit • Grünausstattung • Grünraumvernetzung • Grünraumerreichbarkeit • GPP (Gross Primary Production) • Wassererreichbarkeit	Öffentlich zugänglich	Satellitenüberflüge alle 5 Tage, durch Wolkenbedeckung teils jedoch deutlich längere Zyklen

ERLÄUTERUNG GRÜN-INDIKATOREN:

4.6.1 NDVI

Die Einbeziehung des Grünindikators NDVI ist in Kapitel 9.1.1 des Abschlussberichtes näher beschrieben.

Der NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ist ein Maß für die Gesundheit und Dichte von Pflanzen, die sogenannte „Grünvitalität“. Er basiert auf der Messung des von Pflanzen reflektierten Lichts in verschiedenen Wellenlängen: Pflanzen absorbieren rotes Licht zur Photosynthese und reflektieren nahes Infrarotlicht stark. Der NDVI berechnet den Unterschied zwischen diesen Lichtarten und ergibt einen Wert zwischen -1 und +1. Höhere Werte (z. B. 0,6 bis 0,9) zeigen gesunde und dichte Vegetation, während niedrigere Werte auf wenig oder gar keine Pflanzen hinweisen.

Beispielhafte graphische Darstellung (Land, Regionen und Kommunen):

In diesem Projekt wird der NDVI aus Sentinel 2 Level 2-Daten der Sommermonate der Jahre 2018 bis 2022 berechnet. Dies ist sinnvoll, da zum einen mit 10 m eine räumlich recht hohe Auflösung und zum anderen mit circa 2 bis 3 Aufnahmen pro Woche eine zeitlich sehr hohe Wiederholrate gegeben ist, in der die Daten bereitgestellt werden. Nachfolgend sind in den Ergebniskarten von Abbildung 17 der mittlere NDVI auf Landesebene und in Abbildung 18 die detaillierteren Auswertungen des mittleren NDVI für die Kommunen Frankfurt, Marburg, Witzenhausen und Waldeck dargestellt.

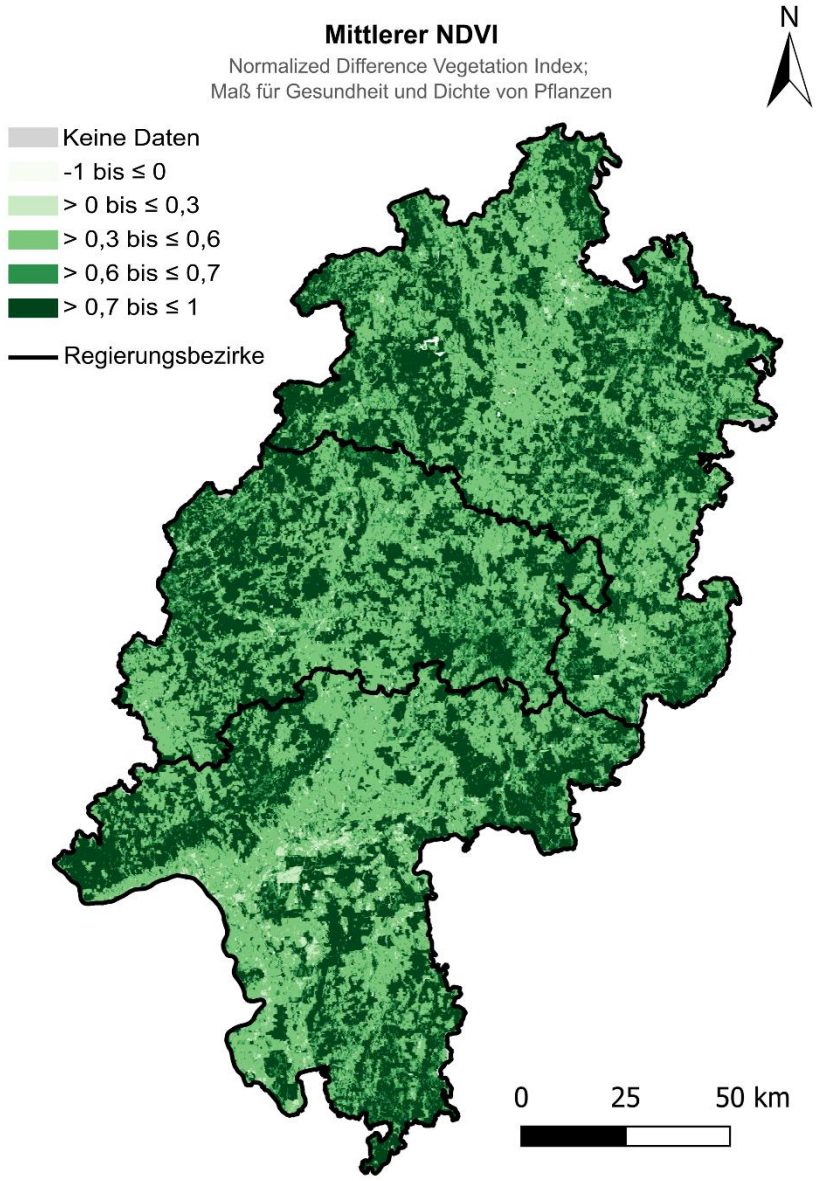


Abbildung 17: Grünindikator “Grünvitalität” (NDVI) für ganz Hessen.

Im Ergebnis ist der NDVI als Indikator für die Vitalität der Vegetation sowohl für die Identifikation erhaltenswerter Kühlflächen (hohe NDVI-Werte) als auch für die Analyse von Defiziten an kühlender Vegetation geeignet - insbesondere in Kombination mit Temperaturdaten und Landbedeckungsklassen.

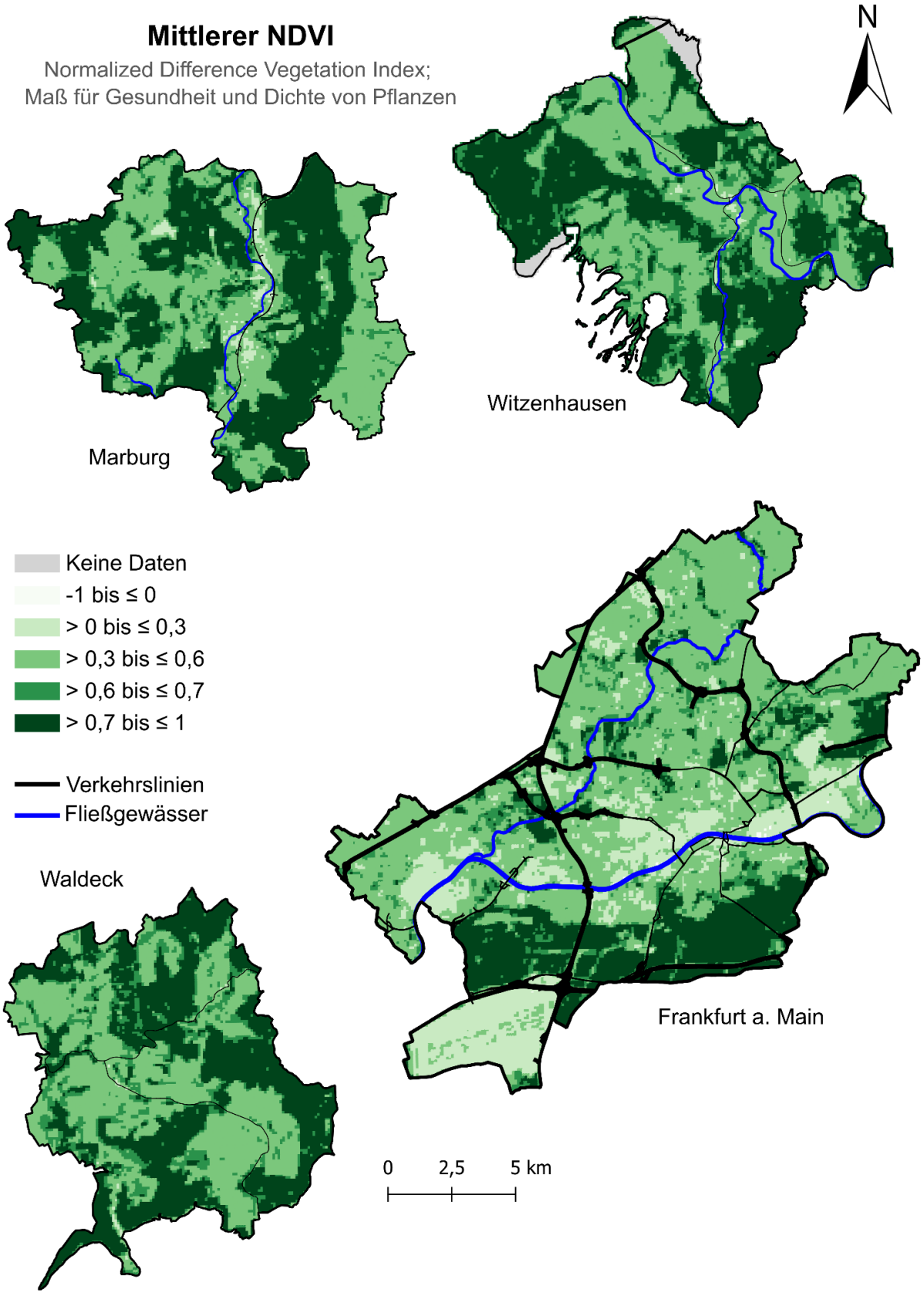


Abbildung 18: NDVI für ausgewählte Kommunen.

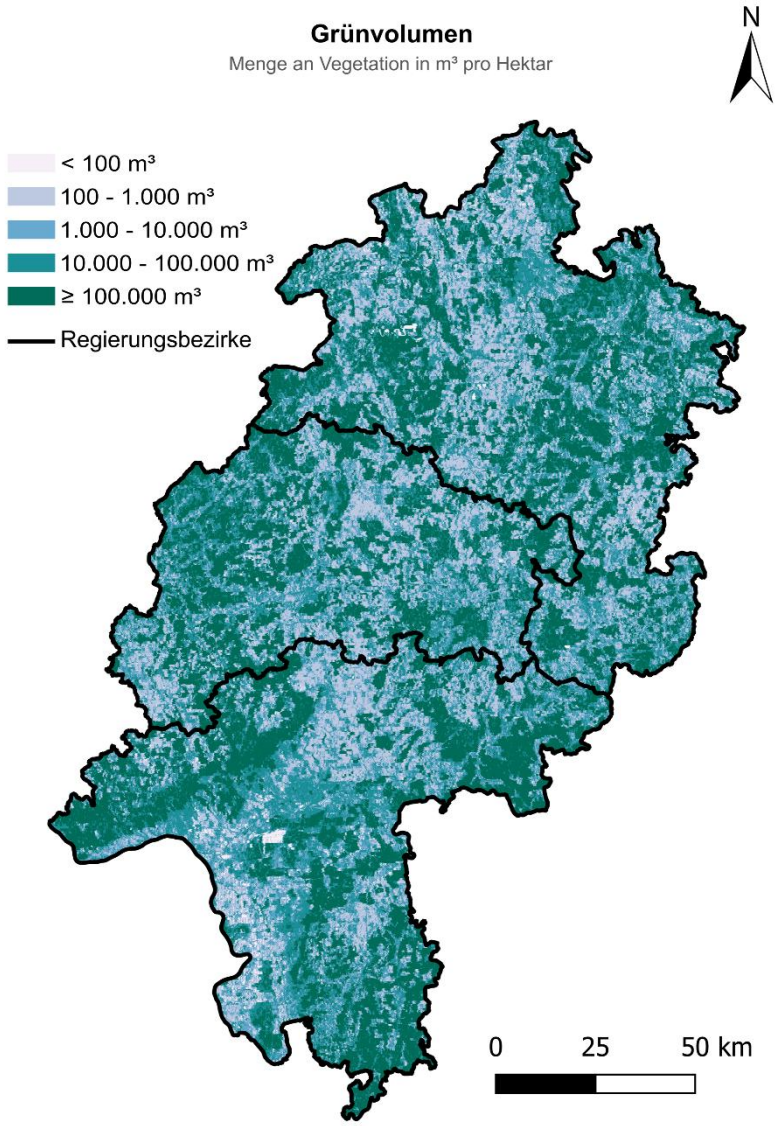
4.6.2 GRÜNVOLUMEN / GRÜNVOLUMENDEFIZIT

Der Indikator „**Grünvolumen**“ ist in Kapitel 9.1.3 des Abschlussberichtes näher beschrieben. Er bemisst das zur Verfügung stehende Grünvolumen pro Flächeneinheit (m^3/m^2). Als Berechnungsgrundlage dienen die Ergebnisse aus der Landbedeckungsanalyse, im Geoportal werden sie auf ein 100 m-Gitter aggregiert.

Für die Grünvolumenberechnung werden die Daten aus dem Digitalen Oberflächenmodell und die Vegetationsklassen der Landbedeckungsklassifikation miteinander verschnitten und auf die Flächeneinheit normiert.

Beispielhafte graphische Darstellungen (Land, Regionen und Kommunen):

Nachfolgend sind in den Ergebniskarten von Abbildung 19 das Grünvolumen auf Landesebene sowie für die Regionen und von Abbildung 20 die detaillierteren Auswertungen des Grünvolumens für die Kommunen Frankfurt, Marburg, Witzenhausen und Waldeck dargestellt.



Insbesondere zeigt Abbildung 20 auf kommunaler Ebene, dass v. a. Waldgebiete ein erhöhtes **Grünvolumen** aufweisen, während in Offenlandregionen und Städten nur geringe bis Null-Werte vorliegen. Versiegelungsflächen und Gewerbeflächen werden separat dargestellt und sind von der Berechnung ausgeschlossen.

Im Ergebnis unterstützt das Grünvolumen einerseits die Identifikation und Analyse von durch Vegetationsverdunstung kühlend wirkenden Flächen. Andererseits können durch eine gemeinsame Betrachtung von Landbedeckung, Vegetationswuchshöhen und NDVI Potenziale für eine Grünverdichtung mit entsprechenden Maßnahmentypen ermittelt werden.

Abbildung 19: Grünindikator „Grünvolumen“ für ganz Hessen.

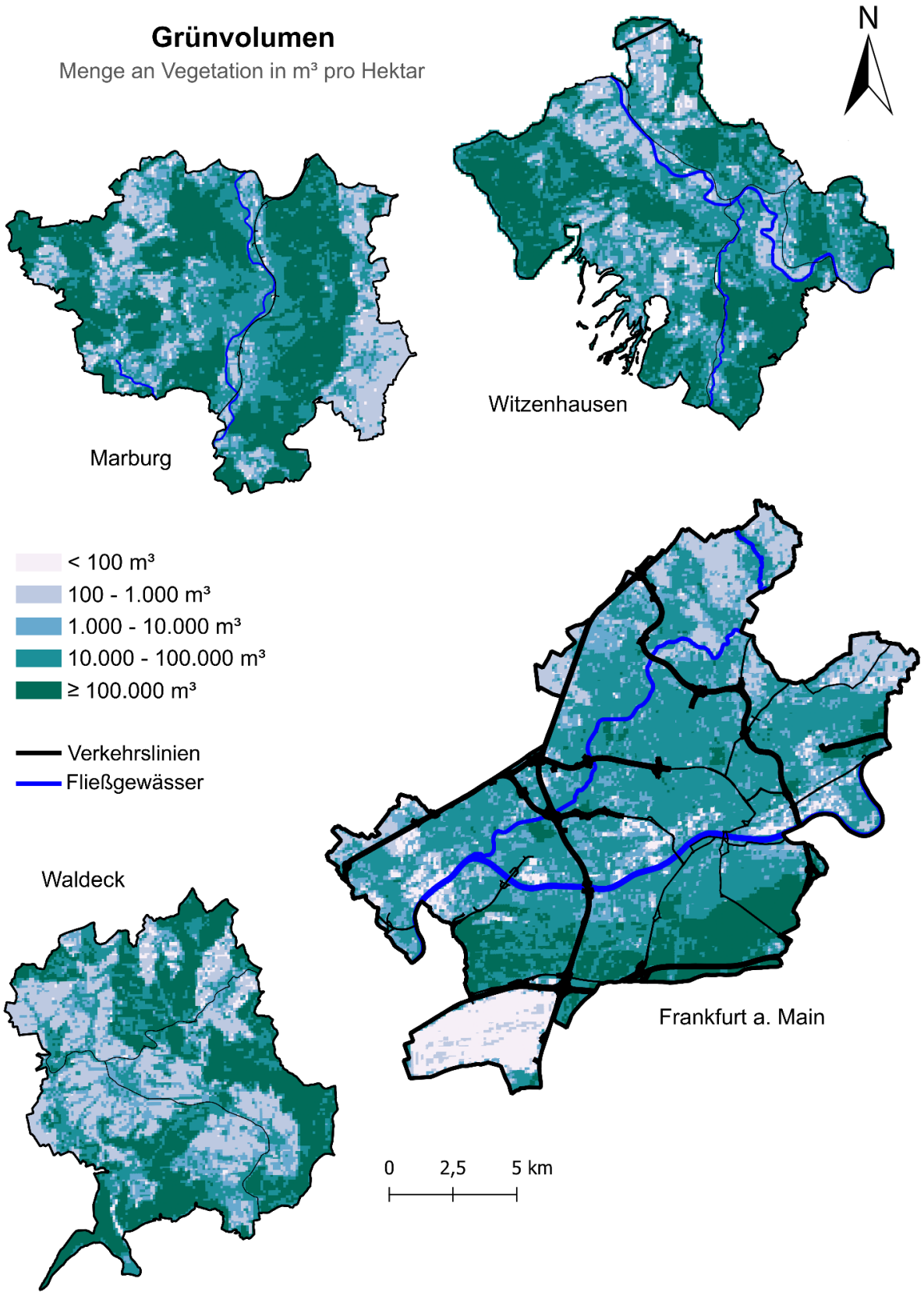


Abbildung 20: Grünindikator "Grünvolumen“ für ausgewählte Kommunen.

Der gesondert betrachtete Indikator „**Grünvolumendefizit**“ ist in Kapitel 13 des Abschlussberichts näher beschrieben.

Er charakterisiert den Mangel an Vegetationsvolumen (hier: Grünvolumen), das nötig wäre, um durch Verdunstung und Beschattung eine bestimmte Kühlwirkung in dem betrachteten urbanen Raum herbeizuführen. Konkret wird berechnet, wieviel Grünvolumen nötig wäre, um die Kategorien „Universeller Hotspot Tag und Nacht“ und „Universeller Hotspot Tag mit nächtlicher Abkühlung“ bezüglich der „Tagwerte“ **eine Kategorie herabzustufen**.

Als Berechnungsgrundlage dienen die oben genannten universellen Hot- und Coldspotkategorien, die Landoberflächentemperatur, das Grünvolumen und die Versiegelung (als Indikator für die Fähigkeit des Bodens Wasser zu speichern und zur Verdunstung bereitzustellen) auf Basis der Regierungsbezirke. Für jeden Regierungsbezirk wird die Verteilung des Grünvolumendefizits in vier Klassen unterteilt, neben „kein Defizit“ (= 0) die Klassen „geringes Defizit“ (1 - 33 %-Perzentil), mittleres Defizit (34 - 66 %-Perzentil) und „hohes Defizit“ (≥ 67 %- Perzentil). Dies ermöglicht eine vergleichbare Analyse der regionalen Unterschiede im Defizitniveau. Bereiche „ohne Daten“ sind alle übrigen Kategorien der universellen Hot- und Coldspots, die nicht in die Betrachtung eingegangen sind. Diese visuelle Analyse unterstützt dabei, gezielte Strategien zur Verbesserung des Grünvolumens zu entwickeln, um urbane Hitzeinseln zu reduzieren.

Beispielhafte graphische Darstellung (Land, Regionen und Kommunen):

Abbildung 21 zeigt für die Ebene von **Land und Regionen**, dass Defizite in stark urbanisierten Regionen sowie in Gebieten mit hohem Versiegelungsgrad besonders ausgeprägt sind. Vor allem größere Städte und Ballungsräume weisen hohe Defizite auf. Im Kontrast dazu zeigen weniger dicht besiedelte oder ländlich geprägte Regionen ein deutlich geringeres Grünvolumen-Defizit.

Abbildung 22 zeigt für ausgewählte Gemeinden (Marburg, Witzenhausen, Waldeck und Frankfurt am Main) eine präzisere Analyse auf Ebene der **Kommune**. Sie macht deutlich, dass selbst innerhalb einzelner Gemeinden erhebliche räumliche Unterschiede im Grünvolumendefizit bestehen. In städtischen Zentren und entlang wichtiger Verkehrsachsen sind die Defizite häufig besonders hoch, hingegen zum Beispiel in Randgebieten geringer.

Im Ergebnis zeigt sich, dass mit steigendem „Grünvolumendefizit“ auch der Bedarf an der Entwicklung von hochwüchsiger und beschattender Vegetation bzw. an großen Grünvolumina im betrachteten Raum zunimmt. Gleichzeitig sind in Räumen mit Maßnahmen zur Senkung des Grünvolumendefizits Strategien zum vermehrten Niederschlagsrückhalt zur besseren Wasserversorgung der Vegetation von besonderer Bedeutung. Besonders zu beachten ist auch, dass in nächtlichen Kaltluftentstehungsgebieten oder Kaltluftbahnen keine hochwüchsige Vegetation zur Erhöhung des Grünvolumens vorzusehen ist, da diese Räume zur Minderung der sommerlichen Hitzebelastung offen zu halten sind.

