

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

Forschungs- und Entwicklungsvorhaben



Auftraggeber: Hessisches Ministerium für
Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und
ländlichen Raum

Abschlussbericht

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

Berichtszeitraum:	03.11.2022 bis 30.06.2025
Auftraggeber:	Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum (HMWVV)
Durchführung:	KIT Transfer GmbH (KCT)
Vorhabenbezeichnung:	Entwicklung von Planungshilfen für Klimaschutz und Klimaanpassung in der räumlichen Gesamtplanung mittels Fernerkundung
Laufzeit:	03.11.2022 bis 30.06.2025
Projektleitung:	Prof. Dr.-Ing. Stefan Hinz (stefan.hinz@kit-ct.de)
Zitierempfehlung:	Sina Keller et al. <i>Entwicklung von Planungshilfen für Klimaschutz und Klimaanpassung in der räumlichen Gesamtplanung mittels Fernerkundung - Abschlussbericht</i> . KITopen, 2025

Kurzzusammenfassung

Dieser Abschlussbericht fasst die wesentlichen Ergebnisse des Vorhabens *Entwicklung von Planungshilfen für Klimaschutz und Klimaanpassung in der räumlichen Gesamtplanung mittels Fernerkundung* zusammen. Ziel des Projekts war es, zu beiden Themenfeldern digitale Themenkarten und Geofachdaten bereitzustellen, die mittels Fernerkundung erhoben wurden und als Planungshilfen dienen sollen.

Der Bericht gibt zunächst einen Überblick über die Zielsetzung des Projekts und die Projektstruktur in Teil I. Der Teil II beschreibt die Projektinhalte auf dem Gebiet der Klimaanpassung einschließlich der Ableitung von möglichen Umweltzielen und Maßnahmentypen. Die Themenkarten und Geofachdaten werden räumlich differenziert ermittelt und für die Ebenen Land, Region und Kommune betrachtet. Anschließend werden in Teil III die Projektinhalte auf dem Gebiet des Klimaschutzes mit Fokus auf Freiflächen-Photovoltaik (FF-PV) beschrieben. Den Schwerpunkt bildet hierbei eine landesweite Analyse der Flächenpotenziale für die FF-PV-Nutzung, die räumlich differenziert für die Ebenen Land, Region, Landkreis und Kommune durchgeführt wurde. Untersucht werden außerdem die Potenziale für Photovoltaik (PV) auf Stellplätzen für mindestens 50 Fahrzeuge. Ergänzt wird dies in Teil IV durch diverse Verzeichnisse und Anhänge, die weiterführende Informationen zu Abkürzungen, Fachbegriffen sowie Dokumentationen der Ergebnisse und Analysen enthalten. Der Bericht umfasst den Zeitraum von Projektbeginn im November 2022 bis Juni 2025.

Die nachfolgende Übersicht zeigt die einzelnen Kapitel sowie die entsprechenden Ansprechpersonen des Auftragnehmers (AN).

Kapitel	Ansprechperson
1 - Allgemeines zum Projekt	Prof. Stefan Hinz, Dr. Andreas Schenk
2 - Vorstudie: Datenakquise	Prof. Stefan Hinz, PD Dr. Sina Keller
4 - Temperaturdaten und Klassifizierung	Dr. Susanne Benz, Svea Krikau
5 - Vereinfachte Lokale Klimazonen	Dr. Susanne Benz, PD Dr. Sina Keller
6 - Bevölkerung und vulnerable Gruppen	Dr. Mathias Jehling
7 - KI-basierte Klassifikation der Landbedeckung	PD Dr. Sina Keller
8 - Exkurs zum Segmentierungsmodell auf fernerkundlichen Eingangsdaten	PD Dr. Sina Keller, Prof. Dr. Stefan Hinz
9 - Blau-Grüne Indikatoren	PD Dr. Sina Keller, Dr. Susanne Benz, Dr. Mathias Jehling, Claire Gallacher, Linda Hänchen
10 - Stadtstrukturtypen im besiedelten Raum	Dr. Mathias Jehling, Denis Reiter
11 - Themen im Kontext von Wasser	PD Dr. Sina Keller
12 - Identifikation von Suchräumen basierend auf universellen Hot- und Coldspots	Dr. Susanne Benz, Dr. Sven Wursthorn, PD Dr. Sina Keller, Prof. Stefan Hinz
13 - KI-basierte Ermittlung von Grünvolumendefiziten aus Geofachdaten	PD Dr. Sina Keller
14 - Abgrenzung von priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten	Dr. Susanne Benz, PD Dr. Sina Keller
15 - Exkurs: Das Forschungsprojekt im Vergleich zur Landesweiten Klimaanalyse	Dr. Mathias Jehling & Auftraggeber (AG)
16 - Exkurs: Das Forschungsprojekt im Vergleich zu kommunalen Klimaanalysen	Dr. Susanne Benz
17 - Analyse der SLA in Verbindung mit ausgewählten Parametern	Dr. Susanne Benz, PD Dr. Sina Keller
18 - Lokal differenzierte Potenzial- und Defizitanalyse am Beispiel von sechs Hektar in Frankfurt am Main	PD Dr. Sina Keller, Dr. Susanne Benz
19 - Umweltziele	Prof. Gerd Hager
20 - Auswahl und Verortung von Maßnahmentypen	Dr. Denise Böhnke, Dr. Mathias Jehling
21, 22, 23 - (FF-)PV-Potenziale und PV-Bestand	PD Dr. Sina Keller, Svea Krikau, Frederick Kistner
24 - Unterstützung der Energieeffizienten Siedlungsentwicklung durch FE	Prof. Dr. Stefan Hinz

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xvi
I. Einführung zum Projekt und Vorstudie	1
1. Allgemeines zum Projekt	2
1.1. Zielsetzung des Vorhabens	2
1.2. Projektstruktur	4
2. Vorstudie: Datenakquise	5
2.1. (Test-)Gebiete und Planungsebenen	5
2.2. Zusammenstellung der allgemeinen Datengrundlage	6
II. Darstellung der Ergebnisse im Kontext der Klimaanpassung	9
3. Einleitung zu den Themenschwerpunkten der Klimaanpassung	10
4. Temperaturdaten und Klassifizierung	12
4.1. Einleitung	12
4.2. Erläuterung unterschiedlicher temperturbezogener Kenngrößen	13
4.3. In der Analyse verwendete Temperaturdaten	15
4.3.1. LST Nacht	16
4.3.2. LST Tag	16
4.3.3. Anzahl Tropennächte	17
4.3.4. PET	18
4.4. Klassifizierende Darstellung	18
5. Vereinfachte Lokale Klimazonen	28
5.1. Lokale Klimazonen als Klimatope	28
5.2. Vereinfachte lokale Klimazonen	30
6. Bevölkerung und vulnerable Gruppen	36
6.1. Einleitung	36
6.2. Vorhandene Datensätze	37

7. KI-basierte Klassifikation der Landbedeckung	42
7.1. Allgemeines zum Ansatz	42
7.2. Versiegelungsklassen	44
7.2.1. Definition der Versiegelungsklassen	44
7.2.2. Erzeugung der Trainingsdaten für Versiegelungsflächen	45
7.3. Klasse der Hausdächer	46
7.3.1. Definition unterschiedlicher Hausdächer	46
7.3.2. Erzeugung der Trainingsdaten für Dachflächen	47
7.4. Klassifizierung von Grünflächen und Gewässern	47
7.4.1. Definition der Klassen für Grünflächen	47
7.4.2. Trainingsdaten	48
7.5. Ergebnisse und Bewertung der Klassifikation der Landbedeckung	48
8. Exkurs zum Segmentierungsmodell auf fernerkundlichen Eingangsdaten	57
8.1. Funktionsweise des Modells	57
8.2. Erzeugung der Trainingsdaten	59
9. Blau-Grüne Indikatoren	61
9.1. Ausgewählte Grünindikatoren	62
9.1.1. NDVI	63
9.1.2. Grünausstattung	67
9.1.3. Grünvolumen	70
9.1.4. GPP	73
9.2. Weitere Grünindikatoren	76
9.2.1. DSWI	76
9.2.2. Grünraumvernetzung	79
9.2.3. Grünerreichbarkeit	80
9.3. Blauer Indikator	84
9.3.1. Wassererreichbarkeit	84
10. Stadtstrukturtypen im besiedelten Raum	88
10.1. Aufgabenstellung im Kontext einer Siedlungsstrukturanalyse	88
10.2. Bestehende Vorarbeiten in Hessen aus dem Klimprax-Projekt	89
10.3. Landesebene	90
10.4. Regionalebene	91
10.5. Lokale Ebene: Gebäudebasierte Siedlungsstruktur	91
10.5.1. Stadtstrukturtypen in der Klimaanpassung	92
10.5.2. Vorgehen zur automatisierten Ableitung von SST	95
10.5.3. Ergebnis und Validierung	96
10.5.4. SST auf Ebene der 100 m-Gitterzellen	101
10.5.5. Hintergrundinformationen zum verwendeten Datenmodell und Vergleich mit der Segmentierung	103
10.5.6. Hintergrundinformationen zur Aggregation von SST	105
11. Themen im Kontext von Wasser	106
11.1. Existierende fernerkundliche Bodenfeuchteprodukte	107
11.2. Ermittlung der Bodenfeuchte mittels fernerkundlicher Methoden	110
11.2.1. Einleitung	110
11.2.2. Datengrundlage	110

11.2.3. Methodisches Vorgehen zur KI-basierten Schätzung der Bodenfeuchte	110
11.2.4. Ergebnisse zur Bodenfeuchteschätzung und Diskussion mit Fazit	113
11.3. Grundwasser: Ausnutzungsgrade unter mittlerer und reduzierter Grund- wasserneubildung	115
11.3.1. Einleitung	115
11.3.2. Ausnutzungsgrad der erneuerbaren Grundwasserressourcen im lang- jährigen Mittel der Grundwasserneubildung	116
11.4. Fazit zum Themenschwerpunkt Wasser	118
12. Identifikation von Suchräumen basierend auf universellen Hot- und Coldspots	119
12.1. Methodische Vorgehensweise zur Berechnung der universellen Cold- und Hotspots	119
12.2. Ergebnisse zu den universellen Cold- und Hotspots	123
12.3. Plausibilisierung der universellen Hot- und Coldspots	129
13. KI-basierte Ermittlung von Grünvolumendefiziten aus Geofachdaten	135
13.1. Einleitung	135
13.2. Methodenentwicklung für die KI-basierte Ermittlung von Grünvolumende- fiziten	136
13.2.1. Datenquellen und Vorverarbeitung	137
13.2.2. Modellentwicklung	139
13.2.3. Ermittlung des KI-basierten Grünvolumendefizits und Visualisierung	142
13.2.4. Fazit zur KI-basierten Ermittlung von Grünvolumendefiziten	147
14. Abgrenzung von priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten	148
14.1. Einführung zu den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten	148
14.2. SLA und verwendete Datenquellen	149
14.3. Ergebnisse der SLA	166
14.4. Fazit zur Abgrenzung von Handlungsräumen mit Priorisierung basierend auf SLA	170
15. Exkurs: Das Forschungsprojekt im Vergleich zur Landesweiten Klima- analyse	171
15.1. Zielsetzung der LWKA	171
15.2. Regionalplanerisch bedeutsame Hotspots: Methodisches Vorgehen zur Er- mittlung der bioklimatisch belasteten Siedlungsräume der LWKA	171
15.3. Vergleich der Ermittlung regionalplanerisch bedeutsamer Hot-/Coldspots gemäß LWKA mit dem Forschungsprojekt	174
16. Exkurs: Das Forschungsprojekt im Vergleich zu kommunalen Klima- analysen	178
16.1. Einführung in kommunale Klimaanalysen	178
16.2. Vergleich von modellierten Daten zur Hitzebelastung	179
16.3. Vergleich von gemessenen (Luft-)Temperaturen	182
16.4. Vergleich von Planungshinweiskarten	184
16.5. Fazit zum Vergleich mit kommunalen Klimaanalysen	187

17. Analyse der SLA in Verbindung mit ausgewählten Parametern	188
17.1. Zusammenhang zwischen SLA und universellen Hot- und Coldspots	188
17.2. Zusammenhang zwischen SLA und vLCZ	190
17.3. Zusammenhang zwischen SLA und Stadtstrukturtypen	191
17.4. Zusammenhang zwischen SLA und Landbedeckung	197
17.5. Zusammenhang zwischen SLA und grünen bzw. blauen Indikatoren	201
18. Lokal differenzierte Potenzial- und Defizitanalyse am Beispiel von sechs Hektar in Frankfurt am Main	205
19. Umweltziele	212
19.1. Landesebene	212
19.2. Regionale Ebene	213
19.3. Kommunale Ebene	217
20. Auswahl und Verortung von Maßnahmentypen	218
20.1. Einführung und Übersicht	218
20.2. Maßnahmentypenauswahl anhand der Ziele für universelle Hot- und Cold-spots	219
20.3. Maßnahmentypenauswahl anhand von übergeordneten Umweltzielen	221
20.3.1. Dämpfung der sommerlichen Temperaturmaxima in den universellen Hotspots	222
20.3.2. Schonung der Kühlfunktion in den universellen Coldspots	225
20.3.3. Erhalt der Kühlfunktion der regionalbedeutsamen Kaltluftentstehungsgebiete und der Funktion der zugehörigen Luftleitbahnen der landesweiten Klimaanalyse	226
20.3.4. Steigerung der Niederschlagsretention (Schwammwirkung) im besiedelten und unbesiedelten Raum	228
20.3.5. Schonung der Ressource Wasser vorrangig im besiedelten Raum	230
20.3.6. Synergien der Klimaanpassung mit der dreifachen Innen- und der energieeffizienten Siedlungsentwicklung	232
20.4. Maßnahmentypenauswahl anhand von Stadtstrukturtypen	234
III. Darstellung der Ergebnisse im Kontext des Klimaschutzes	248
21. Überblick zum Themenschwerpunkt des Klimaschutzes	249
22. Themenschwerpunkt: FF-PV-Potenziale	251
22.1. Ermittlung der FF-PV-Potenziale für Hessen	251
22.1.1. Methodisches Vorgehen der schrittweisen FF-PV-Potenzialanalyse	251
22.1.2. Visualisierung der Potenzialanalyse-Ergebnisse	254
22.1.3. Hardware-Spezifikationen und Ergebnisdokumentation der Potenzialberechnung	254
22.2. PV-Potenziale auf Parkplätzen	258
22.2.1. Referenzdaten und Klassendefinitionen	258
22.2.2. Eingangsdaten aus heterogenen Datenquellen	261
22.2.3. Datenvorverarbeitung	263
22.2.4. Training und Hyperparameter-Optimierung der KI-Verfahren	265

22.2.5. Evaluierung der Klassifikationsergebnisse	265
22.2.6. Vergleich der Klassifikationsmodelle	266
22.2.7. Auswahl des besten Klassifikationsverfahrens und dessen Analyse .	267
22.2.8. Ergebnisse der KI-basierten PV-Potenzialanalyse von Parkplätzen für Hessen	268
22.2.9. Plausibilisierung der Modellvorhersage anhand einer Solarstrah- lungsanalyse für eine Beispielregion	270
23. Themenschwerpunkt: PV-Bestand	272
23.1. PV-Detektion	272
23.1.1. Datengrundlage	272
23.1.2. Aufbau des Segmentierungsmodells	274
23.1.3. Bewertung der Modellergebnisse	275
23.1.4. Fazit zur KI-basierten Detektion von PV	277
24. Unterstützung der Energieeffizienten Siedlungsentwicklung durch FE	278
24.1. Einleitung	278
24.2. Analysen zur Flächensparsamkeit, Kompaktheit und Bebauungsdichte .	279
24.3. Verknüpfung von FE und energetischen Stadtraumtypen	284
24.4. Fazit	288
Literaturverzeichnis	289
IV. Anhänge	297
25. Datengrundlage	298
26. Anhänge: FF-PV	302
26.1. Visualisierung weiterer Potenzialanalyse-Ergebnisse	302
26.2. Basisdaten	308
26.3. Ausschlussflächen	308
26.4. Landwirtschaftsszenarien	312
26.5. Restriktionsflächen	314
26.6. Baurechtlich privilegierte und förderfähige Bereiche	317
27. Anhänge: Landbedeckung	319

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Projektstruktur	4
3.1.	Schema zur Klimaanpassung	10
4.1.	Illustration der urbanen Wärme	15
4.2.	Klassifizierte Darstellung Tropennächte, Gemeinden	20
4.3.	Klassifizierte Darstellung Tropennächte, Hessen	21
4.4.	Klassifizierte Darstellung PET, Gemeinden	22
4.5.	Klassifizierte Darstellung PET, Hessen	23
4.6.	Klassifizierte Darstellung LST Tag, Gemeinden	24
4.7.	Klassifizierte Darstellung LST Tag, Hessen	25
4.8.	Klassifizierte Darstellung LST Nacht, Gemeinden	26
4.9.	Klassifizierte Darstellung LST Nacht, Hessen	27
5.1.	LCZ-Klassen	29
5.2.	Schema zur vLCZ Methodik	32
5.3.	vLCZ in Hessen	33
5.4.	vLCZ in ausgewählten Gemeinden	34
5.5.	Histogramm der vLCZ	35
6.1.	Bevölkerung und vulnerable Einrichtungen in Waldeck (beides Stand 2022)	38
6.2.	Bevölkerungsverteilung in Frankfurt	39
6.3.	Anzahl vulnerabler Einrichtungen in Frankfurt	40
6.4.	Bevölkerungsentwicklung in Frankfurt	41
7.1.	Schematische Darstellung des Segmentierungsprozesses	43
7.2.	Landbedeckung für ausgewählte Gemeinden	51
7.3.	Landbedeckung für Hessen	52
7.4.	Konfusionsmatrix des Segmentierungsmodells	53
7.5.	Beispielhafte Anwendung des Segmentierungsmodells	54
7.6.	Beispielhafte Anwendung des Segmentierungsmodells für eine Kachel von Marburg	55
7.7.	Beispiel einer geostatistischen Analyse basierend auf den Ergebnissen des Segmentierungsmodells	56
8.1.	Schematische Darstellung eines Encoder-Decoders	58
8.2.	Statistik der Trainingsdaten Versiegelung und Grünflächen	60
9.1.	Mittlerer NDVI in Hessen	65
9.2.	Mittlerer NDVI in den ausgewählten Gemeinden	66
9.3.	Grünausstattung für Hessen	68

9.4.	Grünausstattung in den ausgewählten Gemeinden	69
9.5.	Grünvolumen für Hessen	71
9.6.	Grünvolumen für ausgewählte Gemeinden	72
9.7.	GPP in Hessen	74
9.8.	GPP in den ausgewählten Gemeinden	75
9.9.	Mittlerer DSWI in Hessen	77
9.10.	Mittlerer DSWI für ausgewählte Gemeinden	78
9.11.	Grünraumvernetzung für Frankfurt	80
9.12.	Grünerreichbarkeit hochwüchsig Marburg	81
9.13.	Grünerreichbarkeit in Marburg	82
9.14.	Erreichbarkeit von hochwüchsigem Grün > 1 ha für Marburg in 300 m . .	83
9.15.	Erreichbarkeit von hochwüchsigem Grün > 10 ha für Marburg in 700 m .	83
9.16.	Wassererreichbarkeit für Hessen	86
9.17.	Wassererreichbarkeit für ausgewählten Gemeinden	87
10.1.	Raumstruktur in Hessen	91
10.2.	Ableitung einer gebäudebasierten Siedlungsstruktur	95
10.3.	Verteilung der Stadtstrukturtyp (SST) nach Anzahl der Gebäude in Hessen.	97
10.4.	Trainings- und Testkurven des XGBoost Modells.	98
10.5.	Feature Importance für Schätzung der Gebäudetypen	99
10.6.	Verteilung der SST auf Ebene der 100 m-Gitterzelle in Hessen [ha].	101
10.7.	SST in Marburg	102
10.8.	Eigenschaften der Gebäudedaten	104
10.9.	Verteilung der Anteilswerte der dominierenden Stadtstrukturtypen	105
11.1.	Mittlere Bodenfeuchte basierend auf fernerkundlichen Daten	108
11.2.	Schema zur Schätzung der Bodenfeuchte	111
11.3.	Verteilung der Bodenfeuchte	112
11.4.	Split der Bodenfeuchtedaten	113
11.5.	Verteilung der Bodenfeuchte	114
11.6.	Ausnutzungsgrad der erneuerbaren Grundwasserressourcen	117
12.1.	Schema der universellen Hot- und Coldspots	119
12.2.	Universelle Hot- und Coldspots für Land und Regierungsbezirke.	125
12.3.	Universelle Hot- und Coldspots für ausgewählte Gemeinden mit Wald und Landwirtschaft	126
12.4.	Universelle Hot- und Coldspots für ausgewählte Gemeinden mit Verdunstungsfähigkeit und Hitzebelastung	127
12.5.	Universelle Hot- und Coldspots für ausgewählte Gemeinden mit Gebieten für besondere Klimafunktion	128
12.6.	Universelle Hot- und Coldspots in den vLCZ.	132
12.7.	Universelle Hot- und Coldspots in den SST	132
13.1.	Schema zur Klassenverschiebung beim Grünvolumendefizit	137
13.2.	Schema zur Methodik des Grünvolumendefizits	137
13.3.	SHAP Diagramm Grünvolumenänderung	143
13.4.	Visualisierung des Grünvolumendefizits für Hessen	145
13.5.	Visualisierung des Grünvolumendefizits für ausgewählte Gemeinden . . .	146

14.1. Schema Verbindung zwischen universellen Hot- & Coldspots und den räumlichen Handlungsschwerpunkten	149
14.6. Einfluss Auflösung auf Belüftungswirkung	151
14.2. Gewichtung Bevölkerung für die SLA in Hessen	154
14.3. Gewichtung Bevölkerung für die SLA in ausgewählten Gemeinden	155
14.4. Gewichtung vulnerable Einrichtungen für die SLA in Hessen	156
14.5. Gewichtung vulnerable Einrichtungen für die SLA in ausgewählten Gemeinden	157
14.7. Priorisierung Belüftungswirkung für die SLA in Hessen	158
14.8. Priorisierung Belüftungswirkung für die SLA in ausgewählten Gemeinden	159
14.9. Priorisierung NACHbarschaftsanalyse für die SLA in Hessen	160
14.10. Priorisierung NACHbarschaftsanalyse für die SLA in ausgewählten Gemeinden	161
14.11. SLA für universelle Hot- & Coldspots	162
14.12. SLA für universelle Hotspots	163
14.13. SLA für universelle Coldspots	164
14.14. Einteilung der universellen Hotspots nach SLA-System.	165
14.15. Einteilung der universellen Coldspots nach SLA-System.	165
14.16. Räumliche Handlungsschwerpunkte für Hessen	168
14.17. Abgrenzung von Räumen mit Indizfunktion für ausgewählte Gemeinden .	169
15.1. Vergleich LWKA	177
16.1. Vergleich PET Marburg.	180
16.2. Vergleich PET Dietzenbach.	181
16.3. Vergleich Temperaturmessfahrt Darmstadt.	184
16.4. Vergleich Planungshinweiskarte Marburg.	185
16.5. Vergleich Planungshinweiskarte Dietzenbach.	186
17.1. Sankey-Diagramm: Zusammenhang zwischen universellen Hot- und Coldspots und priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten	189
17.2. vLCZ in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten	191
17.3. Stadtstrukturtypen in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten, Frankfurt	193
17.4. Stadtstrukturtypen in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten, Marburg	194
17.5. Stadtstrukturtypen in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten, Waldeck	195
17.6. Stadtstrukturtypen in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten, Witzenhausen	196
17.7. Landbedeckung in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten	197
17.8. Landbedeckung nach LCZ in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten	198
17.9. Landbedeckung nach Stadtstrukturtypen in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten, Frankfurt	199
17.10. Landbedeckung nach Stadtstrukturtypen in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten, Marburg	200
17.11. Landbedeckung nach Stadtstrukturtypen in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten, Waldeck	200

17.12. Landbedeckung nach Stadtstrukturtypen in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten, Witzenhausen	201
17.13. NDVI in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten	202
17.14. Grünvolumen in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten .	202
17.15. Grünausstattung in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten	203
17.16. GPP in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten	204
17.17. Wasserreichbarkeit in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten	204
18.1. Orthofoto-Darstellung der sechs ausgewählten Gitterzellen	206
18.2. Geostatistische Analyse ausgewählter Gitterzellen	211
20.1. Histogramm der vLCZ	221
22.1. FF-PV-Potenzialberechnung.	253
22.2. FF-PV-Potenziale in Hessen	255
22.3. FF-PV	256
22.4. FF-PV-Potenziale am Beispiel von Dietzenbach	257
22.5. Schema zu PV-Analyse auf Parkplätzen	259
22.6. Beispiel für Parkplätze für PV	262
22.7. Klassenverteilung im Trainings- und Testdatensatz	264
22.8. Konfusionsmatrix des XGBoost-Modells	267
22.9. SHAP Diagramm XGBoost	268
22.10. Histogramm der vorhergesagten Parkplatzflächen	269
22.11. Violinendiagramm zur Solarstrahlung	270
23.1. Automatisiertes Labeling der PV-Anlagen	274
23.2. Positive Beispiele der PV-Detektion	275
23.3. Herausforderungen bei der PV-Detektion	276
24.1. Flächenanteile von Stadtstrukturtypen in räumlichen Handlungsschwerpunkten	280
24.2. Darstellung von Einwohnerdichte und SST in Dietzenbach	281
24.3. Darstellung der Bebauungsdichte	282
24.4. Gesamtstädtische Auswertung der Flächensparsamkeit	283
24.5. Definition der energetischen Stadtraumtypen (EST) aus [26].	284
24.6. Beispiel für die Zusammenstellung energetische Kenngrößen	285
24.7. Konzept zur Verknüpfung von SST mit energetischen Stadtraumtypen .	286
24.8. Zuweisung von Stadtstrukturtypen	286
24.9. Beispiel für klassifizierten Stadtstrukturtypen	287
24.10. Auswertung Zeilenbebauung	287
24.11. Auswertung Mehrfamilienhäuser	288
26.1. FF-PV-Potenziale in Hessen	303
26.2. FF-PV-Potenziale am Beispiel von Dietzenbach	304
26.3. Verschiedenen Szenarien für das FF-PV-Flächenpotenzial nach Abzug der Flächen gemäß Schritt 3, Teil 1	305
26.4. Verschiedenen Szenarien für das FF-PV-Flächenpotenzial nach Abzug der Flächen gemäß Schritt 3, Teil 2	306

26.5. Flächen der Agrarfachplanungen 307

Tabellenverzeichnis

4.1.	Eingangsdaten Temperatur	15
4.2.	Perzentile Grenzwerte im Regierungsbezirk: Darmstadt	19
4.3.	Perzentile Grenzwerte im Regierungsbezirk: Gießen	19
4.4.	Perzentile Grenzwerte im Regierungsbezirk: Kassel	19
5.1.	Verteilung der vLCZ in Prozent	31
7.1.	Verhältnis Abflussbeiwert zu Versiegelungskategorie	45
7.2.	Vegetationswuchshöhen	47
7.3.	Grünflächenklassen / Vegetationswuchshöhen	48
9.1.	Übersicht der Blau-Grünen Indikatoren	62
10.1.	Bewertung zu den Klimatopen	90
10.2.	Klassifizierung der Gebäudetypen	94
10.3.	Metriken zur Stadtstrukturtypenklassifikation	96
10.4.	Hyperparameter des Modells der SST	98
10.5.	Fehlermatrix	100
11.1.	Satellitenbasierte Bodenfeuchteprodukte	109
12.1.	Matrix für LST Tag und PET	121
12.2.	Matrix für LST Nacht und Anzahl der Tropennächte	121
12.3.	Matrix für Zwischenprodukt Nacht und Zwischenprodukt Tag	122
12.4.	Temperaturen je universeller Hot- und Coldspotkategorie.	129
12.5.	Temperaturen je Hot- und Coldspotkategorie.	130
12.6.	Temperaturen je universeller Hot- und Coldspotkategorie.	130
12.7.	Temperaturen je universeller Hot- und Coldspotkategorie.	131
12.8.	Fläche je vLCZ oder SST und universeller Hot- und Coldspot Kategorie .	133
12.9.	Blau- und Grüne Indikatoren je universeller Hot- und Coldspotkategorie .	134
13.1.	Schätzergebnisse der Modelle für die Grünvolumenänderung	141
14.1.	Prioritätseinstufung des Handlungs- und Erhaltungsbedarfs	153
16.1.	Messfahrten der Nord- und Südroute in Darmstadt.	183
18.1.	Indikatoren und Parameter für die sechs ausgewählten Gitterzellen	210
20.1.	Zuordnung Umweltziele zu den universellen Hot- und Coldspots	220
20.2.	Klimaanpassungsmaßnahmen Temperaturmaxima	222
20.3.	Klimaanpassungsmaßnahmen	225
20.4.	Maßnahmentypenauswahl üUZ-3	227

20.5. Maßnahmentypenauswahl anhand üUZ-4 (1)	228
20.6. Anpassungsziele und ihre Kurzbeschreibung	230
20.7. Maßnahmentypenauswahl	231
20.8. Maßnahmentypenauswahl üUZ-5	232
20.9. SST im Projekt	235
20.10. SST Projekt Zuordnung je Gitterzelle und je Kachel bzw. Bestand.	237
20.11. Von Stadtstrukturtypen zu Maßnahmen (Teil I)	238
20.12. Von Stadtstrukturtypen zu Maßnahmen (Teil II)	239
20.13. Von Stadtstrukturtypen zu Maßnahmen	240
22.1. FF-PV Ergebnisübersicht	258
22.2. Daten für die Klassifikation	263
22.3. Vergleich der Modelle	266
22.4. Zusammenfassung der Flächenpotenziale für FF-PV-Eignungsklassen	269
23.1. Ergebnisse der PV-Detektion	276
23.2. Klassenweise Ergebnisse der PV-Detektion	277
25.1. Übersicht vorhandener Datensätze.	298
25.2. Fernerkundliche Produkte	300
25.3. Sonstige Daten	301
27.1. Klassen für Versiegelung.	319

Akronyme

AG Auftraggeber

AN Auftragnehmer

AP Arbeitspaket

ATKIS Amtliches Topographisch Kartographisches Informationssystem

AUC Area Under the Curve

BauGB Baugesetzbuch

BBSR Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

BEC Barcelona Expert Center

BKG Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

CLC CORINE Land Cover

CNN Convolutional Neural Networks

DGM Digitales Geländemodell

DLM digitales Landschaftsmodell

DOM Digitales Oberflächenmodell

DSWI Disease Water Stress Index

DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.

DWD Deutscher Wetterdienst

EEG Erneuerbare-Energien-Gesetz

ESA European Space Agency

EST Energetische Stadtraumtypen

EU-WRRL Europäische Wasserrahmenrichtlinie

FE Fernerkundung

FF-PV Freiflächen-Photovoltaik

FITNAH Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat-Sources

GIS Geographisches Informationssystem

GPP Primärproduktion, engl. Gross Primary Production

GT Ground Truth

HLNUG Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

HMLU Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat

HMUKLV Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

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

HOSTRADA Hochauflöster Stündlicher Rasterdatensatz

HSL Hessisches Statistisches Landesamt

HVBG Hessische Verwaltung für Bodeninformation und Geoinformation

IG interessantes Gebiet

INKAS Informationsportal Klimaanpassung in Städten

INSPIRE Infrastructure for Spatial Information in Europe

IoU Intersection over Union

ISMN International Soil Moisture Network

ÖR Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. Dresden

KCT KIT Transfer GmbH

KI Künstliche Intelligenz

KLIMPRAX KLIMawandel in der PRAXis

KLIWA Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft

LB Leistungsbeschreibung

LCZ lokale Klimazonen, engl. local climate zones

LEP Landesentwicklungsplan

LST Landoberflächentemperatur, engl. Land Surface Temperature

LWKA Landesweite Klimaanalyse

MAE Mittlerer absoulter Fehler, engl. mean absoult error

ML maschinelles Lernen

MODIS Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer

NASA Nationale Aeronautik- und Raumfahrtbehörde, engl. National Aeronautics and Space Administration

nDOM Normalisiertes digitales Oberflächenmodell

NDVI normierter differenzierter Vegetationsindex

NIR naher Infrarotbereich

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration

OSM Open Street Map

PET Physiologisch äquivalente Temperatur

POI Point of Interest

PV Photovoltaik

RGB rot, grün und blau

RGBI rot, grün, blau und infrarot

RMSE Root Mean Squared Error

ROC Receiver Operating Characteristic

ROG Raumordnungsgesetz

ROT roter sichtbarer Bereich

SHAP SHapley Additive exPlanations

SLA Snakes-Ladders Analysis

SMAP Soil Moisture Active Passive

SST Stadtstrukturytyp

SWIR Short Wave Infrared

UT Unterthemengruppe

VIIRS Visible Infrared Imaging Radiometer Suite

vLCZ vereinfachten lokalen Klimazonen

vUZ verfeinertes Umweltziel

WRRL Wasserrahmenrichtlinie

WUDAPT World Urban Database and Access Portal Tools

üUZ übergeordnetes Umweltziel

Teil I.

Einführung zum Projekt und Vorstudie

1. Allgemeines zum Projekt

1.1. Zielsetzung des Vorhabens

Das vorliegende Fernerkundungsforschungsprojekt soll der Umsetzung des Klimaplans Hessen 2030 im Kontext der Maßnahme GS-05 „Stadt-Umland-Entwicklung im Klimawandel stärken“ dienen. Diese Maßnahme betrachtet Städte und ihr Umland zusammenhängend und integrativ. Der Schwerpunkt dieses Forschungsprojekts ist dabei die Erforschung der Potenziale des Einsatzes von Methoden und Technologien der Fernerkundung (FE) mit dem Ziel, Klimaschutz und Klimaanpassung stärker im Verwaltungshandeln und insbesondere in der räumlichen Gesamtplanung (Landes-, Regional- und kommunale Planung) zu verankern.

Neben der FE per se kommt den zur Analyse und Bewertung der Ist-Situation hinzuzuziehenden Geofachdaten sowie den Themenkarten, die auf Basis dieser Daten erstellt werden können, eine besondere Bedeutung zu. Auch wenn die öffentliche Verwaltung auf zahlreiche Geofachdaten zugreifen kann, liegen erforderliche Daten für eine landesplanerische Steuerung sowie für das Monitoring zum Teil nicht in einem geeigneten Format (beispielsweise zu starke Aggregation) bzw. Detaillierungsgrad vor oder lassen keine digitale oder automatisierte Erfassung, Auswertung und Aufbereitung als Grundlage für die planerische Entscheidung zu. Daher bedarf es der Erstellung einer Übersicht über die für die Fragestellung vorhandenen und erforderlichen Geofachdaten sowie einer Methodik für die zukünftige Erfassung und Auswertung entsprechender Daten und deren Bewertung für die im vorliegenden Projekt definierten Fragestellungen zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung.

Die Erfassung, Auswertung und Aufbereitung der Daten muss schwerpunktmäßig automatisiert und derart erfolgen, dass hierüber z. B. Umweltziele auf dem Gebiet der Klimaanpassung definiert und überwacht werden können. Dies erfordert eine integrative, zusammenhängende Betrachtung und bildet die zentrale Fragestellung des Forschungsprojekts.

Grundlage hierfür ist eine für die räumliche Gesamtplanung geeignete Analyse der Ist-Situation. Sie soll es ermöglichen, differenziert für die Planungsebenen der Landes-, Regional- und kommunalen Planung Umweltziele sowie hieran orientierte Umsetzungs- und Überwachungsmaßnahmen für die Klimaanpassung entwickeln zu können. Die verschiedenen Planungsebenen sollen hierüber auf dem Gebiet der Klimaanpassung effizient und zielgerichtet zusammenwirken. Zugleich soll hiermit eine Steuerung durch die oberste und oberen Landesplanungsbehörden auf dem Gebiet der Klimaanpassung ermöglicht werden.

Durch die Ergebnisse des Forschungsprojekts soll die öffentliche Verwaltung in die Lage versetzt werden, auf FE-Daten zurückzugreifen, die bereits in geeigneter Form aufbereitet sind und nicht erst als Rohdaten heruntergeladen und weiterbearbeitet werden müssen.

Für die Klimaanpassung (Teil II) werden z. B. vorrangig die Ergebnisse der Temperaturkarten mit den Themen Versiegelung, Begrünung, Bevölkerungsdichte/-entwicklung sowie den Stadtstrukturtypen (SST) verschnitten, um räumliche Handlungsschwerpunkte für Klimaanpassungsmaßnahmen zu identifizieren und für diese gesamtstädtische Steuerungen zu entwickeln.

Auf dem Gebiet der Klimaanpassung steht die Minderung der Belastung durch markante Hitze- und Kälttereize im Fokus. So steht außer Frage, dass neben Hitzereizen auch Kälttereize v. a. auf vulnerable Bevölkerungsgruppen gravierende Auswirkungen haben können. Jedoch wird in dem vorliegenden Projekt - aufbauend auf den Zielen des Klimaplans Hessen 2030 - ausschließlich auf sommerliche Hitzereize und auf die Möglichkeiten eines Hitzeausgleichs durch vermehrte Kühlleffekte eingegangen.

Auf dem Gebiet des Klimaschutzes (Teil III) werden vorrangig die Beiträge der FE zum Ausbau der PV untersucht, z. B. bei der Erfassung des Bestandes an Dach-PV und FF-PV sowie der Flächenpotenziale an FF-PV. Darüber hinaus werden beim Thema Klimaschutz auch mögliche Beiträge der FE zur energieeffizienten Siedlungsentwicklung geprüft.

Mit Hilfe der FE und vorliegenden Fachinformationen sollen aufbereitete Geofachdaten und Themenkarten automatisiert bereitgestellt werden, die folgenden drei Projektzielen dienen:

1. Senkung sommerlicher Temperatur-Maxima sowie Erhalt und Entwicklung wertvoller Kühlflächen,
2. Stärkung von Niederschlagsrückhalt, -versickerung, -verdunstung und von effizienten Strategien zum Umgang mit der begrenzt vorhandenen Ressource Wasser und
3. Erhalt und Entwicklung von wertvollen Retentionsflächen (Wasser, CO₂).

1.2. Projektstruktur

Die Struktur des Projekts ist in Abbildung 1.1 dargestellt. In der Vorstudie (Arbeitspaket (AP) 1) wurden die grundlegenden Konzepte für die Erfassung von Fernerkundungsdaten und deren Integration in eine Geofachdatenbank erarbeitet. Die Ergebnisse der Vorstudie finden sich in Kapitel 2.

An die Vorstudie anschließend stand die fernerkundliche Methodenentwicklung im Vordergrund und insbesondere die Erstellung von Themenkarten. Wichtige Zwischenstände zur Erstellung der Themenkarten und der Entwicklung sowie Berechnung von Indikatoren aus Temperatur-, Flächen- und Stadtstrukturdaten finden sich in den Teilen II und III.

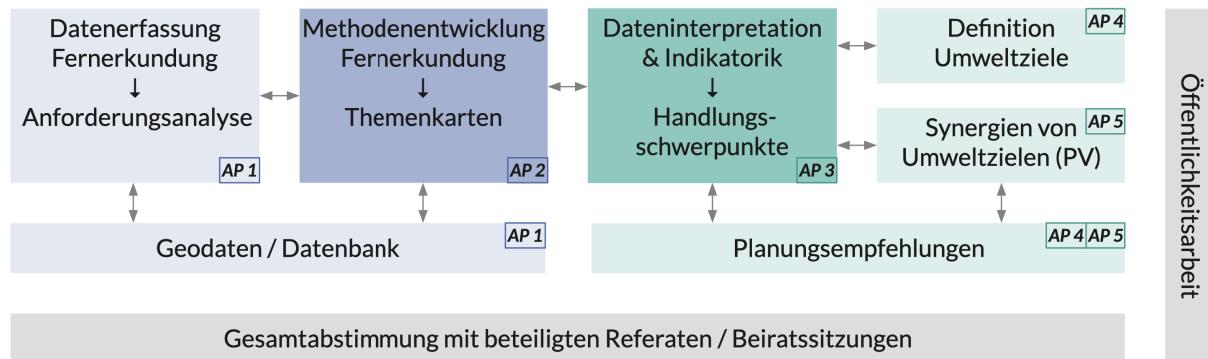


Abbildung 1.1.: Projektstruktur nach Arbeitspaketen.

Im Zuge der Projektbearbeitung erfolgte eine enge und regelmäßige Abstimmung mit dem HMWVW als AG sowie beteiligten Fachbehörden. Abstimmungen und Projekttreffen wurden überwiegend digital durchgeführt. Im Rahmen von Beiratssitzungen wurden die Zwischenstände des Projekts regelmäßig in einem erweiterten Kreis präsentiert und abgestimmt. Neben dem HMWVW, dem Hessischen Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat (HMLU) sowie dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) nahmen dabei auch Fachpersonen der Regierungspräsidien (insbesondere obere Landesplanung), verschiedener Gemeinden sowie weitere geladene Fachexperten:innen und Vertretungen von kommunalen Spitzenverbänden und der Architekten- und Stadtplanerkammer Hessen teil.

2. Vorstudie: Datenakquise

Den Beginn des Projekts bildete eine Vorstudie. Ausgehend von der Projektfragestellung wurde im Rahmen einer viermonatigen Definitions-Studie zunächst festgelegt, welche Anforderungen an die zu untersuchenden (Teil-)Räume auf den drei Planungsebenen sowie an die Datenqualität bzw. an die Datengenauigkeit der Eingangsdaten und der Ergebnisdaten bestehen. Die Details hierzu wurden im ersten Zwischenbericht dokumentiert; nachfolgend wird eine zusammenfassende Übersicht gegeben.

Die Vorstudie hatte die Prüfung der folgenden zwei Punkte zum Ziel:

- Prüfung, welche homogenen und flächendeckenden Eingangsdaten zur Verfügung stehen. Dabei sind die in Hessen vorliegenden, vom Forschungsgeber bereitgestellten Datensätze und Fachgutachten auf ihre Verwendbarkeit zu prüfen.
- Sofern erforderlich, ist das Vorliegen neuerer, ggf. noch besser geeigneter FE-Daten zur Bearbeitung der Fragestellungen zu klären. Auch sonstige bereits vorliegende Ergebnisse, die zumindest in Teilen für die vorzunehmenden Untersuchungen im Kontext der räumlichen Gesamtplanung verwendet werden können, sind hinzuzuziehen und werden im jeweiligen Zusammenhang konkret benannt. Bedarf es zur Bearbeitung der Fragestellung zusätzlicher Daten, so sind diese Daten einschließlich der erforderlichen Auflösung, Qualität etc. anzugeben.

Ausgehend hiervon wird in den nachfolgenden Unterkapiteln zunächst auf die ausgewählten Teilräume (identifizierte Testregionen auf kommunaler Ebene) und auf die differenzierte Betrachtung der drei Planungsebenen Land, Regierungsbezirk sowie (beispielhaft) Kommune eingegangen (siehe Abschnitt 2.1). Hieran schließen sich die Analyse, Organisation und Wirtschaftlichkeitsprüfung des Datenbestands (siehe Abschnitt 2.2) an.

2.1. (Test-)Gebiete und Planungsebenen

Im Projekt wird zwischen den Planungsebenen Land, Region (Regierungsbezirk) und Kommune unterschieden. Im Zuge der Vorstudie werden mehrere in Hessen liegende Gebiete als für die Fragestellungen der Klimaanpassung interessantes Gebiets (IGs) identifiziert, um an ihnen beispielhaft das methodische Vorgehen zu erarbeiten und zu evaluieren, sowie Trainingsdaten für Verfahren des maschinellen Lernens zu erzeugen.

Stellvertretend für die kommunale Ebene wurden die Gemeinden **Frankfurt am Main**, **Dietzenbach**, **Marburg**, **Waldeck** und **Witzenhausen** sowohl hinsichtlich experimen-

teller Datenauswertungen als auch der Einbindung in Arbeitskreis- und Beiratssitzungen vertieft mit einbezogen. Die im Projekt entwickelten Ergebnisse und Themenkarten werden exemplarisch anhand dieser Gemeinden im Abschlussbericht visualisiert. Für alle weiteren hessischen Gemeinden werden die Ergebnisse zentral über das Geoportal digital zugänglich gemacht.

Die Auswahl stellt für das Projekt eine angemessen große Variabilität bzgl. Größe, Region, Siedlungsstruktur und klimatischer Bedingungen dar. Diese Gebiete decken eine Vielzahl der hessischen Landnutzungs- und Landbedeckungsklassen ab sowie die planerischen Raumkategorien, die für das Projekt von Interesse sind. Stellvertretend für die Regionalebene wurde der Regierungsbezirk Südhessen ausgewählt.

2.2. Zusammenstellung der allgemeinen Datengrundlage

Daten aus der Leistungsbeschreibung

Tabelle 25.1 (siehe Kapitel 25) gibt eine Übersicht über die in der Leistungsbeschreibung (LB) aufgeführten Daten sowie eine Zusammenfassung und Bewertung über den aktuellen Stand ihrer Beschaffung, in Verbindung mit dem jeweiligen Themengebiet des Forschungsprojekts. Im Zuge der Recherchearbeiten stellte sich heraus, dass die Mehrheit der Daten frei verfügbar ist, allerdings über Drittanbieter wie z. B. über den Deutschen Wetterdienst akquiriert werden müssen. In einem zweiten Schritt wurde die Eignung der Daten für die unterschiedlichen Themenbereiche evaluiert. Auch die räumliche Skala wird hierbei berücksichtigt, um die Verwendbarkeit der Daten auf den verschiedenen Planungsebenen mit ihren unterschiedlichen Maßstäben zu adressieren. Geprüft wurden auch Daten aus Drittquellen, die nicht kostenfrei verfügbar sind, u. a. räumlich hochauflöste Planet Labs Satellitendaten. Mit Blick auf einen wirtschaftlichen Einsatz und eine potenzielle Monitoringfähigkeit wurde jedoch im Weiteren davon abgesehen, kostenpflichtige Datenprodukte zu verwenden.

Ergänzung durch weitere Daten der FE

Für die Lösung der projektbezogenen Fragestellungen sind neben den vorhandenen Geodaten auch FE-Daten sowie Referenzdaten zu nutzen. Diese Daten sind in Tabelle 25.2 (siehe Kapitel 25) zusammengefasst. Gemäß der räumlichen Auflösung erfolgt eine Zuordnung zu der entsprechenden Planungsebene. Je kleinräumiger die Planungsebene, desto räumlich höher aufgelöste Daten werden als Grundlage für Themenkarten benötigt.

In Hessen enthält der Landesentwicklungsplan (LEP) zeichnerische Festlegungen im Maßstab 1:200.000, die Plankarte der Regionalpläne in den drei Planungsregionen enthält die zeichnerischen Festlegungen im Maßstab 1:100.000. In Südhessen übernimmt der Regionalplan für das Gebiet des Ballungsraums Frankfurt/Rhein-Main zugleich die Funktion

eines regionalen Flächennutzungsplans (§ 204 Baugesetzbuch (BauGB)). Für diese Region wird die Plankarte zukünftig im Maßstab 1:25.000 erstellt. Auf kommunaler Ebene werden die Flächennutzungspläne in der Regel im Maßstab zwischen 1:5.000 bis 1:50.000 und die Bebauungspläne im Maßstab 1:500 bis 1:2.500 erstellt.

Die in Tabelle 25.2 dargestellten FE-Daten sind bereits auf ihre Nutzbarkeit für die in Teil III und Teil II zu lösenden Fragestellungen und Themenstellungen analysiert. Weiterhin werden die Daten im weiteren Projektverlauf auf ein Minimum an notwendigen Daten reduziert. Neben der räumlichen und zeitlichen Auflösung und Detaillierung haben auch die Datenverfügbarkeit und der Datenzugriff als wichtige Aspekte Einfluss auf die Datenbewertung.

Vom Land Hessen sind räumlich hochauflöste Orthofotos mit den drei Kanälen rot, grün und blau (RGB) und Infrarotbilder sowie Gelände- und Oberflächenmodellen vorhanden. Diese Daten finden u. a. Eingang in die datengetriebenen Segmentierungsverfahren in den Unterthemengruppen (UTs) Versiegelung, Grünflächen und FF-PV (siehe Teil II und Kapitel 8). Für weitere Aufgabenstellungen, wie beispielsweise im Themenbereich Wasser, muss auf zusätzliche FE-Daten mit einer höheren spektralen Auflösung (multispektrale Satellitendaten) oder anderen Wellenlängenbereichen (z. B. SMAP-Mission der Nationalen Aeronautik- und Raumfahrtbehörde, engl. National Aeronautics and Space Administration (NASA)) zurückgegriffen werden.

Im Rahmen des Vorhabens wird darauf geachtet, dass die Kosten zur Datenbeschaffung so gering wie möglich gehalten werden und dass die Daten ausreichend lange zur Verfügung stehen. Letzteres spielt insbesondere im Kontext der Monitoringaufgaben eine entscheidende Rolle. Zu beachten ist, dass aber selbst bei kostenfreien Daten ein gewisser Aufwand für Akquise und Download der Daten entsteht.

Im nachfolgenden Abschnitt wird kurz auf die Analyse der bestehenden und genutzten Daten hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien eingegangen.

Analyse der Datengrundlage, Wirtschaftlichkeitsprüfung

Der planenden Verwaltung soll eine Hilfestellung in Form einer automatisierten Daten erfassung, -aufbereitung und -bewertung an die Hand gegeben werden, die zugleich wirtschaftlich umsetzbar ist.

Die Analyse der Datenverfügbarkeit wurde als erster, wichtiger Schritt im Vorhaben durchgeführt, um die Grundlage für die Datenauswahl und Modellierung zu schaffen. Hierbei werden zum einen die bereits existierenden Daten seitens des AG (interne Quellen) sowie potenzielle zusätzliche Datenquellen (externe Quellen) evaluiert. Die Evaluierung erfolgt basierend auf der Grundlage der relevanten Datenquellen und der Bestimmung der Qualität, Quantität und Verfügbarkeit der Daten. Die Tabellen 25.1 und 25.2 im Kapitel 25 fassen die vorhandenen Daten nach Quelle, Themenschwerpunkt sowie Verfügbarkeit zusammen.

Während der Überprüfung der Datenqualität wird auf die Genauigkeit, Vollständigkeit, zeitliche und räumliche Eignung im Hinblick auf die Projektfragestellungen sowie auf die Aktualität der Daten geachtet. Insbesondere sind dabei auch die unterschiedlichen Aspekte von Luft- und Oberflächentemperaturmessungen sowie deren mittel- und langfristigen Muster in den Blick genommen. Hierbei werden auch mögliche Fehler und Inkonsistenzen in den Daten berücksichtigt. Auch die Wirtschaftlichkeit fließt in die Bewertung der Daten mit Blick auf ein potenzielles Monitoring ein. Betrachtet wird der Aufwand, die Daten anzuschaffen, aufzubereiten und zu archivieren. In diesem Zusammenhang meint „anschaffen“ die Datenakquise oder Datenbeschaffung von Dritten, „aufbereiten“ die Bereinigung der Daten und das anschließende Transformieren in ein zur Weiterverarbeitung geeignetes Format und „archivieren“ bezieht sich auf die langfristige Speicherung der Daten in einem geeigneten Format.

Die Beurteilung der Datenverfügbarkeit beinhaltet damit die notwendigen Zugriffsrechte, vorzuhaltende technische Infrastruktur, jegliche Kosten und die rechtlichen Anforderungen. Dokumentiert wurden die Schritte und Ergebnisse der Datenverfügbarkeitsanalyse (siehe hierzu auch Tabellen 25.1 und 25.2 in Kapitel 25). Neben den hier genannten Aspekten spielen eine systematische Datenstrategie und eine effektive Datenverwaltung eine zentrale Rolle, um die entsprechend einzusetzenden Daten rechtzeitig zur Verfügung zu stellen. **Als Abschluss der Datenrecherche und Wirtschaftlichkeitsprüfung kann festgehalten werden, dass sämtliche im folgenden herangezogenen Datenquellen kostenfrei verfügbar sind.**

Datenorganisation, Datenbankentwicklung

Der Großteil der im Projekt erhobenen Daten ist in einer eigens eingerichteten PostGIS-Datenbank organisiert. Das verwendete Datenbanksystem ist in der Lage, Vektor- und Rasterdaten zu speichern und auf Abfrage bereitzustellen. Ausgewählte Projektteilnehmende haben während der Entwicklungs- und Testphase jeweils einen eigenen Zugang mit Lese- und Schreibrechten. Die Datenbank kann problemlos in verschiedene Geographische Informationssysteme (GIS) und Applikationen eingebunden werden. Diese Flexibilität bietet den Vorteil, dass die Projektteilnehmenden nicht auf eine bestimmte Software festgelegt sind.

Teil II.

Darstellung der Ergebnisse im Kontext der Klimaanpassung

3. Einleitung zu den Themenschwerpunkten der Klimaanpassung

Ein zentrales Projektziel ist die Identifikation und Priorisierung von räumlichen Handlungsschwerpunkten für Klimaanpassungsmaßnahmen. Hierbei handelt es sich um Räume, in denen Maßnahmen zur Minderung von sommerlichen Extremtemperaturen oder zum Erhalt und zur Stabilisierung von wertvollen Kühlflächen Bedeutung zukommt. Diese Aspekte werden in Teil II ausführlich behandelt.

Das Vorgehen auf dem Gebiet der Klimaanpassung zeigt Abbildung 3.1. Den Ausgangspunkt bilden die sog. „universellen Hot- und Coldspots“, die aus verschiedenen Temperaturparametern (Daten zur Abbildung der Hitzebelastung und der Verdunstungsdefizite) abgeleitet werden.

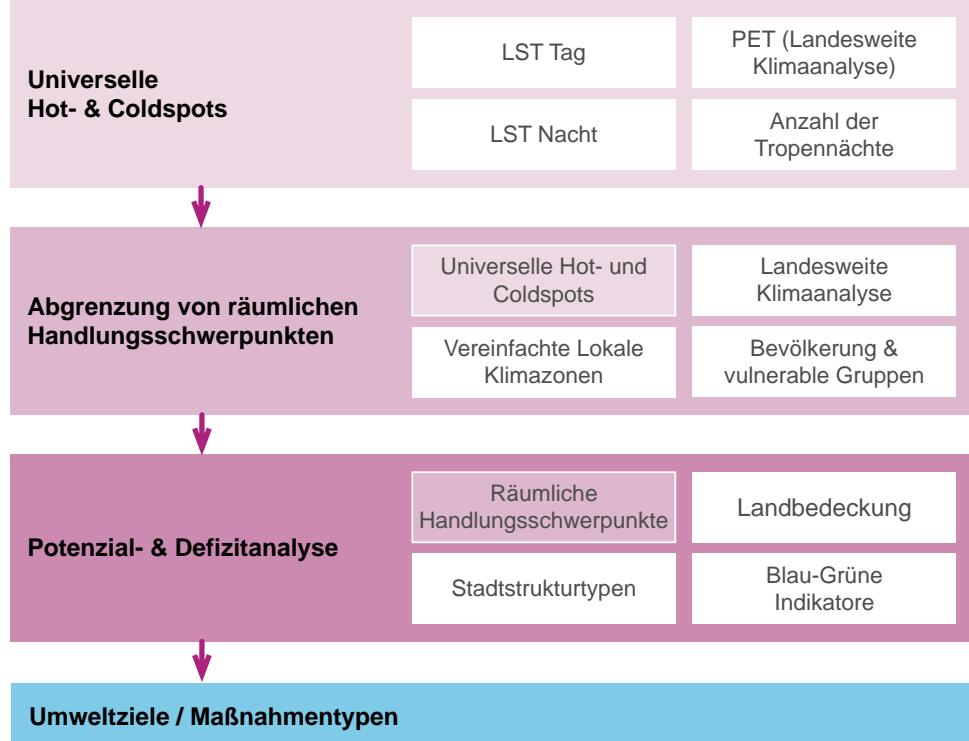


Abbildung 3.1.: Schematische Übersicht für den Themenschwerpunkt der Klimaanpassung.

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 nachrichtlich dargestellten regionalbedeutsamen Kaltluftentstehungsgebieten und Kaltluftbahnen aus der Landesweiten Klimaanalyse 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. In der Abbildung 3.1 sind die einzelnen Arbeitsschritte (linksseitig) und die diesen Arbeitsschritten zugrunde liegenden Geofachdaten (Kästchen rechte Seite) schematisch dargestellt.

Im Abschlussbericht werden jedoch, abweichend von dieser planerischen Vorgehensweise, zunächst alle verwendeten Datengrundlagen der einzelnen Themenkarten beschrieben (vgl. Kapitel 4 bis 11), bevor Verschneidungen dieser Datengrundlagen methodisch erläutert werden (zum Beispiel zur Ermittlung von universellen Hot- und Coldspots oder zur Ermittlung von priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten innerhalb der universellen Hot-/Coldspots; vgl. Kapitel 12 bis 14). Zu Beginn der Themenkarten-Kapitel werden jeweils kurze Hinweise gegeben, wofür die jeweilige Themenkarte im planerischen Ablaufschema gemäß Abbildung 3.1 benötigt wird.

Zur Identifikation der universellen Hot- und Coldspots wird das aus einem 10-jährigen Mittel (2013 bis 2022) abgeleitete Tag-Nacht-Temperaturmuster analysiert. Diese Methode ermöglicht eine transparente Darstellung der sommerlichen Temperaturextreme und verdeutlicht das Klimaanpassungspotenzial in verschiedenen Raumtypen.

Es lassen sich Bereiche identifizieren, die:

- sich sowohl tagsüber als auch nachts stark erwärmen,
- tagsüber hohe Temperaturen aufweisen, aber nachts durch Abkühlung Potenzial für Kaltluftbildung bieten, was auf eine gute Durchlüftung hinweist,
- im Tag-Nacht-Rhythmus nur geringe Temperaturschwankungen erleben, jedoch in ihrer nächtlichen Kühlfunktion stabilisiert werden sollten,
- durchgehend kühlend wirken und somit als natürliche Temperaturpuffer fungieren.

Diese differenzierte Betrachtung schafft die Basis für eine zielgerichtete Klimaanpassungsstrategie und unterstützt die Priorisierung von Maßnahmen in hitzebelasteten Räumen sowie die Bewahrung und Stärkung von kühlen Gebieten.

Im Kontext der Klimaanpassung dieses Vorhabens beziehen sich der Großteil der Analysen und Darstellungen auf eine 100 m-Gitterzelle. Diese bezeichnet eine Zelle des Infrastructure for Spatial Information in Europe (INSPIRE)-Gitters mit einer festen Größe von 100 m × 100 m.

4. Temperaturdaten und Klassifizierung

4.1. Einleitung

Die Themenkarten der Temperatur dienen der Entwicklung sogenannter universeller Hot- und Coldspots für Hessen. In diesen Themenkarten werden sowohl vergleichsweise kühlwirksame als auch vergleichsweise stark erwärmte Bereiche dargestellt. Die Themenkarten zu den universellen Hot- und Coldspots bilden die wesentliche Fachgrundlage, um in einem nächsten Arbeitsschritt räumliche Handlungsschwerpunkte für die Klimaanpassung zu identifizieren (siehe Teil II).

In diesem Projekt wurden ausgehend von den verfügbaren Temperaturdaten (siehe Abschnitt 4.3) verschiedene Ansätze vorgestellt und mit dem AG sowie in der Unterarbeitsgruppe *Temperatur* mit externen Experten:innen umfassend und detailliert diskutiert. Betrachtet werden die Tag- und Nachttemperaturdaten, die (a) für das menschliche Hitzeempfinden relevant sind (Lufttemperatur in Form der Tropennächte sowie Physiologisch äquivalente Temperatur (PET)) und (b) Landoberflächentemperatur, engl. Land Surface Temperature (LST), die mittelbar Verdunstungsdefizite der Oberflächen und damit zusammenhängende Hitzeeffekte abbilden. Die final festgelegte Methode wurde in Hinblick auf ein stringentes Vorgehen, eine maximale Aussagekraft und die Verhinderung von Widersprüchen zu anderen hessischen Studien optimiert.

Im Projekt wurden ergänzend weitere wissenschaftliche Ansätze zur räumlichen Identifikation von Handlungsschwerpunkten für die Klimaanpassung geprüft, darunter die Analyse von Temperaturgradienten zwischen Hotspots und angrenzenden kühleren Bereichen. Dieser methodische Zugang wurde im Rahmen einer begleitenden vertiefenden Studie weiter ausgearbeitet und publiziert [55]. Für die operative Umsetzung im Projekt wurde auf darstellungs- und kommunikationsfreundlichere Absolutgrößen zurückgegriffen, die eine direkte Anwendung in Planung und Öffentlichkeit ermöglichen und nachfolgend erläutert werden.

4.2. Erläuterung unterschiedlicher temperturbezogener Kenngrößen

Die Erfassung und Klassifizierung der Oberflächentemperaturen sollte zunächst auf verschiedenen Maßstabsebenen mit FE-Methoden erfolgen (LST, s. Abschnitt 4.3), wurde allerdings mit Temperaturmessverfahren außerhalb der FE erweitert (PET, s. Abschnitt 4.3). Dies ermöglicht es, die Temperaturen in Hessen und deren Bedeutung sowohl für menschlichen Hitzestress als auch den Energieaustausch an der Erdoberfläche ganzheitlich abzubilden. Nachfolgend werden die unterschiedlichen Eingangsgrößen und deren (u. a. physikalische) Bedeutung kurz umrissen. Auf die zugrundeliegenden Datenquellen wird dann weiter unten in Abschnitt 4.3 eingegangen.

Lufttemperaturen werden in der Regel in einer Höhe von 2 m über der Erdoberfläche im Schatten aufgezeichnet. In Deutschland finden diese Messungen u. a. in Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) statt. Für das menschliche Wohlbefinden sind neben der Lufttemperatur allerdings auch andere Merkmale wie Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Strahlung von Bedeutung.

Diese Merkmale können in thermischen Indizes, wie etwa der **Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET)**, zusammengefasst werden. So wird die PET verwendet, um die wahrgenommene Wärmebelastung zu quantifizieren und somit das Risiko von Hitzestress und Hitzeerkrankungen zu bewerten. Sie basiert darauf, dass die Körperwärmeabgabe des Menschen von den Umgebungsbedingungen beeinflusst wird. In die Berechnung der PET fließen neben der Lufttemperatur auch weitere Einflussgrößen wie Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Strahlung ein. Dadurch ermöglicht die PET eine realistischere Einschätzung der *tatsächlich wahrgenommenen* Wärmebelastung.

Ein weiteres Kriterium zur Bewertung von Wärmebelastungen ist die Häufigkeit sogenannter **Tropennächte**. Als Tropennächte gelten Nächte, in denen die Lufttemperatur nicht unter 20 °C sinkt. Diese Nächte stellen eine besondere Belastung für den menschlichen Organismus dar, da der Körper ohne die Abkühlung durch niedrigere Nachttemperaturen weniger effektiv regenerieren kann. Dies kann besonders für Risikogruppen wie ältere Menschen oder Personen mit Vorerkrankungen gefährlich werden und führt zu erhöhtem Risiko für hitzebedingte Gesundheitsprobleme. Tropennächte haben sich durch die Klimaerwärmung in den letzten Jahren gehäuft, insbesondere in dicht bebauten städtischen Gebieten. Für die räumliche Planung und das Monitoring im vorliegenden Projekt sind daher auch Daten zur Häufigkeit und Verteilung von Tropennächten relevant, da sie maßgeblich zur Identifikation von Handlungsräumen für Klimaanpassungsmaßnahmen beitragen.

Sowohl für die Lufttemperatur bzw. Tropennächte als auch für die PET gilt, dass eine flächendeckende Bestimmung nur durch Integration aufwendiger Klimamodelle möglich ist. Aus diesem Grund ist die Aufzeichnung der Daten im vorliegenden FE-Projekt für die Ermittlung und Überwachung von Temperaturgradienten aus wirtschaftlichen Gründen nicht möglich und muss aus anderen Datenquellen, wie z. B. Landesweite Klimaanalyse (LWKA) für die PET- oder DWD-Daten für die Anzahl der Tropennächte sowie die Lufttemperatur, bezogen werden.

Durch den Einsatz von FE-Daten und -Methoden können [Landoberflächentemperaturen](#), engl. [Land Surface Temperatures \(LSTs\)](#) flächendeckend generiert werden. Sie geben mittelbar Informationen über das Energiegleichgewicht an der Erdoberfläche und können somit über den latenten Wärmestrom auch die Verdunstungseigenschaft der jeweiligen Landoberfläche abbilden. Die LST in der Erdbeobachtung wird hauptsächlich von Satelliten aufgenommen. Allerdings sind auch Aufnahmen aus Luftbildbefliegungen, unbemannten Flugobjekten oder von stationär installierten Thermalbildkameras möglich.

Bei der LST handelt es sich um eine Strahlungsgröße der Erdoberfläche, für deren fernerkundliche Bestimmung u. a. der Emissionsgrad eines Objektes relevant ist. Dieser Emissionsgrad beschreibt das Verhältnis zwischen der Wärmeabgabe (Wärmestrahlung) eines Objekts und der eines perfekten schwarzen Körpers bei gleicher Temperatur. Das bedeutet, jeder Körper sendet abhängig von seiner Oberflächentemperatur elektromagnetische Strahlung aus, die von passiven Fernerkundungssensoren gemessen werden kann. Für einen perfekten schwarzen Körper – ein Objekt, das alle einfallende elektromagnetische Strahlung absorbiert – ist die spektrale Strahlungsdichte in Abhängigkeit der Temperatur durch das Planck'sche Strahlungsgesetz gegeben. Hierdurch kann die Temperatur eines schwarzen Körpers durch Messen der Wärmestrahlung bei einer festen Wellenlänge bestimmt werden. Reale Objekte, wie etwa die Erdoberfläche, absorbieren in aller Regel nicht die gesamte einfallende elektromagnetische Strahlung und ihre Oberflächentemperatur kann nur bei bekanntem Emissionsgrad aus der Ferne erfasst werden. Die Abschätzung dieses Emissionsgrads ist die größte Fehlerquelle bei der Erfassung von LST.

Im Rahmen dieses Projekts wird diese Abschätzung direkt von der NASA, dem Anbieter der fertigen LST-Produkte, übernommen. Sie basiert u. a. auf der Land- bzw. Oberflächenbedeckung und ist vor allem im urbanen Raum aufgrund der komplexen Geometrie und der Vielzahl an verwendeten Baustoffen schwierig. Verschiedene Methoden zur Abschätzung des Emissionsgrads können zu stark unterschiedlichen urbanen LST und LST-Gradienten führen [21].

Es ist wichtig zu beachten, dass LST und Lufttemperaturen durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst werden. Die LST wird primär durch die Beschaffenheit der Bodenbedeckung und Materialeigenschaften der Bodenbedeckung geprägt, während Lufttemperaturen durch advektive Prozesse, wie z. B. Wind- und Luftaustausch, beeinflusst werden [5].

Im städtischen Kontext bedeutet dies beispielsweise, dass urbane Wärmeinseln tagsüber deutlich in der LST sichtbar werden, diese sich jedoch nicht zwangsläufig in den Lufttemperaturen widerspiegeln (siehe Abbildung 4.1). Ein hoher LST-Wert kann auf stark aufgeheizte Asphaltflächen hinweisen, während die Lufttemperatur in etwa 2 m Höhe vergleichsweise moderat bleibt. Dieser Effekt tritt z. B. auf, wenn der Bereich gut durchlüftet ist oder sich in einer Frischluftschneise befindet.

Für die Maßnahmenplanung ist dabei bedeutsam, dass ein hoher LST-Wert zugleich auf eine geringe Verdunstungskühlung und eingeschränkte Wasserrückhaltefähigkeit der Fläche hinweist. Dieser Zusammenhang kann auf eine mangelnde Schwammwirkung hindeuten, was sowohl für das thermische Empfinden als auch für den Umgang mit Starkniederschlägen und Oberflächenabfluss relevant ist.

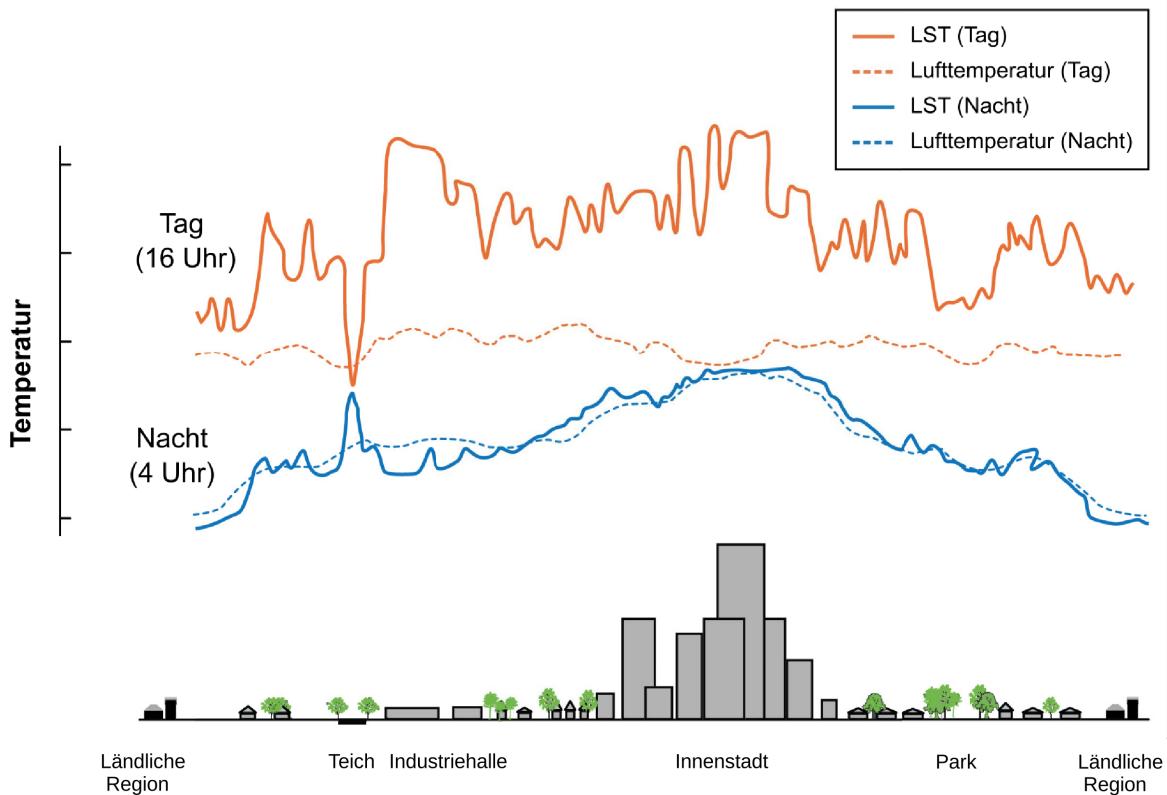


Abbildung 4.1.: Eine Illustration der US-Umweltschutzbehörde (U.S. Environmental Protection Agency), welche die Auswirkungen verschiedener Landnutzungen auf die Luft- und Landoberflächentemperaturen einer Stadt hervorhebt. [Abgewandelt nach <https://www.usgs.gov/media/images/urban-heat-islands>]

4.3. In der Analyse verwendete Temperaturdaten

Die in Kapitel 3 angekündigten universellen Hot- und Coldspots basieren in ihrer Berechnung auf vier Temperaturparametern. Diese beinhalten die Tag- und Nachttemperaturen sowie Temperaturen, die relevant für die Energiebilanz an der Oberfläche und für die Hitzebelastung des Menschen sind (siehe Tabelle 4.1). Sie werden im Folgenden ausführlich vorgestellt.

Tabelle 4.1.: Für die Berechnung der universellen Hot- und Coldspots relevante Temperaturparameter eingeteilt in Tag und Nacht Parameter sowie Parameter relevant für die Energiebilanz an der Oberfläche oder für die Hitzebelastung des Menschen. #Tropennächte steht für die Anzahl an Tropennächten.

	Nacht	Tag
Energiebilanz	LST Nacht	LST Tag
Hitzebelastung	#Tropennächte	PET

4.3.1. LST Nacht

Zur Analyse von LST bei Nacht werden die Daten des Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)-Systems verwendet. MODIS ist auf zwei Satelliten der NASA installiert: Aqua (seit 2002 in der Umlaufbahn) und Terra (seit 1999) haben beide einen sonnensynchronen Orbit und nehmen somit jeden Punkt auf der Erde täglich zur selben Uhrzeit auf. Pro Satellit werden zwei Aufnahmen pro wolkenfreiem Tag erhoben (Aqua: 1:30 Uhr und 13:30 Uhr Ortszeit am Äquator; Terra: 10:30 Uhr und 22:30 Uhr), die gemeinhin als *Tag*- bzw. *Nacht*-Aufnahme bezeichnet werden. Allerdings ist die räumliche Auflösung mit einer Pixelgröße von $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ am Äquator deutlich schlechter als bei anderen Satelliten. Die Sensoren werden in absehbarer Zeit keine Daten mehr liefern, NASA versichert qualitativ hochwertigen Ersatz etwa über die Produkte von Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS).

Hier verwendet wird das LST-Nacht Produkt *Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1 km* des Aqua Satelliten (*MYD11A1*) in der Version 6.1. Ein Wolkenfilter ist bereits implementiert. Um ein wetterunabhängiges Temperaturmuster zu gewährleisten, wurden Daten über einen 10-Jahreszeitraum (2013 bis 2022) zusammengefasst. Um die Zeiten der größten Temperaturextreme zu fokussieren, wurden jeweils nur die Sommermonate (Juni, Juli, August) analysiert. Des Weiteren wurden die Daten unter Verwendung der mitgelieferten Qualität der Messungen innerhalb eines Pixels (QC_Night Bitmask, Bits 6 – 7) dahingehend gefiltert, dass nur Eingangsdaten mit einer Unsicherheit $< 3 \text{ K}$ berücksichtigt werden (d. h. Bits 6 – 7 sind nicht 3). Eine noch strengere Einstufung, z. B. $< 2 \text{ K}$, hätte vor allem in Städten deutlich weniger Messwerte zur Folge.

In der fertigen Themenkarte sind die Daten in 100 m-Gitterzellen des INSPIRE-Gitters aufbereitet. Pro Gitterzelle stellt der AN den 10-Jahresmittelwert der Sommermonate und dessen Standardabweichung sowie folgende Hintergrundinformationen zur Verfügung, die auf die Eingangsgrößen sowie die involvierten Unsicherheiten Rückschluss geben: Anzahl an Beobachtungen, durchschnittliche Aufnahmezeit, durchschnittliche Unsicherheit.

Zur Bestimmung der Unsicherheiten der einzelnen Beobachtungen werden dabei Informationen der mitgelieferten Pixelqualität (QC_Night Bitmask, Bits 6 – 7) ausgewertet, dabei wird die Unsicherheit eines Pixels mit einer Qualität von $< 2 \text{ K}$ (Bits 6 – 7 sind 1) als 2 K angenommen.

4.3.2. LST Tag

Im Gegensatz zu den MODIS-Daten bietet die NASA seit Anfang 2023 mit den Landsat 8-9 Collections 2 Level 2 Produkten auch ein LST-Produkt mit einer Auflösung von 30 m. Sowohl die erst 2021 gestartete Landsat 9 Mission als auch die Mission Landsat 8, welche seit 2013 im Orbit ist, nehmen Informationen im Thermalbereich mit $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ auf. Allerdings sind Informationen zu Landbedeckung und zum geschätzten Emissionsgrad in 30 m Auflösung vorhanden, wodurch LST mit der höheren Auflösung von $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ modelliert und als fertiges Produkt zur Verfügung gestellt werden kann. Die Aufnahmen beider Missionen werden allerdings nur im 16-Tage-Rhythmus mit einem Tag Versatz

erhoben. Aufnahmen werden um circa 12 Uhr Ortszeit aufgenommen. Im Rahmen dieses Projekts findet Landsat 8 Verwendung wegen der Datenverfügbarkeit seit 2013. Für das Monitoring soll dann auch Landsat 9 hinzugezogen werden.

Analog zu den LST Nacht Daten werden auch hier die Sommermonate eines 10-Jahreszeitraums (2013 bis 2022) pro 100 m-Gitterzelle zusammengefasst. Dies beinhaltet eine Filterung nach Datenqualität (d. h. es gehen nur Pixel mit einer Unsicherheit $< 3\text{ K}$ nach Band „ST_QA“ in die Analysen ein). Im Gegensatz zu LST Nacht ist auch ein pixelbasierter Wolkenfilter nötig. Das bedeutet, dass in den verarbeiteten Aufnahmen alle Pixel herausgefiltert wurden, die in der mitgelieferten Pixelqualität (QA_Pixel Bitmask) als dilatierte Wolke, Zirruswolke oder einfach nur Wolke (Bits 1, 2 und 3) gekennzeichnet sind. Da Landsat-Daten nicht als globale Karten, sondern in einzelnen Kacheln veröffentlicht werden, ist es für die Verarbeitung nötig, die einzelnen Kacheln zuvor zu reprojizieren bzw. neu abzutasten (resampling), um einheitliche Pixel zu generieren. Dabei wird die Größe der Pixel nicht verändert, aber die Koordinaten ihrer Eckpunkte werden für alle Kacheln angeglichen. Um die Anzahl an Aufnahmen über ganz Hessen möglichst konstant zu halten, wurden nur Kacheln des Streifens 195 mit einbezogen. Dabei kann nicht ganz Hessen abgedeckt werden; es finden sich Orte in Osthessen, für die es keine wolkenfreie Landsat 8 Aufnahme in dem Verarbeitungszeitraum gab.

Es werden wiederum dieselben Hintergrundinformationen zu Eingangsgrößen und Unsicherheiten wie für LST Nacht bereitgestellt: Mittelwert, Standardabweichung, Unsicherheit, Uhrzeit der Aufnahmen und Anzahl der Aufnahmen, die in die Berechnung einfließen. Dabei sind Informationen zur Unsicherheit pro Pixel durch das Band ST_QA gegeben. Im Gegensatz zu MODIS sind Informationen zu Aufnahmezeitpunkt nicht pro Pixel, sondern pro Kachel gegeben. Dies führt zu großskaligen Mustern in diesem Parameter.

4.3.3. Anzahl Tropennächte

Für denselben Zeitraum (Sommer der Jahre 2013 bis 2022) wurde auch die Anzahl der Tropennächte (abgekürzt als # Tropennächte) bestimmt. D. h. die Anzahl der Nächte, in denen die Lufttemperatur nie unter 20°C gefallen ist.

Die Analyse beruht auf dem Hochaufgelösten Stündlichen Rasterdatensatz (HOSTRADA) des DWD. Es handelt sich um einen neuen, umfassenden klimatologischen Referenzdatensatz für Deutschland. Er bietet seit 1995 stündliche meteorologische Daten mit einer räumlichen Auflösung von $1\text{ km} \times 1\text{ km}$. Im Gegensatz zu vorherigen Datensätzen berücksichtigt HOSTRADA urbane Landnutzung und bildet urbane Wärmeinseln präzise ab. Die Daten werden regelmäßig aktualisiert und sind über das Climate Data Center (CDC) des DWD im OpenData-Bereich frei zugänglich. Dabei werden monatliche Datensätze als netcdf-Dateien zur Verfügung gestellt.

Aus dem Datensatz zur Lufttemperatur in 2 m Höhe aus HOSTRADA wurde zunächst für jeden Tag die minimale Temperatur bestimmt und dann die Anzahl der Tage im Untersuchungszeitraum aufsummiert, an denen die minimale Temperatur größer oder gleich 20°C ist. Anschließend wurde die gewonnene Information auf das 100 m-Gitter übertragen.

4.3.4. PET

Informationen zu PET an einem typischen, klaren Hochsommertag (d. h. Sonnenstände wie am 1. August) stehen dem AN aus einem vorhergehenden Projekt, der Landesweiten Klimaanalyse (LWKA), zur Verfügung. Ziel der Klimaanalyse ist es, belastete und unbelastete (Siedlungs-)Räume hinsichtlich thermischer und lufthygienischer Bedingungen zu identifizieren sowie unbelastete Luftleitbahnen und Kaltluftproduktionsgebiete zu ermitteln, die wiederum als Ausgleichsraum für die belasteten Wirkräume dienen können. Die LWKA stellt im Rahmen der Neuaufstellung der Regionalpläne eine Datengrundlage zur Festlegung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten für besondere Klimafunktionen dar (mehr Informationen in Kapitel 15).

Um PET zu generieren, wurden Simulationen mit dem Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat-Sources (FITNAH)-Modell durchgeführt. Das Modell löst die Bewegungsgleichungen zur Berechnung der Strömung und berücksichtigt den Tagesverlauf der meteorologischen Größen. Die Auflösung der FITNAH-Modellsimulationen ist abhängig vom Untersuchungsgebiet. Für den Ballungsraum Frankfurt am Main stehen hochauflöste Simulationsdaten mit einer horizontalen Auflösung von $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ zur Verfügung. Für die übrigen hessischen Regionen lagen die Modellrechnungen in einer Auflösung von $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ vor. Für die Analysen im Vorhaben wurden beide Datensätze entsprechend ihrer regionalen Verfügbarkeit eingesetzt, sodass im Ballungsraum Frankfurt am Main mit einer feineren räumlichen Detailtiefe gearbeitet werden konnte. Die PET wurde für alle Gebiete einheitlich für 13 Uhr tatsächlicher Ortszeit simuliert, um repräsentative thermische Bedingungen zur Mittagszeit abzubilden. Für die weitere Verarbeitung und insbesondere die Ableitung klassifizierter Ergebnisse (siehe Abschnitt 4.4) wurde eine einheitliche räumliche Bezugsgröße gewählt. Unabhängig von der ursprünglichen Auflösung des Modells erfolgte die Aggregation der Daten auf die 100 m-Gitterzelle. Dies gewährleistet eine vergleichbare Datenbasis für die landesweite Auswertung und Darstellung sowie eine konsistente Anwendung der entwickelten Klassifikationsmethoden in unterschiedlichen räumlichen Kontexten.

4.4. Klassifizierende Darstellung

Zur leichteren Interpretation der Temperaturdaten werden alle vier Parameter (LST Nacht, LST Tag, #Tropennächte und PET) klassifizierend dargestellt. Die Einteilung beruht auf Perzentilen und wird für jeden Regierungsbezirk individuell durchgeführt. D. h. Gitterzellen im Regierungsbezirk Kassel werden nur mit anderen Gitterzellen im Regierungsbezirk Kassel verglichen. Dieser Bezugsrahmen wurde gewählt, um die Analyse von großskaligen Klimaeffekten, wie etwa besonders milde Winter und warme Sommer im Rhein-Main-Gebiet, zu trennen, wie es bei einem hessenweiten Bezugsrahmen der Fall gewesen wäre. Gleichzeitig soll verhindert werden, dass in Gemeinden ohne Temperaturrextreme diese als rechnerische Artefakte auftreten, wie es etwa bei einem kleineren Bezugsrahmen auf Gemeindeebene der Fall wäre. Vor allem bei den Nacht-Parametern mit einer originalen Auflösung von 1 km^2 ist allerdings zu beachten, dass Gebiete einzig

und allein aufgrund ihrer Nachbarschaft, die in den Originaldaten im selben Pixel liegt, erhöhte bzw. niedrige Temperaturen aufzeigen können.

Die klassifizierende Darstellung priorisiert sowohl universelle Hot- als auch Coldspots. Dabei wurden jeweils die heißesten bzw. kältesten 10 % der Priorität 1 zugeordnet; dann jeweils 20 % der Priorität 2; und die letzten 40 % der Daten der Priorität 3 (Beispiele siehe Tabellen 4.2 bis 4.4). Die entstehenden Kategorien wurden für jede analysierte Größe wie folgt betitelt und eingefärbt:

- **Priorität 1: Sehr kühl ($\leq 10\%$)**
- **Priorität 2: Kühl (> 10 und $\leq 30\%$)**
- **Priorität 3: Geringere Extreme (> 30 und $\leq 70\%$)**
- **Priorität 2: Erwärmte (> 70 und $\leq 90\%$)**
- **Priorität 1: Sehr erwärmt ($> 90\%$)**

Die Ergebnisse sind als Karten für vier Beispielgemeinden in Abb. 4.2, 4.4, 4.6 und 4.8 und hessenweit in Abb. 4.3, 4.5, 4.7 und 4.9 zu finden.

Tabelle 4.2.: Perzentile Grenzwerte im Regierungsbezirk: Darmstadt

Attribut	10%	30%	70%	90%
# Tropennächte	4	10	22	32
PET	21.56°C	23.73°C	39.34°C	42.65°C
LST Tag	24.11°C	25.69°C	30.68°C	33.85°C
LST Nacht	11.74°C	12.42°C	13.37°C	14.16°C

Tabelle 4.3.: Perzentile Grenzwerte im Regierungsbezirk: Gießen

Attribut	10%	30%	70%	90%
# Tropennächte	1	2	6	20
PET	21.60°C	23.54°C	37.76°C	41.73°C
LST Tag	24.14°C	25.50°C	29.58°C	31.48°C
LST Nacht	10.81°C	11.37°C	12.02°C	12.50°C

Tabelle 4.4.: Perzentile Grenzwerte im Regierungsbezirk: Kassel

Attribut	10%	30%	70%	90%
# Tropennächte	1	1	3	9
PET	21.13°C	22.91°C	37.07°C	41.32°C
LST Tag	23.51°C	25.07°C	29.13°C	30.97°C
LST Nacht	10.75°C	11.26°C	11.93°C	12.36°C

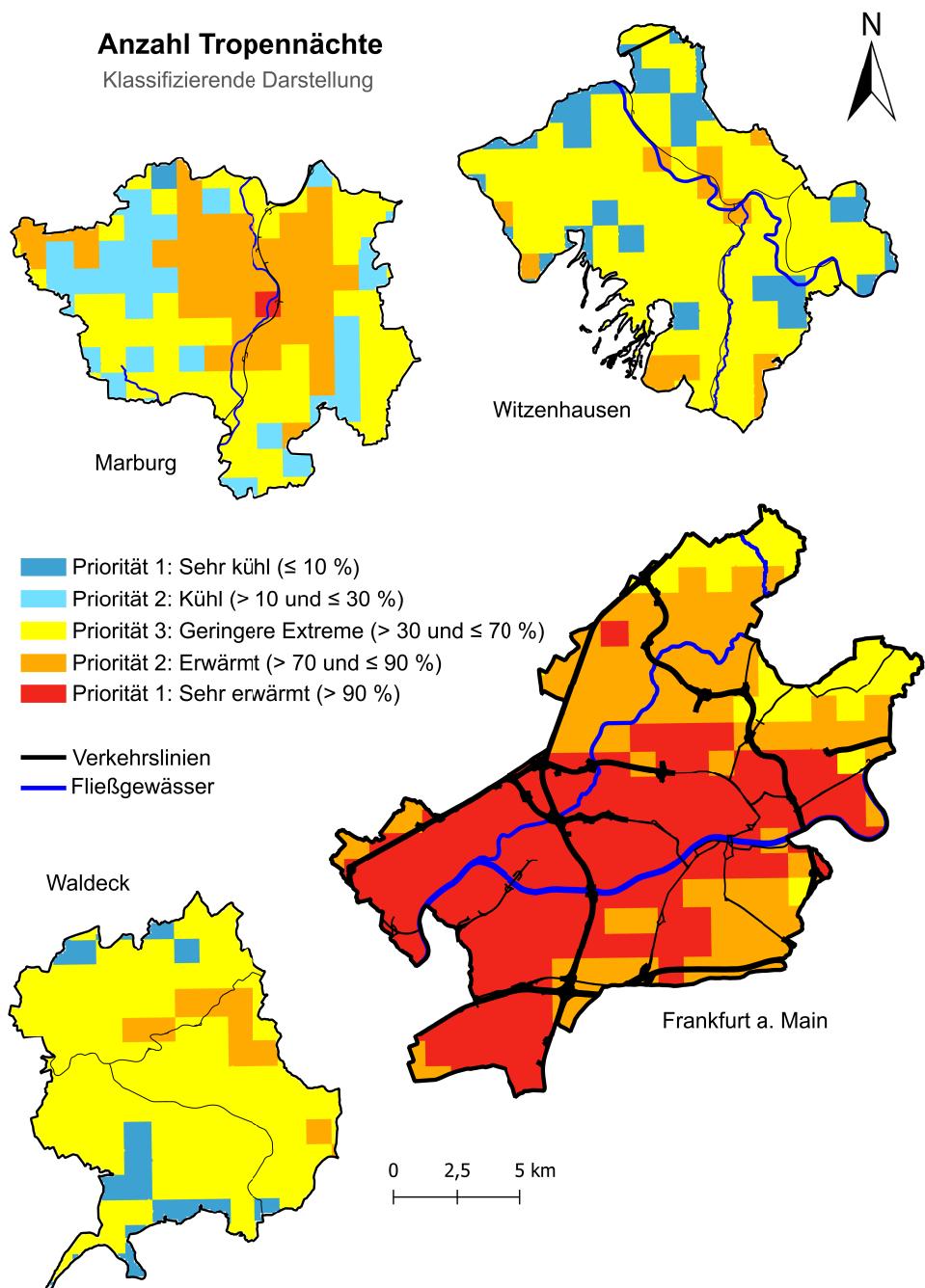


Abbildung 4.2.: Anzahl der Tropennächte der Sommermonate eines 10-Jahreszeitraums (2013 bis 2022) pro 100 m-Gitterzelle in einer klassifizierenden Darstellung in den vier Beispielgemeinden (Frankfurt, Marburg, Waldeck und Witzenhausen). Die absoluten Werte hinter den Klassen sind für jeden Regierungsbezirk unterschiedlich Tabellen 4.2 bis 4.4).

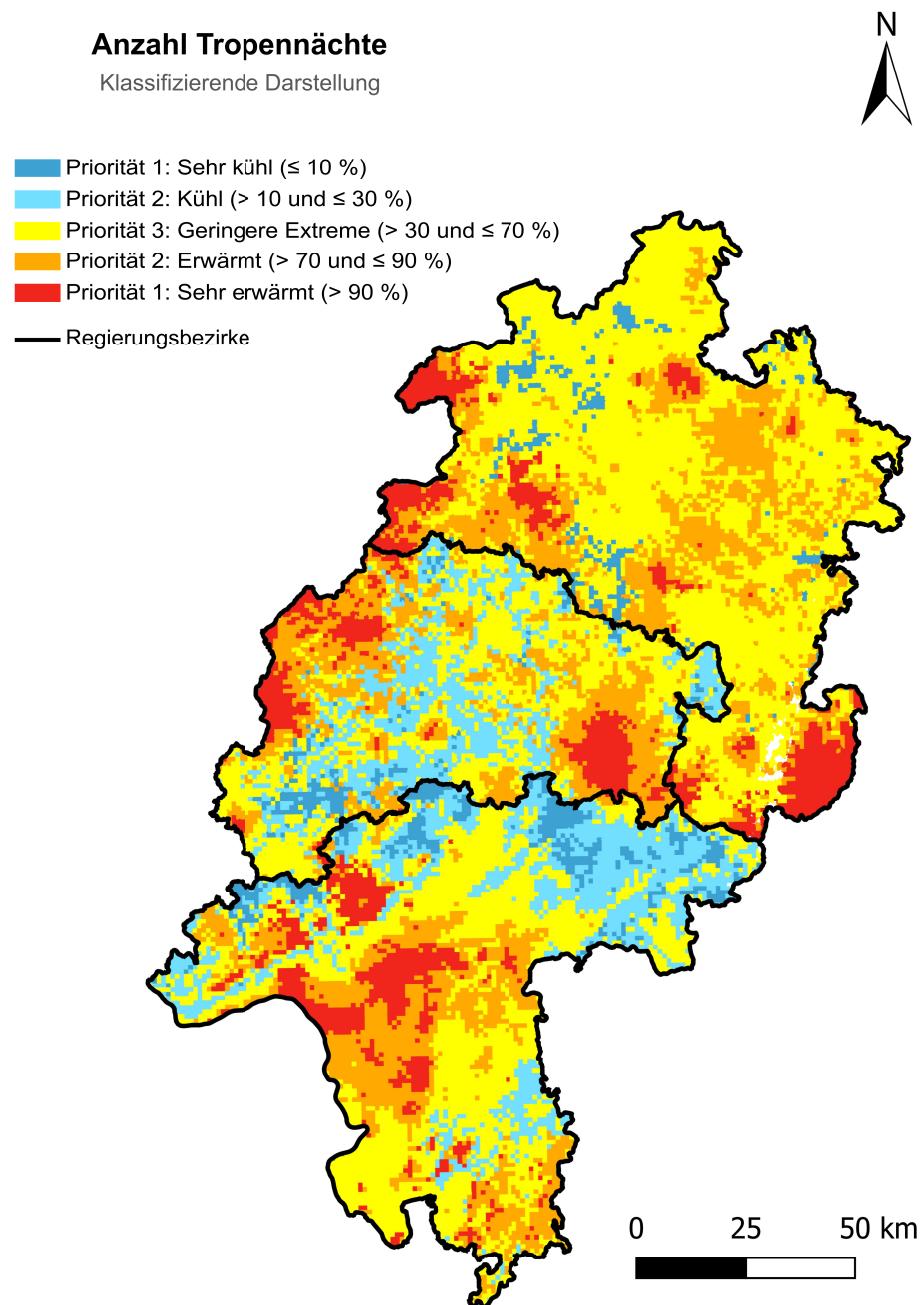


Abbildung 4.3.: Anzahl der Tropennächte der Sommermonate eines 10-Jahreszeitraums (2013 bis 2022) pro 100 m-Gitterzelle in einer klassifizierenden Darstellung in Hessen. Die absoluten Werte hinter den Klassen sind für jeden Regierungsbezirk unterschiedlich (Tabellen 4.2 bis 4.4).

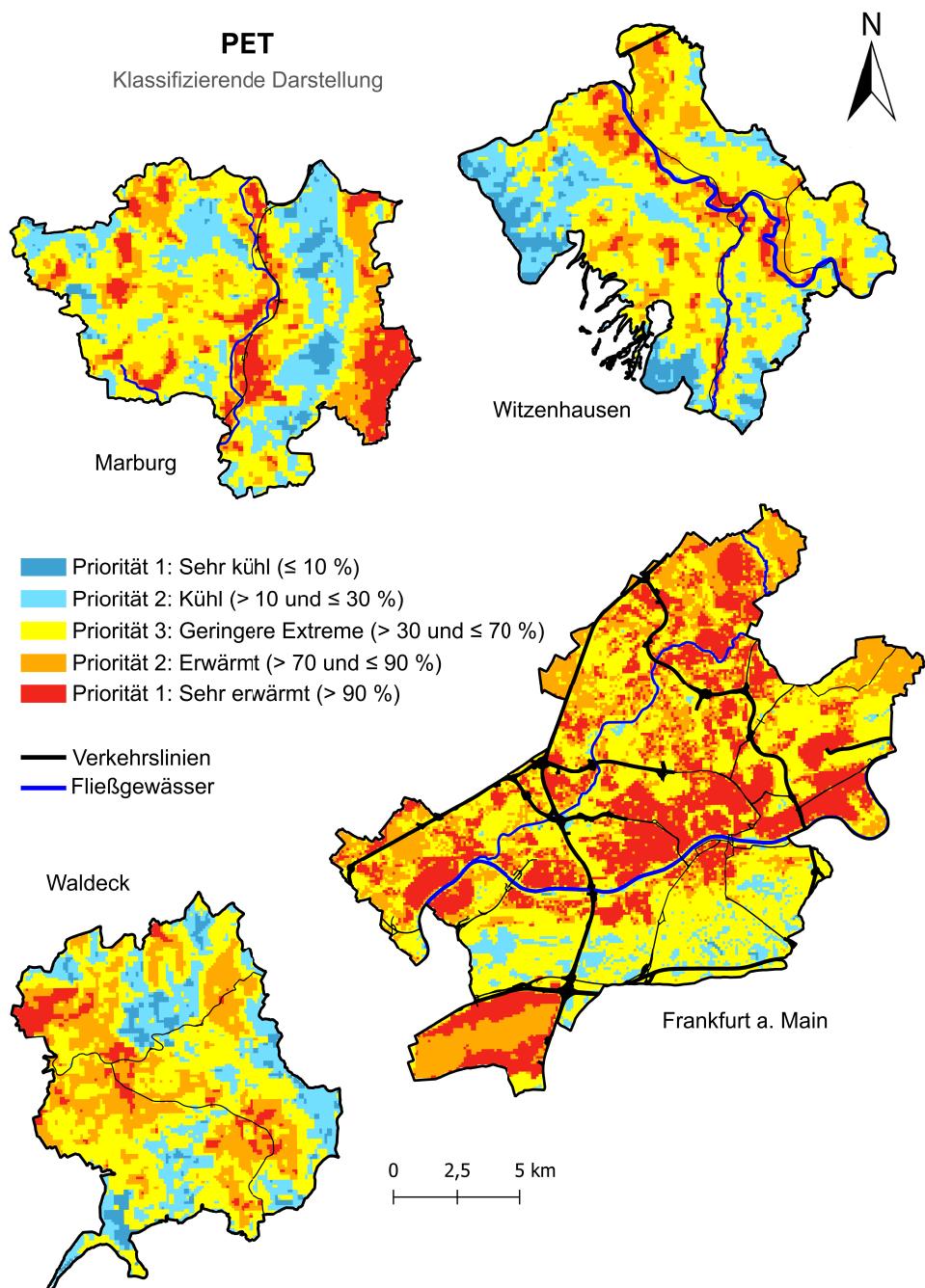


Abbildung 4.4.: PET an einem heißen Sommertag nach der LWKA pro 100 m-Gitterzelle in einer klassifizierenden Darstellung in den vier Beispielgemeinden (Frankfurt, Marburg, Waldeck und Witzenhausen). Die absoluten Temperaturen hinter den Klassen sind für jeden Regierungsbezirk unterschiedlich (Tabellen 4.2 bis 4.4).

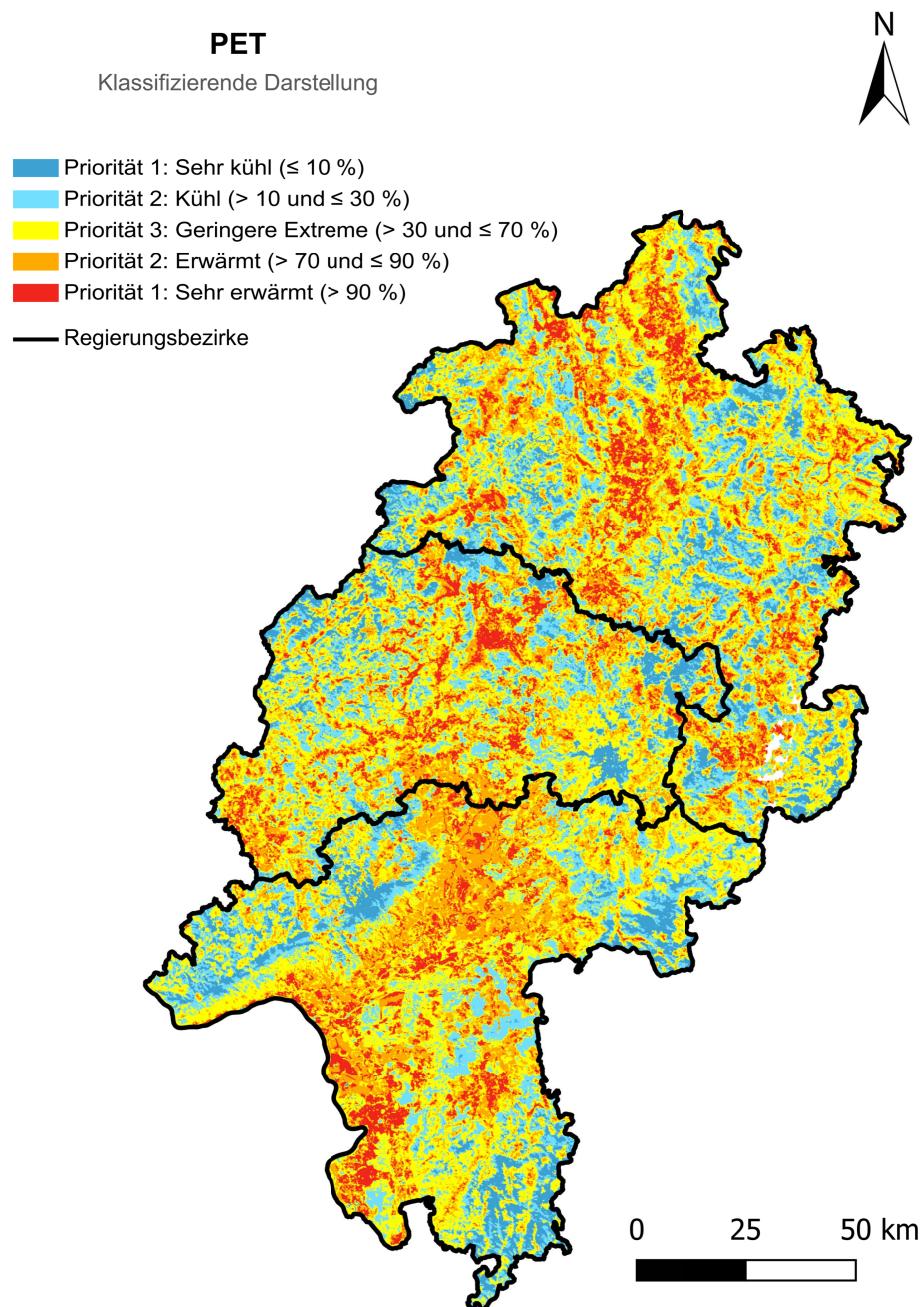


Abbildung 4.5.: PET an einem heißen Sommertag nach der LWKA pro 100 m-Gitterzelle in einer klassifizierenden Darstellung in Hessen. Die absoluten Temperaturen hinter den Klassen sind für jeden Regierungsbezirk unterschiedlich (Tabellen 4.2 bis 4.4).

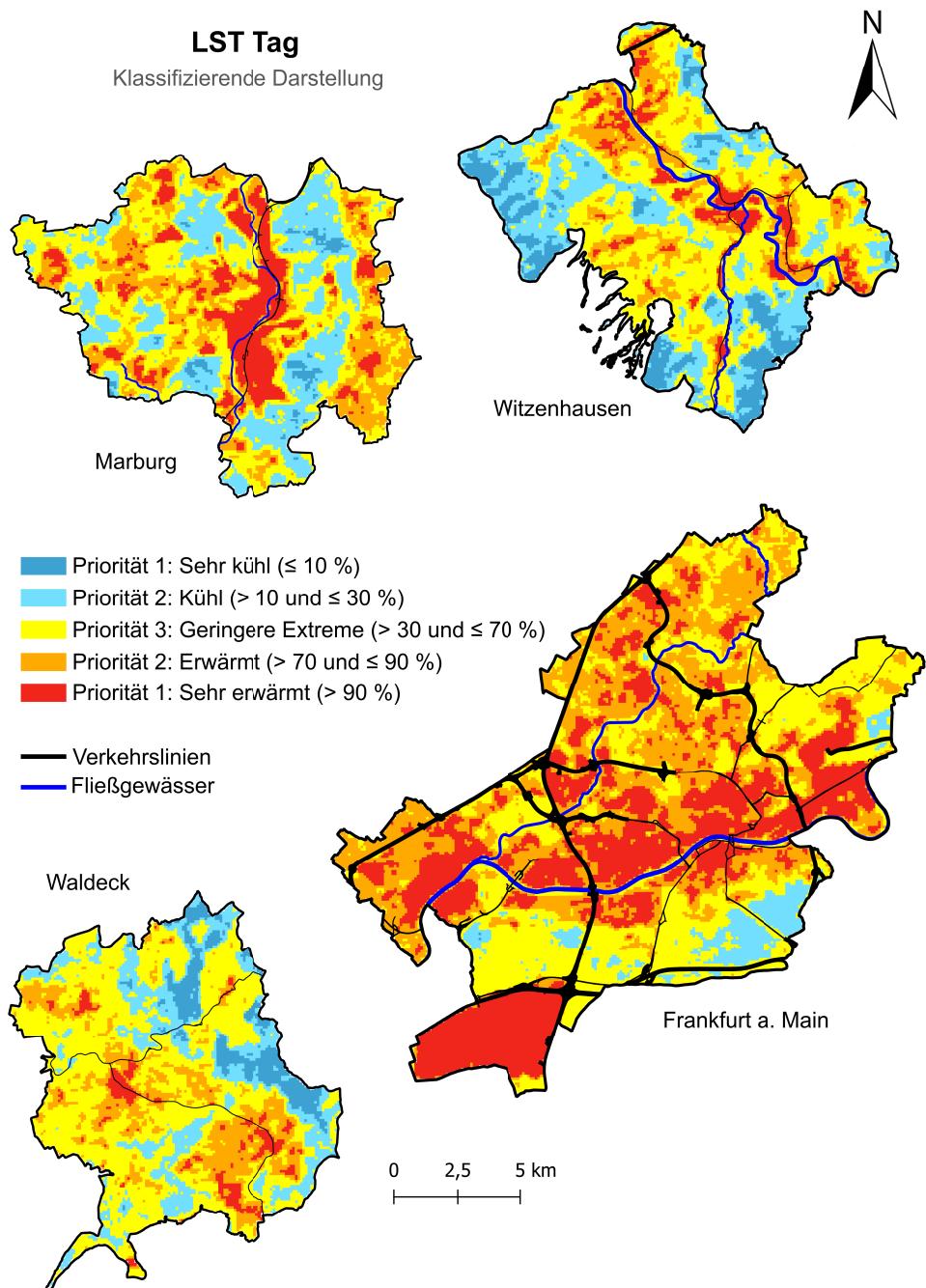


Abbildung 4.6.: Durchschnittliche LST Tag der Sommermonate eines 10-Jahreszeitraums (2013 bis 2022) pro 100 m-Gitterzelle in einer klassifizierenden Darstellung in den vier Beispielgemeinden (Frankfurt, Marburg, Waldeck und Witzenhausen). Die absoluten Temperaturen hinter den Klassen sind für jeden Regierungsbezirk unterschiedlich (Tabellen 4.2 bis 4.4).

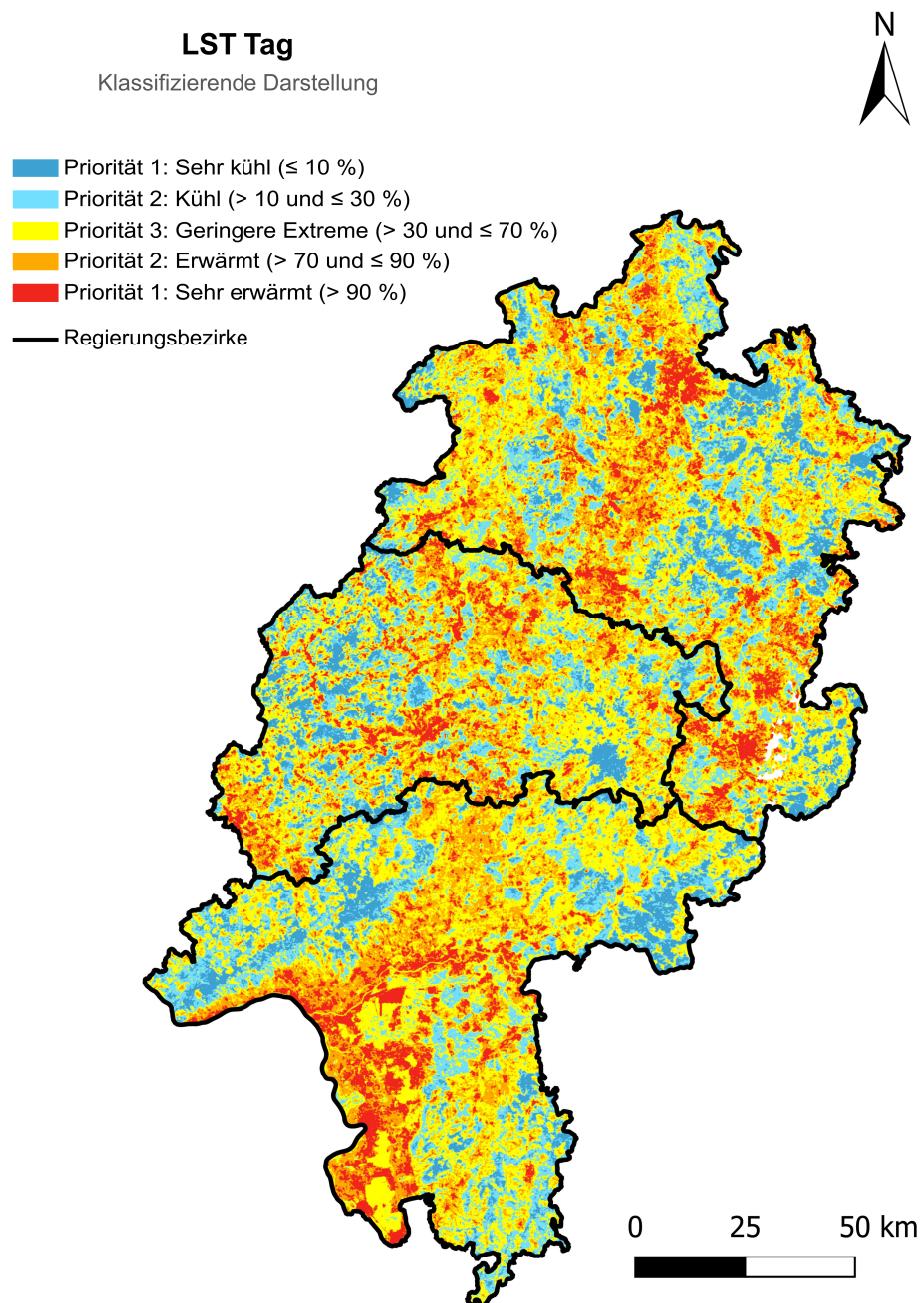


Abbildung 4.7.: Durchschnittliche LST Tag der Sommermonate eines 10-Jahreszeitraums (2013 bis 2022) pro 100 m-Gitterzelle in einer klassifizierenden Darstellung in Hessen. Die absoluten Temperaturen hinter den Klassen sind für jeden Regierungsbezirk unterschiedlich (Tabellen 4.2 bis 4.4).

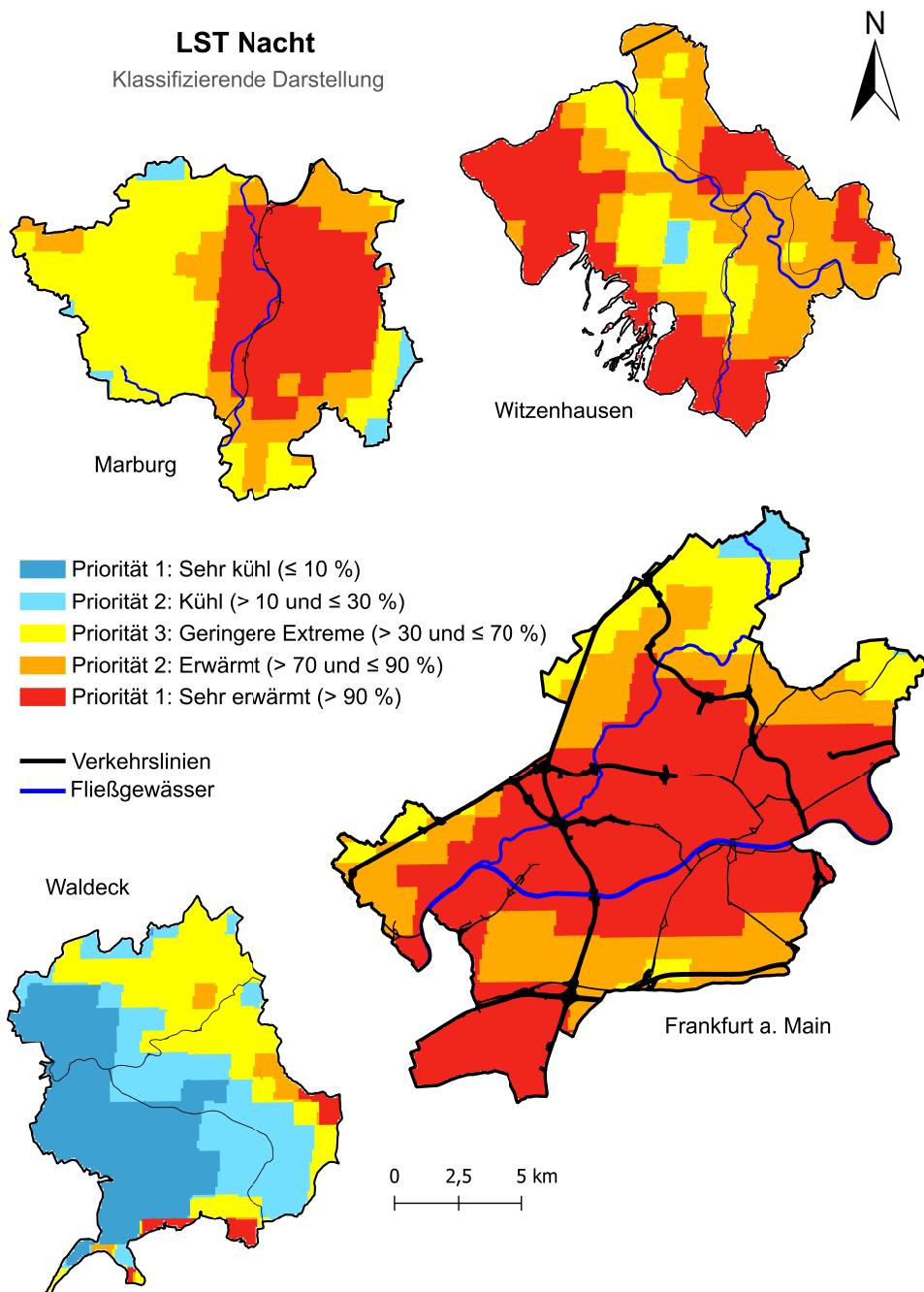


Abbildung 4.8.: Durchschnittliche LST Nacht der Sommermonate eines 10-Jahreszeitraums (2013 bis 2022) pro 100 m-Gitterzelle in einer klassifizierenden Darstellung in den vier Beispielgemeinden (Frankfurt, Marburg, Waldeck und Witzenhausen). Die absoluten Temperaturen hinter den Klassen sind für jeden Regierungsbezirk unterschiedlich (Tabellen 4.2 bis 4.4).

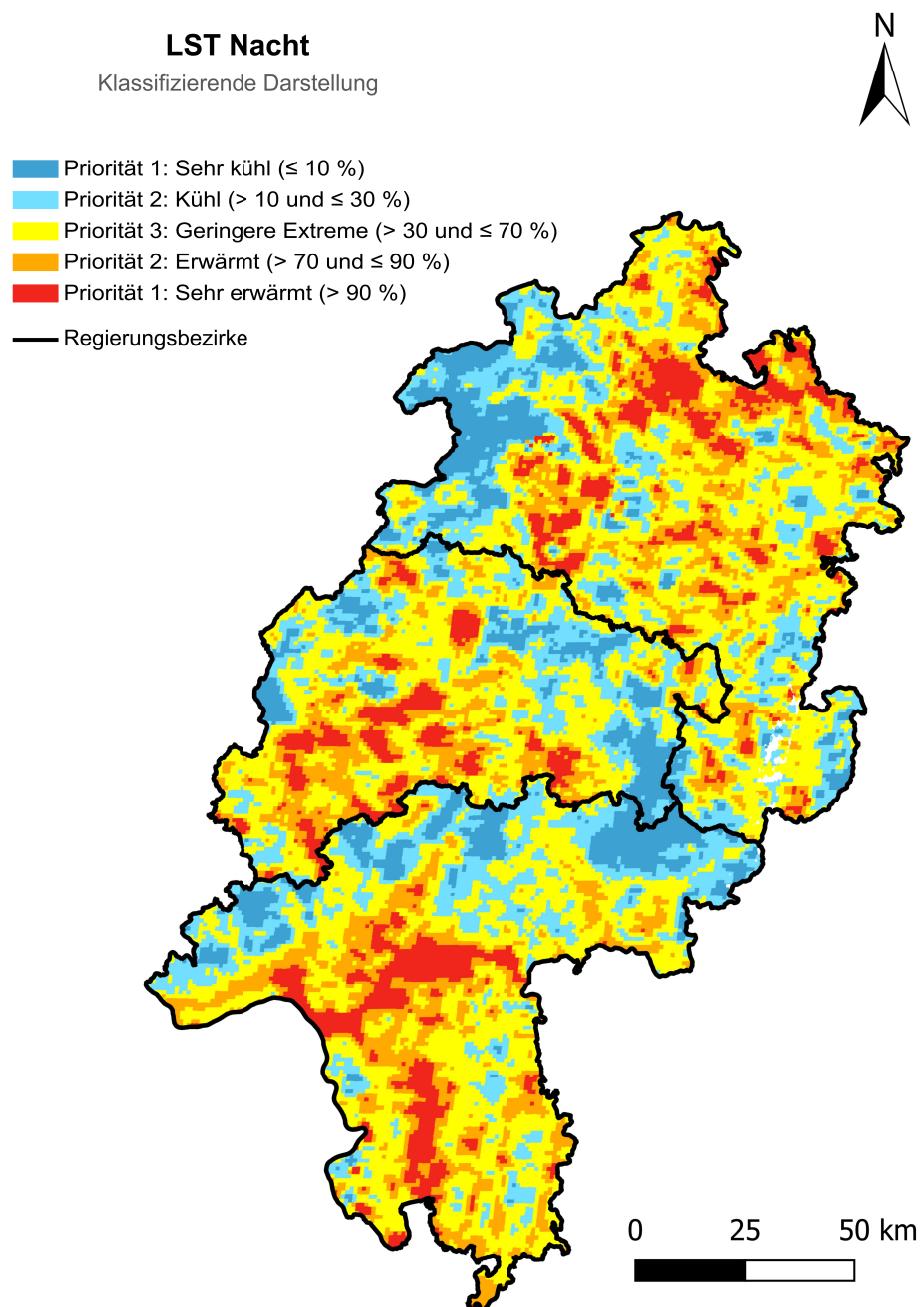


Abbildung 4.9.: Durchschnittliche LST Nacht der Sommermonate eines 10-Jahreszeitraums (2013 bis 2022) pro 100 m-Gitterzelle in einer klassifizierenden Darstellung in Hessen. Die absoluten Temperaturen hinter den Klassen sind für jeden Regierungsbezirk unterschiedlich (Tabellen 4.2 bis 4.4).

5. Vereinfachte Lokale Klimazonen

Nach der Identifizierung universeller Hot- und Coldspots für Hessen wird für diese in einem nächsten Schritt durch Hinzunahme weiterer Daten und Informationen der Handlungsbedarf für Klimaanpassungsmaßnahmen in drei Prioritätsstufen identifiziert. Entwickelt werden somit innerhalb der universellen Hot- und Coldspots sogenannte räumliche Handlungsschwerpunkte (drei Prioritätsstufen) für die Klimaanpassung in Hessen.

Eine weitere wesentliche Datengrundlage zur Identifizierung räumlicher Handlungsschwerpunkte in universellen Hot- und Coldspots stellen die sogenannten vereinfachten lokalen Klimazonen dar (vgl. Abb. 3.1), die im Folgenden eingehender erläutert werden.

5.1. Lokale Klimazonen als Klimatope

Klimazonen beschreiben den bebauten wie auch nicht bebauten Raum quantitativ hinsichtlich klimarelevanter Oberflächeneigenschaften. Lokale Klimazonen, engl. local climate zones (LCZ) werden durch die Eigenschaften der Bebauung, Vegetation und Oberflächenstruktur charakterisiert. Die Zonen weisen somit unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen auf, die maßgeblich die Lebensqualität und die Umweltbedingungen beeinflussen. Entsprechend wurden bereits mehrere Klimatopkartierungen entwickelt (siehe z. B. Abschnitt 10.2).

Aus Gründen der Konsistenz mit anderen stadtplanerischen und regionalwissenschaftlichen Auswertungen wurde hier auf das Prinzip der LCZ zurückgegriffen. Dabei handelt es sich um eine Klassifikation von natürlichen und städtischen Landschaften auf der Grundlage klimarelevanter Oberflächeneigenschaften. Vor diesem Hintergrund sind LCZ ergänzend zu den ebenfalls in diesem Projekt verwendeten Stadtstrukturtypen zu sehen, deren Definition stärker durch kleinräumige bauliche Eigenschaften geprägt ist.

Die Klassifikation der LCZ stellt einen internationalen Standard dar, der im Forschungsprojekt World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT) entwickelt wurde. Die Klassifikation hat das Ziel, eine weltweite, konsistente Informationsbasis bereitzustellen. Zur Bestimmung der LCZ-Klassifikation werden grundlegend vier klimarelevante Parameter bzw. Struktureigenschaften betrachtet. Diese sind:

- **Komponente 1:** Rauigkeit der Oberfläche (d. h. Gebäude, Vegetation und andere Objekte am Erdboden)
- **Komponente 2:** „Packung“ (d. h. lokale Dichte) der Rauigkeitsmerkmale, z. B. dichte oder lockere Packung von Gebäuden und/oder Vegetation

- **Komponente 3:** Oberflächenbedeckung (d. h. Versiegelungsgrad)
- **Komponente 4:** Thermische Leitfähigkeit der Oberflächenmaterialien (d. h. verwendetes Baumaterial)

In der weltweiten Betrachtung sind insgesamt zehn urbane und sieben ländliche Klassen definiert. Die Bestimmung der Klassen basiert auf Fernerkundungsdaten der Mission Landsat 8. Die aus dem WUDAPT-Projekt bereitgestellten Daten sind global und frei verfügbar [25]. Somit können sie auch für spezifische Fragestellungen angepasst werden. In Abbildung 5.1 sind die 17 LCZ-Klassen nach WUDAPT dargestellt.



Abbildung 5.1.: Originale 17 Klassen der LCZ nach [25].

Diese Klassen sind jedoch unter einem globalen Blickwinkel definiert und stützen sich entsprechend auch auf globale Daten hinsichtlich der Methode zur Klassifikation. Wie aus der Darstellung in Abbildung 5.1 zu entnehmen ist, sind einerseits nicht alle dieser Klassen für Hessen relevant. Andererseits muss z. B. aufgrund anderer Datengrundlagen und Datenerfassungszeiträume (z. B. Sentinel-2 Daten nur bis 2018) auch mit Inkonsistenzen gerechnet werden.

tenzen gegenüber den fernerkundlichen Datenauswertungen in diesem Projekt gerechnet werden. Aus diesem Grund wurden die Klassen im Hinblick auf die Gegebenheiten in Hessen vereinfacht und auf eine Datenbasis gestellt, die bzgl. anderer in diesem Projekt verwendeten Daten konsistent ist.

5.2. Vereinfachte lokale Klimazonen

Die Vereinfachung der Klassendefinition der LCZ zu den **vereinfachten lokalen Klimazonen (vLCZ)** verfolgt mehrere Ziele: Die neuen Klassen sollen sich logisch aus der ursprünglichen Definition ableiten lassen, eine vollständige und flächendeckende Beschreibung des Landschaftsraums ermöglichen sowie eine klare semantische Abgrenzung und eine hohe Trennschärfe zwischen den Klassen gewährleisten. Unter diesen Randbedingungen sind sieben vLCZ folgendermaßen definiert; der Farbhintergrund korrespondiert jeweils mit den Kartendarstellungen:

- **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

Um die vLCZ automatisch aus Fernerkundungsdaten ableiten zu können, wird vollumfänglich auf die in diesem Projekt erarbeiteten Datensätze zurückgegriffen. Die nötigen Informationen zur Bebauung werden aus dem 3D-Gebäudemodell (LoD2-Datensatz) des BKG entnommen [46], und insbesondere durch die Einbindung der Ergebnisse aus der Bild-Segmentierung (siehe Kapitel 7) wird dabei sichergestellt, dass für die gesamte Landesfläche eine quasi lückenlose Unterteilung in vLCZ möglich ist. Die Kriterien zur Unterscheidung der unterschiedlichen Klassen orientieren sich dabei an der Originalveröffentlichung (siehe z. B. Tab. 3 in [78]) und folgen dem in Abbildung 5.2 gezeigten Schema eines binären Entscheidungsbaumes.

Dieser geht von einem Rasterdatensatz wie dem in diesem Projekt verwendeten 100 m-Gitter aus, wobei jeder Gitterzelle Attribute zu Flächenanteilen von Bebauung, Grün- und Versiegelungsflächen sowie unterschiedlichen Wuchshöhen der Vegetation hinterlegt sind. Der initiale Knoten des Baumes unterteilt die Daten zunächst anhand des Bebauungsanteils, wobei Gitterzellen, die einen geringeren Anteil als 10 % Bebauung aufweisen, der Klasse *Wald und Gehölze* zugewiesen werden, wenn sie mehr als 30 % hochwüchsige Vegetation aufweisen (Klasse 2), und andernfalls als Flächen mit *geringer Oberflächenrauigkeit* in besiedelten oder unbesiedelten Bereichen klassifiziert werden (Klasse 1).

Gitterzellen ab 10 % Bebauung werden zunächst anhand der durchschnittlichen Gebäudenhöhe in zwei Äste aufgeteilt. Der erste Ast umfasst Gitterzellen mit durchschnittlicher

Gebäudehöhe größer als 10 m und unterscheidet diese in *lockere, mittelhohe bis hohe Bebauung* für einen bebauten Flächenanteil bis 40 % (Klasse 5) und in *kompakte, mittelhohe bis hohe Bebauung* für mehr als 40 % (Klasse 6). Der zweite Ast für niedrigere durchschnittliche Gebäudehöhen als 10 m wird sukzessive in drei Klassen unterteilt. Im Fall von Grünflächen bis zu einem Anteil von 30 % innerhalb der Gitterzelle wird diese der Klasse *niedrige Bebauung mit hohem Versiegelungsanteil* zugewiesen (Klasse 7) und für höhere Grünanteile wird durch einen Grenzwert von 40 % bzgl. der Bebauungsdichte in die Klassen *lockere, niedrige Bebauung* (Klasse 3) und *kompakte, niedrige Bebauung* (Klasse 4) unterschieden. Nach komplettem Durchlauf dieses Schemas wurden alle Gitterzellen einer der sieben vLCZ zugeordnet.

Für das visuelle Studium von Abbildung 5.2 sei darauf hingewiesen, dass der dort dargestellte Baum keine Distanzen im euklidischen Sinne darstellt. Das bedeutet, dass in der Realität auch Klassen in unmittelbarer Nachbarschaft auftreten können, selbst wenn sie im Baum vermeintlich weit entfernt liegen. So kann es z. B. bei Wohngebieten, die am Waldrand liegen, ohne Weiteres vorkommen, dass die Klasse *Wald und Gehölze* (ganz links im Baum) neben der Klasse *lockere, niedrige Bebauung* auftritt (ganz rechts im Baum).

In Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 ist die automatische Klassifikation in die vLCZ für ganz Hessen bzw. für die vier ausgewählten Gemeinden Frankfurt, Marburg, Witzenhausen und Waldeck illustriert. Deutlich sind neben vielen vegetationsdominierten Bereichen v. a. auch die Siedlungen und städtischen Bereiche ersichtlich. Auch aus dieser kleinmaßstäblichen Übersicht wird bspw. deutlich, dass kleinere Siedlungen oder die Stadtstrandgebiete eher durch lockere, niedrige Bebauung dominiert sind und der korrespondierenden vLCZ zugewiesen werden (Klasse 3, Gelbtöne), während größere Stadtregionen kompakte Bebauung aufweisen und entsprechend in andere Klimazonen eingeordnet werden (Klassen 4 bis 6, Rottöne).

Die in Abbildung 5.5 dargestellte flächenmäßige Auswertung für gesamt Hessen zeigt dies numerisch. Hingewiesen sei hierbei auf die logarithmische Skala. Tabelle 5.1 fasst zudem die prozentuale Verteilung der vLCZ in Bezug auf die Gesamtfläche Hessens zusammen.

Tabelle 5.1.: Verteilung der vLCZ an der Gesamtfläche Hessens in Prozent.

vLCZ	Anteil an Gesamtfläche Hessens in %
Geringe Oberflächenrauigkeit (besiedelter/unbesiedelter Bereich)	44.03
Wald und Gehölze	48.28
Lockere, niedrige Bebauung	4.77
Kompakte, niedrige Bebauung	0.03
Lockere, mittelhohe bis hohe Bebauung	1.27
Kompakte, mittelhohe bis hohe Bebauung	0.23
Niedrige Bebauung mit hohem Versiegelungsgrad	1.40

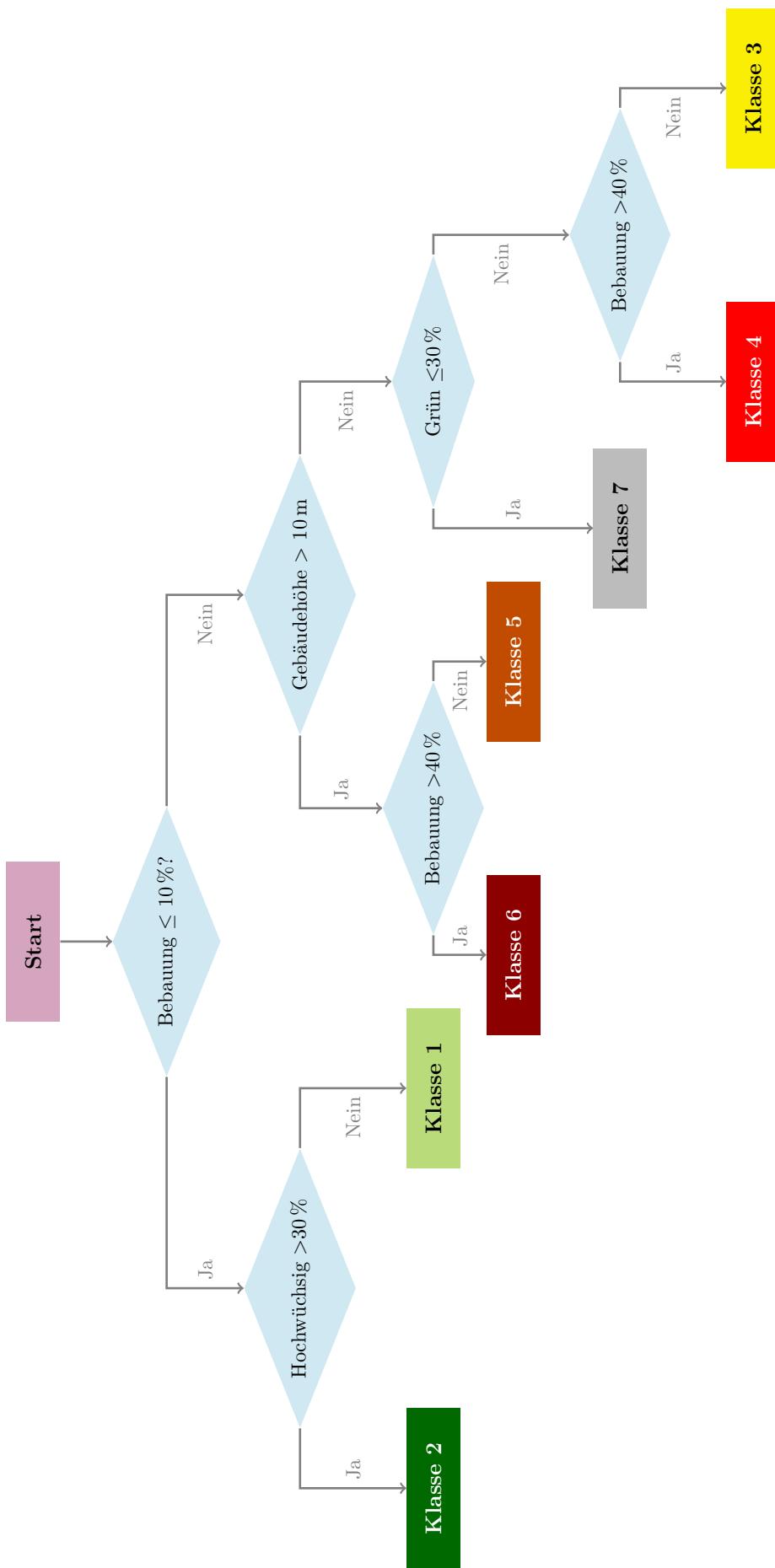


Abbildung 5.2.: Schematische Darstellung zur Methodik der vLCZ (hier: Klassen 1 bis 7).

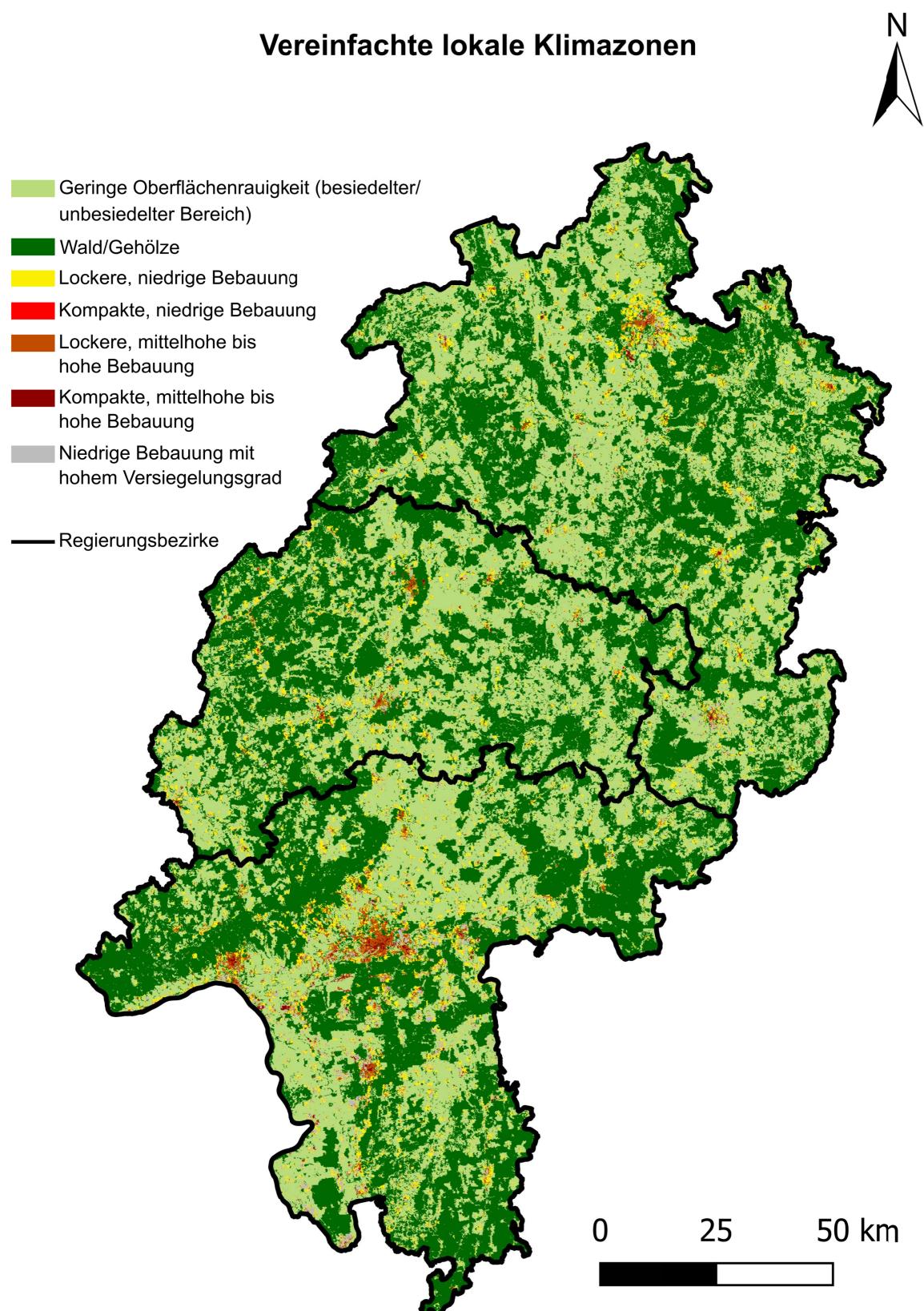


Abbildung 5.3.: Visualisierung der vLCZ für Hessen.

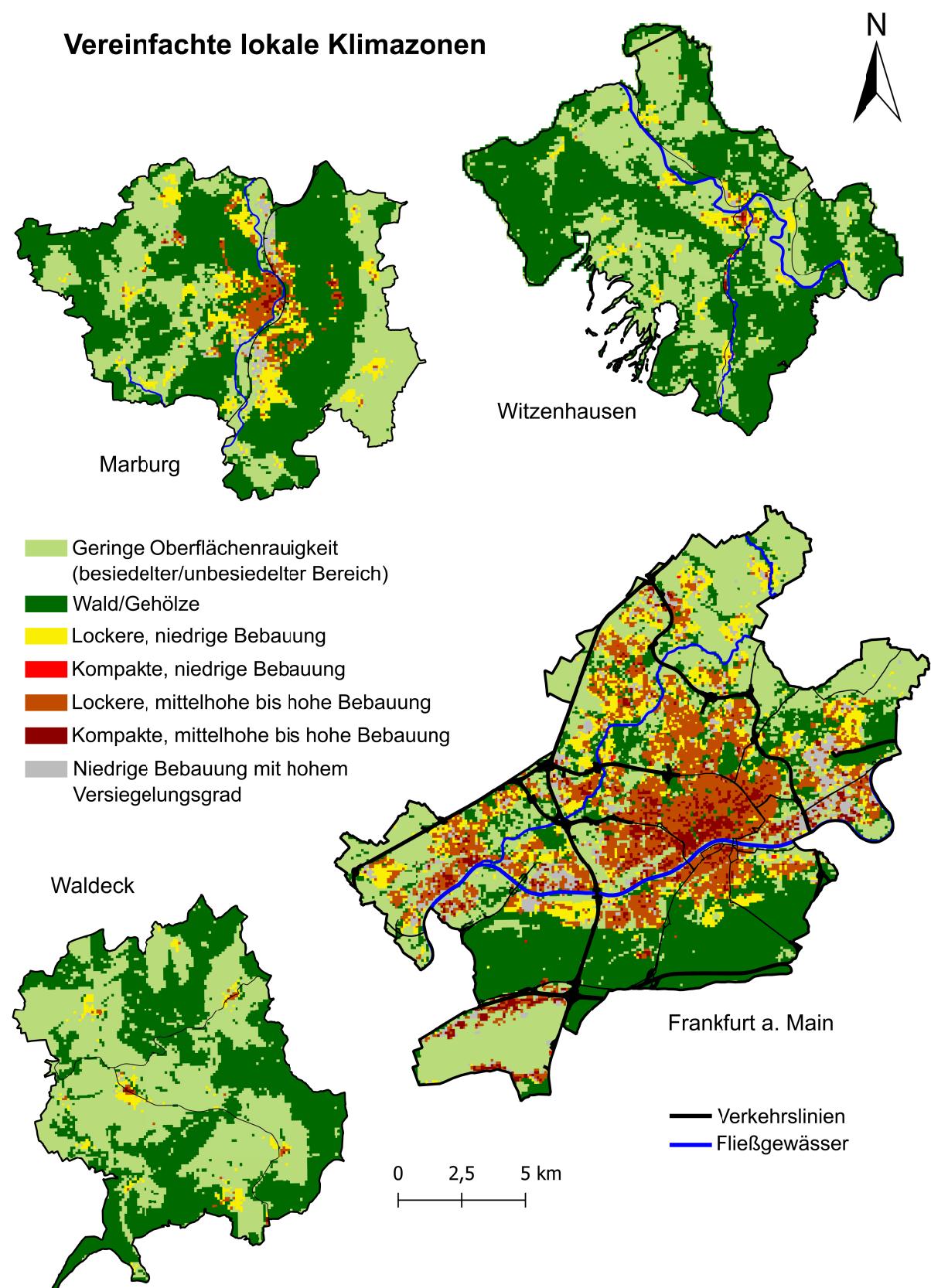


Abbildung 5.4.: Visualisierung der vLCZ für die ausgewählten Gemeinden.

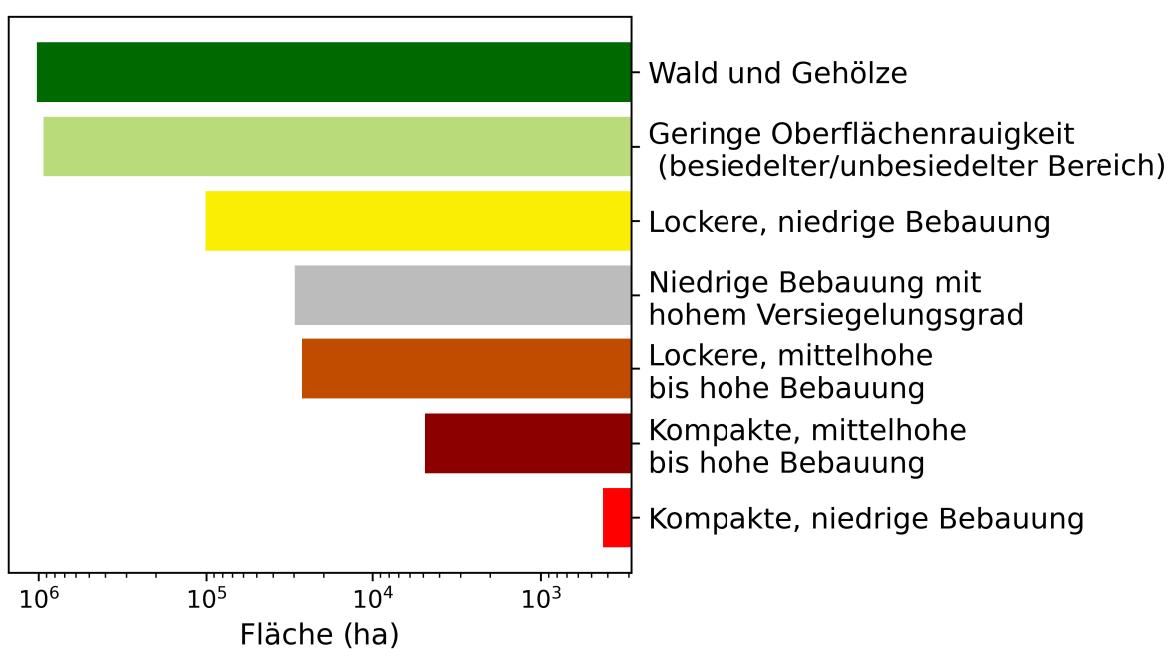


Abbildung 5.5.: Flächenbezogene Verteilung der vLCZ über gesamt Hessen in logarithmischer Skala.

6. Bevölkerung und vulnerable Gruppen

Zur Identifikation priorisierter räumlicher Handlungsschwerpunkte innerhalb der universellen Hot- und Coldspots werden zudem Daten zur Bevölkerungsdichte einbezogen sowie zu vulnerablen Bevölkerungsgruppen. Dies erweitert die in Kapitel 5 beschriebenen Grundlagen zu den vereinfachten lokalen Klimazonen. Die Datengrundlagen zu Bevölkerung und vulnerablen Gruppen sowie deren Verwendung werden nachfolgend näher beschrieben.

6.1. Einleitung

Als vulnerable Gruppen werden Menschen gezählt, die oftmals weniger in der Lage sind, ihre Körpertemperatur effektiv zu regulieren, d. h. hochbetagte, kranke oder sehr junge Menschen. Ein zielführender Ansatz, diese Gruppen zu verorten, ist die Identifikation von entsprechenden Einrichtungen, zu denen insbesondere Kindergärten, Altenheime, Krankenhäuser und Schulen gehören.

Durch die Kombination von universellen Hot- und Coldspots (siehe Kapitel 12) mit der Information über vulnerable Bevölkerungsgruppen und dicht besiedelte Gebiete können die prioritären Handlungsfelder für Klimaanpassungsmaßnahmen präziser definiert werden (siehe Kapitel 14), um damit den Risiken durch Klimaveränderung im Sinne einer Gefährdung, Exposition und Vulnerabilität gerecht zu werden [19, 28, 74]. Gefährdung bezieht sich hierbei auf die Intensität physischer Hitzeeinwirkungen. Exposition impliziert zum einen, dass Menschen in dem betreffenden Gebiet anwesend sein müssen, damit diese überhaupt von der Hitze betroffen sein können, bzw. die Möglichkeit haben, die Gefährdung zu umgehen. Beispielsweise, wenn die Gefährdung am Wohnort besteht. Vulnerabilität bedeutet in diesem Zusammenhang, dass bestimmte Bevölkerungsgruppen eine höhere Anfälligkeit für negative Auswirkungen durch die Hitze aufweisen, wie bspw. ältere oder gesundheitlich eingeschränkte Menschen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein risikobasierter Ansatz, in dem die Gefährdung durch Hitze, die Exposition der Bevölkerung sowie die Vulnerabilität spezifischer Bevölkerungsgruppen berücksichtigt werden, eine fundierte Grundlage für die Identifikation prioritärer Handlungsfelder zur Klimaanpassung bietet. Die Implementierung solcher Maßnahmen ist besonders in urbanen Gebieten von hoher Bedeutung, um die Gesundheit und das Wohlbefinden der Bevölkerung langfristig zu sichern (siehe Kapitel 15).

Um Zielgebiete basierend auf Vulnerabilität und Bevölkerungsdichte (Exposition) zu identifizieren, wird ein rasterbasierter Ansatz genutzt. Zum einen wird die Bevölkerungsdichte und deren Veränderung somit für das gesamte Bundesland darstellbar. Zum anderen können Einrichtungen mit Bezug zu vulnerablen Gruppen über die Dichte innerhalb eines Rasters übersichtlich dargestellt werden.

Bei einer Verbesserung der Datenlage zu kleinräumigen Bevölkerungsstatistiken lassen sich mittels dieses Ansatzes auch amtliche sozio-demografische Daten für Fragen der Klimaanpassung in der Gesamtplanung darstellen. 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. spezifischen Gesundheits- und Sozialdaten, könnte die Genauigkeit und Wirksamkeit der Maßnahmen weiter erhöhen. Nachfolgend werden entsprechend dieser Voraussetzungen die im Projekt genutzten Datensätze beschrieben (siehe Abschnitt 6.2).

6.2. Vorhandene Datensätze

Im Rahmen des Projekts findet die **Bevölkerungsdichte** im 100 m-Gitter Verwendung. Für Landes- und Regionalebene steht derselbe Datensatz in 100 m-Gitterzellen sowie pro Gemeinde zur Verfügung. Die Bevölkerungsdaten zum Zensus 2021 (bzw. pandemiebedingt 2022) sind seit dem Frühjahr 2024 verfügbar und können in Verbindung mit dem Zensus 2011 auch für Veränderungsanalysen verwendet werden [20]. Zudem stehen Daten des Hessischen Statistischen Landesamts (HSL) für eine zukünftige **Einwohnerentwicklung** auf Gemeindeebene zur Verfügung.

Daten zur Lage **vulnerabler Einrichtungen** liegen in unterschiedlicher Form vor. Mögliche Datenquellen sind das HMWVW oder auch benutzergenerierte Daten wie Open Street Map (OSM). Im Projekt werden exemplarisch die amtlichen Daten zu Standorten von Einrichtungen aus dem Point of Interest (POI) Datensatz des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG) verwendet. Diese sind offen zugänglich und werden in einem sechsmonatigen Zyklus aktualisiert [47]. Dies macht sie für gesamtplanerische Fragestellungen interessant. Aus dem Datensatz werden öffentliche Infrastruktureinrichtungen gefiltert, die Standorte von vulnerablen Gruppen darstellen. Die folgenden Einrichtungen lassen sich daraus ableiten, die insbesondere in das Handlungsfeld der Landes-, Regional- und Kommunalplanung einzuordnen sind:

- Kindergärten
- Altenheime
- Schulen
- Krankenhäuser

Bei einer kleinräumigen Analyse ist festzuhalten, dass die POI, wie der Name sagt, als Punktdaten zur Verfügung stehen. Größere Gebäudekomplexe wie Schulen haben mehrere Gebäudeteile, das Ensemble dieser Gebäude wird somit nur durch einen Punkt repräsentiert. Entsprechend werden auch die Gebäudegrößen an sich nicht berücksichtigt. Daher

ist es sinnvoll, für die Klimaanpassung die Dichte der vulnerablen Einrichtungen in einer räumlichen Einheit zu beschreiben. Dies erfolgt im Projekt durch die Anzahl der genannten Einrichtungen pro 100 m-Gitterzelle.

Durch die Verknüpfung von Bevölkerungsdichte und der Lage sowie Dichte vulnerabler Einrichtungen lassen sich Themenkarten für die Klimaanpassungsplanung vorbereiten. Beispielhaft für die verwendeten Datensätze zeigt Abbildung 6.1 die Situation in der Gemeinde Waldeck. Diese stellt die Bevölkerung zum Stand 2022 über die Dichte (Einwohner:in) in den 100 m-Gitterzellen und die Standorte vulnerabler Einrichtungen dar.

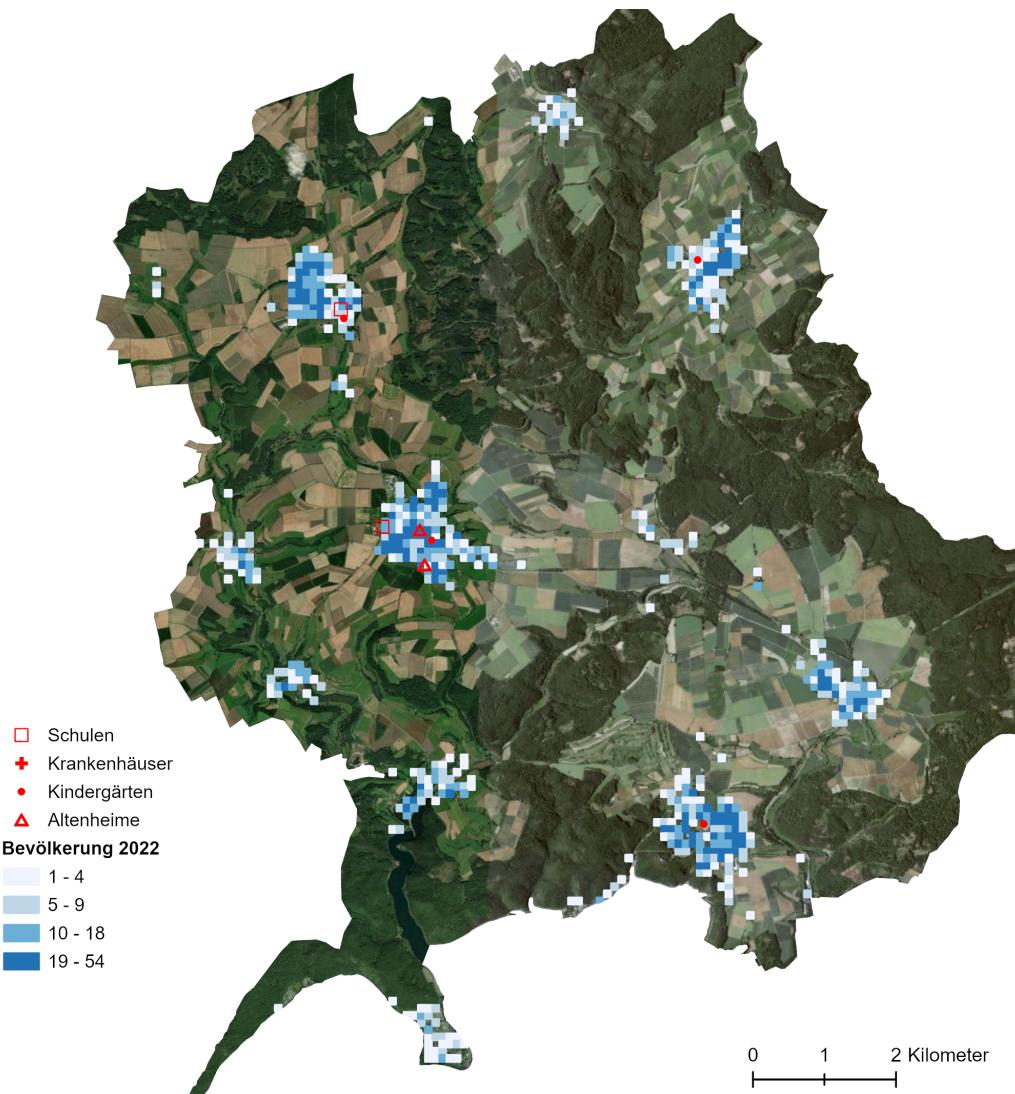


Abbildung 6.1.: Bevölkerung pro 100 m-Gitterzelle zum Stand 2022 und vulnerable Einrichtungen in Waldeck.

Abbildung 6.2 zeigt als Beispiel für einen großstädtischen Kontext die Bevölkerungsverteilung im Jahr 2022, fokussiert auf die Stadt Frankfurt. Abbildung 6.3 zeigt zudem die Standorte von Einrichtungen vulnerabler Gruppen über deren Dichte im 100 m-Gitter.

Ergänzend hierzu zeigt die folgende Abbildung 6.4 die Bevölkerungsveränderung zwischen 2011 und 2022 am Beispiel der Stadt Frankfurt. Diese, wie die hier insgesamt vorgestellten

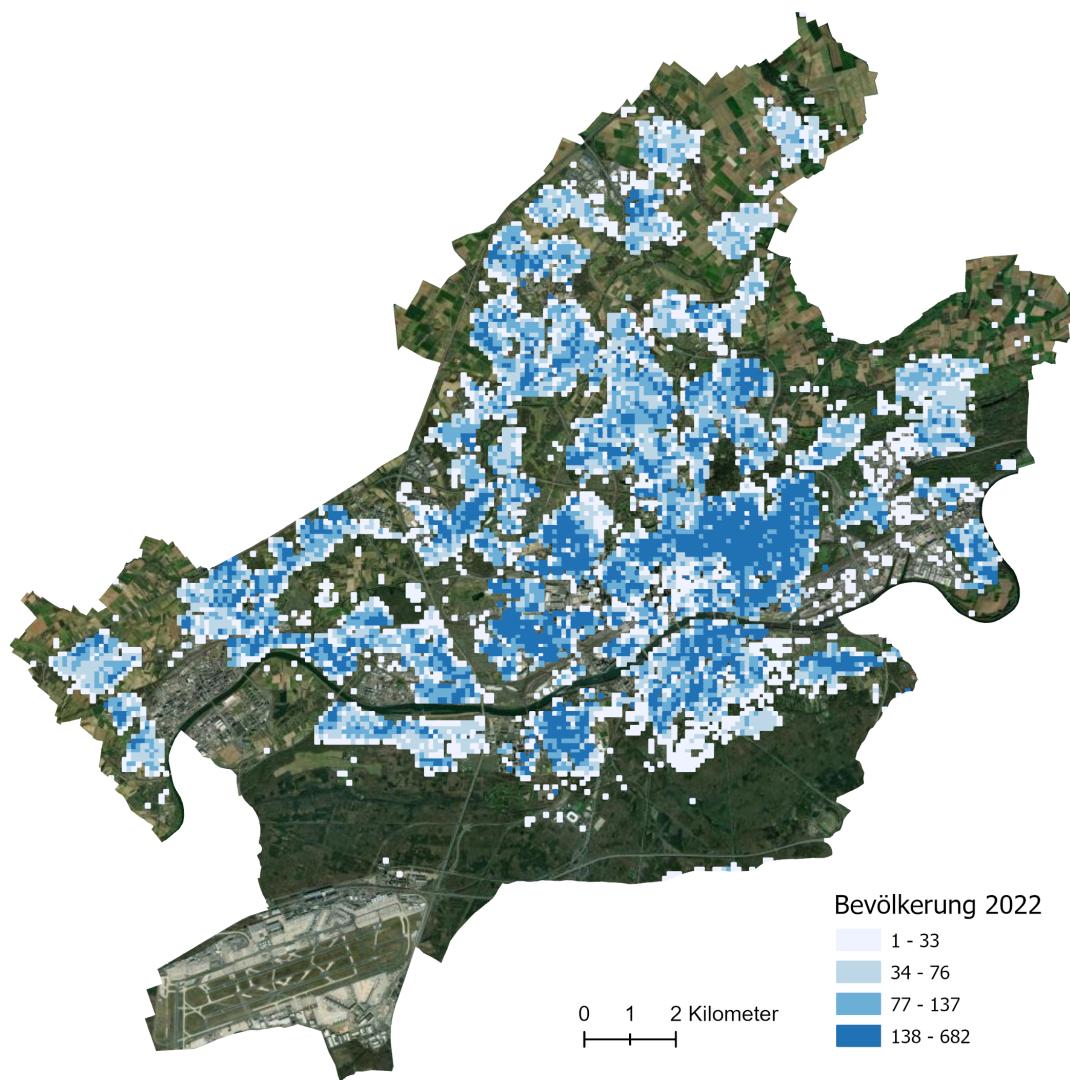


Abbildung 6.2.: Bevölkerungsverteilung in Frankfurt für 2022.

Daten, sind im Projekt aufbereitet und werden für das gesamte Bundesland in der amtlich bereitgestellten 100 m-Auflösung zur Verfügung gestellt.

Die Betroffenheit der Bevölkerung ist auch ein zentraler Aspekt der LWKA. Kapitel 15 widmet sich daher einer detaillierten Gegenüberstellung der Adressaten und verwendeten Datensätze der LWKA im Vergleich zu diesem Projekt.



Abbildung 6.3.: Anzahl vulnerabler Einrichtungen (Kindergärten, Altenheime, Schulen und Krankenhäuser) in Frankfurt (Datenquelle © BKG 2024).

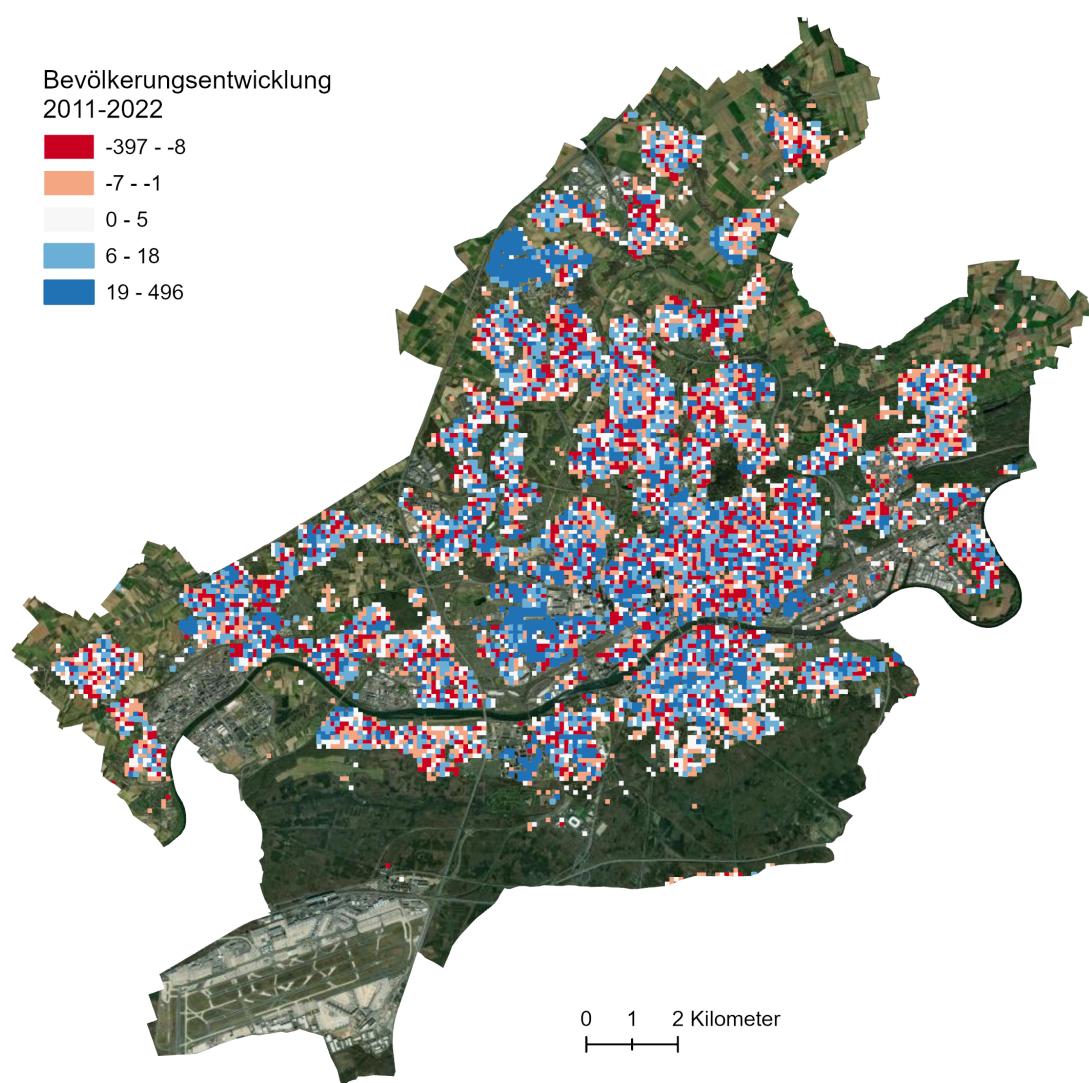


Abbildung 6.4.: Bevölkerungsentwicklung in Frankfurt in absoluten Werten nach Quantilen für 2011 – 2022 nach Daten des Zensus.

7. KI-basierte Klassifikation der Landbedeckung

Nachfolgend werden die Daten sowie daraus entwickelte Themenkarten vorgestellt, die für eine Potenzial- und Defizitanalyse (siehe Kapitel 17) innerhalb der priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkte (siehe Kapitel 14) von Relevanz sind. Von großer Bedeutung für eine Potenzial- und Defizitanalyse ist die Analyse der Landbedeckung. Aus ihr können vielfältige Informationen zur Versiegelung (inklusive Dachflächen) und dem Grün (z. B. Wuchshöhe, Grünvitalität, Grünraumvernetzung, Dachgrün) gewonnen werden.

Auf die Beschreibung entsprechender Daten und daraus erzeugter Themenkarten wird nachfolgend näher eingegangen.

7.1. Allgemeines zum Ansatz

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Ableitung der im weiteren Verlauf wesentlichen Landbedeckungsklassen, mit Fokus auf die Versiegelung und Vegetationswuchshöhen, erläutert.

Für die gesamte Klassifikationsaufgabe wird ein Künstliche Intelligenz (KI)-gestützter Modellansatz verwendet, der auf einem aufgabenspezifisch optimierten, tiefen neuronalen Netz basiert. Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit werden die übergeordneten technologischen Aspekte dieses Ansatzes in einem separaten Exkurs in Kapitel 8 beschrieben.

Dieser Klassifikationsansatz ist in der Lage, sowohl unterschiedliche Versiegelungsklassen (siehe Abschnitt 7.2) als auch Grünflächen-Klassen (siehe Abschnitt 7.4) zu segmentieren, d. h. jedem Pixel des zu klassifizierenden Bildausschnitts eine Bedeutung zuzuweisen. Als eigens behandelter Spezialfall wird die Klassifikation von Hausdächern und FF-PV eingeführt (siehe Abschnitt 7.3). Denn Dächer können entweder als Versiegelung oder als Grünfläche (im Fall von begrünten Dächern) oder als Standort einer existierenden PV-Anlage klassifiziert werden. Zudem gibt es noch den Fall der existierenden FF-PV-Anlagen. Daher wurde für diese Klassen eine individuelle Klassifikationsstrategie entwickelt.

Für alle Klassen müssen Referenzdaten erzeugt werden, anhand derer das KI-Verfahren trainiert und unabhängig getestet werden kann. Die Generierung solcher Daten ist daher von herausragender Bedeutung, sodass in den entsprechenden Unterkapiteln einzeln darauf eingegangen wird. Ebenso spielt die Bewertung der Klassifikationsgenauigkeit anhand

unabhängiger Testdaten eine entscheidende Rolle, da hieraus einerseits die Leistungsfähigkeit und andererseits auch die Übertragbarkeit der Ergebnisse bewertet werden kann.