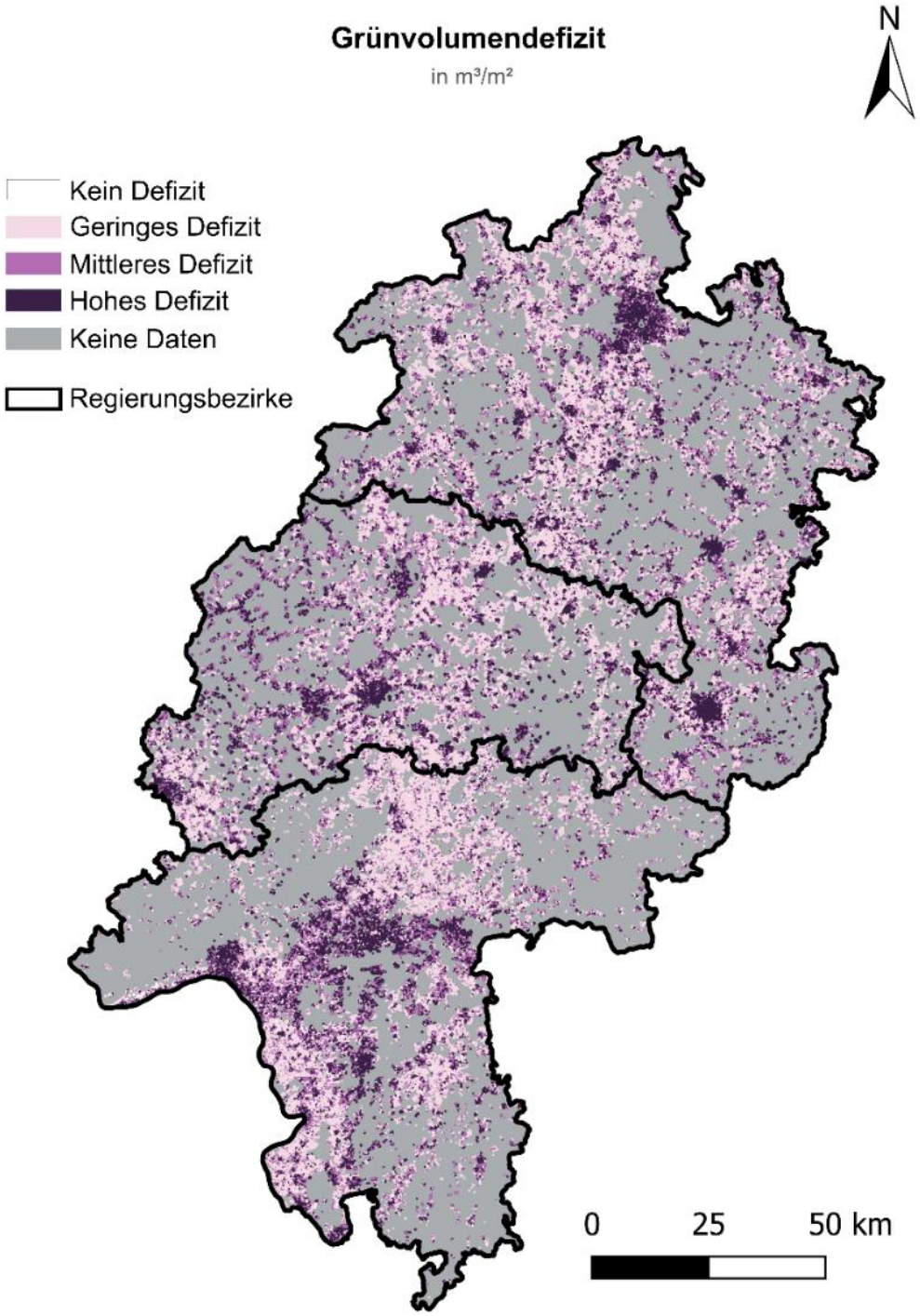


Abbildung 21: Grünindikator "Grünvolumendefizit“ für ganz Hessen.

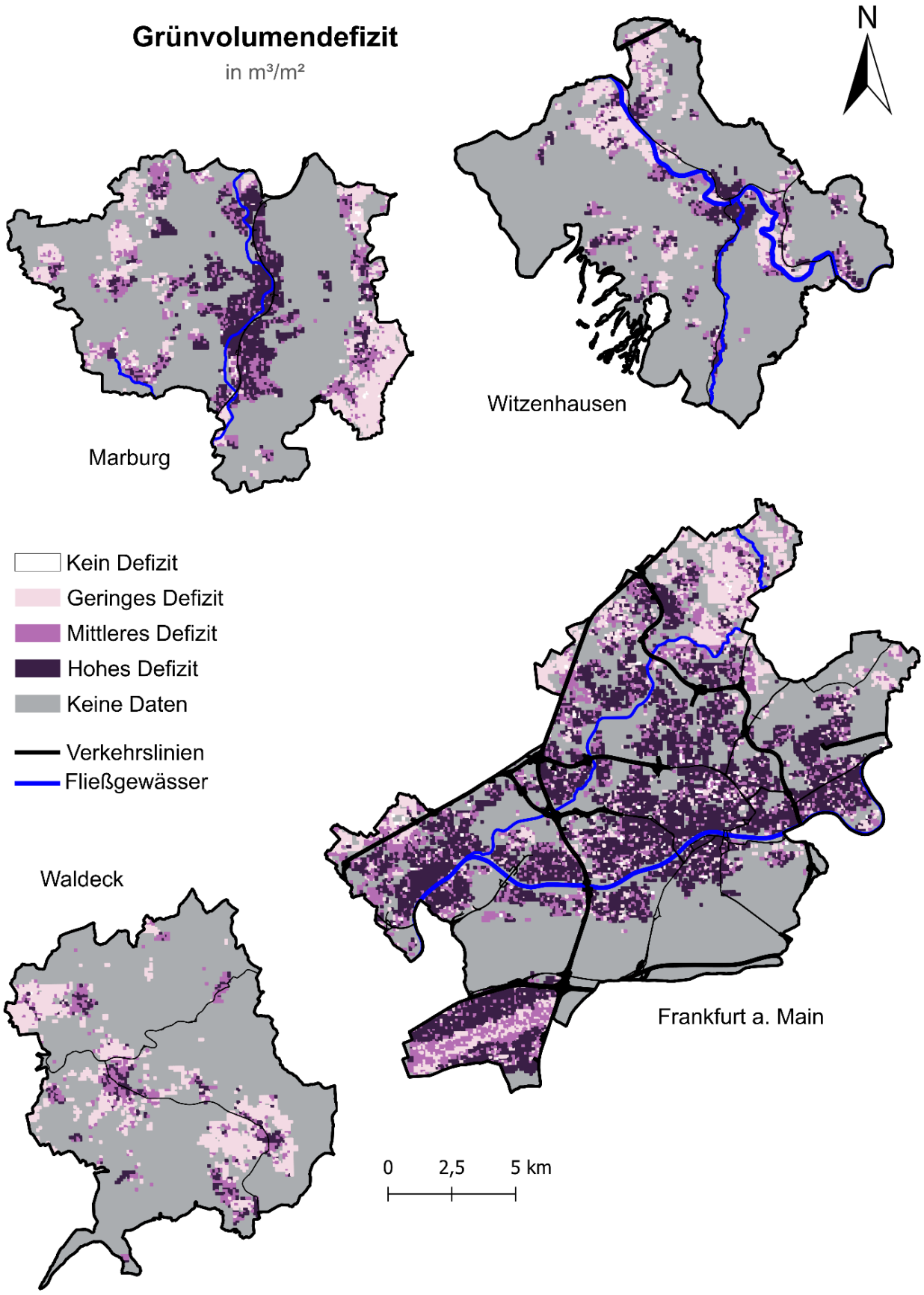


Abbildung 22: Grünindikator "Grünvolumendefizit“ für ausgewählte Gemeinden.

4.6.3 GRÜNAUSSTATTUNG

Der Grünindikator „Grünausstattung“ ist in Kapitel 9.1.2 des Abschlussberichts näher beschrieben.

Er misst für eine Flächeneinheit den Anteil an Vegetationsfläche. Es handelt sich daher um eine normierte Flächeneinheit (m^2/m^2), die meist in Prozent angegeben wird. Als Berechnungsgrundlage dienen die Ergebnisse aus der Landbedeckungsanalyse; im Geoportal werden sie auf ein 100 m-Gitter aggregiert. In die Grünflächenberechnung gehen dabei sowohl die drei Vegetationsklassen (niedrig-, mittel-, hochwüchsig) als auch begrünte Dächer ein.

Beispielhafte graphische Darstellungen (Land, Regionen und Kommunen):

In der Ergebniskarte von Abbildung 23 ist die Grünausstattung für die **Land**esebene sowie die **Regionen** dargestellt.

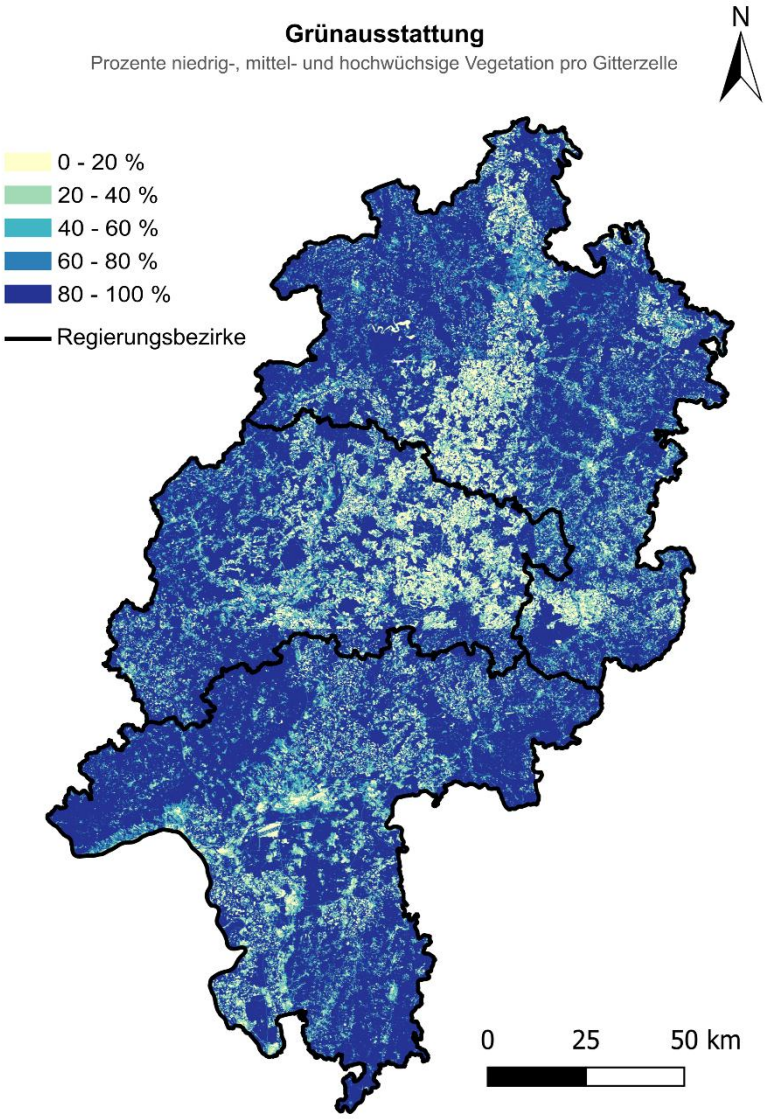


Abbildung 23: Grünindikator „Grünausstattung“ für Hessen.

Abbildung 24 zeigt die Grünausstattung für ausgewählte Gemeinden (Marburg, Witzenhausen, Waldeck und Frankfurt am Main) im 100 m-Gitter. Erwartungsgemäß ergibt sich für Waldgebiete und viele Offenlandflächen ein relativ hoher Prozentsatz an Grünausstattung. Innenstadtbereiche, Industriegebiete und Flughafengebäude bzw. -infrastruktur haben dagegen eine Grünausstattung von unter 20 %. Die räumliche Trennschärfe des 100 m-Gitters lässt sich u. a. gut an den Autobahnen und an den Landebahnen des Frankfurter Flughafens bzw. deren Grünstreifen erkennen.

Im Ergebnis ist der Indikator „Grünausstattung“ u. a. in Kombination mit den Landbedeckungs- bzw. Versiegelungsklassen für die Analyse von Potenzialen und Defiziten in der Klimaanpassungsplanung geeignet.

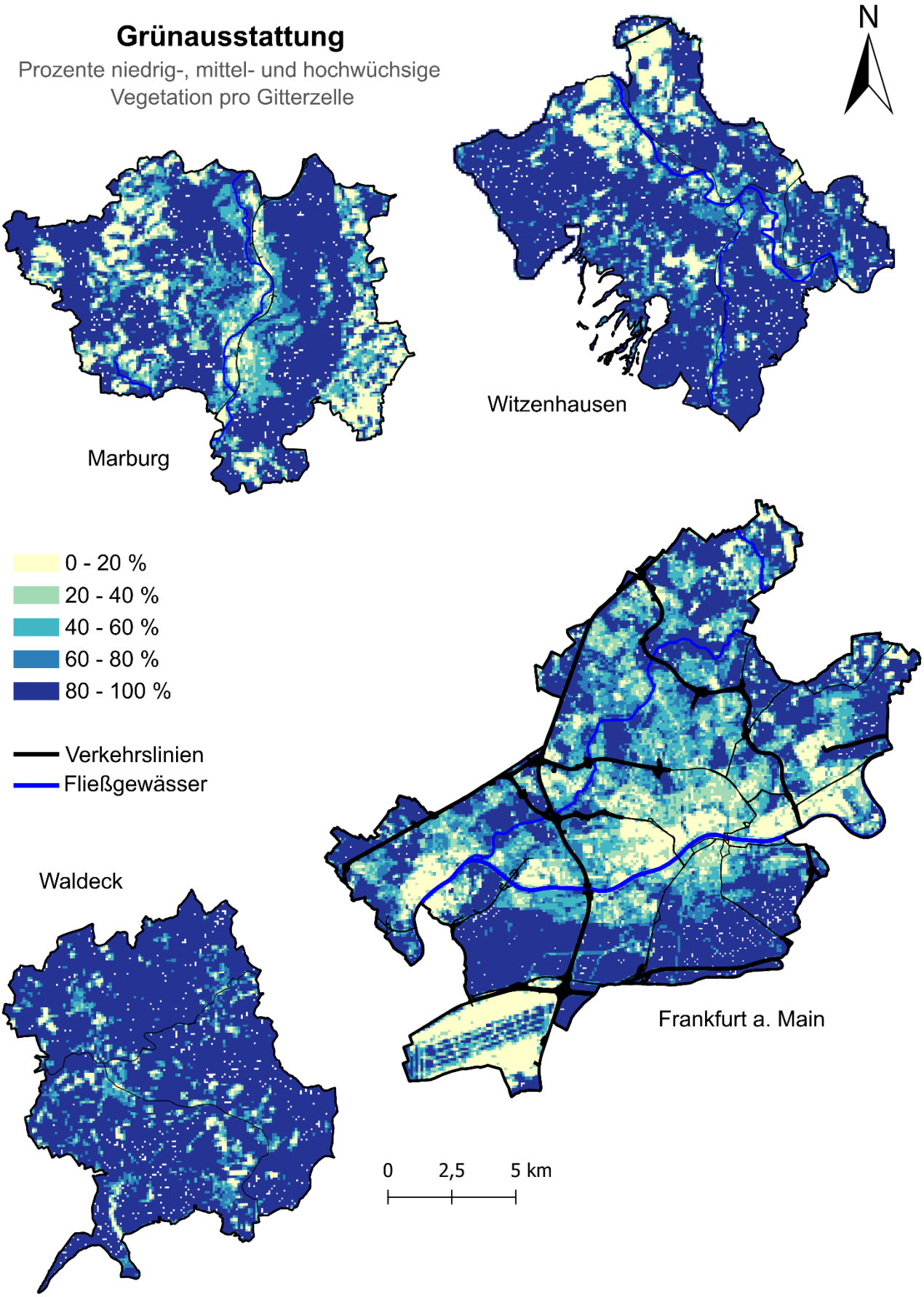


Abbildung 24: Karte der Grünausstattung für ausgewählte Gemeinden.

4.6.4 GRÜNRAUMVERNETZUNG

Die „Grünraumvernetzung“ ist in Kapitel 9.2.2 des Abschlussberichts näher beschrieben.

Die Grünraumvernetzung ist ein Indikator, der den räumlichen Zusammenhang von Grünflächen bemisst. Dabei werden Grünflächen anhand ihrer Nachbarschaft zu anderen Grünflächen beschrieben. Ausgehend von einer einheitlichen räumlichen Einheit (Gitterzelle) wird geprüft, ob eine benachbarte Gitterzelle ebenfalls Grünflächen beinhaltet und wie hoch der Grünflächenanteil in dieser ist (eine sogenannte Gewichtung). Hohe Werte für die Grünraumvernetzung ergeben sich, wenn eine Zelle in einem Verbund von Nachbarn mit hohem Grünflächenanteil liegt. Gitterzellen ohne signifikanten Grünanteil werden nicht in die Berechnung einbezogen. Je weniger Nachbarzellen als „Grün“ identifiziert sind und je geringer deren einzelnen Grünflächenanteile, umso niedriger fällt der Indikatorwert aus.

Als Berechnungsgrundlage, ob und in welcher Gewichtung eine Gitterzelle einbezogen wird, dient der Grün-Indikator „NDVI“. Begrünte Dächer sind aus der Betrachtung ausgeschlossen. Es erfolgt eine Aggregation auf ein 100 m-Gitter für das Geoportal.

Beispielhafte graphische Darstellungen (Frankfurt):
Abbildung 25 zeigt die Grünraumvernetzung für den Raum Frankfurt im 100 m-Gitter. Die weißlich eingefärbten Bereiche tragen nicht zur Grünraumvernetzung bei. Hellgrüne Bereiche sind wenig vernetzt; je dunkler der Grünton, umso besser die Vernetzung. Waldgebiete als große Grünflächen zeigen eine hohe Vernetzung, aber auch zusammen-hängende, urbane Grünstrukturen in der Innenstadt werden erkennbar.

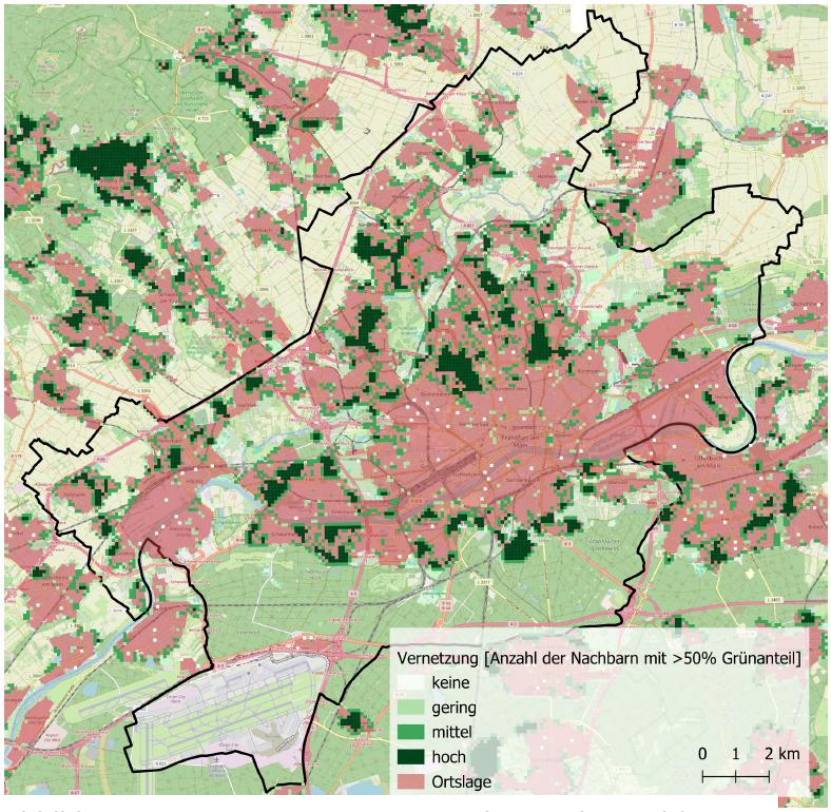


Abbildung 25: Grünraumvernetzung der Stadt Frankfurt.

Im Ergebnis ermöglicht die Darstellung der Grünraumvernetzung die Identifizierung von Orten und Achsen, in denen Grünraumvernetzung gestärkt werden sollte (z. B. durch die Anlage von öffentlichen Grünflächen).

4.6.5 GRÜNERREICHBARKEIT

Die „Grünerreichbarkeit“ ist in Kapitel 9.2.3 des Abschlussberichts näher beschrieben. Sie ist ein Indikator, der ausgehend von Siedlungsbereichen die Entfernung zu Grünflächen bemisst. Maßgeblich sind hierfür fußläufige Distanzen. Ausgehend von einer Luftliniendistanz um Siedlungsbereiche (100 m-Gitter der Stadtstrukturtypen) werden die Grünflächen - differenziert in niedrig-, mittel- und hochwüchsig - entsprechend des Landbedeckungsmodells erfasst und summiert. Zusätzlich werden im Bericht unterschiedliche Grünflächengrößen berücksichtigt, da sie eine unterschiedliche Bedeutung für die Erholung von Bewohnern:innen, als auch einen unterschiedlichen Effekt auf das urbane Klima aufweisen. Dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung folgend, wird deswegen die Grünerreichbarkeit unterschieden nach Flächengröße und fußläufiger Distanz beschrieben. Der Indikator beschreibt somit die Erreichbarkeit von Grünflächen >1 ha innerhalb von 300 m und von Grünflächen >10 ha innerhalb von 700 m getrennt. Dies gilt jeweils für die drei Klassen niedrig-, mittel- und hochwüchsig.

Beispielhafte graphische Darstellungen (Marburg):
Anhand des 100 m-Gitters der Stadtstrukturtypen zeigt Abbildung 26 die Grünerreichbarkeit im Siedlungsbereich der Stadt Marburg für hochwüchsiges Grün, welches v. a. durch die Beschattungseigenschaft an heißen Tagen hohe Relevanz hat. Die Aussagekraft dieses Indikators lässt sich am leichtesten anhand der höchsten Werte beschreiben.

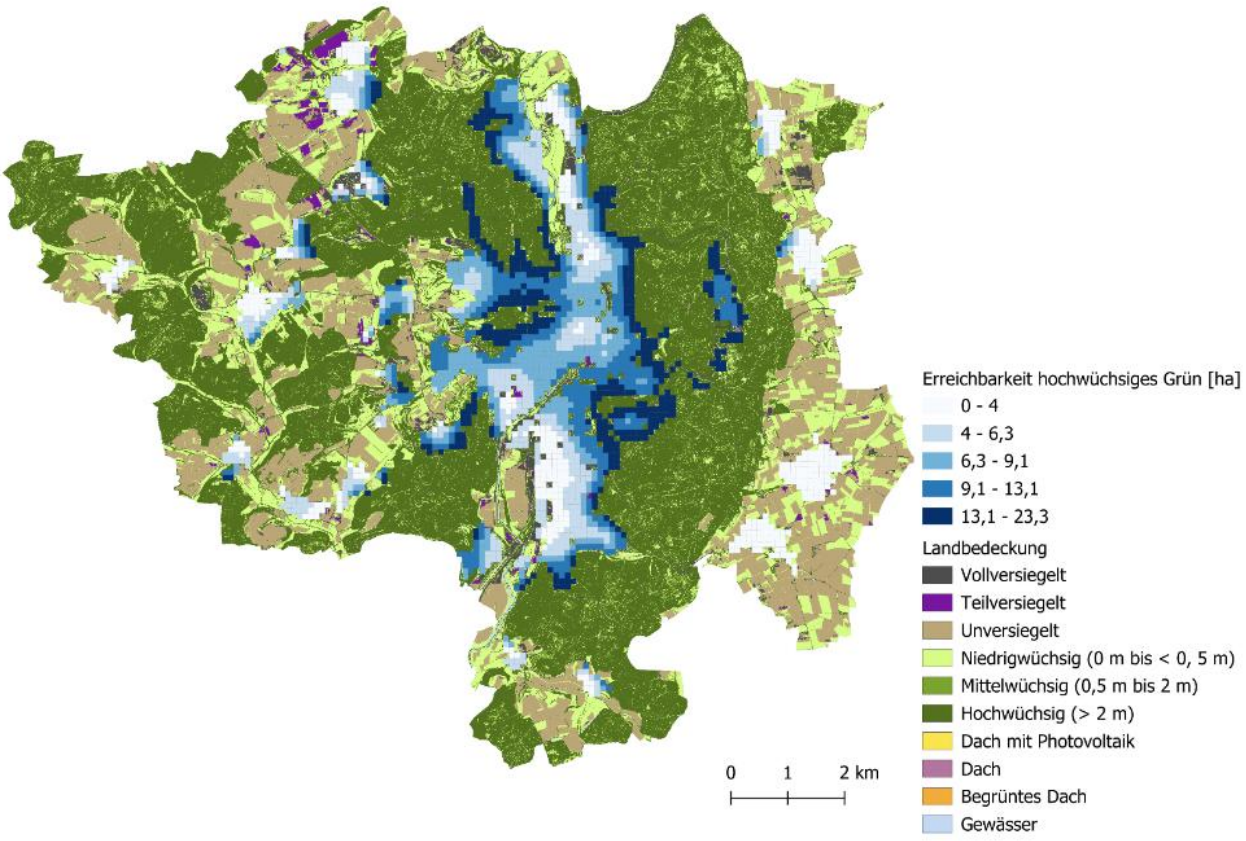


Abbildung 26: Erreichbarkeit von Flächen hochwüchsigen Grüns >1 ha in 300 m Luftlinie im Siedlungsbereich der Stadt Marburg. Hinweis: die Landbedeckung enthält in diesem Beispiel nicht die Klasse FF-PV.