Die Erzeugung der Ground Truth (GT) (Referenzen) für die UT „Grünflächen“, „Versiegelung“ und „begrünte Dächer“ bzw. „Dächer mit PV“ erfolgt in einem gemeinsamen Ansatz, da die Klassen dieser Segmentierungen einander ausschließen und somit eine gemeinsame Segmentierung keine Nachteile mit sich bringt, sondern tendenziell sogar stabiler ist. Zugunsten der besseren Übersicht wird die Erstellung des jeweiligen Trainingsdatensatzes in den entsprechenden Unterkapiteln erläutert.

Da insbesondere in Ortslagen aber in häufigen Fällen auch in der offenen Landschaft eine räumlich relativ detaillierte Abgrenzung der Versiegelungs- und Grünflächen-Klassen nötig ist, wird als Datengrundlage auf Luftbild-Befliegungen sowie die daraus abgeleiteten Oberflächenmodelle mit $0,2\text{ m} \times 0,2\text{ m}$ Auflösung zurückgegriffen. Dies geschieht prinzipiell für alle drei Planungsebenen (lokal, regional, landesweit). Sofern räumlich stärker generalisierte Aussagen über die Landbedeckung getroffen werden sollen, lässt sich die Klassifizierung problemlos zu größeren Einheiten aggregieren, wie dies später am Beispiel der 100 m-Gitterzellen gezeigt wird.

Hinsichtlich innerörtlicher Freiflächen, die eine Indiz-Funktion für das Vorliegen einer Brachfläche besitzen können, wird keine automatische Segmentierung und Erkennung umgesetzt, da derzeit keine verlässlichen Referenzdaten (Stichwort GT) vorliegen. Insbesondere aufgrund der vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten von Freiflächen in urbanen Gebieten kann keine präzise und objektive Zuordnung zur Klasse „Brachfläche“ erfolgen. D. h. bzgl. dieser Flächen mit Indizfunktion für das Vorliegen einer Brachfläche bedarf es einer Einzelfallbetrachtung.

Abbildung 7.1 zeigt den typischen schematischen Ablauf der Klassifikation von Bild- und Oberflächendaten mit einem tiefen neuronalen Netz. Zur Beschreibung der Funktionsweise und der Implementierung eines solchen KI-Verfahrens wird an dieser Stelle auf Abschnitt 8.1 verwiesen.

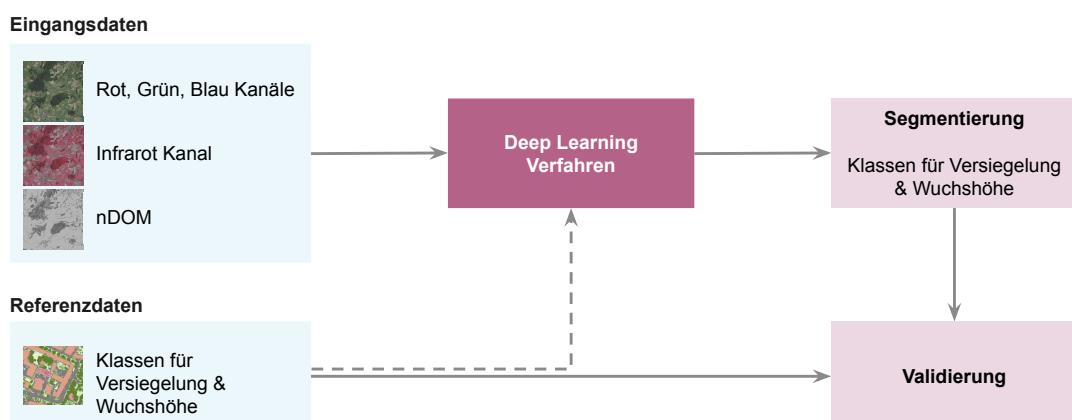


Abbildung 7.1.: Schematische Darstellung des Trainings- und Anwendungsprozesses des KI-basierten Segmentierungsmodells. Die Referenzdaten werden dem KI-Modell nur im Trainingsprozess zur Verfügung gestellt (gestrichelte Pfeil).

Die hier segmentierten Klassen bilden die Grundlage, um nachfolgend eine Vielzahl an Indikatoren zu berechnen (z. B. Grünindikatoren in Kapitel 9). Häufig geschieht dies unter Hinzunahme weiterer Daten mit i.d.R. größerer räumlicher Auflösung, wie z. B. die Berechnung der Vitalität von hochwüchsiger Vegetation unter der Hinzunahme von aktuellen Sentinel-2 Aufnahmen mit 10 m Auflösung (für den normierter differenzierter Vegetationsindex (NDVI)), oder die Berechnung der Grünerreichbarkeit der Bevölkerung unter Einbeziehung von räumlich aggregierten Zensus-Daten. Weitere denkbare Verschneidungen sind u. a. mit Wasserretentionsräumen oder regional bedeutsamen Kaltluftentstehungsgebieten möglich. In Kombination mit den Ergebnissen aus den Themenschwerpunkten Wasser (siehe Kapitel 11) und Temperatur (siehe Kapitel 4) können aus der erstellten Themenkarte dann Informationen zu kühlenden Feuchtgebietsstrukturen (beispielsweise Ufervegetation, Auen) gezogen werden.

Ein längerfristiges Monitoring der Landbedeckung ist grundsätzlich von der Datenverfügbarkeit abhängig und somit vom Zyklus der Befliegungsdaten. Dann muss lediglich das Klassifizierungsmodell erneut angewendet werden. In Bezug auf den Monitoring-Aspekt stellt sich die nötige Rechenkapazität als große Herausforderung dar, sofern solche Daten landesweit erhoben werden sollen. Im Rahmen dieses Vorhabens konnte dies mithilfe einer iterativen Prozessierung auf einer geeigneten Kachelung durchgeführt werden. Die hierfür nötige Kapazität muss für eine spätere Anwendung ebenfalls bereitgestellt werden. Auf der anderen Seite haben Daten mit einer räumlichen Auflösung von 20 cm hervorragende Aussagekraft, sodass der Ressourcenaufwand auch entsprechenden Nutzen erbringt.

7.2. Versiegelungsklassen

7.2.1. Definition der Versiegelungsklassen

Versiegelung kann physikalisch als ein kontinuierlicher Parameter angesehen werden, der zwischen den Extrema „vollversiegelt“ und „unversiegelt“ eine verschieden starke Ausprägung zeigt. Da eine exakt quantifizierbare Bestimmung dieser Ausprägung aus FE-Daten unmöglich ist, alleine schon, weil z. B. die Verdichtung tieferliegender Bodenschichten aus den gängigen Fernerkundungsdaten nicht ermittelbar ist, wurde in diesem Vorhaben eine pragmatische Vorgehensweise für die Definition der Versiegelungsklassen gewählt.

Dieser Ansatz orientiert sich hilfsweise am Arbeitsblatt 138 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) [27], worin sich die Differenzierung der Versiegelung am mittleren Abflussbeiwert orientiert. Das Arbeitsblatt empfiehlt mittlere Abflussbeiwerte zwischen 0,1 und 1 in Abhängigkeit von Flächentyp und Befestigungsart. Beispielsweise besitzt eine feste Fahrbahn einen mittleren Abflussbeiwert von 0,9, wohingegen der mittlere Abflussbeiwert bei Rasengittersteinen je nach Verkehrsbelastung zwischen 0,1 und 0,2 liegt.

Der mittlere Abflussbeiwert entspricht dem über die gesamte Dauer des betrachteten Niederschlagsereignisses gemittelten Verhältnis des Abflussvolumens zum Niederschlags-

volumen und bietet somit einen Anhaltspunkt für die Niederschlagsmenge, die über das Entwässerungssystem abgeleitet wird.

In Orientierung an das o. g. Arbeitsblatt werden im Folgenden die Oberflächen in Abhängigkeit ihres mittleren Abflussbeiwerts gemäß Tabelle 7.1 in folgende Klassen unterteilt:

Tabelle 7.1.: Verhältnis von Abflussbeiwert zu Versiegelungskategorie

Abflussbeiwert	Versiegelungskategorie
1,0 bis 0,7	Vollversiegelte Fläche
0,6 bis 0,1	Teilversiegelte Fläche
0	Unversiegelte Fläche

Die diesen Themenbereich betreffende Aufgabe wird flächendeckend über die Segmentierung bzw. Klassifizierung von Objekten gelöst, die mit den definierten Versiegelungsklassen auf den verschiedenen räumlichen Skalen korrespondieren. Von besonderer Bedeutung für diesen methodischen Ansatz ist das eigentliche Segmentierungsmodell (siehe Kapitel 8), zu dessen Parametrisierung entsprechende Referenz- und Eingangsdaten – gesamtheitlich als Trainingsdaten bezeichnet – benötigt werden.

7.2.2. Erzeugung der Trainingsdaten für Versiegelungsflächen

Für die Erzeugung von Trainingsdaten bezüglich der Segmentierung versiegelter Flächen bietet sich eine Orientierung an den in OSM als Surface-Tag bezeichneten Klassen [83] an. Diese umfassen etwa Klassen wie `paved`, `asphalt`, `chipseal` und `concrete` (vollversiegelt), aber auch `paving_stones`, `sett`, `cobblestone` oder `gravel` und `woodchips` (teilversiegelt).

Für die genannten Klassen sind genaue Beschreibungen und Bildbeispiele verfügbar; zudem sind die Klassen recht deutlich voneinander trennbar.

Eine Einstufung der unterschiedlichen Klassen enthält Tabelle 27.1. Diese ordnet hauptsächlich OSM-Klassen des Surface-Tags unterschiedlichen Versiegelungsarten zu, immer in Bezug auf den Abflussbeiwert. Zur Klasse `Natursteinpflaster` sei darauf verwiesen, dass diese zwar in OSM nicht explizit benannt wird, sie scheint jedoch nach stichprobenartiger Überprüfung in der Untersuchungsregion Frankfurt mit anderen Flächen wie bspw. `grass paver`, `sett` oder `paving_stones` klassifiziert zu werden. Die so erzeugten Referenzdaten liegen als geschlossene Polygone vor und werden mit den Bild- und Oberflächendaten verschnitten, um daraus einen geeigneten Datensatz für Training und Validierung des neuronalen Netzes zu erzeugen.

An dieser Stelle muss festgehalten werden, dass die Beziehung zwischen Versiegelungsklassen, Abflussbeiwerten und den o. g. Objektklassen aus Geofachdaten nur eine Approximation darstellen kann. Eine anderweitige Generierung für Referenzdaten dieser Klassen wäre in geringem Umfang zwar durch „in-situ“ Sonden-Messungen möglich, scheidet für größere Flächen und die Variabilität der Landbedeckung jedoch aus.

Weiterhin muss beachtet werden, dass mittels FE-Methoden lediglich die (sichtbare) Oberfläche analysiert werden kann und daher ein Rückschluss auf physikalische Eigenschaften immer eine Schätzung mit Unsicherheiten darstellt. Ein weiterer Rückschluss auf die Wirkung der Oberfläche, beispielsweise auf konkrete Versickerungseigenschaften, kann daher alleine mittels FE-Methodik nicht realisiert werden.

7.3. Klasse der Hausdächer

7.3.1. Definition unterschiedlicher Hausdächer

Während in vielen photogrammetrischen Arbeiten die Erkennung und 3D-Rekonstruktion der Form der Hausdächer im Vordergrund steht, ist für die vorliegenden Arbeiten v. a. die Wirkung und Funktion der Dächer von Bedeutung. Daher werden grundsätzlich drei Klassen definiert:

- unverbautes Dach
- Dach mit PV-Anlage
- begrüntes Dach

Begrünte Dächer können aufgrund verschiedener Bepflanzungsformen nicht unmittelbar einer Versiegelungsart zugewiesen werden; sie nehmen zudem einen sehr geringen Flächenanteil ein. Aufgrund der geringen Pixelanteile sind sie für das KI-Verfahren sehr herausfordernd zu klassifizieren. 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 dabei als irrelevant angenommen. Zudem wurde in dem Projekt die Dachneigung zur Beschreibung des Flächen-Potenzials für Dachbegrünung nicht betrachtet, da eine solche Auswertung nur in Verbindung mit statischen Erfordernissen sinnvoll und im Rahmen dieses Projekts nicht leistbar ist.

Zusätzlich hat sich in detaillierten Untersuchungen herausgestellt, dass bei der Klassifikation von Dächern ein zweistufiger Ansatz bessere Ergebnisse erzielt. Das bedeutet, dass im ersten Schritt alle Dach-Klassen für eine Weiterverarbeitung aggregiert und in eine einzige übergeordnete Klasse „Dach“ zusammengefasst werden. Die somit zunächst gemeinsam klassifizierten Regionen werden nachfolgend noch einmal speziell auf installierte PV-Anlagen und begrünte Dächer untersucht (Level-2 Verfeinerung). PV-Dächer werden mit einem speziell entwickelten Ansatz detektiert. Dieser ist detailliert in Kapitel 23 beschrieben.

Gleichzeitig kann dieser Ansatz auch FF-PV ermitteln, so dass an dieser Stelle im Bericht den Ergebnissen aus Kapitel 23 vorgegriffen wird und die Klasse FF-PV als elfte Kategorie in der Landbedeckung eingeführt wird.

7.3.2. Erzeugung der Trainingsdaten für Dachflächen

Für die Generierung von Trainingsdaten der Dachflächen wird ebenfalls auf Geofachdaten zurückgegriffen. Hierzu werden als hauptsächliche Informationen die Gebäudegrundrisse entnommen. Zusätzlich können, wie in Tabelle 27.1 gezeigt, auch die Klassen **Kiesdächer**, **Flachdächer** und **Gründächer** aus diesen Daten hinzugenommen werden.

Wiederum liegen die so erzeugten Referenzdaten als geschlossene Polygone vor, sodass sie mit den Bild- und Oberflächendaten verschnitten werden können, um daraus einen geeigneten Datensatz für Training und Validierung des neuronalen Netzes zu erzeugen.

7.4. Klassifizierung von Grünflächen und Gewässern

7.4.1. Definition der Klassen für Grünflächen

Wie in Abschnitt 7.2 und Abschnitt 7.3 erwähnt, erfolgt die Klassifizierung von Grünflächen auf Grundlage des gleichen Segmentierungsmodells. Dies bedeutet, dass auch für diese Aufgabe ein Klassenkatalog definiert und geeignete Trainingsdaten für die Klassifizierung generiert werden müssen.

Für die Einteilung der Wuchshöhen der Vegetation ist neben der räumlichen Auflösung auch die Genauigkeit des Oberflächenmodells von entscheidender Bedeutung. In diesem Zusammenhang muss hier von einem photogrammetrisch durch automatische Bildzuordnungsverfahren generierten Höhenmodell ausgegangen werden. Oberflächenmodelle aus flugzeuggestützten Laserscanning-Aufnahmen würden über Vegetationsflächen typischerweise eine etwas bessere Höhengenauigkeit liefern, allerdings ist der Befliegungszyklus für die hier vorgestellten Anwendungen viel zu groß.

Über Vegetationsflächen mit Sträuchern und Bäumen muss bei einem photogrammetrisch erstellten Höhenmodell mit einer Genauigkeit ausgegangen werden, die deutlich schlechter als die räumliche Auflösung der Bilder ist. Dies gilt insbesondere für kleinere Punktgruppen, wie sie z.B. bei kleinen Baumgruppen oder Einzelbäumen auftreten, weil sich zufällige Fehler der Einzelpunktmessung dann nicht mehr herausmitteln. Dementsprechend wurde für die Klassen der Vegetationswuchshöhe folgende Wertebereiche, wie in Tabelle 7.2 gelistet, festgelegt:

Tabelle 7.2.: Klasseneinteilung der Vegetationswuchshöhe.

Klassenbezeichnung	Höhe
Niedrigwüchsig	0 m bis 0,5 m
Mittelwüchsig	0,5 m bis 2 m
Hochwüchsig	2 m und höher

7.4.2. Trainingsdaten

Die Klassenlabels für die Erzeugung der Referenzdaten für die Klassifizierung der unterschiedlichen Vegetationswuchshöhen- bzw. Grünflächen-Klassen werden wiederum aus Geofachdaten entnommen. Hierbei werden folgende Zuweisungen für die Klasseneinteilung vorgenommen, wobei jeweils die Vegetationswuchshöhe bzw. die Begrünung als weiteres Charakteristikum definiert ist:

Tabelle 7.3.: Klassen für die Segmentierung von Grünflächen in Bezug auf die Vegetationswuchshöhe.

Klassenbezeichnung	Einstufung
Laubwald	Hochwüchsige
Nadelwald	Hochwüchsige
Mischwald	Hochwüchsige
Gehölze	Hochwüchsige
Sukzessions- und Ruderalflächen	Mittelwüchsige
Röhrichte	Mittelwüchsige
Sträucher	Mittelwüchsige
Rasen	Niedrigwüchsige
Wiese	Niedrigwüchsige
Extensives Dachgrün	Gebäudegrün
Intensives Dachgrün	Gebäudegrün
Fassadengrün	Gebäudegrün
Stillgewässer	Gewässer
Fließgewässer	Gewässer

Wie aus Tabelle 7.3 ersichtlich ist, werden zusätzlich zu Grünflächen auch Gewässerflächen klassifiziert. Dies ist in diesem Zusammenhang einfach möglich, da Gewässerflächen naturgegeben keine Versiegelungsflächen sind und sich spektral v. a. im Infraroten sehr gut von Vegetation unterscheiden. Auf die Differenzierungen der Klasse „Gebäudegrün“ wird nachfolgend verzichtet.

Analog zur Abschnitt 7.2 gilt auch für die Klassifikation der Vegetationswuchshöhen, dass die räumliche Auflösung der Segmentierung 0,2 m beträgt. Sie ist grundsätzlich, ggf. durch räumliche Aggregation, auf allen Planungsebenen anwendbar. Die eingangs erwähnten Aspekte der Rechenkapazitäten müssen jedoch beachtet werden.

7.5. Ergebnisse und Bewertung der Klassifikation der Landbedeckung

Die Klassifizierung erfolgt mit dem in Kapitel 8 skizzierten Modell eines tiefen neuronalen Netzes für alle Klassen der Versiegelung, der Grünflächen (inkl. Wasser) und der Hausdächer gemeinsam.

Für eine detaillierte Bewertung wurden Gebiete der Stadt Frankfurt sowie aus einer Reihe weiterer Gemeinden unterschiedlicher Größe und regionaler Lage, darunter Marburg, Waldeck und Witzenhausen, ausgewählt. Aufgrund der größten Intra- und Interklassenvarianz wurden für den Raum Frankfurt manuell Referenzdaten kombiniert mit Luftbildern sehr detailliert digitalisiert, um aussagekräftige numerische Bewertungen der Klassifikation durchführen zu können.

Die Abbildungen 7.2 und 7.3 visualisieren die Landbedeckung in den beschriebenen elf Klassen für die vier ausgewählten hessischen Gemeinden und ganz Hessen in verschiedenen räumlichen Auflösungen.

Zudem zeigt Abbildung 7.4 die Konfusionsmatrix basierend auf unabhängigen Referenzdaten (unbekannter Testdatensatz aus Frankfurt), d. h. die Bewertung, wie gut der Klassifikationsansatz in der Lage ist, die Klassen der manuell erhobenen Referenzdaten zu detektieren und von anderen Klassen zu trennen. Die Werte auf der Hauptdiagonalen geben auf einer Skala von 0 bis 1 an, zu welchen Anteilen segmentierte Klassen und die zugehörigen Referenzdaten übereinstimmen. Für die Klasse „vollversiegelt“ sind dies bspw. 92 %. Für nahezu alle Klassen ergeben sich Werte um oder über 80 %, was insgesamt auf eine gute Klassifikationsgenauigkeit schließen lässt. Die Gesamtgenauigkeit über alle Klassen ergibt sich aufgrund der unterschiedlichen Flächenanteile der Klassen zu 93 %.

Die Einträge in Nebendiagonalelementen geben die Fehlklassifikationen wieder. Auffällig ist, dass diese lediglich für die Versiegelungsklassen und insbesondere die Klasse „teilversiegelt“ eine nennenswerte Größenordnung annehmen. Dies unterstreicht, dass anhand der spektralen Information aus den Bilddaten eine scharfe Abgrenzung zwischen den drei Versiegelungsklassen mit gewissen Unsicherheiten verbunden ist. Hinzu kommt, dass die Klasse „teilversiegelt“ auch zu den Klassen gehört, die in den Referenzdaten eine geringe Anzahl an Pixeln innehalt. Dass der Klassifikator auch eine gewisse Verwechslung zwischen den Klassen „Dach“ und „vollversiegelt“ zeigt (11 %) dürfte u. a. an Ungenauigkeiten des Höhenmodells sowie an der Unterrepräsentation im Referenzdatensatz (Uunausbalanciertheit) liegen.

In Summe können die im unabhängigen Referenzdatensatz erzielten Ergebnisse als zufriedenstellend bewertet werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die Eingangsdaten der Befliegung, insbesondere im Infrarotkanal, nicht kalibriert vorlagen, was vereinzelt zu einer fehlerhaften Klassifikation von Schattenbereichen als Wasserflächen geführt hat.

Nachfolgend werden noch einige weitere typische Ergebnisse anhand ausgewählter Bildausschnitte illustriert und kurz qualitativ bewertet.

Abbildung 7.5 zeigt ein Beispiel ländlicher Umgebung in der Gemeinde Ennerich und eine Flusslandschaft in der Gemeinde Bacharach. Zum Vergleich sind aktuelle Google-Satellitenbilder danebengestellt. Diese Gegenüberstellung ermöglicht einerseits die visuelle Bewertung, dass die meisten Flächenanteile richtig klassifiziert wurden. Sie unterstreicht andererseits auch einige wichtige Aspekte der Bewertung, die grundsätzlich beachtet werden müssen:

So sind die Google-Bilder zu anderen Zeitpunkten als die klassifizierten Luftbilder aufgenommen, was z. B. an den Inselbereichen im Flusslauf zu sehen ist. Weiterhin illustriert das Beispiel Ennerich, dass innerhalb eines bewirtschafteten Feldes ein Übergang der Klassenzugehörigkeit zwischen „unversiegelt“ und „niedrigwüchsig“ zu beobachten ist. Dies liegt offensichtlich an einem leichten Übergang in den Spektralwerten, die typisch für unversiegelten Boden und (sehr) niedrige Vegetation sind. Da beide Klassen jedoch eine hohe Versickerung zulassen, kann eine Verwechslung als weniger kritisch eingestuft werden.

Am Beispiel der Abbildung 7.6, die einen Ausschnitt der Stadt Marburg visualisiert, ist zu erkennen, dass die Klassifikation von Stadtgebieten abgesehen von den auch in der numerischen Bewertung aufgedeckten geringen Unsicherheiten plausible Ergebnisse erzielt. Entlang des Flusslaufs ist zudem ein typisches Phänomen der Luftbildanalyse deutlich zu erkennen: Mittels Luftbildern kann nur die sichtbare Oberfläche klassifiziert werden. So wird die das Ufer überragende Vegetation sehr gut detektiert; eine Ableitung der eigentlichen Uferlinie ist jedoch nicht möglich. Wasserflächen werden daher tendenziell etwas unterschätzt, was sich auch in den leichten Unsicherheiten in der Konfusionsmatrix widerspiegeln kann.

Die Ergebnisbewertung abschließend zeigt Abbildung 7.7 die Möglichkeit einer geostatistischen Analyse basierend auf den Segmentierungsergebnissen. Beispielhaft wurde ein 100 m Gitter zugrunde gelegt, wobei für jede Gitterzelle und schließlich für den Gesamtausschnitt die Flächenanteile der klassifizierten Bildregionen ermittelt wurden (siehe Abbildung 7.7, unten). Dies unterstreicht die Flexibilität des entwickelten Verfahrens, indem die hier gewählten Methoden der bildbasierten Klassifikation nicht nur auf lokaler Ebene, sondern ebenso auf regionaler oder landesweiter Ebene eingesetzt werden können.

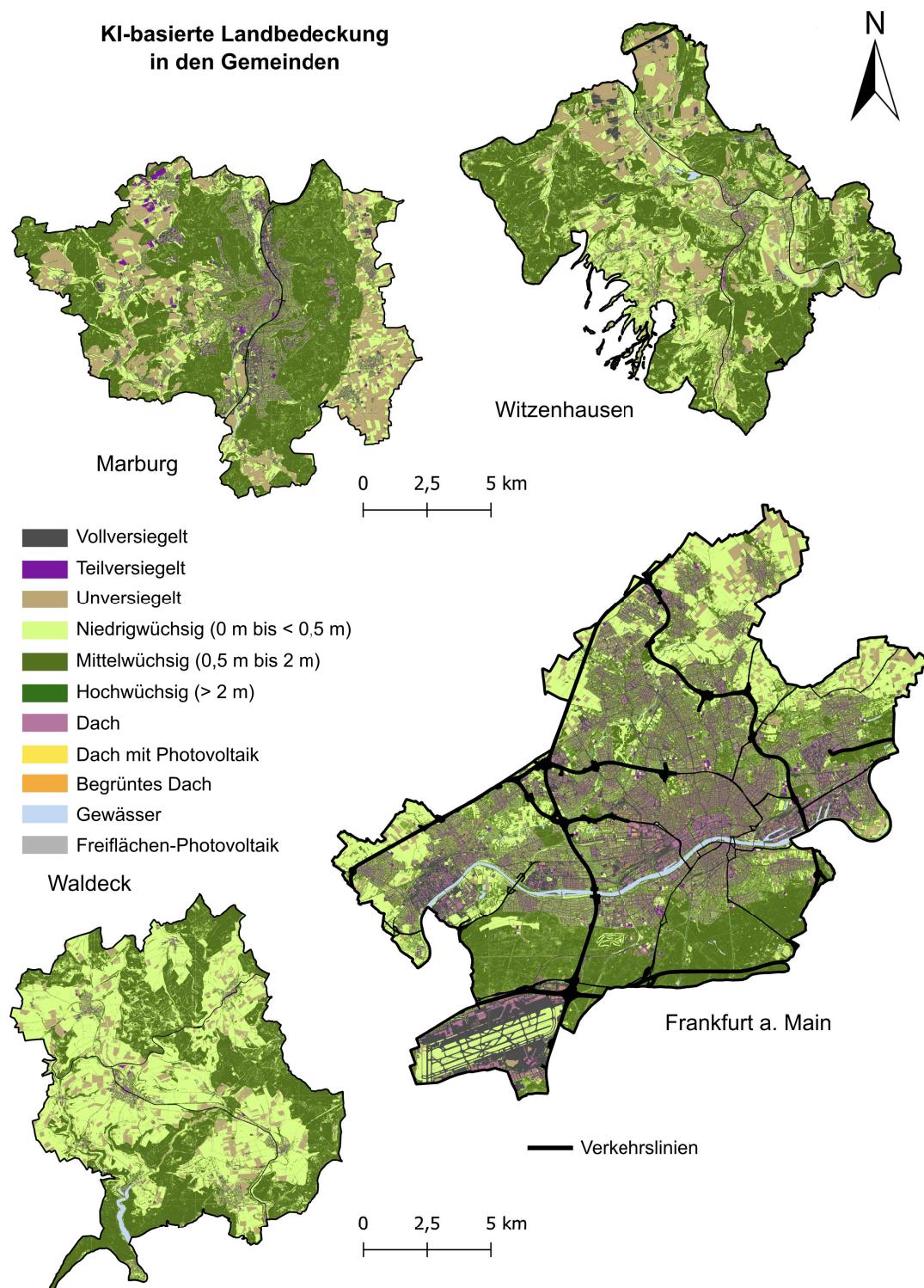


Abbildung 7.2.: Visualisierung der Vegetationswuchshöheklassen und der Versiegelungsklassen für vier Beispielgemeinden. Die Datengrundlage bildet das Ergebnis des Segmentierungsmodells (siehe Kapitel 8) in einer 20 cm × 20 cm Auflösung.

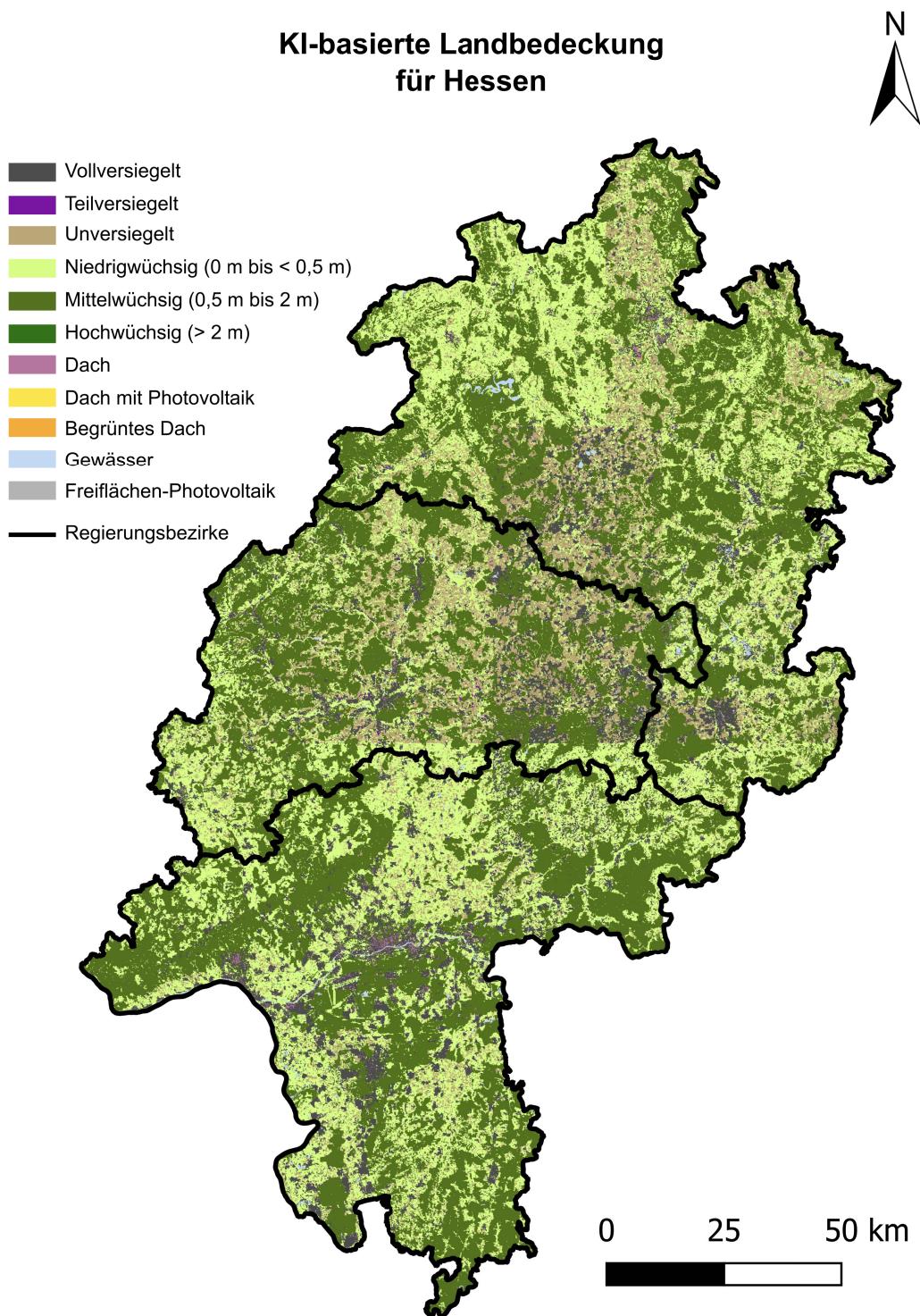


Abbildung 7.3.: Visualisierung der Vegetationswuchshöheklassen und der Versiegelungsklassen für Hessen. Die Datengrundlage bildet das Ergebnis des Segmentierungsmodells (siehe Kapitel 8) in einer $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ Auflösung aggregiert auf die 100 m -Gitterzellen eingefärbt nach der dominierenden Klasse.

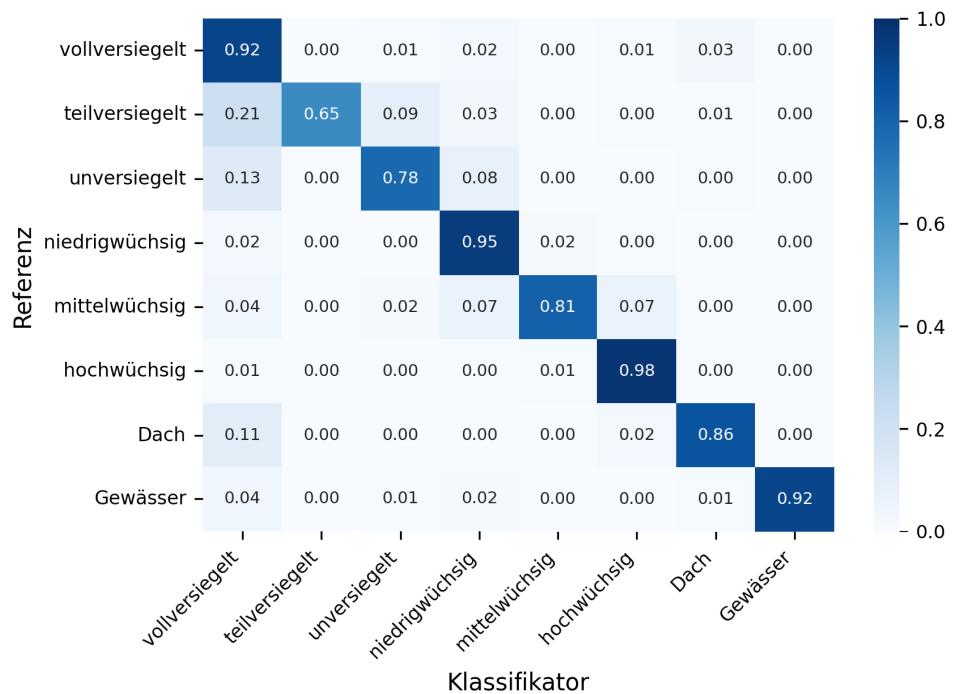


Abbildung 7.4.: Konfusionsmatrix der Landbedeckungsklassifikation des Segmentierungsmodells. Die Werte repräsentieren die Klassifizierungsgenauigkeit für jede Klasse, wobei diagonale Werte die richtigen Klassifikationen darstellen. Dunklere Farben deuten auf höhere Übereinstimmungswerte hin, während hellere Felder eine niedrigere Übereinstimmung anzeigen.

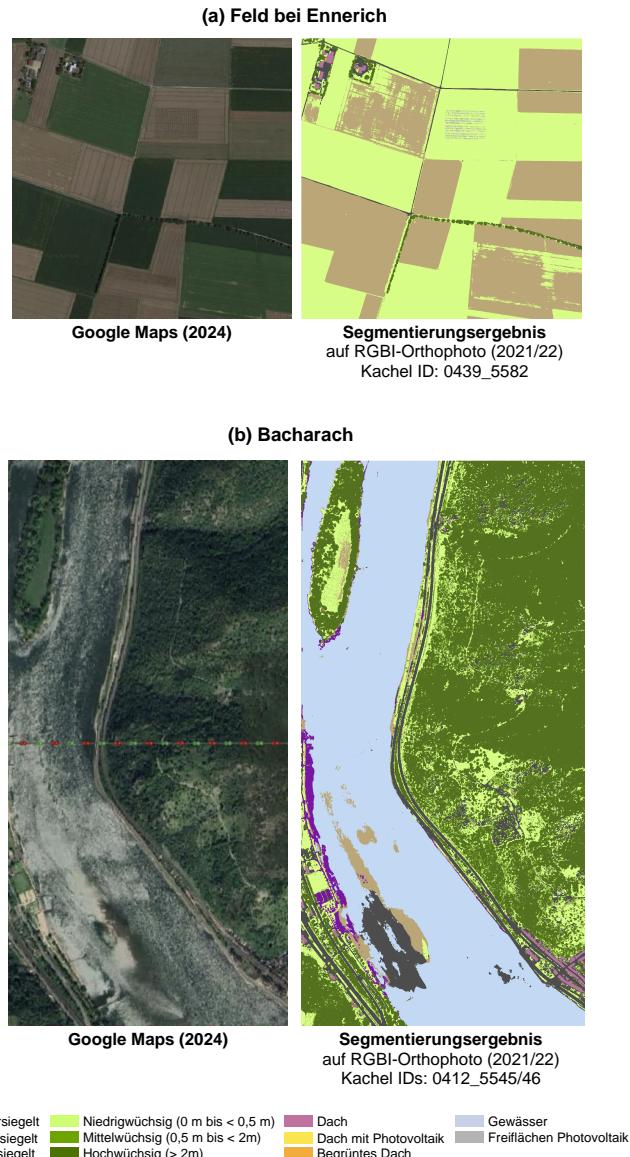


Abbildung 7.5.: Anwendung des Segmentierungsmodells auf drei 1 km × 1 km Beispieldacheln. Oben: Ländlicher Bereich bei Ennerich. Unten: Flussbereich bei Bacharach.

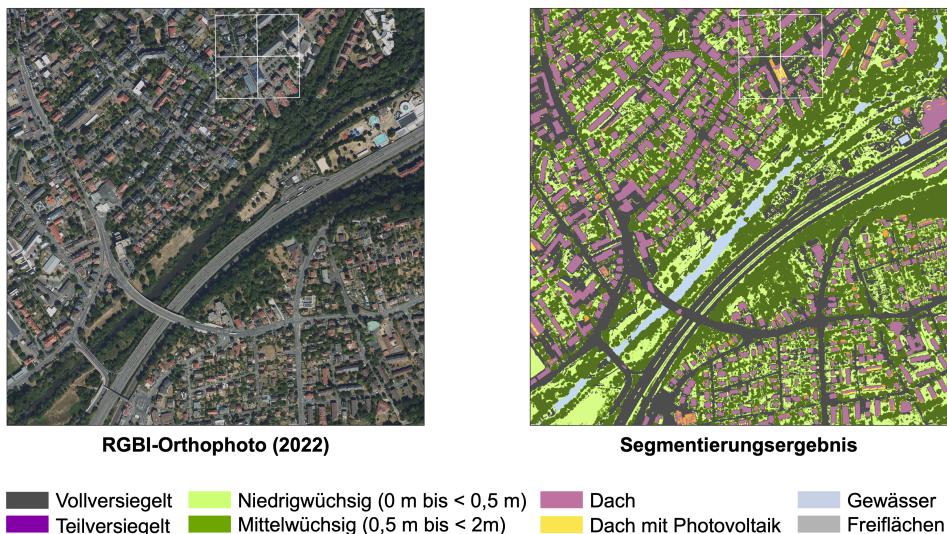


Abbildung 7.6.: Anwendung des Segmentierungsmodells auf eine $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ Beispieldach in Marburg. Die vier weißen Polygone stellen die vier 100 m -Gitterzellen dar, die in Abbildung 7.7 genutzt werden.

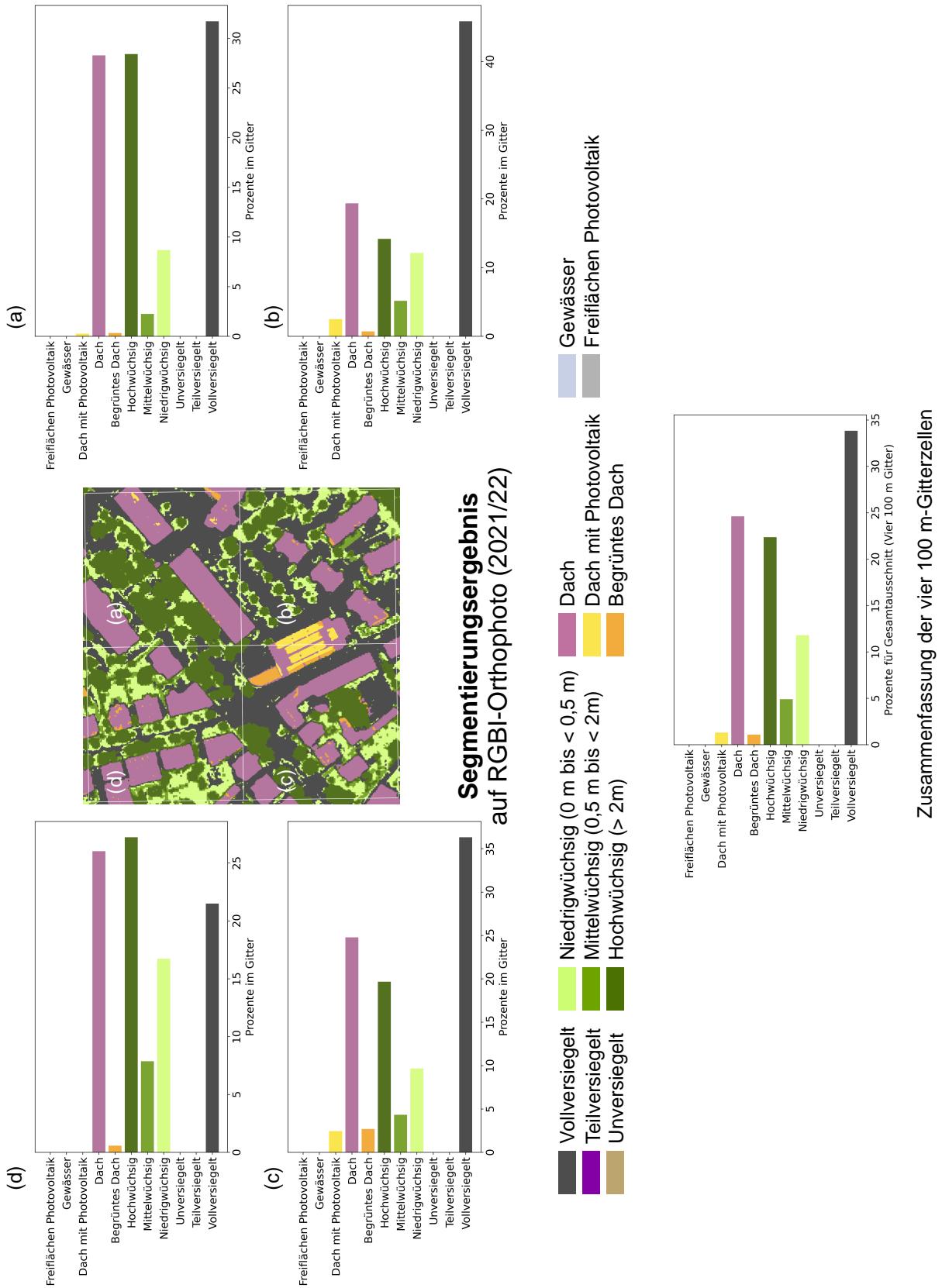


Abbildung 7.7.: Beispiel für einer geostatistischen Analyse basierend auf den Ergebnissen des Segmentierungsmodells für vier 100 m-Gitterzellen (oben) und die Summe aus den vier 100 m-Gitterzellen (unten).

8. Exkurs zum Segmentierungsmodell auf fernerkundlichen Eingangsdaten

8.1. Funktionsweise des Modells

Eine der wesentlichen Herausforderungen der automatischen Analyse von Fernerkundungsdaten besteht darin, Bildausschnitte mit Semantik zu versehen und sie zu interpretieren. Die technische Automatisierung dieser Aufgabe wird hier mit Verfahren der KI gelöst, das heißt mittels einer sogenannten datengetriebenen semantischen Segmentierung. Das Ziel einer semantischen Segmentierung von Bildern besteht darin, jedem Pixel eines Eingangsbildes eine entsprechende Klassenzugehörigkeit zuzuordnen, wobei bei sogenannten überwachten Verfahren, wie sie auch hier eingesetzt werden, die Klassen vorher definiert sein müssen. Eine weitere Voraussetzung ist, dass ein grundlegendes mathematisch-stochastisches Modell vorgegeben werden muss, welches den Zusammenhang zwischen den Spektraldaten der Fernerkundung inklusive deren räumlicher Muster und der jeweiligen Klassenzugehörigkeit herstellt. Auf Basis von Trainingsdaten, das heißt Bildausschnitten, deren Klassenzugehörigkeit vorab manuell bestimmt bzw. über Referenzdaten zugeordnet wurde, müssen die Modellparameter mittels Schätzverfahren so angepasst werden, dass sie sowohl die Klassenzugehörigkeiten der Trainingsdaten als auch von unabhängigen Testdaten, die nicht zum Training verwendet wurden, bestmöglich reproduzieren können. Ziel ist, dass das Modell einerseits so gut generalisiert, dass die Klassenzugehörigkeiten unbekannter Bildausschnitte sicher identifiziert werden können, andererseits aber auch so spezifisch ist, dass die Klassengrenzen klar definiert sind. Leistungsfähige und flexible Modelle können mit mehreren Millionen an freien Variablen parametrisiert sein, deren gegenseitige Abhängigkeiten in einer vorzugebenden Architektur definiert werden. Entsprechend aufwändig und wohlüberlegt muss der Trainingsprozess gestaltet werden, um Generalisierungsfähigkeit und Spezialisierung bestmöglich auszubalancieren.

Die Architektur kann prinzipiell beliebig gewählt werden, es haben sich für die Segmentierung von Bilddaten jedoch bestimmte Architekturen von neuronalen Netzen (und speziell Faltungsnetzen, sogenannten Convolutional Neural Networks (CNN)) als besonders leistungsfähig herausgestellt. Diese basieren i.d.R. auf einer Encoder-Decoder-Architektur (siehe beispielsweise Abbildung 8.1):

Der Encoder dient zur Extraktion von Merkmalen. Hier wird die räumliche Auflösung des Eingabebilds schrittweise reduziert und gleichzeitig Merkmale durch sogenannte Convolution- und Pooling-Schichten des Netzes extrahiert. Beim Training werden die

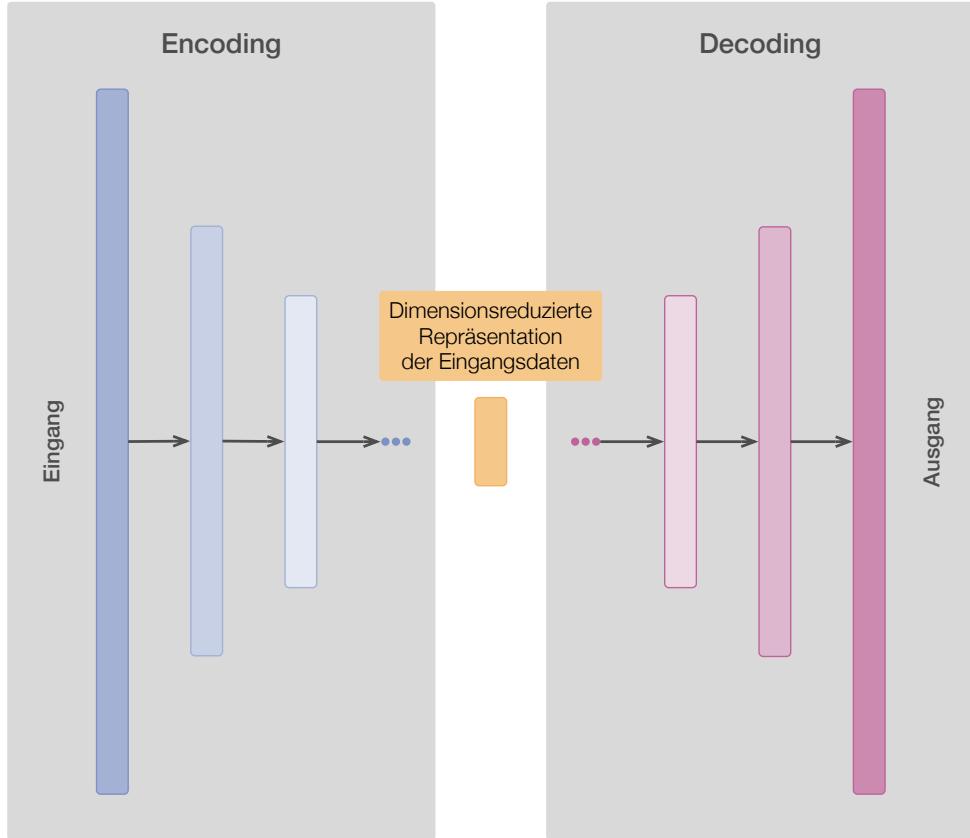


Abbildung 8.1.: Schematische Darstellung eines Encoder-Decoders. Entnommen aus [50].

Parameter iterativ angepasst, sodass in den Faltungsschichten geeignete Filtermasken gelernt werden. Durch den Einsatz von Pooling-Schichten wird ein Lernen von Filtermasken über verschiedene Auflösungen (das heißt Levels im Maßstabsraum) realisiert, indem die Information der vorherigen Schichten sukzessive zusammengefasst wird. Somit kann nicht nur die Spektralinformation (mehrere Bänder) eines Pixels, sondern auch die Kontextinformation der benachbarten Bildbereiche für die Klassifizierung genutzt werden. Die Gesamtstruktur des Encoders hat letztlich die Aufgabe, die in der hohen Auflösung vorhandene Information auf die für die Klassifikation wesentlichen Größen zu reduzieren.

Der Decoder dient dazu, die durch den Encoder gespeicherten Informationen wieder auf die räumliche Auflösung des Originalbildes zu projizieren, um eine Segmentierungskarte zu erstellen. Dieses „Hoch-Sampeln“ geschieht auch auf Basis einer Netzarchitektur mit zu lernenden Parametern, die häufig spiegelsymmetrisch zur Encoder-Architektur definiert ist. Das bedeutet, dass die Upsampling-Schichten als Invertierung der Pooling-Schichten des Encoders aufgefasst werden können, womit die Auflösung wieder schrittweise verfeinert wird. Nachfolgende Faltungsschichten erlauben dabei, die räumliche Umgebung der Pixel jeweils zu integrieren.

Ein prominenter Vertreter dieser Architektur ist das „U-Net“. Das U-Net [71] basiert auf einem vollvernetzten CNN mit einer Folge von Convolution-, Pooling- und Upsampling-Schichten. Das U-Net ergibt sich aus der Encoder-Decoder-Architektur mit zusätzlichen Verbindungen zwischen identischen Maßstabsebenen des Encoders und Decoders, welche

dazu dienen, die Segmentierungsergebnisse insbesondere an den Objektkanten in ihrer räumlichen Genauigkeit zu verbessern. Insgesamt kann das U-Net somit lokale Informationen effektiv erfassen und gleichzeitig semantische Informationen auf hoher Ebene beibehalten, wodurch es sich gut für Aufgaben eignet, die eine präzise Klassifizierung oder Segmentierung auf Pixelebene erfordern.

Verfeinerungen der U-Net-Architektur finden sich beispielsweise in den Varianten der DeepLabV3 bzw. DeepLabV3+ Netze [22]. Diese basieren ebenfalls auf einer Encoder-Decoder-Architektur, führen jedoch gezielt weitere Verbindungen zwischen Encoder und Decoder ein, die hauptsächlich dem Zweck dienen, sowohl große und weitläufige Objekte als auch kleine und sehr detailreiche Objekte sicher klassifizieren zu können.

Eine Weiterentwicklung der beschriebenen Modellansätze findet sich in der DenseNet-Architektur [41]. Basis stellt ebenfalls ein CNN dar, welches „dense connections“ zwischen den einzelnen Layern aufweist.

Für die Lösung der Segmentierungsaufgaben, die bereits in Kapitel 7, 9 und 23 thematisiert wurden, werden verschiedene CNN-Architekturen implementiert, um das eine Modell zu finden, welches die Aufgaben mit entsprechender Genauigkeit lösen kann. Derartige Modellansätze benötigen für das Training ausreichend viele und gute Trainingsdaten. Diese Daten wurden eigens für die Aufgaben manuell aus heterogenen Datenquellen fusioniert und generiert.

8.2. Erzeugung der Trainingsdaten

Für die Erzeugung der Trainingsdaten für das Segmentierungsmodell wurde der Raum Frankfurt am Main (Stadt) gewählt. Dieser Bereich bietet einige Informationen, die für die Erzeugung der Trainingsdaten sehr wertvoll sind. Gleichzeitig werden auf kleinem Raum sehr viele verschiedene Typen der gewünschten Klassen in ausreichendem Umfang abgedeckt. So finden sich in Frankfurt nicht nur einzelne Bäume, sondern auch größere Waldstücke mit Laub-, Misch- und Nadelwald. Weiterhin gibt es neben Parks und Kleingartenanlagen sowie Gärten auf Privatgrundstücken auch Flächen mit Grünland. Diese Vielfalt an Eingangsdaten ist für eine stabile Segmentierung sehr wichtig. Je vielfältiger die Eingangsdaten sind, desto zuverlässiger segmentiert das Modell am Ende. Mit 20 cm Pixelgröße ist die räumliche Auflösung sehr hoch, was ein Grund für die lange Dauer der Vorverarbeitung ist.

Alle verwendeten Daten finden sich mit ihrer Quelle in der nachfolgenden Aufzählung:

- Digitales Geländemodell (DGM) und Digitales Oberflächenmodell (DOM) (Hessische Verwaltung für Bodeninformation und Geoinformation (HVBG))
- rot, grün, blau und infrarot (RGBI)-Orthofotos (HVBG)
- Biotopkartierung Frankfurt (Stadt Frankfurt am Main)
- Hausumringe (HVBG)
- Amtliches Topographisch Kartographisches Informationssystem (ATKIS) (HVBG)
- OSM-Daten (OSM)

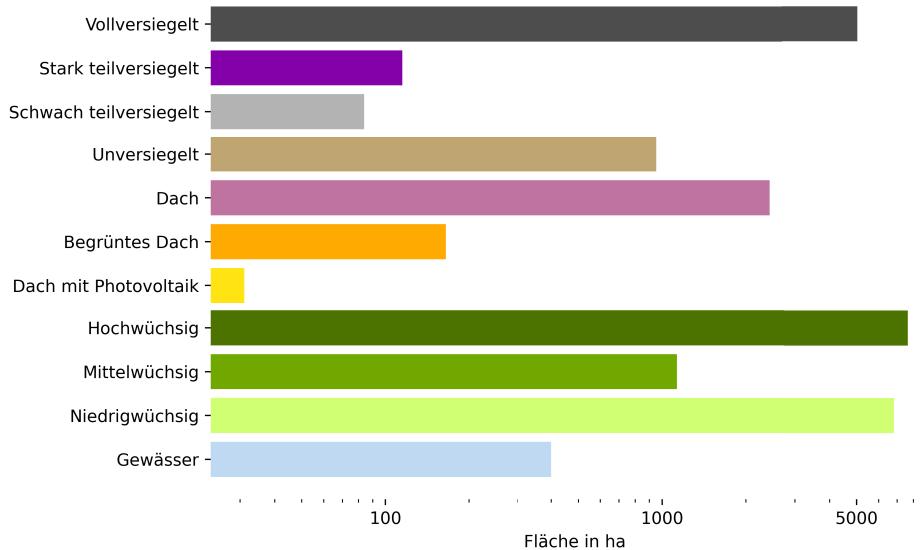


Abbildung 8.2.: Flächenstatistik der Trainingsdaten für die Segmentierung von innerörtlicher Versiegelung und Grünflächen. Die Fläche ist in Hektar auf einer logarithmischen Skala dargestellt.

- Grünflächenkataster (Stadt Frankfurt am Main)
- Baumkataster (Stadt Frankfurt am Main)

Abbildung 8.2 zeigt die durch die unterschiedlichen Klassen bedeckte Fläche als Beispiel einer Statistik für Frankfurt (hier: ohne die Detailklassen der Dächer).

Diese Basisinformationen wurden aufbereitet (beispielsweise Auswahl nach Attributen), umgewandelt (beispielsweise Berechnung von NDVI), umformatiert (Vektor zu Raster), in Kacheln geschnitten und nach festgelegter Gewichtung zusammengeführt. Das Ergebnis sind die nun fertiggestellten Trainingsdaten, die sowohl für die Segmentierung der in Kapitel 9 als auch für die in Kapitel 7 beschriebenen Klassen Anwendung finden werden, da die Anforderungen der beiden UT sich nicht überschneiden, sondern ergänzen.

9. Blau-Grüne Indikatoren

Blau-Grüne Indikatoren stellen zentrale Instrumente zur Bewertung der ökologischen und klimatischen Funktionen von Städten und Regionen dar. Sie spielen daher auch eine wesentliche Rolle bei der Potenzial- und Defizitanalyse in räumlichen Handlungsschwerpunkten der Klimaanpassung (vgl. Abb. 3.1). Die zugrunde liegenden Daten sowie die daraus abgeleiteten thematischen Karten werden im Folgenden näher erläutert.

Besonders in urbanen Gebieten tragen Vegetations- und Wasserflächen wesentlich dazu bei, thermische Belastungen zu reduzieren, Kühlungseffekte zu erzeugen und CO₂ zu speichern. Vegetationsflächen wirken durch Verdunstung, Schattenwurf und Luftzirkulation kühlend, während Wasserflächen als natürliche Wärmesenken die Umgebungstemperatur reduzieren können [44]. Darüber hinaus leisten sie durch ihre CO₂-Bindung und Sauerstoffproduktion einen entscheidenden Beitrag zur Klimaregulation. Gleichzeitig tragen diese Flächen auch zur Erhaltung der Biodiversität bei. Einen Überblick über Studien zur Effektivität der Kühlung durch Grünflächen unterschiedlicher Größe zeigen Aram et al. (2019) [4]. Hierbei wird deutlich, dass die Form und auch der räumliche Zusammenhang der Flächen von Bedeutung sind [4]. Diese Aspekte wirken sich auf die thermische Belastung vorwiegend im städtischen Raum aus (siehe Kapitel 4, 10, 13 und 17).

Die in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellten Indikatoren sind speziell ausgewählt, um diese Funktionen zu quantifizieren und räumlich zu visualisieren. Sie adressieren die thermische Belastung als Folge von städtischen Hitzeinseln, die Fähigkeit von Vegetation und Wasserflächen, Kühlungseffekte zu generieren, sowie die Bindung von Kohlenstoff als Maß für die Nachhaltigkeit. Die Blau-Grünen Indikatoren können hinsichtlich ihrer Aussagekraft und Fähigkeit zum Beitrag für diese Aspekte betrachtet werden.

Tabelle 9.1 zeigt eine Auswahl an Blau-Grünen Indikatoren, die u. a. im Forschungsprojekt berechnet und hinsichtlich ihrer Bedeutung für thermische Belastung, Kühlungseffekte und CO₂-Speicherung untersucht wurden. Diese Indikatoren spielen eine Schlüsselrolle in der Klimaanpassung und ermöglichen eine fundierte Bewertung der ökologischen und klimatischen Funktionen urbaner und ländlicher Räume.

So hebt sich beispielsweise der NDVI (siehe Abschnitt 9.1.1) durch seine Fähigkeit hervor, die Vitalität und Dichte von Vegetation zu messen, und bietet wertvolle Informationen über thermische Belastungen sowie die CO₂-Bindungskapazität. Die Grünausstattung (siehe Abschnitt 9.1.2) beschreibt die Verteilung und den Anteil von Grünflächen, was insbesondere für die Identifikation von Defiziten in der städtischen Begrünung von Bedeutung ist. Als dreidimensionaler Indikator liefert das Grünvolumen (siehe Abschnitt 9.1.3) wichtige Erkenntnisse über die Höhe und Dichte der Vegetation und zeigt direkte Zusammenhänge mit Kühlungseffekten und CO₂-Bindungskapazität auf. Einen spezifischen

Indikator repräsentiert die Primärproduktion, engl. Gross Primary Production (GPP) (siehe Abschnitt 9.1.4). Dieser Indikator misst die Kohlenstoffaufnahme durch Photosynthese und stellt daher die Produktivität und Klimarelevanz der Vegetation direkt dar. Ergänzend dazu adressiert die Wassererreichbarkeit (siehe Abschnitt 9.3.1) als blauer Indikator die räumliche Verteilung und den Anteil von Wasserflächen, die entscheidend für Kühlungseffekte und die thermische Entlastung sind.

Diese ausgewählten Indikatoren (siehe Abschnitt 9.1 und Abschnitt 9.3) werden für die weiteren Analysen in Kapitel 12, 14 und 17 exemplarisch herangezogen. Weitere im Vorhaben gerechnete Indikatoren finden sich in Abschnitt 9.2.

Tabelle 9.1.: Übersicht zu den im Forschungsprojekt berechneten Blau-Grünen Indikatoren. Hierbei bedeutet: + gering ++ mittel +++ hoch. Leere Zellen definieren, dass für diesen Indikator in der gegebenen Kategorie keine Aussage getroffen werden kann.

Blau-Grüne Indikatoren	Thermische Belastung	Kühlung	Wasser- & CO ₂ -Speicherung	Planungsebene(n)
Ausgewählte Indikatoren				
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	+	+++	+++	lokal bis landesweit
Grünausstattung	++	++	+	lokal bis landesweit
Grünvolumen	+	++	+++	lokal bis landesweit
GPP (Gross Primary Product)			+++	regional & landesweit
Weitere Indikatoren				
DSWI (Disease Water Stress Index)	+	+++	+++	regional & landesweit
Grünraumvernetzung	+++	++	++	lokal bis regional
Grünraumerreichbarkeit	+++	+	+	lokal
Blauer Indikator				
Wassererreichbarkeit	+++	+++	+++	lokal

9.1. Ausgewählte Grünindikatoren

In diesem Abschnitt werden die ausgewählten Grünindikatoren vorgestellt, die für die weiterführenden Analysen von zentraler Bedeutung sind (siehe im Bericht z. B. Kapitel 12

bis 14). Diese Indikatoren sind gezielt ausgewählt worden, da sie durch ihre hohe Variabilität hinsichtlich der räumlichen Auflösung und ihrer Relevanz als Messgrößen für thermische Belastung, Kühlungseffekte sowie Wasser- und CO₂-Speicherung besonders geeignet sind. Sie ermöglichen eine fundierte Bewertung der ökologischen und klimatischen Funktionen von Grünflächen und liefern eine Grundlage für die Identifikation von Handlungsschwerpunkten in der Stadt- und Landschaftsplanung.

9.1.1. NDVI

Der **NDVI** repräsentiert einen wichtigen Indikator, der aus FE-Daten (meist: Satellitendaten) gewonnen wird, um die Gesundheit und Dichte von Pflanzen zu bewerten. Er basiert auf der Reflexion von Licht in verschiedenen Wellenlängenbereichen: Gesunde, chlorophyllreiche Pflanzen reflektieren stark im nahen Infrarotbereich (NIR) und deutlich weniger im roten sichtbaren Bereich (ROT). Eine große Differenz zwischen NIR und ROT, auch „rote Kante“ genannt, kennzeichnet somit gesunde und dichte Vegetation. Bei kranken oder spärlich wachsenden Pflanzen ist die „rote Kante“ hingegen deutlich geringer ausgeprägt.

Die Berechnung erfolgt nach folgender Gleichung:

$$NDVI = \frac{NIR - ROT}{NIR + ROT}$$

Vorzugsweise wird der NDVI für die Zeit der Vegetationsphase bestimmt (d. h. von Ende Mai bis September).

Der NDVI bietet eine Vielzahl an wertvollen Informationen über die Vegetation. So weisen hohe NDVI-Werte nahe +1 bzw. im Bereich von 0,6 bis 0,9 auf gesunde, dichte Vegetation mit hoher Photosyntheseaktivität hin, während niedrigere Werte oft gestresste oder geschädigte Vegetation anzeigen. Oberflächengewässer verfügen über einen minimalen NDVI von –1. Zudem ermöglicht der NDVI die Differenzierung zwischen dichter Vegetationsbedeckung und Bereichen mit geringer oder fehlender Pflanzendecke. Darüber hinaus können mithilfe von NDVI-Daten zeitliche Veränderungen in der Vegetationsdichte und -gesundheit beobachtet werden, etwa zur Identifikation von Dürreperioden oder Erntezyklen.

Im Forschungsprojekt ist der NDVI aus Sentinel 2 Level 2 Daten der Sommermonate der Jahre 2018 bis 2022 berechnet worden. Dies ist naheliegend und sinnvoll, da zum einen eine mit 10 m recht hohe räumliche Auflösung und zum anderen mit circa 2 bis 3 Aufnahmen pro Woche eine sehr hohe zeitliche Wiederholrate gegeben ist. Die Ergebnisse der NDVI-Berechnung werden für alle räumlichen Ebenen (lokal, regional und landesweit) als Mittelwert über die Sommermonate von 2018 bis 2022 vorgestellt (siehe Abbildungen 9.1 und 9.2).

Abbildung 9.1 visualisiert den mittleren NDVI für Hessen. Der Grünton spiegelt die Vegetationsdichte wider, wobei dunklere Grüntöne eine höhere Pflanzenbedeckung und -

gesundheit anzeigen. Die Daten ermöglichen eine umfassende Analyse der Vegetationsverteilung in Hessen, wobei die besonders dichte Vegetation in den waldreichen Gebieten im Norden und Osten hervortritt. Urbane und landwirtschaftlich genutzte Flächen sind durch niedrigere NDVI-Werte gekennzeichnet.

Abbildung 9.2 zeigt beispielhaft den mittleren NDVI für die Gemeinden Marburg, Wittenhausen, Waldeck und Frankfurt am Main. Verkehrs- und Fließgewässerlinien sind zur leichteren Orientierung ergänzend dargestellt, um die Landschaftsstruktur hervorzuheben. Es wird deutlich, dass ländlich geprägte Gebiete wie Waldeck eine höhere Vegetationsdichte aufweisen als urbane Gebiete wie Frankfurt am Main.

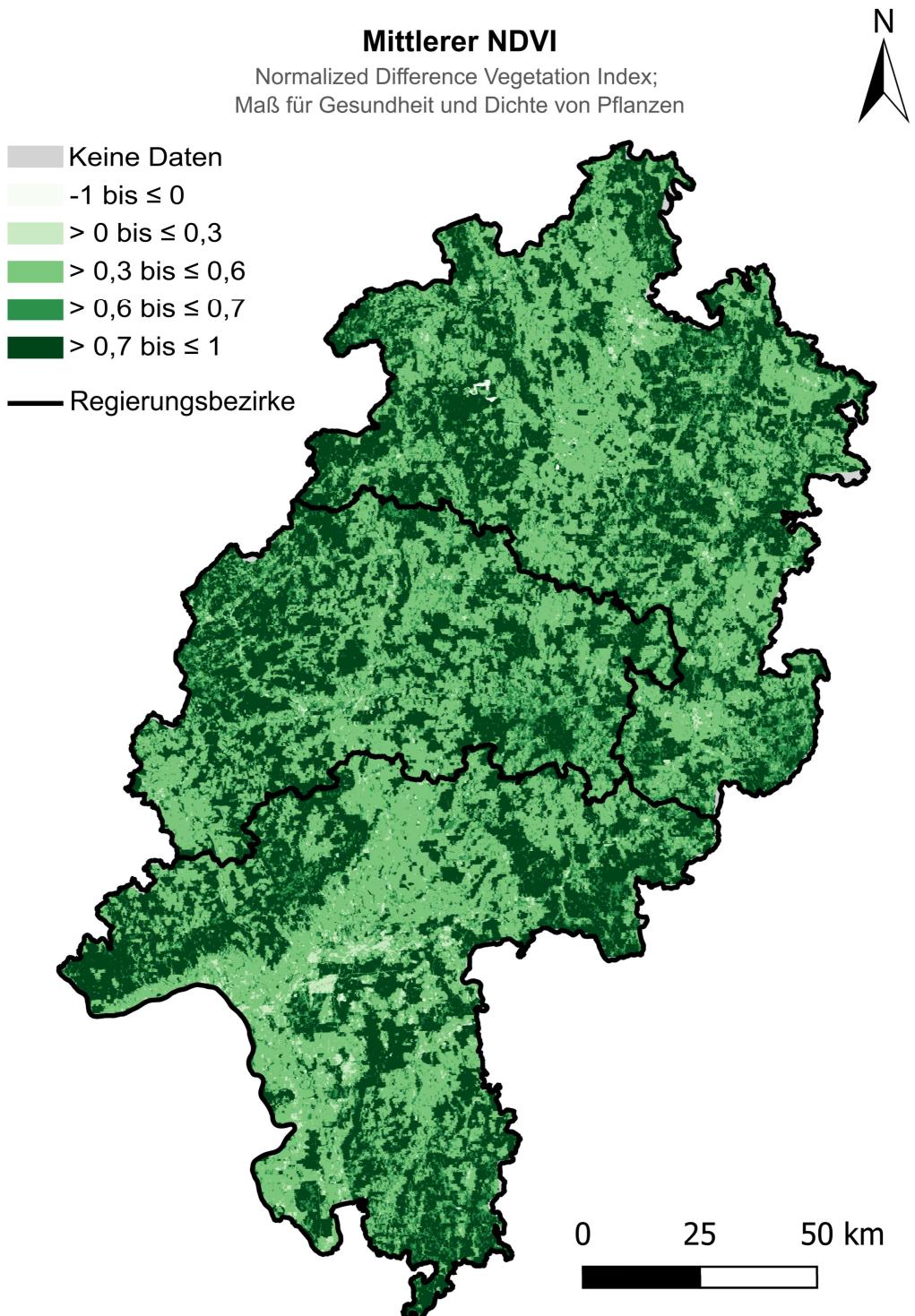


Abbildung 9.1.: Visualisierung des mittleren NDVI für Hessen. Die Berechnung erfolgt als Mittelwert der Sentinel 2 Level 2 Daten für die Sommermonate der Jahre 2018 bis 2022.

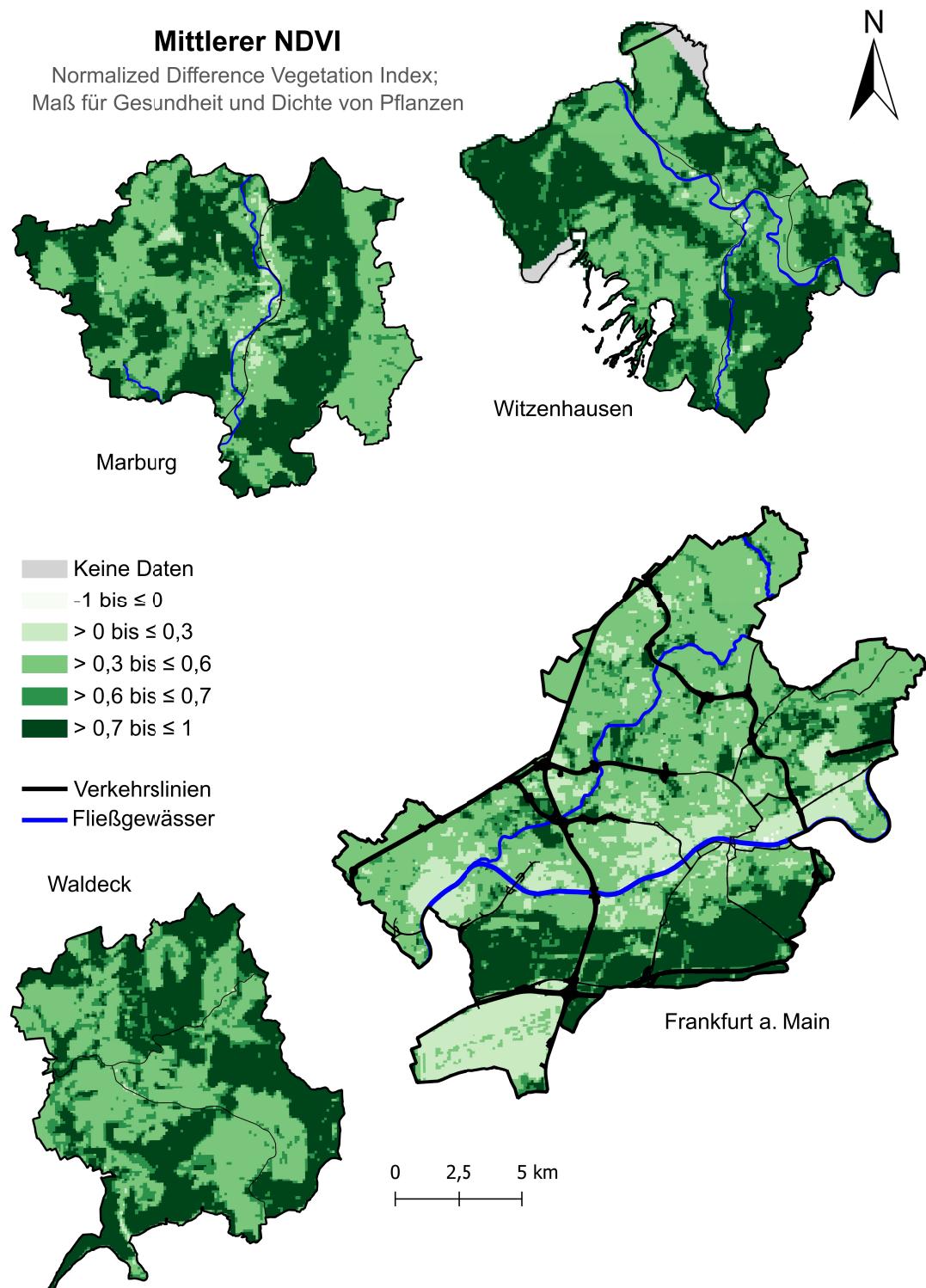


Abbildung 9.2.: Visualisierung des mittleren NDVI für ausgewählte Gemeinden. Die Berechnung erfolgt als Mittelwert der Sentinel 2 Level 2 Daten für die Sommermonate der Jahre 2018 bis 2022.

9.1.2. Grünausstattung

Die **Grünausstattung** bezeichnet die räumliche Verteilung und den Anteil von Grünflächen in einem bestimmten Gebiet in Prozent (%) und stellt einen wichtigen Indikator zur Bewertung der ökologischen und sozialen Funktionen urbaner und ländlicher Räume dar.

Die nachfolgende Gleichung dient als Berechnungsgrundlage für die Grünausstattung.

$$\text{Grünausstattung} = \frac{\text{Grünfläche}}{(\text{Stadt-}) \text{ Fläche}}$$

Auch als Grünflächenanteil oder Grünflächenquote bezeichnet, handelt es sich um einen der meist genutzten Grünindikatoren. So nimmt er u. a. eine zentrale Stellung in Projekten der *Allgemeinen Ressortforschung* des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) ein, wo u. a. das Grün deutscher Städte beschrieben wird [82]. Dieser Stellenwert ist vor allem auf die einfache und wirtschaftliche Berechnung der Grünausstattung zurückzuführen. Dabei gilt hervorzuheben, dass bei der Grünausstattung häufig nicht zwischen verschiedenen Funktionalitäten des Grüns unterschieden wird. Stattdessen fließen verschiedenste Grünflächen (Parkanlagen, Friedhöfe, Grünstreifen am Straßenrand, etc.) ohne Gewichtung in die Berechnung ein. Meist wird die Grünausstattung für gesamte Stadtgebiete oder administrative Unterteilungen als räumliche Einheit berechnet.

Um auch alle räumlichen Ebenen abbilden zu können, wird der Indikator im Vorhaben pro Hektar, im 100 m-Gitter berechnet.

Für die Berechnung werden folgende in Abschnitt 7.4 vorgestellten Klassen als Grünfläche verwendet:

- Hochwüchsige
- Mittelwüchsige
- Niedrigwüchsige

Abbildungen 9.3 und 9.4 zeigen die prozentuale Grünausstattung für Hessen und ausgewählte Gemeinden. Die Werte repräsentieren den Anteil von niedrig-, mittel- und hochwüchsiger Vegetation pro 100 m-Gitterzelle. Die Farbskala reicht von gelb (0 % bis 20 %) bis dunkelblau (80 % bis 100 %). Waldreiche und ländliche Regionen, insbesondere im Norden und Osten Hessens (siehe Abbildung 9.3), weisen eine hohe Grünausstattung auf. Im Gegensatz dazu sind städtische Gebiete wie das Rhein-Main-Gebiet durch geringere Werte gekennzeichnet. Während in den ländlich geprägten Regionen wie Waldeck und Witzenhausen (siehe Abbildung 9.4) eine hohe Grünausstattung vorherrscht, zeigen urbane Gebiete wie Frankfurt am Main niedrigere Anteile, insbesondere in den innerstädtischen Bereichen. Die Unterschiede unterstreichen den Kontrast zwischen dichter Bebauung und naturnahen Räumen und verdeutlichen die Bedeutung der Grünausstattung für die ökologischen Funktionen in verschiedenen Landschaftstypen.

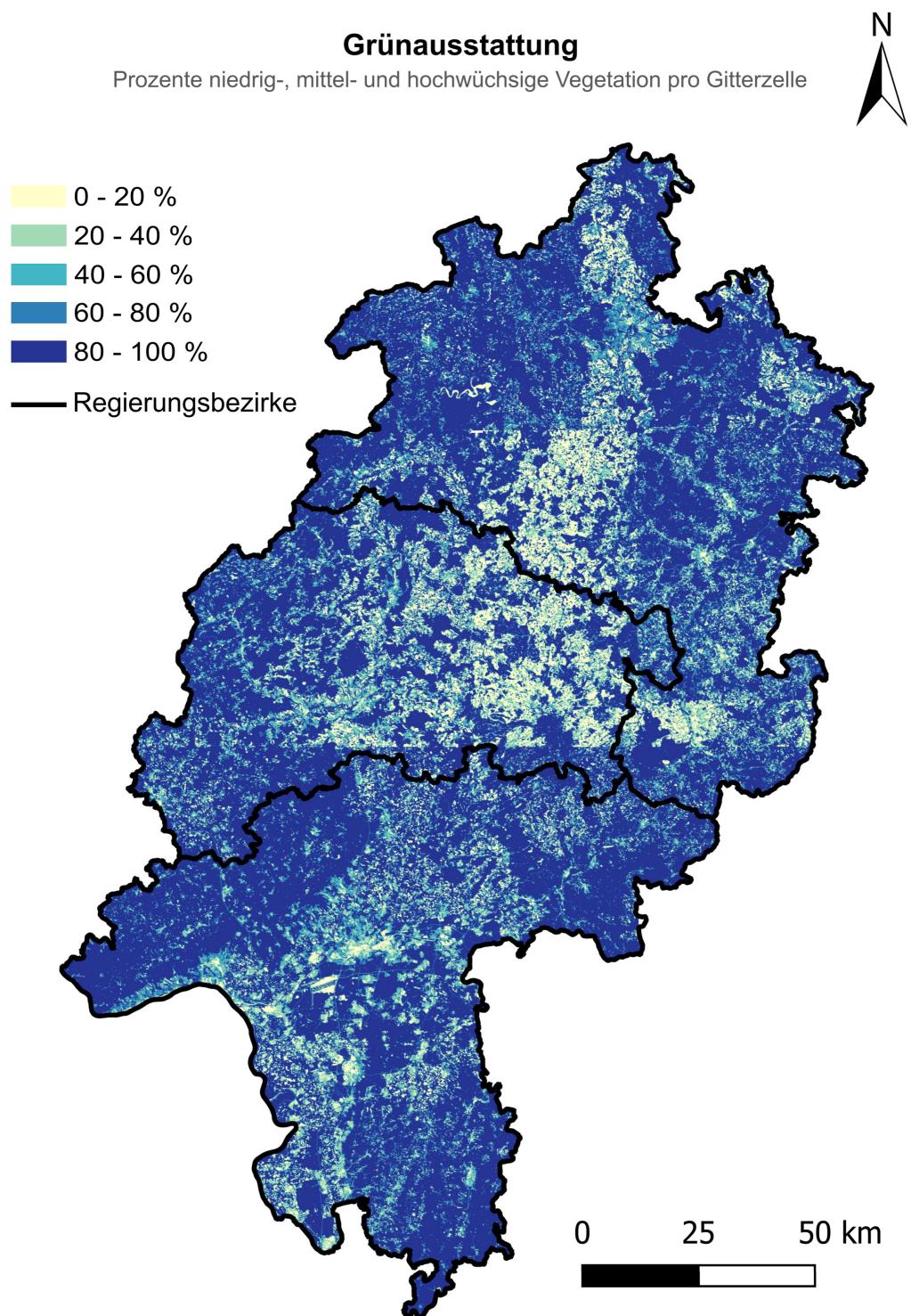


Abbildung 9.3.: Visualisierung der Grün ausstattung für Hessen im 100 m-Gitter und Prozente (%) basierend auf der niedrig-, mittel- und hochwüchsige Vegetation (siehe Kapitel 7).

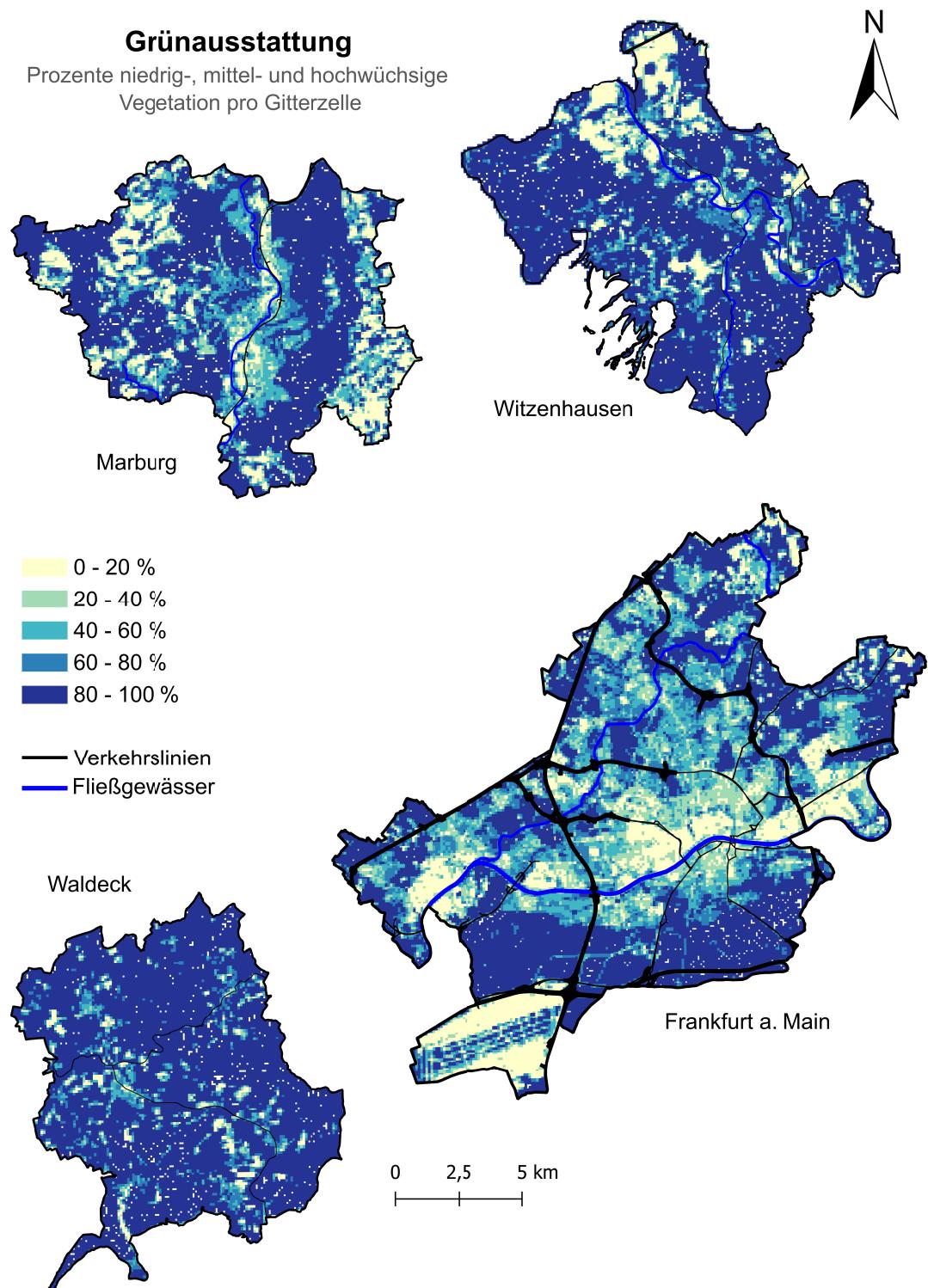


Abbildung 9.4.: Visualisierung der Grün ausstattung für ausgewählte Gemeinden im 100 m-Gitter und Prozente (%) basierend auf der niedrig-, mittel- und hochwüchsige Vegetation (siehe Kapitel 7).

9.1.3. Grünvolumen

Das **Grünvolumen** beschreibt die dreidimensionale Ausdehnung der Vegetation in einem bestimmten Raum und ist ein zentraler Indikator für die Analyse ökologischer und klimatischer Funktionen. Es verbindet Informationen zur Vegetationshöhe, -dichte und -ausdehnung und bietet dadurch ein umfassenderes Abbild der ökosystemischen Leistung von Grünflächen im Vergleich zu rein zweidimensionalen Betrachtungen [62].

Das Grünvolumen ist besonders relevant für die Bewertung von Kühlungseffekten in urbanen Räumen, da eine größere dreidimensionale Vegetationsstruktur durch Verdunstung und Schattenwurf eine effektivere thermische Regulation ermöglicht [29]. Darüber hinaus spielt es eine entscheidende Rolle bei der Bindung von CO₂ und anderen Schadstoffen, der Wasserrückhaltung sowie der Förderung der Biodiversität [82].

Grundlage für die Berechnung des Grünvolumens stellen Daten aus dem Normalisierten Digitalen Oberflächenmodell (nDOM) dar. Das nDOM ist ein Differenzmodell aus dem DGM und einem DOM. Die nDOM-Daten werden auf ein 1 m × 1 m-Gitter (d. h. auf eine Rasterweite von 1 m) aggregiert. Dieses Gitter wird mit den identifizierten Vegetationsflächen im städtischen Raum verschnitten. Die Identifikation der Vegetationsflächen erfolgt mit der Berechnung des NDVI-Wertes (siehe Abschnitt 9.1.1) und einem entsprechenden Schwellenwert ebenfalls auf einem 1 m × 1 m-Gitter, sodass die beiden Rasterdatensätze effizient miteinander verrechnet werden können. Mit der beschriebenen Vorgehensweise wird die durchschnittliche Höhe für 1 m × 1 m Vegetationsflächen kombiniert und daraus das Grünvolumen für alle räumlichen Ebenen mit ausreichender Auflösung errechnet. Beachtet werden sollte, dass die Absolutwerte des Grünvolumens aufgrund dieser Berechnungsweise nur eine Approximation an das tatsächliche Grünvolumen darstellen können. Insbesondere für vergleichende, relative Angaben oder Klassifikationsaufgaben ist dieser Indikator jedoch von großem Nutzen.

Abbildungen 9.5 und 9.6 zeigen die Verteilung des Grünvolumens in m³ ha⁻¹ für Hessen und die ausgewählten Gemeinden Marburg, Witzenhausen, Waldeck und Frankfurt am Main. Die Farbskala verdeutlicht die Spannbreite von niedrigem (<100 m³) bis sehr hohem Grünvolumen ($\geq 100\,000\,m^3$). Wie in Abbildung 9.5 zu erkennen ist, sind besonders hohe Grünvolumenwerte in den waldreichen Regionen des Landes, insbesondere im Norden und Osten, zu finden. Im Gegensatz dazu weisen städtische Gebiete und intensiv landwirtschaftlich genutzte Flächen niedrigere Werte auf. Ländlich geprägte Regionen wie Waldeck und Witzenhausen (siehe Abbildung 9.6) weisen deutlich höhere Grünvolumenwerte pro Hektar auf, während in der stark urbanisierten Region Frankfurt am Main eine geringeres Vegetationsvolumen erkennbar ist.

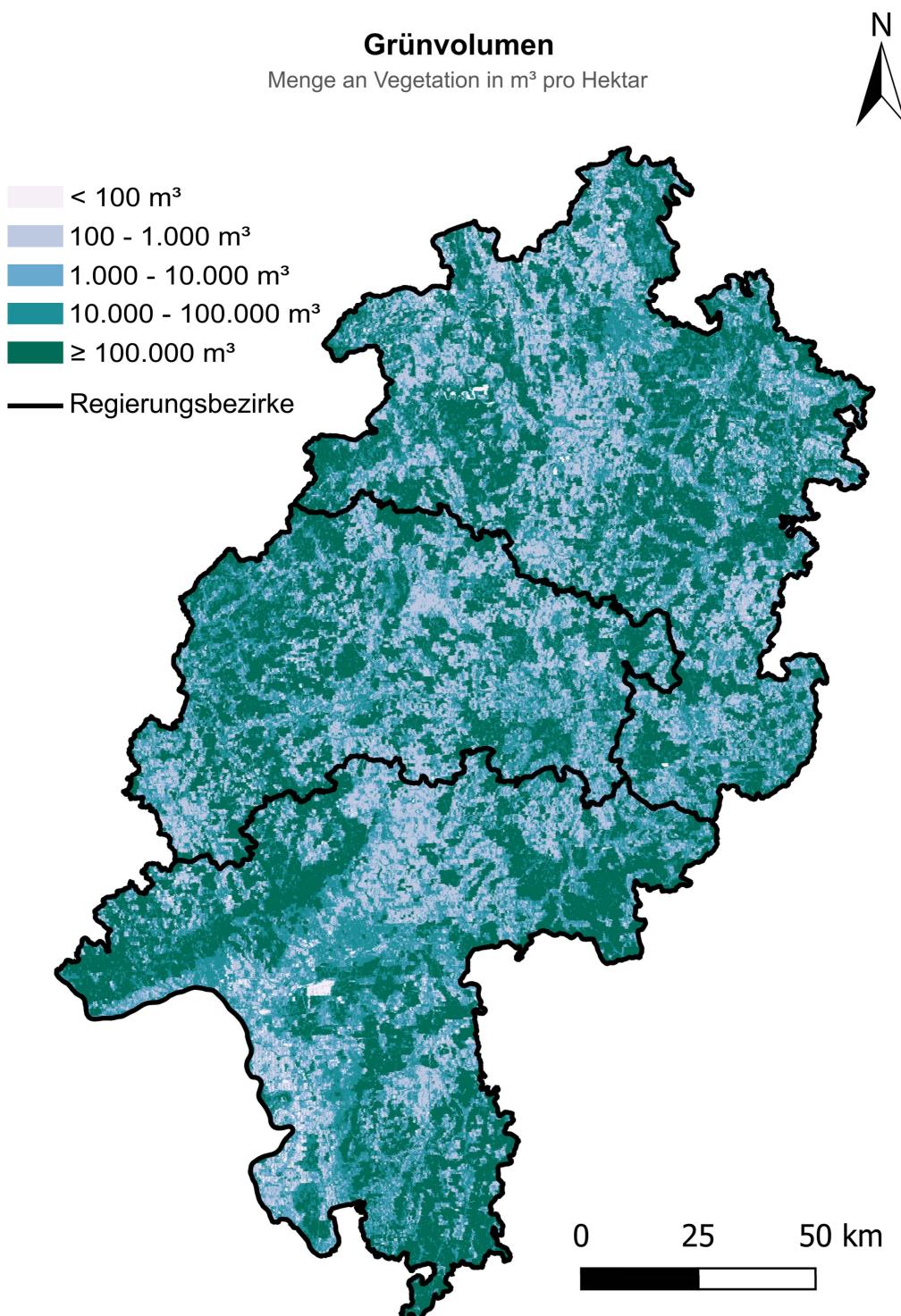


Abbildung 9.5.: Grünvolumen für Hessen in $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$.

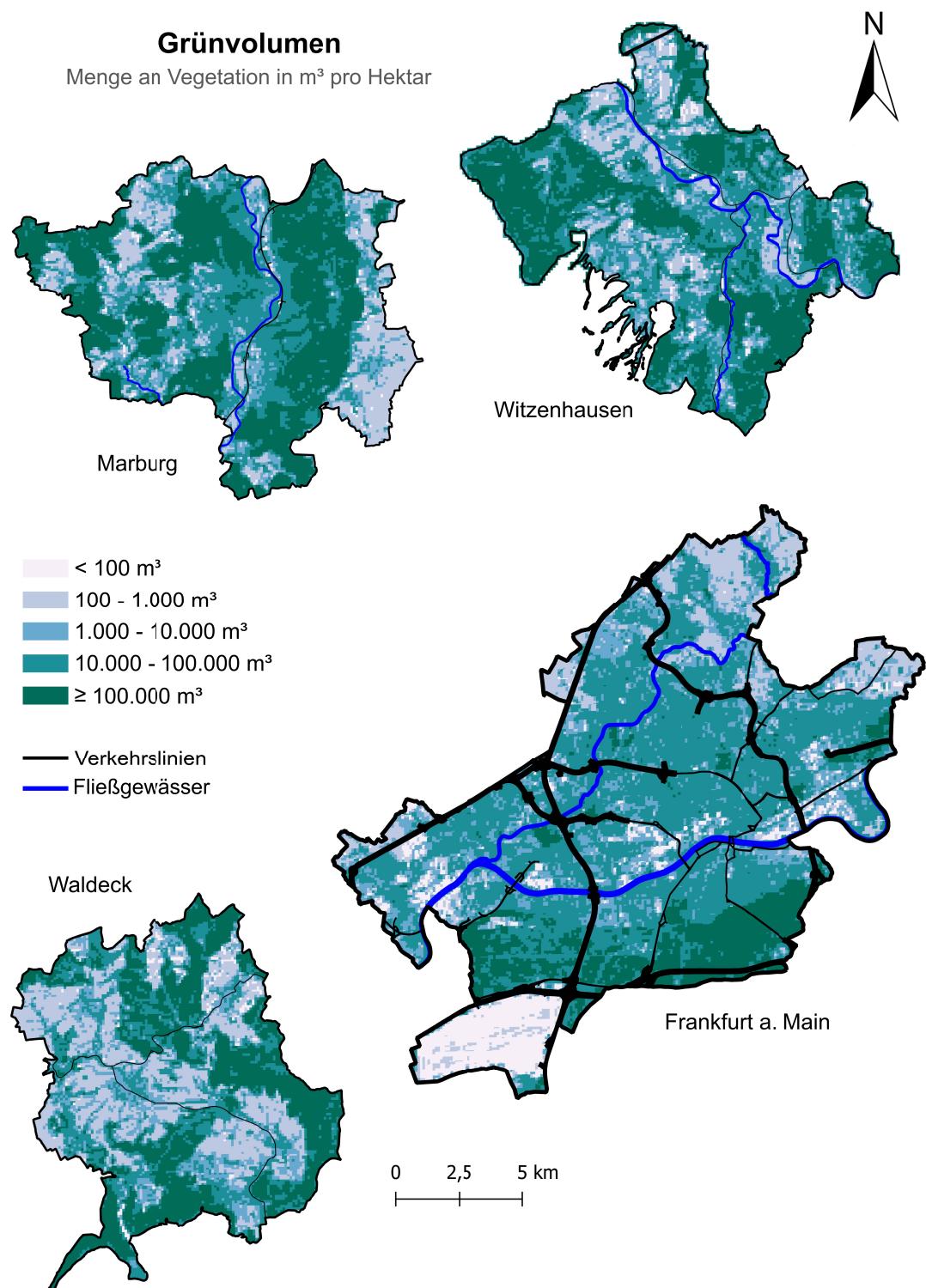


Abbildung 9.6.: Grünvolumen für die ausgewählten Gemeinden in $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$.

9.1.4. GPP

Die **GPP** ist als ein Daten-Produkt der Mission „MODIS“ für ländliche Gebiete verfügbar. Sie 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.

Details hierzu finden sich in [72]. 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 (kg m^{-2}) Landfläche definiert.

Die GPP eignet sich vor allem als Indikator im Kontext des Klimaschutzes, da sie die in Pflanzen gespeicherte Kohlenstoffmenge anzeigt. Dies bedeutet, dass Bereiche mit hoher GPP einen wertvollen Kohlenstoffspeicher repräsentieren. 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 ließe. In der Regel sind Bereiche mit hohem CO_2 -Speicher auch wertvolle Wasserspeicher in der Landschaft (z. B. Feuchtgebiete und Wälder).

Abbildungen 9.7 und 9.8 zeigen die räumliche Verteilung der GPP für Hessen und beispielhaft für ausgewählte Gemeinden. Es wird hier in Gramm Kohlenstoff pro Quadratmeter (g m^{-2}) dargestellt. Die Farbskala reicht von gelb ($<2\text{ g m}^{-2}$) bis violett ($\geq7\text{ g m}^{-2}$), wobei höhere Werte auf eine stärkere Kohlenstoffaufnahme durch Vegetation hinweisen. Waldreiche Gebiete im Norden und Osten Hessens (siehe Abbildung 9.7) weisen die höchsten GPP-Werte auf, was auf ihre hohe Vegetationsdichte und Photosyntheseaktivität zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu sind urbanisierte und landwirtschaftlich stark genutzte Flächen, insbesondere im Rhein-Main-Gebiet, durch niedrigere Werte gekennzeichnet. Diese Unterschiede spiegeln die Vielfalt der Vegetationsleistungen in den verschiedenen Landschaftstypen wider.

In Abbildung 9.8 ist weiter zu erkennen, dass ländliche Regionen wie Waldeck und Witzenhausen höhere GPP-Werte aufweisen. Im Gegensatz dazu weisen die urbanen Gebiete von Frankfurt am Main niedrigere Werte auf. Dies lässt auf eine geringere Vegetationsdichte und begrenzte Photosyntheseleistung schließen.

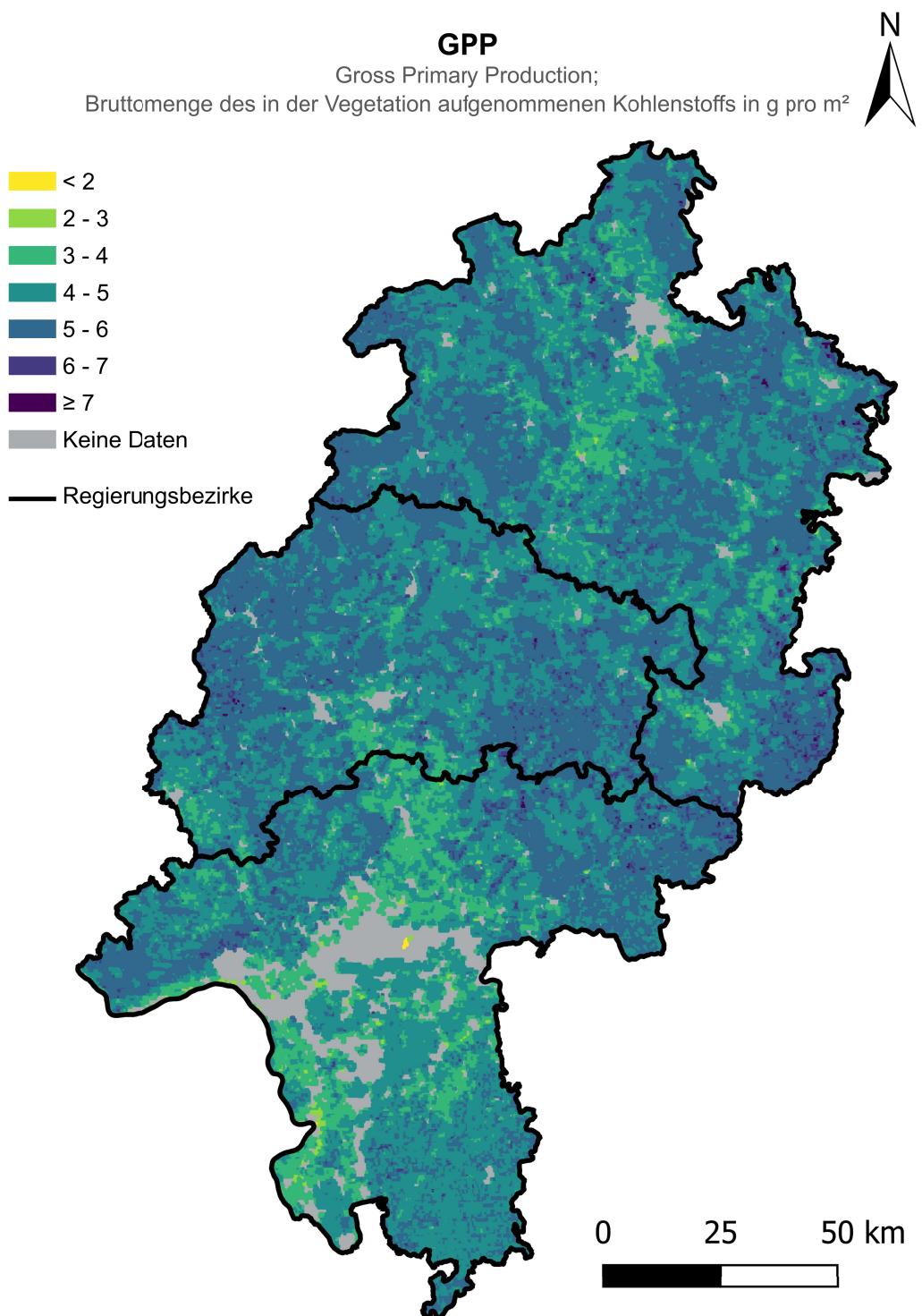


Abbildung 9.7.: Visualisierung der mittleren GPP als Bruttomenge des in der Vegetation aufgenommenen Kohlenstoffs in g m⁻² für Hessen.

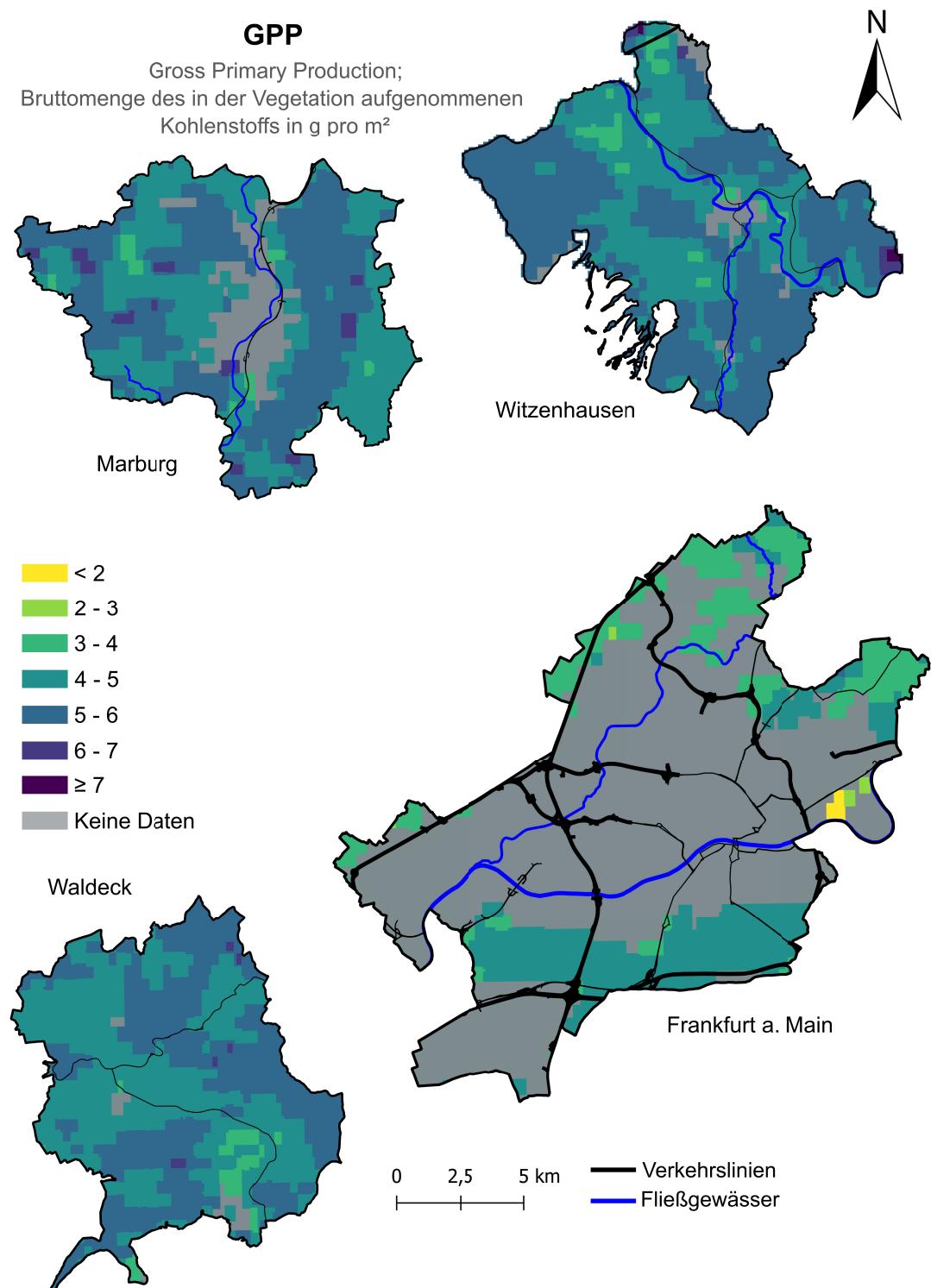


Abbildung 9.8.: Visualisierung der mittleren GPP als Bruttomenge des in der Vegetation aufgenommenen Kohlenstoffs in g m⁻² beispielhaft für ausgewählte Gemeinden.

9.2. Weitere Grünindikatoren

In diesem Abschnitt werden weitere, im Forschungsprojekt ermittelten Grünindikatoren vorgestellt.

9.2.1. DSWI

Der **Disease Water Stress Index (DSWI)** wird als Verhältnis der Reflexion in Spektralbereichen der FE-Daten berechnet, die sehr empfindlich auf Veränderungen der Blattpigmente, Blattstruktur und des Feuchtigkeitsgehalts der Pflanze reagieren.

Kombiniert werden Bänder im grünen (GRÜN) mit 550 nm, roten (ROT) mit 680 nm, nahen Infraroten (NIR) mit 800 nm und kurzweligen Infraroten, dem sogenannten Short Wave Infrared (SWIR), mit 1660 nm Wellenlängenbereich.

Berechnet wird der DSWI nach der folgenden Gleichung:

$$\text{DSWI} = \frac{\text{NIR} + \text{GRÜN}}{\text{SWIR} + \text{ROT}}$$

Analog zum NDVI wird der DSWI aus Sentinel 2 Level 2 Daten der Sommermonate der Jahre 2018 bis 2022 berechnet. Erneut werden die Ergebnisse der DSWI-Berechnung für alle räumlichen Ebenen (lokal, regional und landesweit) als Mittelwert illustriert (siehe Abbildungen 9.9 und 9.10).

Ursprünglich wurde der DSWI für die Detektion der Rostpilzkrankheit des Zuckerrohrs entwickelt [3]. Hierbei zeigt gesundes Zuckerrohr hohe Werte im Grünen und NIR Kanal und geringe Werte im Wasser-affinen SWIR-Bereich. Wird die Pflanze vom Rostpilz befallen, steigt der Wert des SWIR-Bereiches an. Die Anwendung zum Monitoring von Wasserstress und Krankheitsbildern wird in vereinzelten Studien angenommen, ist jedoch nicht auf allgemeiner Basis belegt.

Der DSWI weist in seiner Funktionalität und seinem Aussagegehalt erhebliche Überschneidungen mit dem NDVI auf, wie der AN in vertiefenden Analysen untersucht hat. Die dabei festgestellte positive Korrelation zwischen beiden Indizes verdeutlicht, dass der DSWI ähnliche Informationen zur Vegetationsdichte und -gesundheit liefert wie der NDVI. Angesichts der bereits nachgewiesenen Verlässlichkeit und breiten Anwendung des NDVI, seiner direkten Relevanz für thermische Belastung, Kühlungseffekte und Kohlenstoffbindung sowie der vergleichbaren Ergebnisse mit dem DSWI, ist es ausreichend, sich im weiteren Verlauf der Analysen auf den NDVI zu konzentrieren. Der DSWI wurde daher im weiteren Projektverlauf nicht eingehender verwendet. Dieses Vorgehen reduziert Redundanzen und gewährleistet eine klarere und effizientere Interpretation der Daten. Details zum NDVI finden sich in Abschnitt 9.1.1.

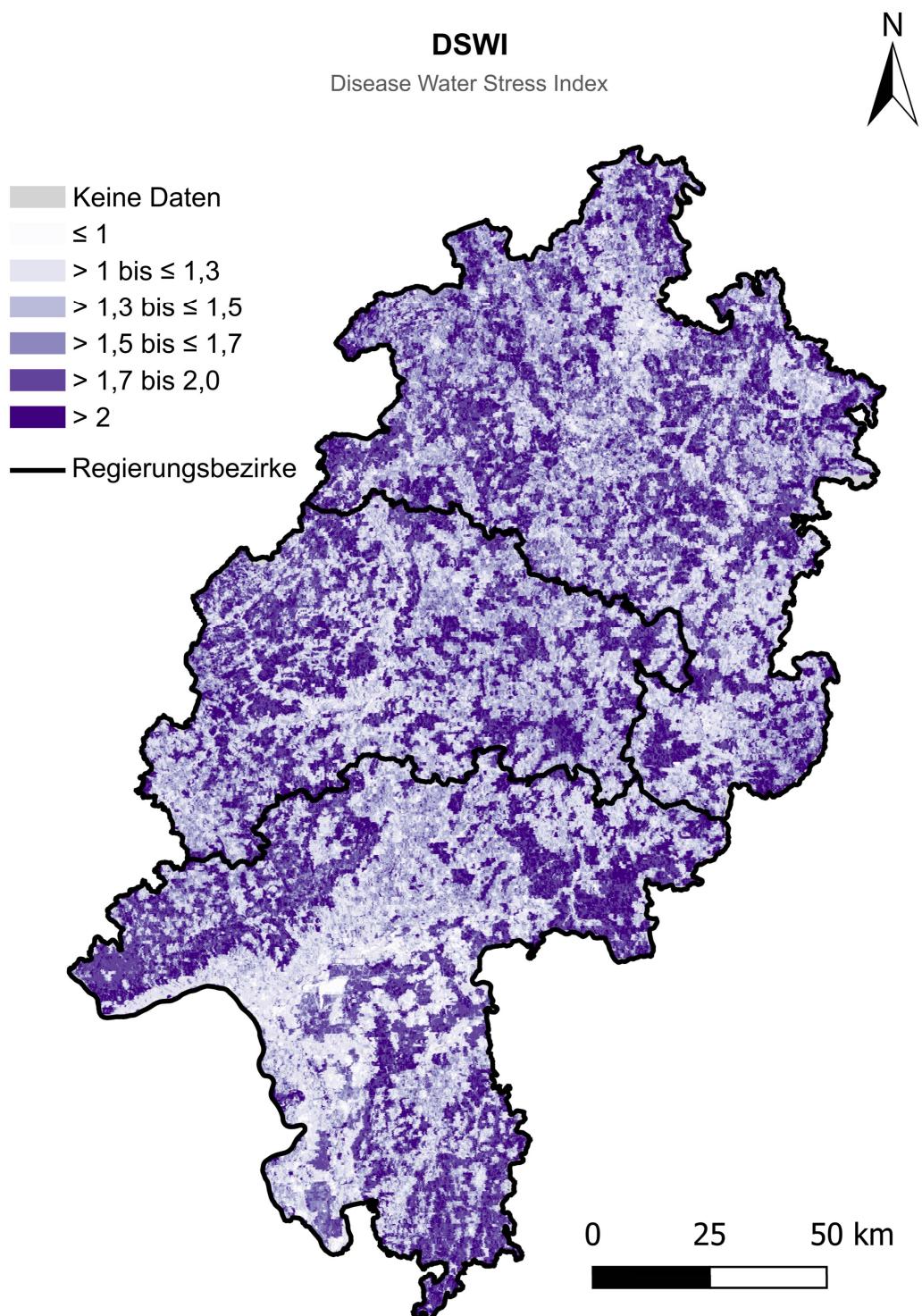


Abbildung 9.9.: Visualisierung des mittleren DSWI für Hessen. Die Berechnung erfolgt als Mittelwert der Sentinel 2 Level 2 Daten für die Sommermonate der Jahre 2018 bis 2022.

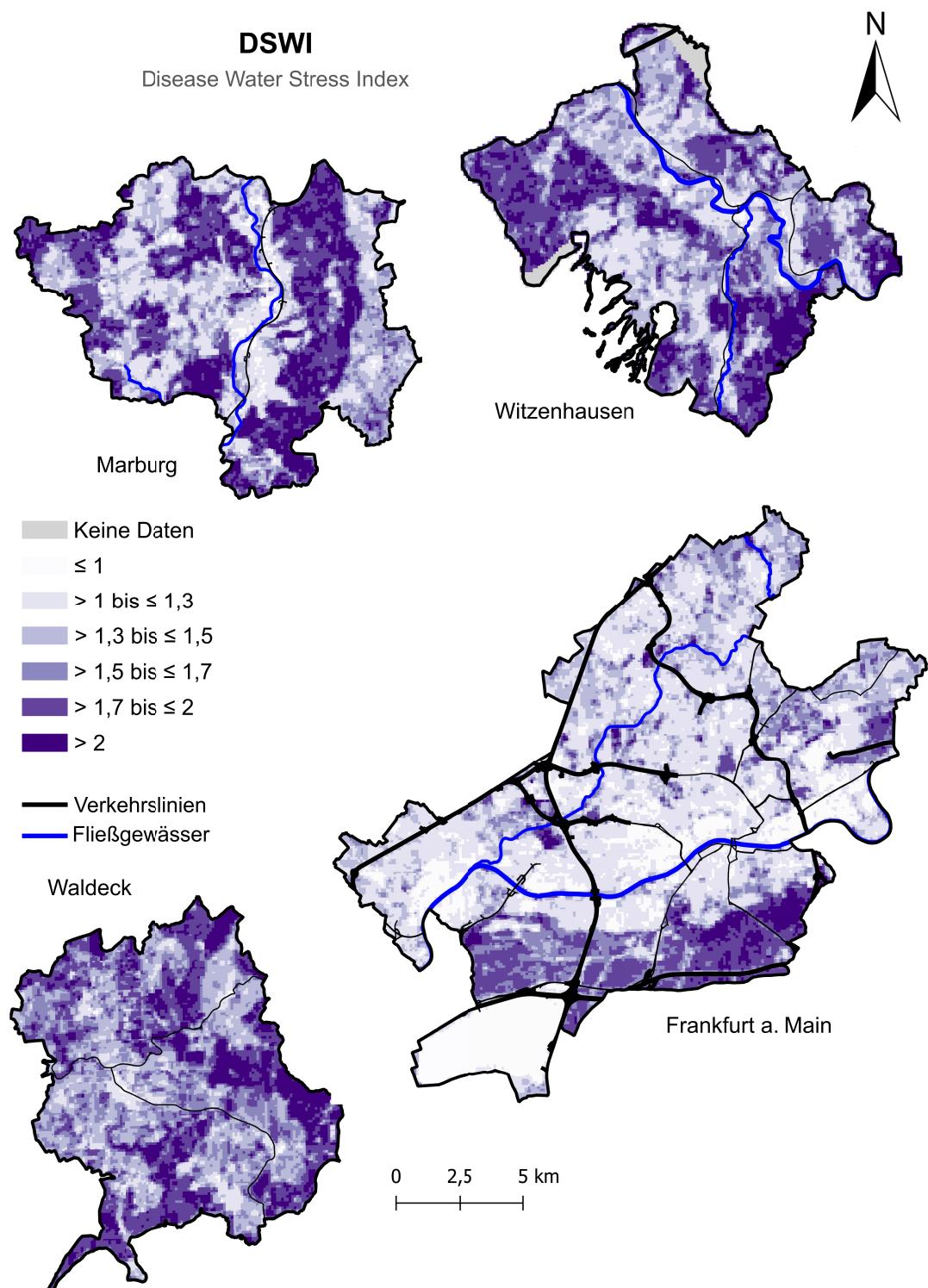


Abbildung 9.10.: Visualisierung des mittleren DSWI für ausgewählte Gemeinden. Die Berechnung erfolgt als Mittelwert der Sentinel 2 Level 2 Daten für die Sommermonate der Jahre 2018 bis 2022.

9.2.2. Grünraumvernetzung

Die **Grünraumvernetzung** wird über den Ansatz der Landschaftskonnektivität beschrieben, bei der die Verknüpfung von Lebensräumen, Arten, Gemeinschaften und ökologischen Prozessen im Vordergrund steht. Die Vernetzung ist bedeutend für die Aufrechterhaltung ökologischer Prozesse und Ökosystemdienstleistungen [81, 60].

Es gibt zwei Arten der Konnektivität, die für die klimaorientierte Grünraumvernetzung in Betracht gezogen werden können: die strukturelle Konnektivität und die funktionale Konnektivität. Strukturelle Konnektivität bezieht sich auf den physischen, räumlichen Aspekt von Grünflächen und kann insbesondere durch die Betrachtung der Nähe oder der Verbindung von Grünflächen bewertet werden. Die funktionale Konnektivität bezieht sich darauf, wie gut Grünflächen ökologische Prozesse, die Bewegung von Wildtieren und die Gesamtfunktion von Ökosystemen in einer städtischen Umgebung unterstützen, was durch das Verhalten bestimmter Arten analysiert wird [81, 60, 48]. Die strukturelle Konnektivität kann jedoch als Grundlage für die funktionale Konnektivität angesehen werden, insbesondere wenn weiteres Wissen über die Funktionen nicht vorhanden ist [18].

Entsprechend der Zielsetzungen mit einem Schwerpunkt auf Ansätzen der FE wurde der Ansatz von [73] adaptiert, um die strukturelle Konnektivität bzw. Vernetzung von Grünflächen zu quantifizieren. Der Ansatz eignet sich vorrangig für den städtischen Kontext, sodass er auf das Grün innerhalb urbaner Strukturen angewendet wird. Zunächst beinhaltet der Ansatz die Erstellung von Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den 100 m-Gitterzellen. Es werden alle Gitterzellen innerhalb der Ortslage ausgewählt. Die Vernetzung lässt sich über die Anzahl direkter Nachbarn darstellen, dies sind im Falle des quadratischen Rasters die umgebenden acht Gitterzellen mit gemeinsamer Kante oder Knoten [73].

In einem weiteren Schritt wird festgelegt, welche 100 m-Gitterzellen Grünflächen repräsentieren. Basierend auf dem Ergebnis des Segmentierungsmodells (siehe Abschnitt 7.5) wird der gesamte Grünanteil einer Zelle berechnet. Nach Prüfung der Verteilung dieser Gesamtanteile im urbanen Kontext wird ein Schwellwert festgelegt. Dieser liegt bei >50 %, sodass überwiegend von Grün geprägte Zellen in die Berechnung einbezogen werden. Die Grünraumvernetzung lässt sich über die Zahl der benachbarten 100 m-Gitterzellen, die ebenfalls als städtisches Grün identifiziert werden, ausdrücken und in Kategorien einteilen. Die Abbildung 9.11 visualisiert das Ergebnis des beschriebenen Vorgehens zur Grünraumvernetzung exemplarisch für die Stadt Frankfurt und beschreibt die Vernetzung über die Kategorien „keine“, „niedrig“, „mittel“ und „hoch“. Der Ansatz erlaubt auf Ebene der 100 m-Gitterzellen eine Abschätzung der Vernetzung der erfassten, oft kleinteiligen Grünflächen. Hier treten beispielhaft die für die Erholung wichtigen linearen Grünflächen des Rings um die Altstadt hervor, kleine vernetzte Grünflächen im Westen der Innenstadt oder größere zusammenhängende Gebiete, wie der Hauptfriedhof im Norden der Innenstadt.

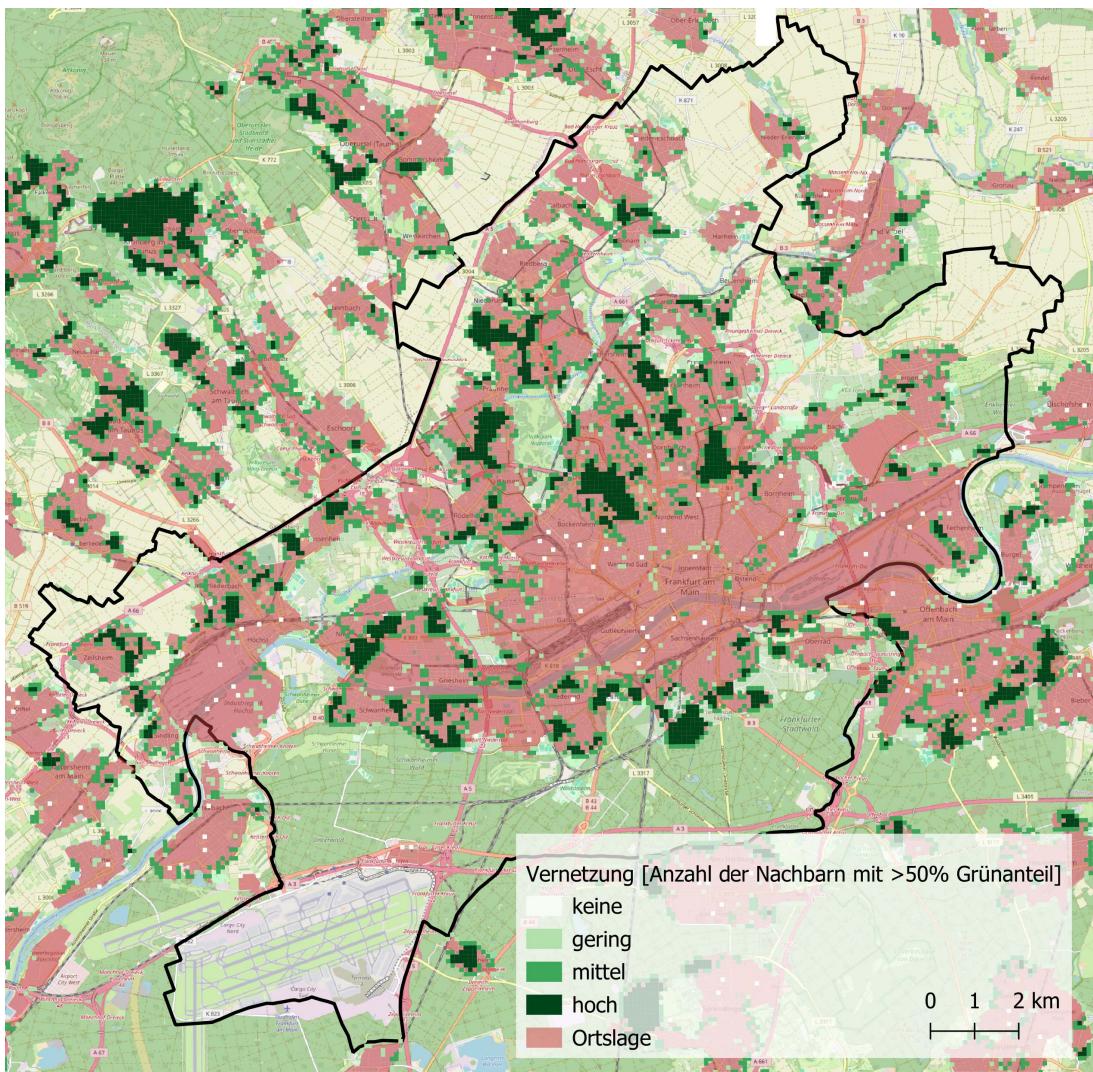


Abbildung 9.11.: Beispiel der Grünraumvernetzung für Frankfurt.

9.2.3. Grünerreichbarkeit

Die **Grünerreichbarkeit** lässt sich als Summe der Fläche (ha) von Grünflächen darstellen, die in fußläufiger Entfernung aus einem bestimmten Ausgangspunkt zu erreichen ist [82]. Der hier vorgestellte Ansatz basiert auf dem Landbedeckungsmodell (siehe Kapitel 7) mit einer Auflösung von 20 cm für die Grünflächen. Diese sind aufgeteilt in folgende drei Vegetationsklassen: niedrigwüchsige, mittelwüchsige, hochwüchsige (siehe Kapitel 7). Im Anschluss wird eine vierte Klasse „gesamt“ aus der Summe der drei Klassen hinzugefügt. Ausgangspunkt bildet die Siedlungsstruktur (siehe Kapitel 10). Um den Mittelpunkt einer 100 m-Gitterzelle, die als Siedlungsstruktur identifiziert wird, werden Grünflächen innerhalb von (300 m Luftlinie) erfasst und summiert. Die Grünerreichbarkeit wird für alle Klassen und pro 100 m-Gitterzelle berechnet.

Abbildung 9.12 zeigt dies beispielhaft für die Erreichbarkeit hochwüchsigen Grüns in Marburg. Abbildung 9.13 stellt die Erreichbarkeit sämtlichen Grüns in Marburg dar. Deutlich werden hier kleinräumige Unterschiede in den Vororten, die nicht von Wald umgeben

sind. Dies hebt die Vorteile der Nutzung von FE-Daten gegenüber auf topographischen Daten basierenden Verfahren hervor und erweitert diese um einen hochaufgelösten Ansatz [82].

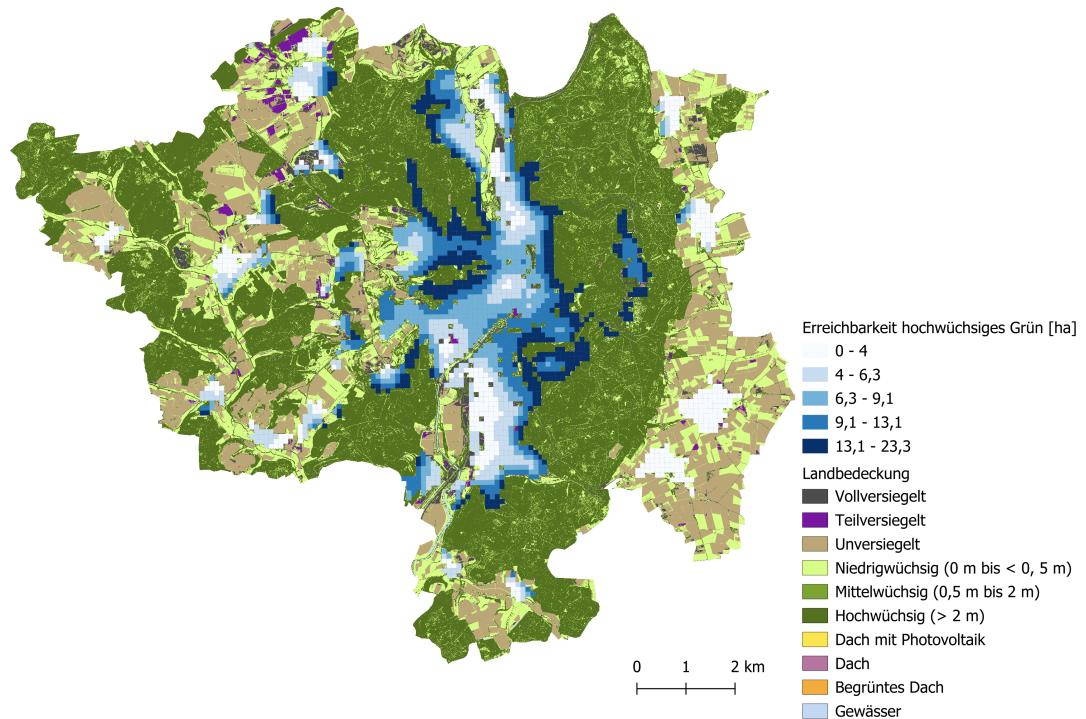


Abbildung 9.12.: Erreichbarkeit von hochwüchsigem Grün innerhalb 300 m Luftlinie in Marburg (Quintile).

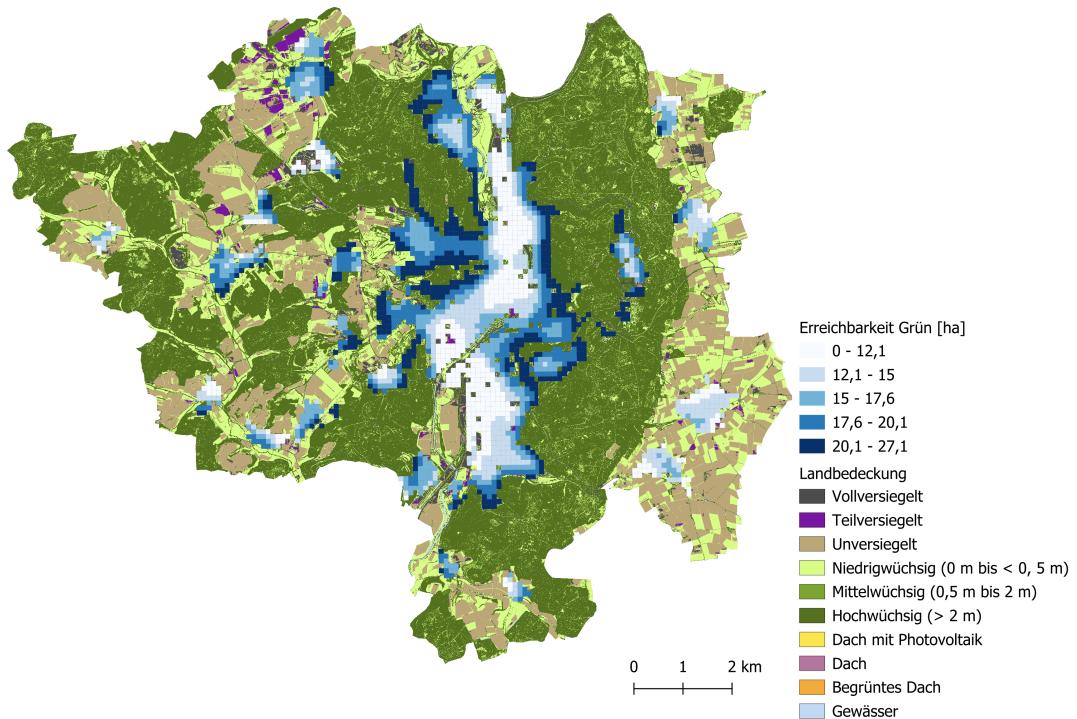


Abbildung 9.13.: Erreichbarkeit von Grün innerhalb 300 m Luftlinie in Marburg (Quintile).

Unterschiedliche Grünflächengrößen haben sowohl eine unterschiedliche Bedeutung für die Erholung von Bewohnern:innen, als auch einen unterschiedlichen Effekt auf das urbane Klima [4]. Entsprechend ist es sinnvoll, die Erreichbarkeit von Grünflächen nach deren Größe auszuwerten. Hierzu hat sich eine Abgrenzung von Grünflächen >1 ha innerhalb von 300 m und >10 ha innerhalb von 700 m etabliert [82]. Diese Abgrenzung wird für die Landbedeckung herangezogen, sodass ausgehend von den Mittelpunkten der Zellen der Siedlungsstruktur die Erreichbarkeit differenziert dargestellt werden kann. Die folgenden Abbildung 9.14 und Abbildung 9.15 zeigen das Ergebnis einer Unterscheidung der Erreichbarkeit nach Flächengröße für die Stadt Marburg.

Der Indikator Grünerreichbarkeit gibt damit einen ersten Hinweis auf die fußläufige Erreichbarkeit des vorhandenen Grüns hinsichtlich dessen Eigenschaften (niedrigwüchsig, mittelwüchsig, hochwüchsig) und Größe. In den Abbildungen wird deutlich, dass z. B. insbesondere zentrale Lagen der Innenstadt eine relativ geringe Erreichbarkeit aufweisen, hier zeichnet sich die Bedeutung von vernetzten Grünstrukturen innerhalb des urbanen Raums ab. Zu beachten ist, dass Aussagen zu dem für die Einwohner:innen tatsächlich nutzbaren Grün, beispielsweise für Erholungszwecke, auf dieser Ebene jedoch nicht möglich sind. Barrieren in Form von nicht-querbaren Verkehrstraßen oder Umzäunungen, die einen Zutritt zu Grünflächen verhindern, Eigentumsverhältnisse und damit verbundene Betretungsbeschränkungen sowie der qualitative Ausstattungsgrad werden nicht berücksichtigt. Diese Eigenschaften lassen sich mit wege-, ausstattungs- und nachfragebasierten Ansätzen [76] auffangen.

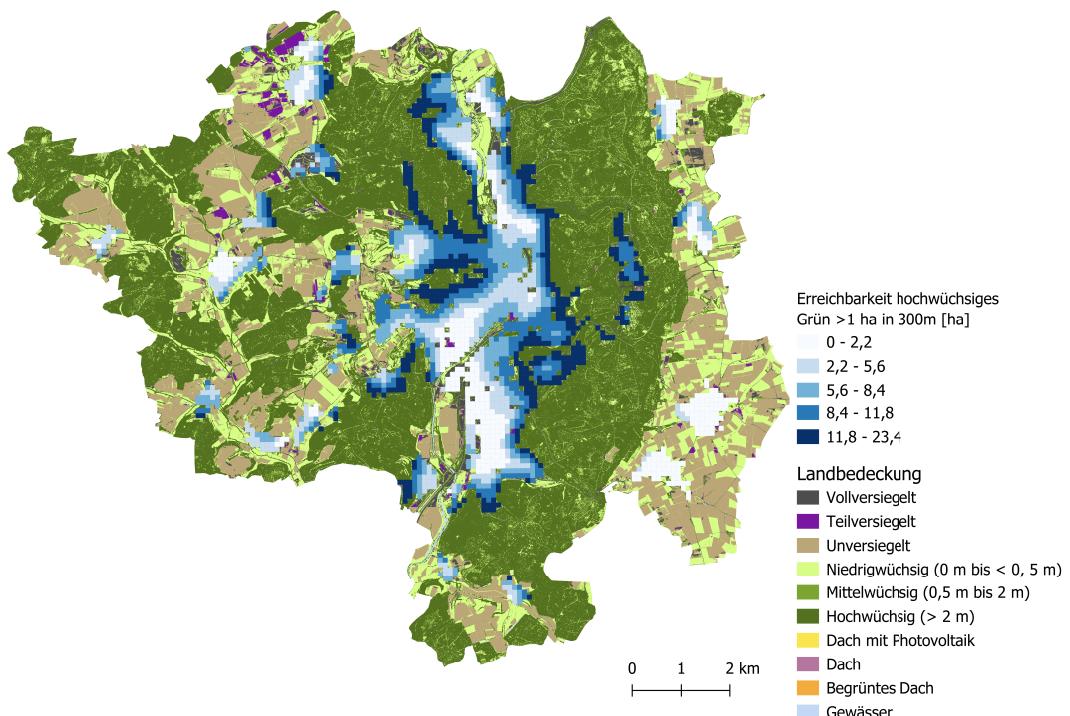


Abbildung 9.14.: Erreichbarkeit von hochwüchsigem Grün > 1 ha innerhalb 300 m für Marburg.

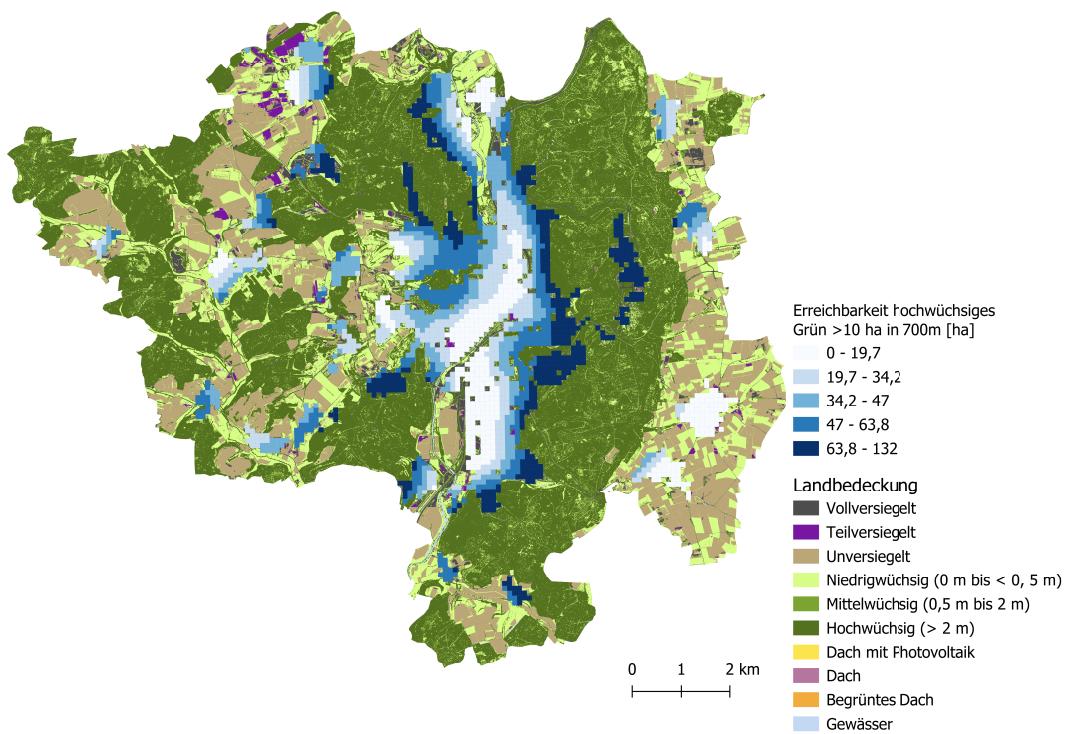


Abbildung 9.15.: Grünerreichbarkeit von hochwüchsigem Grün > 10 ha innerhalb 700 m für Marburg.

9.3. Blauer Indikator

Wasserflächen spielen eine zentrale Rolle in urbanen Gebieten, indem sie das Mikroklima positiv beeinflussen und als natürliche Kühlkörper wirken. Zahlreiche Studien, wie jene von [86] und [32], haben gezeigt, dass Wasserflächen durch Verdunstung und Wärmespeicherung die LST in ihrer Umgebung signifikant senken können. Dies führt zu einer Abmilderung städtischer Hitzeinseln, insbesondere in dicht bebauten Gebieten. Die Kombination von Wasserflächen mit Grünflächen, oft als Blau-Grüne Infrastruktur bezeichnet, verstärkt diesen Effekt zusätzlich [84].

Vor diesem Hintergrund ist im Rahmen dieses Forschungsprojekts ein eigener blauer Indikator entwickelt worden, der die Wassererreichbarkeit quantifiziert. Dieser Indikator dient nicht nur als Maß für die räumliche Verteilung von Wasserflächen, sondern ermöglicht auch die Untersuchung ihrer thermischen und ökologischen Auswirkungen auf verschiedene räumliche Skalen (siehe hierzu u. a. Kapitel 17).

9.3.1. Wassererreichbarkeit

Die **Wassererreichbarkeit** 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. Die Zelle selbst wird hierbei aus der Liste der Nachbarn ausgeschlossen. Für jede Gitterzelle werden die folgenden Werte berechnet:

- Der Mittelwert des Wasserflächenanteils in der inneren Nachbarschaft (200 m-Radius)
- Der Mittelwert des Wasserflächenanteils in der äußeren Nachbarschaft (300 m-Radius)
- Kombinationen der beiden genannten Werte mit dem Wasserflächenanteil der Zelle selbst, wie z. B. Zentrum der Zelle plus innere Nachbarschaft oder alle berechneten Werte.

Der ideale Wert für die Wassererreichbarkeit ist somit +1, und ein Wert 0 bedeutet keine Wassererreichbarkeit innerhalb des gewählten Puffers.

Durch diesen Ansatz wird nicht nur der lokale Wasseranteil einer Gitterzelle betrachtet, sondern auch der Einfluss umliegender Wasserflächen in unterschiedlichen Entfernung berücksichtigt. Dies ermöglicht eine feinere räumliche Analyse der Wassererreichbarkeit und ihrer potenziellen Wirkung auf die Umgebung.

Abbildung 9.16 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 erreichbar sind, was für die klimatische Wirkung und die Planung von blauer Infrastruktur relevant ist.

Für ausgewählte Gemeinden auf lokaler Ebene veranschaulicht Abbildung 9.17 die Wassererreichbarkeit. Zu erkennen ist, dass u. a. in urbanen Gebieten wie Frankfurt am Main die Wassererreichbarkeit deutlich geringer ausfällt, was auf die dichte Bebauung und die reduzierte Anzahl an Wasserflächen zurückzuführen ist.

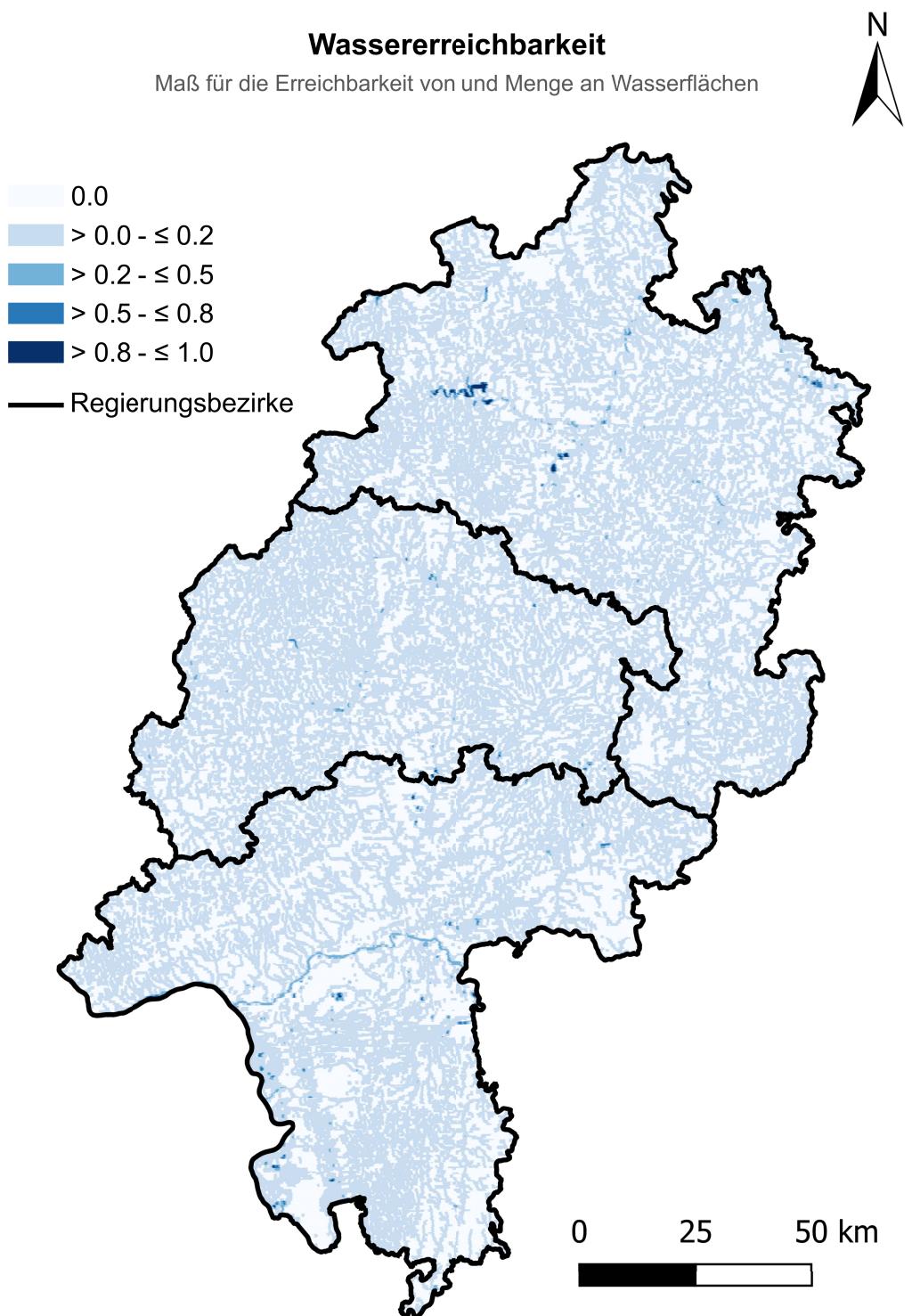


Abbildung 9.16.: Visualisierung der Wassererreichbarkeit für Hessen. Räumliche Einheit ist hierbei die jeweils betrachtete Gitterzelle sowie die 300 m-Nachbarschaft.

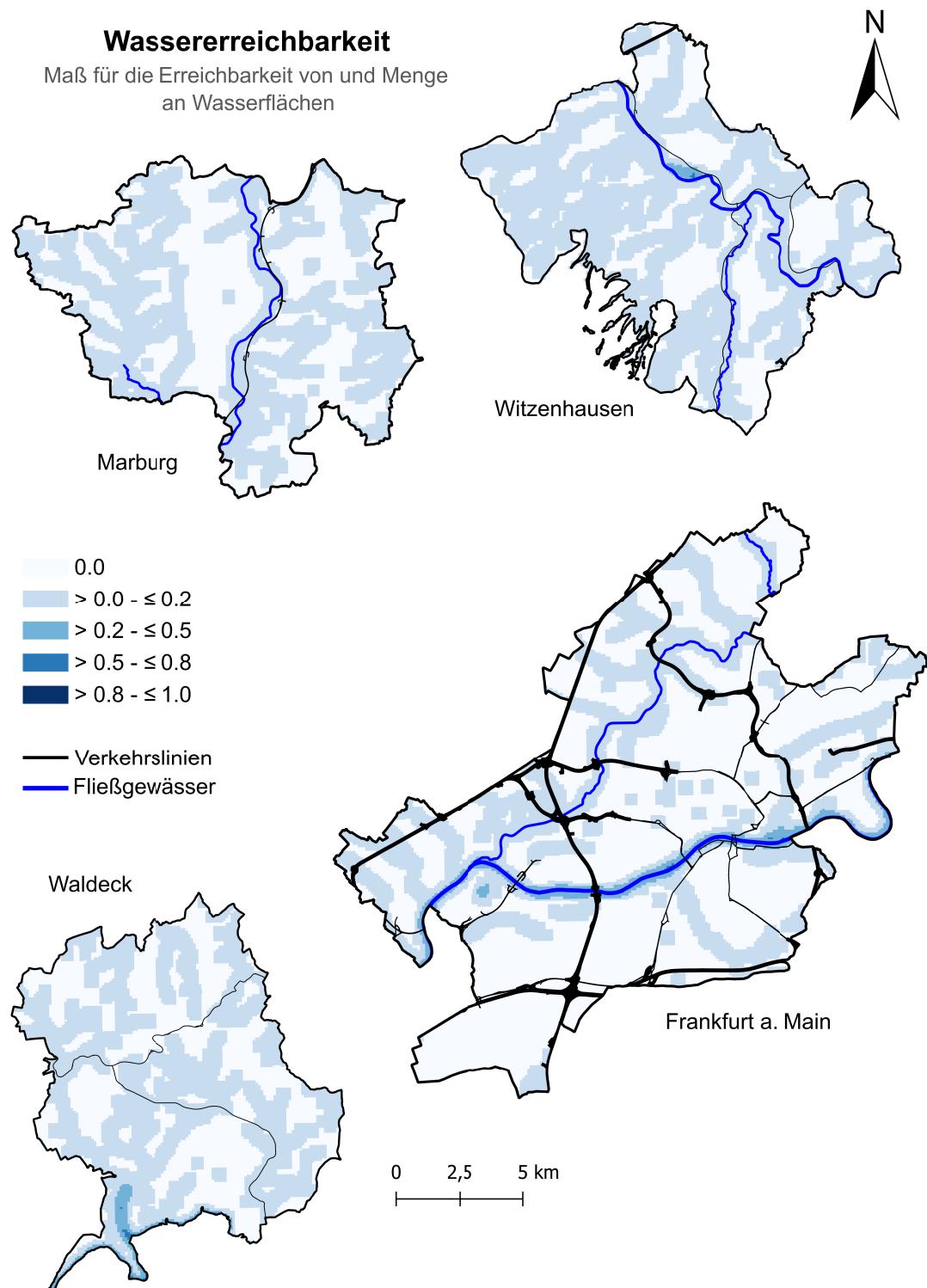


Abbildung 9.17.: Visualisierung der Wassererreichbarkeit für beispielhaft ausgewählte Gemeinden. Räumliche Einheit ist hierbei die jeweils betrachtete Gitterzelle sowie die 300 m-Nachbarschaft.

10. Stadtstrukturtypen im besiedelten Raum

Zur Erleichterung von Planungen auf dem Gebiet der Klimaanpassung wurden für den besiedelten Raum sogenannte Stadtstrukturtypen (SST) ermittelt. Auf der Grundlage dieser SST baut die Konzeption von Klimaanpassungs-Maßnahmetypen auf (vgl. Abb. 3.1). Nachfolgend wird die Methodik zur Entwicklung der Stadtstrukturtypen beschrieben.

10.1. Aufgabenstellung im Kontext einer Siedlungsstrukturanalyse

In der Aufgabenstellung der Siedlungsstrukturanalyse liegt der Fokus auf der detaillierten Untersuchung und Bewertung der räumlichen Strukturen in Siedlungsgebieten unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren. Ein zentrales Ziel ist die systematische Erfassung und Klassifizierung der Siedlungsstrukturen, um ein Maß für Kompaktheit und Bebauungsdichte zu ermitteln. Zusätzlich wird der Anteil an Grünflächen analysiert, da dieser eine bedeutende Rolle hinsichtlich der kühlenden Wirkung auf das Stadtklima spielt. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Typisierung des besiedelten Raumes, wobei sowohl der Verstädterungsgrad als auch unterschiedliche Aspekte wie Bebauungshöhe, Versiegelungsanteil, Grünflächenanteil und Bevölkerungsdichte in Klassen unterteilt und differenziert dargestellt werden sollen. Diese facettenreiche Analyse ermöglicht eine umfassende Bewertung der Siedlungsstruktur und unterstützt die zielgerichtete Entwicklung urbaner und suburbaner Räume.

Das Vorgehen zur Bearbeitung der hier genannten Aspekte unterscheidet sich hinsichtlich der drei räumlichen Ebenen. Für die Landesebene wird auf die Raumstruktur (Strukturräume und Zentren-Betrachtung) fokussiert (siehe Abschnitt 10.3), während die Verknüpfung der Größenverteilung der Siedlungsgebiete sowie ihre Lage zueinander und die Bevölkerungsentwicklung für die regionale Ebene von Bedeutung sind (siehe Abschnitt 10.4). Auf lokaler Ebene (siehe Abschnitt 10.5) steht die Stadtstruktur im Zentrum. Zur fachlichen Einordnung des Zusammenhangs zwischen Siedlungsstruktur und Klimaanpassung wird im folgenden Abschnitt 10.2 auf konzeptionelle Vorarbeiten des Projektes KLIMA-wandel in der PRAXis (KLIMPRAX) hingewiesen.

10.2. Bestehende Vorarbeiten in Hessen aus dem Klimprax-Projekt

In diesem Abschnitt werden drei Methodenansätze beschrieben, die im Bericht „Hitze in der Stadt und kommunale Planung. Klimawandel in Hessen - Schwerpunktthema“ von 2017 [39] des KLIMPRAKX Projekts sowie im „Handlungsleitfaden zur kommunalen Klimaanpassung in Hessen – Hitze und Gesundheit“ von 2019 [38] vorgestellt wurden. Diese existierenden Ansätze können entsprechend der Datenverfügbarkeit genutzt werden und finden daher hier Erwähnung.

A. Typisierung der SST nach Versiegelungsgrad In der Klima(funktions)karte von Wiesbaden werden urbane Räume anhand des Versiegelungsgrades in verschiedene „städtische Klimafunktionsräume“ unterteilt. Die Klassen bzw. Kategorien sind wie folgt definiert:

- **Sehr hoher** Versiegelungsgrad (mehr als 90 %) mit geringem Vegetationsbestand und einem höchst intensiven innerstädtischen Überwärmungsgebiet mit eingeschränktem Luftaustausch;
- **Hoher** Versiegelungsgrad (70 % bis 90 %) mit geringem Vegetationsbestand und intensivem innerstädtischen Überwärmungsgebiet mit eingeschränktem Luftaustausch;
- **Mittlerer** Versiegelungsgrad (40 % bis 70 %) mit mittlerem Vegetationsbestand und Überwärmungsgebiet mit teilweise eingeschränktem Luftaustausch;
- **Mittlerer bis geringer** Versiegelungsgrad (10 % bis 40 %), mit hohem bis sehr hohem Vegetationsanteil und geringfügig überwärmtem Gebiet, welches bebaut oder versiegelt ist, und einer annähernd funktionsfähigen Belüftung.

Informationen zum Versiegelungsgrad finden sich im Detail in Kapitel 7. Klimatische Pufferzonen stellen Park- und Grünanlagen, Friedhöfe (Parkklima) sowie Kleingärten und Erwerbsgartenbau (Klima der Gartenbauzone) dar. Darüber hinaus werden vier Bebauungsumgebungen unterschieden und differenziert: Freifläche, dörfliches Umland, Siedlung, locker bebaut und ländliches Umland mit Wald [39]. Basierend auf dem Versiegelungsgrad können Gemeindegebietsflächen hinsichtlich ihrer thermischen Belastung klassifiziert werden. Diese Klassifizierung dient der qualitativen Einstufung der Belastungsgebiete. Individuelle Rahmenbedingungen wie Topografie oder Lage der Kommune werden nicht berücksichtigt [38, S. 76].

B. SST nach Bebauungstypen und Flächenanteilen Dieser Ansatz typisiert das Stadtclima anhand der Bebauungsstrukturen und Flächennutzung [38, Modul 1, B1.6]. Basis bildet das DWD-Werkzeug zur Flächenanalyse Informationsportal Klimaanpassung in Städten (INKAS) [1]. Hier werden insgesamt 9 Bebauungstypen unterschieden: (1)

Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung, (2) Dorfkern und Einfamilienhaussiedlung, (3) Reihenhaussiedlung, (4) Zeilenbebauung, (5) Zeilenbebauung und Hochhäuser, (6) Blockbebauung, (7) Citybebauung, (8) Mittelalterliche Altstadt und (9) Industrie- und Lagergebäude. Die Ableitung der Wärmebelastung erfolgt für jeden Bebauungstyp mithilfe dreier Flächenanteile, den sogenannten Flächen-Indikatoren: Flächenanteil der Gebäude (Bebauung), Anteil der versiegelten Fläche und Anteil der unversiegelten Fläche zwischen der Bebauung, die ebenfalls entsprechend aufgenommen werden.

C. SST nach Klimatopen (VDI 3787 Blatt 1) Der Handlungsleitfaden [38, S. 78f] erläutert die Klimatope wie folgt:

„ Die VDI-Richtlinie unterscheidet bebaute und nicht bebaute Gebiete, sodass alle Flächen ihres Gemeindegebiets klassifiziert werden können. Damit haben Gemeinden eine Grundlage für die Einschätzung der Flächen als Belastungs- bzw. Ausgleichsräume. Die Einstufung erfolgt qualitativ. Die Herangehensweise berücksichtigt keine individuellen Rahmenbedingungen der Kommune, wie die Topografie oder die Lage der Kommune. Datengrundlagen für die Zuordnung zu Klimatopen sind Nutzungsklassen, wie sie beispielsweise in den Datensätzen CORINE Land Cover (CLC) oder ATKIS enthalten sind. Auch Luftbildauswertungen eignen sich als Grundlage. Zusätzlich werden Informationen zum Relief und zur Oberflächenstruktur benötigt, z. B. aus digitalen Höhenmodellen. Ergänzend kann eine qualitative Bewertung der Intensität der Kaltluftentstehung anhand von Klimatopen vorgenommen werden “ [38, S. 80].

Tabelle 10.1 fasst die Bewertung der Intensität der Kaltluftentstehung zusammen.

Tabelle 10.1.: Intensität der Kaltluftentstehung verschiedener Klimatope.

Klimatop	Intensität der Kaltluftentstehung
Freiland und Acker	sehr hoch
Parkflächen und Kleingärten	sehr hoch
Wälder	mittel

10.3. Landesebene

Auf Landesebene stehen bei der Untersuchung der Raumstrukturen die sogenannten „Strukturräume“ im Mittelpunkt. Strukturräume umfassen hochverdichtete Räume, verdichtete Räume, ländliche Räume mit Verdichtungsansätzen sowie dünn besiedelte ländliche Räume. Des Weiteren sind Ober- und Mittelzentren sowie deren Subkategorien geeignete Ausgangspunkte. All diese Informationen sind aus dem LEP erschließbar. Abbildung 10.1 zeigt die wichtigsten Fachinformationen.

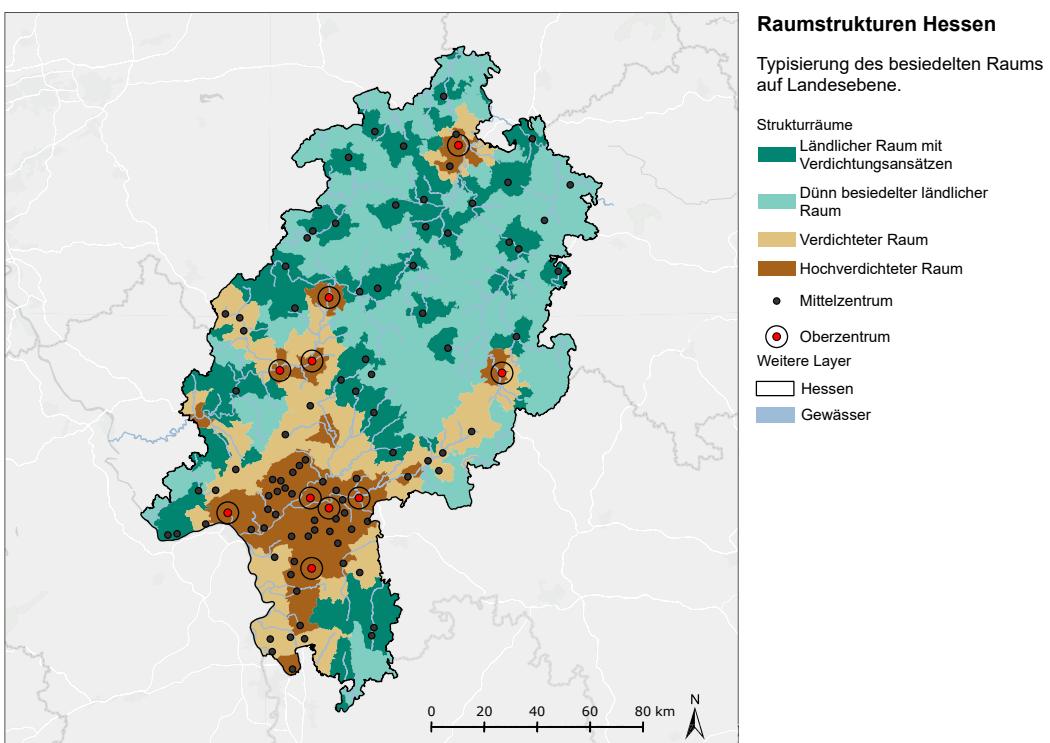


Abbildung 10.1.: Wichtigste Fachinformationen zur Darstellung der landesweiten Raumstruktur in Hessen.

10.4. Regionalebene

Auf der regionalen Ebene findet die Entwicklung einer geeigneten Typisierung statt. Diese Typisierung beinhaltet (a) die Größenverteilung der Siedlungsgebiete, (b) deren Lagebeziehung und (c) die entsprechenden Bevölkerungsveränderungen. Die Vorgehensweise zur Typisierung umfasst zum einen Analysen zu den Gebäudebeständen sowie der Einwohnerzahl. Notwendige Daten existieren bereits, wie z. B. in Kapitel 6 beschrieben oder lassen sich aus vorhandenen Datensätzen (z. B. Hausumrisse) ableiten. Auch die Bevölkerungsveränderungen sind bekannt (siehe Kapitel 6) und bilden eine wichtige Grundlage für die Identifizierung von Handlungsschwerpunkten auf regionaler Ebene.

10.5. Lokale Ebene: Gebäudebasierte Siedlungsstruktur

Die gebäudebasierte Siedlungsstruktur erlaubt es, einen Betrachtungsraum auf lokaler Ebene mittels Gebäudetypen nach baustrukturellen Eigenschaften des Siedlungsbereichs zu gliedern. Sie gibt Aussagen zur städtebaulichen Form. Davon abgeleitet erlauben sich auch Rückschlüsse auf die Nutzung, wie Wohnen oder Arbeiten.

Informationen zur Siedlungsstruktur liegen nicht flächendeckend für Deutschland oder das Land Hessen vor, eine mögliche Lösung ist jedoch ein passender Schätzansatz. Hierzu sind Informationen zu vorkommenden Gebäuden wichtig, um auf dieser Basis eine Zuordnung von Einzelgebäuden zu Gebäudetypen vornehmen zu können und diese dann zu sogenannten Stadtstrukturtypen (SST) zusammenzufassen.

10.5.1. Stadtstrukturtypen in der Klimaanpassung

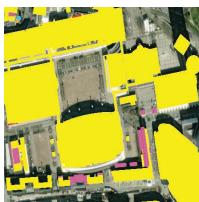
Strukturtypenansätze eignen sich, wenn Informationen zu, wie hier, städtebaulichen Kontexten erforderlich sind und die Gesamtheit einer Siedlungsstruktur gegliedert werden soll. Hierzu werden meist automatisierte Ansätze verwendet. SST spiegeln das Wissen zu Gebäudeformen und damit verbunden deren Nutzung wider. Die hier verwendeten Typen haben den Vorteil, dass sie sich an den in der Planung verwendeten städtebaulichen Definitionen orientieren und entsprechend bestimmter Handlungsfelder angepasst werden können. In der Klimaanpassung ist eine Typisierung des Gebäudebestandes und des baulich geprägten Raumes interessant, die die Maßnahmenplanung vereinfacht und eine Verortung von Maßnahmen ermöglicht. Ziel des hier beschriebenen Stadtstrukturtypenansatzes ist es, den baulich geprägten Raum und damit Gebäude und den sie umgebenden räumlichen Kontext für die Entwicklung von Planungshilfen in der Klimaanpassung und dem Klimaschutz bereitzustellen.

In diesem Projekt erfolgt die Bestimmung der SST durch einen Ansatz der geometrische Eigenschaften auf Gebäudeebene und die Landbedeckung zusammenführt. Die Geometrien der Gebäude, wie zum Beispiel deren Grundfläche und Höhe, werden durch Vektordaten, die Landbedeckung wird mittels Rasterdaten beschrieben. Für letztere wird die in diesem Projekt ermittelte Landbedeckung genutzt und hierfür Anteilswerte der Landbedeckungsklassen in 100 m-Gitterzellen abgeleitet (siehe Kapitel 7 zu KI-basierter Klassifikation der Landbedeckung). Mittels eines Verfahrens des ML [34] wird auf Basis einer manuell erhobenen Stichprobe, die Gebäude einem Strukturtyp zuweist, und den Informationen zu Gebäudeeigenschaften und Landbedeckung der gesamte Gebäudebestand in Hessen klassifiziert. Dabei werden nach [33] acht verschiedene SST definiert. Die Strukturtypen sind denen des Projekts Klimaprax begrifflich ähnlich (siehe Abschnitt 10.2), allerdings werden sie auf eine andere Art und Weise abgeleitet. Im hier vorgestellten Ansatz werden mehrere Landbedeckungsklassen und Gebäudegeometrien verwendet. Im Austausch zwischen AG und AN wurden für das Projekt die folgenden Strukturtypen für den gebäudebasierten Ansatz festgelegt:

- 1 : Einfamilienhäuser [EFH]
- 2 : Hochhäuser [HH]
- 3 : Mehrfamilienhäuser [MFH]
- 4 : Blockrandbebauung [MFH-BR]
- 5 : Zeilenbebauung [MFH-Z]
- 6 : Bebauung hoher Dichte (öffentliche Gebäude) [OEG]
- 7 : Großflächige, niedrige Bebauung (Gebäude für Wirtschaft und Gewerbe) [WGL]
- 8 : Nebengebäude [NG]

Tabelle 10.2 stellt diese Strukturtypen vor und beschreibt sie anhand der Wahrnehmung durch den Menschen, dem geometrischen Modell (Gebäudepolygon) und charakteristischer Eigenschaften.