So haben die Siedlungsbereiche am Rand der Kernstadt die höchste Grünerreichbarkeit, da sie in unmittelbarer Nähe des Waldes liegen. Innenstadtgebiete sind dagegen durch eine geringere Grünerreichbarkeit gekennzeichnet. Die geringste Erreichbarkeit von hochwüchsigem Grün weisen Siedlungsbereiche in den Vororten umgeben von landwirtschaftlichen Flächen auf.

Im Ergebnis gibt der Indikator Grünerreichbarkeit einen ersten Hinweis auf die fußläufige Erreichbarkeit des vorhandenen Grüns hinsichtlich dessen Eigenschaften (niedrigwüchsig, mittelwüchsig, hochwüchsig) und Größe. Zusätzlich kann dieser Grünindikator die Planung dabei unterstützen, Grün-Maßnahmen für die menschliche Erholung zielgerichtet zu entwickeln. Insbesondere in räumlichen Handlungsschwerpunkten universeller Hotspots, wo aufgrund der Stadtstrukturen nur begrenzte Möglichkeiten zur Erhöhung des Grünvolumens bestehen, sind sie von besonderer Bedeutung. In der Umsetzung können auch spezifische Maßnahmentypen wie Pocket-Parks vorgesehen werden.

4.6.6 GPP (GROSS PRIMARY PRODUCTION)

Die **GPP (Gross Primary Production)** ist in Kapitel 9.1.4 des Abschlussberichts näher beschrieben. Die GPP ist als ein Daten-Produkt der Mission „MODIS“ für ländliche Gebiete verfügbar. Es wird über einen modellbasierten Ansatz aus einem 8-tägigen Komposit von Aufnahmen mit einer räumlichen Auflösung von 500 m berechnet. Im Forschungsprojekt sind die MODIS-Daten der Sommermonate der Jahre 2018 bis 2022 genutzt worden, um eine mittlere GPP zu bestimmen. Vereinfacht beschrieben bezieht sich die GPP auf die Menge an organischer Substanz, die von Pflanzen durch Photosynthese in einer bestimmten Zeitspanne produziert wird. Daher ist die Berechnung der GPP nur außerhalb bebauter und besiedelter Gebiete sinnvoll. Als ökologischer Index wird GPP in Kilogramm Kohlenstoff (in Pflanzen gespeichert) pro Quadratmeter (kgm^{-2}) Landfläche definiert. Somit spiegelt die GPP wichtige Kohlenstoffspeicher der Landschaft wider, die in der Regel zugleich wertvolle Wasserspeicher sind.

Beispielhafte graphische Darstellungen (Land, Regionen und Kommunen):

Die beiden folgenden Seiten zeigen die Ergebniskarten des Grünindikators GPP sowohl auf Landes- als auch auf Kommunalebene.

Abbildung 27 zeigt die Ergebniskarte zur GPP auf Ebene von Land und Regionen. In Abbildung 28 ist zu erkennen, dass ländliche Regionen wie die Gemeinden Waldeck und Witzenhausen höhere GPP-Werte aufweisen. Im Gegensatz dazu zeigen die urbanen Gebiete bspw. von Frankfurt am Main niedrigere Werte auf. Dies lässt auf eine geringere Vegetationsdichte, eine begrenzte Photosyntheseleistung und insgesamt vergleichsweise geringe CO_2-Speicherfähigkeit der Fläche schließen.

Im Ergebnis eignet sich die GPP vor allem als Indikator im Kontext des Klimaschutzes, da es die in Pflanzen gespeicherte Kohlenstoffmenge anzeigt. Dies bedeutet, dass Bereiche mit hoher GPP einen wertvollen Kohlenstoffspeicher repräsentieren, was in der Regel mit einer erhöhten Wasserspeicherfunktion des Standortes einhergeht (z. B. Wälder). Aufgrund der räumlichen Auflösung der Rohdaten von 500 m ist die GPP

jedoch für die lokale Planungsebene nicht so detailliert verfügbar, wie das zugrundeliegende 100 m-Gitter vermuten lässt. **Großräumige CO_2- und in der Regel zugleich Wasserspeicher mittels GPP sind daher besonders für die regionale und landesweite Planungsebene von Relevanz.**

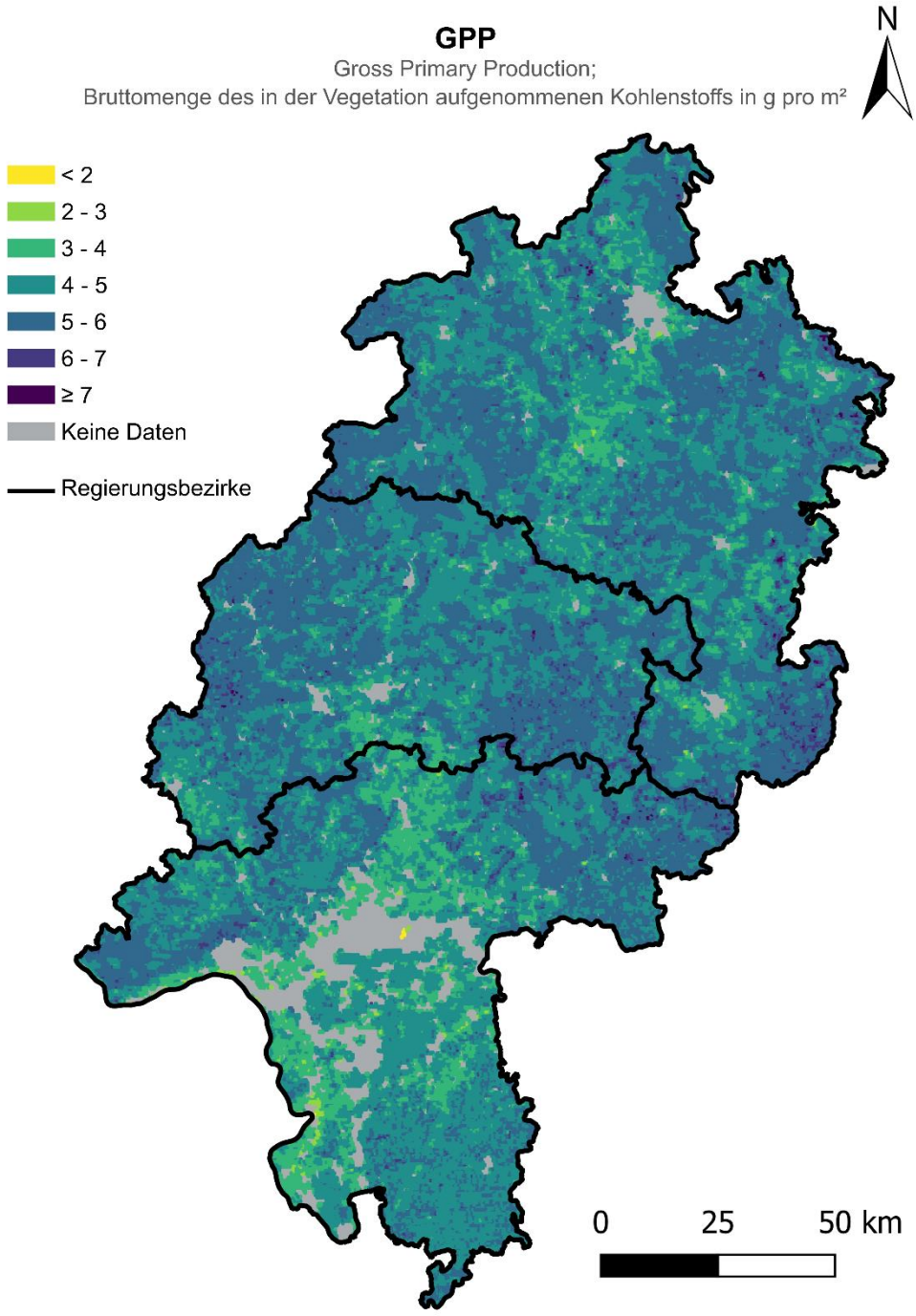


Abbildung 27: Visualisierung der mittleren GPP als Bruttomenge des in der Vegetation aufgenommenen Kohlenstoffs in gm^{-2} für ganz Hessen.

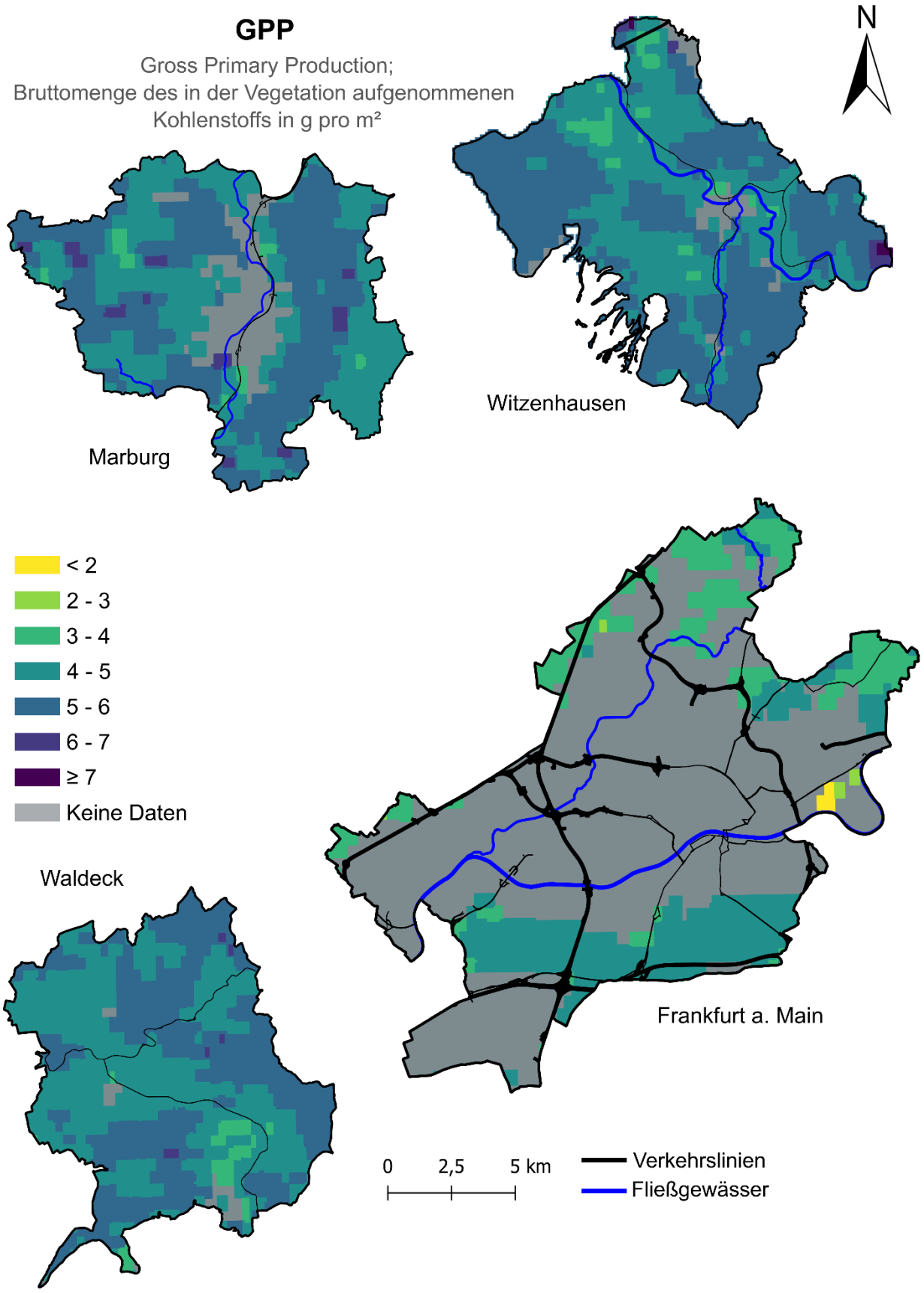


Abbildung 28: Visualisierung der mittleren GPP als Bruttomenge des in der Vegetation aufgenommenen Kohlenstoffs in gm^{-2} beispielhaft für ausgewählte Gemeinden.

4.6.7 WASSERERREICHBARKEIT

Die **Wassererreichbarkeit** ist in Kapitel 9.3.1 des Abschlussberichts näher beschrieben. Sie wird auf Basis von ATKIS-Daten berechnet, die Informationen zu Wasserflächen wie Flüssen, Seen und anderen Gewässern enthalten. Zunächst werden diese Daten aufbereitet und in das 100 m-Gitter überführt. Hierbei wird für jede Gitterzelle der prozentuale Anteil an Wasserflächen berechnet. Um auch den Einfluss umliegender Wasserflächen zu berücksichtigen, wird für jede Gitterzelle eine Betrachtung der Nachbarschaft in zwei Radien durchgeführt: 200 m (innere Nachbarschaft) und 300 m (äußere Nachbarschaft). Diese Nachbarschaften werden mithilfe von Puffern und einem räumlichen Index effizient berechnet. Der ideale Wert für die Wassererreichbarkeit ist somit +1, und ein Wert 0 bedeutet keine Wassererreichbarkeit innerhalb des gewählten Puffers.

Beispielhafte graphische Darstellungen (Land, Regionen und Kommunen):

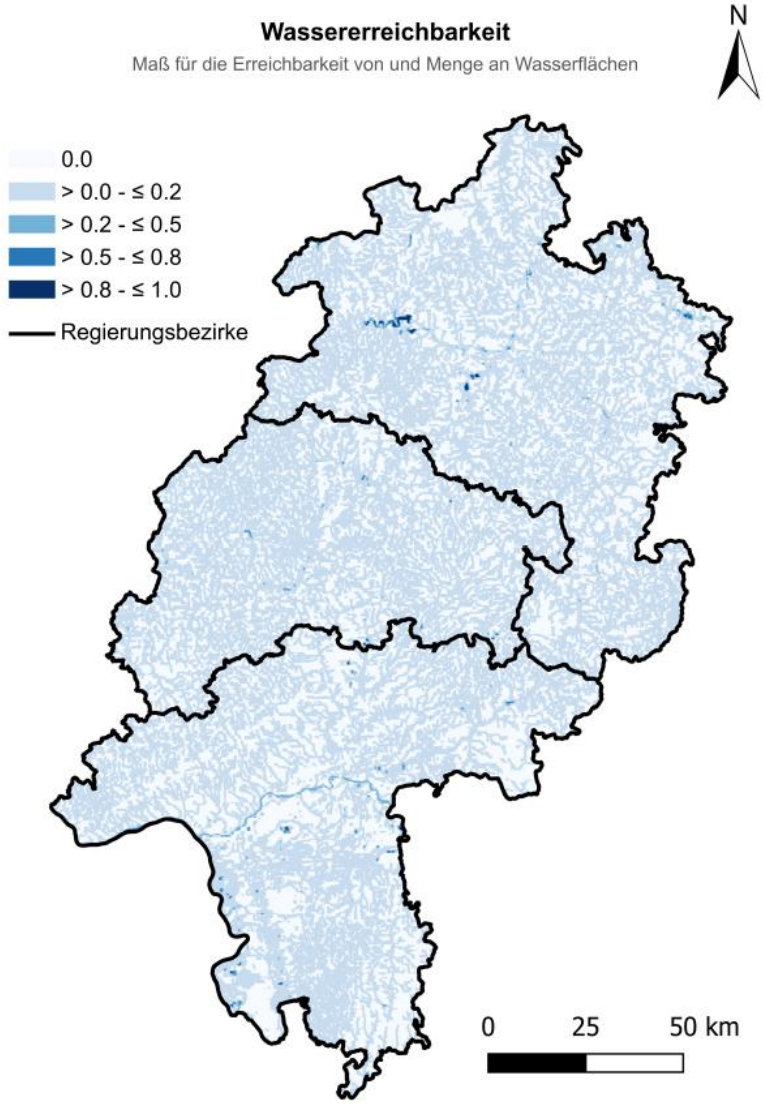


Abbildung 29 zeigt die Wassererreichbarkeit für Hessen, ausgedrückt als Maß für die Erreichbarkeit und Menge an Wasserflächen innerhalb einer 300 m-Nachbarschaft um die jeweilige Gitterzelle. Die Farbskala reicht von hellblau (keine Wasserflächen: 0) bis dunkelblau (hohe Wassererreichbarkeit: 0,8 bis 1). Die Verteilung verdeutlicht, dass die Wassererreichbarkeit in Hessen regional stark variiert, mit einer Konzentration höherer Werte in Gebieten mit größeren Flüssen wie dem Rhein und der Fulda sowie in Regionen mit Seen oder Stauseen. Die Ergebnisse zeigen, dass Wasserflächen in weiten Teilen Hessens nur begrenzt verfügbar sind, was für die klimatische Wirkung und die Planung von blauer Infrastruktur relevant ist.

Abbildung 30 bietet eine detailliertere Darstellung der Wassererreichbarkeit auf Ebene der **Kommune** für ausgewählte Gemeinden.

Abbildung 29: Visualisierung der Wassererreichbarkeit für Hessen. Räumliche Einheit ist hierbei die jeweils betrachtete Gitterzelle sowie die 300 m-Nachbarschaft.

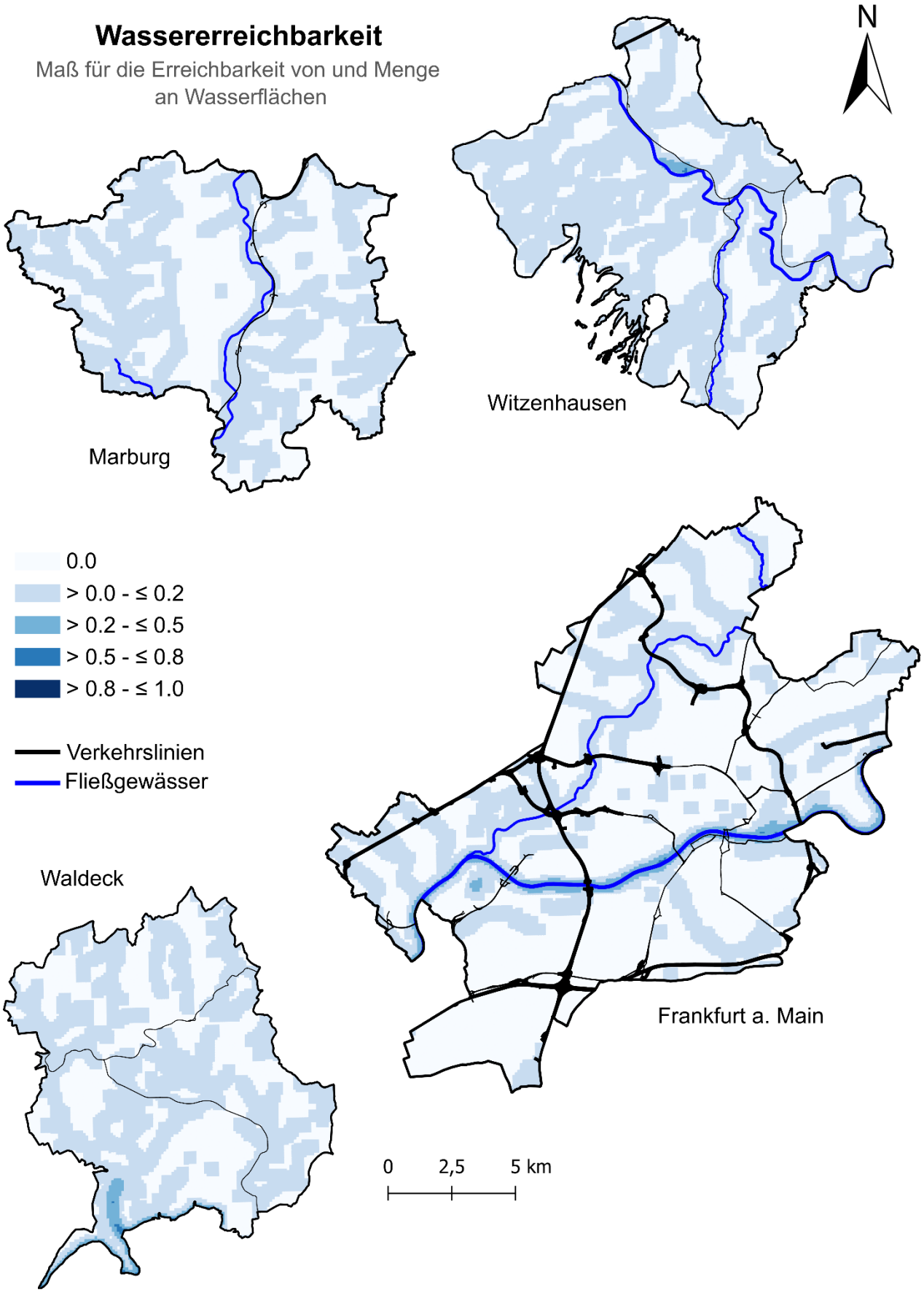


Abbildung 30: Themenkarte "Wassererreichbarkeit" für ausgewählte Gemeinden.