Tabelle 10.2.: Klassifizierung der Gebäudetypen. Bilderquellen: ©Google Streetview, BKG

Stadtbild	klassifizierte Gebäude	Gebäudetyp und Beschreibung
		<p>1. Bebauung hoher Dichte Öffentliche Gebäude und Gebäude mit Dienstleistungen sowie Büronutzungen</p>
		<p>2. Mehrfamilienhäuser Freistehende Gebäude mit Wohnnutzung und mehreren Wohneinheiten</p>
		<p>3. Hochhäuser Gebäude mit einer Höhe von über 22 m (Höhe des Fußbodens des höchsten Aufenthaltsraumes)</p>
		<p>4. Zeilenbebauung Zeilenartige Wohnbebauung mit mehreren Wohneinheiten</p>
		<p>5. Blockrandbebauung geschlossene Bebauung mit Wohn- und Mischnutzungen, „Gründerzeitquartier“</p>
		<p>6. Einfamilienhäuser Freistehende Gebäude mit Wohnnutzung und ein bis zwei Wohneinheiten</p>
		<p>7. Großflächige, niedrige Bauten Gebäude mit gewerblichen oder industriellen Nutzungen</p>
		<p>8. Nebengebäude</p>

10.5.2. Vorgehen zur automatisierten Ableitung von SST

Die automatisierte Ableitung von SST erfolgt auf der Ebene individueller Gebäude, deren Typ flächenbasiert auf eine 100 m-Gitterzelle aggregiert wird, um den baulichen Kontext widerzuspiegeln. Ein Abriss der Methodik ist in Abbildung 10.2 dargestellt, die den Workflow beschreibt.

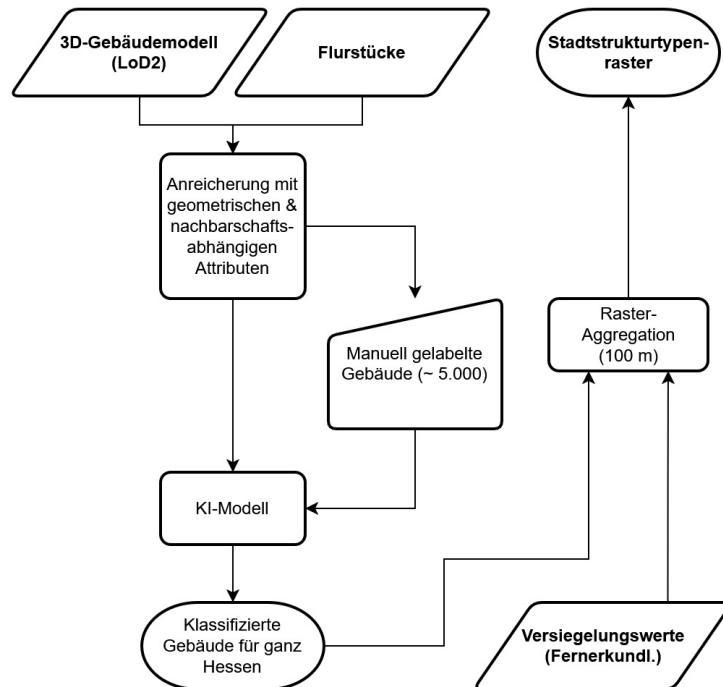


Abbildung 10.2.: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Bestimmung von SST.

Im Detail werden Gebäudegeometrien genutzt. Die Daten zu den Gebäudegeometrien werden aus dem amtlichen 3D-Gebäudemodell abgeleitet (LoD2) [46]. Die Gebäude werden zusätzlich zu den vorhandenen Basisinformationen, beispielsweise der Grundfläche, mit weiteren Attributen angereichert. Diese sogenannten urbanen Metriken beschreiben unter anderem die Form der Gebäude, ihre Nachbarschaftsbeziehungen und weitere Eigenschaften. (Für weitere Informationen zu urbanen Metriken siehe z. B. [9] und [87]). Für Deutschland ist ein Datensatz mit urbanen Metriken auf Gebäudeebene offen verfügbar [64]. Für diese Anwendung wurde ein Katalog aus 18 Metriken genutzt, welche ausschließlich die Form oder Nachbarschaften beschreiben, d. h. insbesondere keine Nutzungsinformationen. Diese Nutzungsinformationen liegen in den öffentlichen Gebäudedaten in Deutschland in den meisten Bundesländern nicht in ausreichender Qualität, insbesondere Vollständigkeit vor.

Mit den attribuierten Gebäudegeometrien wird ein Trainingsdatensatz für etwa 5.000 Gebäude in Hessen erzeugt. Hierzu werden zufällig ausgewählte Gebäude manuell einem Gebäudetyp zugewiesen. Mit diesen Trainingsdaten wird nun ein KI-Modell trainiert und validiert, das schätzt, welchem Typ ein bestimmtes Gebäude aufgrund seiner in den Metriken dargestellten Eigenschaften entspricht [43]. Für den Trainingsdatensatz werden Gebäude in den Regionen Mittelhessen und Südhessen ausgewählt. Für die Bestimmung der

SST auf Basis geometrischer Gebäudemerkmale hat sich eXtreme GradientBoosting (XGBoost) [23] als geeignetes Verfahren herausgestellt. XGBoost ist ein auf Entscheidungsbäumen basierendes Verfahren, das nacheinander eine Reihe kleiner Entscheidungsbäume aufbaut, wobei jeder einzelne die Fehler der vorherigen Bäume verbessert. Dieser Algorithmus ist für die hier verwendeten tabellarischen Daten (Gebäudegeometrien) besonders geeignet [31].

Die relevanten Gebäudemerkmale wurden auf Basis des 3D-Gebäudemodells (LoD2) sowie Flurstücksinformationen von 2022 berechnet. Tabelle 10.3 führt die Merkmale auf und beschreibt diese. Darüber hinaus wurde zusätzlich die in diesem Projekt ermittelte Landbedeckung als Attribut ergänzt. Jedes Gebäude erhält die Anteile der Landbedeckungsklassen der es umgebenden 100 m-Gitterzellen (siehe Kapitel 7) als zusätzliches Attribut. Somit kombiniert der Ansatz Geofachdaten zu Gebäuden und Daten der FE (segmentierte Landbedeckung), um den Gebäudebestand nach SST zu klassifizieren.

Tabelle 10.3.: Gebäudebasierte Metriken zur Schätzung von SST.

Kürzel	Beschreibung
Kürzel	Beschreibung
A	Grundfläche
CNT_ADD	Anzahl Adressen
CNT_AN	Anzahl Nachbarn im 50 m Umkreis
CNT_NDS	Anzahl Knoten der Geometrie
CNT_NN	Anzahl direkter Nachbarn
CNT_PRTS	Anzahl Gebäudeteile im LoD2
DIST_AN	Median Distanz zu Nachbarn in 50 m Umkreis
DIST_NN	Distanz zum nächsten Nachbarn
EDGE	Anteil geteilter Wandfläche mit Nachbarn
H	Gebäudehöhe
RATIO_HLL_V	Verhältnis Hüllfläche-Volumen
RATIO_MBR_A	Verhältnis Minimales Begrenzungsrechteck-Grundfläche
RATIO_PRCL_A	Verhältnis Flurstücksfläche-Grundfläche
RATIO_PRM_A	Verhältnis Umfang-Grundfläche
RF_A	Dachfläche
RF_TYPE	Hauptdachtyp
SHPX	Shape Index (Rundheitsmaß)
V	Gebäudevolumen

10.5.3. Ergebnis und Validierung

Im Ergebnis stehen durch die automatisierte Ableitung für Hessen für alle baulich geprägten Flächen eine Einteilung nach SST zur Verfügung. Den circa 5 Mio. Gebäuden des Landes Hessens ist ein Strukturtyp zugewiesen worden. Etwa die Hälfte der Gebäude wird als Einfamilienhäuser erfasst. Danach folgen Nebengebäude und die Klassen der Mehrfamilienhäuser. Zur Klasse der Hochhäuser werden etwa 20.000 Gebäude zugezählt (siehe Abbildung 10.3). Bevor die Einzelgebäude zur Bildung von Stadtstrukturtypen auf

Ebene der 100 m-Gitterzellen genutzt werden, erfolgt eine Validierung auf Gebäudeebene.

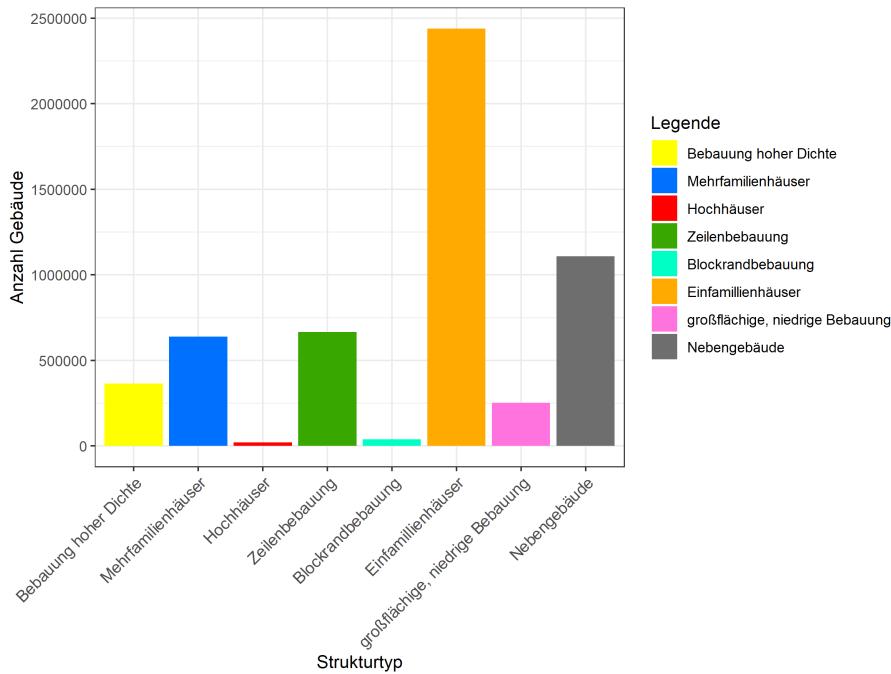


Abbildung 10.3.: Verteilung der SST nach Anzahl der Gebäude in Hessen.

Die Validierung der Methode erfolgt auf Ebene der Gebäude anhand einer zufälligen Stichprobe aus den manuell bestimmten Gebäuden. Für die großflächige automatische Bestimmung des SST wurden zunächst 4.765 einzelne Gebäudepolygone manuell klassifiziert. Diese wurden im Verhältnis 80 : 20 in Trainings- bzw. Testdaten aufgeteilt, mit denen das KI-Modell zunächst parametrisiert und trainiert wurde. Abbildung 10.4 zeigt die Trainings-/Testkurven des Modells, an denen erkennbar ist, dass das Training korrekt funktioniert hat. Die während des Trainings zu optimierenden Hyperparameter sowie die von uns gewählten endgültigen Werte sind in Tabelle 10.4 aufgeführt.

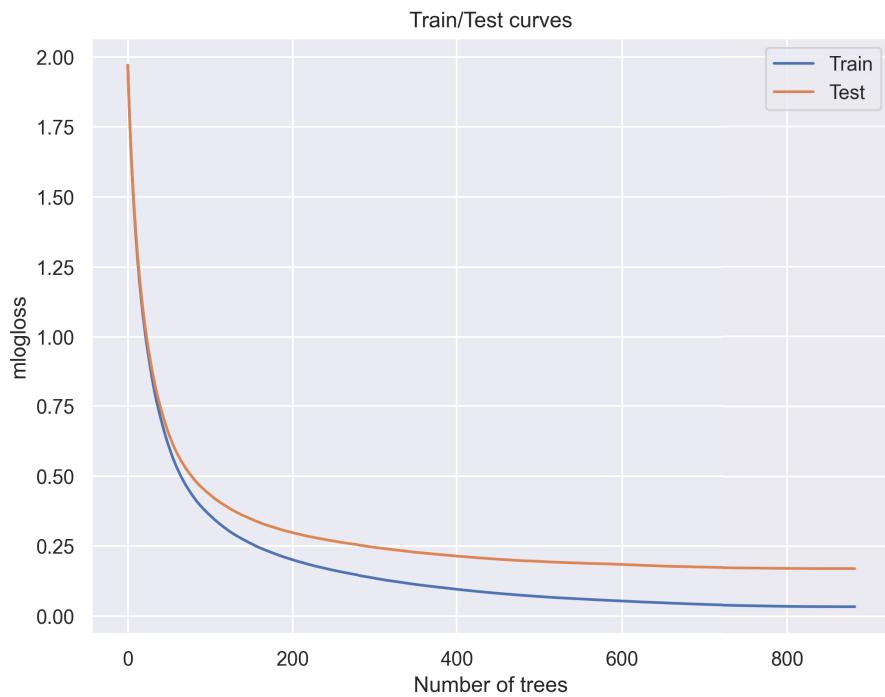


Abbildung 10.4.: Trainings- und Testkurven des XGBoost Modells.

Tabelle 10.4.: Hyperparameter für das Modell der SST.

Parameter	Wert
α	0.0
colsample_bytree	1.0
γ	0.1
λ	1.0
learning_rate	0.1
max_depth	4.0
min_child_weight	5.0
subsample	1.0

Die Validierung des Modells erfolgt mit den Testdaten unter Nutzung des SHapley Additive exPlanations (SHAP)-Verfahrens nach [61]. Abbildung 10.5 zeigt beispielhaft für die Klasse „Einfamilienhäuser“ die sogenannte Feature Importance, aus der man ableSEN kann, welche Gebäudemerkmale für die betrachtete Klasse am wichtigsten sind. Hier zeigt sich, wie gebäudebasierte Metriken und die Versiegelungsanteile zusammenwirken, um den Gebäudetyp zu schätzen. Insbesondere der Anteil niedrigwüchsiger Vegetation, die Gebäudehöhe (H) und das Gebäudevolumen (V) beschreiben den Gebäudetyp.

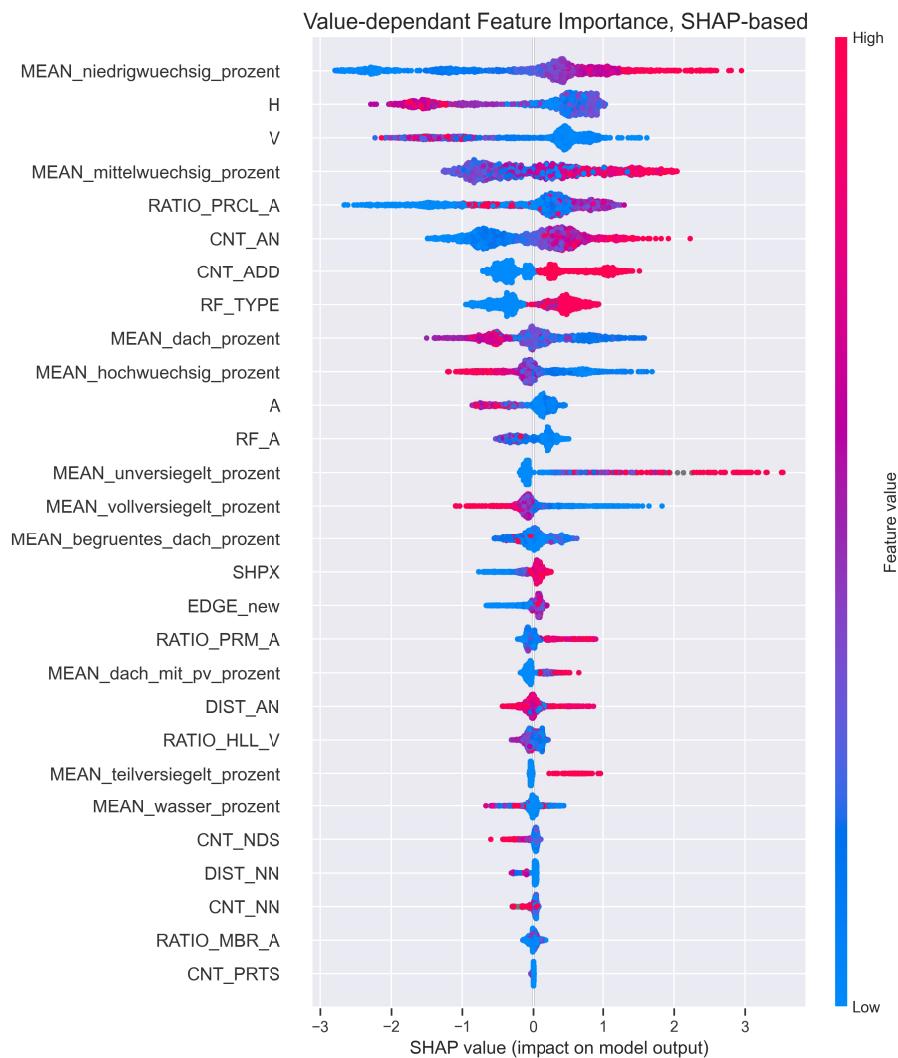


Abbildung 10.5.: Einfluss der Variablen auf die Schätzung des Gebäudetyps Einfamilienhaus.

Insgesamt zeigt das Modell sehr gute Ergebnisse: Die Gesamtgenauigkeit beträgt 95 %. Für einzelne Strukturtypen ist die (Nutzer-/Produzenten-)Genauigkeit in Tabelle 10.5 dargestellt, die mit über 90 % über alle Klassen hinweg, außer Nebengebäuden, für den angestrebten Anwendungsfall als ausgesprochen zufriedenstellend beschrieben werden kann (siehe Tabelle 10.5). Deutlich wird allerdings, dass die Klassen „Bebauung hoher Dichte (Öffentliche Gebäude) [OEG]“ und „Großflächige, niedrige Bebauung (Gebäude für Wirtschaft und Gewerbe) [WGL]“ schwieriger zu trennen sind. Dies gilt ebenfalls für die Typen der Mehrfamilienhausbebauung.

Tabelle 10.5.: Fehlermatrix der Validierungsdaten. Die Gesamtgenauigkeit beträgt 95%.

U.A. = Benutzergenauigkeit, P.A. = Produzentengenauigkeit.
 [OEG] = Bebauung hoher Dichte (Öffentliche Gebäude), [MFH] = Mehrfamilienhäuser,
 [HH] = Hochhäuser, [MFH-Z] = Zeilenbebauung, [MFH-BR] = Blockrandbebauung, [EFH] = Einfamilienhäuser,
 [WGL] = Gebäude für Wirtschaft und Gewerbe, [NG] = Nebengebäude

Kategorie	OEG	MFH	HH	MFH-Z	MFH-BR	EFH	WGL	NG	Sum	P.A.
OEG	163	4	1	2	0	2	6	2	180	90,6%
MFH	0	135	0	0	0	1	1	1	138	97,8%
HH	2	0	31	0	0	0	0	0	33	93,9%
MFH-Z	2	0	1	80	0	0	0	0	83	96,4%
MFH-BR	1	0	0	0	22	0	0	0	23	95,7%
EFH	1	1	0	0	0	317	0	5	324	97,8%
WGL	12	0	0	0	0	0	107	1	120	89,2%
NG	0	0	0	0	0	3	0	76	79	96,2%
Sum	181	140	33	82	22	323	114	85	980	
U.A.	90,1%	96,4%	93,9%	97,6%	100,0%	98,1%	93,9%	89,4%	95%	

10.5.4. SST auf Ebene der 100 m-Gitterzellen

In einem abschließenden Schritt müssen aus den Einzelgebäuden Siedlungsstrukturen abgeleitet werden. Hierzu werden für eine 100 m-Gitterzelle die Gebäude aggregiert dargestellt, wozu auf die 100 m-Gitterzelle die Bezeichnung des häufigsten Gebäudetyps übertragen wird und eine Filterung erfolgt. Die Verteilung der Stadtstrukturtypen in Hessen nach 100 m-Gitterzellen ist in Abbildung 10.6 dargestellt.

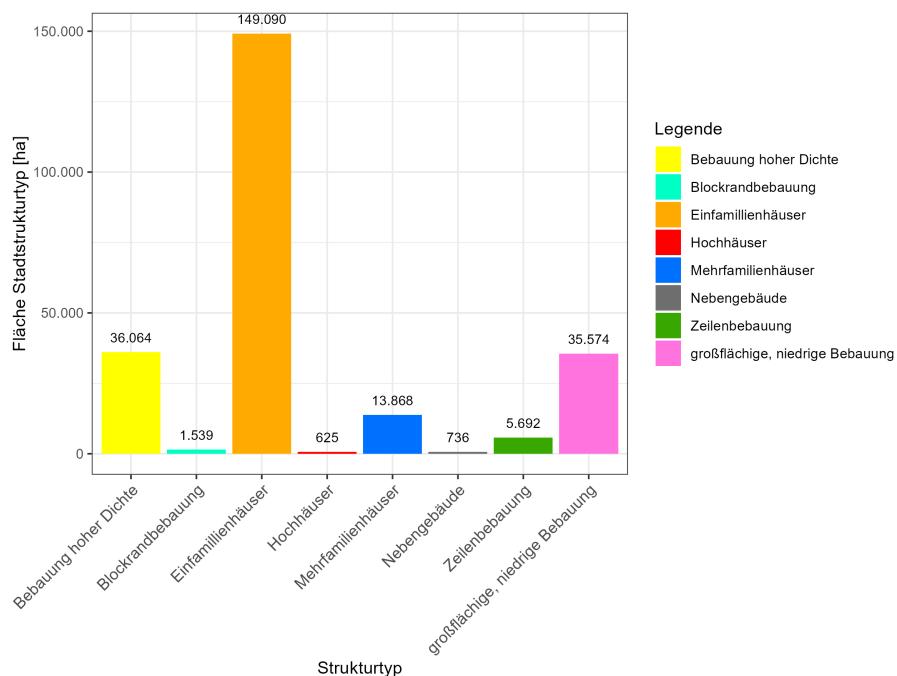


Abbildung 10.6.: Verteilung der SST auf Ebene der 100 m-Gitterzelle in Hessen [ha].

Die Aggregation erfolgt anhand der Flächenanteile aller nach Typ klassifizierten Gebäude, die innerhalb einer Zelle liegen. Durch das Vorliegen der Anteilswerte können Aussagen zu Homogenität oder Heterogenität der Stadtstruktur der 100 m-Gitterzelle getroffen werden (siehe Abschnitt 10.5.6). Abbildung 10.7 zeigt einen Kartenausschnitt des Ergebnisses der SST-Schätzung auf Ebene der 100 m-Gitterzellen für die Stadt Marburg. Hier wird die Eignung des landesweit verfügbaren Ergebnisses für die lokale Ebene deutlich. Die Bereiche der Innenstadt als Bebauung hoher Dichte, die Einfamilienhausbebauung, aber auch Zeilenbebauung in Randlagen und großflächige niedrige Bebauung der Gewerbe- und Industriegebiete treten deutlich hervor.

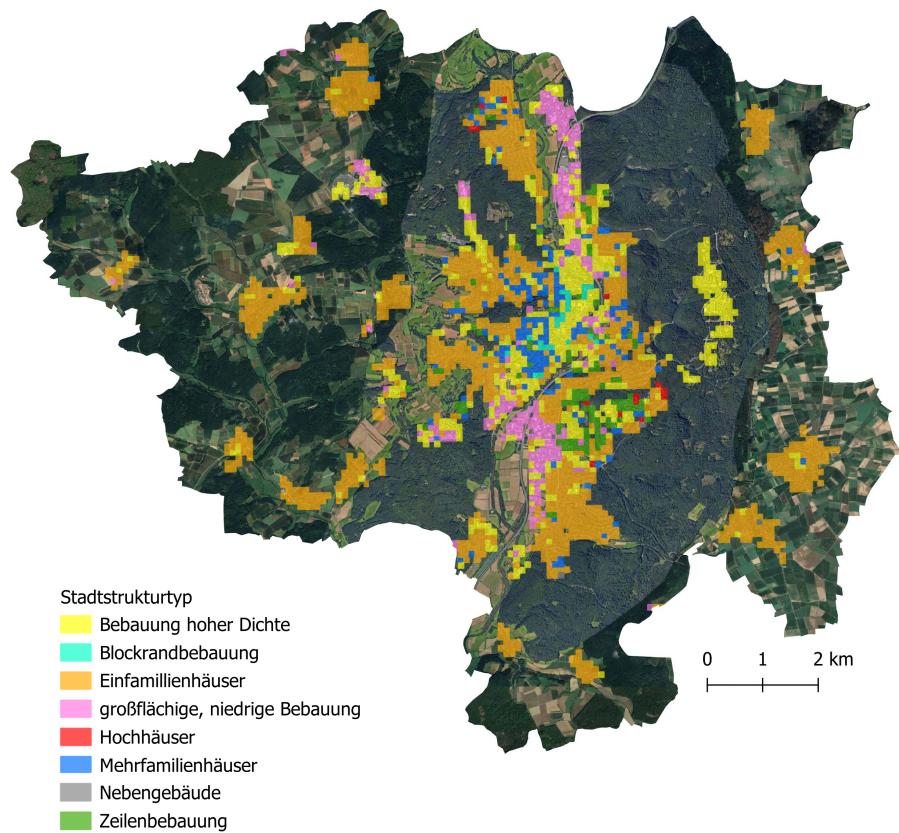


Abbildung 10.7.: SST in der Stadt Marburg.

Darauf werden weitere Schritte ergänzt, um eine möglichst gute Abbildung bebauter Bereiche zu erhalten, die im Folgenden beschrieben werden. Um möglichst genau Siedlungsstrukturen abzubilden, wird die Übertragung von Gebäudeinformationen auf die 100 m-Gitterzellen verfeinert. Es erfolgt eine Filterung von Flächen im Außenbereich. Insgesamt stehen vier Versionen zur Verfügung, die die SST auf sinnvolle Zuweisungen für den städtebaulichen Kontext reduzieren.

In der Version 1 (`stadtstrukturtypen_gitter_v1`) wird ab einem klassifizierten Gebäude einer 100 m-Gitterzelle der Typ des Gebäudes zugewiesen. Befindet sich die Fläche eines Einfamilienhauses innerhalb einer 100 m-Gitterzelle, wird diese als SST Einfamilienhaus definiert. Da meist mehrere Gebäude vertreten sind, erhält die Zelle den Wert des Gebäudetyps mit dem höchsten Anteil an Gebäudegrundfläche.

In der Version 2 (`stadtstrukturtypen_gitter_v2`) werden die Gitterzellen mit weniger als 2,5 % bebauter Gebäudegrundfläche ausgeschlossen. Dies filtert nicht sinnvolle Zuweisungen als Stadtstruktur durch landwirtschaftliche Flächen mit einzelnen Wirtschaftsgebäuden. Meistens werden hier die Wirtschaftsgebäude, die nicht im Modell trainiert wurden, einem am besten passenden Typ zugewiesen.

In der Version 3 (`stadtstrukturtypen_gitter_v3`) wird eine räumliche Kontextualisierung vorgenommen. „Inseln“ mit vier und weniger 100 m-Gitterzellen werden ausge-

schlossen. Dies ermöglicht es, weitere Flächen im Außenbereich zu reduzieren, die eine geringfügige Bebauung haben, die für die Klimaanpassung nicht relevant ist.

Final wird eine Version 4 (`stadtstrukturtypen_gitter_v4`) ausgegeben. Basierend auf den vorherigen Versionen beinhaltet diese eine manuelle Korrektur der Ergebnisse. Der Strukturtyp Hochhäuser wurde hierbei mittels Luftbildabgleich komplett auf Plausibilität geprüft und die 100 m-Gitterzellen entsprechend korrigiert. Grund hierfür ist die Bedeutung des Attributs Höhe für das Schätzergebnis. Hier können einzelne Gebäudeteile in den Eingangsdaten zu nicht zutreffenden Ergebnissen führen, z.B. Türme.

Das Vorgehen richtet sich an die Besonderheiten der Gebäudedaten und beinhaltet die Prüfung weiterer Ansätze zum Ausschluss von SST außerhalb eines städtebaulichen Kontexts. Zunächst ist festzuhalten, dass die öffentlich bereitgestellten Gebäudedaten im Bundesland Hessen eine geringe semantische Detaillierung haben. Gebäude und Bauwerke der Energieversorgung werden beispielsweise als „öffentliche“ in den Daten bezeichnet, wie ebenfalls Schulen. Entsprechend lassen sich Bauwerke und Gebäude der Energieversorgung im Außenbereich nicht auf diesem Wege ausschließen. Es wurde zudem geprüft, mittels der Ortslage oder der tatsächlichen Nutzung aus den ATKIS-Daten Außenbereichsflächen und landwirtschaftliche Gebäude oder Wirtschaftsgebäude auszuschließen. Hier ergeben sich dann durch die nicht immer konsistente Zuweisung von Ortslagen in öffentlichen Datensätzen erhebliche Schwierigkeiten, bspw. in der Berücksichtigung von Außenbereichen von Kasernen oder Schlossanlagen oder dem Ausschluss von Gewerbegebieten. Bei der tatsächlichen Nutzung zeigt sich die Herausforderung, den Bezug zur Klimaanpassung herzustellen. Hier wäre eine sehr umfassende Zuordnung einzelner Flächennutzungstypen erforderlich. Verkehrsflächen sollten ausgeschlossen sein, wenn es sich um Straßen handelt, allerdings nicht, wenn es sich um baulich geprägte Hafenflächen handelt. Wie diese Beispiele zeigen, kann der hier entwickelte Ansatz diese Dateneigenschaften abfangen und erlaubt somit eine effiziente und effektive Lösung zur Darstellung eines lokalen, stadtstrukturellen Kontextes. Entsprechend werden die oben beschriebenen Versionen 1 bis 4 als gut nachvollziehbar, reproduzierbar und für eine breite, landesweite Anwendung in der Klimaanpassung geeignet angesehen. Für die weitere Verwendung werden die Ergebnisse der Version 4 im 100 m-Gitternetz landesweit zur Verfügung gestellt.

10.5.5. Hintergrundinformationen zum verwendeten Datenmodell und Vergleich mit der Segmentierung

Die Modellierung von SST stützt sich auf die Gebäudedaten des amtlichen 3D-Gebäudemodells des BKG [46], Abschnitt 10.5.2. Für die Repräsentation in einem GIS und die Erstellung von Karten wird nach der Berechnung der Metriken für die Schätzung des Gebäudetypus aus dem 3D-Gebäudemodell ein 2D-Gebäudefußabdruck abgeleitet.

Die folgende Abbildung 10.8 zeigt den verwendeten LoD2-Gebäudedatensatz im Vergleich zum Ergebnis der KI-basierten Klassifikation der Landbedeckung aus Abschnitt 7.5. Zur Einordnung der Daten und zur Unterstützung der Interpretationsmöglichkeiten werden diese beiden Ergebnisse des Projekts mit aktuellen, offen verfügbaren Luftbildern verglichen. Die Abbildung veranschaulicht die Aktualität der im Projekt verwendeten amtli-

chen Basisdaten. Für die Projektbearbeitung wurden die aktuellsten verfügbaren Daten mit dem Stand 2022 verwendet. Neuere Daten aus 2023 und 2024 zeigen hier bauliche Veränderungen auf, die zwischenzeitlich stattgefunden haben. Landbedeckung (siehe Kapitel 7) und Gebäudedaten zusammen lassen hier bauliche Prozesse erkennbar werden. Eine weitere wichtige Unterscheidung zwischen Gebäudedaten und Landbedeckung liegt in der Definition eines Gebäudes. Für die Ableitung der SST werden nur Gebäude verwendet; bauliche Anlagen wie Überdachungen oder Sendemasten, die in den amtlichen Daten ebenfalls erfasst werden, werden für die Anwendung herausgefiltert, um die Qualität des KI-basierten Schätzansatzes zu verbessern. So können Flächen in der Landbedeckung als Dach dargestellt sein, allerdings nicht als Gebäude.



Abbildung 10.8.: Eigenschaften der Gebäudedaten im Vergleich zum Segmentierungsmo-
dell und aktuellen Luftbildern.

10.5.6. Hintergrundinformationen zur Aggregation von SST

Zur besseren Interpretierbarkeit der SST, die durch die Aggregation von Gebäudetypen auf die 100 m-Gitterzelle erfolgt, wird das Vorgehen der Aggregation nachfolgend näher beschrieben. Die Aggregation erfolgt anhand der Anteile der Flächen aller nach SST-Typ klassifizierten Gebäude. Zum Beispiel erhält eine Zelle den Wert „Blockrandbebauung“, wenn der Anteilswert von Gebäuden des Typs Blockrandbebauung höher ist, als der nächsthöchste Anteilswert. Abbildung 10.9 zeigt die Verteilung dieser Werte für alle bebauten 100 m-Gitterzellen für Hessen. So wird deutlich, dass meistens der Anteilswert bei 1 liegt. In solchen Fällen gibt es in einer Zelle nur einen Gebäudetyp, die Stadtstruktur ist folglich sehr homogen. Geringer wird dieser Wert, wenn mehrere Gebäudetypen innerhalb einer Zelle vorhanden sind. Abbildung 10.9 untermauert jedoch, dass diese Fälle deutlich weniger häufig sind. In einigen Fällen liegt der Anteil für den höchsten Anteilswert unter 0,5. Dies lässt auf sehr heterogene Stadtstrukturen rückschließen.

Der verwendete Strukturtypenansatz hat eine Genauigkeit in der Klassifikation, die für die Zielsetzung, den baulich geprägten Raum auf Ebene einer 100 m-Gitterzelle zu beschreiben, effektiv ist. Auf dieser Grundlage können räumliche Handlungsschwerpunkte abgegrenzt und priorisiert werden (Kapitel 14), Maßnahmen verortet werden (Kapitel 20) und konzeptionelle Grundlagen für die energieeffiziente Siedlungsentwicklung (Kapitel 24) gelegt werden. Darüber hinaus ließe sich der Ansatz weiterentwickeln, um ihn auch auf Gebäudeebene nutzen zu können. Für die Verwendung in unterschiedlichen lokalen Kontexten wären hierzu weitere Schritte sinnvoll, wie eine deutlich umfangreichere Trainingsdatenerhebung und eine Integration raumstruktureller Merkmale. Hierdurch ließen sich auch bis zu einem bestimmten Maß bauliche Sonderformen integrieren.

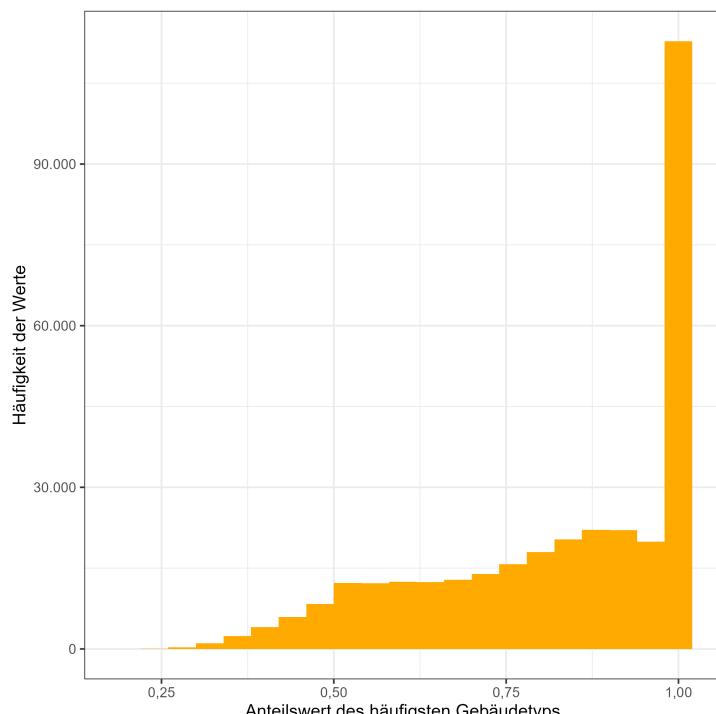


Abbildung 10.9.: Verteilung der Anteilswerte bei der Zuweisung einer 100 m-Gitterzelle zu einem dominierenden SST.

11. Themen im Kontext von Wasser

Der Themenschwerpunkt Wasser sollte u. a. dazu dienen, im Rahmen der Potenzial- und Defizitanalyse für die räumlichen Handlungsschwerpunkte nähere Informationen z. B. zur Bodenfeuchte zu erlangen. Dieses Kapitel fasst den Wissensstand und den im Rahmen dieses Projekts erzielten Arbeitsstand, die Möglichkeiten und Limitierungen hinsichtlich der Bodenfeuchte aus fernerkundlichen Daten und Methoden zusammen. Darüber hinaus informiert dieses Kapitel angesichts des fortschreitenden Klimawandels über in Hessen vorliegende Daten zur Ressource Grundwasser, speziell über seine Ausnutzungsgrade unter mittlerer und reduzierter Grundwasserbildung.

Vor dem Hintergrund der Möglichkeiten einer fernerkundlichen Datenanalyse in Kombination mit bestehenden Geofachdaten konzentrieren sich die Arbeiten im Themenschwerpunkt Wasser auf die Aspekte Bodenfeuchte (siehe Abschnitte 11.1 und 11.2) sowie auf den Ausnutzungsgrad des Grundwassers (siehe Abschnitt 11.3).

Hierbei ist zu beachten, dass aus Fernerkundungsdaten nur oberflächennahe Informationen gewonnen werden können. Dies gilt insbesondere für die am häufigsten verwendeten Multispektral-Sensoren auf luft- oder weltraumgestützten Plattformen. Der über solche Sensoren messbare Informationsgehalt beschränkt sich auf die oberste Bodenschicht im Millimeterbereich. Längerwellige Aufnahmen jenseits des sichtbaren Lichts bis hin zu Mikro- oder Radiowellen dagegen enthalten prinzipiell auch Informationen über tieferliegende Bodenschichten und erlauben unter gewissen Einschränkungen einen Rückschluss auf die Feuchtigkeit in tieferen Bodenschichten. Technologisch gesehen liegt dabei eine wesentliche Einschränkung in der geringeren verfügbaren Auflösung am Boden im Vergleich zu Multispektral-Sensoren. Daneben ist aus praktischer Sicht v. a. noch relevant, wie viele Sensoren oder Missionen überhaupt regelmäßig Daten liefern und welche Regionen dabei erfasst werden.

Aus diesen Gründen wurden im Vorhaben drei Arbeitsstränge verfolgt, die im Folgenden näher ausgeführt werden. Zum einen wurde eine intensive Datenrecherche mit Blick auf kostenfreie, regelmäßig verfügbare und über ganz Hessen aufgezeichnete Bodenfeuchte-Daten durchgeführt und mit den Projektbedarfen abgeglichen (siehe Abschnitt 11.1). Zu einer potenziellen Verfeinerung dieser Daten wurde eine stark methodisch und grundlagenorientierte Studie initiiert, in der ein KI-basiertes Verfahren unter Nutzung von Referenzstationen aus einem internationalen Bodenfeuchte-Netzwerk zur Schätzung der oberflächennahen Bodenfeuchte entwickelt wurde (siehe Abschnitt 11.2). Der dritte Strang umfasst schließlich die Ableitung des Ausnutzungsgrades des Grundwassers aufbauend auf bereits für Hessen aufbereiteten Daten (siehe Abschnitt 11.3).

11.1. Existierende fernerkundliche Bodenfeuchteprodukte

Im Zuge der Recherche nach bestehenden, regelmäßig fortgeführten, frei verfügbaren und für Hessen anwendbaren Datenquellen zur Bodenfeuchte wurden mehrere Dutzend Studien und Datenbanken analysiert. Tabelle 11.1 gibt eine Übersicht über jene sieben Datenquellen, die den Bedarfen des Projekts am nächsten kommen. Wie anhand der primären Anwendungsfelder ersichtlich wird, ist der Hauptanwendungszweck dieser Daten die Klima- und Wettermodellierung sowie daraus abgeleiteten Prognosen. Dementsprechend wird auf langfristige Messreihen mit Aufnahmzyklen von wenigen Stunden bis maximal zwei Tagen Wert gelegt. Die eingangs erwähnte niedrigere Auflösung am Boden von mehreren Kilometern ist ein typisches Merkmal solcher Datenquellen.

Die noch am besten für die Projektbedarfe geeignete Datenquelle ist die Soil Moisture Active Passive (SMAP)-Mission(en) der NASA (siehe Tabelle 11.1, Zeile 6).

Die Charakteristiken lassen sich wie folgt zusammenfassen und bewerten: Aktuell verwendet wird die SMAP L4 Sensorplattform mit einer globalen dreistündlichen Datenerhebung. Es handelt sich dabei um ein L-Band Radiometer, sodass Informationen über die oberflächennahe Bodenfeuchte im Bereich 0 cm bis 5 cm Tiefe abgeleitet werden können. Die native räumliche Auflösung von 40 km wird durch spezielle Signalverarbeitungsalgorithmen vom Anbieter NASA für eine finale Auflösung eines Rasters von 9 km mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag prozessiert. Diese Daten werden im sog. EASE-Raster zur Verfügung gestellt.

Somit liegen die standardisierten Bodenfeuchtedaten seit 2015 im Ein- bis Zweitagerhythmus vor, werden auch weiterhin kostenfrei und standardisiert aufbereitet und können über ein Portal heruntergeladen werden. Mit Rasterzellen von 9 km Seitenlänge zeigen die SMAP-Daten zwar im Vergleich zu allen anderen Datenquellen noch die beste geometrische Auflösung, eine mögliche Anwendung mit dieser Auflösung beschränkt sich jedoch weitestgehend auf die Landesebene, außerhalb von Siedlungen.

Abbildung 11.1 zeigt die mittlere, oberflächennahe Bodenfeuchte, in einer Tiefe von 0 cm bis 5 cm für Hessen, basierend auf Fernerkundungsdaten des SMAP L4-Sensorsystems.

Die Daten wurden für die Sommermonate von 2018 bis 2022 berechnet und in 100 m-Gitterzellen dargestellt. Für die Visualisierung sind die Bodenfeuchtwerte in vier Kategorien eingeteilt: die niedrigsten 40 %, mittleren 20 %, zweithöchsten 20 % und höchsten 20 %, die jeweils in verschiedenen Blautönen dargestellt sind.

Wie man aus der Abbildung 11.2 entnehmen kann, konzentrieren sich erwartungsgemäß die höchsten Bodenfeuchtwerte vor allem in den ausgedehnteren Waldregionen im nördlichen Teil Hessens sowie an den dortigen östlichen und westlichen Landesgrenzen. Deutlich trockenere Regionen befinden sich dagegen z. B. in der Rhein-Main-Region im südlichen Teil Hessens.

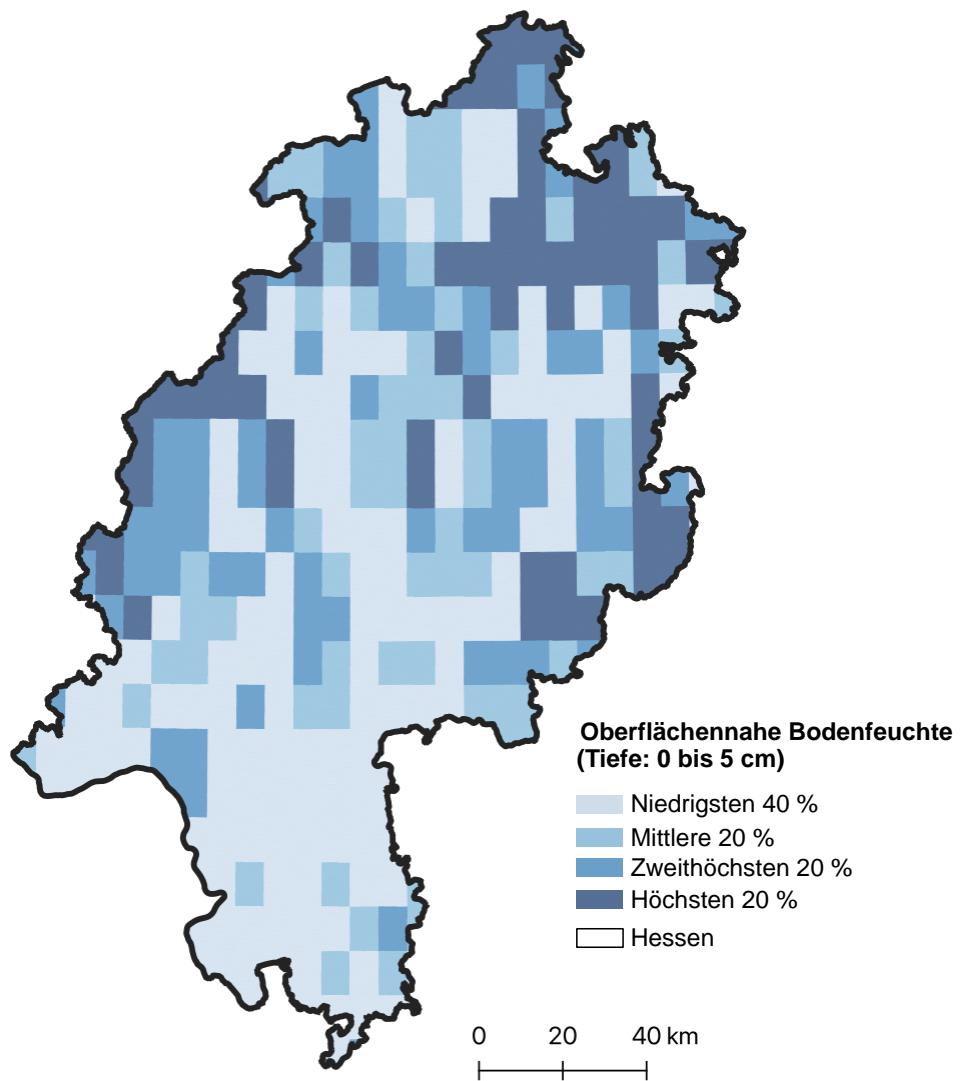


Abbildung 11.1.: Mittlere, oberflächennahe Bodenfeuchte des SMAP L4 Sensorsystems der Sommermonate 2018 bis 2022, berechnet für die 100 m-Gitterzellen. Datengrundlage: SMAP L4 globale 3-stündliche 9 km Auflösung im EASE-Raster für die oberflächennahe Bodenfeuchte.

Tabelle 11.1.: Übersicht zu ausgewählten, aktuell verfügbaren satellitenbasierten Bodenfeuchteprodukten.

Herausgeber	Zeitliche Verfügbarkeit	Zeitliche Auflösung	Räumliche Auflösung	Name & Sensorsystem	Primäre Anwendungen
NASA	2012 bis heute	täglich	25 km × 25 km	AMSR-E; AMSR2 Unified Level-2B Advanced Microwave Scanning Radiometer SSM-ASCAT-NRT-DIS	Klimamodellierung, numerische Wettervorhersagen
EUMET SAT H-SAF	2007 bis heute	1 d bis 2 d	25 km × 25 km	(H08) Small-scale surface soil moisture by radar scatterometer	Klimamodellierung, numerische Wettervorhersagen
CESBIO	2010 bis heute	1 d bis 2 d	25 km × 25 km	SMOS Soil Moisture and Ocean Salinity	Klimamodellierung, numerische Wettervorhersagen
ESA	2010 bis heute	1 d bis 2 d	15 km × 15 km	SMOS	Klimamodellierung, numerische Wettervorhersagen
BEC	2010 bis heute	täglich	15 km × 15 km 25 km × 25 km	SMOS	Klimamodellierung, numerische Wettervorhersagen
NASA	2015 bis heute	1 d bis 2 d	9 km × 9 km	SMAP	Klimamodellierung, numerische Wettervorhersagen
NOAA	2012 bis heute	6 h	0,25° × 0,25°	Merged Active & Passive Microwave Sensors (SMOPS)	Klimamodellierung, numerische Wettervorhersagen

11.2. Ermittlung der Bodenfeuchte mittels fernerkundlicher Methoden

11.2.1. Einleitung

Die Trainingsdaten im Bereich „Bodenfeuchte“ basieren auf Daten des International Soil Moisture Network (ISMN), näher beschrieben in Abschnitt 11.2.2. Entscheidend ist hierbei, dass die Bodenfeuchtwerte an unterschiedlichen Standorten (Bodenart, -typ, etc.) mit entsprechenden Sensoren erfasst werden. Zusätzlich wurden noch einige weitere Datenquellen recherchiert, deren Messwerte jedoch entweder zu kurze Zeitreihen abbilden und damit nicht repräsentativ sind oder nicht mit den gleichen Aufnahmeparametern (z.B. bzgl. Sondentiefe) aufgezeichnet wurden. Wie weiter unten beschrieben, konnten jedoch für eine unabhängige Validierung Bodenfeuchtedaten der Universität Gießen herangezogen werden, die mit den Standards des ISMN Datensatzes übereinstimmen.

11.2.2. Datengrundlage

Das ISMN sammelt Bodenfeuchte-Daten verschiedener Initiativen europaweit und stellt diese gebündelt zur Verfügung. ISMN repräsentiert folglich eine Datenbank zur Validierung und Verbesserung globaler Satellitenprodukte sowie von Modellen für die Landoberfläche, das Klima und die Hydrologie. Es handelt sich um die Ergebnisse von Bodenfeuchte-Messungen in verschiedenen Bodenhorizonten, die mitsamt Metadaten frei verfügbar sind. Des Weiteren werden die statischen Zusatzinformationen Köppen-Geiger-Klimaklasse, Bodentyp und Landbedeckung zur Verfügung gestellt.

Alle Eingangsdaten werden durch das ISMN harmonisiert in Bezug auf das Datenformat, fehlende Werte, zeitliche Auflösung und physikalische Einheit der Messungen. Das Resultat entspricht dem ISMN-Standard mit stündlicher Datenbereitstellung, einem einheitlichen Datenformat, koordinierter Weltzeit und einheitlichen Einheiten. Weiterhin werden Werte, die nicht den Erwartungen entsprechen, mit sog. Quality Flags versehen, sodass leicht erkennbar ist, welche Messungen ggf. ausgeschlossen werden müssen.

Das Herunterladen der Daten erfolgt über die Website des ISMN. Hierbei werden die Daten nach Registrierung zur freien Verfügung gestellt.

11.2.3. Methodisches Vorgehen zur KI-basierten Schätzung der Bodenfeuchte

Die Ermittlung der Bodenfeuchte erfolgt auf Basis eines tiefen neuronalen Netzes, dessen Architektur eigens für diese Aufgabenstellung adaptiert wurde.

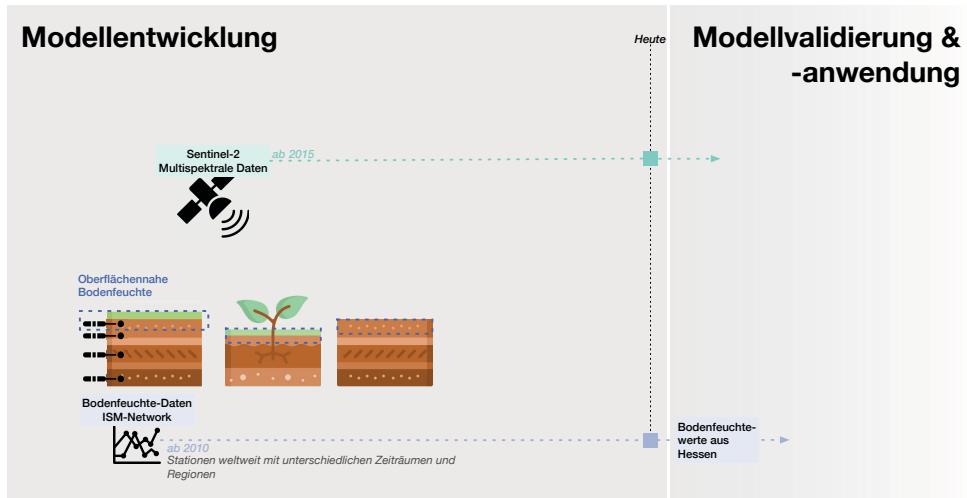


Abbildung 11.2.: Schema der Modellentwicklung und -Validierung zur Schätzung der Bodenfeuchte.

Im Gegensatz zu dem in Kapitel 8 beschriebenen Klassifikationsansatz zielt die hier zu wählende Methode auf eine nichtlineare, mehrdimensionale Regression (Schätzung) ab, um den Zusammenhang zwischen Spektralwerten der Fernerkundung und Bodenfeuchtwerten herzustellen, d. h. für Training und Test werden Daten des ISMN mit Spektraldataen kombiniert. Der Aufnahmezeitpunkt der Spektraldataen sollte daher dem Aufnahmezeitpunkt der Bodenfeuchtemessung entsprechen. Somit kann sichergestellt werden, dass die spektrale Information mit dem jeweiligen Bodenfeuchte-Messwert sowohl räumlich als auch zeitlich übereinstimmt. Der AN hat in diesem Kontext auf kleinräumiger Skala bereits Methoden entwickelt und Expertise aufgebaut [49, 52, 69, 70]. Der Übergang von punktuellen Daten auf eine flächendeckende, räumliche Modellierung der Bodenfeuchte mit satellitenbasierten Daten ist u. a. Gegenstand aktueller wissenschaftlicher Studien.

Abbildung 11.2 zeigt den schematischen Ablauf des entwickelten Verfahrens zur Bodenfeuchteschätzung. Auf der linken Seite der Abbildung 11.2 finden sich unter „Modellentwicklung“ die Eingangsdaten des tiefen neuronalen Netzes. Diese umfassen die Zeitreihen der tiefengestaffelten Bodenfeuchtwerte an den unterschiedlichen Messstationen des ISMN-Netzwerkes. Zusätzlich stehen für Zeitpunkte ab 2015 multispektrale Bilddaten der Sentinel-2 Mission zur Verfügung, mit deren Hilfe die zeitabhängige Phänomenologie der Landbedeckung in der Umgebung der Messstationen als weitere Beobachtungen in das Netzwerk integriert werden. Im Rahmen der ausgiebigen Entwicklungsphase hat sich zudem gezeigt, dass die Hinzunahme eines DOM sowie Informationen über den Bodentyp aus Geofachdatenbanken in der Umgebung der Messstationen eine weitere Steigerung der Genauigkeit erbringt.

Nachdem in dem Zeitraum bis zur Marke „Heute“ sowohl die Eingangsdaten als auch die zu erzielenden Bodenfeuchtwerte bekannt sind, kann das tiefe neuronale Netz durch geeignetes Aufsplitten von Trainings- und Validierungsdaten entsprechend gelernt werden. D. h. die Parameter des Netzes werden iterativ so justiert, dass die vorgegebenen Zielgrößen (hier: Bodenfeuchtwerte) aus den Eingangsdaten bestmöglich ermittelt werden können. Entscheidend ist hierbei, dass sowohl Trainings- als auch Validierungsdaten so repräsentativ gewählt werden, dass das neuronale Netz ausreichend generalisieren kann;

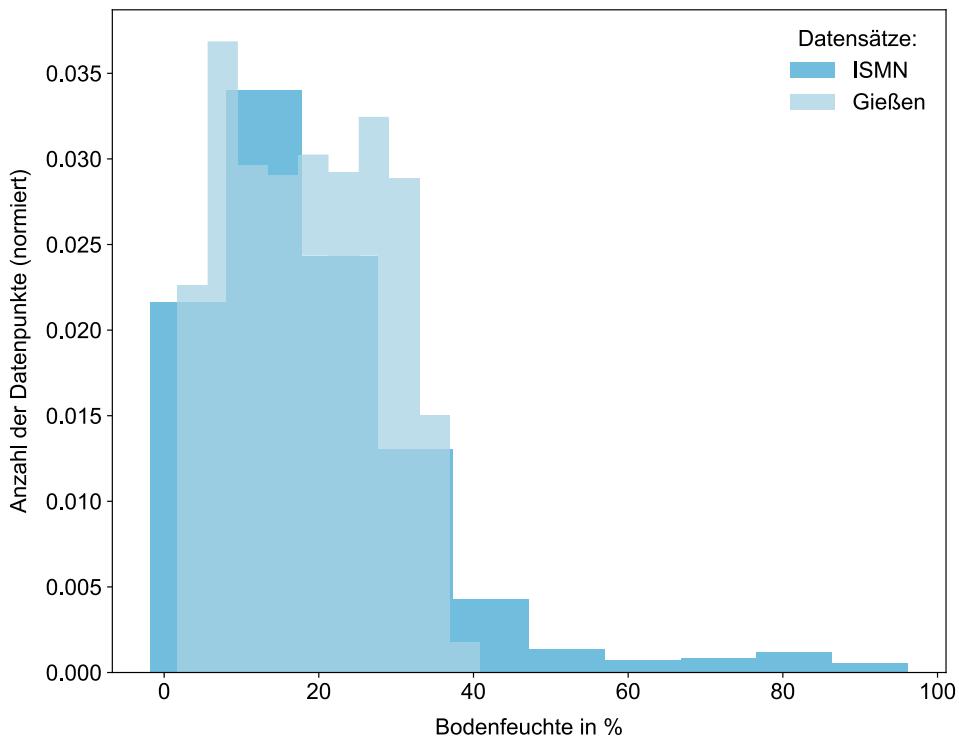


Abbildung 11.3.: Histogramm der Bodenfeuchtwerte des ISMN und des Datensatzes der Universität Gießen.

das bedeutet, dass die Genauigkeit der ermittelten Bodenfeuchtwerte auch bei variierten Eingangsdaten ähnlich hoch bleibt.

Um diese Generalisierungsfähigkeit zu überprüfen und ggf. zu verbessern, werden hier weitere, zuvor nicht verwendete Daten – in diesem Fall der Universität Gießen – eingeführt, wie auf der rechten Seite der Abbildung 11.2 unter „Modellvalidierung und Anwendung“ zu sehen ist.

Eine Gegenüberstellung der Messwertverteilung der beiden Datensätze zeigt Abbildung 11.3. Auffällig ist, dass der ISMN-Datensatz eine deutlich größere Spannweite zeigt als der Datensatz der Universität Gießen, welcher den Bereich 0 % bis 45 % Bodenfeuchte (d. h. konkret Volumenprozent) umfasst. Dies muss im Rahmen des Trainingsprozesses der KI-Verfahren ausbalanciert werden, da die ermittelten Werte sonst verzerrt würden. Diese stratifizierte Aufteilung des ISMN-Datensatzes und des Datensatzes der Universität Gießen in jeweils einen Trainings- und einen Testdatensatz ist in Abbildung 11.4 dargestellt. Physikalisch betrachtet ist der Bereich 0 % bis 45 % jedoch völlig ausreichend, weil nahezu alle in Deutschland vorkommenden Böden bereits deutlich unter 50 % gesättigt sind und kein weiteres Wasser mehr aufnehmen können.

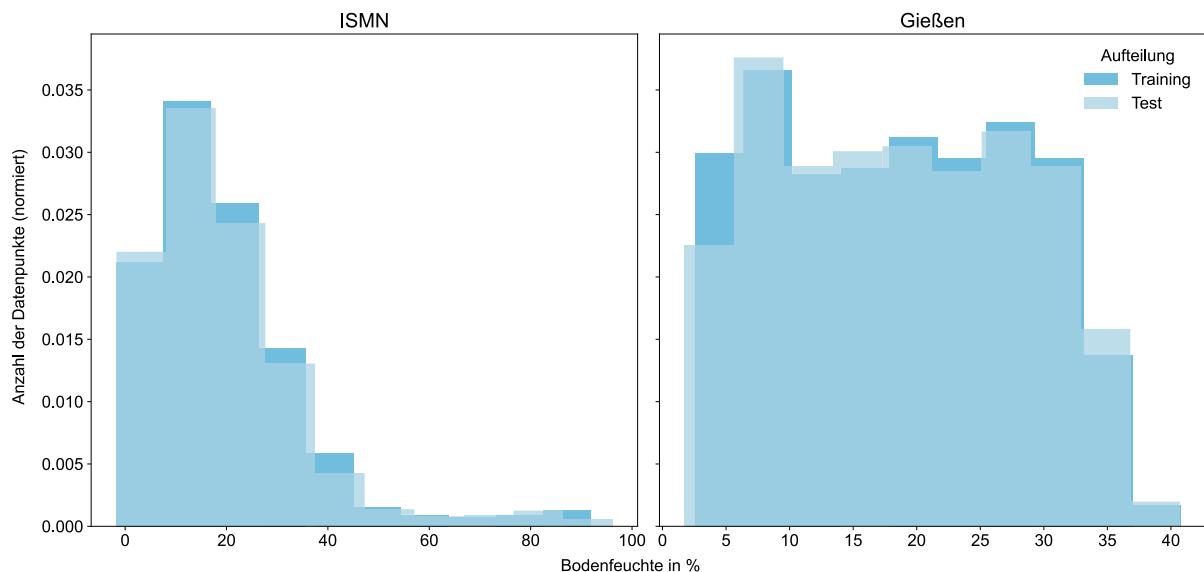


Abbildung 11.4.: Histogramme der Aufteilung der Bodenfeuchtwerte des ISMN (links) und des Datensatzes der Universität Gießen (rechts) in Trainings- und Testdaten.

11.2.4. Ergebnisse zur Bodenfeuchteschätzung und Diskussion mit Fazit

Das in Abbildung 11.5 dargestellte Streudiagramm zeigt das Ergebnis der Validierung. Die Streuung um die Winkelhalbierende gibt einen Aufschluss über die Genauigkeit sowie eventuelle Verzerrungen der Ergebnisse der Bodenfeuchteschätzung. Allein aus dem visuellen Eindruck wird deutlich, dass keine signifikante Verzerrung vorliegt, da die Punkte relativ symmetrisch um die Winkelhalbierende streuen. Dass auch die durchschnittliche Größe der Abweichung und damit die generelle Genauigkeit der Bodenfeuchtwerte als zufriedenstellend eingeschätzt werden kann, wird durch die Metriken „Bestimmtheitsmaß“, auch als R^2 oder Determinationskoeffizient bezeichnet und durch den mittleren absoluten Fehler, engl. mean absolute error (MAE) beschrieben.

R^2 gibt an, wie gut die Daten durch das Modell erklärt werden. Er hat Werte zwischen 0 und 1, wobei 1 eine perfekte Übereinstimmung darstellt. Der Wert von 0.74 in Abbildung 11.5 bedeutet, dass das erarbeitete Schätzmodell etwa 74 % der Varianz in den tatsächlichen Messungen durch die Vorhersagen erklärt. Der MAE ist ein Maß für die durchschnittliche Abweichung zwischen den tatsächlichen und den vorhergesagten Werten, gemessen in derselben Einheit wie die Daten. Ein niedriger MAE bedeutet eine höhere Genauigkeit. In Abbildung 11.5 beträgt der MAE 3,4 % Bodenfeuchte für die Schätzung der Bodenfeuchte auf dem Gießen-Datensatz. Das bedeutet, dass die durchschnittliche Abweichung der Vorhersagen vom tatsächlichen Wert im Gießen-Datensatz geringer ist.

Auch wenn diese Genauigkeitsmaße der Bodenfeuchteschätzung als sehr vielversprechend für das entwickelte KI-Verfahren einzustufen sind, muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass für eine auf gesamt Hessen zu übertragende Aussage noch deutlich mehr

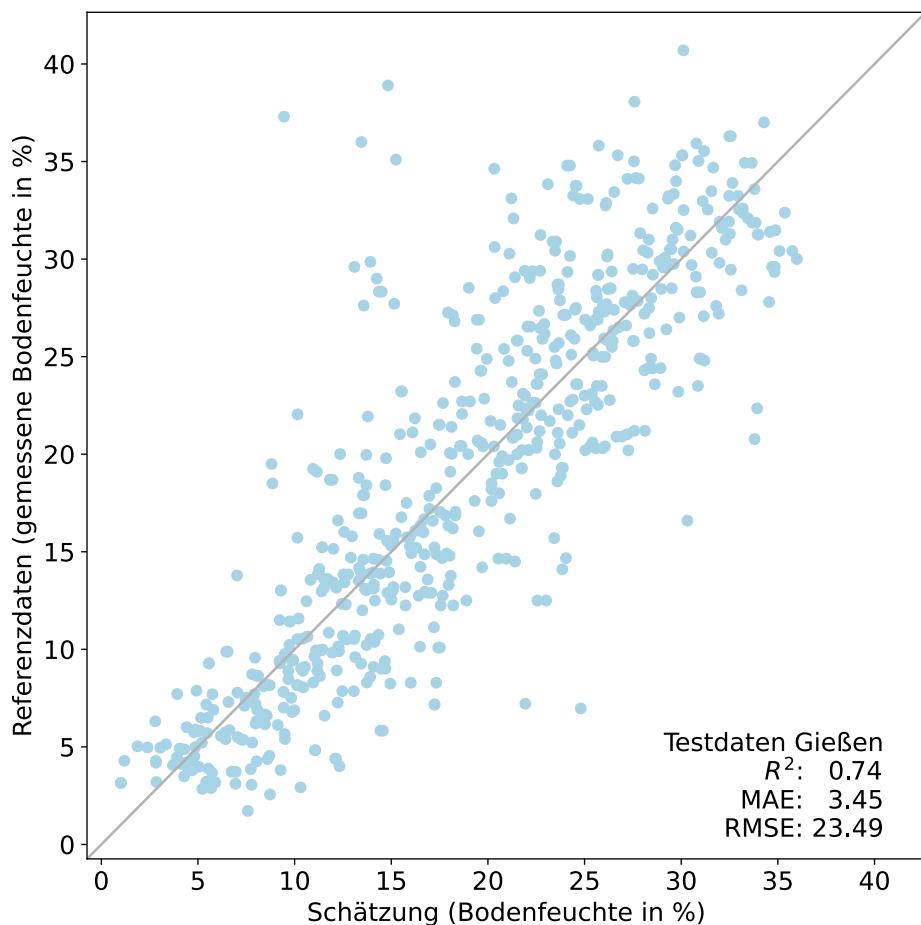


Abbildung 11.5.: Visualisierung der Abweichung der ermittelten Bodenfeuchtwerte von den Referenzwerten (Winkelhalbierende) auf dem unbekannten Testdatensatz der Universität Gießen.

und v. a. bzgl. Bodentyp und klimatischer Region repräsentativ verteilter Bodenfeuchte-Messstationen nötig sind. Solche standen aktuell dem Projekt nicht zur Verfügung.

Weiterhin ist zu beachten, dass in dem entwickelten Verfahren keine spezielle Behandlung von drainierten Flächen integriert oder untersucht wurde. Sofern solche Flächen vorhanden sind, sollten diese für eine lokale Bewertung und Interpretation der Bodenfeuchtwerte mit herangezogen werden. Eine Detektion aus Luft- oder Satellitenbildern erscheint aufgrund der synoptischen Charakteristik dieser Daten äußerst fraglich. Sofern Informationen über drainierte Flächen in Geofachdatenbanken verfügbar sind, sollten diese jedoch in eine Gesamtbewertung durch Experten:innen und ggf. ergänzt durch in-situ Begehungen integriert werden. Im vorliegenden Vorhaben war dies nicht möglich.

11.3. Grundwasser: Ausnutzungsgrade unter mittlerer und reduzierter Grundwasserneubildung

11.3.1. Einleitung

Im vorliegenden Projekt mit seiner Fragestellung der fernerkundlich gestützten Stärkung der Klimaanpassung in der räumlichen Gesamtplanung stellt das Grundwasser keinen expliziten Betrachtungsschwerpunkt dar. Es werden jedoch ausgewählte Informationen aus dem Zukunftsplan Wasser des Landes Hessen [37] zur Ressource Grundwasser, die in einer Rückschau der letzten Jahre im fortschreitenden Klimawandel Extreme in der (reduzierten) Grundwasserneubildung beschreiben, nachrichtlich eingebracht. Diese vom HLNUG erstellten Auswertungen informieren anschaulich darüber, dass sich die durch den Klimawandel bedingten Witterungsextreme in der Rückschau der letzten Jahre nicht nur in den Tag-Nacht-Temperaturmustern, sondern auch auf dem Gebiet der Grundwasserneubildung darstellen lassen. Eine Prognose für die Grundwasserneubildung in der Zukunft ist anhand dieser Daten jedoch nicht möglich, sodass sie nicht in die Bewertung der räumlichen Handlungsschwerpunkte mit Priorisierung eingehen.

In Hessen werden jährlich rund 407 Mio. m³ Grundwasser entnommen [37]. Mit einem Anteil von knapp 77 % stellen Grundwasserentnahmen (ohne Quellwasser und Uferfiltrat) die wichtigste Quelle der öffentlichen Wasserversorgung dar [77], womit Hessen knapp über dem bundesdeutschen Durchschnitt liegt [77]. Neben der öffentlichen Wasserversorgung dient Grundwasser zum Beispiel zur Kühlung und als Prozesswasser in Industrieanlagen sowie zur Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen. Daneben erfüllt Grundwasser wichtige Ökosystemfunktionen.

Auch wenn den Entnahmen im langjährigen Mittel jährlich rund 2,130 Mio. m³ Grundwasserneubildung (HLNUG, Daten aus Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wassergewirtschaft (KLIWA)) gegenüberstehen und damit jährlich rund fünfmal mehr Grundwasser neu gebildet als gefördert wird [37], so variieren diese Werte jedoch sowohl räumlich als auch zeitlich sehr stark. In den letzten 20 Jahren kam es wiederholt zu einer Folge mehrerer Trockenjahre mit einer deutlich reduzierten Grundwasserneubildung. Dies wird teilweise saisonal durch vermehrte Trocken- und Hitzeperioden, vor allem in den Sommermonaten, verstärkt, welche mit erhöhter Grundwasserentnahme gegenüber dem Jahresmittel einhergehen. Dies kann v. a. in Gebieten mit hohen Entnahmen zeitweise zu deutlich abgesenkten Grundwasserständen führen, auch wenn in der räumlich und zeitlich aggregierten Bilanzbetrachtung ein deutlicher Überschuss der Grundwasserneubildung vorherrscht. Es ist zu erwarten, dass sich der Nutzungsdruck auf das Grundwasser in den kommenden Jahren weiter erhöhen wird. Durch den Klimawandel bedingt wird es zukünftig vermehrt zu Trocken- und Hitzeperioden kommen, mit erhöhtem Wasserbedarf bei gleichzeitig reduzierter Grundwasserneubildung [85].

Im Folgenden wird zunächst räumlich differenziert der Ausnutzungsgrad der erneuerbaren Grundwasserressourcen unter der Annahme eines langjährigen Mittels der Grundwasserneubildung für die Grundwasserkörper betrachtet. Dieser basiert auf gemittelten, tatsäch-

lichen Grundwasserentnahmemengen im Zeitraum 2015 bis 2017 gegenüber der mittleren Grundwasserneubildung aus Niederschlägen im Zeitraum 1981 bis 2010 (ohne Berücksichtigung von Zuflüssen und Abflüssen an den Rändern des betrachteten Gebietes und ohne Berücksichtigung der natürlichen Infiltration aus Oberflächengewässern, aber unter Berücksichtigung der künstlichen Infiltration).

11.3.2. Ausnutzungsgrad der erneuerbaren Grundwasserressourcen im langjährigen Mittel der Grundwasserneubildung

Der Ausnutzungsgrad wurde aus den gemittelten, tatsächlichen Grundwasserentnahmemengen im Zeitraum 2015 bis 2017 und der mittleren Grundwasserneubildung aus Niederschlag im Zeitraum 1981 bis 2010 für 118 der 127 Grundwasserkörper berechnet (siehe Abbildung 11.6). Für 9 Grundwasserkörper lagen keine Daten vor. Zu- und Abflüsse an den Rändern wurden nicht in die Bilanzbetrachtung einbezogen.

Dabei zeigen 17 der 118 Grundwasserkörper einen hohen Ausnutzungsgrad über 30 %, 12 davon über 50 %, wovon 5 sogar eine negative Bilanz (Ausnutzungsgrad >100 %) aufweisen. 71 Grundwasserkörper sind mit <10 % eher gering genutzt, in einem sind keine Entnahmen verzeichnet. Der Rest bewegt sich mit einem mittleren Ausnutzungsgrad von 10 % bis 30 %.

In [35] wurden die 17 Grundwasserkörper, die einen hohen Ausnutzungsgrad über 30 % verzeichnen, einer weitergehenden Betrachtung unterzogen, bei der unter anderem der Austausch zwischen Grundwasserkörpern (lateraler Zu- und Abstrom) und bekannte natürliche Infiltrationen von Oberflächengewässern berücksichtigt wurden. Der überwiegende Anteil der Grundwasserkörper, die einen höheren Ausnutzungsgrad als 30 % aufweisen, befindet sich im Hessischen Ried und der Rhein-Main-Ebene. Zudem weisen die Grundwasserkörper teils erhebliche Randzuflüsse aus dem Odenwald oder anderen benachbarten Grundwasserleitern auf.

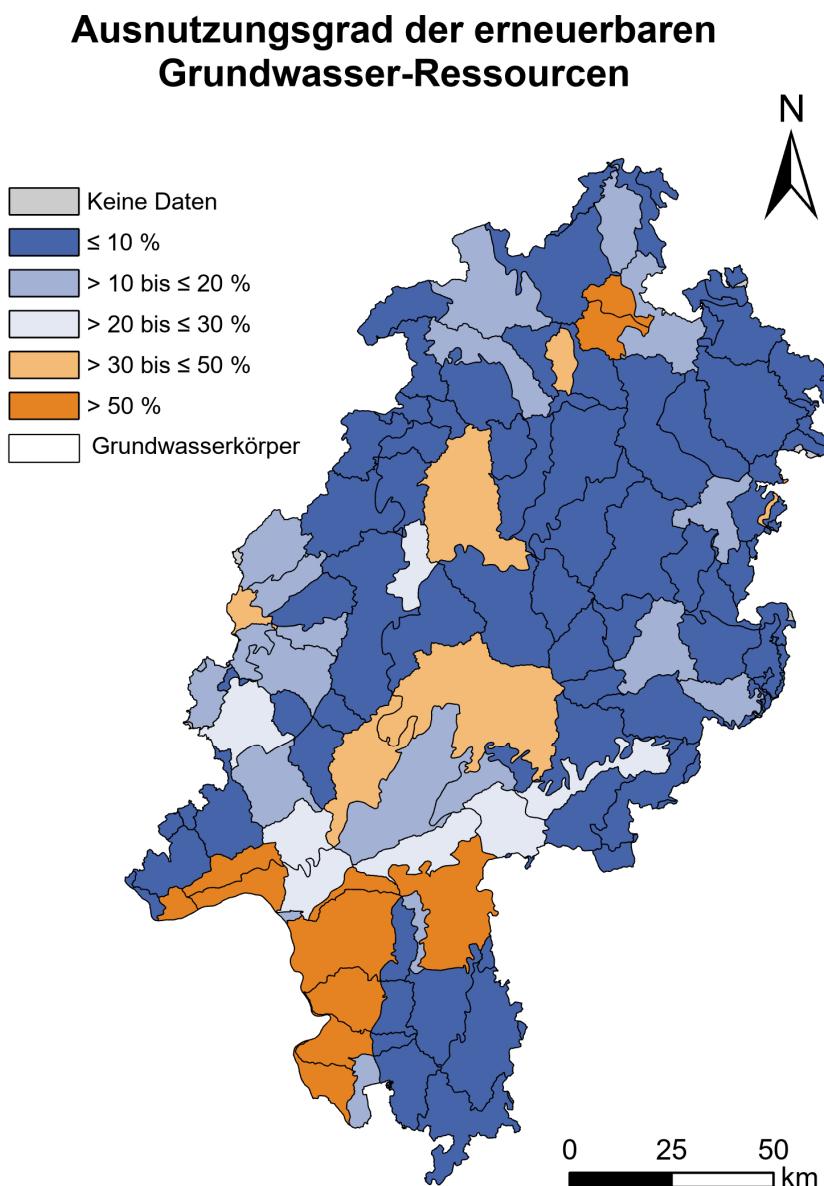


Abbildung 11.6.: Ausnutzungsgrad der erneuerbaren Grundwasserressourcen im langjährigen Mittel.

11.4. Fazit zum Themenschwerpunkt Wasser

Der Themenschwerpunkt Wasser befasst sich mit der Analyse von Wasserressourcen in Hessen, die auf einer Kombination aus fernerkundlichen Daten und bodengestützten Messungen basiert. Der Fokus liegt dabei auf der Bodenfeuchte und dem Grundwasser. Für die Analyse der oberflächennahen Bodenfeuchte für das gesamte Bundesland Hessen mittels FE-Daten und -verfahren hat sich die SMAP-Mission als beste Möglichkeit herausgestellt. Das entsprechend zur Verfügung gestellte Bodenfeuchteprodukt hat eine räumliche Auflösung von 9 km.

Dieses Produkt wird im Rahmen dieses Projekts zudem für die Plausibilisierung der universellen Hot- und Coldspots außerhalb von Siedlungen verwendet. Auch wenn die geringe räumliche Auflösung eine gewisse Limitierung darstellt, erscheint eine Auswertung auf großen räumlichen Skalen wie Regierungsbezirk oder Bundesland durchaus sinnvoll, zumal die gute zeitliche Auflösung von einem Tag eine gute Anpassung an die Temperatur-Daten der Hot- und Coldspot-Analyse erlaubt.

Darüber hinaus wurde eine KI-gestützte Methode entwickelt, um die Bodenfeuchte aus hochaufgelösten Satellitendaten der Sentinel-2 Mission zusammen mit bodengestützten Referenzdaten des ISMN abzuleiten. Das tiefe neuronale Netz zeigt vielversprechende Ergebnisse, aber es gibt Einschränkungen in der regionalen Übertragbarkeit aufgrund begrenzter bodenfeuchte- und bodentyp-spezifischer Messstationen in Hessen.

Die Analyse des Grundwassers in Hessen zeigt, dass das Grundwasser eine entscheidende Rolle für die Wasserversorgung spielt, insbesondere in Zeiten reduzierter Grundwasserneubildung, die durch klimatische Veränderungen zunehmend beeinflusst wird.

12. Identifikation von Suchräumen basierend auf universellen Hot- und Coldspots

Im Folgenden wird der im vorliegenden Forschungsprojekt verfolgte methodische Ansatz skizziert, wie aus den zuvor beschriebenen Daten Suchregionen für die Abgrenzung räumlicher Handlungsschwerpunkte identifiziert werden (vgl. Abb. 3.1).

12.1. Methodische Vorgehensweise zur Berechnung der universellen Cold- und Hotspots

Abbildung 12.1 visualisiert die grundsätzliche Vorgehensweise hierzu. Die räumliche Auflösung, die für diese Vorgehensweise herangezogen wird, ist das $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ -INSPIRE-Gitter.

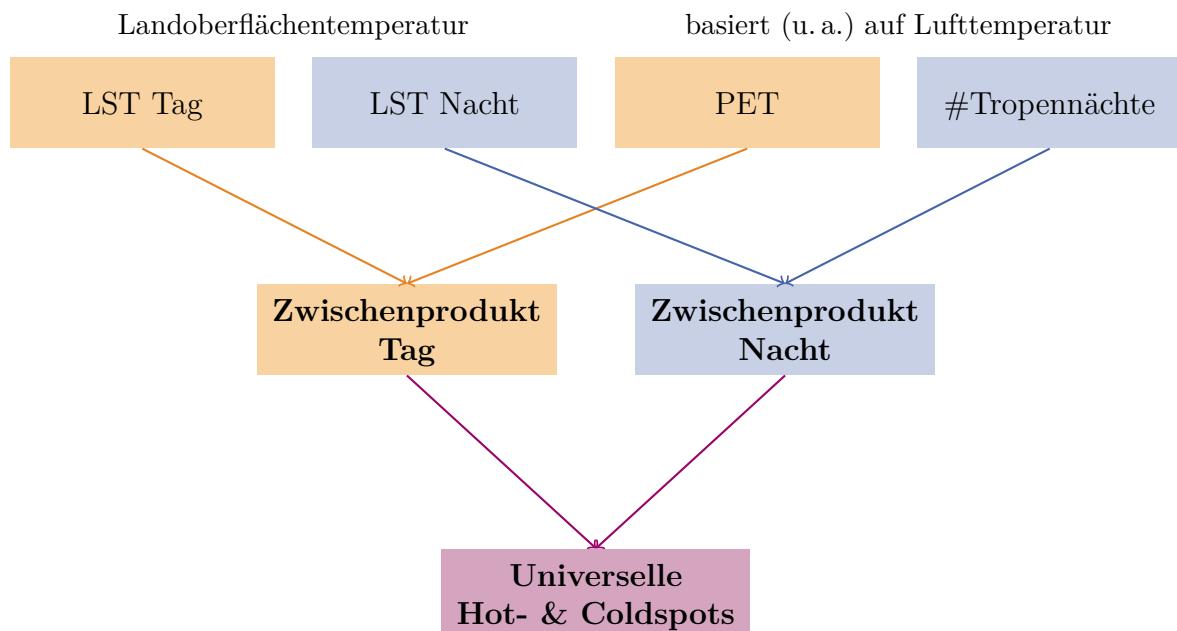


Abbildung 12.1.: Schematische Darstellung der Methode zur Berechnung der universellen Hot- und Coldspots.

Um die Intaktheit der besiedelten und unbesiedelten Landschaft hinsichtlich ihres Temperaturverhaltens bestmöglich zu erfassen, wurden Tag-Nacht-Temperaturanalysen anhand der in Kapitel 4 vorgestellten, auf Ebene der Regierungsbezirke klassifizierten Datensätze durchgeführt. Betrachtet wurde hierbei der 10-jährige Zeitraum von 2013 bis 2022, um keine Wetterereignisse einzelner Jahre der Klimaanpassungsplanung zugrunde zu legen.

Von besonderer Relevanz sind folgende Tag-Nacht-Temperatur-Muster, da sie den Handlungsbedarf auf dem Gebiet der Klimaanpassung priorisieren und zugleich die Art der Klimaanpassungsmaßnahmen differenzieren:

- Räume, die **sowohl am Tag als auch in der Nacht stark erwärmt** sind (z. B. urbane Wärme-Insel, die in besonderem Umfang Kühlbedarf aufweisen)
- Räume, die **am Tag stark erwärmt, in der Nacht aber kühlend wirken** (dies können beispielsweise Kaltluftentstehungsgebiete im Offenlandbereich sein, deren nächtliche Kühlfunktion es bei der Auswahl geeigneter Klimaanpassungsmaßnahmen zu erhalten gilt)
- Räume, die **keine ausgeprägten Extreme** am Tag und in der Nacht aufweisen oder sogar einen Coldspot darstellen (ihr weitgehend ausgeglichenes Tag-Nacht-Temperatur-Verhalten sowie die Kühlfunktion sollte nicht abnehmen, sondern stabilisiert werden).