4.7 THEMENSCHWERPUNKT: STADTSTRUKTURTYP

Der Themenschwerpunkt Stadtstrukturtyp (SST) ist in Kapitel 10 des Abschlussberichts näher beschrieben. Die Stadtstrukturtypen bilden eine zentrale Grundlage insbesondere für die Defizit- und Potenzialanalyse (siehe Abbildung 1). Folgende **Daten und datenbezogenen Informationen** liegen hierzu vor:

Themenkarte Stadtstrukturtyp				
Datengrundlage (Auflösung)	**Abrufbare Auflösung Geoportal**	**Abrufbare Informationen**	**Datenverfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit**	**Monitoringfähigkeit (abhängig von den Erfassungszyklen)**
ATKIS (Gebäudescharf) inkl. Gebäudemodelle des BKG mit LoD-2	100 m-Gitter	Stadtstrukturtyp	Im Forschungsprojekt aus komplexem KI-Verfahren ermittelt	In Abhängigkeit der ATKIS-Aktualisierung, i.d.R. jährlich.

Erläuterung:

In der Klimaanpassung ist eine automatisierte Typisierung des Gebäudebestandes und des baulich geprägten Raumes von Interesse, die die Planung und Verortung von Klimaanpassungsmaßnahmen erleichtert. Die hier vorliegende Untergliederung von Stadtstrukturtypen basiert auf der Kombination von geometrischen Gebäudeeigenschaften und Versiegelungsmaßen. Mittels maschinellen Lernens wurde der gesamte Gebäudebestand Hessens entsprechend klassifiziert. Eine genauere Beschreibung des Verfahrens, das am Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) entwickelt und auf die Belange von Hessen im Rahmen des Projektes angepasst wurde, enthält Kapitel 10.5 im Abschlussbericht.

Eine Kurzbeschreibung der für Hessen entwickelten acht Stadtstrukturtypen, die für ganz Hessen berechnete Häufigkeit ihres Vorkommens pro Gitterzelle (Verteilung) sowie eine beispielhafte Darstellung der SST-Gitterzellen für die Stadt Marburg enthält Abbildung 31. Hessenweit überwiegt sehr stark der SST-Typ Einfamilienhäuser, der 4-mal häufiger vorkommt als die zweithäufigsten SST-Typen „Bebauung hoher Dichte“ und „großflächige, niedrige Bebauung“ (z. B. Gewerbeflächen).

Beispielhafte graphische Darstellungen (Kommune):

Stadtstrukturtypen sind vorrangig für die Planung auf kommunaler Ebene geeignet. Nachfolgend wird daher ihre Darstellung am Beispiel der Stadt Marburg gezeigt.

Abbildung 31 (links) zeigt die Einteilung der Stadtstrukturtypen, die im Allgemeinen in folgende Gebäudetypen eingeteilt werden können (vgl. Kapitel 10 des Abschlussberichts): Bebauung hoher Dichte, Mehrfamilienhäuser, Zeilenbebauung, Blockrandbebauung, Einfamilienhäuser, großflächige niedrige Bauten

und Nebengebäude. Die Einzelgebäude können aufgrund ihrer Beschaffenheit, wie beispielsweise Höhe, Umriss oder Nähe zu anderen Gebäuden, mit Hilfe eines KI-Ansatzes klassifiziert und eingeordnet werden (vgl. Kapitel 10 des Berichts). In der Abbildung ist zu sehen, wie die klassifizierten Stadtstrukturtypen auf das Untersuchungsgitter von 100 x 100 m projiziert werden. Hierbei wird jeweils der flächenmäßig dominanteste Gebäudetyp ausgewählt. Man kann daher erkennen, dass in einer 100 m-Gitterzelle auch abweichende Gebäudetypen vorkommen können, die Stadtstruktur jedoch von einem Gebäudetyp dominiert wird. Hierdurch wird der Detaillierungsgrad der Gebäudetypen verlassen, wodurch zugleich fehlklassifizierte Gebäudetypen weniger ins Gewicht fallen und vernachlässigbar werden.

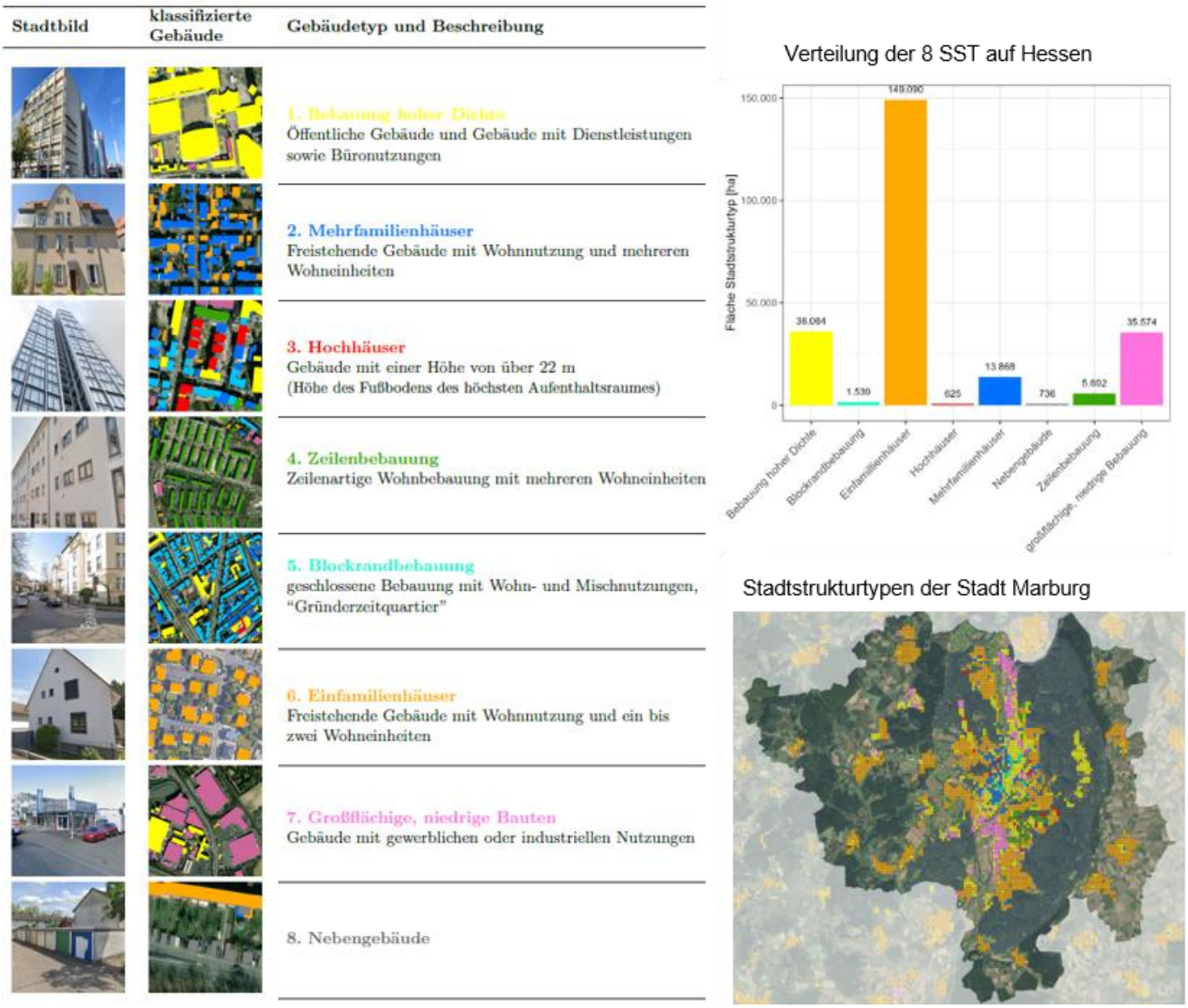


Abbildung 31: Übersicht Stadtstrukturtypen.

Die Aufteilung der Stadtstrukturtypen zeigt den Grad ihrer unterschiedlichen Homogenität: So sind beispielsweise Einfamilienhäuser und Zeilenbebauung oftmals sehr homogene Stadtstrukturen, während Gebäude des Hochhäusertyps in eher durchmischten Gebieten vorzufinden sind. Dies spiegelt sich im Folgenden auch in der Häufigkeit und Quantität der verschiedenen Stadtstrukturtypen wider (Abbildung 31).

Die Bestimmung der Stadtstrukturtypen hilft der zielgerichteten Verortung von Klimaanpassungs-Maßnahmentypen auf der städtischen Ebene. Beispielsweise sind in Stadtstrukturtypen, die von Einfamilienhäusern dominiert sind, andere Maßnahmentypen vorzusehen als für großflächige, niedrige Bauten.

Abbildung 31 (rechts oben) zeigt die flächenmäßige Häufigkeit der Stadtstrukturtypen in Hessen. Hierbei ist zu beachten, dass die absolute Fläche des jeweiligen Stadtstrukturtyps angezeigt wird, also nicht die Anzahl der einzelnen Gebäude. Es sticht vor allem der Einfamilienhaus-Typus stark hervor. An zweiter Stelle stehen die Bebauung hoher Dichte und die großflächige, niedrige Bebauung. Besonders in Verbindung mit der Erkenntnis der Abbildung 31 (links) sind die Unterschiede der Homogenität der unterschiedlichen Stadtstrukturtypen daher für die Verortung von Maßnahmen von großer Bedeutung.

Abbildung 31 (unten rechts) zeigt die auf das 100 m-Gitter projizierten Stadtstrukturtypen für die Stadt Marburg. Wie landesweit sticht auch in Marburg der Einfamilienhaus-Typ in **orange** dominant hervor. Er verteilt sich nicht auf die Innenstadtlage, sondern auf ortsumgebende und vorörtliche Lagen. Der als Suburbanisierung bzw. urban sprawl geläufige Prozess der Flächeninanspruchnahme durch Einfamilienhäuser ist gut zu erkennen.

In **Gelb** lässt sich der Anteil an Bebauung hoher Dichte erkennen (innerstädtische bzw. zentrale Gebiete) Universitäts- und Forschungsgebäude östlich der Innenstadt von Marburg). Gut zu erkennen ist auch die **pinkfarbene** großflächige, niedrige Bebauung (in erster Linie Industriebauten). In **Blau** ist der Mehrfamilien-Typus erkennbar, der sich im Übergang zwischen innerstädtischer Bebauung hoher Dichte und dem Typus Einfamilienhaus befindet. In **Grün** sind Gitterfelder mit überwiegender Zeilenbebauung und in **Rot** mit überwiegendem Anteil des Hochhaus-Typus zu finden (in Marburg vor allem Wohngebäude).

Abbildung 32 zeigt die Verteilung der universellen Hot- und Coldspotkategorien für den jeweiligen Stadtstrukturtyp, basierend auf landesweiten Daten. Eine generell starke Tendenz zur Überwärmung ist hieran vor allem für die Blockrandbebauung zu erkennen, die kühlste Tendenz weisen Einfamilienhäuser auf. Die zugehörige Verteilung der Stadtstrukturtypen pro Hektar für ganz Hessen wird in Abbildung 31 in der Graphik rechts oben („Verteilung der 8 SST auf Hessen“) dargestellt.

Hinweise zur möglichen Nutzung der Darstellung

Für die Planung von Klimaanpassungsmaßnahmen helfen die Darstellungen, geeignete Maßnahmentypen entsprechend der baulichen Struktur auszuwählen (z. B. Reduzierung der Versiegelung in der Blockrandbebauung).

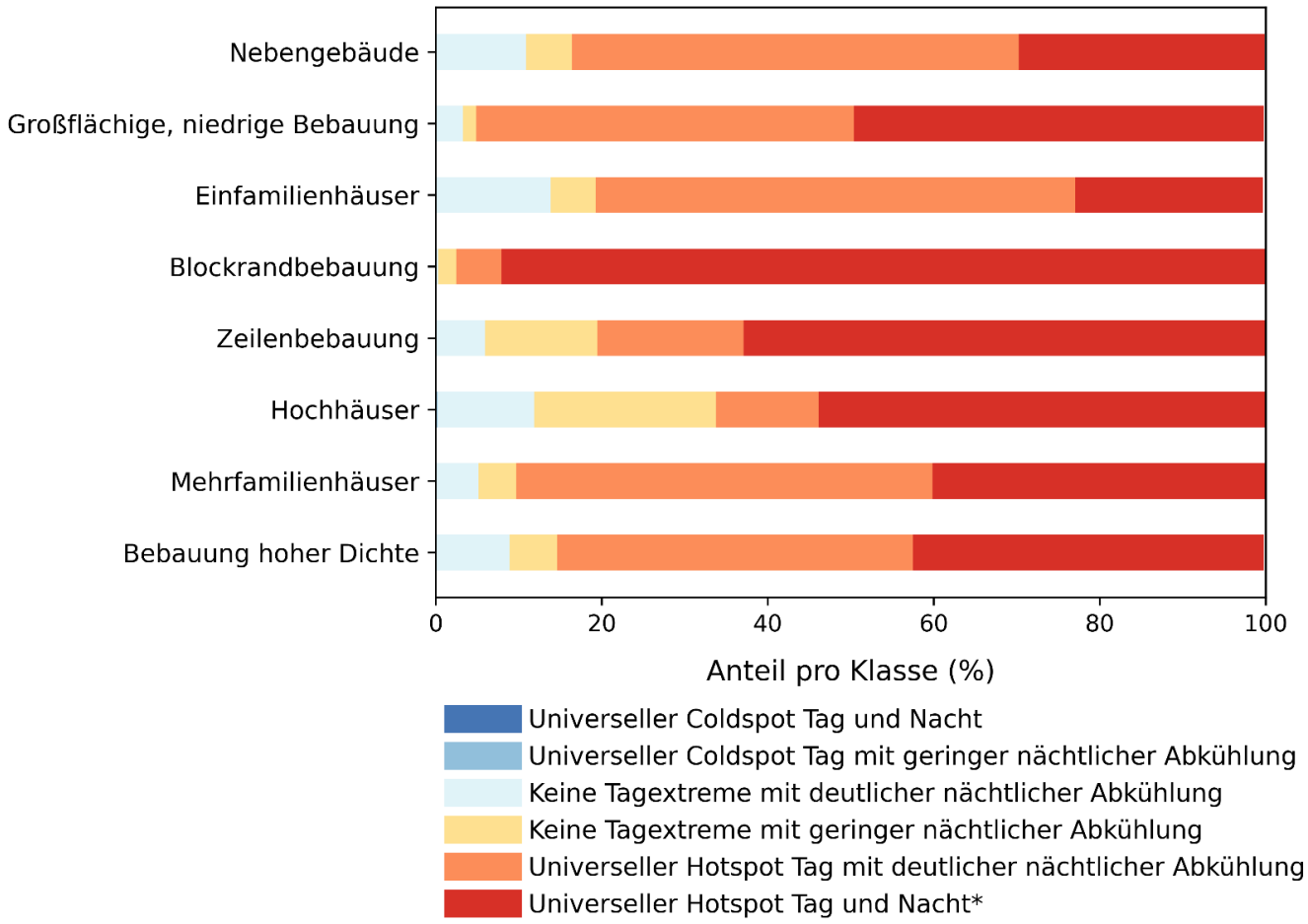


Abbildung 32: Anteilige Verteilung der universellen Hot- und Coldspotkategorien pro Stadtstrukturtypen. (*Offenlandflächen: Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.)

4.7.1 EXKURS: VERGLEICH DER PROJEKTERGEBNISSE MIT DER LANDESWEITEN KLIMAANALYSE

Die Landesweite Klimaanalyse (LWKA) stellt eine Datengrundlage für die Regionalplanung dar. Ziel der LWKA ist insbesondere die Ermittlung der regional bedeutsamen bioklimatisch belasteten Siedlungsräume, sogenannte regionalplanerische Hotspots, und die Identifizierung der möglichst unbelasteten Luftleitbahnen einschließlich der ihnen zugeordneten Kaltluftentstehungsgebiete, die eine ausgleichende Wirkung auf diese bioklimatisch belasteten Siedlungsräume ausüben.

Die in der LWKA ermittelten regionalplanerisch bedeutsamen Luftleitbahnen werden in diesem Projekt in die Priorisierung der räumlichen Handlungsschwerpunkte für die Klimaanpassung mit einbezogen (vgl. Abbildung 9).

Die universellen Hot- und Coldspots dieses Projektes sind im Wesentlichen mit den Ergebnissen der LWKA vergleichbar, weisen aber auch Unterschiede auf. Beispielsweise wurde in diesem Projekt eine höhere Anzahl universeller Hotspots als regionalplanerische Hotspots in der LWKA ermittelt, da die Hotspots der LWKA auf regional bedeutsame Siedlungsbereiche konzentriert wurden. Auch wurden in diesem Projekt mehr universelle Coldspots ermittelt, da in der LWKA zwar alle Kaltluftentstehungsgebiete ermittelt wurden, der Fokus jedoch auch bei ihnen auf jene Kaltluftentstehungsgebiete gelegt wurde, die den regional bedeutsamen thermisch belasteten Siedlungsgebieten zugeordnet werden konnten und aus denen die Kaltluft diese Siedlungsgebiete innerhalb eines definierten Zeitraums erreicht. **Diese Unterschiede stellen keinen Widerspruch dar, sondern sind plausibel erklärbar. Sie beruhen auf Unterschieden beider Analyseansätze hinsichtlich der Fragestellung, den Eingangsdaten und der Methodik**.

Zielsetzung von LWKA und Forschungsprojekt:

- **LWKA:** Die wesentliche Zielsetzung ist die Identifizierung und Sicherung klimarelevanter Freiräume (Kaltluftentstehungsgebiete und zugehörige Luftleitbahnen) im räumlichen Zusammenhang mit den regionalplanerischen Hotspots (regional bedeutsame bioklimatisch belastete Siedlungsräume). Diese Luftleitbahnen und Kaltluftentstehungsgebiete sollen möglichst in den Regionalplänen als Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen gesichert werden.
- **Forschungsprojekt:** Die Zielsetzung liegt auf der flächenhaften Identifizierung von “universellen Hot- und Coldspots” anhand gemessener Temperaturdaten (Ausnahme PET: simulierter Wert). In einem zweiten Schritt werden flächenhaft räumliche Handlungsschwerpunkte für die Klimaanpassung (3 Prioritätsstufen) sowie eine Defizit- und Potenzial-Analyse als Grundlage für die Planung von Klimaanpassungsmaßnahmen durchgeführt.

Parameter zur Ermittlung der jeweiligen Hotspots:

LWKA: Ermittlung regionalplanerisch bedeutsamer Hotspots in „aggregierter Form“

Die Ergebnisse der LWKA, die landesweit in einer räumlichen Auflösung von 200 m x 200 m (Rechengitter) vorliegen, basieren auf umfangreichen Modellrechnungen mit dem prognostischen mesoskaligen Strömungsmodell FITNAH.

- Für jedes Rechengitter wurde - basierend auf der Wärmebelastung (ermittelt aus den Parametern PET, Anzahl Sommertage, Temperatur 4:00 Uhr nachts) und der Empfindlichkeit der Bevölkerung (ermittelt aus den Parametern Ortsgröße / Einwohnerdichte) - die thermische Betroffenheit ermittelt.
- Besitzen Siedlungsgebiete Rechengitter mit mindestens mittlerer thermischer Belastung von
    - in der Summe ≥ 200 ha, wurden sie der Kategorie „sehr großer Flächenanteil“ zugeordnet;
    - in der Summe ≥ 120 bis < 200 ha, wurden sie der Kategorie „großer Flächenanteil“ zugeordnet.
- Weist ein Siedlungsgebiet eine entsprechende Summe an Rechengittern auf, wird immer das gesamte Siedlungsgebiet (definiert als regionalplanerische Vorranggebiete Siedlung, Bestand sowie Vorranggebiete Industrie und Gewerbe, Bestand) entweder der Kategorie thermisch belastetes Siedlungsgebiet mit großem Flächenanteil oder sehr großem Flächenanteil zugeordnet. Beide Kategorien stellen regionalplanerische Hotspots dar. Die Relevanz der Sicherung der regional bedeutsamen Luftleitbahnen mit zugehörigen Kaltluftentstehungsgebieten ist jedoch bei einem Siedlungsgebiet, das der Kategorie „mit sehr großem“ Flächenanteil zugeordnet ist, höher.

Forschungsprojekt: Ermittlung von universellen Hot- und Coldspots unter Einbeziehung von Fernerkundungsdaten:

- Für die Berechnung der universellen Hot- und Coldspots werden flächendeckend gemessene Temperaturdaten für Tag und Nacht verwendet; betrachtet wurden Parameter für die Energiebilanz an der Oberfläche (LST-Daten zur Bewertung des Verdunstungsdefizits der Oberfläche). Zur Berücksichtigung der Hitzebelastung des Menschen fließen zudem die modellierten PET-Werte der LWKA, Tropennacht-Lufttemperaturdaten des DWD mit ein.
- Mit den universellen Hot- und Coldspots stehen Suchräume zur Verfügung, innerhalb der mittels einer multikriteriellen Analyse räumliche Handlungsschwerpunkte für die Klimaanpassung ermittelt werden. Dabei werden Einwohnerzahl, vulnerable Nutzungen und wertvolle Belüftungsbahnen der LWKA (simulierter Wert) für die räumliche Priorisierung berücksichtigt.

Im Ergebnis weisen die universellen Hot- und Coldspots des Forschungsprojektes teilweise Unterschiede zu den regionalplanerischen Hotspots der LWKA auf (insbesondere größere Anzahl an Hot- und Coldspotflächen). Die Unterschiede sind durch teilweise unterschiedliche Eingangsdaten und die abweichende Fragestellung und Methodik beider Analysen bedingt. Widersprüche bestehen somit nicht. Auch sind die Ergebnisse der LWKA (regionalbedeutsame Kaltluftentstehungsgebiete und Luftleitbahnen) in die Priorisierung der räumlichen Handlungsschwerpunkte des Forschungsprojektes eingegangen. Vorsorglich werden die regionalbedeutsamen Luftbahnen der LWKA zu ihrer optimalen Berücksichtigung in Klimaanpassungsplanungen in den Themenkarten des Forschungsprojektes dargestellt (vgl. Abbildung 9). Beide Ansätze ergänzen sich somit sinnvoll.

4.8 THEMENSCHWERPUNKT: KLIMASCHUTZ

Beim Themenschwerpunkt „Klimaschutz“ werden die Beiträge der Fernerkundung auf dem Gebiet der **Freiflächenphotovoltaik** (FF-PV) und der **energieeffizienten Siedlungsentwicklung** betrachtet. Folgende Fragestellungen stehen dabei im Fokus (vgl. hierzu Kapitel 22 und 23 im Abschlussbericht):

- **Ermittlung des Bestandes von PV-Anlagen (Freiflächen und Dachflächen)**
- **Analyse der Flächenpotenziale für die FF-PV-Nutzung**
  a) Im unbesiedelten Bereich werden in mehreren Arbeitsschritten die vergleichsweise konfliktarmen Flächen für die FF-PV-Nutzung identifiziert.
  b) Im besiedelten Bereich wird das Potenzial an Parkplatzfläche mit über 50 Stellplätzen identifiziert, das für den PV-Einsatz in Frage kommt.