Diese Grundmuster an Tag-Nacht-Temperaturen werden nachfolgend möglichst differenziert erfasst und der Priorisierung des räumlichen Handlungsbedarfs für die Klimaanpassung zugrunde gelegt.

Hinsichtlich der Art der verwendeten Temperaturdaten und hieraus ermittelten universellen Hot-/Coldspots wird, wie in Kapitel 4 erläutert, unterschieden zwischen

- LST-Daten (diese bilden über den latenten Wärmefluss mittelbar die Verdunstungseigenschaft und damit das Vermögen zur Verdunstungskühlung der Landoberfläche ab).
- Die menschliche Hitzebelastung abbildende Daten (z. B. PET und Tropennächte, die u. a. über die Lufttemperatur die vom Menschen wahrgenommene Hitzebelastung wiedergeben).

Diese Einteilung ermöglicht beispielsweise die Unterscheidung von Flächen mit universellen Hotspots durch „Verdunstungsdefizite“ (LST-basierte Hotspots) und „Hitze-Belastung“ (Hotspots durch hohe PET-Werte). Dies ist für die Konzeption geeigneter Klimaanpassungsmaßnahmen von Bedeutung.

Die Erfassung des Tag-Nacht-Temperaturverhaltens wird nachfolgend im Einzelnen beschrieben.

Wie aus Abbildung 12.1 ersichtlich ist, wird aus den vier Datensätzen zunächst je ein Zwischenprodukt zur Erfassung der Tag- sowie der Nacht-Temperaturcharakteristiken er-

stellt. Dafür wird, wie Tabelle 12.1 und Tabelle 12.2 dargestellt, die klassifizierende Darstellung der Eingangsparameter (Abschnitt 4.4) ausgewertet. Somit ergeben sich sowohl für das Tag- als auch für das Nachtprodukt 5×5 -Matrizen, die die Verschneidung der fünf Perzentil-Kategorien widerspiegeln.

Tabelle 12.1.: Matrix für Zwischenprodukt LST Tag und PET. P1-P3 steht für die Priorisierungsstufen.

		PET				
		P1: Sehr kühl ($\leq 10\%$)	P2: Kühl (> 10 und $\leq 30\%$)	P3: Geringere Extreme (> 30 und $\leq 70\%$)	P2: Erwärmte (> 70 und $\leq 90\%$)	P1: Sehr erwärmt ($> 90\%$)
LST Tag		0	0	1	2	2
Priorität 1: Sehr kühl ($\leq 10\%$)		0	1	2	2	2
Priorität 2: Kühl (> 10 und $\leq 30\%$)		1	2	2	2	3
Priorität 3: Geringere Extreme (> 30 und $\leq 70\%$)		2	2	2	3	4
Priorität 2: Erwärmte (> 70 und $\leq 90\%$)		2	2	3	4	4
Priorität 1: Sehr erwärmt ($> 90\%$)						

Tabelle 12.2.: Matrix für Zwischenprodukt LST Nacht und Anzahl (#) der Tropennächte. P1-P3 steht für die Priorisierungsstufen.

		# Tropennächte				
		P1: Sehr kühl ($\leq 10\%$)	P2: Kühl (> 10 und $\leq 30\%$)	P3: Geringere Extreme (> 30 und $\leq 70\%$)	P2: Erwärmte (> 70 und $\leq 90\%$)	P1: Sehr erwärmt ($> 90\%$)
LST Nacht		0	0	1	2	2
Priorität 1: Sehr kühl ($\leq 10\%$)		0	1	2	2	2
Priorität 2: Kühl (> 10 und $\leq 30\%$)		1	2	2	2	3
Priorität 3: Geringere Extreme (> 30 und $\leq 70\%$)		2	2	2	3	4
Priorität 2: Erwärmte (> 70 und $\leq 90\%$)		2	2	3	4	4
Priorität 1: Sehr erwärmt ($> 90\%$)						

Die 25 Einträge der Verschneidungsmatrizen werden anschließend in fünf Kategorien zusammengefasst, wie anhand der Farbgebung in Tabelle 12.1 und Tabelle 12.2 nachzu vollziehen ist. Diese fünf Kategorien charakterisieren grundsätzlich Regionen, die in beiden Parametern **kühl**, **heiß**, **ohne ausgeprägte Extrema** oder im Übergangsbereich (**hellblau** bzw. **orange**) auftreten. Somit können in einem zweiten Schritt (vgl. unterer Teil von Abbildung 12.1) auch das Tag- und Nacht-Zwischenprodukt nach der gleichen Methodik miteinander verschnitten werden, sodass als Endprodukt für die Charakterisierung von universellen Hot- und Coldspots wiederum eine 5×5 -Matrix entsteht (siehe Tabelle 12.3).

Tabelle 12.3.: Matrix für Zwischenprodukt (ZB) Nacht und Zwischenprodukt (ZB) Tag mit zugehöriger Legende.

		ZB Tag				
		0	1	2	3	4
ZB Nacht	0	0	0	2	4	4
	1	0	0	2	4	4
	2	0	0	2	4	4
	3	1	1	3	5	5
	4	1	1	3	5	5

	Universeller Coldspot Tag und Nacht
	Universeller Coldspot Tag mit geringer nächtlicher Abkühlung
	Keine Tagextreme mit deutlicher nächtlicher Abkühlung
	Keine Tagextreme mit geringer nächtlicher Abkühlung
	Universeller Hotspot Tag mit deutlicher nächtlicher Abkühlung
	Universeller Hotspot Tag und Nacht*

*(Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.)

Zur leichteren Interpretation dieser Spots ist die Matrix, wie in Tabelle 12.3 dargestellt, in sechs Kategorien eingeteilt:

- **Universeller Coldspot Tag und Nacht**
 - **Universeller Coldspot Tag mit geringer nächtlicher Abkühlung**
 - **Keine Tagextreme mit deutlicher nächtlicher Abkühlung**
 - **Keine Tagextreme mit geringer nächtlicher Abkühlung**
 - **Universeller Hotspot Tag mit deutlicher nächtlicher Abkühlung**
 - **Universeller Hotspot Tag und Nacht***
- *(Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.)

Für die Kategorie „Universeller Hotspot Tag mit deutlicher nächtlicher Abkühlung“ ist zu beachten, dass nicht nur Regionen wie typischerweise dicht bebaute und versiegelte Innenstadtgebiete als Hotspot hervorstechen, sondern dass im Einzelfall auch Offenlandregionen wie abgeerntete Agrarflächen auftreten können. Während natürliche Gründe, wie z. B. wenig Beschattung und geringe Verdunstung, zu dieser Einordnung führen können, kann es in Einzelfällen auch an der 1×1 km Originalauflösung der nächtlichen Eingangsparameter liegen (hier: MODIS- und HOSTRADA-Produkte, siehe Kapitel 4). Ebenfalls können Temperaturwerte nahe der Grenzwerte zur klassifizierenden Darstellung auf der Basis der

Regierungsbezirke zu einer nicht intuitiven Einteilung führen. Daher wird für universelle Hotspots Tag/Nacht kartografisch mit einer *Darstellung darauf hingewiesen, dass hier im Offenland bei kleinräumigerer Betrachtung insbesondere nachts auch kühlere Temperaturen vorliegen können. Dies kann aufgrund der räumlichen Auflösung in diesem Projekt jedoch nicht abgebildet werden.

Weiterhin ist wichtig festzuhalten, dass die ursprünglichen Daten durch die kaskadierende Verschneidung bis hin zu den universellen Hot- und Coldspots zunehmend aggregiert werden. Jede 100 m-Gitterzelle eines solchen Spots ermöglicht jedoch auch eine Rückverfolgung über die Zwischenprodukte bis hin zum ursprünglichen Messwert. Dies ermöglicht im Bedarfsfall auch sehr detaillierte Analysen über die Ursachen eines universellen Hot- oder Coldspots.

12.2. Ergebnisse zu den universellen Cold- und Hotspots

Die universellen Hot- und Coldspots stellen das Ergebnis der zuvor beschriebenen Verschneidung von Daten zur Hitzebelastung und Verdunstungsdefiziten dar. Sie bilden ein wichtiges Ergebnis im Forschungsprojekt, auf dem weitere wichtige Arbeitsschritte (z. B. die Priorisierung des räumlichen Handlungsbedarfs für Klimaanpassungsmaßnahmen) aufbauen.

Für die Identifikation von universellen Hot- und Coldspots werden die aus einem 10-jährigen Mittel (2013 bis 2022) entwickelten Tag-Nacht-Temperatur-Muster betrachtet (siehe Abbildung 12.2). Über sie kann das Ausmaß der sommerlichen Temperatur-Extreme transparent dargestellt werden. Ermöglicht wird die Erfassung von Räumen, die:

- am Tag und in der Nacht stark erwärmt sind und damit ein Hinweis auf urbane Wärmeinseln sind
- tagsüber stark erwärmt und nachts kühlend sind, was Hinweise auf ein Kaltluftentstehungsgebiet bzw. geringe Wärmespeicherung und eine gute Durchlüftung mit Kaltluft liefern kann
- keine extremen Temperatur-Schwankungen aufweisen und insgesamt eher kühl sind. Diese können Hinweise auf ein Kaltluftentstehungsgebiet sein und sind in ihrer nächtlichen Kühlfunktion zu stabilisieren.
- tagsüber kühl sind und nachts weiter abkühlen und somit insgesamt kühlend wirken.

Abbildung 12.2 visualisiert die farblich kodierten Kategorien der universellen Hot- und Coldspots. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass auf landesweiter Ebene aufgrund der Lesbarkeit von einer Schraffur mit Zusatzinformationen abgesehen wird. Auf der Gemeindeebene werden dagegen bei universellen Hot-/Coldspots mit höchster Prioritätsstufe zusätzliche Informationen gegeben. Hierbei handelt es sich zum einen um die Kenntlich-

machung der Landnutzungskategorien „Wald“ und „Landwirtschaft“. Zum anderen wird darüber informiert, ob in universellen Hotspots der höchsten Priorität die Temperaturextreme durch hohe Hitzebelastung oder Verdunstungsdefizite verursacht sind. Abbildungen 12.3 und 12.4 zeigen dies beispielhaft für vier ausgewählte Gemeinden.

Des Weiteren werden die universellen Hot- und Coldspots auf Gemeindeebene auch mit den gemäß der LWKA als Vorranggebiete bzw. als Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen vorgeschlagenen Flächen überlagert (Abbildung 12.5).

Als Flächen für Vorranggebiete für besondere Klimafunktionen werden diejenigen Luftleitbahnen einschließlich der zugehörigen Kaltluftentstehungsgebiete vorgeschlagen, die maßgeblich zur thermischen Entlastung eines Wirkraums mit sehr großem Flächenanteil (≥ 200 ha) mittlerer bis extremer thermischer Betroffenheit beitragen. Diese zeichnen sich durch eine geringe Volumenstromdichte von unter $60 \frac{m^3}{m \cdot s}$ aus und sind besonders sensibel gegenüber Veränderungen der Oberflächenrauigkeit, wie etwa durch Bebauung. Aufgrund dieser hohen Sensibilität kommt ihnen eine bedeutende planerische Schutzfunktion zu.

Als Flächen für Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen werden hingegen Luftleitbahnen einschließlich der zugehörigen Kaltluftentstehungsgebiete vorgeschlagen, die zwar ebenfalls eine thermische Entlastung bewirken, jedoch durch eine höhere Volumenstromdichte von über $60 \frac{m^3}{m \cdot s}$ weniger anfällig für Eingriffe in die Oberflächenstruktur sind. Dies reduziert ihren planerischen Schutzbedarf, da sie auch bei Veränderungen weiterhin eine gewisse Belüftungsfunktion erfüllen können. Zudem werden auch Luftleitbahnen einschließlich der zugehörigen Kaltluftentstehungsgebiete in diese Kategorie aufgenommen, die zur Entlastung eines Wirkraums mit nur großem Flächenanteil (>120 ha bis <200 ha) mittlerer bis extremer thermischer Betroffenheit beitragen, selbst wenn keine Differenzierung hinsichtlich der Volumenstromdichte vorgenommen wird. In diesem Fall besteht ebenfalls ein geringerer Schutzbedarf, da sowohl die thermische Belastung als auch die Anzahl betroffener Personen im Vergleich zu Wirkräumen mit sehr großem Flächenanteil niedriger ist. Diese Gegenüberstellung mit universellen Hot- und Coldspots ermöglicht eine präzisere Bewertung der klimatischen Bedeutung einzelner Gebiete und kann als Grundlage für weiterführende Planungen dienen.

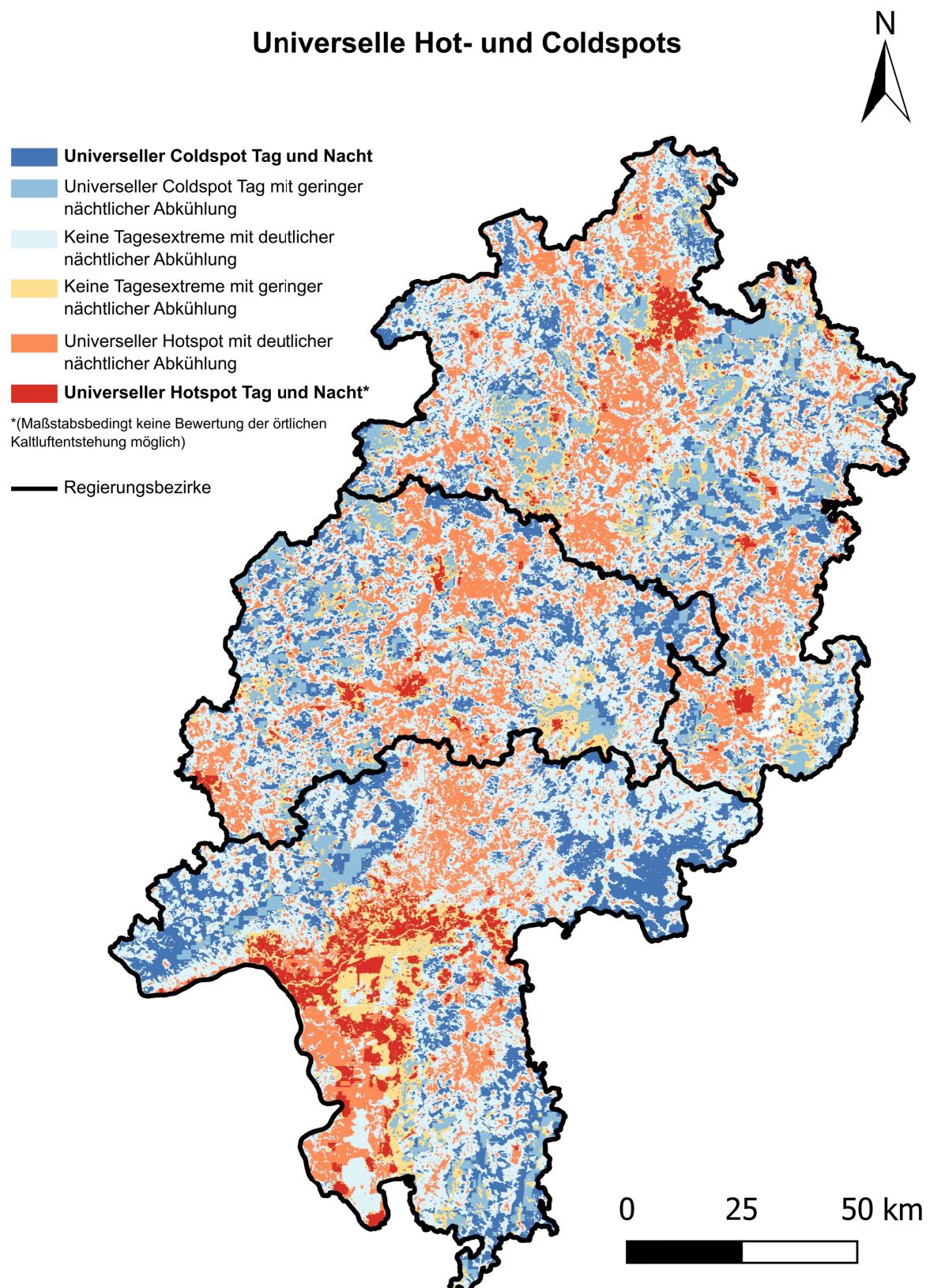


Abbildung 12.2.: Visualisierung der universellen Hot- und Coldspots für Hessen und die Regierungsbezirke im 100 m-Gitter und klassifiziert pro Regierungsbezirk.

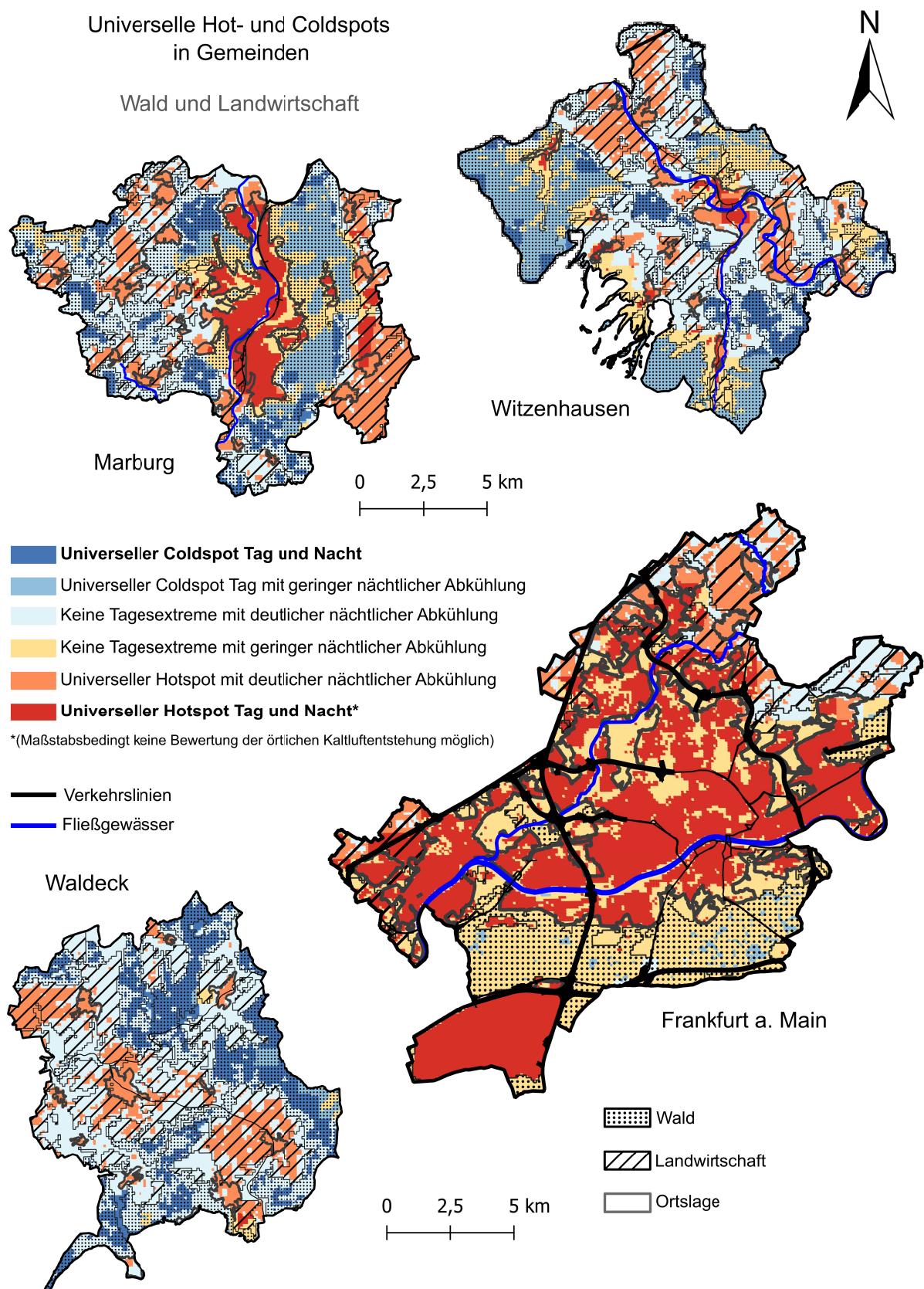


Abbildung 12.3.: Universelle Hot- und Coldspots für ausgewählte Gemeinden mit Wald und Landwirtschaft im 100 m-Gitter und klassifiziert pro Regierungsbezirk.

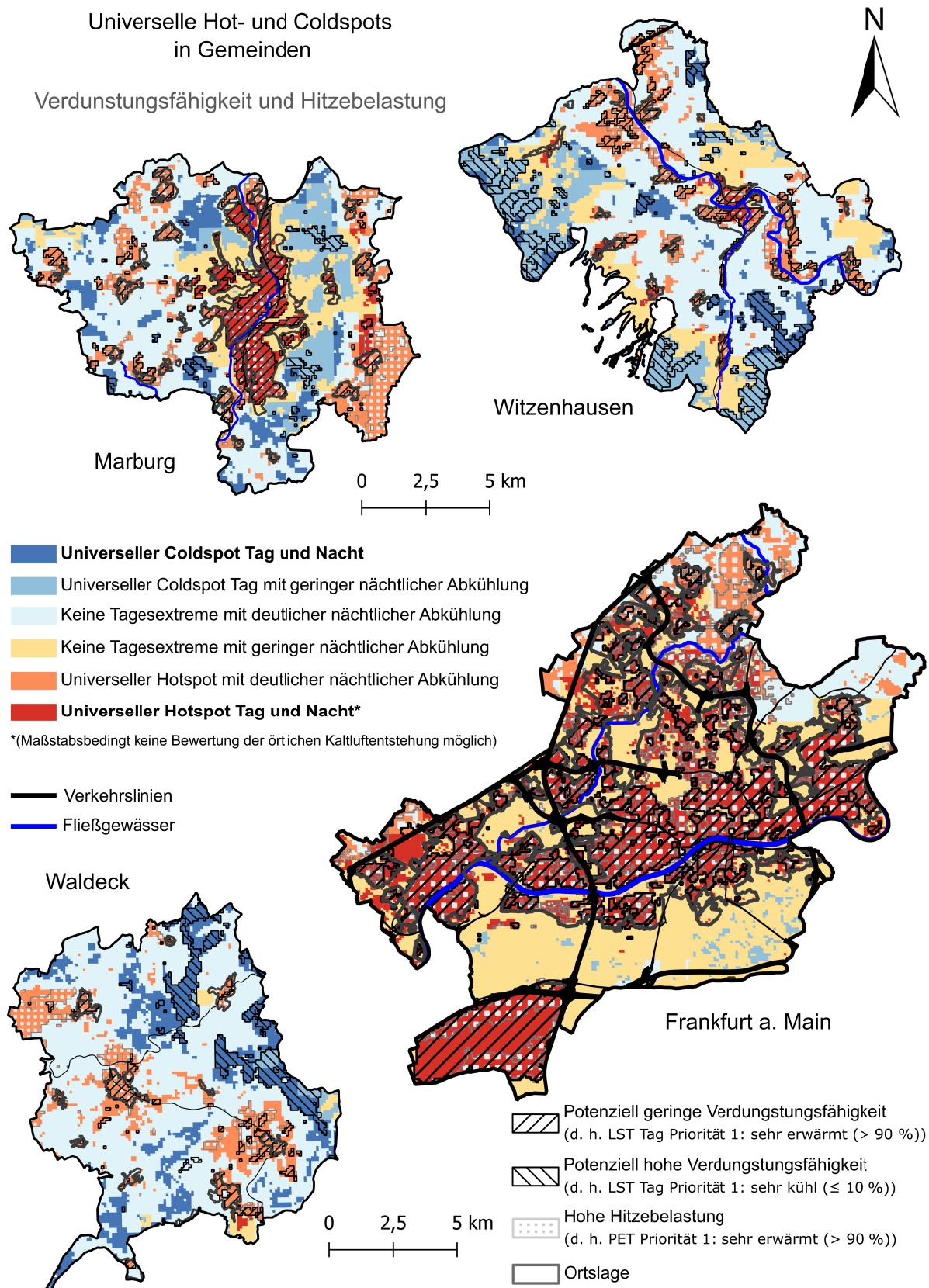


Abbildung 12.4.: Universelle Hot- und Coldspots für ausgewählte Gemeinden mit Verdunstungsfähigkeit und Hitzebelastung für ausgewählte Gemeinden im 100 m-Gitter und klassifiziert pro Regierungsbezirk.

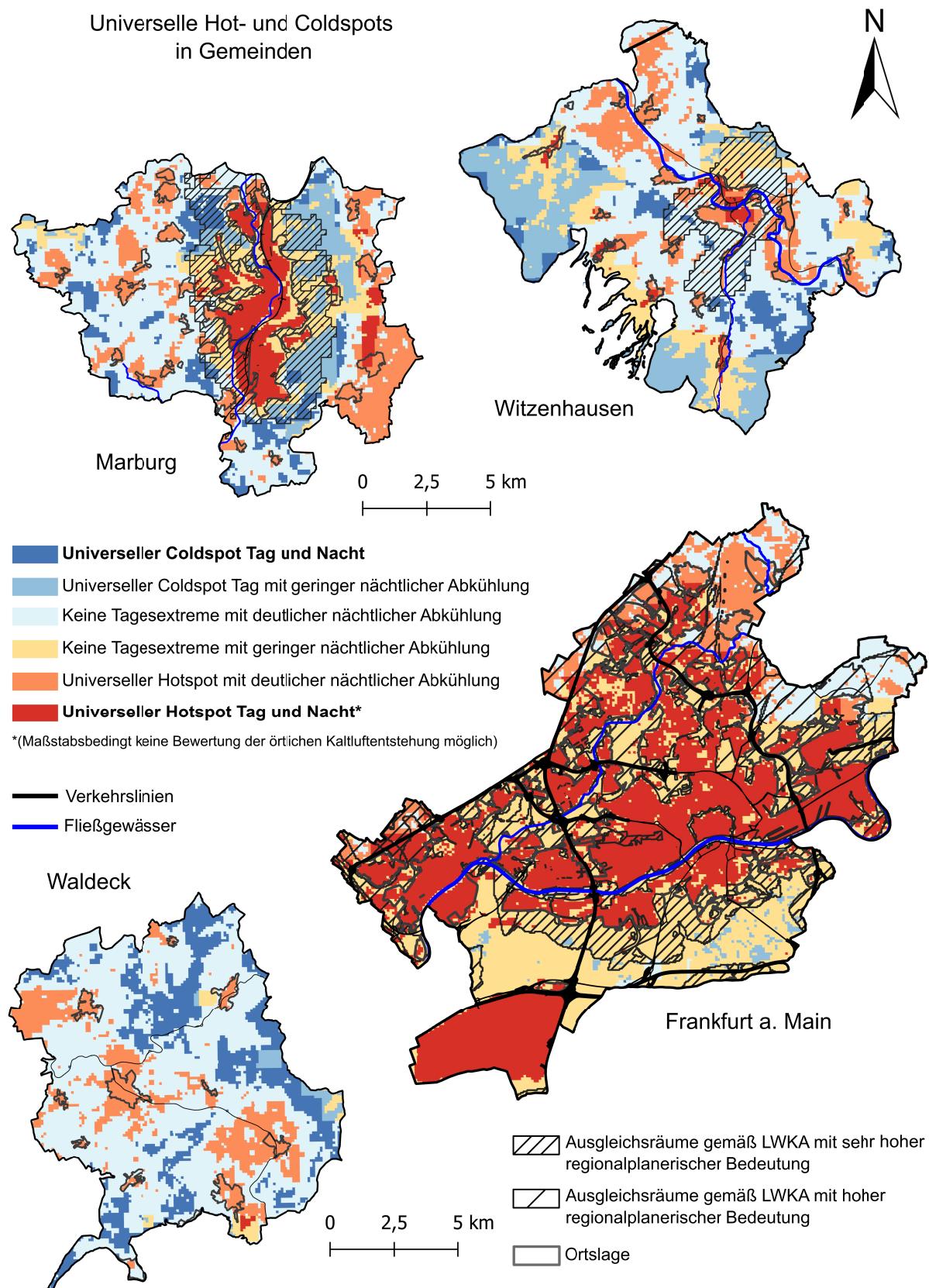


Abbildung 12.5.: Universelle Hot- und Coldspots für ausgewählte Gemeinden überlagert mit Gebieten, die gemäß der LWKA als Vorranggebiete (d. h. mit sehr hoher regionalplanerischer Bedeutung) oder Vorbehaltsgebiete (d. h. mit hoher regionalplanerischer Bedeutung) für besondere Klimafunktionen vorgeschlagen werden.

12.3. Plausibilisierung der universellen Hot- und Coldspots

Dieser Abschnitt widmet sich der Überprüfung und Validierung der zuvor ermittelten universellen Hot- und Coldspots, um die Aussagekraft der Ergebnisse zu sichern und mögliche Unsicherheiten zu minimieren. Durch die Plausibilisierung sollen insbesondere die räumlichen und klimatischen Zusammenhänge genauer beleuchtet werden, um eine belastbare Grundlage für die darauf aufbauenden Klimaanpassungsmaßnahmen zu schaffen.

Tabelle 12.4 zeigt für den Bezugsraum Hessen die folgenden Aspekte: Angelehnt an die Definition von Tabelle 12.3 weisen die Klassen *Universeller Coldspot Tag und Nacht* und *Universeller Coldspot Tag mit geringer nächtlicher Abkühlung* die kältesten (LST Tag und PET) und die Klassen *Universeller Hotspot Tag und Nacht** und *Universeller Hotspot Tag mit deutlicher nächtlicher Abkühlung* die wärmsten Tagestemperaturen auf. Gleichzeitig sind *Universeller Coldspot Tag mit geringer nächtlicher Abkühlung* und *Universeller Hotspot Tag und Nacht ** in der Nacht wärmer als ihr entsprechendes Gegenstück *Universeller Coldspot Tag und Nacht*, *Keine Tagesextreme mit deutlicher nächtlicher Abkühlung* bzw. *Universeller Hotspot Tag mit deutlicher nächtlicher Abkühlung*. * bedeutet in diesem Zusammenhang, dass maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich ist.

Tabelle 12.4.: Durchschnittliche Werte der Eingangsparameter im Bezugsraum Hessen (LST Tag, LST Nacht, PET, und #Tropennächte) je Kategorie der universellen Hot- und Coldspots.

(* Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.)

Kategorie	Tropennächte	LST Tag	LST Nacht	PET
0 Universeller Coldspot Tag und Nacht	5	24,33°C	11,99°C	21,94°C
1 Universeller Coldspot Tag mit geringer nächtlicher Abkühlung	9	23,91°C	12,42°C	21,44°C
2 Keine Tagesextreme mit deutlicher nächtlicher Abkühlung	3	27,98°C	11,76°C	31,30°C
3 Keine Tagesextreme mit geringer nächtlicher Abkühlung	13	27,38°C	12,65°C	27,38°C
4 Universeller Hotspot Tag mit deutlicher nächtlicher Abkühlung	2	31,09°C	11,61°C	41,24°C
5 Universeller Hotspot Tag und Nacht*	25	33,98°C	13,68°C	41,57°C

Die Tabellen 12.5 bis 12.7 bestätigen die genannten Aspekte auch auf der Ebene der einzelnen Regierungsbezirke. Jedoch zeigt sich hierbei, dass signifikante Unterschiede in den Absoluttemperaturen gegeben sind. Besonders deutlich wird dies in der Anzahl (#) der Tropennächte (kurz: # Tropennächte). Während die Klasse mit der geringsten Anzahl an Tropennächten (*Universeller Coldspot Tag und Nacht*) im Regierungsbezirk Darmstadt 11 Tropennächte im Sommermittel zwischen 2013 und 2022 aufweist, gab es in der Klasse mit der höchsten Anzahl (*Hotspot Tag und Nacht**) im Regierungsbezirk Kassel lediglich 5 Tropennächte. Die nächtlichen Temperaturen eines Hotspots im Regierungsbezirk Kassel

sind daher kälter als die in einem Coldspot im Regierungsbezirk Darmstadt. Zurückzuführen ist dies auf die unterschiedlichen regionalklimatischen Bedingungen; so ist Südhessen aufgrund der geographischen Lage sowie der umgebenden topographischen Situation generell durch deutlich milderes Klima geprägt als die hügeligen und stärker bewaldeten Gebiete in den anderen Regionen Hessens.

Tabelle 12.5.: Durchschnittliche Werte der Eingangsparameter im Bezugsraum Regierungsbezirk Darmstadt (LST Tag, LST Nacht, PET, und #Tropennächte) je Kategorie der universellen Hot- und Coldspots.

(*Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.)

	Kategorie	Tropennächte	LST Tag	LST Nacht	PET
0	Universeller Coldspot Tag und Nacht	11	24, 40°C	12, 82°C	22, 13°C
1	Universeller Coldspot Tag mit geringer nächtlicher Abkühlung	32	24, 24°C	13, 54°C	21, 20°C
2	Keine Tagesextreme mit deutlicher nächtlicher Abkühlung	12	28, 59°C	12, 62°C	32, 75°C
3	Keine Tagesextreme mit geringer nächtlicher Abkühlung	28	28, 89°C	14, 08°C	27, 88°C
4	Universeller Hotspot Tag mit deutlicher nächtlicher Abkühlung	16	32, 47°C	12, 56°C	41, 93°C
5	Universeller Hotspot Tag und Nacht*	32	34, 79°C	14, 28°C	42, 17°C

Tabelle 12.6.: Durchschnittliche Werte der Eingangsparameter im Bezugsraum Regierungsbezirk Gießen (LST Tag, LST Nacht, PET, und #Tropennächte) je Kategorie der universellen Hot- und Coldspots.

(*Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.)

	Kategorie	Tropennächte	LST Tag	LST Nacht	PET
0	Universeller Coldspot Tag und Nacht	5	24, 57°C	11, 71°C	22, 11°C
1	Universeller Coldspot Tag mit geringer nächtlicher Abkühlung	12	24, 12°C	12, 30°C	21, 93°C
2	Keine Tagesextreme mit deutlicher nächtlicher Abkühlung	3	28, 03°C	11, 57°C	31, 75°C
3	Keine Tagesextreme mit geringer nächtlicher Abkühlung	8	26, 99°C	12, 35°C	29, 34°C
4	Universeller Hotspot Tag mit deutlicher nächtlicher Abkühlung	2	30, 91°C	11, 50°C	41, 16°C
5	Universeller Hotspot Tag und Nacht*	8	32, 53°C	12, 66°C	40, 78°C

Tabelle 12.7.: Durchschnittliche Werte der Eingangsparameter im Bezugsraum Regierungsbezirk Kassel (LST Tag, LST Nacht, PET, und #Tropennächte) je Kategorie der universellen Hot- und Coldspots.

(*Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.)

Kategorie	Tropennächte	LST Tag	LST Nacht	PET
0 Universeller Coldspot Tag und Nacht	2	24, 00°C	11, 66°C	21, 61°C
1 Universeller Coldspot Tag mit geringer nächtlicher Abkühlung	4	23, 62°C	12, 26°C	21, 30°C
2 Keine Tagesextreme mit deutlicher nächtlicher Abkühlung	2	27, 53°C	11, 44°C	29, 79°C
3 Keine Tagesextreme mit geringer nächtlicher Abkühlung	3	26, 42°C	12, 29°C	25, 90°C
4 Universeller Hotspot Tag mit deutlicher nächtlicher Abkühlung	1	30, 41°C	11, 32°C	40, 72°C
5 Universeller Hotspot Tag und Nacht*	5	31, 76°C	12, 46°C	40, 15°C

Die räumlichen Muster der universellen Hot- und Coldspots werden weiterhin durch einen Vergleich mit vLCZ und SST analysiert. Prozentuale Flächenanteile sind in Tabelle 12.8 gelistet. Abbildung 12.6 zeigt, dass *Universelle Hotspots Tag und Nacht** den größten Flächenanteil in den bebauten vereinfachten Klimazonen ausmachen, wohingegen die vLCZ nur wenige Anteile dieser Klasse enthalten. Lediglich die vLCZ *Wald und Gehölze* enthält erhebliche Flächenanteile, die in die Klassen *Universeller Coldspot Tag und Nacht* und *Universeller Coldspot Tag mit geringer nächtlicher Abkühlung* fallen. Dies entspricht den in der Literatur bestätigten Erwartungen. In den vLCZ *Geringe Oberflächenrauwigkeit (besiedelt/unbesiedelter Bereich)* sind sowohl Gebiete mit leicht unterdurchschnittlichen Temperaturen (Klasse *keine Tagesextreme mit deutlicher nächtlicher Abkühlung*) als auch überdurchschnittliche Temperaturen. Die benannten Unterschiede sind primär auf verschiedene Vegetationsbedeckungen und Versiegelungsanteile zurückzuführen, die in dieser Klasse zusammengeführt werden (z. B. versiegelte Gebiete oder Rasen). Ferner sind aufgrund der räumlichen Auflösung der Nacht-Daten (LST Nacht, Anzahl der Tropennächte) kleinräumige Kaltluftentstehungsgebiete nicht abbildbar.

In Abbildung 12.7 werden weiter die Flächenanteile der universellen Hot- und Coldspots den SST aus Kapitel 10 gegenübergestellt. Da SST nur im besiedelten Raum auftreten, finden sich hier keine universellen Coldspots. Es ist weiterhin hervorzuheben, dass sich mehr als 90 % der *Blockrandbebauung* in einem *universellem Hotspot Tag und Nacht** befinden. Dieser Anteil ist signifikant größer als in allen anderen SST. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der prozentuale Anteil keine Aussagen über absolute Flächenbedeckung in Hessen ausdrücken kann.

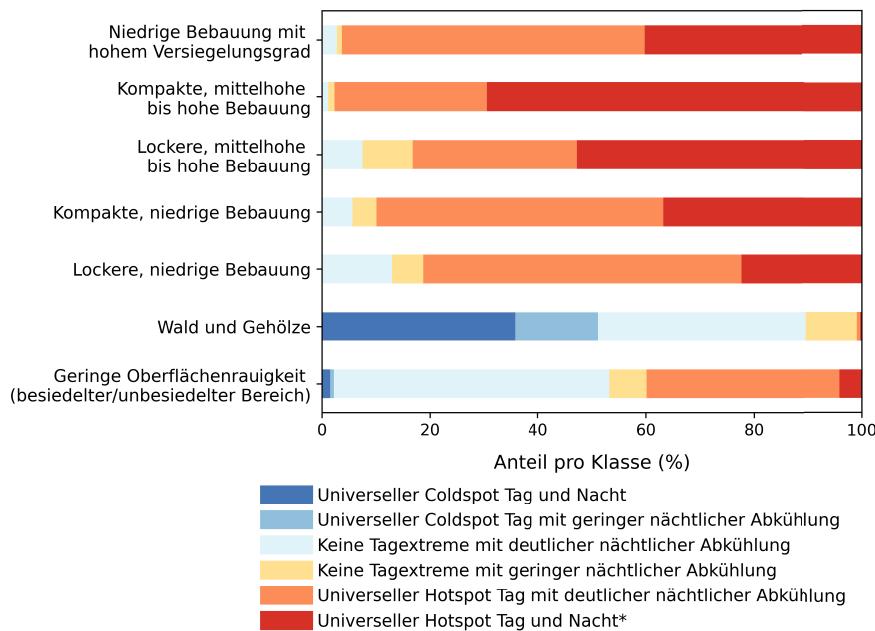


Abbildung 12.6.: Anteilige Verteilung der universellen Hot- und Coldspotkategorien pro vLCZ Klasse.

(*Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.)

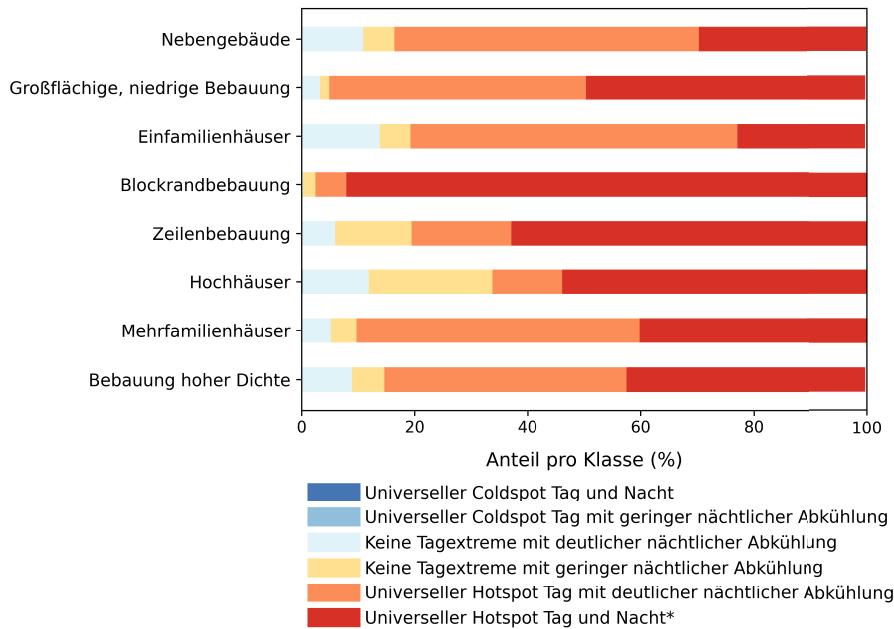


Abbildung 12.7.: Anteilige Verteilung der universellen Hot- und Coldspotkategorien pro SST. (*Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.) Zum Vergleich findet sich in Abbildung 10.3 die Verteilung der SST in Hessen.

Tabelle 12.8.: Flächenanteil der Gitterzellen in jeder universellen Hot- und Coldspot Kategorie, differenziert nach vLCZ (bezogen auf ganz Hessen) und SST (bezogen auf bebaute Flächen). (*Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.)

Universeller Hotspot Tag und Nacht*		Universeller Hotspot mit deutlicher nächtlicher Abkühlung		Keine Tagesextreme mit geringer nächtlicher Abkühlung		Universeller Coldspot Tag mit geringer nächtlicher Abkühlung		Universeller Coldspot Tag und Nacht	
Geringe Oberflächenrauigkeit (besiedelter/unbesiedelter Bereich)	0,66 %	0,30 %	22,28 %	3,00 %	15,62 %	1,78 %	0,13 %	1,78 %	43,64 %
Wald und Gehölze	17,12 %	7,37 %	18,49 %	4,43 %	0,32 %	0,13 %	1,06 %	2,80 %	47,86 %
Lockere, niedrige Bebauung	0,00 %	0,00 %	0,61 %	0,28 %	0,01 %	0,01 %	0,01 %	0,01 %	4,75 %
Kompakte, niedrige Bebauung	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,02 %
Lockere, mittelhohe bis hohe Bebauung	0,00 %	0,00 %	0,09 %	0,12 %	0,39 %	0,67 %	0,39 %	0,39 %	1,27 %
Kompakte, mittelhohe bis hohe Bebauung	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,16 %	0,06 %	0,06 %	0,22 %
Niedrige Bebauung mit hohem Versiegelungsgrad	0,00 %	0,00 %	0,04 %	0,01 %	0,78 %	0,56 %	0,56 %	0,56 %	1,39 %
SST									
Bebauung hoher Dichte	0,01 %	0,01 %	1,99 %	1,30 %	9,70 %	9,55 %	4,17 %	5,21 %	22,56 %
Mehrfamilienhäuser	0,00 %	0,00 %	0,53 %	0,47 %	0,06 %	0,06 %	0,25 %	0,10 %	10,38 %
Hochhäuser	0,00 %	0,00 %	0,05 %	0,10 %	0,00 %	0,00 %	0,12 %	0,27 %	0,46 %
Zeilenbebauung	0,00 %	0,00 %	0,12 %	0,27 %	0,35 %	0,35 %	0,27 %	0,27 %	2,00 %
Blockrandbebauung	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,02 %	0,06 %	0,06 %	0,02 %	0,02 %	1,04 %
Einfamilienhäuser	0,01 %	0,00 %	5,79 %	2,28 %	24,25 %	9,50 %	2,28 %	2,28 %	41,83 %
Großflächige, niedrige Bebauung	0,00 %	0,00 %	0,51 %	0,26 %	7,23 %	7,85 %	0,26 %	0,26 %	15,85 %
Nebengebäude	0,00 %	0,00 %	0,61 %	0,31 %	3,02 %	1,66 %	0,31 %	0,31 %	5,60 %

Zum Abschluss der Plausibilisierung werden Durchschnittswerte der Grünindikatoren NDVI, Grünvolumen und Grünausstattung (siehe Kapitel 9) sowie der Bodenfeuchte (siehe Kapitel 11) mit den verschiedenen universellen Hot- und Coldspots verglichen. Tabelle 12.9 fasst diesen Vergleich quantitativ zusammen. Hinsichtlich der Bodenfeuchte ist zu beachten, dass die gezeigten Werte nur für Gebiete außerhalb der Siedlungen repräsentativ sind. Aus den gezeigten Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die Werte der Grünindikatoren vor allem mit den Tagestemperaturen korrelieren. Die Klassen *Universeller Coldspot Tag und Nacht* und *Universeller Coldspot Tag mit geringer nächtlicher Abkühlung* zeigen in allen Grünindikatoren die höchsten Werte, während *Universeller Hotspot Tag und Nacht** und *Universeller Hotspot Tag mit deutlicher nächtlicher Abkühlung* die geringsten Werte innehaben. Im Gegensatz dazu lässt Tabelle 12.9 hinsichtlich der Bodenfeuchte folgende Rückschlüsse ziehen: Die Bodenfeuchte wirkt sich vor allem auf eine Abkühlung bei Nacht aus. Dieser Aspekt ist vor allem anhand der höheren Prozente in den Klassen *Universeller Coldspot Tag und Nacht, keine Tagesextreme mit deutlicher nächtlicher Abkühlung* und *Universeller Hotspot Tag mit deutlicher nächtlicher Abkühlung* festzumachen.

Tabelle 12.9.: Durchschnittliche Werte der Blauen und Grünen Indikatoren je Kategorie der universellen Hot- und Coldspots. Für die Bodenfeuchte wurden nur Gebiete ohne Ortslage berücksichtigt.

(*Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.)

Kategorie	Grünausstattung [%]	NDVI	Grünvolumen [m ³ /ha]	Bodenfeuchte [%]
Universeller Coldspot Tag und Nacht	95,8	0,72	162.250	15,9
Universeller Coldspot Tag mit geringer nächtlicher Abkühlung	95,0	0,73	160.920	13,6
Keine Tagesextreme mit deutlicher nächtlicher Abkühlung	77,8	0,60	60.270	15,9
Keine Tagesextreme mit geringer nächtlicher Abkühlung	79,2	0,63	74.015	14,4
Universeller Hotspot Tag mit deutlicher nächtlicher Abkühlung	53,6	0,45	5.580	16,1
Universeller Hotspot Tag und Nacht*	44,8	0,39	11.350	14,7

Fazit zur Plausibilisierung der universellen Hot- und Coldspots: Die Plausibilisierung der identifizierten universellen Hot- und Coldspots bestätigt die Korrelation zwischen Temperaturmustern und den regionalen klimatischen und strukturellen Bedingungen sowie der Vegetationsbedeckung. Die Analyse zeigt deutlich, dass urbane Räume stärker zur Hitzeentwicklung neigen, während Gebiete mit hoher Vegetationsbedeckung kühlend wirken. Zudem betonen die Unterschiede zwischen den Regierungsbezirken die Relevanz einer regional differenzierten Betrachtung für effektive Klimaanpassungsmaßnahmen. Insgesamt bieten die Ergebnisse eine fundierte Grundlage für die zielgerichtete Planung von Klimaanpassungsstrategien.

13. KI-basierte Ermittlung von Grünvolumendefiziten aus Geofachdaten

Die Ermittlung des Grünvolumendefizits baut auf den Informationen zum Grün-Indikator „Grünvolumen“ (siehe Abschnitt 9.1.3) auf, der für die Potenzial- und Defizitanalyse von Relevanz ist und zielgerichtete Maßnahmen zur Klimaanpassung erleichtert (vgl. Abb. 3.1).

13.1. Einleitung

Geringe Vegetationsausstattung und ein hoher Versiegelungsgrad, oftmals einhergehend mit einem hohen sommerlichen Wasserstress der nur geringfügig vorhandenen Vegetation, mindern die Verdunstungskühlung und Beschattung, was an heißen Sommertagen Temperatur und Hitzebelastung insbesondere in urbanen Gebieten deutlich erhöhen kann [63, 10, 65, 67].

Vor diesem Hintergrund kann die klimatische Belastung in Städten basierend auf dem Grünvolumendefizit als Indikator betrachtet und untersucht werden. Das **Grünvolumendefizit** beschreibt den Mangel an Vegetationsvolumen (hier: Grünvolumen, siehe Abschnitt 9.1.3), das notwendig wäre, um eine ausreichende Kühlung und andere klimatische Vorteile, wie z. B. Beschattungseffekte, in dem betrachteten urbanen Raum herbeizuführen. Hierfür wird nachfolgend eine beispielhafte Betrachtung angestellt, die eine bestimmte Minderung der sommerlichen Tagestemperaturextreme in einem urbanen Raum zum Ziel hat. Zugrunde gelegt werden hierbei die LST-Temperaturen, da diese die sommerlichen Temperaturextreme insbesondere am Tag mit hoher räumlicher Auflösung abbilden und dabei mittelbar auch die Verdunstungskühle der Landoberfläche widerspiegeln. Das Defizit wird durch den Vergleich von vorhandenem Grünvolumen mit dem idealen oder erforderlichen Grünvolumen bestimmt, das notwendig ist, um die Temperaturbelastung in einem Gebiet zu reduzieren.

Bisherige Studien nutzen lineare Modelle zur Schätzung des Grünvolumendefizits (siehe z. B. [30]). Sie erweisen sich als nützlich für einen ersten Ansatzpunkt, da sie aus empirisch abgeleiteten, linearen Zusammenhängen zwischen Oberflächentemperatur (hier: LST am Tag), Versiegelungsgrad und Grünvolumen bestimmt werden. Obwohl diese Ansätze effizient und anwendungsfreundlich sind, weisen sie jedoch einige Einschränkungen auf:

1. **Eindimensionale Modellierung:** Lineare Ansätze gehen davon aus, dass der Einfluss von Grünvolumen und Versiegelung auf LST Tag linear ist. Dies entspricht jedoch nicht der tatsächlichen Komplexität und somit werden nichtlineare Wechselwirkungen nicht berücksichtigt.
2. **Mangelnde regionale Spezialisierung:** Unterschiedliche klimatische Bedingungen, städtebauliche Strukturen und sonstige regional variierende Bedingungen werden nur unzureichend berücksichtigt, was die Genauigkeit der Ergebnisse reduziert.
3. **Begrenzte Flexibilität:** Dies hängt direkt mit dem zweiten Aspekt zusammen. Lineare Modelle sind weniger anpassungsfähig und robust gegenüber variierenden städtebaulichen und klimatischen Gegebenheiten.

Die im Projekt entwickelte Methodik zur Bestimmung des Grünvolumendefizits berücksichtigt u. a. auch die Versiegelung (Voll- und Teilversiegelung). Damit geht auch die Fähigkeit des Bodens zur Speicherung von Niederschlägen, die für die Vegetationsverdunstung benötigt werden, in die Betrachtung ein. Darüber hinaus können nichtlineare Zusammenhänge zwischen universellen Hot- und Coldspots, die Tag-Nacht-Temperaturmuster in einer zehnjährigen Zeitreihe auswerten (siehe Kapitel 12, Landbedeckung (siehe Kapitel 7) und Grünvolumen (siehe Abschnitt 9.1.3) abgebildet, regionale Unterschiede integriert und robuste Vorhersagen für die Reduktion des Grünvolumendefizits geliefert werden. Im Gegensatz zu [30] wird in diesem Vorhaben nicht der einzelne Parameter LST Tag betrachtet, sondern die entwickelten universellen Hot- und Coldspots.

Ziel ist die Ermittlung derjenigen notwendigen Grünvolumenänderung, über die eine temperaturbedingte Abstufung der universellen Hotspots bewirkt werden kann. Konkret soll hierbei angestrebt werden, die Kategorien „Universeller Hotspot Tag und Nacht“ und „Universeller Hotspot Tag mit nächtlicher Abkühlung“ bezüglich der „Tagwerte“ eine Kategorie herabzustufen.

Das entwickelte Vorgehen stellt eine Weiterentwicklung dar und schafft eine fundiertere Grundlage für Maßnahmen zur urbanen Klimaanpassung. In den folgenden Abschnitten werden die Methodik und die Ergebnisse dieser neuen Herangehensweise detaillierter beschrieben.

13.2. Methodenentwicklung für die KI-basierte Ermittlung von Grünvolumendefiziten

Die Ermittlung des Grünvolumendefizits erfordert in einem ersten Schritt eine KI-basierte Ableitung des Grünvolumens. Daher kann das Vorgehen als Schätzaufgabe interpretiert werden. Dies bildet die Grundlage, um das Grünvolumen und damit das Defizit als Differenz zweier Grünvolumina zu berechnen, wobei sich die Defizitberechnung auf die Hotspot-Kategorien der universellen Hot- und Coldspots und hier insbesondere auf die Kategorien „Universeller Hotspot Tag und Nacht“ und „Universeller Hotspot Tag mit nächtlicher Abkühlung“ beschränkt (siehe Abbildung 13.1).

Abbildung 13.2 visualisiert schematisch die methodische Vorgehensweise, die in den nachfolgenden Abschnitten erläutert wird.

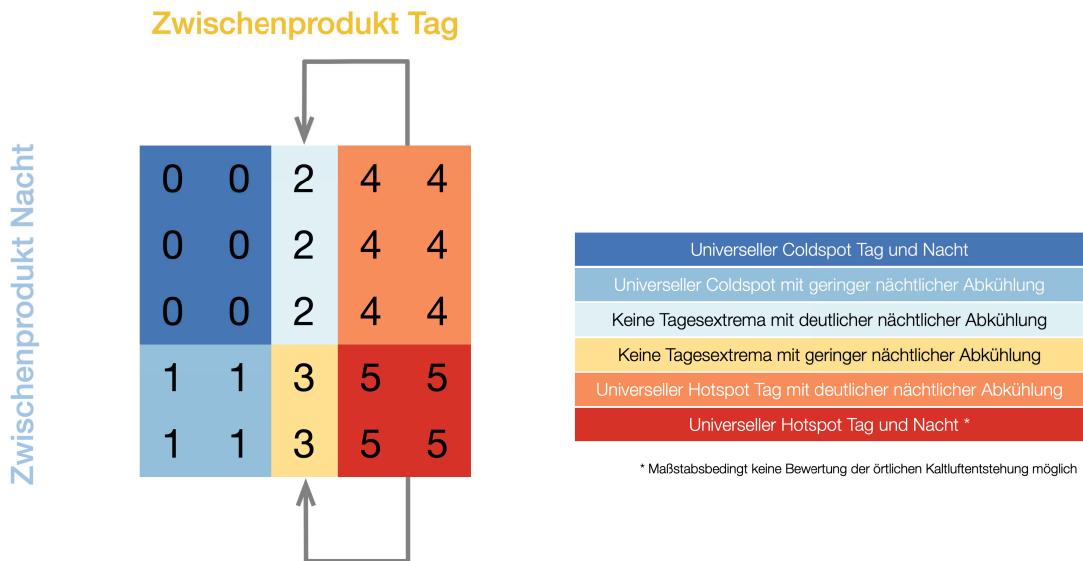


Abbildung 13.1.: Schematische Darstellung zur Klassenverschiebung bei der Ermittlung des Grünvolumendefizits.

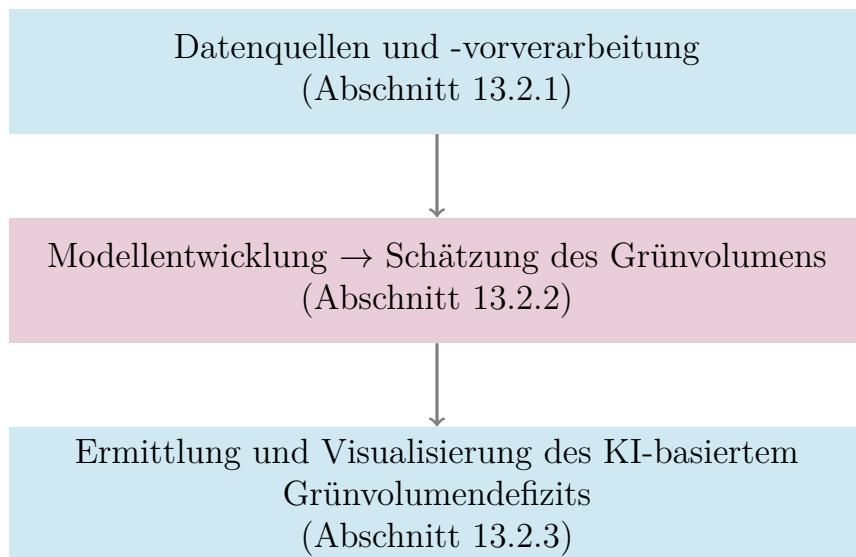


Abbildung 13.2.: Schematische Darstellung der KI-basierten Analyse des Grünvolumendefizits in Hessen.

13.2.1. Datenquellen und Vorverarbeitung

Die hier verwendeten Verfahren des ML (Teilbereich der KI) benötigen zum datengestützten Erlernen des Zusammenhangs aus **Eingangs- und Ausgangsbereich** ausreichend viele Daten und Informationen. Im Kontext der Schätzung des Grünvolumens wird auf die in dem Forschungsprojekt entwickelten und aufbereiteten Daten zurückgegriffen.

Genutzte Datenquellen

Eingangsdaten stellen hierbei die universellen Hot- und Coldspots, die Klassen der Landbedeckung, die SST sowie die vereinfachten LCZ dar. Die universellen Hot- und Coldspots nach Tabelle 12.3 aus Kapitel 12 bilden die zentralen Eingangsdaten. Letztlich wird in einem nachfolgenden Anwendungsschritt das fertige Modell zur Schätzung des Grünvolumens auf simulierte Veränderung der universellen Hotspot-Klassen (vier Stück) jeder 100 m-Gitterzelle angewandt, um zu überprüfen, wie sich das Grünvolumen ändern müsste, wenn eine Abkühlung der Tagkomponente erfolgen soll. Ausgehend von Tabelle 12.3 wird die Annahme getroffen, dass eine Grünvolumensteigerung bei Tag kühlt, d. h. hauptsächlich LST Tag verringert wird. Dies bedeutet, dass Klasse 4 in Klasse 2 und Klasse 5 in Klasse 3 überführt wird (siehe Abbildung 13.1).

Ein weiterer zentraler Bestandteil der Datengrundlage sind Landbedeckungs- und Stadtstrukturklassen (siehe Kapitel 7 und Kapitel 10). Diese umfassen prozentuale Anteile von Vegetation, Vegetationswuchshöhen und Versiegelung sowie die Zuordnung zu acht spezifischen SST, wie beispielsweise dichte Bebauung oder Einfamilienhausgebiete. Diese Differenzierung ermöglicht es, die städtebauliche Vielfalt und deren Einfluss auf das Grünvolumen präzise abzubilden.

Darüber hinaus werden die sieben Klassen der vereinfachten LCZ (siehe Kapitel 5) herangezogen. Dadurch können regionale Klimacharakteristiken in die Analyse einbezogen werden.

Das Grünvolumen (siehe Abschnitt 9.1.3) bildet die entscheidende **Zielgröße**. Dieses wurde für das gesamte Gebiet Hessen auf Grundlage eines 100 m-Gitters aggregiert und liefert detaillierte Informationen über die vorhandene Vegetationsmenge, die als Basis für die Modellierung und Berechnung des Grünvolumendefizits dient.

Schritte der Datenvorverarbeitung

Die Datenvorverarbeitung stellt einen wesentlichen Schritt dar, um die Eingangsdaten für die KI-basierte Modellierung zu standardisieren und sicherzustellen, dass sie für die Analyse geeignet sind.

Zunächst wurden alle prozentualen Eingangsdaten, wie beispielsweise die Anteile von Vegetation oder Versiegelung, jeweils auf einen Wertebereich zwischen 0 bis 1 **normalisiert**. Dies sorgt u. a. dafür, dass alle Eingangsdaten in einer vergleichbaren Skala vorliegen und das ML-Verfahren effizient trainiert werden kann.

Ein weiterer wichtiger Schritt ist die **Integration** der vLCZ-Daten mit den 7 Klassen im 100 m-Gitter.

Darüber hinaus wurde eine neue Kategorie für **nicht urbane** 100 m-Gitterzellen eingeführt. Diese Kategorie umfasst alle Gitterzellen, die keine städtischen Strukturen enthalten, wie offene Landschaften oder Gewässer. Die Integration dieser Kategorie ermöglicht

eine klare Abgrenzung zwischen urbanen und nicht urbanen Gebieten, was die Qualität der Modellierung erhöht. Schließlich wurden inkonsistente bzw. fehlerhafte Datenpunkte (hier: 100 m-Gitterzellen) eliminiert, und alle relevanten Eingangs- und Zieldatentupel in einem konsistenten Datensatz zusammengeführt. Diese Schritte stellen sicher, dass der Datensatz frei von Redundanzen oder Fehlern ist und optimal für die Modellierung vorbereitet wurde.

Durch diese sorgfältige Vorverarbeitung wird eine robuste Grundlage für die nachfolgende Modellentwicklung geschaffen.

13.2.2. Modellentwicklung

Die Modellentwicklung folgt einem strukturierten Vorgehen, um robuste und präzise Voraussagen über die Grünvolumenänderungen zur Reduktion von universellen tagbasierten Temperatur-Hotspots zu generieren. Dieser Prozess beinhaltet die Erstellung spezifischer Modellsätze, die auf die regionalen und klassenbezogenen Gegebenheiten abgestimmt wurden, sowie eine umfassende Optimierung und Bewertung der Modelle.

Generierung der Modellierungsdatensätze

Für die Generierung der Modellierungsdatensätze werden zunächst die Eingangs- und Zieldatentupel jeder 100 m-Gitterzelle nach den Regierungsbezirken Darmstadt, Gießen und Kassel sowie nach den universellen Hotspot-Klassenkombinationen gruppiert. Die betrachteten Kombinationen „4 → 2“ und „5 → 3“ repräsentieren die spezifischen Übergänge zwischen universellen Hotspot-Klassen, die für die Reduktion von Hitzebelastungen entscheidend sind. Dieser Filterungs- bzw. Sortierungsprozess führt zu sechs spezifischen Datensätzen, die sowohl die klimatischen als auch die urbanen Besonderheiten der jeweiligen Regionen abbilden (siehe Vorgehen in Kapitel 4).

Um eine ausgewogene Datengrundlage für die ML-Verfahren zu gewährleisten, wird eine Klassenbalance durch einen sog. „Downsampling-Ansatz“ erreicht. Diese Methode stellt sicher, dass alle Klassen gleichmäßig in den Datensätzen vertreten sind und die Trainingsprozesse der ML-Modelle nicht durch unausgeglichenen Daten verzerrt werden.

Zudem werden aus den ursprünglichen Daten verschiedene Teilmengen mit jeweils 2,5 %, 10 % und 50 % der Datenmenge für die jeweiligen Regierungsbezirke und universellen Hotspotszenarien generiert. Diese Teilmengen ermöglichen es, die Modellleistung bei unterschiedlich großen Trainingsdatensätzen zu bewerten und die Robustheit der Modelle unter variierenden Bedingungen zu evaluieren.

Nach der Erstellung der Teilmengen erfolgte eine Aufteilung der zugrunde gelegten Datensätze in Trainings- und Testteildatensätze. Hierbei werden 50 % der Daten für das Training und 50 % für den Test verwendet. Zudem wird eine Stratifizierung der Daten durchgeführt, um sicherzustellen, dass die universellen Hotspot-Klassen in beiden Datensätzen gleichmäßig vertreten sind. Für die Evaluierung wurden zusätzliche Datensätze

verwendet, die zu 100 % erhalten bleiben und sicherstellten, dass mindestens 60 % der Daten den Modellen unbekannt sind. Dieses Vorgehen erlaubt eine robuste Überprüfung der Generalisierbarkeit der entwickelten Modelle.

Modelltraining und -optimierung

Nach der Generierung der Modellierungsdatensätze beginnt das Training der ML-Modelle und deren Optimierung. Für die Modellierung wird der „CatBoost-Regressor“ (siehe [66]) eingesetzt, ein leistungsfähiger Algorithmus, der besonders gut mit kategorialen Eingangsdaten und unausgeglichenen Datensätzen umgehen kann. Dieses Verfahren gehört zu der Gruppe an Modellansätzen, die auf Entscheidungsbäumen basieren.

Ein zentraler Bestandteil des Trainingsprozesses ist die Einführung eines zusätzlichen Gewichtungsparameters, der allen universellen Hotspot-Kategorien eine erhöhte Priorität einräumt. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Modelle den Übergängen zwischen den universellen Hotspot-Klassen eine besondere Bedeutung beimessen und diese präzise abbilden.

Die Optimierung der Modelle erfolgt mittels „Bayes’scher Optimierung“, einer Methode, die effizient den Parameterraum durchsucht, um optimale Einstellungen für die Modellleistung zu finden. Über 30 Iterationen hinweg werden Hyperparameter wie Baumtiefe, Lernrate und Iterationsanzahl angepasst, um die Vorhersagegenauigkeit weiter zu verbessern. Um die Robustheit der Modelle zu gewährleisten, wird eine dreifache Kreuzvalidierung durchgeführt. Die Kreuzvalidierung ist eine Technik zur Bewertung der Modellgüte, bei der der Datensatz in mehrere Teilmengen (sog. Folds) aufgeteilt wird. Das Modell wird wiederholt auf einer Teilmenge (Trainingsdaten) trainiert und auf der verbleibenden Teilmenge (Testdaten) getestet, wodurch eine zuverlässigere Einschätzung der Modellleistung erzielt wird. Im vorliegenden Fall dient der negative mittlere quadratische Fehler (`neg_mean_squared_error`) als primäre Bewertungsmetrik, um die Modellgüte sowohl für das Training als auch für die Testphase zu beurteilen.

Modellauswahl und -bewertung

Im Rahmen der Modellierung sind insgesamt 2.520 verschiedene Modelle trainiert und mit einem einheitlichen Ansatz verglichen worden, um die bestmögliche Schätzleistung hinsichtlich des Grünvolumens und damit der Ermittlung des Grünvolumendefizits zu gewährleisten. Um die Komplexität der Modellevaluierung zu reduzieren, wird eine automatisierte Selektion durchgeführt, die diese Anzahl zunächst auf 84 Modelle begrenzt. Diese Modelle werden anschließend einer detaillierten Analyse und Bewertung unterzogen, um die bestmöglichen Kandidaten für jeden Regierungsbezirk und jede Kombination der universellen Hotspotkategorien zu identifizieren.

Die Bewertung der Modelle erfolgt anhand mehrerer Kriterien. Die Modelle werden mit klassischen Regressionsmetriken wie dem Root Mean Squared Error (RMSE) und dem

Tabelle 13.1.: Evaluierung der Schätzergebnisse für die Grünvolumenänderung basierend auf zwei Metriken. RMSE bedeutet mittlerer quadratischer Fehler in der Einheit der Zielgröße und R^2 ist das einheitslose Bestimmtheitsmaß.

Modell	Universelle Hotspotklasse	RMSE in $\text{m}^3 \text{m}^{-2}$	R^2
CatBoost Darmstadt	4 → 2	1,61	0,94
CatBoost Gießen	4 → 2	1,56	0,94
CatBoost Kassel	4 → 2	1,55	0,94
CatBoost Darmstadt	5 → 3	1,31	0,95
CatBoost Gießen	5 → 3	1,97	0,92
CatBoost Kassel	5 → 3	1,92	0,93

Bestimmtheitsmaß (R^2) evaluiert. Diese Metriken werden sowohl auf den Gesamtdatensätzen als auch auf den Testdatensätzen berechnet, um die Modellgüte umfassend zu beurteilen.

Nach dieser umfassenden Evaluierung werden die verbleibenden 84 Modelle auf die finalen 30 reduziert. Diese finalen Modelle repräsentieren die beste Schätzleistung für jede Kombination aus universellem Hotspot-Klassenübergang und Regierungsbezirk und bieten eine solide Grundlage für präzise Vorhersagen und Planungen im Kontext der Klimaanpassung.

Die Güte der verschiedenen CatBoost-Modelle ist in Tabelle 13.1 dargestellt. Für den Übergang der universellen Hotspotklasse von „4 → 2“ zeigt das Modell für den Regierungsbezirk Kassel einen RMSE-Wert von $1,55 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ und ein R^2 von 0,94. Ähnliche Werte werden in den Regierungsbezirken Darmstadt und Gießen erzielt, mit RMSE-Werten von $1,61 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ bzw. $1,56 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ und identischen R^2 -Werten von 0,94. Für den Übergang von „5 → 3“ erzielt das Modell für Darmstadt mit einem RMSE von $1,31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ und einem R^2 von 0,94 die höchste Genauigkeit. Die Ergebnisse für Gießen und Kassel weisen etwas höhere RMSE-Werte von $1,97 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ bzw. $1,92 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ auf, während die R^2 -Werte bei 0,92 bzw. 0,93 lagen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die entwickelten CatBoost-Modelle eine präzise Vorhersage der notwendigen Grünvolumenänderungen ermöglichen. Die hohe Übereinstimmung der R^2 -Werte unterstreicht die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Modelle.

Analyse der Modelle

Abbildung 13.3 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der SHAP-Werte-Analyse, welche die Bedeutung der einzelnen Merkmale auf die Modellvorhersagen visualisiert. Die SHAP-Werte repräsentieren den Einfluss jedes Eingangsmerkmals auf das vorhergesagte Grünvolumen. Hohe positive oder negative SHAP-Werte zeigen einen großen Einfluss des je-

weiligen Merkmals, wobei positive Werte auf eine Erhöhung und negative Werte auf eine Verringerung der Vorhersage hinweisen.

Das wichtigste Merkmal ist der hochwüchsige Vegetationsanteil (`hochwuechsig_prozent_x`), welcher den größten positiven Einfluss auf das Modell hat, wie durch die Konzentration der SHAP-Werte auf der positiven Seite des Diagramms ersichtlich ist. Auch der mittlere NDVI-Wert (`ndvi_mean`) und die Klassifizierung nach vLCZ (hier kurz: `lcz`) tragen signifikant zu den Vorhersagen bei. Beide Merkmale stimmen mit der Erwartung von Experten:innen überein. Im Gegensatz dazu haben Merkmale wie der Versiegelungsanteil (`dach_prozent_x`) einen vorwiegend negativen Einfluss, da sie typischerweise mit einem geringeren Grünvolumen assoziiert sind. Jedoch spielen Dächer und auch die Vollversiegelung insbesondere für die Erhöhung der Temperatur eine zentrale Rolle. Darüber hinaus geht ein hoher Anteil an Vollversiegelung mit einem vermehrten raschen Abfluss der Niederschläge einher. Hierdurch mindert sich in sommerlichen Hitzeperioden der Anteil des für die Vegetationsverdunstung verfügbaren Niederschlagswassers. Der Umfang an Vollversiegelung ist somit in doppelter Hinsicht für die Vegetationsverdunstung bzw. die hierüber bewirkte Kühlleistung im urbanen Raum von Bedeutung. Beispielhaft sind für ausgewählte Bereiche in Hessen Analysen zum Verhältnis von Vollversiegelung und Grünvolumendefizit in Kapitel 17 gegeben.

Ein weiteres interessantes Merkmal sind die universellen Hot- und Coldspots (`universelle_hot_und_coldspots`). Diese haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Schätzung des Grünvolumens, abhängig von ihrer spezifischen Kategorie bzw. Intensität als universeller Cold- oder Hotspot.

Andere Merkmale wie SST (`strukturtyp`) oder der Anteil von niedrigwüchsiger Vegetation (`niedrigwuechsig_prozent_x`) haben ebenfalls eine moderate Auswirkung auf die Modellvorhersagen, während weniger signifikante Variablen, wie gewisse Strukturtypen (hier `pct_sst1` oder `pct_sst8`), eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Analyse zeigt deutlich, dass die Eingangsdaten, die mit der Vegetationswuchshöhe verbunden sind, den stärksten Einfluss auf die Vorhersage des Grünvolumendefizits haben, was die Bedeutung von „möglichst hochwüchsigen“ Vegetationsmaßnahmen in der Klimaanpassung unterstreicht. Gleichzeitig zeigt die Differenzierung der SHAP-Werte die Komplexität der Modellentscheidungen auf, da unterschiedliche Variablen sich auf verschiedene Weise auf das Modell auswirken.

13.2.3. Ermittlung des KI-basierten Grünvolumendefizits und Visualisierung

Basierend auf den implementierten ML-Verfahren und dem in Abschnitt 13.2.2 beschriebenen Vorgehen kann nun das Grünvolumen geschätzt werden. Es wird simuliert, inwieweit sich das Grünvolumen ändert, wenn die universellen Hotspotklassen (hier: 5, 4) im Eingang entsprechend den Tagwerten (hier auf: 3, 2) angepasst werden. Dies bedeutet, dass das Grünvolumendefizit daraufhin als Differenz ermittelt wird.

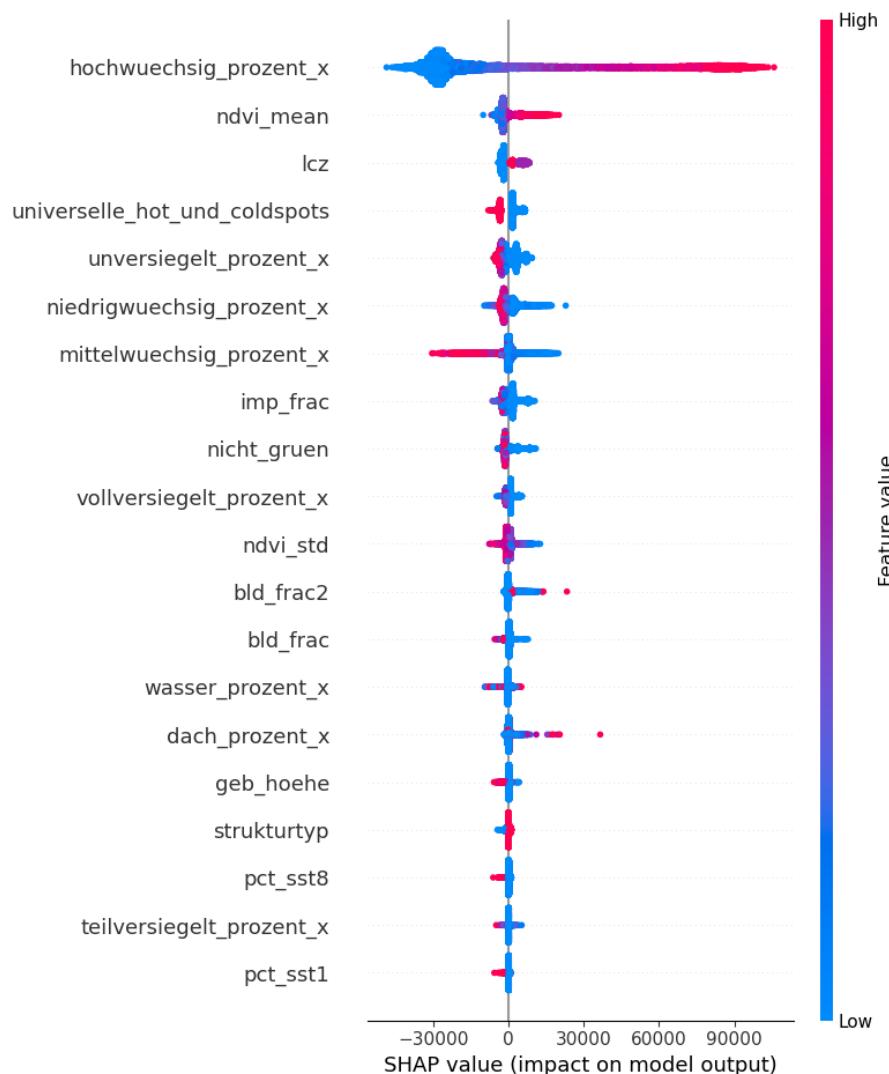


Abbildung 13.3.: SHAP-Visualisierung zur Interpretation der Einflussstärke der Eingangsmerkmale im CatBoost-Modell für den Regierungsbezirk Gießen und die Hotspotänderung von „4 → 2“ hinsichtlich der Grünvolumenänderung. Die Farbgebung zeigt die jeweiligen Feature-Werte an: Hohe Werte sind rot, niedrige Werte blau.

Abbildungen 13.4 und 13.5 zeigen die Verteilung des Grünvolumendefizits in Hessen, sowohl auf landesweiter Ebene als auch detailliert für ausgewählte Gemeinden. Sie stellen das Defizit in verschiedenen Kategorien dar: von „kein Defizit“ (weiß) über „geringes Defizit“ und „mittleres Defizit“ bis hin zu „hohem Defizit“. Für jeden Regierungsbezirk wird die Verteilung des Grünvolumendefizits in die drei genannten Klassen unterteilt, basierend auf den entsprechenden Perzentilen. Dabei werden die Werte in die unteren, mittleren und oberen Perzentilbereiche (jeweils 33 %) eingeordnet, um regionale Unterschiede in der Verteilung des Defizits sichtbar zu machen und konsistent zur Ermittlung der universellen Cold- und Hotspots zu bleiben (siehe Kapitel 12). Zudem existieren Bereiche ohne Daten, da die Grundlage für die Ermittlung des Grünvolumendefizits aus den universellen Hot- und Coldspots der Kategorien „Universeller Hotspot Tag und Nacht“ und „Universeller Hotspot Tag mit nächtlicher Abkühlung“ besteht.

Abbildung 13.4 illustriert die großflächige Verteilung des Grünvolumendefizits und zeigt, 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 Defizit, oft mit großen weißen Flächen, die auf ein ausreichendes Grünvolumen hinweisen.

Darstellungen wie Abbildung 13.5 ermöglichen eine präzisere Analyse auf lokaler Ebene wie z. B. für die Gemeinden Marburg, Witzenhausen, Waldeck und Frankfurt am Main. Sie machen 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, während Randgebiete oder Flächen mit bestehender Vegetation ein geringeres Defizit aufweisen.

Abbildungen 13.4 und 13.5 betonen die Bedeutung einer differenzierten Betrachtung von Grünvolumendefiziten, sowohl auf regionaler als auch auf lokaler Ebene. Diese visuelle Analyse unterstützt kommunale und regionale Entscheidungsträger dabei, gezielte Strategien zur Verbesserung des Grünvolumens zu entwickeln, um urbane Hitzeinseln zu reduzieren und die Lebensqualität in den betroffenen Gebieten zu erhöhen. Darstellungen wie Abbildungen 13.4 und 13.5 heben hierfür insbesondere hervor, in welchen Räumen aufgrund des vergleichsweise hohen Grünvolumendefizits bei der Klimaanpassung ein besonderer Fokus auf die Entwicklung hochwüchsiger und beschattender Vegetation gelegt werden sollte, sofern es sich bei diesen Räumen nicht um Kaltluftentstehungsgebiete oder Kaltluftbahnen handelt, die zur Minderung der sommerlichen Hitzebelastung offen zu halten sind. Gleichzeitig sind Regionen mit einem vergleichsweise hohen Bedarf an der Entwicklung großer Grünvolumina jene Räume, in denen Strategien zum vermehrten Niederschlagsrückhalt zur besseren Wasserversorgung der Vegetation besondere Bedeutung zukommt.

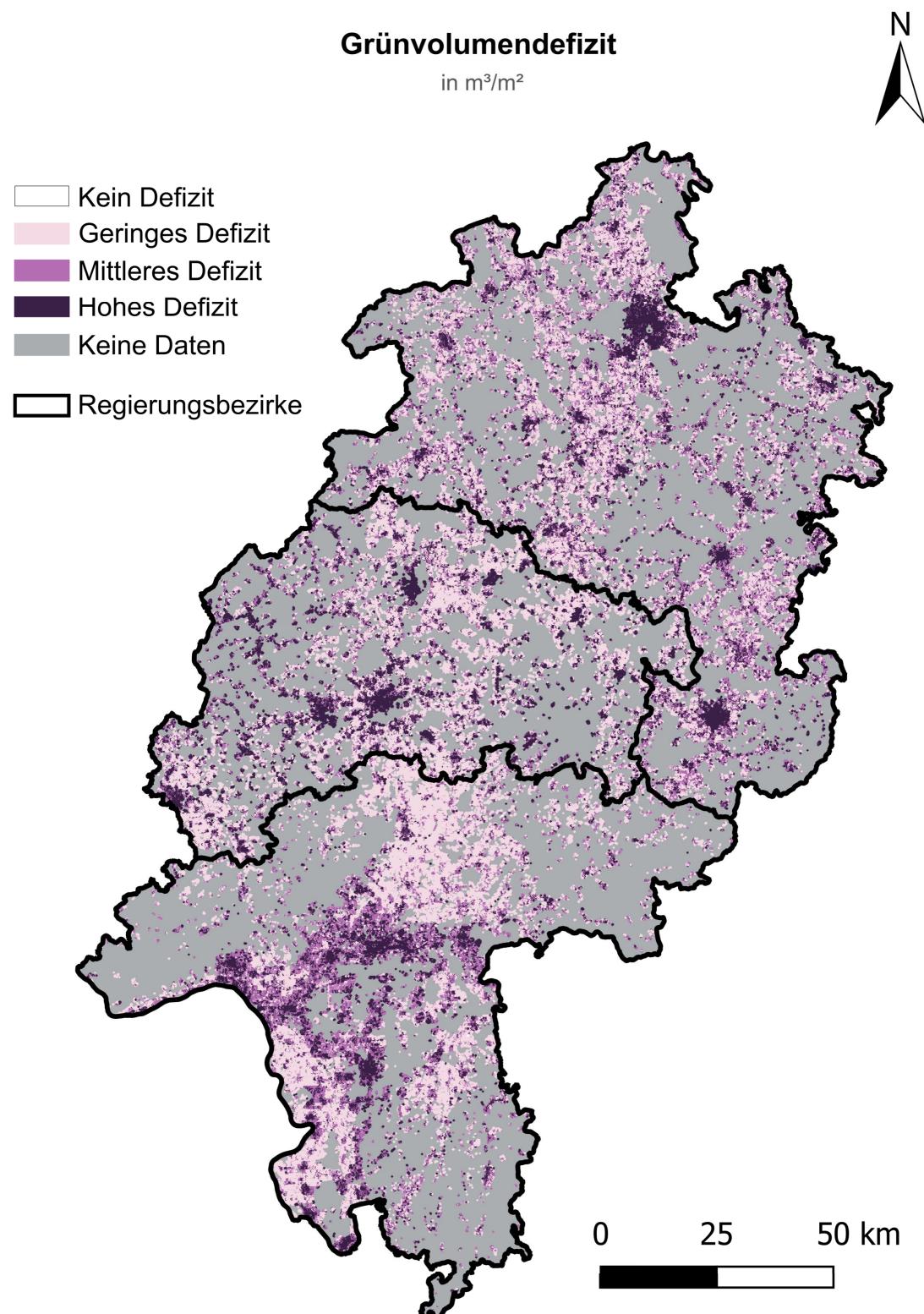


Abbildung 13.4.: Visualisierung des Grünvolumendefizits für Hessen auf Basis der Regierungsbezirke. Für jeden Regierungsbezirk wird die Verteilung des Grünvolumendefizits in drei Klassen unterteilt, basierend auf den entsprechenden Perzentilen (unteres Drittel: $\leq 33\%$ -Perzentil, mittleres Drittel: 34 % bis 66 %-Perzentil, oberes Drittel: $\geq 67\%$ - Perzentil). Dies ermöglicht eine vergleichbare Analyse der regionalen Unterschiede im Defizitniveau.

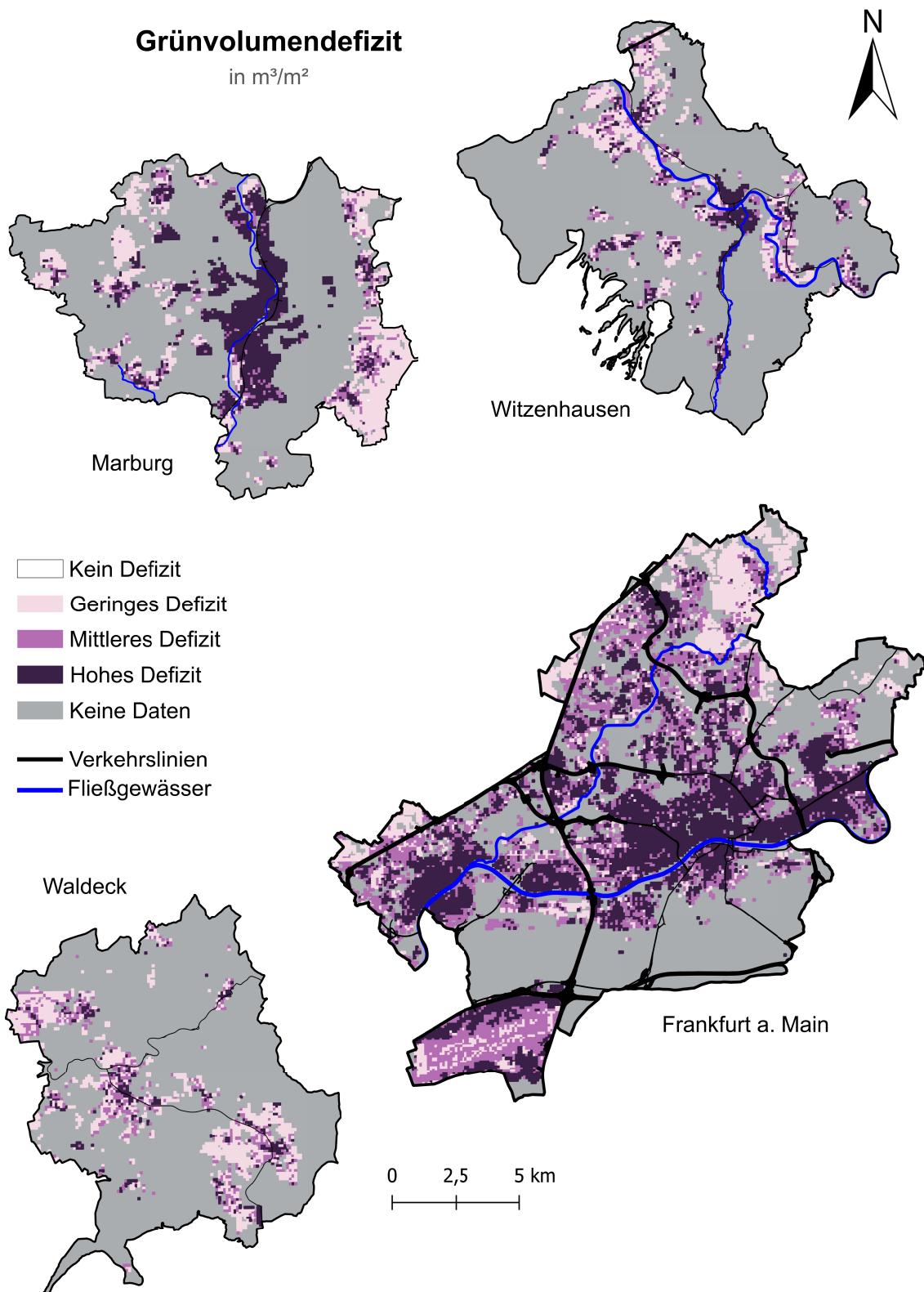


Abbildung 13.5.: Visualisierung des Grünvolumendefizits am Beispiel ausgewählter Gemeinden. Für jeden Regierungsbezirk und die darin liegenden Gemeinden wird die Verteilung des Grünvolumendefizits in drei Klassen unterteilt, basierend auf den entsprechenden Perzentilen (unteres Drittel: $\geq 33\%$ -Perzentil, mittleres Drittel: 34 % bis 66 % -Perzentil, oberes Drittel: $\geq 67\%$ - Perzentil). Dies ermöglicht eine vergleichbare Analyse der regionalen Unterschiede im Defizitniveau.

13.2.4. Fazit zur KI-basierten Ermittlung von Grünvolumendefiziten

Die im Rahmen des Projekts ermittelte Modellierung des Grünvolumendefizits bietet eine datengetriebene Grundlage für die Planung und Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen. Dabei ist zu betonen, dass die Ergebnisse auf modellgestützten Simulationen basieren, die auf einer Reihe von Annahmen beruhen. Diese Annahmen beeinflussen die Genauigkeit der Prognosen und sollten bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Beispielsweise stellt eine Limitierung in der vorliegenden Betrachtung die vereinfachte Annahme eines homogenen Grünvolumens dar. Dennoch bieten die Ergebnisse eine wertvolle Planungsgrundlage, um vergleichsweise hohe oder geringe Grünvolumendefizite überschlägig zu ermitteln und zielgerichtet zu mindern. Dabei ist es entscheidend, bei der Planung eine standortangepasste Pflanzenauswahl sowie die Bodenbeschaffenheit und Wasserverfügbarkeit zu berücksichtigen. Insbesondere während Trockenperioden, in denen die Wasserverfügbarkeit für Verdunstungsprozesse eingeschränkt ist, können diese Faktoren einen erheblichen Einfluss auf die Kühlleistung von Grünflächen haben. Studien zeigen, dass insbesondere die Bodenart maßgeblich die kühlende Wirkung von Grünflächen beeinflusst, wobei sandige Böden eine geringere Wasserspeicherfähigkeit und infolgedessen eine reduzierte Verdunstung aufweisen, während lehmhaltige Böden den Kühleffekt deutlich steigern können [79]. Ebenso können die Wahl und die Vitalität der Vegetation den Kühlungseffekt während Hitzeperioden stark variieren lassen, da unterschiedliche Pflanzenarten und -strukturen unterschiedlich auf Trockenstress reagieren [54].

Auch wenn die Steigerung des Grünvolumens das Potenzial bieten kann, die Tagesoberflächentemperaturen in urbanen Gebieten zu senken und somit urbane Hitzeinseln abzumildern, können weitere Einflüsse aus anderen Bereichen sowie komplexere Wechselwirkungen aus Landesoberfläche, Vegetation und Temperaturen die Effekte beeinflussen. Die Ergebnisse dieses Kapitels zeigen dennoch, dass die Erhöhung des Grünvolumens ein vielversprechender Baustein im Rahmen eines umfassenden Maßnahmenpaketes zur Klimaanpassung ist. Insbesondere in universellen Hotspots zeigt sich, dass durch Maßnahmen der sogenannten „Grün-Kosmetik“ – beispielsweise durch die Anlage reiner Rasenflächen – keine relevanten Beiträge zur Temperaturdämpfung geleistet werden können. Vielmehr ist eine gezielte Kombination mit hochwüchsigen Bäumen und Sträuchern erforderlich, um eine effektive Kühlleistung zu erzielen.

In Kapitel 17 wird das hier vorgestellte Grünvolumendefizit zusammen mit weiteren Indikatoren, wie Vollversiegelung, Grünvitalität (NDVI) und Blau-Grünen Indikatoren gesamtheitlich und auf planerischer Ebene betrachtet.

14. Abgrenzung von priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten

14.1. Einführung zu den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten

Mit der Identifikation von universellen Hot- und Coldspots (siehe Kapitel 12) werden Gebiete ermittelt, die Suchräume für Handlungsschwerpunkte für die Klimaanpassung darstellen. Diese Suchräume sind für die landesweite, regionale und kommunale Ebene verwendbar. Um eine weitere Konkretisierung und Priorisierung des Handlungsbedarfs für Klimaanpassungsmaßnahmen innerhalb dieser Suchräume vornehmen zu können, werden zusätzliche Daten herangezogen.

Die hierfür entwickelte, sog. „Snakes-Ladders Analysis (SLA)“ Methodik stützt sich auf ein Merit-and-Penalty-System, wobei jede zusätzliche Datenquelle die Gewichtung einzelner Gitterzellen innerhalb eines zuvor abgeleiteten Suchraums erhöhen oder verringern kann. Dies beruht auf dem Grundgedanken, dass zusätzliche Informationen, wie z. B. die Bevölkerungsdichte, die Hitzebelastung der Umgebung oder die vorhandene Belüftung wichtige Faktoren darstellen, die den Handlungsdruck oder Erhaltungsbedarf verstärken – oder in selteneren Fällen auch vermindern – können.

Um die sehr heterogenen Datenquellen möglichst harmonisiert und dennoch pragmatisch in dieses System einzuführen, werden die Gewichtungsstufen aus statistischen Parametern abgeleitet und aggregiert. Da sich eine bestimmte Datenquelle unterschiedlich auf den Handlungsdruck in universellen Hotspot-Gebieten oder den Erhaltungsbedarf in universellen Coldspot-Gebieten auswirken kann, stützt sich die Methodik zwar immer auf die gleichen Datensätze, es werden aber unterschiedliche Gewichtungsstufen für universelle Hotspots und universelle Coldspots abgeleitet.

Die SLA-Methodik ist grundsätzlich für alle Planungsebenen identisch entwickelt und stützt sich auf 100 m-Gitterzellen der INSPIRE-Richtlinie. Eine Aggregation dieser Ergebnisse bspw. auf den Bezugsrahmen der Regierungsbezirke ergibt räumliche Handlungsschwerpunkte auf Regionalebene oder ggf. auch Landesebene. Auf lokaler Ebene können noch deutlich weitergehende Informationen z. B. über Stadtstruktur- oder Raumtypen vorliegen, die nicht in den hier verwendeten Datensätzen abbildbar sind. Daher sind die

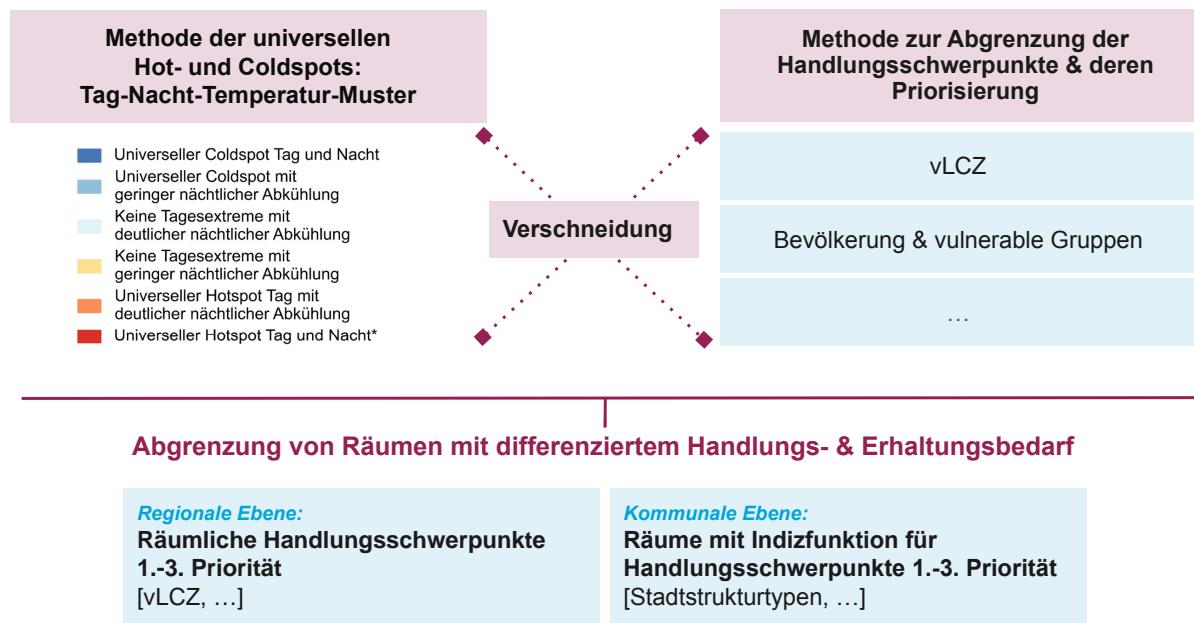


Abbildung 14.1.: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen den Methoden der universellen Hot- und Coldspots (links) und der Methode zur Abgrenzung der Handlungsschwerpunkte inkl. deren Priorisierung (rechts) für die verschiedenen räumlichen Ebenen (unten). *(Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.)

Gitterzellen-Ergebnisse dieses Verfahrens auf lokaler Ebene als **Räume mit Indizfunktion für Handlungsschwerpunkte** zu interpretieren.

Abbildung 14.1 visualisiert das zugrundeliegende Schema der SLA-Methodik: Der linke obere Bereich der Grafik zeigt die Eingangsdaten aus der universellen Hot- und Coldspot-Analyse (siehe Kapitel 12). Der rechte obere Bereich symbolisiert die zusätzlichen Daten, die mit den universellen Hot- und Coldspots verschneitten (mittig) und durch SLA gewichtet werden. Ergebnisse sind Räume mit differenziertem Handlungs- und Erhaltungsbedarf, die auf dem Bezugsrahmen der regionalen Ebenen räumliche Handlungsschwerpunkte und auf lokaler Ebene eine Indizfunktion für räumliche Handlungsschwerpunkte darstellen.

Nachfolgend wird in Abschnitt 14.2 die SLA-Methodik näher erläutert sowie Ergebnisse für ausgewählte Gemeinden sowie die Regionalebene gezeigt.

14.2. SLA und verwendete Datenquellen

Ziel der Methodik ist es, die nachfolgend vorgestellten Eingangsdatenquellen in solch einer Weise zu kombinieren, dass sie mit der räumlichen Auflösung der 100 m-Gitterzellen die Bedeutung eines Suchraums für einen Handlungsschwerpunkt über die Temperatur-Charakteristiken aus Kapitel 12 weitergehend bewerten können.

Diese Eingangsdaten umfassen Indikatoren wie Umweltfaktoren, Bevölkerungsdichte, Infrastrukturdaten oder sozialdemografische Informationen. Daraus berechnete statistische Merkmale erhöhen die Gewichtung eines Suchraums in unterschiedlichen Stärken, oder können sie in selteneren Fällen auch senken. So signalisiert eine Erhöhung um +1, +2 oder +3 jeweils eine zunehmende Dringlichkeit, während mindernde Faktoren mit den Stärken –1 oder –2 einfließen. Bei einigen Kategorien der Eingangsdaten kann die Gewichtung unverändert bleiben (± 0), falls sie für die Priorisierung des Handlungsschwerpunktes keine Rolle spielen. Insgesamt werden sechs Datenquellen hinzugezogen, die in zwei Gruppen eingeteilt sind.

Gruppe 1 umfasst:

- Bevölkerungsdichte (siehe Abschnitt 6.2)
- Anzahl der vulnerablen Einrichtungen (siehe Abschnitt 6.2)
- Belüftungswirkung (Durchlüftungsfunktion aus LWKA siehe Abschnitt 15.1)

Gruppe 2 umfasst:

- Intensität der universellen Hot-/Coldspots (siehe Abschnitt 12.1)
- Anzahl universeller Hot- oder Coldspots im 200 m-Umkreis (siehe Abschnitt 12.1)
- vereinfachte LCZ (siehe Abschnitt 5.2)

Die Unterscheidung in die beiden Gruppen ist insofern von Bedeutung, als die Gewichtungen für die Daten in **Gruppe 1** unabhängig davon, ob es sich um einen universellen Hot- oder Coldspot handelt, wirken. Die Daten der **Gruppe 2** wirken dagegen unterschiedlich, je nachdem, ob ein universeller Hot- oder Coldspot vorliegt, weshalb auch unterschiedliche Gewichtungen für universelle Hot- bzw. Coldspots verwendet werden.

Ableitung der Gewichtungen: Die Bestimmung der Gewichtungen der Daten aus **Gruppe 1** ist in Abbildung 14.11 zusammengefasst. Auf der linken Seite ist jeweils gezeigt, wie die Höhe der Gewichtungen mit dem Perzentil der jeweiligen Verteilung zusammenhängt. Die Histogramme auf der rechten Seite illustrieren die korrespondierende Verteilung, wobei dunklere Farbtöne höhere Gewichtungen bedeuten. (Man beachte die logarithmischen Skalen.) Die vier grünlichen Farbtöne des obersten Histogramms zeigen somit jene Bereiche der Bevölkerungsverteilung an, die zu Gewichtungen von +1, +2 oder +3 führen, während Gitterzellen ohne Bevölkerung ganz links im Histogramm akkumuliert werden und somit der hellste Farbton keine weitere Gewichtung nach sich zieht (Gewichtung von 0). Die räumliche Verteilung der Gewichtung findet sich in den Abb. 14.2 und 14.3 für Hessen und ausgewählte Gemeinden.

Analog wird für die Gewichtung einer Gitterzelle durch den Datensatz der vulnerablen Einrichtungen verfahren (siehe Abbildung 14.11, mittig; räumliche Darstellung in Abb. 14.4 und 14.5). Aufgrund der geringen Anzahl an vulnerablen Einrichtungen pro Gitterzelle ist hier die maximale Gewichtung +2 erreicht.

Die Bewertung der Strömungsverhältnisse basiert auf den in der LWKA simulierten Datensätzen. In diesen Datensätzen werden Durchlüftungsfunktionen der Strömung und in-

direkt auch die Eindringtiefe aus der Summe der Betroffenheiten aller Siedlungsgebiete berechnet. Die simulierten Daten liegen für zwei Zeitpunkte (22 Uhr und 4 Uhr) sowie auf zwei Höhenebenen (5 m und 28 m) vor. Die räumliche Auflösung beträgt hessenweit 200 m \times 200 m; für das Gebiet des Ballungsraums Frankfurt am Main liegt eine höhere Auflösung von 50 m \times 50 m vor. Da die verwendeten, dimensionslosen Werte von der jeweiligen Gitterzellengröße beeinflusst werden, können die Datensätze aufgrund ihrer unterschiedlichen räumlichen Auflösung nicht direkt zusammengeführt werden. An ein und demselben Ort beschreiben sie dadurch unterschiedliche Strömungssituationen und sind ohne Anpassung nicht unmittelbar vergleichbar.

Um die beiden unterschiedlichen räumlichen Datensätze aufeinander abzustimmen, wurde eine lineare Skalierung vorgenommen: Zunächst wurden alle Werte auf eine einheitliche Gittergröße von 100 m skaliert. Dabei galt die zusätzliche Bedingung, dass beim Datensatz mit 50 m Auflösung alle vier Zellen, die zu einer 100 m Zelle zusammengefasst werden, gültige Werte aufweisen müssen. Anschließend wurden für die überlappenden Gitterzellen die Werte abgeglichen und eine lineare Skalierung der logarithmierten Werte durchgeführt. Dabei wurden alle Zeitpunkte und Höhen einbezogen, um eine konsistente Anpassung sicherzustellen.

Abbildung 14.6 zeigt die dabei ermittelte lineare Regressionsbeziehung (rote Linien) zwischen den Belüftungswirkungen (Punktfolke) in 200 m und 50 m-Auflösung (x- und y-Achse). Das Bestimmtheitsmaß beträgt $R^2 = 0,74$. Aus der Regression ergibt sich ein Skalierungsfaktor von 1,28, der auf alle Höhen- und Zeitstufen angewendet wurde. Die Durchlüftungsfunktion sowie indirekt die Eindringtiefe der Strömung werden anschließend über die Summe der betroffenen Siedlungsgebiete berechnet.

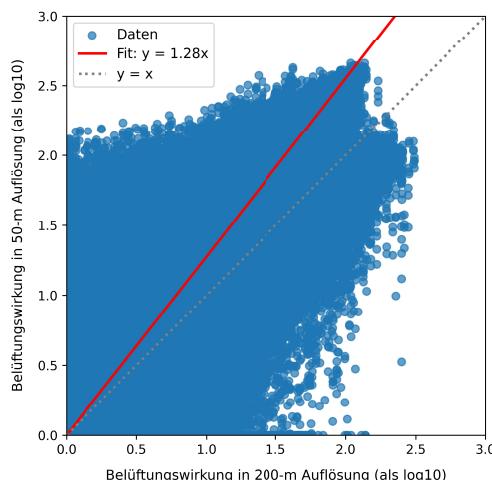


Abbildung 14.6.: Lineare Skalierung abgeleitet aus überlappenden Daten der Belüftungswirkung unterschiedlicher Auflösungen ($R^2 = 0,7387$).

Die Verteilung der Gewichtungen für die Belüftungswirkung folgt der Darstellung im Histogramm. Abbildung 14.11 zeigt exemplarisch in der Teilabbildung unten rechts die Teil-Gewichtung für die Belüftung um 4 h auf einer Höhe von 5 m. Zur Aggregation der Teil-Gewichtungen wurden zunächst die Gewichtungen der beiden Höhenstufen 5 m und

28 m für jede Zeitstufe summiert, sodass separate Summen für 4 h und 22 h vorliegen. Anschließend wurde für jede Gitterzelle das Maximum aus diesen beiden Summen gewählt. Daraus ergibt sich ein maximaler Gewichtungswert (Vote) von +2. Die räumliche Darstellung dieser Gewichtung ist in Abb. 14.7 und 14.8 für gesamt Hessen sowie für die vier ausgewählten Gemeinden visualisiert.

Für die Bestimmung der Gewichtungen der **Gruppe 2** wird nun separat für universelle Hot- bzw. Coldspots fortgefahren.

Abbildung 14.12 zeigt den Zusammenhang von Verteilungen der Daten mit Gewichtung für die universellen Hotspots. Die obere Zeile illustriert, wie die Präsenz von universellen Hot- und/oder Coldspots in der Nachbarschaft die Gewichtung einer Gitterzelle beeinflusst. Je mehr universelle Hotspot-Zellen in der Umgebung vorhanden sind, umso größer ist auch der Handlungsdruck. Die Gewichtung kann sich auch verringern (negative Werte der Gewichtung), wenn deutlich mehr universelle Coldspot-Zellen in der Umgebung sind. Dann wird davon ausgegangen, dass eine einzelne heiße Zelle weniger starken Einfluss auf den gesamten Raum ausüben kann. Die räumliche Darstellung für Hessen sowie ausgewählte Gemeinden ist in Abb. 14.9 und 14.10 dargestellt. Sie illustrieren, inwieweit die lokalen Nachbarschaften durch viele universelle Hot- oder Coldspots geprägt sind. Je intensiver der Farbton, umso stärker überwiegt die jeweilige Kategorie. In nicht farblich hervorgehobenen Gebieten ist die Nachbarschaft von universellen Hot- und Coldspots ausgeglichen.

In ähnlicher Weise wird mit den vereinfachten LCZ verfahren (mittlere Zeile in Abbildung 14.12). Speziell Wald und Gehölze, aber auch Flächen mit generell geringer Oberflächenrauigkeit (meist Offenlandflächen) mindern den Handlungsdruck. Lockere, niedrige Bebauung beeinflusst den Handlungsdruck nicht. Je höher oder kompakter die Bebauung ist, umso mehr erhöht sich auch das Gewicht des Handlungsdrucks.

Zuletzt wird noch die Intensität eines universellen Hotspots analysiert (siehe Abbildung 14.12, unten), wie sie in Kapitel 12 für die abschließende Kategorisierung der universellen Hotspots eingeführt wurde. In Abhängigkeit von der universellen Hotspot-Klasse findet ebenfalls eine stärkere Gewichtung statt.

Für universelle Coldspots wird wie in Abbildung 14.13 gezeigt vorgegangen. Die obere Reihe visualisiert den Fall der 200 m-Nachbarschaft, der immer zu höheren Gewichtungen führt. Sowohl großflächige universelle Coldspots als auch isolierte universelle Coldspots haben einen erhöhten Erhaltungsbedarf. Lediglich für den Fall, dass es sich um Nachbarzellen ohne Temperaturextreme handelt, verändert sich die Gewichtung nicht (Gewichtung von 0). Analog wie bei universellen Hotspots werden auch bei universellen Coldspots die vereinfachten LCZ und die Intensität der universellen Coldspots betrachtet (mittlere bzw. untere Graphiken in Abbildung 14.13).

Wenn universelle Coldspots beispielsweise in bebauten Gebieten vorkommen, haben sie große Bedeutung und damit hohen Erhaltungsbedarf. Je kompakter oder höher die Bebauung ist, umso stärker fällt auch das Gewicht für die Erhaltung der universellen Coldspots aus (bis hin zu Vote +2). Für die universellen Coldspot-Intensität gilt, je besser die Klasse

eines universellen Coldspots (z. B. universelle Coldspot bei Tag und Nacht), umso größer ist auch der Erhaltungsbedarf.

Ableitung der Gesamtpriorisierung: Die zuvor genannten Priorisierungsstufen werden für jede Gitterzelle berechnet und aufsummiert. Die Kriterien aus **Gruppe 1** ermöglichen daher in der Summe eine Priorisierung jeder Gitterzelle zwischen 0 und +7. Die Fortführung mit den Kriterien aus **Gruppe 2** (differenziert für Hot- bzw. Coldspots) ermöglicht eine weitere Heraufstufung bzw. Herabstufungen im Bereich zwischen -4 und +6 für Gitterzellen universeller Hotspots und im Bereich zwischen -1 und +6 für Gitterzellen universeller Coldspots.

Aggregiert bedeutet dies, dass universelle Hotspot-Gitterzellen theoretisch eine Gesamtpriorisierung im Wertebereich zwischen -4 und +13 erhalten können und universelle Coldspot-Gitterzellen eine Gesamtpriorisierung im Bereich zwischen -1 und +13.

In den Abbildungen 14.14 und 14.15 sind die Histogramme der Gesamtpriorisierungen aller Gitterzellen der klassifizierten universellen Hot- und Coldspots für ganz Hessen dargestellt. Es zeigt sich, dass die Wertebereiche für universelle Hotspots zwischen -3 und +12 liegen und damit den maximal möglichen Wertebereich nahezu voll ausschöpfen, während für universelle Coldspots nur Werte im Bereich zwischen -1 und +6 erreicht werden.

Anhand dieser Histogramme wurden nachfolgend final – jeweils für Hotspots und Coldspots getrennt – drei Priorisierungsstufen abgeleitet (siehe Tabelle 14.1), die die Dringlichkeit von Maßnahmen oder Untersuchungen für jeden Bereich darstellen. Die Einteilung wurde so gewählt, dass nach Möglichkeit die obersten 20 % der Verteilungen der Priorisierung 1 mit sehr hohem Handlungs- bzw. Erhaltungsbedarf zugeordnet werden und die verbleibenden 80 % absteigend möglichst jeweils hälftig der Priorisierung 2 (40 %) mit hohem Handlungs- bzw. Erhaltungsbedarf sowie der Priorisierung 3 (40 %) mit mittlerem Handlungs- bzw. Erhaltungsbedarf zugewiesen werden. Aufgrund der zugrundeliegenden ganzzahligen Gewichtungsklassen unterliegen die Histogramme allerdings Diskretrisierungseffekten. Die tatsächlichen Grenzen (Perzentile) der Priorisierungsstufen weichen daher von den o.g. Grenzen geringfügig ab (vgl. Abbildungen 14.14 und 14.15).

Tabelle 14.1.: Prioritätseinstufung des Handlungs- und Erhaltungsbedarfs basierend auf der SLA. Basis bilden die universellen Hot- (rechts) und Coldspots (links).

1. Priorität	Sehr hoher Handlungs-/Erhaltungsbedarf	Sehr hoher Handlungsbedarf
2. Priorität	Hoher Handlungs-/Erhaltungsbedarf	Hoher Handlungsbedarf
3. Priorität	Mittlerer Handlungs-/Erhaltungsbedarf	Mittlerer Handlungsbedarf

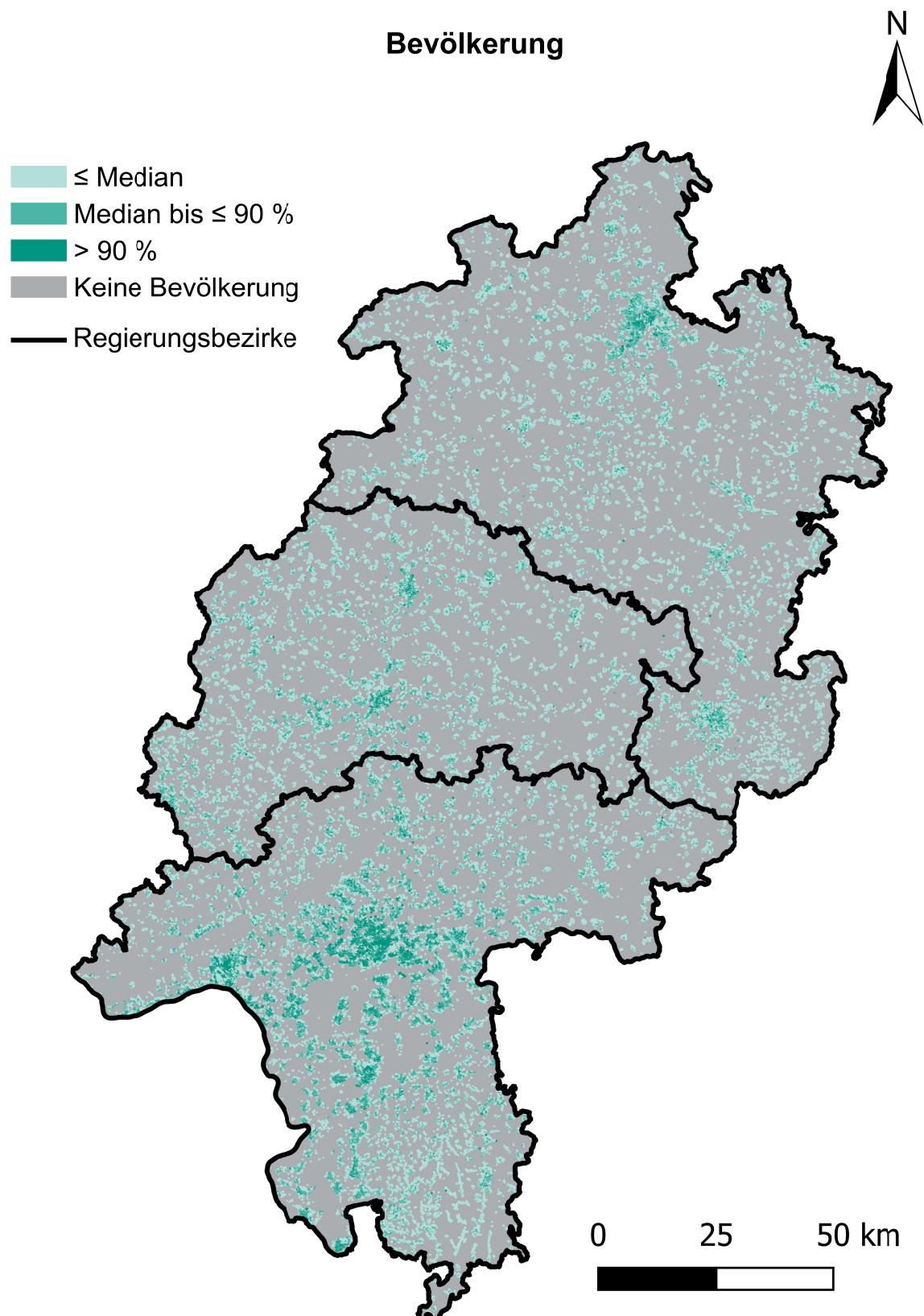


Abbildung 14.2.: Bevölkerung pro Hektar in Hessen basierend auf dem Zensus 2022 des Bundes. Die hier dargestellten Klassen entsprechen den Gewichtungen in der SLA.

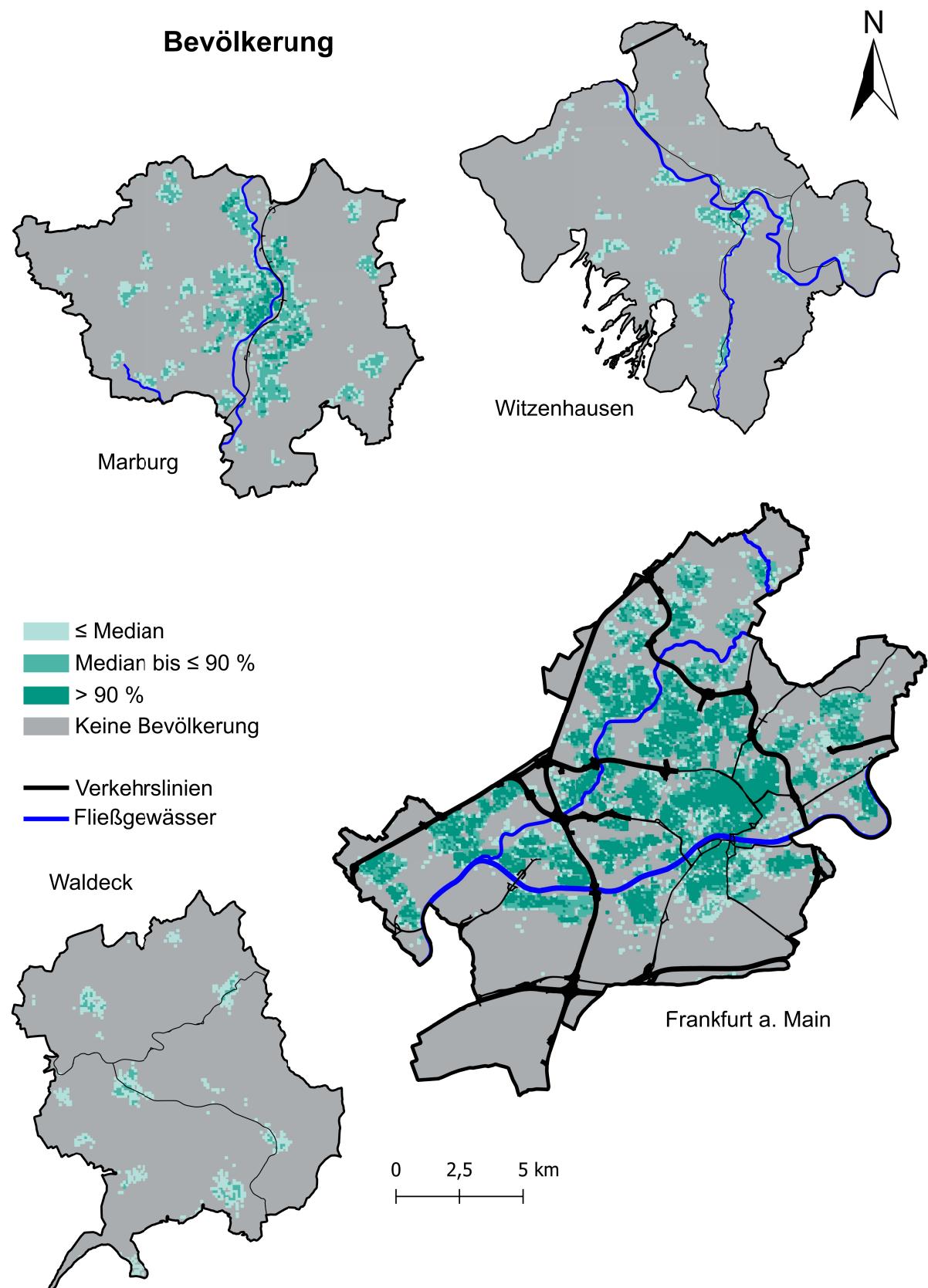


Abbildung 14.3.: Bevölkerung pro Hektar in ausgewählten Gemeinden basierend auf dem Zensus 2022 des Bundes. Die hier dargestellten Klassen entsprechen den Gewichtungen in der SLA.

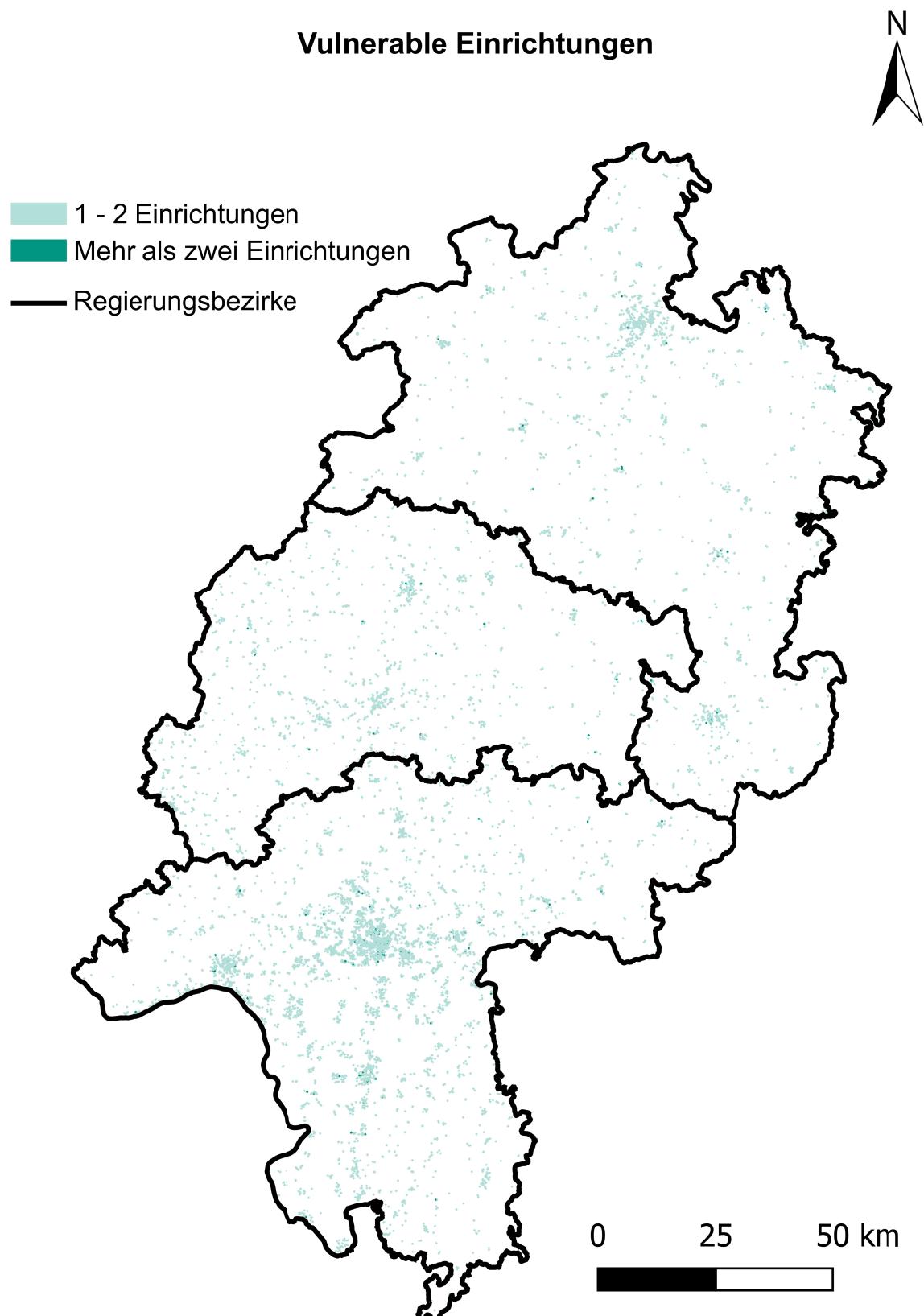


Abbildung 14.4.: Anzahl vulnerabler Einrichtungen nach Kapitel 6 pro Hektar in Hessen. Die hier dargestellten Klassen entsprechen den Gewichtungen in der SLA.

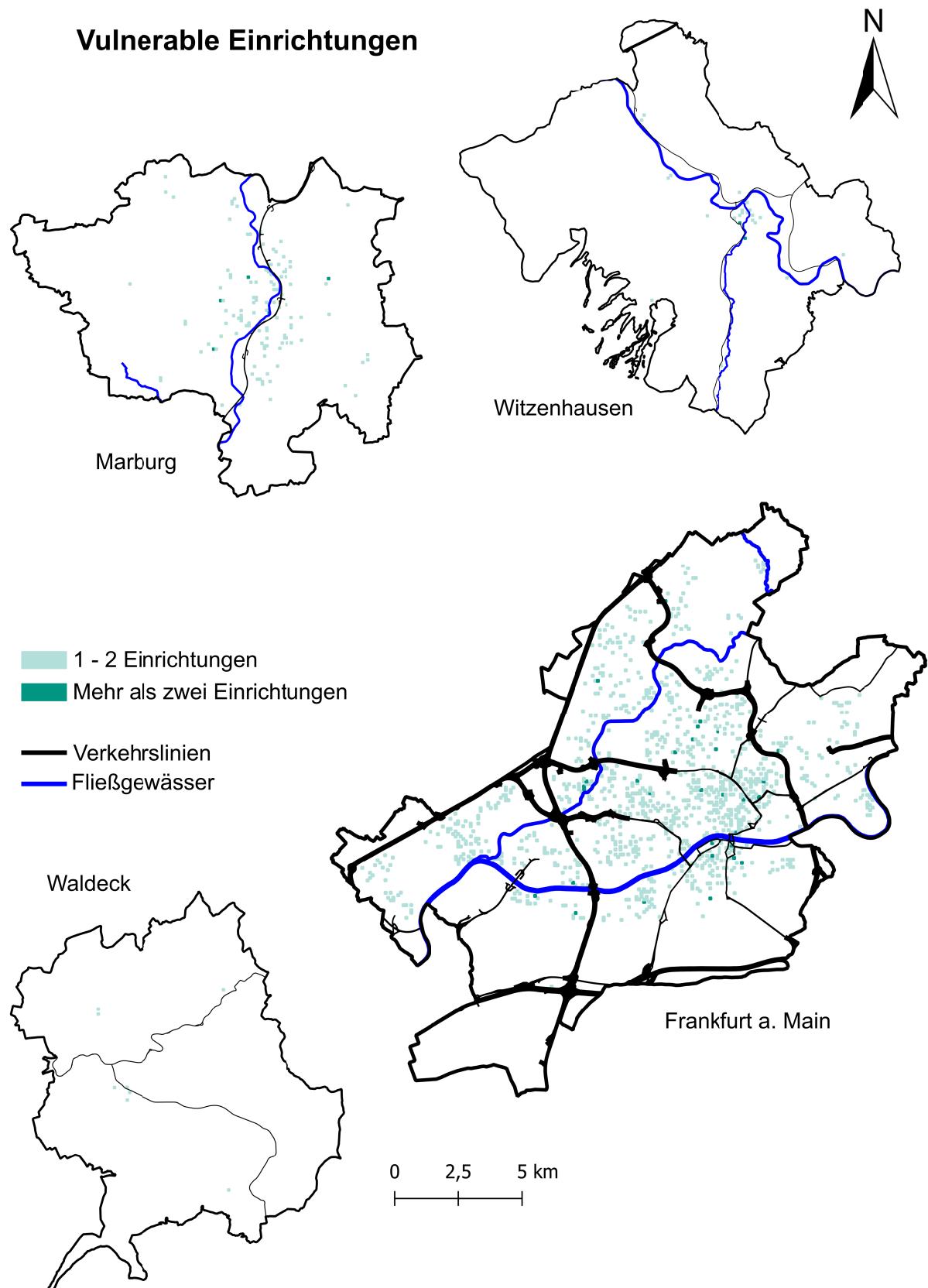


Abbildung 14.5.: Anzahl vulnerabler Einrichtungen nach Kapitel 6 pro Hektar in ausgewählten Gemeinden. Die hier dargestellten Klassen entsprechen den Gewichtungen in der SLA.

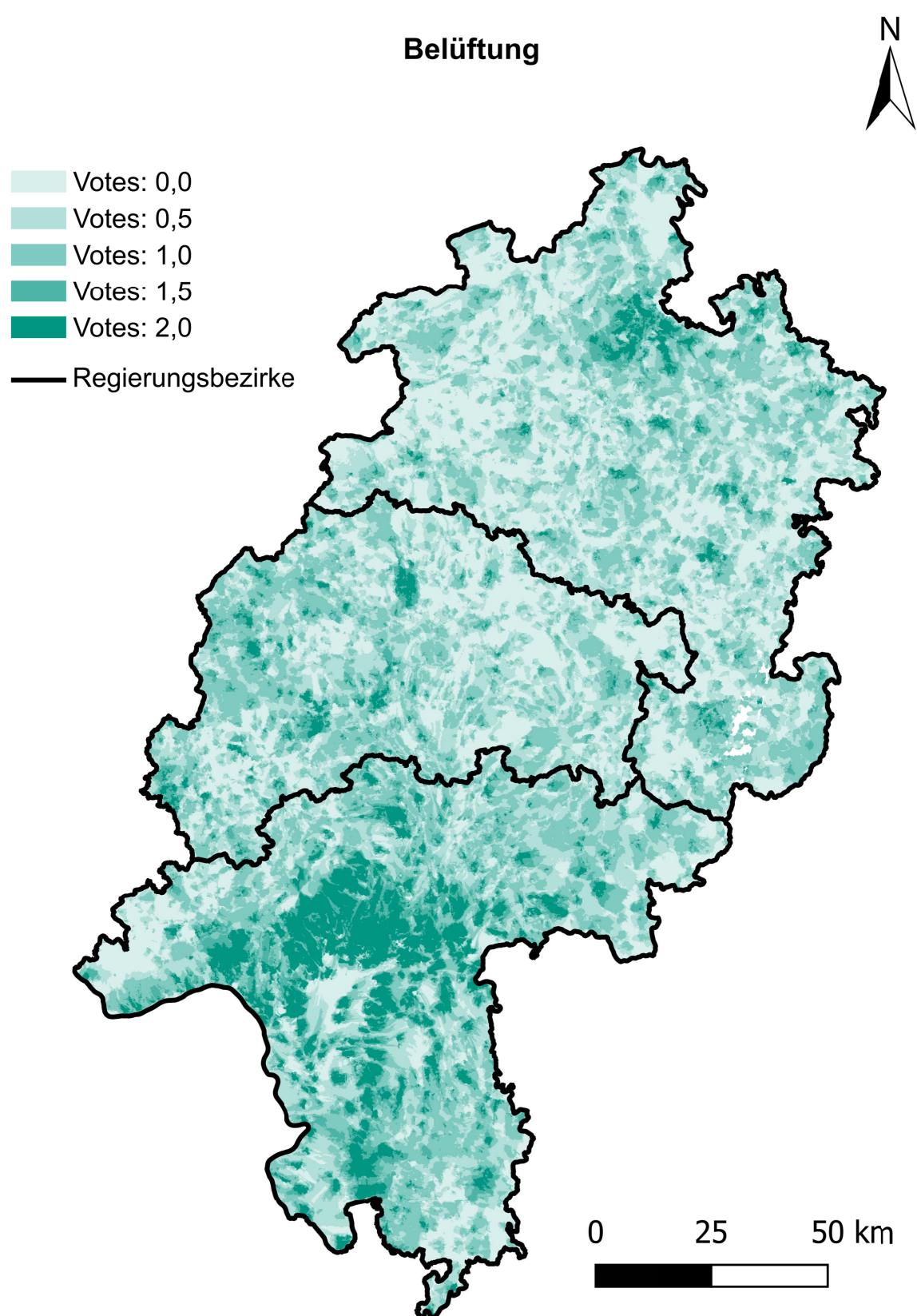


Abbildung 14.7.: Gewichtung der Belüftungswirkung in gesamt Hessen als Basis für SLA.

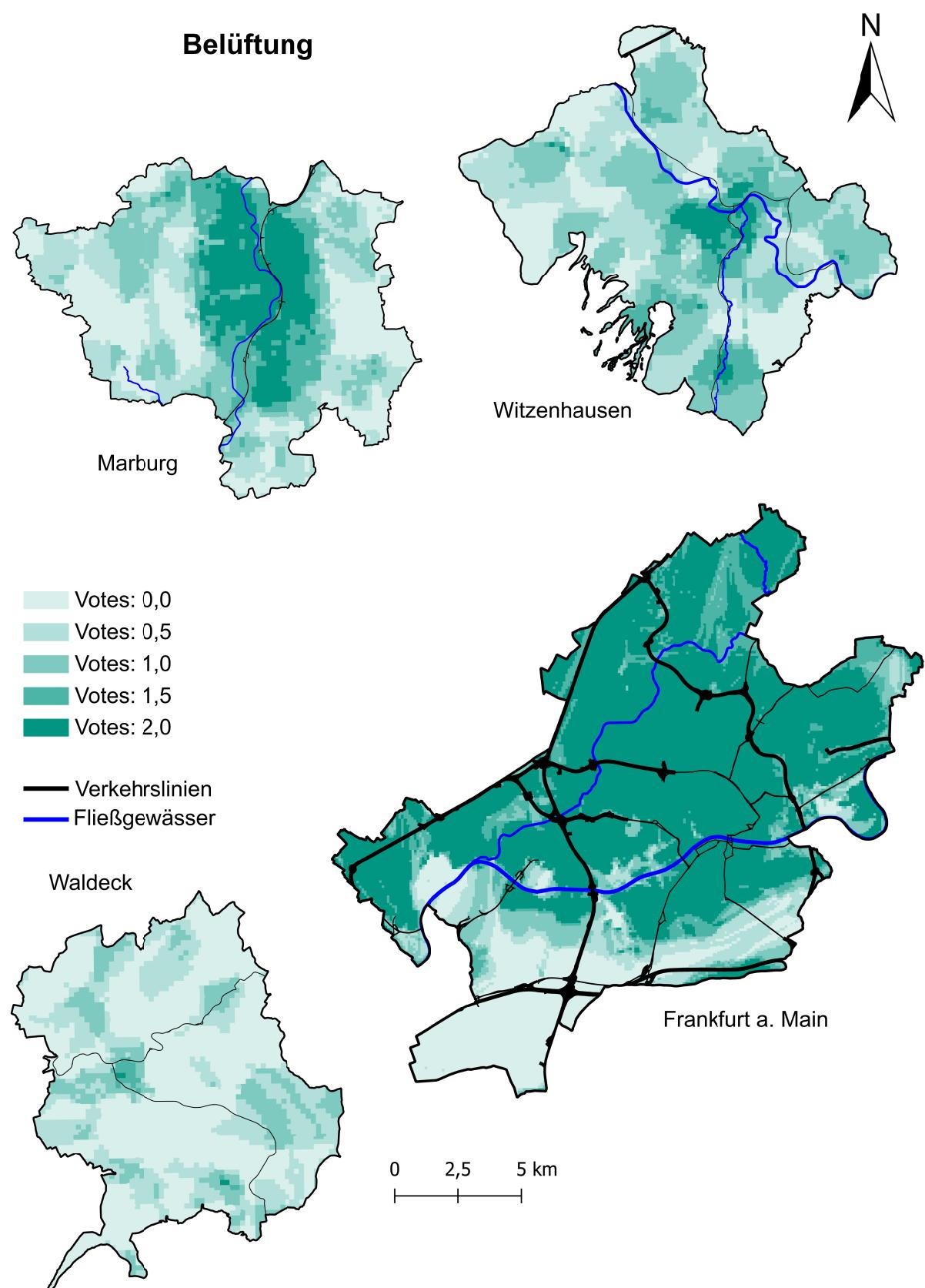


Abbildung 14.8.: Gewichtung der Belüftungswirkung für die ausgewählten Gemeinden als Basis für SLA.

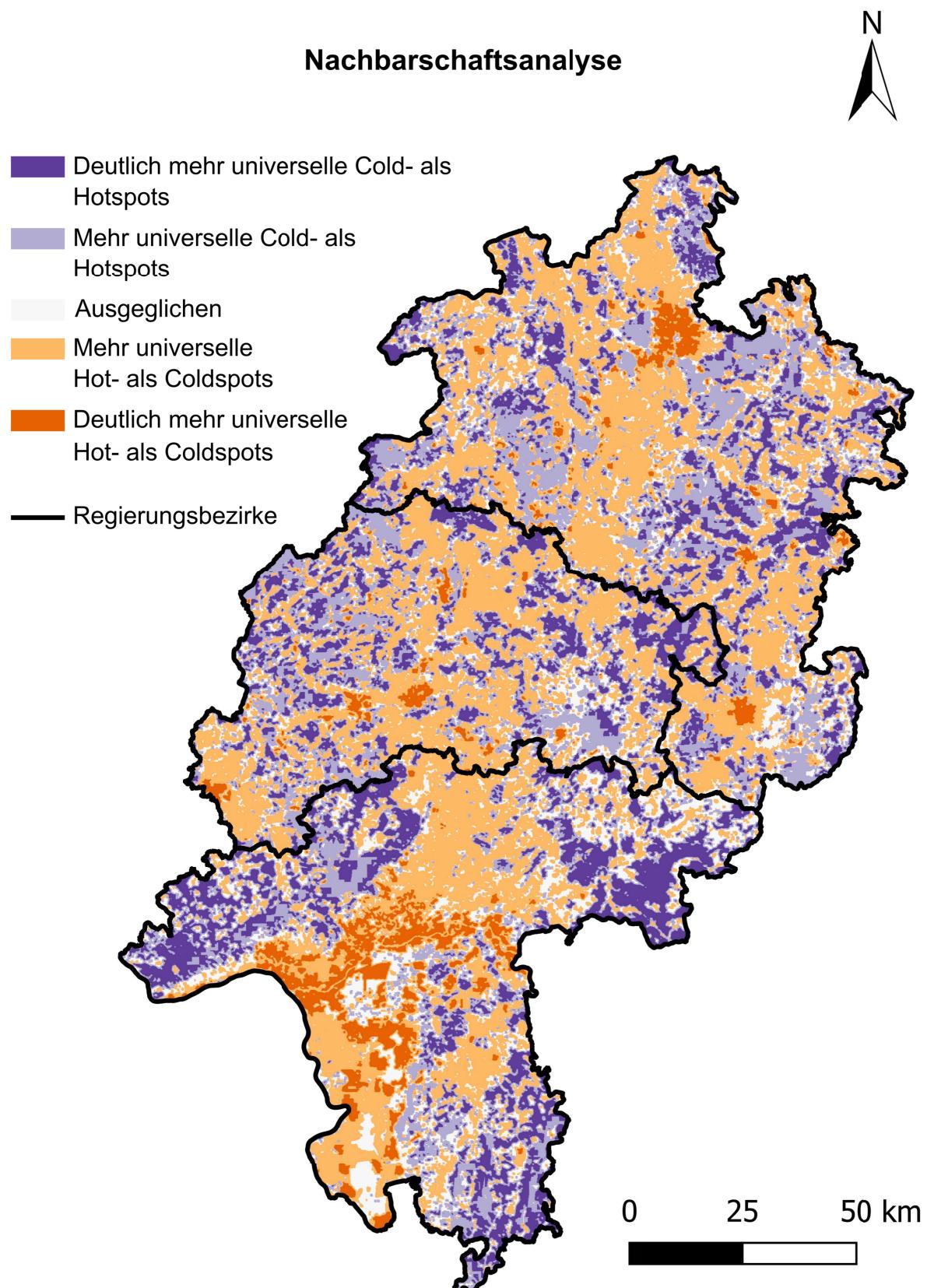


Abbildung 14.9.: Nachbarschaftsanalyse von universellen Hot- und Coldspots in Hessen als Basis von SLA: Je intensiver der Farbton, umso stärker überwiegt die jeweilige Kategorie. In farblosen Regionen ist die Nachbarschaft von universellen Hot- und Coldspots ausgeglichen.

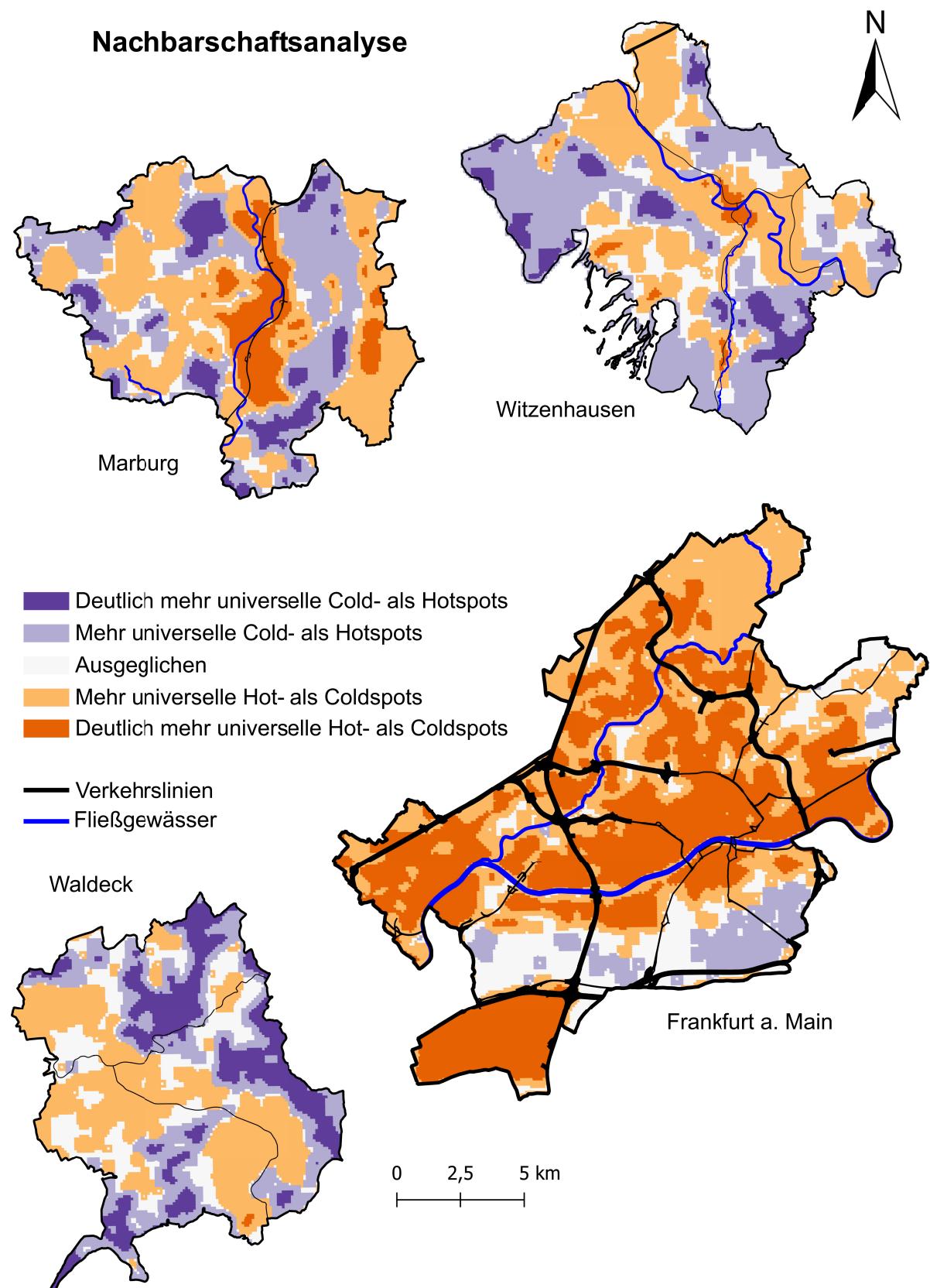


Abbildung 14.10.: Nachbarschaftsanalyse von universellen Hot- und Coldspots für ausgewählte Gemeinden als Basis von SLA: Je intensiver der Farbton, umso stärker überwiegt die jeweilige Kategorie. In farblosen Regionen ist die Nachbarschaft von universellen Hot- und Coldspots ausgeglichen.

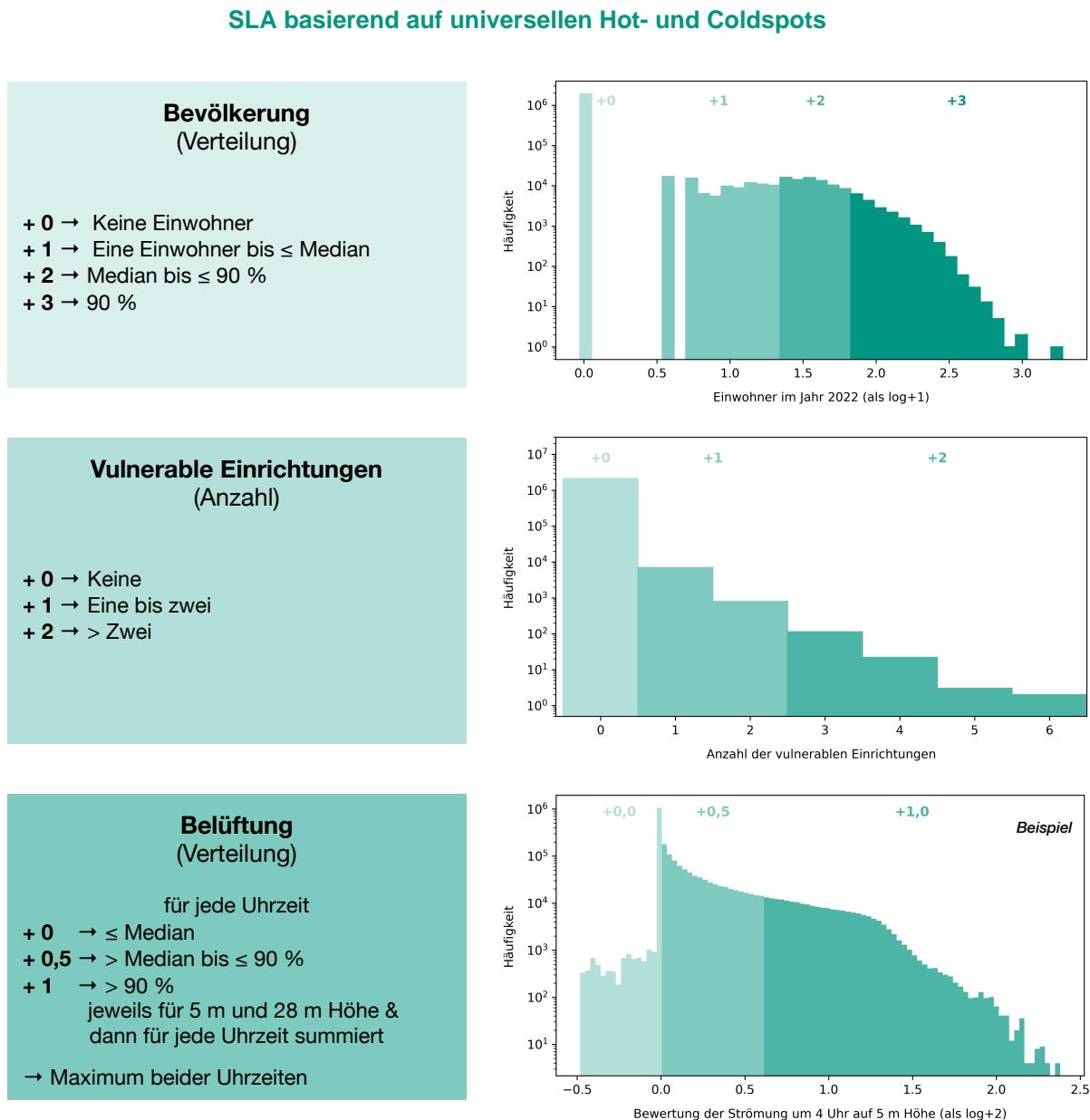


Abbildung 14.11.: Visualisierung für das mehrstufige Vorgehen der SLA für die universellen Hot- und Coldspots. Eine differenzierte Gewichtung erfolgt für weitere drei Eingangsdaten für die universellen Hot- und Coldspots (siehe Fortsetzung in Abbildungen 14.12 und 14.13).

Fortführung der SLA basierend auf universellen Hotspots

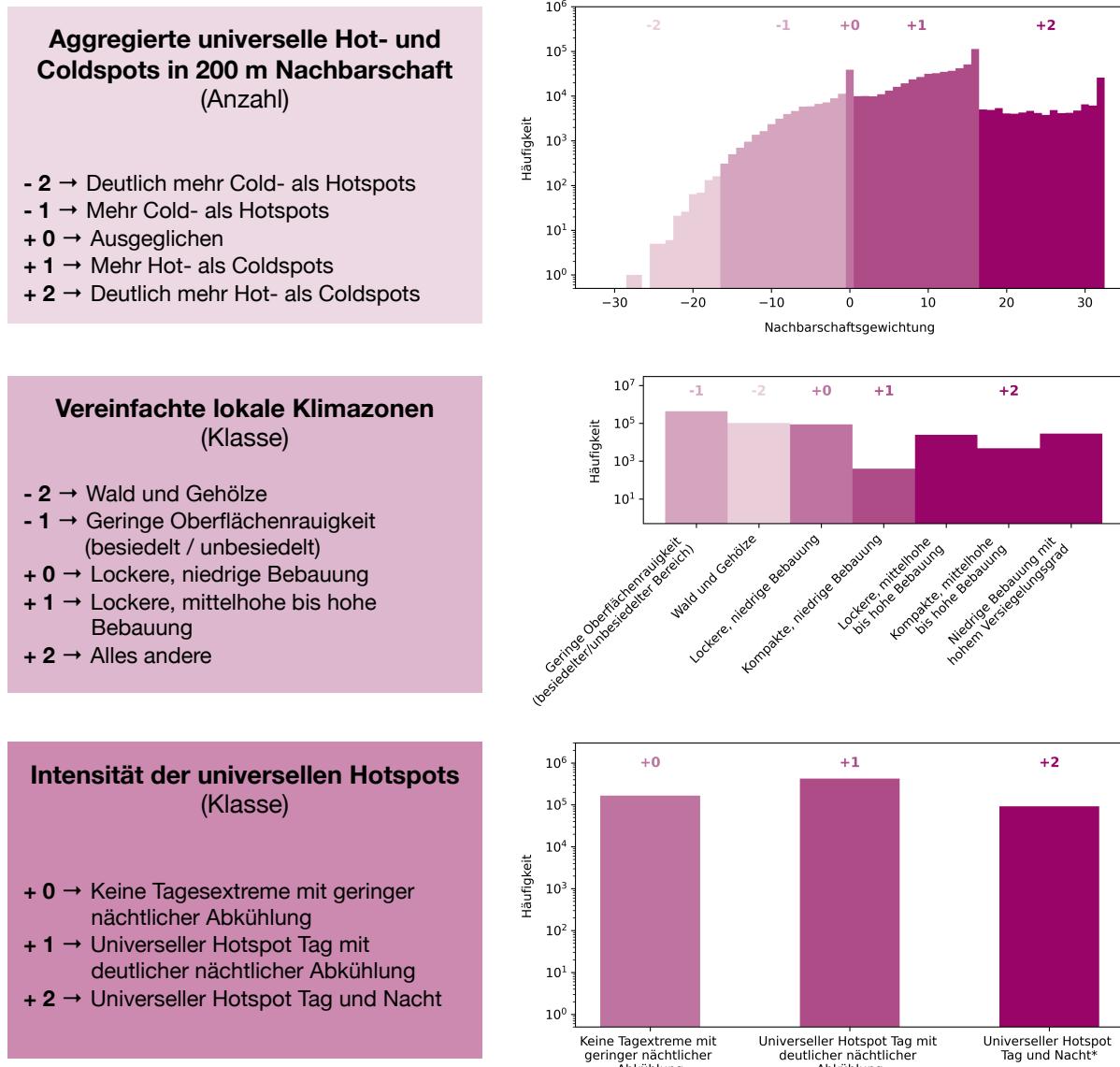


Abbildung 14.12.: Visualisierung für das mehrstufige Vorgehen der SLA für die universellen Hotspots. Es handelt sich um die Fortführung von Abbildung 14.11.

Fortführung der SLA basierend auf universellen Coldspots

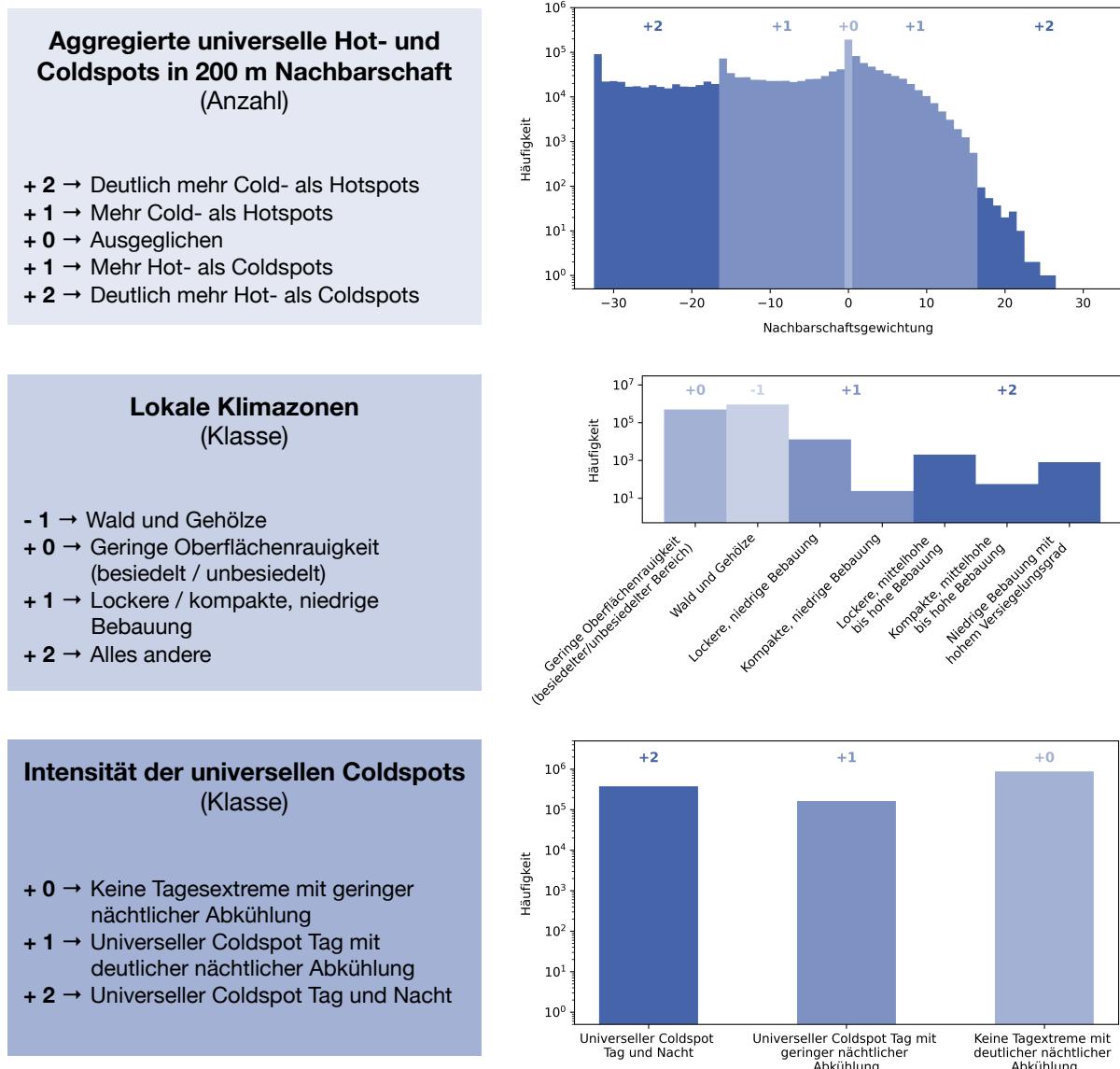


Abbildung 14.13.: Visualisierung für das mehrstufige Vorgehen der SLA für die universellen Coldspots. Es handelt sich um die Fortführung von Abbildung 14.11.

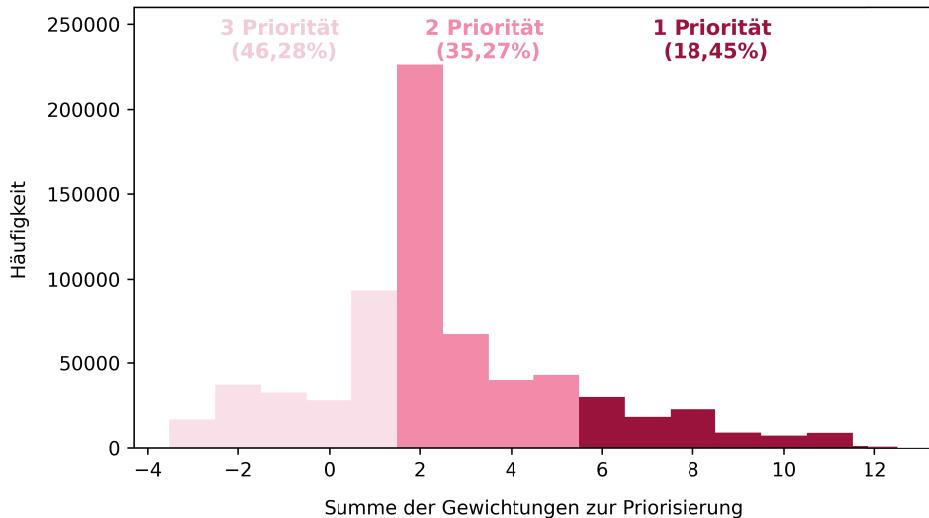


Abbildung 14.14.: Einteilung der universellen Hotspots nach SLA-System.

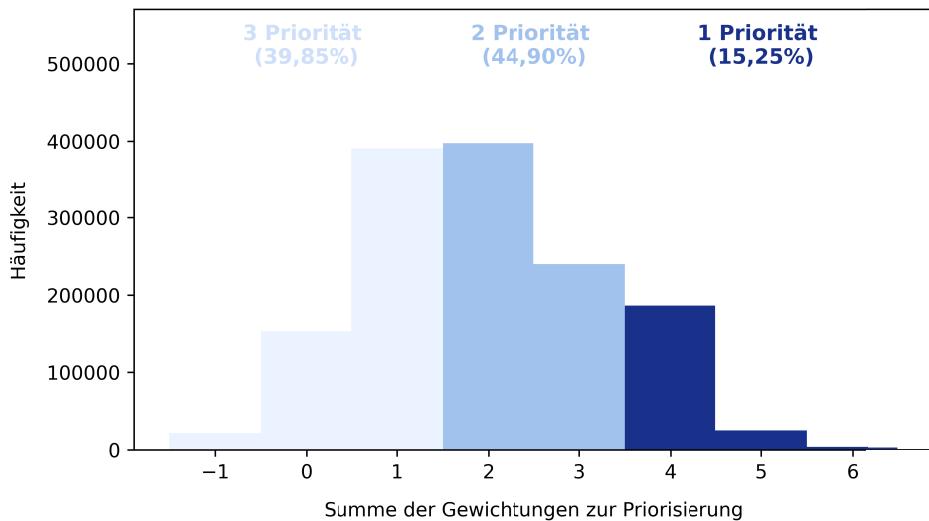


Abbildung 14.15.: Einteilung der universellen Coldspots nach SLA-System.

14.3. Ergebnisse der SLA

Die in den Abschnitten 14.1 und 14.2 zur Abgrenzung von räumlichen Handlungsschwerpunkten skizzierten Schritte wurden für gesamt Hessen im 100 m-Gitter berechnet. Abbildung 14.16 visualisiert diese Auswertung für das gesamte Land, wobei die mittlere Karte die Synopse räumlicher Handlungsschwerpunkte basierend auf universellen Hot- und Coldspots illustriert und die beiden äußeren Karten jeweils ausschließlich mittels universeller Cold- bzw. Hotspots. Der Bezugsrahmen für die Berechnungen, insbesondere die statistischen Auswertungen, ist durch die Regierungsbezirke vorgegeben. Insofern stellt Abbildung 14.16 sowohl die Regional- als auch die Landesebene dar.

Die drei Priorisierungsstufen für die universellen Hot- und Coldspots (siehe Abschnitt 14.2) werden durch die Farbintensität räumlich abgebildet. Die Ermittlung der Priorisierungen anhand von Perzentilen resultiert in einer ähnlichen Häufung der Priorisierungsgruppen für jeden Regierungsbezirk. Somit konnte der Einfluss großräumiger klimatischer Effekte minimiert werden, der insbesondere im Regierungsbezirk Darmstadt (Südhessen) durch auffällig höhere Temperaturextreme als in Nord- und Mittelhessen geprägt ist. Auffallend ist, dass im Regierungsbezirk Darmstadt eine räumlich sehr deutliche Abgrenzung zwischen hochpriorisierten universellen Hotspot-Gebieten – also Räumen mit erhöhtem Handlungsdruck – der urban geprägten Region des Rhein-Main-Gebiets und ebenfalls hochpriorisierten universellen Coldspot-Gebieten mit großem Erhaltungsbedarf jeweils östlich und westlich davon auftritt. In den anderen Regierungsbezirken sind diese Phänomene wie erwartbar v. a. in den Stadtgebieten zu erkennen.

Abbildung 14.17 stellt die Abgrenzung von räumlichen Handlungsschwerpunkten für die vier ausgewählten Gemeinden (kommunale Ebene) dar. Zusätzlich eingeblendet sind die Ortslagen. Eine hohe Priorisierung ergibt sich nahezu durchweg in bebauten Gebieten. In den kleineren Gemeinden haben vorzugsweise Offenlandregionen jeweils die niedrigste Priorisierungsstufe für Hot- und Coldspot-Gebiete. Vor allem Waldgebiete zeigen großen Erhaltungsbedarf.

Die Auswertung für Frankfurt zeigt beispielsweise, dass universelle Coldspots hoher Priorität überwiegend in nordöstlich gelegenen Offenlandbereichen (insbesondere in landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie extensivem Grünland) und in angrenzenden Waldgebieten auftreten. Diese Flächen weisen eine hohe klimatische Funktionsfähigkeit auf und werden daher in den oberen Priorisierungsgruppen für Erhaltungsmaßnahmen eingeordnet. In den innerstädtischen, dicht bebauten Quartieren sind demgegenüber universelle Hotspots sehr hoher Priorität identifiziert worden. Diese Flächen zeichnen sich durch erhöhte thermische Belastung und hohe Bevölkerungsdichte aus und sind in der Klassifikation vorrangig als Gebiete mit sehr hohem Handlungsbedarf hinsichtlich klimawirksamer Maßnahmen eingestuft. Der Verlauf des Mains tritt ebenfalls als klimatisch relevanter Raum in Erscheinung. Aufgrund der temperatursausgleichenden Wirkung der Wasserfläche zeigt der Fluss selbst nur mittlere Ausprägungen von Handlungsdruck. Entlang des Flusslaufs befinden sich jedoch einzelne Gitterzellen, die als Coldspots mit hoher Priorität klassifiziert wurden und entsprechend als funktional bedeutsame Erhaltungsräume bewertet werden.

In Summe unterstreichen die Ergebnisse die Plausibilität des gewählten Ansatzes. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass auf allen Planungsebenen, aber v. a. auf der lokalen Ebene, die gezeigten Methoden und Auswertung als Planungsunterstützung und nicht als Planungsvorgabe fungieren. Diese hier gezeigten Daten geben wertvolle Hinweise für Handlungsschwerpunkte, die durch die Vor-Ort-Kenntnis der agierenden Planungsbehörden modifiziert werden sollten.