Bei der **energieeffizienten Siedlungsentwicklung** steht u. a. die Kompaktheit der Gebäude und Flächensparsamkeit der Siedlung im Vordergrund. Hierzu werden Konzepte gezeigt, die den Mehrwert der Hinzunahme von FE-Daten für eine energieeffiziente Siedlungsentwicklung abschätzen sollen.

4.8.1 ANALYSE VON PV-BESTANDSFLÄCHEN (DACHFLÄCHEN UND FREIFLÄCHEN)

Ziel dieses Verfahrens ist die Detektion bestehender PV-Anlagen anhand einer automatisierten datenbasierten Vorgehensweise. Hierzu wurde ein Trainingsdatensatz, bestehend aus multispektralen Bilddaten (sichtbarer und infraroter Bereich) und bekannten FF-PV-Standorten zusammengestellt, um mittels eines KI-Ansatzes bereits installierte Freiflächen- und Dach-Photovoltaikanlagen zu erkennen.

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass das entwickelte Verfahren den PV-Bestand aus Bild- und Oberflächendaten mit einer Zuverlässigkeit von circa 90 % erfasst; die Vollständigkeit liegt bei knapp 70 %.

Die nachfolgenden Bildbeispiele (Abbildung 33, Abbildung 34, Abbildung 35) zeigen typische Beispiele aus Stadt- und Vorortregionen mit Dach- und Freiflächen-PV Anlagen, die Aufschluss über die erwartbaren Ergebnisse geben. Die automatische Detektion kann sehr gute Hinweise geben; allerdings sollte eine manuelle Prüfung die Ergebnisse verifizieren.

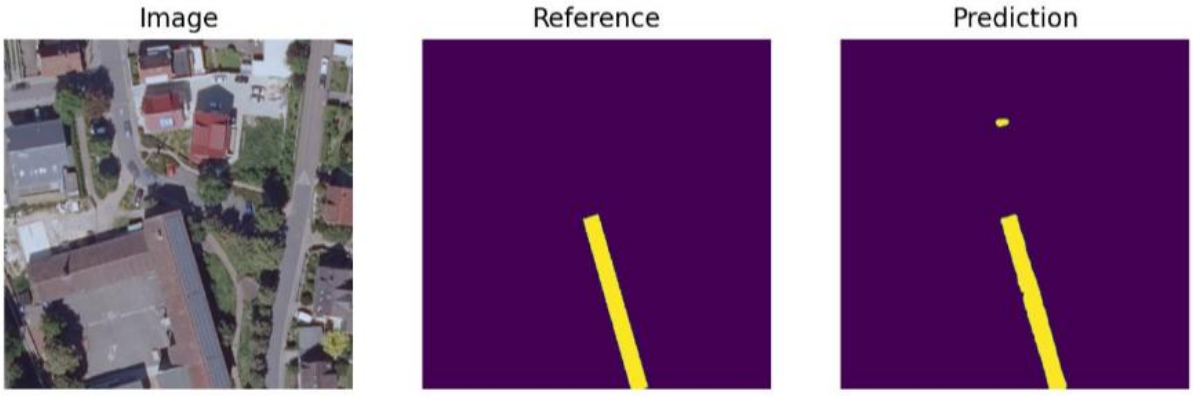


Abbildung 33: Aus dem Luftbild (links) automatisch detektierte PV-Flächen (rechts) und Referenz (mittig). Die zum Vergleich manuell digitalisierte Referenzfläche wurde gefunden. Allerdings wurde zusätzlich eine helle Dachkonstruktion des oberhalb abgebildeten Wohngebäudes gefunden.

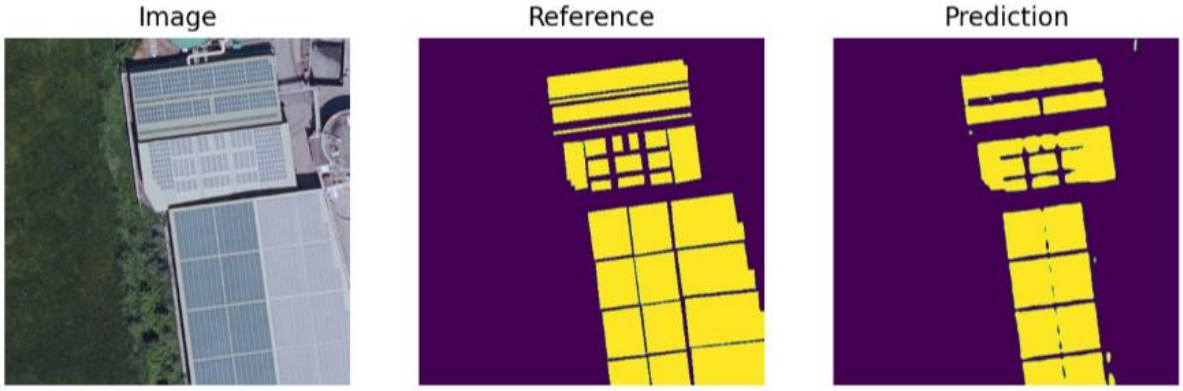


Abbildung 34: Aus dem Luftbild (links) automatisch detektierte PV-Flächen (rechts); Referenz (mittig). Die manuell digitalisierten Referenzflächen wurden bis auf sehr helle PV-Anlagen am rechten Bildrand gefunden.

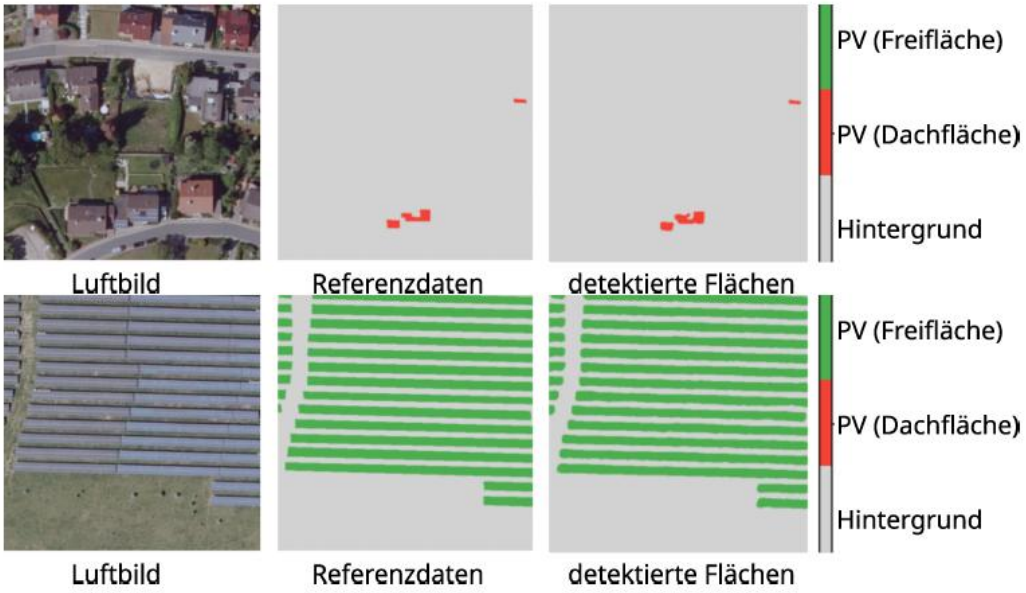


Abbildung 35: Beispielfälle der PV-Detektion: Luftbild (rechts), Referenzdaten (mittig), automatisch detektierte Flächen (rechts). Unterschiedliche PV-Anlagen erfasst das KI-Modell überwiegend richtig.

4.8.2 ANALYSE DER FLÄCHENPOTENZIALE FÜR DIE PHOTOVOLTAIK-NUTZUNG IM BESIEDELTEN BEREICH

Im besiedelten Bereich wird das Potenzial an Parkplatzfläche mit über 50 Stellplätzen identifiziert, das für den Photovoltaik-Einsatz besonders in Frage kommt. Die Grenze von 50 Stellplätzen wurde in Anlehnung an die gesetzliche Pflicht zum Bau von PV-Anlagen auf neuen Parkplätzen mit mehr als 50 Stellplätzen in Hessen gewählt. Für bestehende Parkplätze besteht diese Pflicht jedoch nicht. Die Identifikation von PV-Potenzialen auf Parkplätzen erfolgt datengetrieben für ganz Hessen. Zielsetzung dieses Vorgehens ist, die vorhandenen Parkplatzflächen ab einer Größe von ≥ 50 Stellplätzen in „geeignet“ und „ungeeignet“ datengetrieben (automatisiert) zu klassifizieren und die Potenziale zu quantifizieren. Diese Klassifikationsaufgabe kann mithilfe von KI-Einsatz gelöst werden. Abbildung 36 zeigt typische Beispiele dieser drei Klassen.

Parkplätze der Klasse „geeignet“ (für PV) lassen sich anhand folgender Kriterien beschreiben:

- **Vollversiegelte Fläche:** Vollständig asphaltierte oder betonierte Parkplätze mit minimaler oder keiner Vegetation (das Verhältnis von Versiegelung zu Vegetation ist besonders vorteilhaft für die FF-PV-Nutzung).
- **Frei von großen Bäumen:** Keine großen Bäume auf oder in unmittelbarer Nähe des Parkplatzes. Diese sind schützenswert und wichtig für die Beschattung, sodass Eingriffe durch die FF-PV-Nutzung prinzipiell zu vermeiden sind.
- **Keine Allee-Straßen**: Parkplätze abseits von Allee-Straßen, die nicht durch Straßenbegrünung beeinflusst werden.
- **Günstige Flächen- und Formparameter:** Rechteckige oder längliche Parkplätze mit ausreichender Größe für eine effiziente Installation von PV.

Parkplätze der Klasse „ungeeignet“ (für PV) weisen folgende nachteilige Bedingungen auf:

- **Hoher Vegetationsanteil** (z. B. durch große oder in Reihen gepflanzte Bäume, die starke Beschattung verursachen).
- **Nähe zu Wald oder sonstiger schützenswerter Vegetation,** bei denen Eingriffe durch die Installation durch PV vermieden werden sollten.

Eine Überprüfung anhand von unabhängigen Referenzdaten zeigt, dass die Qualität dieser Klassifizierung besser als 90 % ist. Angewandt auf ganz Hessen können dadurch Flächenpotenziale auf Parkplätzen in der Größenordnung, wie in Tabelle 1 gezeigt, abgeschätzt werden. In Verbindung mit der Klassifikation der Wuchshöhen von Vegetation aus der Luftbild-Segmentierung ermöglicht diese Analyse eine flexible Planung unter Berücksichtigung der Versiegelung und des Erhalts hochwüchsiger Vegetation.

Tabelle 1: Zusammenfassende Flächenpotenziale für PV-Anlagen nach Eignungsklassen.

Eignungsklasse	Vorhergesagte Fläche in km^2	Versiegelt in km^2	Vegetation Mittel-& Hochwüchsig in km^2
0: Für PV ungeeignet	5,799	2,261	1,891
1: Für PV geeignet	28,541	21,804	1,912

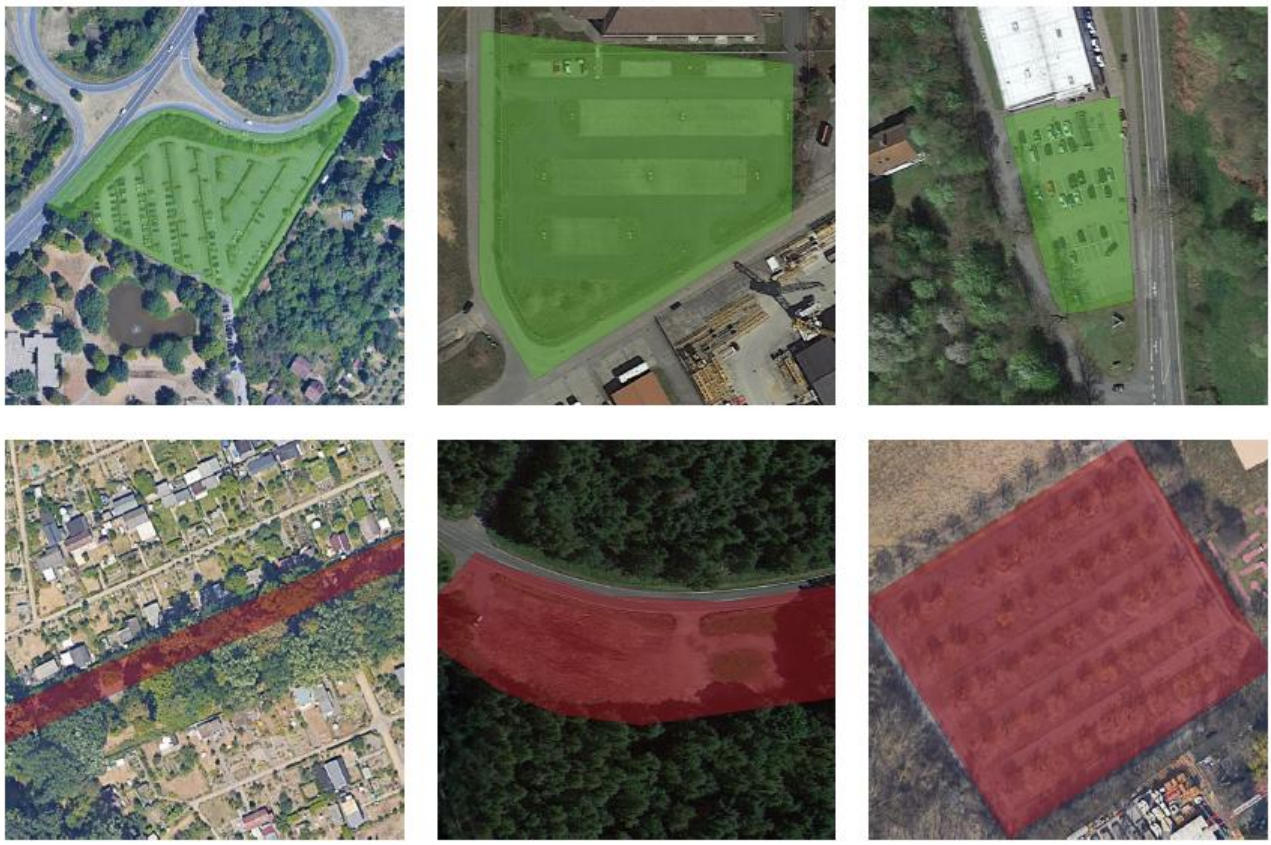


Abbildung 36: Exemplarische Visualisierung von Parkplätzen für PV und deren Klassifizierung. Die erste Reihe zeigt Beispiele der Klasse „geeignet“ und die zweite Reihe der Klasse „ungeeignet“. Die entsprechend eingefärbten Polygone symbolisieren die Parkplatzflächen.

4.8.3 ANALYSE DER FLÄCHENPOTENZIALE FÜR DIE PHOTOVOLTAIK-NUTZUNG IM UNBESIEDELTEN BEREICH

Das Hessische Energiegesetz enthält die Nutzung von Photovoltaikanlagen in einer Größenordnung von einem Prozent der Fläche des Landes als Zielvorgabe. Nach einer vorliegenden Potentialstudie (https://www.lea-hessen.de/mediathek/publikationen/4093) muss zur Erfüllung dieser Zielvorgabe etwa die Hälfte als Freiflächen-Photovoltaik außerhalb des Siedlungsbereichs bereitgestellt werden.

Bei den im vorliegenden Forschungsprojekt ermittelten FF-PV-Potenzialflächen in Hessen handelt es sich um eine Suchraum-Kulisse, in der der benötigte Anteil von etwa 0,5 % der Landesfläche für die FF-PV-Nutzung besonders konfliktarm umgesetzt werden kann.

Zur Entwicklung einer GIS-basierten Methodik für die Identifikation von Suchraumkulissen mit geeigneten FF-PV-Potenzialflächen wird ein sequenzieller, GIS-gestützter Algorithmus verwendet. Dieser ermöglicht in aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten die Ermittlung vergleichsweise konfliktarmer Bereiche für die FF-PV-Nutzung. Die Ergebnisse werden sowohl in Themenkarten als auch über statistische Auswertungen dargestellt und können auf allen Planungsebenen genutzt werden.

Im ersten Schritt werden **Ausschlussflächen** abgezogen, die für die FF-PV-Nutzung grundsätzlich ungeeignet sind, z.B. Steillagen > 30º oder Wälder (mit Verschattungspuffer). In Schritt 2 werden zusätzliche Ausschlussflächen aufgrund naturschutzrechtlicher Vorgaben abgezogen (z. B. Abzüge durch Vorgaben des Naturschutzrechts und Wasserrechts). Als letzte Ausschlussfläche werden bedeutsame landwirtschaftliche Bereiche betrachtet, wozu die regionalplanerischen Vorranggebiete für Landwirtschaft zählen. Zum Schluss werden **Restriktionsflächen (sie erfordern eine Einzelfallprüfung für die FF-PV-Nutzung)** abgezogen - wie zum Beispiel Landschaftsschutzgebiete. Nach Abzug all dieser Flächen ergeben sich die **vergleichsweise konfliktarmen FF-PV-Potenzialflächen** für Hessen (Abbildung 37).

Abbildung 37: Schematische Visualisierung der Analyse zu den konfliktarmen Flächenpotenzialen für die FFPV-Nutzung im unbesiedelten Bereich („Zwiebelschalen-Prinzip“)

Der im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten und nicht abschließenden GIS-gestützten FF-PV-Potenzialflächenanalyse liegen die derzeit geltenden naturräumlichen, rechtlichen und raumordnerischen Vorgaben für die FF-PV-Nutzung zugrunde. Ihre Informationen können der Entwicklung vergleichsweise konfliktarmer Flächenkulissen für die FF-PV-Nutzung dienen. Eine hierauf aufbauende planerische Steuerung der FF-PV-Nutzung wird im Rahmen des Forschungsprojektes nicht durchgeführt; dies bleibt den dafür zuständigen Planungsbehörden vorbehalten. Im Zuge der konkreten Flächenplanung bzw. FF-PV-Anlagenplanung sind über die in diesem Forschungsprojekt bereit gestellten Informationen hinaus weitere Aspekte (z.B. Bodendenkmäler) für die konfliktarme Standortsuche von Relevanz, die aufgrund des landesweiten Betrachtungsmaßstabs bislang nicht mit einbezogen werden konnten.

Das kartografische Ergebnis der beiden ersten Schritte zeigt beispielhaft Abbildung 38. Für weitere Landwirtschaft-Szenarien liegen ebenfalls Prüfergebnisse vor (vgl. Abschlussbericht, Kapitel 22.1).

In einem gesonderten Schritt wurde ermittelt, in welchen Bereichen die ermittelten FF-PV-Potenzialflächen in dem nach der Novelle des BauGB vom 1. Dezember 2022 („Gesetz zur sofortigen Verbesserung der Rahmenbedingungen für die erneuerbaren Energien im Städtebaurecht“) baurechtlich privilegierten 200 m-Korridor sowie in dem nach EEG förderfähigen 500 m-Korridor liegen.

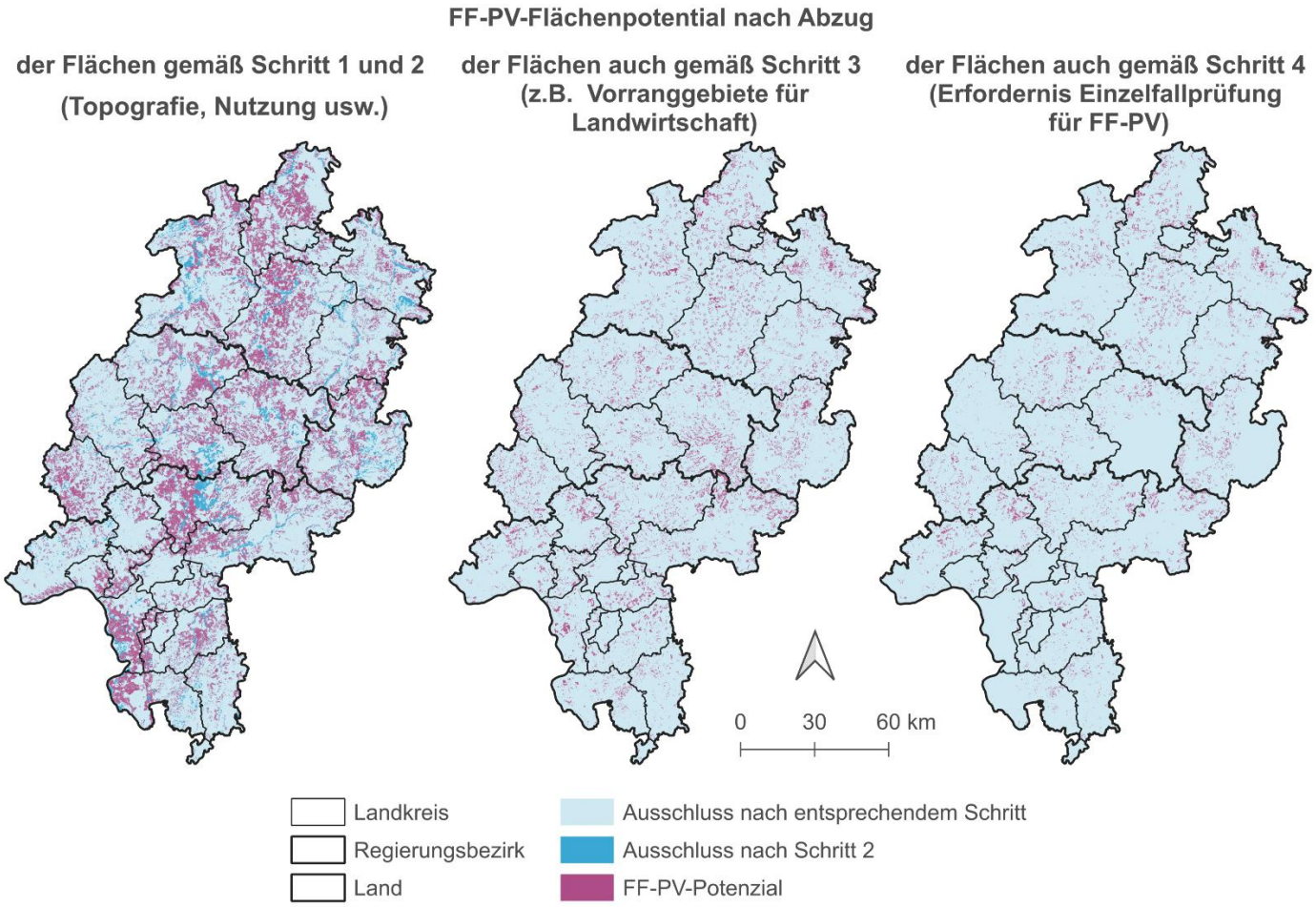


Abbildung 38: Ergebnis der schrittweisen Analyse des konfliktarmen FF-PV-Flächenpotenzials im unbesiedelten Bereich.

4.8.4 ENERGIEEFFIZIENTE SIEDLUNGSENTWICKLUNG

Nähere Ausführungen trifft hierzu Kapitel 24 des Abschlussberichts.

Bei der Frage, inwiefern Fernerkundungsdaten und -Methoden zu Aspekten der energieeffizienten Siedlungsentwicklung - insbesondere zu Fragen des Ausbaus erneuerbarer Energien, der Kompaktheit von Gebäuden, der Flächensparsamkeit und Bebauungsdichte - beitragen können, wurden folgende vier Themenschwerpunkte betrachtet:

Themenschwerpunkte, die den Ausbau erneuerbarer Energien im Siedlungsbereich betreffen:

- Photovoltaik (PV)-Bestand auf Dächern (vgl. Kapitel 4.8.1)
- FF-PV-Potenziale auf großen Parkplatzflächen (> 50 Kfz-Stellplätzen) in Siedlungen (vgl. Kapitel 4.8.2)

Themenschwerpunkte, die die Kompaktheit von Gebäuden sowie die Flächensparsamkeit und Bebauungsdichte im Siedlungsbereich betreffen:

- Die in diesem Projekt quantitativ ermittelten vollversiegelten Flächen
  (d. h. mit Gebäude(dach)flächen) im Vergleich zu teil- oder unversiegelten Flächen
- Stadtstrukturtypen in Verbindung mit den Zensus-Daten über die Bevölkerungsdichte.

Datengrundlagen und Charakteristiken:

Für die Analysen zur **Flächensparsamkeit** und **Bebauungsdichte** wird auf die Daten der Stadtstrukturtypen und die Ergebnisse der Luftbild-Segmentierung in den räumlichen Handlungsschwerpunkten der Priorität 1 zurückgegriffen. Für niedrigere Prioritäten lassen sich analoge Analysen erstellen.

Zur Genauigkeit der verwendeten Daten lässt sich Folgendes festhalten:

- 80 % bis über 90 % Vollständigkeit und Zuverlässigkeit für die (Landbedeckungs-)Klassen der Luftbild-Segmentierung (Versiegelung, Grün, Vegetation inkl. Wuchshöhen, Dach/Gebäude, Wasser). Lediglich die Klasse „teilversiegelt“ weicht mit ca. 65 % davon ab.
- Die den Stadtstrukturtypen zugrundeliegenden Gebäudedaten sind dem LoD2 des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie entnommen. Stichproben haben gezeigt, dass diese Angaben größtenteils eine gute Orientierung geben. Ausreißer gibt es v. a. im Falle von komplizierten Gebäudegeometrien.
- Besondere Beachtung sollte man unterschiedlichen Erfassungszeiträumen schenken. Die der Bildsegmentierung zugrundeliegenden Daten wurden 2021/2022 beflogen. Der Zeitraum entspricht in etwa auch der Erhebung der Zensus-Daten. Die Gebäudedaten des BKG haben einen Zeitstempel. Dieser sollte bei einer detaillierten Analyse mit den anderen Daten abgeglichen werden.

Kompaktheit, Flächensparsamkeit, Bebauungsdichte

Ein zentraler Parameter für eine energieeffiziente Siedlungsentwicklung stellt die **Kompaktheit** von Gebäuden dar. Sie wird üblicherweise über den Quotienten von Hüllfläche (A) als wärmeabgebende Gebäudefläche und Volumen (V) als zu heizendes Raumvolumen beschrieben (A/V-Verhältnis). Die zur Berechnung nötigen Gebäudegeometrien werden den LoD2-Daten des BKG entnommen. Je kleiner das A/V-Verhältnis eines Gebäudes ist, desto geringer ist der spezifische Energiebedarf pro m³ beheiztem Raum bei sonst gleichen Bedingungen.

Als **Flächensparsamkeit** wird hier die bebaute Fläche im Vergleich zur umgebenden Fläche verstanden. Der Bezug zur Anzahl an Bewohnerinnen und Bewohnern folgt anschließend. Basierend auf den in diesem Projekt ermittelten Grün- und Versiegelungsflächen (inkl. Dächern) ergibt sich für die Beispielgemeinden Frankfurt, Marburg, Waldeck und Witzenhausen die in Abbildung 39 dargestellte Verteilung an Grün-, Versiegelungs- und Dachflächen.

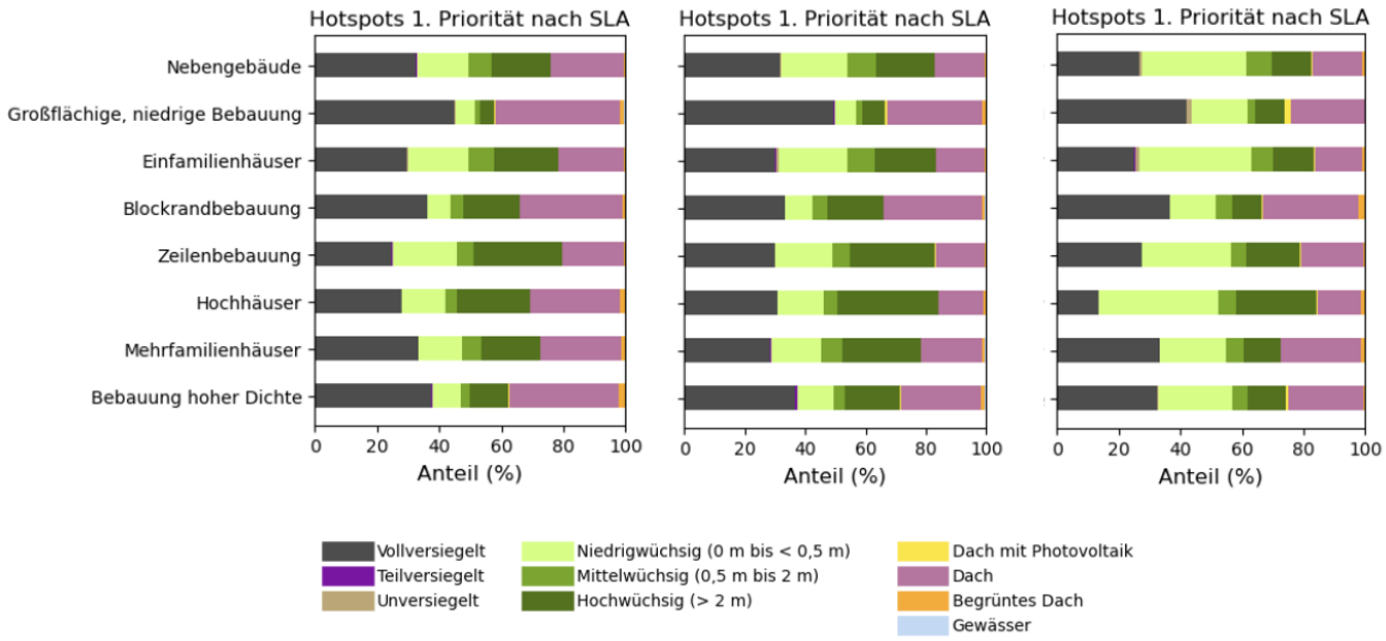


Abbildung 39: Flächenanteile von Stadtstrukturtypen in räumlichen Handlungsschwerpunkten mit Priorität 1 (universelle Hotspots): Frankfurt (links), Marburg (mittig) und Waldeck (rechts).

Indem die Flächensparsamkeit auf der Grundlage von Stadtstrukturtypen ermittelt wird, wird automatisch auch der Aspekt der **Bebauungsdichte** (prozentuale Bebauung pro 100 m-Gitterzelle) integriert, durch den sich die Stadtstrukturtypen voneinander unterscheiden.

Betrachtet man die **Flächensparsamkeit von Gebäuden** anhand ihrer Dachflächen, werden, wie zu erwarten, die besten Werte für lockere Bebauungsformen (Ein- und Mehrfamilienhäuser) sowie teilweise auch Hochhäuser und Zeilenbebauung erreicht. Bei Hinzufügen von Versiegelungsflächen als notwendige Erschließungsflächen verstärkt sich dieses Bild. Insbesondere die Blockrandbebauung ist z. B. verglichen mit der Zeilenbebauung sehr flächenintensiv. Hingegen zeigen Hochhäuser mit grundsätzlich geringerer Bebauungsdichte insbesondere in kleineren Gemeinden und auch unter Hinzunahme der umgebenden

Versiegelungsflächen einen günstigen Flächenverbrauch bezogen auf ihre bebaute Fläche im Vergleich zur umgebenden Fläche.

Erweitert man die Betrachtungsweise der **Flächensparsamkeit von Gebäuden um die Anzahl an Bewohnerinnen und Bewohnern**, die pro Flächeneinheit versorgt werden, verändert sich das Bild, wie im folgenden Absatz näher erläutert wird. Auch hierfür geben die Stadtstrukturtypen wichtige Anhaltspunkte. Abbildung 40 zeigt als Beispiel einen Ausschnitt von Dietzenbach, für den die Einwohneranzahl in Grautönen hinterlegt ist und die Stadtstrukturtypen gebäudescharf überlagert sind.

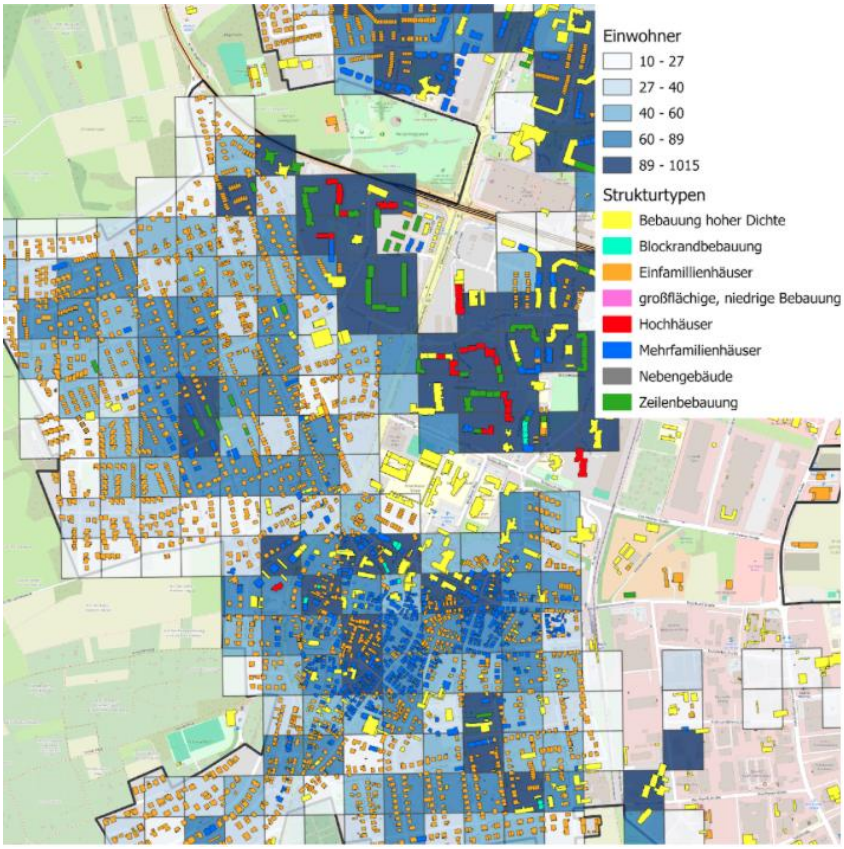


Abbildung 40: Darstellung von Einwohnerdichte und Stadtstrukturtypen in einem Teilbereich von Dietzenbach.

In Abbildung 41 sind die daraus errechneten Parameter für die **einwohnerbezogene Flächensparsamkeit** (Bewohnerinnen/Bewohner pro 100 m²) sowie die **Kompaktheit** der Bebauung gemittelt für ein 100 m-Gitter dargestellt. In Abbildung 42 die Bebauungsdichte (Gebäudeanteil pro 100 m-Gitter).

Isoliert stehende Hochhäuser nehmen einen sehr günstigen Verbrauch von Gebäude- und Versiegelungsflächen pro Einwohnerin/Einwohner an und erlauben gleichzeitig viele Grünflächen. Kleinere Gebäude mit wenigen Bewohnerinnen/Bewohnern, insbesondere Einfamilienhäuser, werden dagegen als besonders ungünstig bewertet.

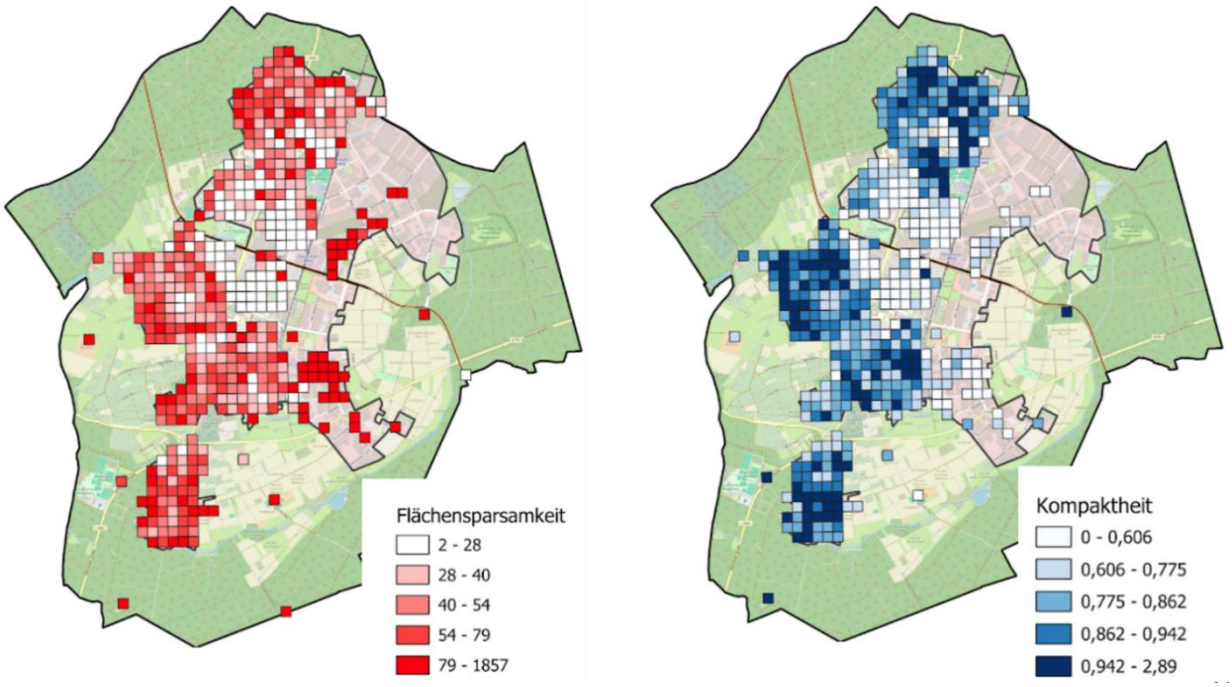


Abbildung 41: Gesamträumliche Auswertung der Flächensparsamkeit, d. h. Grundfläche aller Gebäude pro Einwohnerin/Einwohner (links) sowie der Kompaktheit der Bebauung für die Gemeinde Dietzenbach im Jahr 2022.

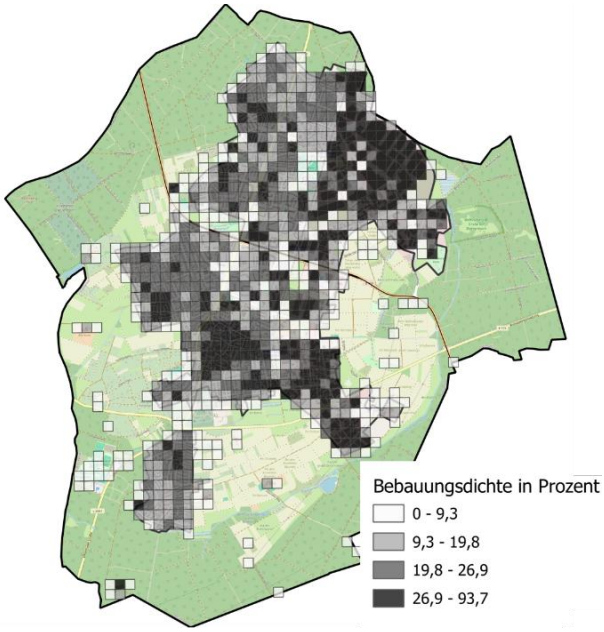


Abbildung 42: Gesamträumliche Auswertung der Bebauungsdichte, d. h. Gebäudeanteil pro 100 m-Gitter für die Gemeinde Dietzenbach.

5 Umweltziele

Nachfolgend werden - aufbauend auf den universellen Hot- und Coldspots sowie den daraus abgeleiteten räumlichen Handlungsschwerpunkten für die Klimaanpassung - **Umweltziele** empfohlen. Als fachliche Empfehlung besitzen diese Umweltziele keinen verbindlichen Charakter. Sie können eine Fachgrundlage für die Entwicklung von **raumordnerischen Zielen und Grundsätzen** in Hessen bilden. Es bleibt dem Träger der Raumordnung vorbehalten, sich diese gutachterlich vorgeschlagenen Umweltziele zu eigen zu machen.

Umweltziele beschreiben einen zukünftig angestrebten (Soll-)Zustand eines bestimmten Teils der Umwelt. Dabei kann zwischen **übergeordneten und verfeinerten Umweltzielen** unterschieden werden**.**

Die im Rahmen des Forschungsprojektes „Stärkung von Klimaschutz und Klimaanpassung in der räumlichen Gesamtplanung unter Einsatz der Fernerkundung“ (Keller et al. 2025[6]) definierten **übergeordneten Umweltziele (üUZ)** beziehen sich auf ganz Hessen. Die gutachterlich daraus abgeleiteten und **verfeinerten Umweltziele (vUZ)** adressieren die Ebene der Regionalplanung und die örtliche Ebene (Kommune, Schwerpunkt besiedelter Bereich im Stadtgebiet). Diese verfeinerten Umweltziele werden als **Handlungsstrategien** formuliert, die die landesweiten, übergeordneten Umweltziele verfeinern und von der Regionalplanung und örtlichen Ebene weiter konkretisiert werden können.

Das Projekt unterlegt die Umweltziele auf der örtlichen Ebene mit beispielhaften **Maßnahmentypen**. Über die Maßnahmentypen werden, sobald sie umgesetzt sind, zur Zielerreichung beigetragen (siehe Kapitel 6).

5.1 LANDESEBENE

Für die landesweite Ebene werden folgende übergeordnete Umweltziele angestrebt:

1. **Dämpfung der Temperaturmaxima in den universellen Hotspots.**

2. **Schonung der Kühlfunktion in den universellen Coldspots** insbesondere durch Erhalt und Aufwertung der großflächigen kühlwirksamen Flächennutzungen in den räumlichen Handlungsschwerpunkten mit sehr hohem bis hohem Handlungsbedarf.

3. **Erhalt der Kühlfunktion der regionalbedeutsamen Kaltluftentstehungsgebiete und der Funktion der zugehörigen Luftleitbahnen der Landesweiten Klimaanalyse Hessen.**

[6] Sina Keller et al. *Entwicklung von Planungshilfen für Klimaschutz und Klimaanpassung in der räumlichen Gesamtplanung mittels Fernerkundung - Abschlussbericht*. KITopen, 2025

4. **Steigerung der Niederschlagsretention (Schwammwirkung) im besiedelten und unbesiedelten Raum** zur Minderung von Abflussextremen und Steigerung des Rückhalts der, insbesondere in sommerlichen Hitzeperioden, zunehmend für die Verdunstungskühlung benötigten Ressource Wasser.

5. **Schonung der Ressource Wasser** zur Sicherung eines sparsamen Umgangs mit den insbesondere in sommerlichen Trockenzeiträumen zunehmend unter Nutzungsdruck stehenden Wasserreserven.

6. **Forcierung von Synergien der Klimaanpassung mit der dreifachen Innenentwicklung** (Flächen für Mobilität, Grün- und Freiflächen sowie Bauen) und der **energieeffizienten Siedlungsentwicklung** (Kompaktheit, Flächensparsamkeit, Erneuerbare Energien).

Erläuterung zur planerischen Umsetzung:

Die genannten landesweiten Umweltziele sollen auf der regionalen sowie nachfolgend auf der kommunalen Ebene als Handlungsstrategien weiter verfeinert werden. Hierdurch wird ein stringentes Zusammenspiel der verschiedenen Planungsträger und die wirksame Umsetzung der landesweiten Umweltziele sichergestellt.

5.2 REGIONALE EBENE

Für die regionale Planungsebene können die landesweiten, übergeordneten Umweltziele zum Beispiel durch folgende Handlungsstrategien verfeinert werden:

1. **Handlungsstrategien zur Dämpfung der Temperaturmaxima in den universellen Hotspots:**

a. **Minderung der urbanen Hitzebelastung in den räumlichen Handlungsschwerpunkten mit sehr hohem bis hohem Handlungsbedarf durch Beiträge zur Steigerung der Beschattung und der Verdunstungskühlung.**

(Beispiele: Festlegung von textlichen Grundsätzen u. a. zur Erhöhung der großvolumigen Grünausstattung, wie Bäume, und zur Verringerung der Vollversiegelung). (Zu 4.1. Nr. 1 und 4)

b. **Forcierung von Umsetzungsstrategien sowie Bereitstellung von Informationen in den großflächigen räumlichen Handlungsschwerpunkten des Offenlandes mit sehr hohem bis hohem Handlungsbedarf.**

(Beispiele: Festlegung von textlichen Grundsätzen u. a. zur humusfördernden und den Boden beschattenden niedrigwüchsigen Begrünung und Mitwirkung in fachübergreifenden Gremien zur Stärkung des Wasserrückhalts in der Fläche). (Zu 4.1. Nr. 1 und 4)

c. **Erhalt der Tag-Nacht-Temperaturmuster** in den **urbanen räumlichen Handlungsschwerpunkten mit mittlerem Handlungsbedarf.**
(Beispiele: Festlegung von textlichen Grundsätzen zum Erhalt des Grünvolumens und zur Minimierung neuer abflussrelevanter Vollversiegelungen). (Zu 4.1. Nr. 1 und 4)

2. Handlungsstrategien zur Schonung der Kühlfunktion in den universellen Coldspots:

a. Erhalt und Aufwertung der großflächigen kühlwirksamen Flächennutzungen in den räumlichen Handlungsschwerpunkten mit sehr hohem bis hohem Handlungsbedarf durch geeignete planerische Sicherung dieser Flächen.

(Beispiele: Festlegung geeigneter Vorranggebiets-Kategorien in den Regionalplänen, etwa durch Vorranggebiete (VRG) für die Forstwirtschaft, VRG für die Landwirtschaft, jeweils mit textlicher Ergänzung ihrer Klimafunktionen und Ausschluss von mit dieser Funktion nicht zu vereinbaren Nutzungen). (Zu 4.1. Nr. 2 und 4)

b. Schonung der Kühlfunktion in großflächigen räumlichen Handlungsschwerpunkten mit mittlerem Handlungsbedarf.

(Beispiele: textliche Festlegungen/Hinweise in den Regionalplänen und ihre transparente Berücksichtigung bei Abwägungsentscheidungen). (Zu 4.1. Nr. 2 und 4)

3. Handlungsstrategien zum Funktionserhalt der regionalbedeutsamen Kaltluftentstehungsgebiete und zugehörigen Luftleitbahnen.

(Beispiele: Festlegung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten (VRG/VBG) für besondere Klimafunktionen. Bei einer raumbedeutsamen Inanspruchnahme der VBG durch entgegenstehende Nutzungen soll eine Abstimmung der Vorlage einer lokalen Klimaanalyse mit der oberen Landesplanungsbehörde erfolgen. In VRG ist eine Inanspruchnahme durch entgegenstehende Nutzungen grundsätzlich ausgeschlossen. Im Rahmen eines Zielabweichungsverfahrens ist eine lokale Klimaanalyse erforderlich. (Zu 4.1. Nr. 3)

4. Handlungsstrategie zur Steigerung der Niederschlagsretention im besiedelten und unbesiedelten Raum (Schwammwirkung):

a. <u>Offenland:</u> Erhalt von großflächigen Rückhalteflächen einschließlich natürlicher Wasser- und CO_2-Speicher durch geeignete planerische Sicherung dieser Flächen.
(Beispiele: textliche und zeichnerische Festlegungen zur Schonung geeigneter Räume, u. a. solchen mit hoher GPP[7]). (Zu 4.1. Nr. 4)

b. <u>Urbaner Raum</u>: Erhalt und Entwicklung von Flächen zur Niederschlagsspeicherung und geeignete planerische Sicherung dieser Flächen.
(Beispiele: textliche Beiträge der Raumordnung zur Verbesserung des Rückhaltepotenzials des Bodens und zur multifunktionalen Flächennutzung). (Zu 4.1. Nr. 4)

[7] GPP: gross primary production (vergleiche Kapitel 4.6.6)

5. **Sparsamer Umgang mit der Ressource Wasser sowie vermehrte Speicherung und Nutzung des Niederschlagwassers im urbanen Raum, insbesondere durch planerische Verknüpfung mit den Zielen zur Dämpfung der Temperaturmaxima in Räumen mit hohem und sehr hohem Handlungsbedarf.**
   (Beispiele: Aufnahme geeigneter textliche Beiträge in die Begründung von Regionalplänen). (Zu 4.1. Nr. 5)

6. **Konkretisierung** der **dreifachen Innenentwicklung** und der **energieeffizienten Siedlungsentwicklung.**
   (Beispiele: Erstellung von entsprechenden Planungskonzeptionen im Zuge der Regionalplanaufstellung und Berücksichtigung des Umweltziels in den Festlegungen zur regionalen Siedlungsstruktur). (Zu 4.1. Nr. 6)

Erläuterungen:

Zu 4.2 Nr. 1a

In urbanen Räumen mit **hohem und sehr hohem** Handlungsbedarf in Bezug auf die Kühlung und Beschattung kommt den auf diesem Gebiet hochwirksamen Maßnahmen (z. B. der Stabilisierung und Steigerung der großvolumigen Grünausstattung in Form von Bäumen sowie der Minderung der Vollversiegelung) eine besondere Bedeutung zu.

Zu 4.2 Nr. 1b

Die von Hitzebelastung betroffenen **großflächigen räumlichen Handlungsschwerpunkte** mit **hoher Priorität im Offenland** können wertvolle Kaltluftentstehungsgebiete sein, die sich am Tag, z. B. aufgrund fehlender Verschattung, stark erhitzen, in der Nacht jedoch stark abkühlen und dadurch der Kaltluftbildung dienen. Für diese Bereiche sind Maßnahmen zur Dämpfung der Temperaturextreme zu empfehlen, welche zur Beschattung und Wasserspeicherung im Boden beitragen, ohne dabei die Kaltluftbildung und -weiterleitung herabzusetzen. Hierzu gehören insbesondere Landwirtschaftsformen mit Dauer- und Zwischenbegrünung sowie bodenschonender Bearbeitung. Entsprechende Flächen weisen eine Humusmehrung auf und tragen u. a. darüber hinaus zugleich zur Dämpfung des Starkregenabflusses bei. Auf entsprechende Zusammenhänge kann regionalplanerisch durch textliche Beiträge oder durch informelle Beiträge, z. B. in fachübergreifenden Arbeitsgruppen, hingewirkt werden.

Zu 4.2 Nr. 1c

In den urbanen räumlichen Handlungsschwerpunkten mit **mittlerem** Handlungsbedarf stehen Maßnahmen zur Erhaltung des vorhandenen Grünvolumens und zur Vermeidung einer Zunahme der Vollversiegelung im Vordergrund. Es sollte daher geprüft werden, in welcher Form entsprechende textliche Festlegungen in die Regionalpläne aufgenommen werden können.

Zu 4.2 Nr. 2a

Die mittels Fernerkundung in den kühlwirksamen Flächen identifizierten großflächigen räumlichen **Handlungsschwerpunkte mit sehr hohem** und **hohem Handlungsbedarf** sind für die Klimaanpassung auf Ebene der Regionalplanung von besonderer Bedeutung. Sie ergänzen die Erkenntnisse aus der Landesweiten Klimaanalyse Hessen (näher unter 4.1 Nr. 3).

Bei dem Schutz der regional bedeutsamen **Kaltluftentstehungsgebiete und der zugehörigen Luftleitbahnen** der Landesweiten Klimaanalyse Hessen steht der Erhalt ihrer Funktion gemäß den Vorgaben des LEP im Vordergrund. Im Bereich der **kühlwirksamen räumlichen Handlungsschwerpunkte mit sehr hohem und hohem Handlungsbedarf** sollte die Erhaltung der vorhandenen Flächennutzung, aber auch die Aufwertung der Kühlfunktion, z. B. durch den Rückbau von Drainagen in Wäldern oder den Rückbau vorhandener Vollversiegelung, im Fokus stehen.

Zu 4.2 Nr. 2b

Die betreffenden, vergleichsweise kühlen Räume in den großflächigen räumlichen Handlungsschwerpunkten mit **mittlerem** Handlungsbedarf umfassen neben Offenlandbereichen auch Siedlungsgebiete, die tagsüber keine Temperaturextreme und eine - wenn auch zum Teil nur geringe - nächtliche Abkühlung aufweisen. Zur Wahrung des Temperatur-Status-Quo sollte die Siedlungsentwicklung hier unter Sicherung relevanter Freiflächen und Luftleitbahnen erfolgen. An geeigneter Stelle kann auch die Sicherung, ggf. Stabilisierung oder Erhöhung der kühlwirksamen (großvolumigen) Grünausstattung dazu beitragen.

Zu 4.2 Nr. 3

Für die in der **Landesweiten Klimaanalyse Hessen** identifizierten regionalbedeutsamen Kaltluftentstehungsgebiete und die zugehörigen Luftleitbahnen trifft bereits die 3. Änderung des Landesentwicklungsplans (LEP) Hessen 2000 unter 4.2.3 Regelungen zur Festlegung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten für besondere Klimafunktionen auf Ebene der Regionalplanung.

Zu 4.2 Nr. 4a

Zur Steigerung der Schwammwirkung **im Offenland** sind geeignete Rückhalteflächen zu identifizieren. Die in diesem Projekt ermittelten Flächen mit hoher GPP beschreiben Räume, die wertvolle Wasser- und CO_2-Speicher darstellen und daher ein mögliches Beispiel für derartige Rückhalteflächen sein können. Es sollte geprüft werden, ob für die Schonung oder Entwicklung von raumbedeutsamen Rückhalteflächen eine zeichnerische Festlegung im Regionalplan unter Hinweis auf die mit der Festlegung vereinbarten bzw. nicht vereinbarten Nutzungen in Frage kommen.

Zu 4.2 Nr. 4b

Für den **urbanen Raum** sind regionalplanerisch ausschließlich textliche Beiträge zur Steigerung der Schwammwirkung zu empfehlen. Beispiele bilden Beiträge im Hinblick auf die Erhöhung des Anteils teilversiegelter anstatt vollversiegelter Oberflächen oder die Minderung des Anteils an Neuversiegelungsflächen.

Zu 4.2 Nr. 5

Zum sparsamen Umgang mit der begrenzten Ressource Wasser im urbanen Raum können regionalplanerisch insbesondere textliche Beiträge zur Verdeutlichung des Erfordernisses der flächenhaften Verbesserung der Verdunstungskühlung und der dafür benötigten Wasserversorgung der verdunstungsaktiven Vegetation formuliert werden.

Zu 4.2 Nr. 6

Aufgrund der Begrenzung des Schutzguts Fläche sollten bei allen Planungen die Elemente der **dreifachen Innenentwicklung**, d. h. Flächensparsamkeit (z. B. durch Forcierung multifunktionaler Flächennutzungskonzepte), Klimaanpassung (z. B. durch die Mehrung der großvolumigen Grünausstattung, Minderung von Vollversiegelungen) und die Mobilitätswende von Anfang an zusammen gedacht und dabei die energieeffiziente Siedlungsentwicklung einbezogen sowie in geeignete Festlegungen umgesetzt werden. Die Realisierung der städtebaulichen Zielsetzungen in der Bauleitplanung in großen wie in kleinen Gemeinden ist dabei von besonderer Bedeutung.

5.3 KOMMUNALE EBENE

1. Handlungsschwerpunkte für die Klimaanpassung

Auf der kommunalen Ebene liegt das Hauptaugenmerk bei der Klimaanpassungsplanung und den Klimaanpassungsmaßnahmen im besiedelten Bereich. Hierfür werden in der Studie von Keller et al. 2025 - aufbauend auf Stadtstrukturtypen - Räume mit **Indizfunktion** als Handlungsschwerpunkte für die Klimaanpassung benannt. Daher steht es den Kommunen frei, diese zu nutzen sowie anhand eigener verfeinerter Untersuchungen und Bewertungskriterien diese räumlichen Handlungsschwerpunkte für die Klimaanpassung zu modifizieren. **Für die Räume mit Indizfunktion als Handlungsschwerpunkte für die Klimaanpassung hat die Studie von Keller et al. 2025 Maßnahmentypen entwickelt** (siehe dazu Kapitel 6).

Die Ausführungen unter 4.2 sind für die kommunalen Planungsträger von hoher Bedeutung. Nach Festlegung entsprechender planerischer Vorgaben zum Erreichen der Umweltziele als Ziele oder Grundsätze der Raumordnung sind gemäß § 1 Abs. 4 BauGB die Bauleitpläne an diese Ziele der Raumordnung anzupassen. Grundsätze der Raumordnung sind nach § 4 Abs. 1 ROG bei raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen in Abwägungs- und Ermessensentscheidungen zu berücksichtigen.

In einen Flächennutzungsplan können beispielsweise klimatisch belastete Quartiere, Potenzialflächen zur klimaoptimierten Nachverdichtung oder zum klimasensiblen Neubau im Siedlungsraum dargestellt werden (siehe Beispiel: FNP 2030 der Stadt Karlsruhe[8]). Im Freiraum sind Darstellungen zu Kaltluftleitbahnen, Kühlflächen, bioklimatischen Entlastungsbereichen oder Retentionsflächen möglich.

2. Konkretisierung der Umweltziele

Die in Keller et al. 2025 vorliegenden Fachgrundlagen bieten den Kommunen eine geeignete Grundlage zur Umsetzung der Umweltziele, die auf lokaler Ebene weiter konkretisiert werden können. Gleichzeitig wahren sie die gebotene räumliche Flexibilität.

Lokale Umweltziele zur Klimaanpassung sollten vor allem der **Steigerung der Schwammwirkung** (z. B. durch Entsiegelungen, multifunktionale Nutzung von Flächen u. a. für den Niederschlagsrückhalt) sowie in universellen Hotspots der räumlichen Handlungsschwerpunkte der **Kühlung durch Verdunstung** (z. B. durch Mehrung des Grünvolumens) und der **vermehrten Beschattung** dienen. Eine hervorgehobene Bedeutung besitzen diese Daten im Rahmen von Konzepten zur dreifachen Innenentwicklung. Mögliche Maßnahmentypen und die zugehörigen Umweltziele sind nachfolgend unter Kapitel 6 sowohl für universelle Hot- als auch universelle Coldspots der räumlichen Handlungsschwerpunkte zusammengestellt.

8

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://nachbarschaftsverband.karlsruhe.de/securedl/sdl-eyJ0eXAiOiJKV1QiLCJhbGciOiJIUzI1NiJ9.eyJpYXQiOjE3NDU0MzQ1MzEsImV4cCI6MzMyMTc2MjY0NTYsInVzZXIiOjAsImdyb3VwcyI6WzAsLTFdLCJmaWxlIjoiZmlsZWFkbWluL3VzZXJfdXBsb2FkLzA3X01hbmRhbnRlbnNlaXRlbi9OYWNoYmFyc2NoYWZ0c3ZlcmJhbmQvRk5QL1BERi8wM19GTlBfMjAzMF9CZWdydWVuZHVuZy5wZGYiLCJwYWdlIjoxMTM0NX0.A--HLBCQAuai3lmZDYHPkCdPz_xjGWHzSovmqvv1eqQ/03_FNP_2030_Begruendung.pdf&ved=2ahUKEwjX_JTKu_-NAxUa8LsIHcovISEQFnoECBQQAQ&usg=AOvVaw1FBFFyU1M3_RlE6NWyrudJ

6 Auswahl und Verortung von Maßnahmentypen

6.1 EINFÜHRUNG UND ÜBERSICHT

Die nachfolgenden Ausführungen geben einen kurzen Überblick über die Verortung bzw. Auswahl von Maßnahmentypen. Eine ausführliche Beschreibung der Thematik bietet Kapitel 20 des Abschlussberichts[9].

Die für die örtliche Planungsebene beschriebenen Maßnahmentypen basieren auf einem umfassenden Review bestehender Handlungshilfen und Leitfäden zur **kommunalen Klimaanpassung.** Diese Maßnahmentypen können z. T. mehreren der sechs übergeordneten Umweltziele auf Landesebene zugeordnet werden. Eine Übersicht aller Maßnahmentypen des Projektes, der ihnen zugeordneten ID sowie diverse Zusatzinformationen bietet eine separat veröffentlichte Übersichtstabelle.[10]

Nachfolgend wird aufgezeigt, wie die landesweiten übergeordneten Umweltziele der universellen Hot- und Coldspots den räumlichen Handlungsschwerpunkten in den universellen Hot- und Coldspots zugeordnet werden können. Danach wird darauf eingegangen, dass diese Umweltziele durch geeignete Maßnahmentypen auch auf kommunaler Planungsebene umsetzbar sind und hierbei die Zugrundelegung von Stadtstrukturtypen hilfreich sein kann. Dies erfolgt im Wesentlichen durch Verweise auf den Abschlussbericht, der in Kapitel 20 umfassende Ausführungen enthält, auf die hier aus Gründen der möglichst gestrafften Darstellung verzichtet wird.

[9] Sina Keller et al. *Entwicklung von Planungshilfen für Klimaschutz und Klimaanpassung in der räumlichen Gesamtplanung mittels Fernerkundung - Abschlussbericht*. KITopen, 2025

[10] Böhnke, Denise; Walter, Madita (2025): *Übersicht der Maßnahmentypen zur Klimaanpassung in der räumlichen Gesamtplanung mittels Fernerkundung_Juni-2025*. Auftraggeber: Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum (HMWVW). KITopen, 2025

6.2 MAßNAHMENTYPENAUSWAHL ANHAND DER ÜBERGEORDNETEN UMWELTZIELE

Die in Kapitel 5 beschriebenen Umweltziele zielen je nach thermischer Situation auf die Dämpfung der Temperaturextreme oder auf den Erhalt der Kühlfunktion. Den Zusammenhang dieser Umweltziele mit den Themenkarten der **räumlichen Handlungsschwerpunkte** in **universellen Hot- und Coldspots beschreibt in allgemeiner Form die nachfolgende Tabelle.**

Zugehörige grundsätzlich geeignete Maßnahmentypen sind beispielhaft für den **besiedelten Bereich** - hier mit Fokus auf räumliche **Handlungsschwerpunkte in universellen Hotspots** - in Abbildung 43 und Abbildung 44 dargestellt.

In Kapitel 20.3 des Abschlussberichts sind im Detail grundsätzlich geeignete Maßnahmentypen für jedes der insgesamt sechs übergeordneten Umweltziele beschrieben.

Tabelle 2: Verknüpfung von Umweltzielen mit universellen Hot- und Coldspots und der LWKA

Nr.	übergeordnetes Umweltziel	Zuordnung universelle Hot-/Coldspots
1	Dämpfung der Temperaturmaxima in den universellen Hotspots	Universelle Hotspots
2	Schonung der Kühlfunktion in den universellen Coldspots	Universelle Coldspots
3	Erhalt der Kühlfunktion der regionalbedeutsamen Kaltluftentstehungsgebiete und der Funktion der zugehörigen Luftleitbahnen der Landesweiten Klimaanalyse Hessen.	Betrifft v.a. Bereiche mit deutlicher nächtlicher Abkühlung, d.h. univ.Coldspots der Priorität 1 und 3 und univ. Hotspots der Priorität 2.
4	Steigerung der Niederschlagsretention (Schwammwirkung) im besiedelten und unbesiedelten Raum	Universelle Hot- und Coldspots
5	Schonung der Ressource Trink-/Grundwasser vorrangig im besiedelten Raum	Schwerpunkt besiedelter Raum, d.h. univ. Hotspots
6	Forcierung von Synergien der Klima-anpassung mit der dreifachen Innen-entwicklung und der energieeffizienten Siedlungsentwicklung	Schwerpunkt besiedelter Raum, d.h. univ. Hotspots

Kategorie	ID	Maßnahmentypen
Versiegelungsmanagement (Neuversiegelung vermeiden, minimieren, ausgleichen; Altversiegelung zurückführen)	M6-1	Voll-/Teilentsiegelung
	M6-2	Wasserdurchlässige Beläge
	M6-3	Rückbau (Entdichtung)
	M6-4	Neuversiegelung minimieren
Verschattung im Quartier erhöhen (öffentlicher Raum, Gebäude, Privatflächen)	M11-1	Grüne Parkierungen, Verschattung von Parkplatzflächen
	M11-2	Verschattung durch Baumpflanzungen
	M11-3	Technischer Sonnenschutz
	M11-5	Innen-/Hinterhofbegrünung
	M11-8	Belüftungs- und beschattungsoptimierte Gebäudestruktur und Straßenführung
Grünausstattung verbessern (neue Grünflächen anlegen, Gebäudebegrünung, Grünvitalität erhalten und verbessern, Grünvolumen steigern, Vernetzung der Grünflächen, Grünzugänglichkeit schaffen und verbessern)	M2-1	Extensive Dachbegrünung
	M2-2	Intensive Dachbegrünung
	M2-3	Optimierte Baumstandorte (Rigolen)
	M5-1	Fassadenbegrünung – Wandsysteme
	M5-3	Vertikalbegrünung (Masten, Pergolen, ...)
	M6-3	Rückbau (Entdichtung)
	M6-4	Rückbau (Entdichtung)
	M6-4	Neuversiegelung minimieren
	M10-3	Erhalt, Entwicklung und Schaffung großräumiger Grün-, Wald- und Freiflächen
	M10-4	Vernetzung und Anbindung grüner Infrastruktur
	M11-2	Verschattung durch Baumpflanzungen
	M11-4	Anlage von Grünflächen
	M11-5	Innen-/ Hinterhofbegrünung
	M11-6	Pocket-Parks
	M11-7	Grüne Gleisstraßen
Strahlungswärme senken (Mehrfachreflektionen verringern, Rückstrahlung verbessern, Wärmequellen reduzieren)	M2-5	PV-Nutzung
	M5-1	Fassadenbegrünung - Wandsyststeme
	M5-3	Vertikalbegrünung (Masten, Pergolen, ...)
	M11-1	Grüne Parkierungen, Veschattung von Parkflächen
	M11-2	Verschattung durch Baumpflanzungen
	M11-4	Anlage von Grünflächen
	M11-5	Innen-/ Hinterhofbegrünung
	M11-6	Pocket-Parks
	M12-1	Erhöhung der Oberflächen-Albedo („Reflektion“), „Cool Roofs“

Abbildung 43: Maßnahmentypenauswahl für den besiedelten Bereich anhand des übergeordneten Umweltziels (hier abgekürzt als "überg. UZ") „Dämpfung der Temperaturmaxima“ - Teil 1.

Kategorie	ID	Maßnahmentypen
Erhöhen der Transpiration (Verbesserung der Grünausstattung und ihrer Wasserversorgung, Erhöhen der direkten (z. B. Wasserspiele) und bodengebundenen Wasserverdunstung)	M1-1	Flächenversickerung
	M1-2	Muldenversickerung
	M2-2	Intensive Dachbegrünung
	M2-3	Verdunstungsdach
	M3-1	Optimierte Baumstandorte (Rigolen)
	M3-2	Verdunstungsbeete
	M3-3	Klimakomfortplatz
	M4-4	Regenwassernutzung zur Gebäudekühlung
	M5-1	Fassadenbegrünung – Wandsysteme
	M6-2	Wasserdurchlässige Beläge
	M6-4	Neuversiegelung minimieren
	M7-4	Erlebbares Wasser im öffentlichen Raum schaffen
	M10-6	Erhalt und Schaffung von offenen bewegten Wasserflächen
	M11-4	Anlage von Grünflächen
	M11-7	Grüne Gleistrassen
Ausreichende Siedlungsdurchlüftung sicherstellen (Kalt- / Frischluftentstehungsgebiete erhalten/ ausweiten/ Leistung steigern, Kalt-/ Frischluftleitbahnen sichern durch Bauverbote, angepasste Bauweise, Siedlungsstruktur anpassen)	M10-1	Freihaltung von Frischluftschneisen
	M10-2	Erhalt, Entwicklung und Schaffung von Kaltluftleitbahnen und Kaltluftentstehungsgebieten
	M10-3	Erhalt, Entwicklung und Schaffung großräumiger Grün-, Wald- und Freiflächen
	M11-8	Belüftungs- und beschattungsoptimierte Gebäudestruktur und Straßenführung
Schutz, Erhalt, Schonung und Entwicklung vorhandener Kühlstrukturen und von Flächen mit Kühlfunktion (großkronige Bäume, unversiegelte Flächen, Parks und Grünflächen, Stadtwälder, Kleingärten usw.)	M13-1	Schutz und Erhalt großkroniger (Alt-)Bäume im urbanen Raum
	M13-2	Schutz, Erhalt und Schonung unversiegelter Flächen im urbanen Raum
	M13-3	Schutz, Erhalt und Entwicklung kleinräumiger Grün-, Wald- und Freiflächen
	M13-4	Schutz, Erhalt und Entwicklung von urbanen Kleingärten, Pocket Parks, Innenhofbegrünungen u. ä.

Abbildung 44: Maßnahmentypenauswahl für den besiedelten Bereich anhand des übergeordneten Umweltziels (hier abgekürzt als "überg. UZ") „Dämpfung der Temperaturmaxima“ - Teil 2.

6.3 MAßNAHMENTYPENAUSWAHL ANHAND VON STADTSTRUKTURTYPEN

Für die kommunale Planungsebene können insbesondere die im Projekt entwickelten Stadtstrukturtypen bei der Planung von Klimaanpassungsmaßnahmen hilfreich sein. Die entwickelten Stadtstrukturtypen sind hessenweit als Information pro Gitterzelle (Hektar) verfügbar und auch direkt vergleichbar. Sie bieten sich daher als ein Element der Zuordnung von Klimaanpassungsmaßnahmentypen und Maßnahmensets anhand des dominanten Stadtstrukturtyps an. Mögliche Maßnahmentypen für Stadtstrukturtypen sind in Abbildung 45 bis Abbildung 48 sowie deutlich ausführlicher in Kapitel 19 des Abschlussberichts beschrieben.

Eine Priorisierung, welche Maßnahmen innerhalb eines Quartiers vorrangig umgesetzt werden sollten, obliegt der planenden Kommune. Bereits die Priorisierung der räumlichen Handlungsschwerpunkte für Klimaanpassungsmaßnahmen besitzt auf der kommunalen Ebene eine Indizfunktion. Hierdurch ist es den Kommunen möglich, ergänzend kleinräumigere Informationen und weitergehende Überlegungen bei der räumlichen Priorisierung der Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen einzubeziehen.

Stadtstrukturtyp	ID	Maßnahmentyp
EFH	M2	Dachbegrünung (alle Typen)
	M5	Fassadenbegrünung (alle Typen)
	M6-1	Voll-/Teilentsiegelung
	M7-4	Erlebbares Wasser im öffentlichen Raum schaffen
	M11-1	Grüne Parkierungen, Verschattung von Parkflächen
	M11-5	Innen-/Hinterhofbegrünung
	M11-6	Pocket-Parks
	M12-2	Sommerlicher Wärmeschutz an Gebäuden
HH Hochhäuser	M2	Dachbegrünung (alle Typen)
	M5	Fassadenbegrünung (alle Typen)
	M6-1	Voll-/Teilentsiegelung
	M7-4	Erlebbares Wasser im öffentlichen Raum schaffen
	M11-1	Grüne Parkierungen, Verschattung von Parkflächen
	M11-2	Verschattung durch Baumpflanzungen
	M11-3	Technischer Sonnenschutz
	M11-6	Pocket-Parks
	M12-1	Erhöhung der Oberflächen-Albedo („Reflektion“), „Cool Roofs“
	M12-2	Sommerlicher Wärmeschutz an Gebäuden
MFH Mehrfamilienhäuser	M2	Dachbegrünung (alle Typen)
	M5	Fassadenbegrünung (alle Typen)
	M6-1	Voll-/Teilentsiegelung
	M6-3	Rückbau (Entdichtung)
	M7-4	Erlebbares Wasser im öffentlichen Raum schaffen
	M11-1	Grüne Parkierungen, Verschattung von Parkflächen
	M11-2	Verschattung durch Baumpflanzungen
	M11-3	Technischer Sonnenschutz
	M11-5	Innen-/Hinterhofbegrünung
	M11-6	Pocket-Parks
	M12-1	Erhöhung der Oberflächen-Albedo („Reflektion“), „Cool Roofs“
	M12-2	Sommerlicher Wärmeschutz an Gebäuden
MFH-BR Blockrandbebauung	M2	Dachbegrünung (alle Typen)
	M5	Fassadenbegrünung (alle Typen)
	M6-1	Voll-/Teilentsiegelung
	M7-4	Erlebbares Wasser im öffentlichen Raum schaffen
	M11-1	Grüne Parkierungen, Verschattung von Parkflächen
	M11-5	Innen-/Hinterhofbegrünung
	M11-6	Pocket-Parks
	M11-7	Grüne Gleistrassen
	M12-1	Erhöhung der Oberflächen-Albedo („Reflektion“), „Cool Roofs“
	M12-2	Sommerlicher Wärmeschutz an Gebäuden

Abbildung 45: Von Stadtstrukturtypen zu Maßnahmentypen, Temperatur - Teil 1 (nach Beermann et al. 2014, verändert).

Stadtstrukturtyp	ID	Maßnahmentyp
MFH-Z Zeilenbebauung	M2	Dachbegrünung (alle Typen)
	M5	Fassadenbegrünung (alle Typen)
	M6-1	Voll-/Teilentsiegelung
	M6-3	Rückbau (Entdichtung)
	M7-4	Erlebbares Wasser im öffentlichen Raum schaffen
	M11-1	Grüne Parkierungen, Verschattung von Parkflächen
	M11-5	Innen-/Hinterhofbegrünung
	M11-6	Pocket-Parks
	M12-2	Sommerlicher Wärmeschutz an Gebäuden
OEG Bebauung hoher Dichte (Öffentliche Gebäude)	M2	Dachbegrünung (alle Typen)
	M5	Fassadenbegrünung (alle Typen)
	M6-1	Voll-/Teilentsiegelung
	M7-4	Erlebbares Wasser im öffentlichen Raum schaffen
	M11-1	Grüne Parkierungen, Verschattung von Parkflächen
	M11-2	Verschattung durch Baumpflanzungen
	M11-3	Technischer Sonnenschutz
	M11-5	Innen-/Hinterhofbegrünung
	M12-1	Erhöhung der Oberflächen-Albedo („Reflektion“), „Cool Roofs“
	M11-7	Grüne Gleistrassen
WGL Großflächige, niedrige Bebauung (Gebäude) für Wirtschaft und Gewerbe	M2	Dachbegrünung (alle Typen)
	M5	Fassadenbegrünung (alle Typen)
	M6-1	Voll-/Teilentsiegelung
	M10-7	Anthropogene Wärmeemissionen reduzieren
	M11-1	Grüne Parkierungen, Verschattung von Parkflächen
	M11-2	Verschattung durch Baumpflanzungen
	M11-3	Technischer Sonnenschutz
	M11-6	Pocket-Parks
	M12-1	Erhöhung der Oberflächen-Albedo („Reflektion“), „Cool Roofs“
	M12-2	Sommerlicher Wärmeschutz an Gebäuden
NG	Nebengebäude wie Garagen, Carports, Schuppen usw. sind oft Teil der oben genannten Hauptgebäudetypen, entsprechend sind die Maßnahmen zuzuordnen.	

Abbildung 46: Von Stadtstrukturtypen zu Maßnahmentypen, Temperatur - Teil 2 (nach Beermann et al. 2014, verändert).

SST	ID	Maßnahmenkategorie	Relevanz
EFH	M1	Versickerung	xx
	M4	Speicher zur Regenwassernutzung	xx
	M2	Dachbegrünung	x
	M3	Bepflanzte Regenwassersysteme	x
	M4	Speicher zur Regenwassernutzung	x
	M5	Fassadenbegrünung	x
	M6	Entsiegelung	x
	M7	Wasserführende Fläche	x
	M9	Starkregenabflüsse zurückhalten und leiten	o-x
MFH Mehrfamilienhäuser	M1	Versickerung	xx
	M4	Speicher zur Regenwassernutzung	xx
	M2	Dachbegrünung	x
	M3	Bepflanzte Regenwassersysteme	x
	M4	Speicher zur Regenwassernutzung	x
	M5	Fassadenbegrünung	x
	M6	Entsiegelung	x
	M7	Wasserführende Fläche	x
	M9	Starkregenabflüsse zurückhalten und leiten	o-x
MFH-BR Blockrandbebauung	M6	Entsiegelung	xx
	M9	Starkregenabflüsse zurückhalten und leiten	xx
	M1	Versickerung	x
	M2	Dachbegrünung	x
	M3	Bepflanzte Regenwassersysteme	x
	M4	Speicher zur Regenwassernutzung	x
	M5	Fassadenbegrünung	x
	M7	Wasserführende Fläche	x
MFH-Z Zeilenbebauung	M1	Versickerung	xx
	M3	Bepflanzte Regenwassersysteme	xx
	M4	Speicher zur Regenwassernutzung	xx
	M5	Fassadenbegrünung	xx
	M2	Dachbegrünung	x
	M6	Entsiegelung	x
	M7	Wasserführende Fläche	x
	M9	Starkregenabflüsse zurückhalten und leiten	x
OEG Bebauung hoher Dichte (Altstadtkerne)	M6	Entsiegelung	xx
	M9	Starkregenabflüsse zurückhalten und leiten	xx
	M2	Dachbegrünung	o-x
	M4	Speicher zur Regenwassernutzung	o-x
	M5	Fassadenbegrünung	o-x
	M7	Wasserführende Fläche	o-x
	M1	Versickerung	o
	M3	Bepflanzte Regenwassersysteme	o
WGL Großflächige, niedrige Bebauung (Gebäude) für Wirtschaft und Gewerbe	M1	Versickerung	xx
	M2	Dachbegrünung	xx
	M4	Speicher zur Regenwassernutzung	xx
	M5	Fassadenbegrünung	xx
	M6	Entsiegelung	xx
	M7	Wasserführende Fläche	xx
	M9	Starkregenabflüsse zurückhalten und leiten	xx
	M3	Bepflanzte Regenwassersysteme	x
HH	Hochhäuser sind in [59] nicht gesondert aufgeführt. Die Maßnahmenzuordnung kann anhand der Bebauungsdichte und vorhandenen Freiräume den eher locker bebauten MFH-Typen oder den eher dicht bebauten OEG bzw. MFH-BR zugeordnet werden.		

Legende „Relevanz“: o = geringe Relevanz | x = relevante Maßnahme | xx = besonders relevante Maßnahme

Abbildung 47: Von Stadtstrukturtypen zu Maßnahmentypen, Schwammwirkung - Teil 1 (nach HMLU 2022, verändert).

SST	ID	Maßnahmenkategorie	Relevanz
NG	Nebengebäude wie Garagen, Carports, Schuppen usw. sind oft Teil der oben genannten Hauptgebäudetypen. Entsprechend sind die Maßnahmen zuzuordnen.		
Parks / Grünflächen	M1	Versickerung	xx
	M3	Bepflanzte Regenwassersysteme	xx
	M4	Speicher zur Regenwassernutzung	xx
	M7	Wasserführende Fläche	xx
	M9	Starkregenabflüsse zurückhalten und leiten	x
	M5	Fassadenbegrünung	o-x
Straßen / Plätze	M1	Versickerung	xx
	M3	Bepflanzte Regenwassersysteme	xx
	M4	Speicher zur Regenwassernutzung	xx
	M6	Entsiegelung	x
	M9	Starkregenabflüsse zurückhalten und leiten	x
	M5	Fassadenbegrünung	o-x
	M7	Wasserführende Fläche	o-x

Legende „Relevanz“: o = geringe Relevanz | x = relevante Maßnahme | xx = besonders relevante Maßnahme

Abbildung 48: Von Stadtstrukturtypen zu Maßnahmentypen, Schwammwirkung - Teil 2 (nach HMLU 2022, verändert). Parks/Grünflächen und Straßen/Plätze wurden ergänzend aufgenommen, auch wenn sie keine eigenen SST des FE-Projektes darstellen.

7 Monitoring

7.1 EINFÜHRUNG UND ÜBERBLICK

Für das Monitoring der mit Hilfe der Fernerkundung ermittelten Daten und Themenkarten ist die Klärung der (wirtschaftlichen) Monitoringfähigkeit der Datengrundlage von zentraler Bedeutung.

In den tabellarischen Übersichten bei der Beschreibung der Themenkarten wurde bereits auf die Monitoringfähigkeit der unterschiedlichen Datengrundlagen eingegangen. Zur besseren Übersicht wird hier eine Synopse der wichtigsten Quellen der zugrundeliegenden **Fernerkundungsdaten** zusammengestellt und nach den Kriterien Auflösung, Verwendungszweck, Aufnahmezyklus und Planungsebene aufgegliedert.

Themenkomplex	Fernerkundliche Eingangsdaten	Verwendungszweck	Auflösung	Monitoringfähigkeit / Aufnahmezyklus	Eignung
Klimaanpassung					
Temperatur	MODIS	LST Nacht Hot- und Coldspots, Temperaturgradienten	1.000 m	mehrfach am Tag	Landes- und Regionalebene
	Landsat 8, 9	LST Tag Hot- und Coldspots, Temperaturgradienten	30 m	16 Tage	Alle Planungsebenen
Flächenanalyse	3D Gebäudemodell	Gebäudeklassen	0,2 m	Landesweiter Befliegungszyklus	Kommunale Ebene
Versiegelung	Orthophotos (RGBI)	Klassifikation der Versiegelungsklassen (vollversiegelt, teilversiegelt, unversiegelt)	0,2 m	Landesweiter Befliegungszyklus	Kommunale Ebene
Grünvitalität	Sentinel 2	NDVI, DSWI	10 m bzw. 20 m	3-4 Tage	alle Planungsebenen
	MODIS	GPP	500 m	Mehrfach am Tag	Landes- und Regionalebene (nicht bebaute Gebiete)
Grünflächen & Vegetationswuchshöhen	Orthophotos (RGBI) Digitales Höhenmodell	Klassifikation von Grünflächen und Vegetationswuchshöhen in gering, mittel und hoch	0,2 m	Landesweiter Befliegungszyklus	Kommunale Ebene
Wasser	SMAP	Bodenfeuchte	9000 m	wenige Tage (i.d.R. 3)	Landesebene
Klimaschutz					
(Freiflächen) Photovoltaik	Ortohphotos (RGBI) Digitales Höhenmodell	Erkennung von PV hessenweit	0,2 m	Landesweiter Befliegungszyklus täglich	Landesebene, detailliert

Die zusätzlich hinzugezogenen Informationen aus Geofachdatenbanken oder Zensus-Daten haben andere, teils unregelmäßige Update-Zyklen, auf die bereits bei den Themenschwerpunkten eingegangen wurde.

7.2 MONITORING DER MAßNAHMEN (UMSETZUNG)

Für das Monitoring von Maßnahmen muss unterschieden werden zwischen dem Monitoring der Umsetzung einer Maßnahme und deren Wirkung. Letztere zeigt sich üblicherweise erst auf einer deutlich längeren Zeitskala.

Monitoring der Maßnahmenumsetzung:

Grundsätzlich lässt sich mit Fernerkundungsmethoden die Umsetzung jener Maßnahmen monitoren, die

- die Landbedeckung
- den Gebäudedatenbestand
- die betrachteten Grünindikatoren
- die Oberflächentemperatur

betreffen.

Die Umsetzung beispielsweise von Entsiegelungsmaßnahmen, Dachbegrünungen, Baumpflanzungen (Erhöhung der Grünvolumina), Vergrößerung von Wasserflächen, größere bauliche Veränderungen etc. kann daher durch eine Veränderungsdetektion - basierend auf o. g. Themenkarten - in den Fernerkundungsdaten erfasst und kartografisch dargestellt werden.

Monitoring der Maßnahmenwirkung:

Die Maßnahmenwirkung (z. B. Beschattungseffekte und damit verbundene Kühleffekte) spielt sich in der Regel auf größeren Zeitskalen ab. Die o. g. temperaturbasierten Themenkarten sind bspw. aus 10 Jahres-Mitteln der Sommermonate errechnet. Eine solche Zeitspanne ist sinnvoll, um kurzzeitige Wettereffekte von klimatischen Effekten zu trennen.

8 Hinweise zu Daten und Analyse-Verfahren

Die Hinweise zu Daten und Analyse-Verfahren sind in der folgenden Tabelle 3, Tabelle 4 und Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 3: Übersicht der Fernerkundungsdaten und Deep-Learning-Verfahren zur Bewertung ihrer planerischen Eignung in den jeweiligen Themenbereichen.

Themenkomplex	Fernerkundliche Eingangsdaten	Verwendungszweck	Auflösung	Deep-Learning-Prozesse	Eignung
Klimaanpassung					
Temperatur	MODIS	LST Nacht Hot- und Coldspots, Temperaturgradient	1.000 m	-	Landesebene und Region
	Landsat 8, Landsat 9	LST Tag Hot- und Coldspots, Temperaturgradienten	30 m (herunter-gerechnet von 100 m)	-	alle Planungsebenen
Flächenanalyse	3D Gebäudemodell	Gebäudeklassen	0,2 m	Klassifikation	Kommunale Ebene
Versiegelung	Orthophotos (RGBi)	Klassifikation der Versiegelungsklassen (vollversiegelt, teilversiegelt, unversiegelt)	0,2 m	Segmentierung mit DL	Kommunale Ebene
Grünvitalität	Sentinel 2	Berechnungen NDVI und DSWI	10 m bzw. 20 m	-	alle Planungsebenen
	MODIS	GPP	500 m	-	Landesebene und Region (exkl. bebaute Gebiete)
Grünflächen und Vegetationswuchs-höhen	Orthophotos (RGBi)	Klassifikation von Grünflächen und Vegetationswuchshöhen (gering, mittel, hoch)	20 cm	Segmentierung mit DL	Kommunale Ebene
Wasser	Sentinel-2 multispektrale Satellitendaten	Schätzung der Bodenfeuchte	Punktweise	Schätzproblem (Regression im KI-Kontext)	-
Klimaschutz					
(Freiflächen) Photovoltaik	Planet Scope Daten	Erkennung von PV hessenweit	3 m	Instanzsegmentie-rung, Objekterkennung + Klassifikation	Landesweit, detailliert

Tabelle 4:Übersicht vorhandener Datensätze.

ID	Bezeichnung	Quelle	Jahr	Status	Themenschwerpunkt
1	Daten für das Zentrale-Orte-Modell in Hessen	HMWVW	~	frei verfügbar	**alle**
2	Daten zur Einwohnerzahl/-dichte in Hessen	Hess. Statistisches Landes-amt, Hessen Agentur	~	frei verfügbar	Hitze
3	L-19-Gutachten „Landschaftswasserhaushalt unter Klimawandel stabilisieren“ mit zugehöriger Thermalkarte für ganz Hessen	HMWVW	~	erhalten	Wasser
4	Daten aus Projekt „Hitzekarten für Hessen“; Kartenprodukte im vor der Veröffentlichung stehenden Viewer und Datenblätter	HLNUG	2022	noch nicht veröffentlicht	Hitze, Grünflächen
5	Landesweite Klimaanalyse Hessen	HMWVEW	2022	erhalten	Hitze
6	Zukunftsplan Wasser - Wasserwirtschaftlicher Fachplan Hessen	HMUKLV	2022	erhalten	Wasser
7	FFPV-Monitoringergebnisse	Landesenergie Agentur	~	erhalten	FFPV
8	Digitales Höhenmodell Hessen in verschiedenen Auflösungen	HVBG	2009 bis 2020	frei verfügbar	FFPV, Wasser
9	Gefährdungsanalyse von Verkehrsinfrastrukturen gegenüber Klimaauswirkungen	TU Darmstadt	2021	erhalten	Temperatur
10	ALKIS-Daten ohne Eigentümerdaten, insbe-sondere Gebäudebestand	HVBG	~	erhalten	**alle**
11	Orthophotos	HVBG	~	erhalten	FFPV, Wasser, Versiegelung, Grün
12	ATKIS-Daten zu den hessischen Siedlungs-gebieten und den Grünflächen in Hessen (Wälder, Parkanlagen, Wiesen usw.)	HVBG	~	erhalten	alle
13	Natureg-Geodaten (Biotopkartierungen, Schutzgebiete)	HLNUG, RP Kassel	2010 bis 2021	frei verfügbar	FFPV, Grünflächen
14	Daten aus dem Geoportal Hessen	-	~	frei verfügbar	alle
15	Biotopkartierung und Grünflächenkataster aus dem Geoportal Frankfurt	Stadt Frankfurt	2020, 2015	frei verfügbar	Grünflächen
16	Agrarfachplanung	HLNUG	2022	erhalten	FFPV
17	Bodenzahl	HMWVW	~	erhalten	FFPV

Tabelle 5: Fernerkundliche Produkte. Hinweis: Der Lebenszyklus der Satellitenmissionen ist häufig begrenzt, jedoch stellen die entsprechenden Programme eine nachhaltige Sicherung der Dateneigenschaften sicher. Der manuelle Aufwand zur Vorverarbeitung und Prozessierung wurde in drei Klassen eingestuft: gering = Daten direkt nutzbar, mittel = Anwendung von bspw. einer Bewölkungsfilterung nötig, und hoch = verschiedene sequenzielle Vorverarbeitungsschritte notwendig.

Bezeichnung	Wiederholrate Monitoring	Räumliche Auflösung	Manueller Aufwand zu Vorverarbeitung & Prozessierung	Anschaffungskosten	Benötigte Infrastruktur, Archivierungsaufwand	Planungsebene
Sentinel 3	27 Tage	300 m	mittel	frei verfügbar	keine, nicht nötig	Land
Sentinel 2	3-4 Tage	10 m	mittel	frei verfügbar	keine, nicht nötig	-
MODIS	4-mal pro Tag	500 m, LST: 1.000 m	gering	frei verfügbar	keine, nicht nötig	Land
Landsat 8	16 Tage	30 m, 100 m	mittel	frei verfügbar	keine, nicht nötig	Region
Landsat 9	16 Tage	30 m	mittel	frei verfügbar	keine, nicht nötig	Region
ECOSTRESS (LST)	1 bis 4 Tage	70 m	mittel	frei verfügbar	keine, nicht nötig	Region
Sentinel-1 für Bodenfeuchte	6-12 Tage	5 m	hoch	frei verfügbar	keine, nicht nötig	Kommune
Planet Earth (RGB, NIR, max. 8 Bänder)	täglich	0,5 bis 3 m	mittel	nicht frei verfügbar	Abo-Modell	Kommune
Airborne Laser Daten	bei Bedarf	Punktdaten (keine räuml. Auflösung)	hoch	nicht frei verfügbar	eigene Archivierung	alle
EnMAP Daten	off-Nadir: 4 Tage, Nadir: 27 Tage	30 m	mittel	frei verfügbar	keine, nicht nötig, Lebenszyklus Satellit begrenzt, DLR-Programme sichern Nachhaltigkeit der Dateneigenschaften	

HESSEN