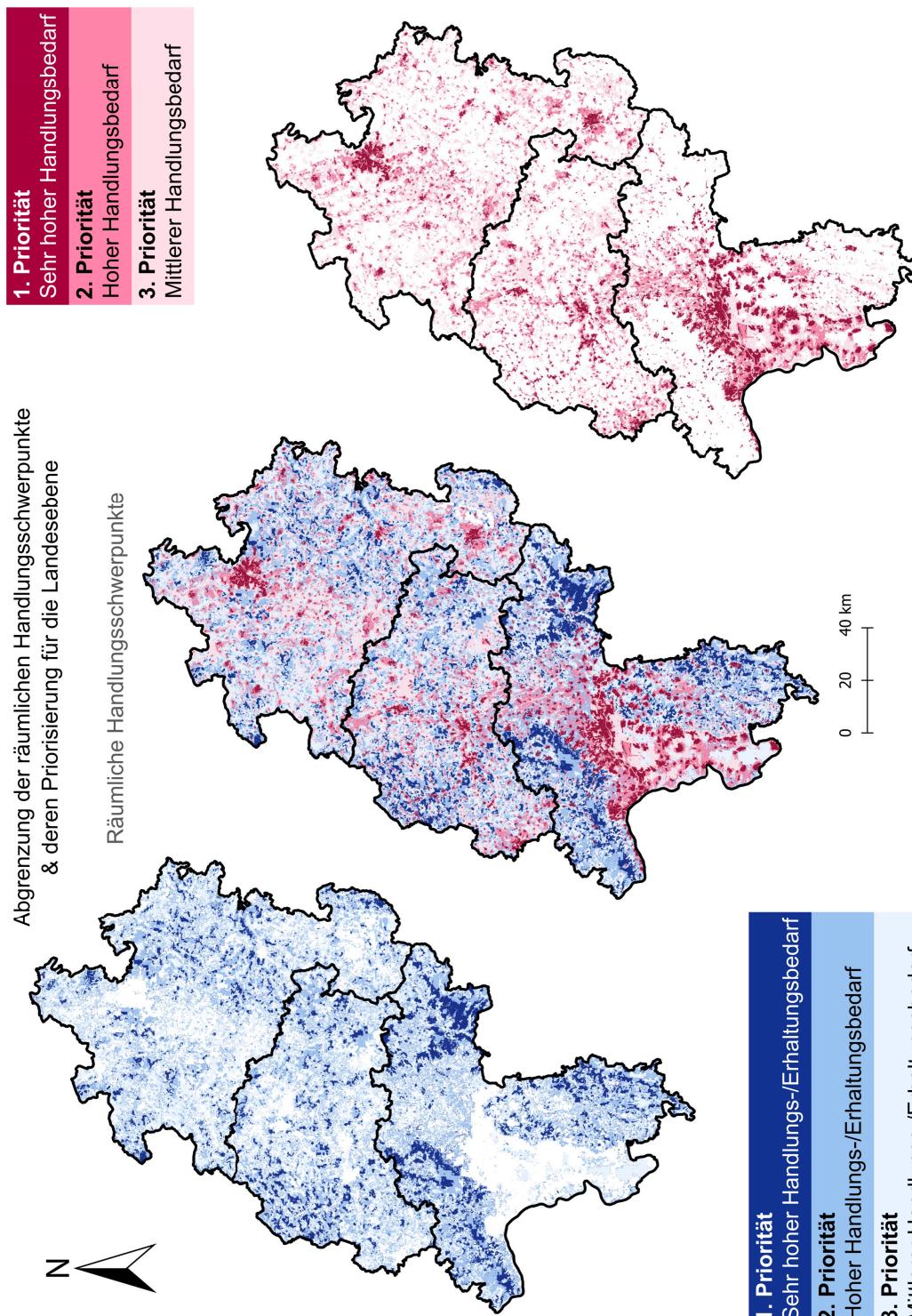


Abbildung 14.16.: Abgrenzung der räumlichen Handlungsschwerpunkte und deren Priorisierung, visualisiert für die Landesebene; Bezugsrahmen für die Berechnungen sind Regierungsbezirke. Links: Priorisierung der Handlungsschwerpunkte aus den universellen Coldspots, Rechts: Priorisierung der Handlungsschwerpunkte aus den universellen Hotspots. Mitte: Kombinierte Visualisierung.

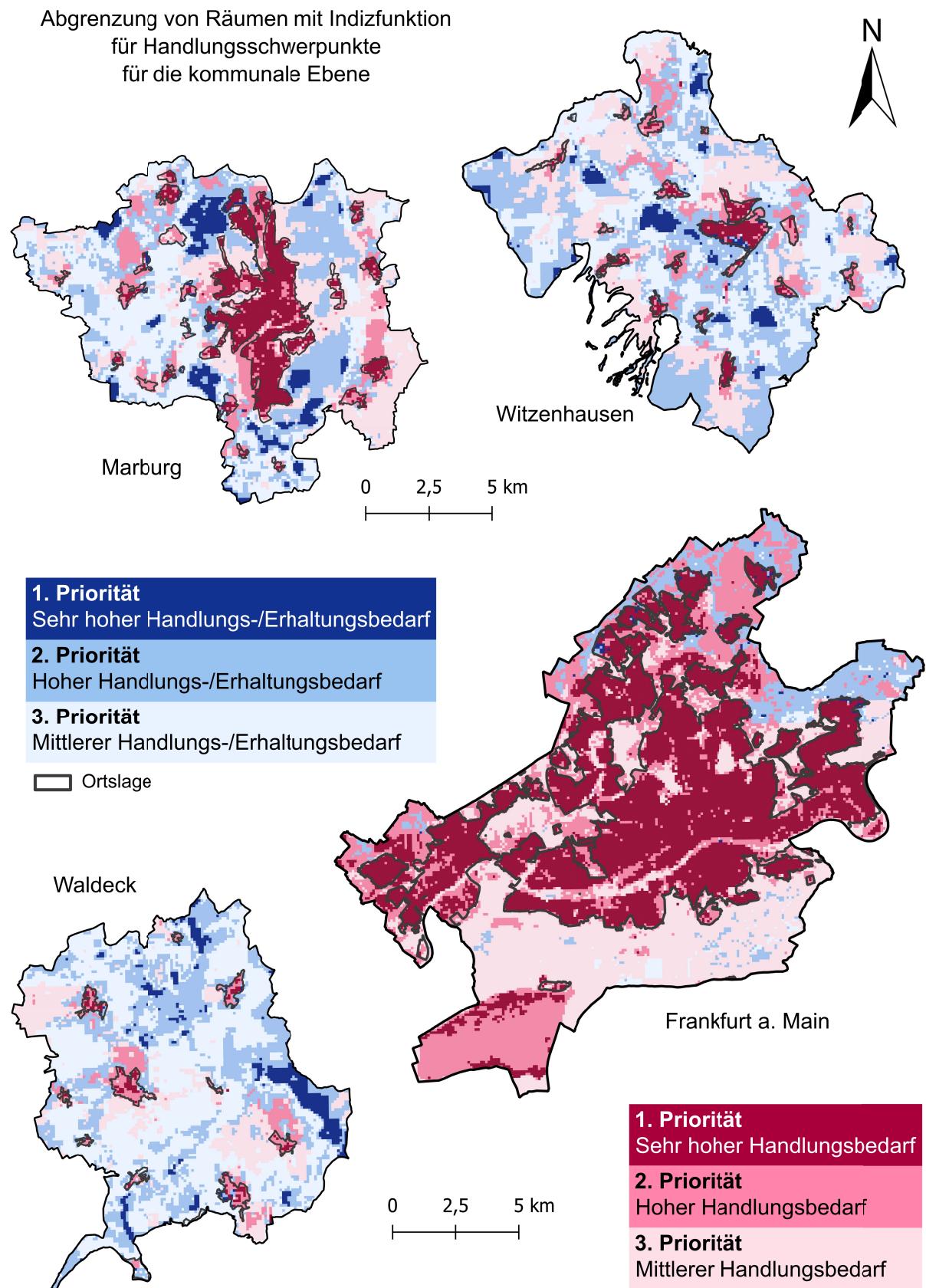


Abbildung 14.17.: Abgrenzung von Räumen mit Indizfunktion für Handlungsschwerpunkte für die kommunale Ebene. Exemplarische Visualisierung anhand von vier ausgewählten Gemeinden.

14.4. Fazit zur Abgrenzung von Handlungsräumen mit Priorisierung basierend auf SLA

Die vorgestellte SLA-Methode zur Abgrenzung räumlicher Handlungsschwerpunkte stellt eine automatisierte Möglichkeit dar, um universelle Hot- und Coldspots anhand weiterer Informationen hinsichtlich Handlungsdruck und/oder Erhaltungsbedarf mit einer räumlichen Auflösung eines 100 m-Gitters zu priorisieren.

Das automatisierte Schema beruht auf einem stufenweisen Gewichtungssystem, welches die Priorität von Gitterzellen durch die Hinzunahme von Daten über Bevölkerungsdichte, vulnerablen Einrichtungen, vereinfachter lokaler Klimazonen, Durchlüftungsfunktion sowie Intensität und Umgebung von universellen Hot- bzw. Coldspots erhöhen oder mindern kann. Die unterschiedlichen Eingangsdaten werden dadurch vergleichbar gemacht, dass die abgeleiteten Priorisierungsstufen aus den Häufigkeitsverteilungen der Daten abgeleitet werden. Abschließend werden die Gewichtungsstufen für jede Gitterzelle aggregiert und wiederum anhand der Auftrittshäufigkeit in je drei Prioritäten für Handlungsschwerpunkte basierend auf universellen Hotspots und Coldspots zusammengefasst.

Durch diese rein datengetriebene Vorgehensweise wird eine für alle Regionen vergleichbar eingesetzte und damit objektive Planungshilfe geschaffen. Die resultierenden Regionen sind räumlich klar abgegrenzt und können auf Regional- und Landesebene als Handlungsschwerpunkte herangezogen werden. Auf lokaler Ebene stehen noch weitere detailliertere Informationen zur Verfügung, die nicht durch die verwendeten Datengrundlagen abgebildet werden. Daher handelt es sich auf der lokalen Ebene um Räume mit Indizfunktion für räumliche Handlungsschwerpunkte. Die identifizierten räumlichen Handlungsschwerpunkte für die Klimaanpassung (dargestellt in drei Prioritätsstufen) bilden ein zentrales Ergebnis des Projekts auf dem Gebiet der Klimaanpassung. Über sie wird die zielgerichtete Lenkung von Klimaanpassungsmaßnahmen erleichtert.

15. Exkurs: Das Forschungsprojekt im Vergleich zur Landesweiten Klimaanalyse

Die Ansätze und Analysen dieses Forschungsprojekts sind im Kontext bereits bestehender Analysen und Ergebnisse für Klimaanpassung in der räumlichen Gesamtplanung zu sehen. Hierbei ist insbesondere die landesweite Klimaanalyse für das Land Hessen (LWKA) zu berücksichtigen [53], die eine Datengrundlage für die Regionalplanung darstellt. Im Folgenden werden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der Zielsetzung und Vorgehensweise zur Ermittlung der jeweiligen Hotspots herausgearbeitet.

15.1. Zielsetzung der LWKA

Ziel der LWKA ist insbesondere die Ermittlung der bioklimatisch belasteten Siedlungsräume, sogenannter regionalplanerisch bedeutsamer Hotspots, und die Identifizierung der möglichst unbelasteten Luftleitbahnen einschließlich der ihnen zugeordneten Kaltluftentstehungsgebiete, die eine ausgleichende Wirkung auf diese bioklimatisch belasteten Siedlungsräume ausüben. In den Regionalplänen sind die in der LWKA ermittelten Kaltluftentstehungsgebiete und Luftleitbahnen möglichst als „Vorranggebiete bzw. Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen“ festzulegen.

Anders als im Forschungsprojekt verfolgt die LWKA bei der Ermittlung der regionalplanerischen Hotspots einen direkten, betroffenheitsbezogenen Ansatz mit dem Ziel, durch raumordnerische Festlegungen eine Aufrechterhaltung bzw. Verbesserung der bioklimatischen Situation für eine möglichst große Anzahl der Bevölkerung bewirken zu können.

15.2. Regionalplanerisch bedeutsame Hotspots: Methodisches Vorgehen zur Ermittlung der bioklimatisch belasteten Siedlungsräume der LWKA

Der LWKA liegen Simulationen mit dem Strömungsmodell FITNAH zugrunde. FITNAH berechnet, basierend auf zahlreichen Eingangsdaten, u. a. Landnutzungsdaten, meteo-

rologische Messdaten, meteorologische Größen und löst im Kern die dreidimensionalen Bewegungsgleichungen zur Berechnung der Luftströmung. Die Ergebnisse der FITNAH-Simulation liegen hessenweit in einer räumlichen Auflösung von 200 m x 200 m vor, für das Gebiet des Ballungsraums Frankfurt/Rhein-Main zudem in einer räumlichen Auflösung von 50 m x 50 m (Gitterzellen).

Ergebnisse der FITNAH-Simulationen sind u. a. räumliche Daten zur Windrichtung, den Windgeschwindigkeiten und Lufttemperaturen zu unterschiedlichen Zeiten sowie daraus abgeleitete weitere Datensätze, wie die Anzahl an Sommertagen. Einzelne dieser Simulationsergebnisse sind zur Ermittlung der regionalplanerischen Hotspots herangezogen worden.

Die Ermittlung der regionalplanerisch bedeutsamen Hotspots erfolgte in einem stufenweisen Vorgehen:

- (a) Ermittlung der „Empfindlichkeit der Bevölkerung“ (ermittelt aus: Einwohnerdichte pro Hektar, Fläche der Ortsgröße in Hektar) – Zusammenführung über eine Kreuzmatrix.
- (b) Ermittlung der „Thermischen Bedingungen“ (Wärmebelastung tagsüber bzw. nachts) – Zusammenführung über Kreuzmatrizen.
- (c) Ableitung der „Thermischen Betroffenheit“ durch Verschneidung der Ergebnismatrix „Empfindlichkeit der Bevölkerung“ (Schritt a) mit der Ergebnismatrix „Thermische Bedingungen“ (Schritt b) – differenziert in die Bewertungsstufen geringe bis extreme „Thermische Betroffenheit“.
- (d) Aufsummierung der Gitterzellen mit einer mindestens mittleren „Thermischen Betroffenheit“, differenziert in:
 - regionalplanerischer Hotspot (sehr großer Flächenanteil = Summe der Gitterzellen > 200 ha).
 - regionalplanerischer Hotspot (großer Flächenanteil = Summe der Gitterzellen > 120 ha bis < 200 ha).

Zu a) Empfindlichkeit der Bevölkerung: Die Empfindlichkeit der Bevölkerung wurde in der LWKA aus der Einwohnerdichte pro Hektar und der Ortsgröße – Fläche in Hektar ermittelt. Je größer das Siedlungsgebiet bzw. die Ortslage und je höher die Einwohnerdichte, desto höher die Empfindlichkeit der Bevölkerung. Ein Siedlungsgebiet mit geringer Einwohnerdichte kann demnach weniger empfindlich sein als ein gleich großes Siedlungsgebiet mit einer höheren Einwohnerdichte. Die Parameter Einwohnerdichte und Ortsgröße wurden in einer Kreuzmatrix verschnitten, den Bewertungsstufen geringe bis sehr hohe Empfindlichkeit zugeordnet und anschließend auf die 200 m x 200 m-Gitterzellen (landesweite Ebene) gemittelt bzw. den 50 m x 50 m-Gitterzellen (Gebiet des Ballungsraums Frankfurt/Rhein-Main) zugeordnet.

Zu b) Thermische Bedingungen: Die Ermittlung der thermischen Bedingungen basiert auf den Parametern „Wärmebelastung“ tagsüber (ermittelt aus PET um 13 Uhr und der Anzahl an Sommertagen) und der „Wärmebelastung nachts“ (Lufttemperatur um 4 Uhr), die in einer Kreuzmatrix verschnitten wurden.

Zu c) Thermische Betroffenheit: Die thermische Betroffenheit ergibt sich aus der Zusammenschau der Empfindlichkeit der Bevölkerung und den thermischen Bedingungen. Die thermische Betroffenheit wird differenziert nach geringer bis extremer thermischer Betroffenheit.

Zu d) Einstufung als regionalplanerisch bedeutsamer Hotspot: Da die Siedlungsgebiete in ihrer Struktur und Einwohnerdichte teilweise sehr heterogen sind, war es im Rahmen der LWKA erforderlich, die vorliegenden Datensätze mit Blick auf den regionalplanerischen Maßstab stärker zu aggregieren.

Als ein Kriterium zur Identifizierung und Differenzierung der regionalplanerisch bedeutsamen Hotspots wurde die flächenhafte Ausdehnung des Auftretens der thermischen Betroffenheit innerhalb eines zusammenhängenden Siedlungsgebietes herangezogen (zusammenhängende Siedlungsgebiete sind in der LWKA definiert als die in den aktuellen Regionalplänen festgelegten Vorranggebiete Siedlung, Bestand sowie die Vorranggebiete Industrie und Gewerbe, Bestand). In einem weiteren Schritt erfolgte eine statistische Analyse der Häufigkeit der Gitterzellen mit einer mittleren bis extremen thermischen Betroffenheit in den Siedlungsgebieten.

Lagen in den Siedlungsgebieten Gitterzellen (mit einer mittleren bis extremen thermischen Betroffenheit) vor, die in der Summe 200 ha und mehr umfassten, wurden diese Siedlungsgebiete der Kategorie regionalplanerisch bedeutsamer Hotspot mit sehr großem Flächenanteil zugeordnet. Die diesen Siedlungsgebieten zugeordneten Kaltluftentstehungsgebiete und Luftleitbahnen sollen gemäß LWKA (je nach Volumenstromdichte) in den Regionalplänen als Vorrang- oder Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen festgelegt werden.

Siedlungsgebiete, die entsprechende Gitterzellen von in der Summe mindestens 120 ha aber weniger als 200 ha aufweisen, wurden der Kategorie regionalplanerisch bedeutsamer Hotspot mit großem Flächenanteil zugeordnet. Gemäß LWKA sollen die Kaltluftentstehungsgebiete und Luftleitbahnen, die im räumlichen Zusammenhang mit diesen Gebieten stehen, in den Regionalplänen als Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen festgelegt werden. Ist ein Siedlungsgebiet einer der beiden Kategorien (sehr großer / großer Flächenanteil) zugeordnet worden, ist immer das gesamte zusammenhängende Siedlungsgebiet als regionalplanerisch bedeutsamer Hotspot festgelegt worden. Aussagen zu Maßnahmen in den identifizierten regionalplanerisch bedeutsamen Hotspots trifft die LWKA nicht, dies war auch nicht Gegenstand des Auftrages.

15.3. Vergleich der Ermittlung regionalplanerisch bedeutsamer Hot-/Coldspots gemäß LWKA mit dem Forschungsprojekt

Die in der LWKA ermittelten regionalplanerisch bedeutsamen Hotspots sind grundsätzlich mit den Ergebnissen der Analyse universeller Hot- und Coldspots in diesem Forschungsprojekt vergleichbar (siehe hierzu Kapitel 12). Zudem werden Elemente der LWKA in das stufenweise Vorgehen des Forschungsprojekts integriert und die Vorranggebiete bzw. als Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen vorgeschlagenen Flächen als Themenkarte bereitgestellt (siehe Abbildung 12.5 in Abschnitt 12.2).

Dennoch soll auf methodische Unterschiede zwischen beiden Analyseansätzen hingewiesen werden, die für die Interpretation beider Ansätze wichtig sind. Die Unterschiede zwischen dem Forschungsprojekt und der LWKA resultieren insbesondere aus den verschiedenen Aufgaben- bzw. Fragestellungen, dem damit einhergehenden unterschiedlichen Vorgehen sowie den jeweils genutzten Datengrundlagen. Die folgende Abbildung 15.1 stellt das Ergebnis beider Ansätze exemplarisch gegenüber.

Um die unterschiedlichen Ansätze der LWKA (regionalplanerisch bedeutsamen Hotspots) und dieses Forschungsprojekts (universelle Hotspots) vergleichen zu können, werden diese in der nachfolgenden Auflistung gegenübergestellt. Im Zentrum stehen hierbei bezogen auf das Forschungsprojekt (a) die Identifikation von Hotspots (siehe Kapitel 12) sowie (b) die Abgrenzung räumlicher Handlungsschwerpunkte mit Priorisierung (s. Kapitel 14). Hier werden grundsätzlicher Ansatz, Adressaten, Zielsetzung und verwendete Datengrundlagen, räumliche Auflösung, Parameter und die Differenzierung der universellen Hotspots beschrieben.

Ansatz

- Planungsorientierter Ansatz zur Identifikation von regional bedeutsamen Freiräumen, die zur Aufrechterhaltung bzw. Verbesserung der bioklimatischen Situation in thermisch belasteten Siedlungsräumen für einen möglichst großen Teil der Bevölkerung wichtig sind.
- Multikriterielle Analyse: Datengetriebene Ansätze, basierend auf flächenhaften Temperaturdaten, zur Ermittlung von universellen Hot- und Coldspots und deren Priorisierung hinsichtlich des Handlungsbedarfs (siehe Kapitel 12 und 14).

Adressat

- Die Ergebnisse adressieren die Akteure der Regionalplanung.
- Die Ergebnisse informieren ein breites Akteursfeld der Landes-, Regional- und Kommunalplanung.

Zielsetzung

- Die wesentliche Zielsetzung ist die Sicherung klimarelevanter Freiräume im räumlichen Zusammenhang mit den regionalplanerisch bedeutsamen Hotspots (bioklimatisch belastete Siedlungsräume). Hierzu zählen insbesondere die Sicherung von

Luftleitbahnen und Kaltluftentstehungsgebieten mittels Vorrang- und Vorbehaltsgebieten für besondere Klimafunktionen. Aussagen zu Maßnahmen in den identifizierten regionalplanerisch bedeutsamen Hotspots trifft die LWKA nicht.

- Die Zielsetzung besteht in der Prüfung der Anwendung Geodaten-getriebener Ansätze zur flächenhaften Identifizierung von „universellen Hot- und Coldspots“, daraus entwickelten „räumlichen Handlungsschwerpunkten“ für die Klimaanpassung sowie zur Ermittlung von „Defiziten und Potenzialen“ in den räumlichen Handlungsschwerpunkten (insbesondere Versiegelung, Grünanstattung).

Datengrundlage

- Die LWKA liefert, basierend auf einer FITNAH-Simulation, Ergebnisse zu zahlreichen meteorologischen Parametern (z. B. Lufttemperatur). Diese Ergebnisse fließen zum Teil in die Ermittlung der regional bedeutsamen klimarelevanten Freiflächen ein. Das FITNAH-Modell wurde mit zahlreichen Inputdaten, u. a. Landnutzung und meteorologischen Messdaten angetrieben.
- Die Datengrundlagen sind neben meteorologischen und landbedeckungsbezogenen Fernerkundungsdaten und Geofachdaten ebenfalls simulierte meteorologische Daten (PET). Darüber hinaus werden die Datengrundlagen genutzt, um mittels KI-gestützter Methoden u. a. die Landbedeckung, Bodenfeuchte, Siedlungsstruktur zu modellieren.

Räumliche Auflösung der Ergebnisse

- Die Ergebnisse werden in einer räumlichen Auflösung von 200 m × 200 m landesweit zur Verfügung gestellt. Für den Ballungsraum Frankfurt/ Rhein-Main ist die räumliche Auflösung 50 m × 50 m.
- Die Auflösung der Ergebnisdaten reicht von 0,2 m × 0,2 m bis 1000 m × 1000 m.

Parameter zur Ermittlung der regionalplanerisch bedeutsamen Hotspots bzw. universellen Hotspots

- Für die Ermittlung der regionalplanerisch bedeutsamen Hotspots ist die thermische Belastung der Bevölkerung bei Tag und Nacht bedeutend. Entsprechend gehen die Empfindlichkeit der Bevölkerung mittels Ortsgröße und Einwohnerdichte, die thermischen Bedingungen (PET Tag Anzahl Sommertage, nachts: Lufttemperatur 4 Uhr) und die Häufigkeit (im Sinne der Anzahl betroffener Gitterzellen) mittlerer bis extremer thermische Belastung in den Siedlungsgebieten in die Berechnung ein.
- Für die Berechnung der universellen Hot- und Coldspots werden Daten sowohl zur thermischen Hitzebelastung (z. B. PET, Tropennächte) als auch zum Verdunstungsdefizit (LST) hinzugezogen. Nachfolgend wird die Landnutzung mit einbezogen.

Differenzierung der regionalplanerisch bedeutsamen Hotspots bzw. universellen Hotspots und deren Flächengröße

- Die Differenzierung der regionalplanerisch bedeutsamen Hotspots erfolgt nach der Summe einer zusammenhängenden Siedlungsfläche (nach Gitterzellen) mit einer mindestens mittleren thermischen Betroffenheit:
 - > 120 ha bis unter 200 ha (großer Flächenanteil) und
 - > 200 ha (sehr großer Flächenanteil).

- Ist ein Siedlungsgebiet einer der beiden Kategorien (großer / sehr großer Flächenanteil) zugeordnet, wird immer das gesamte Siedlungsgebiet (in der Abgrenzung der im Regionalplan festgelegten Kategorien „Vorranggebiet Siedlung, Bestand und Industrie und Gewerbe, Bestand) als regionalplanerisch bedeutsamer Hotspot festgelegt.
- Mit den universellen Hot- und Coldspots stehen Suchräume zur Verfügung, innerhalb dieser daraufhin mittels einer multikriteriellen Analyse räumliche Handlungsschwerpunkte ermittelt werden. Die Siedlungsgebiete werden über Gebäude oder die Ortslage erfasst.
- Entsprechend des Vorgehens unterscheidet sich der Flächenumfang des hier vorgestellten Ansatzes. Einzelne 100 m-Gitterzellen können zunächst als universeller Hot- oder Coldspot identifiziert werden. Entsprechend bestehen keine Flächengrößebeschränkungen bei den betrachteten Siedlungen vorab und damit auch keine Konzentration auf vergleichsweise große Siedlungen. Hier sei noch einmal auf den Vergleich am Beispiel der Hotspots in Abbildung 15.1 hingewiesen.

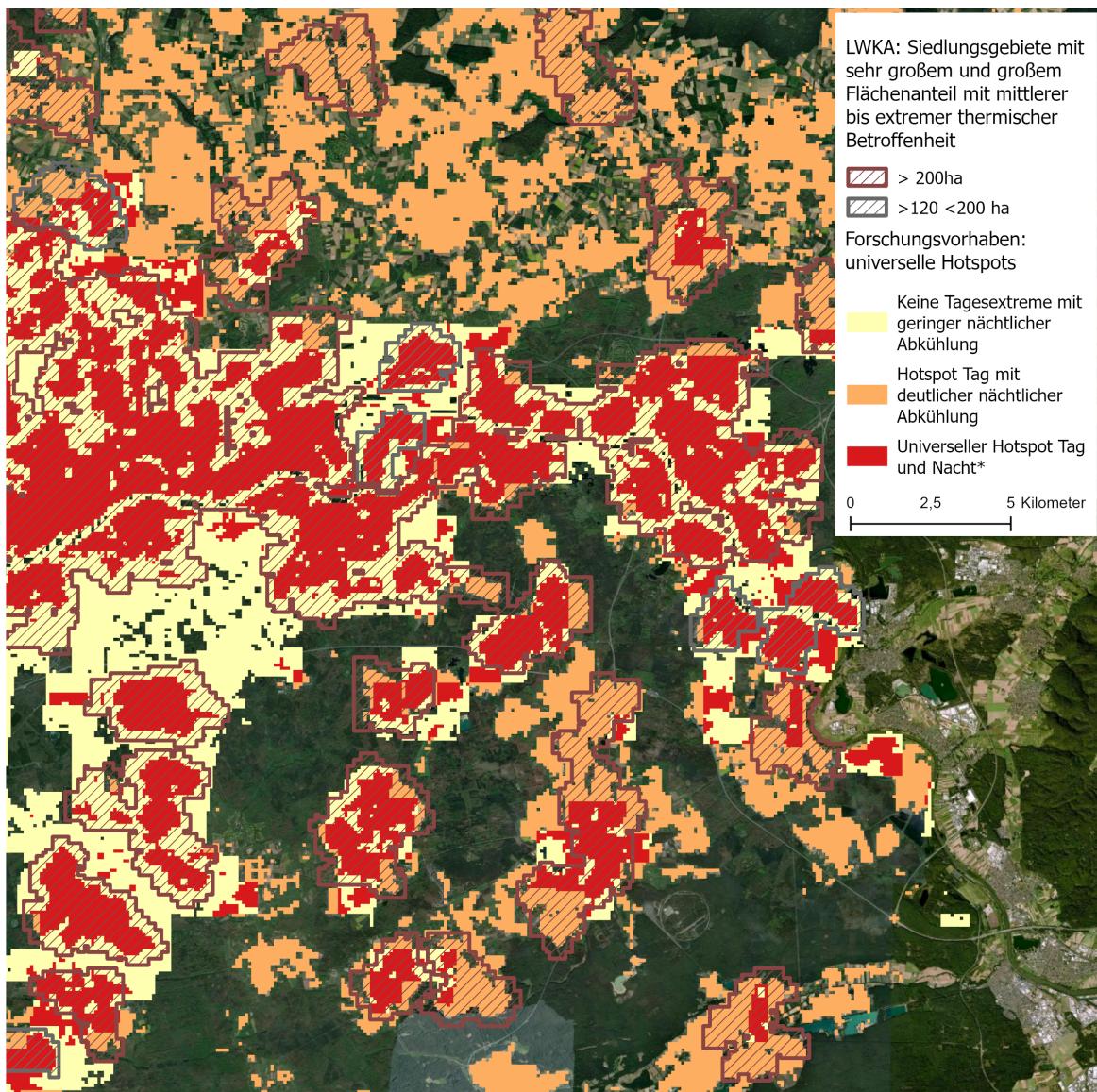


Abbildung 15.1.: Schematische Gegenüberstellung der räumlichen Abgrenzung und des Flächenumfangs von universellen Hotspots aus dem Forschungsprojekt sowie den regionalplanerisch bedeutsamen Hotspots aus der LWKA. (*Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.)

16. Exkurs: Das Forschungsprojekt im Vergleich zu kommunalen Klimaanalysen

16.1. Einführung in kommunale Klimaanalysen

Die im Rahmen dieses Projekts für Hessen flächenhaft unter Zuhilfenahme von FE-Daten und als 10-Jahres-Zeitreihe durchgeföhrten Temperaturanalysen betrachten erstmals gemeinsam die Hitzebelastung (Parameter: PET und Anzahl Tropennächte) und die Stärke der Verdunstungskühlung (Parameter: LST am Tag und in der Nacht). Hierauf aufbauend wird unter Einbeziehung weiterer Daten, z. B. zur Bevölkerungsdichte und zu lokalen Klimazonen, der Klimaanpassungsbedarf auf landesweiter, regionaler und kommunaler Planungsebene räumlich priorisiert. Die Ergebnisse liegen in einer räumlichen Auflösung von 100 m für die Planungsebenen vor (siehe Kapitel 4, 12 und 14). Hierüber soll in Hessen für die verschiedenen Ebenen der räumlichen Gesamtplanung die Klimaanpassungsplanung erleichtert und beschleunigt sowie effizient umsetzbar werden. Auf kommunaler Ebene besitzen die identifizierten räumlichen Handlungsschwerpunkte Indizfunktion. Daher steht es den Kommunen frei, diese zu nutzen sowie anhand eigener verfeinerter Untersuchungen und Bewertungskriterien die räumlichen Handlungsschwerpunkte für die Klimaanpassung zu modifizieren.

Für Kommunen, die bereits eigene Planungen und Strategien zur Klimaanpassung erstellt haben, wird im Folgenden beispielhaft dargelegt, dass diese Planungen durch die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts nicht in Frage gestellt, sondern ergänzt werden. Hintergrund ist, dass die von den Kommunen erstellten bzw. in Auftrag gegebenen kommunalen Klimaanalysen sich in der Zielsetzung von diesem Projekt unterscheiden können oder aber mit unterschiedlichen Zielsetzungen (z. B. Konzentration auf die Hitzebelastung) und Eingangsdaten (z. B. Konzentration auf gemessene Lufttemperatur-Daten oder modellierte PET-Daten) arbeiten und die Methoden der Datenauswertung variieren können (z. B. Konzentration auf einjährige Messreihen). Somit können diese kommunalen Analysen in Teilräumen von den Ergebnissen dieses Projekts abweichen, stehen aber dadurch hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und fachlichen Belastbarkeit nicht in Frage.

Wie sich bei kommunalen Klimaanalysen methodische Unterschiede auf die Ergebnisse (z. B. Klimaanalysekarten) und die darauf aufbauenden Planungshinweiskarten auswirken können, wird nachfolgend in grundsätzlicher Form sowie beispielhaft anhand der kommunalen Klimaanalysen von Marburg, Frankfurt am Main, Dietzenbach sowie der

Temperaturmessungen aus Darmstadt erläutert. Im Einzelnen werden hierbei folgende Parameter betrachtet:

- Vergleich von modellierten Daten zur Hitzebelastung (PET)
- Vergleich von gemessenen (Luft-)Temperaturen
- Vergleich von Planungshinweiskarten

16.2. Vergleich von modellierten Daten zur Hitzebelastung

In kommunalen Klimaanalysen wird häufig die PET zur Beschreibung der Hitzebelastung des Menschen verwendet. Ähnlich wie in der LWKA, deren PET-Daten in dem hier durchgeführten Projekt Eingang finden, werden auch für die Berechnung der PET in lokalen Klimaanalysen Klimamodelle genutzt, deren Input und damit auch deren Ergebnisse variieren können. Im Folgenden werden die Beispiele Marburg und Dietzenbach vorgestellt.

Im Rahmen der **komunalen Klimaanalyse Marburg** wurden die PET-Werte als Vektordatei (d. h. als Polygon, nicht pro Pixel) für 14 Uhr Ortszeit und 1,1 m über Grund simuliert. Die Ergebnisse sind in Abb. 16.1 dargestellt und werden mit den in diesem Projekt verwendeten PET-Werten verglichen, die in der LWKA für 13 Uhr gerechnet wurden. Während die grundlegenden Muster der Analysen übereinstimmen, z. B. stark erhöhte PET-Werte im Osten der Stadt, weisen die im Forschungsprojekt verwendeten Daten der LWKA eine größere Spreizung an Werten auf, d. h. über dasselbe Gebiet erreicht die LWKA sowohl kältere als auch wärmere PET-Werte. Ein typischer Grund für solche Differenzen kann die unterschiedliche Größe des Untersuchungsgebiets sein, da bspw. bei größeren Untersuchungsgebieten auch Effekte durch übergeordnete Luftströmungen einbezogen werden als bei kleinen Untersuchungsräumen. Auf kommunaler Ebene existieren in Einzelfällen spezifische Klimaanalysen, die von den jeweiligen Kommunen in Auftrag gegeben wurden. Diese Analysen zeichnen sich durch kleinere Untersuchungsgebiete und eine gegenüber einem 100 m-Gitter signifikant höhere räumliche Auflösung aus, wodurch innerörtliche klimatische Bedingungen und Strömungsverhältnisse präziser erfasst und bewertet werden können.

Die Kreisstadt **Dietzenbach** ließ die PET für 14 Uhr, in 1,1 m Höhe über Grund durch ein FITNAH-3D Modell simulieren. Verwendet wurden Eingangsdaten von 2022 zu Landnutzung, Gelände und Strukturhöhen in einer horizontalen Auflösung von 5 m. Als meteorologische Randbedingungen lag dem Modell ein Sommertag mit idealisierter autochthoner Wetterlage ohne Bewölkung und einer Bodenfeuchte von 60 % zugrunde. Die Ausgangssituation der LWKA für die Berechnung der PET für 13 Uhr ist demgegenüber ein heißer Sommertag (1. August) mit einer relativen Feuchte von 20 %. Der Vergleich zu den in diesem Forschungsprojekt zugrundeliegenden Daten ist in Abb. 16.2 gegeben. In diesem Fall decken beide Simulationen (die kommunale Klimaanalyse und die LWKA) etwa dieselbe Bandbreite an Werten ab, allerdings zeigt sich innerorts deutlich, dass die lokale Klimaanalyse aufgrund ihrer höheren Auflösung Temperaturen auch innerhalb einzelner Straßenschluchten darstellen kann. Auf der anderen Seite bietet die LWKA eine Daten-

grundlage für die Regionalplanung - sie ersetzt keine kommunalen Klimaanalysen. Gegenüber lokalen Klimaanalysen werden dadurch auch großräumigere Einflussfaktoren, die ihre Ursache deutlich außerhalb der Ortslage haben, in die Berechnungen mit einbezogen. Es ist zudem zu beachten, dass die in der kommunalen Analyse simulierten Temperaturen außerhalb der Stadt sehr nahe am Grenzwert zwischen den Klassen Priorität 2 und 3 sind und dadurch schon kleine Temperaturvariationen, auch wenn dies nur wenige Zehntel Grad sind, eine Zuweisung teils in Priorität 2 und teils in Priorität 3 zur Folge haben können, was sich auch in deren Visualisierung ausdrückt.

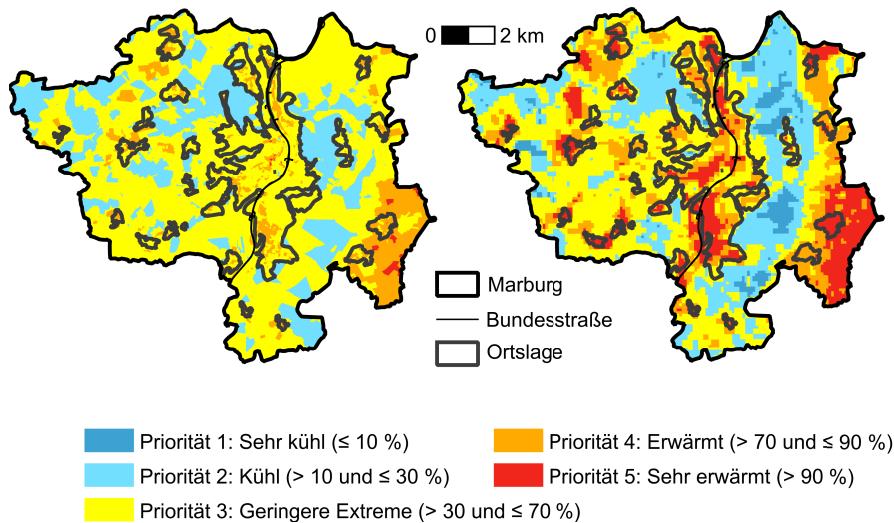


Abbildung 16.1.: Vergleich der aus den modellierten PET Parametern in der kommunalen Klimaanalyse Marburg (links) und den im Forschungsprojekt verwendeten PET-Daten aus der LWKA (rechts) abgeleiteten Prioritätsstufen. Beide Darstellungen verwenden die in Kapitel 4 vorgestellten Grenzwerte.

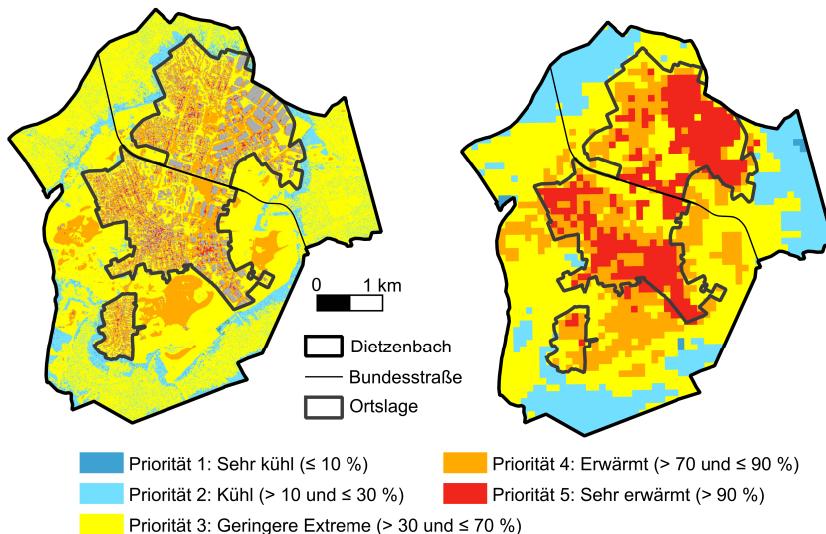


Abbildung 16.2.: Vergleich der aus den modellierten PET Parametern in der kommunalen Klimaanalyse Dietzenbach (links) und den im Forschungsprojekt verwendeten PET Daten aus der LWKA (rechts) abgeleiteten Prioritätsstufen. Beide Darstellungen verwenden die in Kapitel 4 aus Perzentilen ermittelten Grenzwerte. In Dietzenbach ist die Temperatur auf Gebäudeflächen nicht modelliert, diese sind in grau dargestellt.

Generell zusammengefasst lassen sich Unterschiede, wie PET, weitestgehend durch folgende Aspekte erklären:

- **Auswahl und Simulation klimatische Rahmenparameter**

Klimaparameter unterlaufen natürlichen Schwankungen über den Tag und über das Jahr hinweg. Die in diesem Forschungsprojekt verwendete PET der LWKA wurde für einen wolkenfreien Hochsommertag (Sonnenstand entsprechend dem 1. August, 13 Uhr Ortszeit) simuliert. Im Fall der kommunalen Klimaanalysen von Marburg und Dietzenbach wurde die PET für einen Sommertag um 14 Uhr Ortszeit simuliert.

- **Räumliche Auflösung des verwendeten Simulationsmodells**

Je nach Auflösung kann ein Modell ein Landschafts- oder Stadt-Relief unterschiedlich gut darstellen. Z. B. zeigen höher aufgelöste Modelle innerorts lokal oft höhere Temperaturen als die in einer räumlichen Auflösung von 200 m bzw. 50 m simulierten Ergebnisse der LWKA, da solche Gitter keine Straßenschluchten auflösen können.

- **Größe des Simulationsgebietes**

Wird die Modellierung über ein größeres Gebiet durchgeführt, können großräumigere Luftströmungen und somit weiträumigere Klimaeffekte modelliert werden. D. h. vor allem an den Randgebieten der Kommunen muss bei kommunalen Klimaanalysen darauf geachtet werden, dass der Modellierung auch Eingangsdaten aus der großräumigen Umgebung zu Verfügung stehen, damit die Resultate mit der LWKA vergleichbar werden.

- **Verwendete Eingangsdaten**

Verschiedenen Modellierungen liegen oft unterschiedliche Eingangsdaten vor allem zur Bebauung und Landnutzung zu Grunde. Unterscheiden sich die Eingangsdaten, z. B. weil sie verschiedene räumliche Auflösung haben oder einen unterschiedlichen Zeitpunkt der Datenerfassung, so führt dies auch zu Unterschieden in der modellierten PET.

16.3. Vergleich von gemessenen (Luft-)Temperaturen

Viele Gemeinden messen weiterhin direkt Temperaturparameter. Standardmäßig handelt es sich um Lufttemperaturen in 2 m Höhe. Ergänzend zu den Temperaturdaten werden häufig noch weitere Parameter wie relative Luftfeuchte, Luftdruck oder Globalstrahlung gemessen. Dabei dominieren zwei Arten von Messverfahren: Messungen an festen Stationen, die Daten an ausgewählten Orten mit dichten Zeitreihen aufnehmen, und Messungen durch mobile Sensoren, die an Fahrzeugen angebracht werden und Daten entlang von Routen aufzeichnen. Die resultierenden Temperaturkarten sind entlang der Routen genau, müssen für flächenhafte Analysen ähnlich wie Messungen an Stationen interpoliert werden. Eine Besonderheit, die bei mobilen Sensoraufnahmen beachtet werden muss, ist die Tatsache, dass die Messungen entlang der Route zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen werden. Dadurch kann je nach Länge der Fahrt auch variierendes Wetter einen Effekt auf die Messergebnisse ausüben.

Diese Lufttemperatur-Daten sind nur bedingt mit den Messungen der unterschiedlichen Temperaturdaten (PET, LST Tag und Nacht, # der Tropennächte) in diesem Projekt zu vergleichen. Weder werden im Projekt ausschließlich Lufttemperaturen verwendet, noch werden Zeitreihen von Messstationen oder Momentaufnahmen mobiler Messsysteme analysiert.

Für ein besseres Verständnis der Zusammenhänge und Unterschiede zwischen Lufttemperatur-Messungen und den universellen Hot- und Coldspots aus Kapitel 12 soll hier dennoch ein Vergleich gezeigt werden.

In **Darmstadt** wurden Messfahrten zur Erhebung von Temperatur entlang zweier Fahrtrouten („Nordroute“ und „Südroute“) durchgeführt (Quelle: DWD). Diese Messungen wurden an zwei aufeinanderfolgenden Tagen jeweils dreimal vorgenommen: am frühen Nachmittag, am Abend und gegen Mitternacht. Eine genaue Auflistung der Messzeiten ist in Tabelle 16.1 gegeben. Als Parameter wurden neben Luftdruck, relativer Luftfeuchte und Globalstrahlung die Lufttemperaturen in 70 cm und 2 m Höhe sowie die Fahrbahnoberflächentemperatur aufgezeichnet.

Im direkten Vergleich zwischen den nachmittags durchgeführten Messfahrten in Darmstadt und den universellen Hot- und Coldspots aus Kapitel 12 zeigt sich zunächst deutlich die Komplementarität in der Flächenabdeckung (siehe Abb. 16.3), indem die universellen Hot- und Coldspots die ganze Gemeinde in einer klassifizierenden Darstellung abdecken, wohingegen die Messfahrten nur wenige Straßen, allerdings in einer deutlich höheren Genauigkeit, erfassen.

Tabelle 16.1.: Messfahrten der Nord- und Südroute in Darmstadt.

Nummer	Route	Datum	UTC	Start	Ende
01	Nordroute	2023.08.21	15:00	15:07	16:12
02	Südroute	2023.08.21	16:25	16:25	17:29
03	Nordroute	2023.08.21	20:00	19:58	20:52
04	Südroute	2023.08.21	21:00	21:10	22:03
05	Nordroute	2023.08.21	23:00	22:53	23:41
06	Südroute	2023.08.22	00:00	00:00	00:52
07	Nordroute	2023.08.22	12:15	12:10	13:05
08	Südroute	2023.08.22	13:15	13:16	14:20
09	Nordroute	2023.08.22	20:00	20:02	20:51
10	Südroute	2023.08.22	21:00	21:04	22:01
11	Nordroute	2023.08.22	23:00	23:01	23:48
12	Südroute	2023.08.23	00:00	00:04	00:59

Die Absolutwerte der unterschiedlichen zugrundeliegenden Temperaturen lassen sich nicht vergleichen. Führt man jedoch einen relativen Vergleich durch, indem man die Einfärbung der Messfahrt mit dem Farbmuster der universellen Hot- und Coldspots abgleicht, lassen sich trotz der o. g. Unterschiede aus beiden Datensätzen an relativ vielen Orten der Messfahrt ähnliche Schlussfolgerungen ziehen. Temperaturen im Stadtkern sind deutlich erhöht im Vergleich zu den Gebieten außerhalb. Dies ist vor allem im Süden der Stadt sehr klar ersichtlich. Aber auch an der Schleife der Messfahrt im Nordosten stimmen die Aussagen der beiden Karten überein: So zeigen sich auch außerhalb der Ortslage noch leicht erhöhte Temperaturen; ähnliches zeigt sich in der Schleife der Messfahrt im Südwesten. Größere Differenzen sind dagegen im Nordwesten der Messfahrt ersichtlich. Dies bedeutet, dass eine grundsätzliche und auch nachvollziehbare Korrelation zwischen den unterschiedlichen Methodiken und Messungen besteht, es können aber örtlich Differenzen auftreten.

Zusammenfassend lassen sich Unterschiede zwischen den Ergebnissen des Projekts und gemessenen (Luft-)Temperaturen weitestgehend durch folgende Punkte erklären:

- **Temperaturparameter**

Eine gängige Art in lokalen Klimaanalysen ist die Vor-Ort-Aufzeichnung (in-situ) der Lufttemperatur: ein Parameter, der in die hier vorgestellten universellen Hot- und Coldspots nur indirekt einfließt. Entsprechend ist ein quantitativer Vergleich nicht möglich, es können nur qualitative Aussagen getroffen werden.

- **Momentaufnahme oder langjähriges Mittel**

Temperaturfahrten stellen eine Momentaufnahme dar. D. h., sie erfassen typischerweise Wettereffekte. Im Gegensatz dazu basiert die Analyse dieses Projekts größtenteils auf 10-jährigen Mittelwerten der Sommermonate (Juni, Juli, August) und stellt somit eine langjährige Beobachtungsreihe dar.

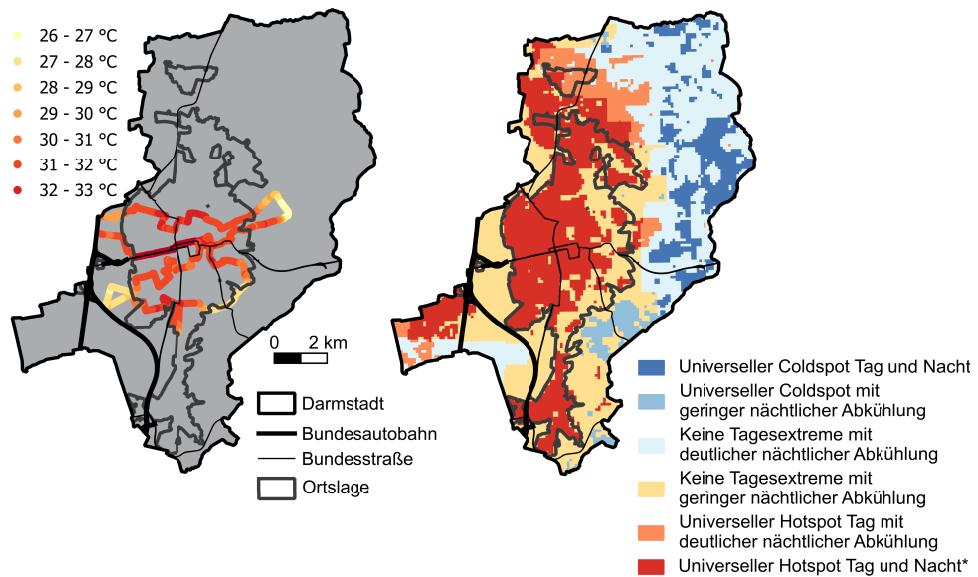


Abbildung 16.3.: Vergleich der universellen Hot- und Coldspots mit den Temperaturmessfahrten der Stadt Darmstadt für die Lufttemperatur in 2 m Höhe am 21.8.2023 mit Start um 15:00 Uhr der Nordroute und Start um 16:25 Uhr der Südroute.

(*Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.)

- **Auflösung**

Temperaturfahrten nehmen typischerweise in sehr hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung Daten auf. Dadurch ist eine weitaus genauere Analyse möglich als in dem hier dargestellten 100 m-Gitter der universellen Hot- und Coldspots. Die unterschiedlichen Auflösungen führen zwangsläufig auch zu kleinräumigen Temperaturunterschieden.

16.4. Vergleich von Planungshinweiskarten

Viele Gemeinden führen kleinskalige, kommunale Klimaanalysen durch bzw. beauftragen diese, um die thermische Belastung der Stadtbevölkerung zu bewerten und damit Hilfestellungen für die Planung zu bieten. Diese sog. Planungshinweiskarten werden häufig anhand der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 aus Klimasimulationen und anderen Geodaten abgeleitet. Beispielhaft sollen hier jeweils die Planungshinweiskarten von Frankfurt, Marburg und Dietzenbach mit den Ergebnissen der SLA in Kapitel 14 verglichen werden.

In ihrem Klimaplanatlas stellt die Stadt **Frankfurt** planungsrelevante Aufgaben, Maßnahmen und Empfehlungen für eine klimabewusste Entwicklung bereit. Als Grundlage dafür dienen unter anderem eine Klimafunktionskarte und eine darauf aufbauende Planungshinweiskarte. Die Klimafunktionskarte wurde auf Basis der VDI-Richtlinien entwickelt und setzt sich aus einer stadtclimatischen Komponente *Thermik* (Landnutzung, Gebäudevolumen, Vegetation, Sky View Factor) und einer stadtclimatischen Komponente

Dynamic (Belüftungssystem, Porosität, Windstatistik, Kaltluftabfluss) zusammen. Durch ein modular aufgebautes GIS-Analyseverfahren wird eine Einteilung in sechs Kategorien vorgenommen, die von *Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiet* bis *Starke Überwärmung* reichen. Basierend auf dieser Karte wurde dann eine vereinfachte und bewertende Karte, die Planungshinweiskarte, entwickelt.

Die unveröffentlichte Planungshinweiskarte enthält planungsunterstützende Aspekte. An dieser Stelle sollen daher nur qualitative Vergleiche angeführt werden. Es gilt zu beachten, dass diese Vergleiche immer mit Bedacht durchzuführen sind, da grundlegend unterschiedliche Bewertungen verglichen werden. Im Fall Frankfurt fällt auf, dass die in diesem Forschungsprojekt vorgestellten Suchräume für räumliche Handlungsschwerpunkte hauptsächlich Handlungsbedarf im Stadtgebiet von Frankfurt definieren. Es sind fast alle Gitterzellen in Frankfurt universelle Hotspots, da als Bezugsrahmen der Regierungsbezirk gewählt wurde. Die kommunale Analyse weist hingegen Ausgleichsräume aus. Diese basieren jedoch auf Landnutzungsklassen und nicht auf gemessenen Temperaturparametern.

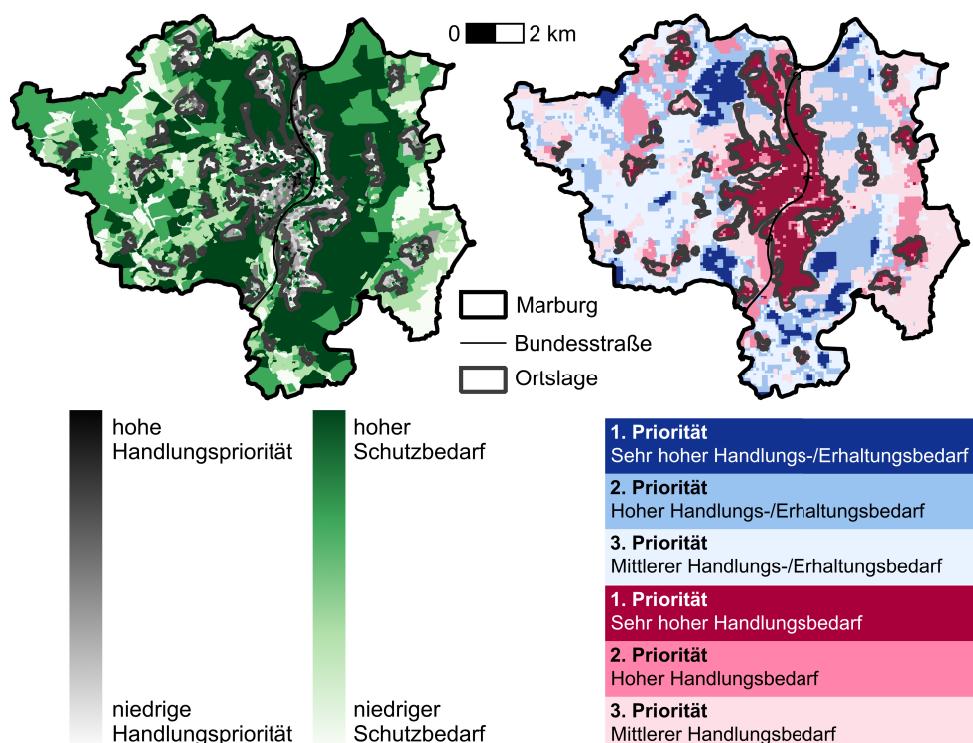


Abbildung 16.4.: Vergleich der Planungshinweiskarte Marburg (links) mit den Suchräumen für priorisierte räumlichen Handlungsschwerpunkten aus der SLA.

Die Planungshinweiskarte **Marburgs** untersucht bebaute und unbebaute Gebiete getrennt und teilt sie hinsichtlich ihres Schutzbedarfs (unbebaut) oder Handlungspriorität (bebaut) auf. Der Vergleich mit den hier definierten Suchräumen für räumliche Handlungsschwerpunkte ist in Abb. 16.4 zu sehen. Wie auch in Frankfurt erlaubt die kommunale Klimaanalyse ein deutlich höher aufgelöstes Bild, welches vor allem die Priorisierung innerorts detaillierter darstellen kann. Der Schutzbedarf im außerstädtischen Bereich zwischen beiden Analysen ist durchaus vergleichbar, mit höherer Priorisierung in den ortsnahen Gebieten.

In Dietzenbach stützt sich die Planungshinweiskarte auf Ergebnisse aus der Simulation mit einem FITNAH Modell. Die in Abschnitt 16.2 beschriebenen PET entstammen diesem Modell. Die kommunale Klimaanalyse untersucht den städtischen Kaltlufthaushalt sowie die kleinräumige, sommerliche thermische Belastungssituation der Stadtbevölkerung. Des Weiteren wird, basierend auf der Landnutzung, zwischen einem Ausgleichsraum (unbebaut) und Wirkraum (Siedlungsfläche und öffentlicher Raum) unterschieden. Methodisch werden zunächst in sechs Szenarien (Tag und Nacht für den Ist-Zustand sowie zwei Zukunftsszenarien) Bewertungskarten erstellt, die wiederum in einer Karte als Planungshinweiskarte zusammengefasst werden. Abbildung 16.5 vergleicht diese mit den in Kapitel 14 definierten Suchräumen für räumliche Handlungsschwerpunkte. Erneut sind die grundlegenden Unterschiede in der Art der Bewertung zu beachten. Die kommunale Klimaanalyse stützt die erste Einteilung auf Landnutzungsklassen, während im vorliegenden Projekt unterschiedliche Temperaturmessungen genutzt werden. Trotz allem sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen. So sind bspw. Gebiete, in denen in der kommunalen Analyse geringerer Schutzbedarf ausgewiesen wird, auch im SLA-Ansatz der dritten Priorität von Handlungs- und/oder Erhaltungsbefand zugeordnet.

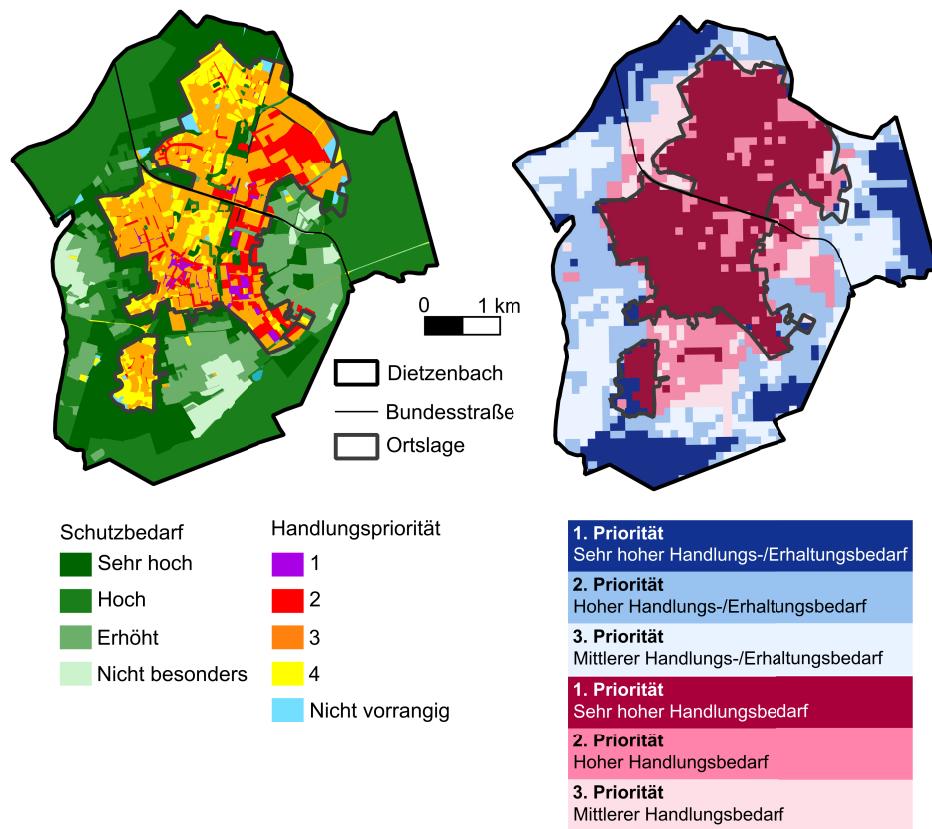


Abbildung 16.5.: Vergleich der Planungshinweiskarte Dietzenbach (links) mit den Suchräumen für priorisierte räumlichen Handlungsschwerpunkten aus der SLA.

16.5. Fazit zum Vergleich mit kommunalen Klimaanalysen

Die kommunalen Planungshinweiskarten und die im Rahmen dieses Projekts erarbeiteten Karten der priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkte basieren auf unterschiedlichen methodischen Ansätzen und Zielsetzungen. Neben den in Abschnitt 16.2 erläuterten Aspekten, wie verschiedenen räumlichen Auflösungen, Bezugsgrößen, Arten und Anzahlen der genutzten Temperaturdaten sowie variierenden qualitativen Kriterien für die Priorisierung, spielen dabei auch grundlegende methodische Entscheidungen eine Rolle. So basiert die Bewertung teils auf einer Differenzierung nach Landnutzungsklassen, während im vorliegenden Projekt eine Verschneidung gemessener und modellierter Temperaturdaten im Tag-Nacht-Muster erfolgt ist.

Zusätzlich sind die Ziele der Arbeiten oft unterschiedlich: Während kommunale Klimaanalysen den Fokus oft nur auf Hitzebelastung legen, ist hier wie im Schema der universellen Hot- und Coldspot-Klassifizierung erläutert, zusätzlich auch die Verdunstungsfähigkeit im Fokus.

Während sich vereinzelt kleinräumige Temperaturunterschiede zwischen den Ergebnissen dieses Forschungsprojekts und den kommunalen Karten finden, ist die großräumige Verteilung der priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkte nicht widersprüchlich. Alle bisher betrachteten Abweichungen ließen sich z. B. auf die räumliche Auflösung, die verwendeten Daten, die Methodik oder die qualitativen Bewertungen zurückführen. Trotz unterschiedlichem Fokus und unterschiedlicher Skalen sind sowohl die kommunalen Ansätze als auch der hier verwendete Ansatz zielführend und koexistent.

17. Analyse der SLA in Verbindung mit ausgewählten Parametern

Ziel dieses Kapitels ist es, ausgehend von den in der SLA-Methodik ermittelten räumlichen Handlungsschwerpunkten der Klimaanpassung (siehe Kapitel 14), die räumliche Verteilung zentraler Parameter wie Wasser- und CO_2 -Speicherung, Landbedeckung, Vegetationswuchshöhe, Grünvolumen und Wasserstress der Vegetation zu analysieren.

In einer Zusammenschau können in einem ersten Schritt die vorhandenen Potenziale (u. a. schützenswerte Kühlstrukturen oder flächenhafte Wasser- und CO_2 -Speicher) und Defizite (z. B. Flächen mit hohem Vollversiegelungsanteil, geringem Vegetationsanteil, hohem Wasserstress der Vegetation) ermittelt werden, um hierauf aufbauend zielgerichtet Erhaltungs- und Entwicklungsmaßnahmen zu konzipieren.

Die in den folgenden Unterkapiteln gezeigten Analysen orientieren sich an den zuvor behandelten Themen Temperatur, Klimazonen, Stadtstrukturen, Landbedeckung und weiter differenzierenden Grünindikatoren.

Konkret wird gezeigt:

- der Zusammenhang zwischen SLA und universellen Hot- und Coldspots (Abschnitt 17.1),
- der Zusammenhang zwischen SLA und vLCZ (Abschnitt 17.2),
- der Zusammenhang zwischen SLA und SST (Abschnitt 17.3),
- der Zusammenhang zwischen SLA und Landbedeckung (Abschnitt 17.4) sowie
- der Zusammenhang zwischen SLA und Grünindikatoren (Abschnitt 17.5).

Eine beispielhafte lokal differenzierte Potenzial- und Defizitanalyse von sechs Hektar in Frankfurt am Main findet sich im Anschluss in Kapitel 18.

17.1. Zusammenhang zwischen SLA und universellen Hot- und Coldspots

Das in Abbildung 17.1 dargestellte Sankey-Diagramm zeigt für den Bezugsraum Hessen auf der linken Seite die sechs Kategorien aus universellen Hot- und Coldspots. Die Länge der vertikalen Balken symbolisiert dabei die Anzahl an Gitterzellen und gibt somit einen Eindruck über die jeweiligen Flächenanteile für den Bezugsraum. Auf der rechten Seite

der Abbildung sind die Priorisierungsstufen der räumlichen Handlungsschwerpunkte für universelle Hot- und Coldspots dargestellt, d. h. je drei für universelle Hot- bzw. Coldspots mit dem entsprechenden Handlungs- bzw. Erhaltungsbedarf, wobei die Länge der Balken wiederum deren Flächenanteil widerspiegelt. Die grau eingefärbten Verbindungen zwischen den universellen Hot- bzw. Coldspot-Kategorien und den Priorisierungsstufen der räumlichen Handlungsschwerpunkte verdeutlichen die durch die SLA-Methodik erreichte Zuordnung. Die Breite der Linie quantifiziert dabei den jeweiligen Mengenanteil der Zuordnung. Per Design werden die in Blautönen gekennzeichneten universellen Coldspots nur den Priorisierungsstufen der universellen Coldspots zugeordnet. Analog werden die in Gelb- und Rottönen dargestellten universellen Hotspots nur den Priorisierungsstufen der universellen Hotspots zugeordnet.



Abbildung 17.1.: Sankey-Diagramm: Zusammenhang zwischen universellen Hot- und Coldspots auf der linken Seite und priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten auf der rechten Seite für den Bezugsraum Hessen.
*(Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich.)

Bei den **universellen Coldspots** fällt auf, dass in etwas weniger als der Hälfte der Fälle der Kategorie *Keine Tagesextreme mit deutlicher nächtlicher Abkühlung* durch die SLA ein hoher Handlungs-/Erhaltungsbedarf zugewiesen wird (d. h. die zweithöchste Priorisierungsstufe) und in einigen wenigen Fällen sogar die höchste Priorisierungsstufe. Die *universeller Coldspot Tag mit geringer nächtlicher Abkühlung* wird nahezu vollständig dem hohen Handlungs-/Erhaltungsbedarf zugewiesen, einige Flächenanteile ebenfalls der höchsten Priorisierungsstufe. Die universelle-Coldspot-Kategorie *universeller Coldspot Tag und Nacht* wird circa zu 50 % der höchsten Priorisierungsstufe zugewiesen und

der Rest der zweithöchsten Stufe. In Summe wird flächenmäßig mehr als der Hälfte der universellen Coldspots ein hoher Handlungs-/Erhaltungsbedarf zugewiesen.

Bei den **universellen Hotspots** ergibt sich ein etwas anderes Bild. Hier zeigen die horizontalen grauen Balken, dass die höchste und niedrigste universellen-Hotspot-Kategorie (*Universeller Hotspot Tag und Nacht* bzw. *Keine Tagesextreme mit geringer nächtlicher Abkühlung*) auch mehrheitlich der entsprechenden Priorisierungsstufe zugewiesen werden. Für die mittlere Kategorie *Universeller Hotspot Tag mit deutlicher nächtlicher Abkühlung* gilt dies nur für circa die Hälfte der Anteile. Die anderen Anteile weist SLA der niedrigeren bzw. höheren Priorisierungsstufe zu. Wie der Längenvergleich der unteren drei vertikalen Balken auf der rechten Seite des Sankey-Diagramms zeigt, werden die universellen Hotspots in Priorisierungsstufen mit gleichmäßig verteilten Anteilen zugeordnet. Dabei finden sowohl Abstufungen als auch Hochstufungen statt. Die Visualisierung einer Hochstufung von der universellen-Hotspot-Kategorie *Keine Tagesextreme mit geringer nächtlicher Abkühlung* zur höchsten Priorisierungsstufe findet sich exemplarisch in Kapitel 18 (Gitterzelle (E)).

17.2. Zusammenhang zwischen SLA und vLCZ

In dieser Analyse werden die priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkte mit **den Anteilen der jeweiligen vLCZ** für den Bezugsraum Hessen zusammengeführt. Abbildung 17.2 visualisiert die flächenmäßige prozentuale Verteilung der vLCZ bezogen auf die Priorisierungsstufen der räumlichen Handlungsschwerpunkte. Dabei ist zu beachten, dass, wie in Abb. 17.1 dargestellt, der absolute Flächenanteil der unterschiedlichen Priorisierungsstufen stark variiert.

Es wird deutlich, dass sich der sehr hohe Handlungsbedarf (Priorität 1) bei universellen Hotspots nahezu vollständig durch die stark urbanisierten Bereiche (Gelb, Rot und Grau) begründet. Der Anteil an vLCZ mit Vegetation (dunkles Grün) liegt in einer Größenordnung unter 10 %.

Dieses Bild ändert sich für die anderen Priorisierungsstufen. Hier nimmt der vLCZ-Anteil mit Bebauung stark ab. Ein Handlungsbedarf ergibt sich zu einem beträchtlichen Anteil aus Gebieten mit *geringer Oberflächenrauigkeit* (helles Grün), da diese tagsüber ebenfalls sehr heiß werden können und die Temperatur teils auch nachts nicht stark abkühlt. Dies unterstreicht die obigen Einschätzungen, dass speziell Offenlandflächen in universellen Hotspot-Gebieten einer Einzelfallprüfung unterzogen werden sollten.

Priorisierte räumliche Handlungsschwerpunkte basierend auf universellen Coldspots umfassen vLCZ mit überwiegendem Wald- und Gehölzanteil oder Gebiete mit geringer Rauigkeit (helles und dunkles Grün). Auffällig ist, dass in der höchsten Priorisierungsstufe die Dominanz von vLCZ mit Waldgebieten (dunkles Grün) und, in geringerem Ausmaß, bebautem Gebiet, wie z. B. lockere, niedrige Bebauung (Gelb) vorliegt. Dies untermauert, dass in dieser Prioritätsstufe sowohl sehr großer Handlungsbedarf (in bebauten Bereichen) als auch sehr großer Erhaltungsbedarf (in Waldgebieten) herrschen kann. Dieses

Charakteristikum zeigt sich auch in den anderen beiden Priorisierungsstufen, jedoch in geringerem Ausmaß.

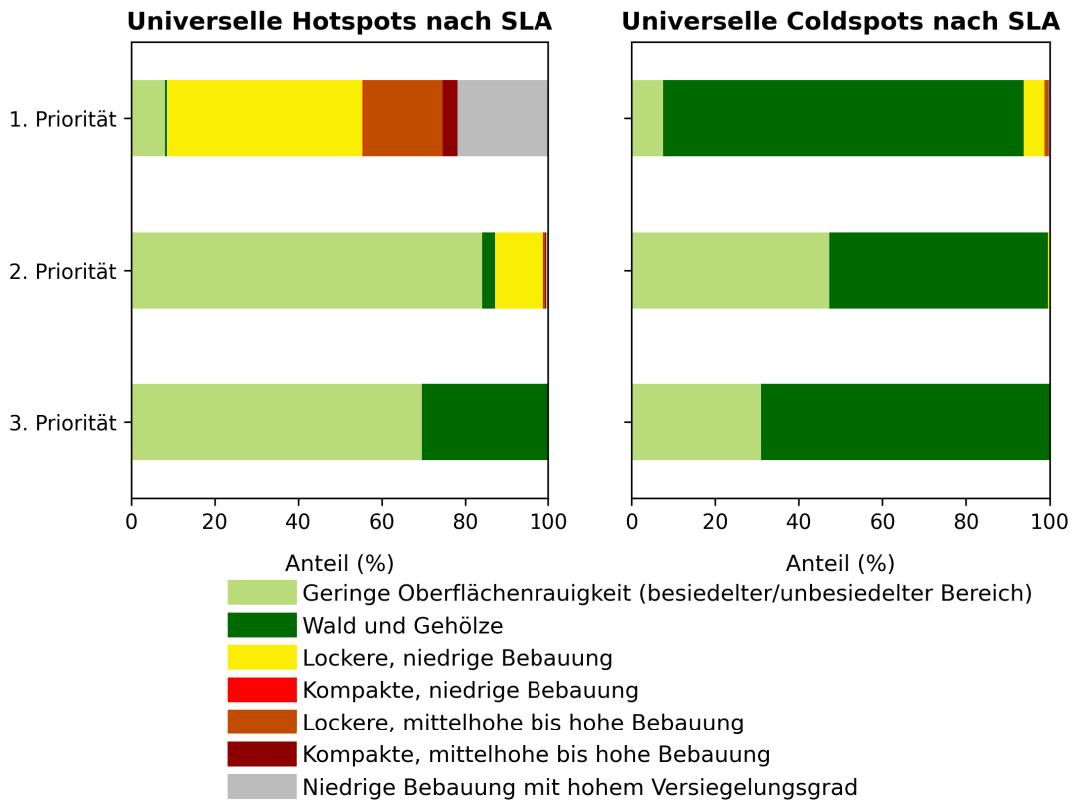


Abbildung 17.2.: Anteilige Verteilung der in Kapitel 5 definierten vLCZ-Klassen in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten nach SLA für den Bezugsrahmen Hessen.

17.3. Zusammenhang zwischen SLA und Stadtstrukturtypen

Dieser Abschnitt adressiert die lokale Planungsebene und untersucht den Zusammenhang zwischen **SST**, wie sie in Kapitel 10 definiert wurden, und den priorisierten Räumen mit Indizfunktion für Handlungsschwerpunkte. Die Analysen werden anhand der vier ausgewählten Gemeinden **Frankfurt**, **Marburg**, **Waldeck** und **Witzenhausen** erläutert.

Die Abbildungen 17.3 bis 17.6 visualisieren für die drei Priorisierungsstufen der Räume mit Indizfunktion, basierend auf universellen Hot- oder Coldspots, die flächenmäßig prozentualen Anteile der verschiedenen SST. Da SST nur auf Gebäudeflächen definiert sind, wird einmal der prozentuale Anteil der Gesamtfläche gezeigt und einmal der prozentuale Anteil der Gebäudefläche. Es ist zu beachten, dass die absolute Fläche teils sehr gering ist.

Sie zeigen, dass mit Abstand der größte Teil an Bebauung sich jeweils in der höchsten Prioritätsstufe, d. h. mit sehr hohem Handlungs- und/oder Erhaltungsbedarf, befindet. In den geringeren Prioritätsstufen dominieren weitgehend unbebaute Flächen. Dies zeigt sich sowohl für die Städte Frankfurt und Marburg, als auch für die kleineren Gemeinden Waldeck und Witzenhausen.

Innerhalb der bebauten Fläche lässt sich für die höchste Prioritätsstufe basierend auf universellen Coldspots (siehe Abbildungen 17.3 bis 17.6, jeweils rechts unten) für alle Gemeinden feststellen, dass *Einfamilienhäuser* der dominierende SST ist und die anderen SST flächenmäßig nur gering oder gar nicht vertreten sind.

Vergleicht man die Priorisierungsstufen basierend auf universellen Hotspots, fällt auf, dass in Frankfurt der SST *Bebauung hoher Dichte* den größten Anteil einnimmt, während in den anderen drei Gemeinden die *Einfamilienhäuser* der dominierende SST ist und die *Bebauung hoher Dichte* erwartungsgemäß seltener auftritt. Ebenso nimmt in Frankfurt die *Blockrandbebauung* ausschließlich in der höchsten Prioritätsstufe einen sichtbaren Flächenanteil ein. In Marburg kommen diese SST wesentlich seltener vor, allerdings auch nur in der höchsten Priorisierung. Dies deutet darauf hin, dass *Blockrandbebauung* vermehrt zu einer erhöhten Temperatur und somit höheren Priorisierung führen kann. Eine detailliertere Analyse ist allerdings nötig, um dies zu bestätigen.

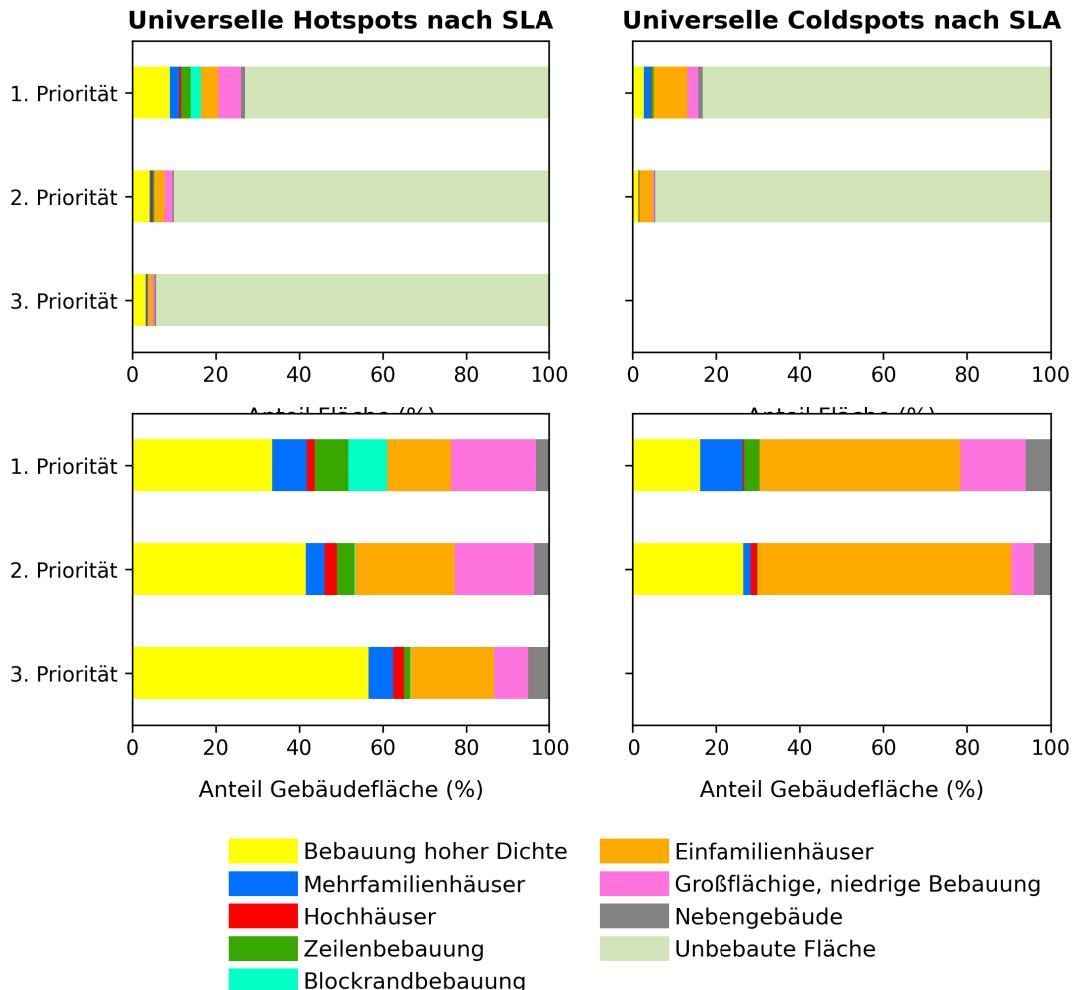


Abbildung 17.3.: Anteilige Verteilung der in Kapitel 10 definierten SST in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten nach SLA für den Bezugsrahmen **Frankfurt**. Oben: Verteilung über die gesamte Fläche Frankfurts. Unten: Verteilung über die Flächen, auf denen SST definiert sind, d. h. Gebäudeflächen. In Frankfurt gibt es keine universelle Coldspots der 3. Priorität nach SLA mit Gebäudeflächen, entsprechend kann keine Verteilung dargestellt werden.

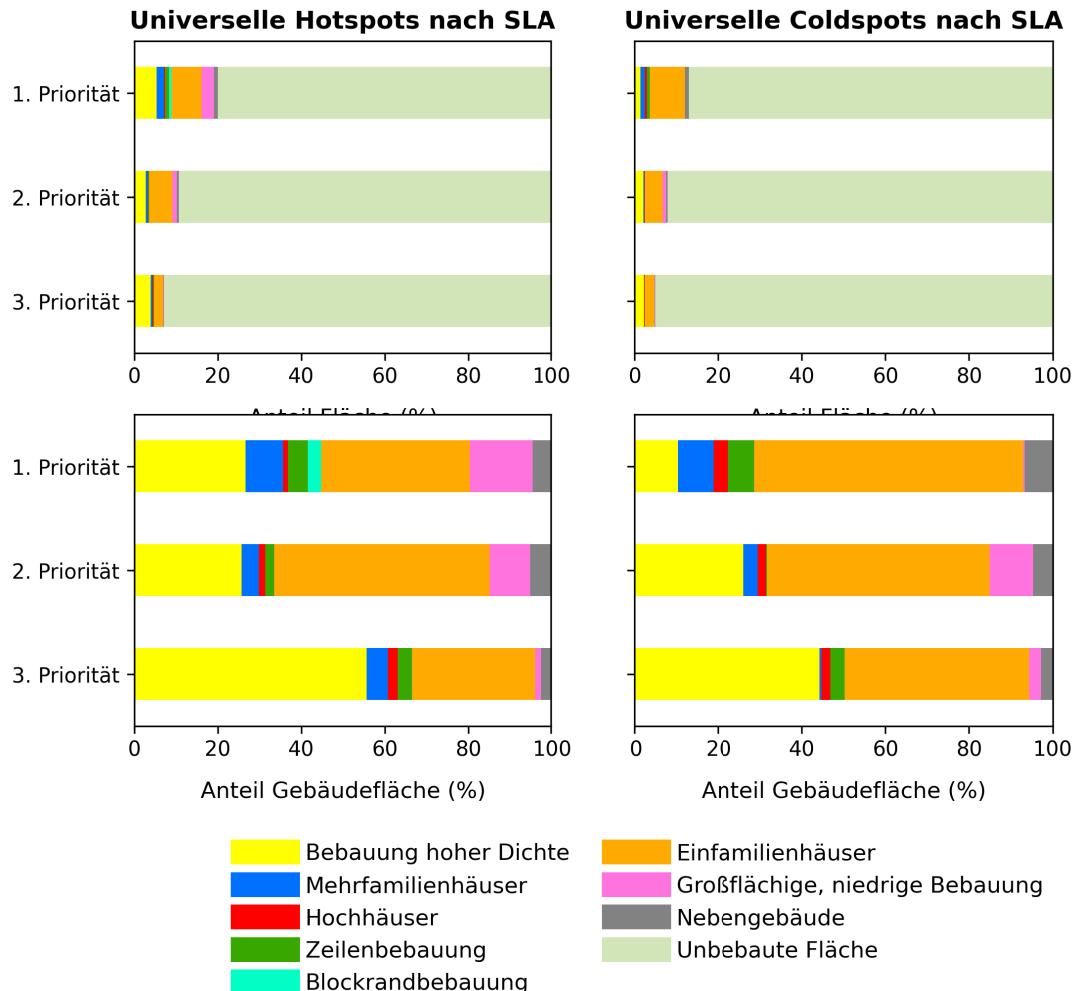


Abbildung 17.4.: Anteilige Verteilung der in Kapitel 10 definierten SST in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten nach SLA für den Bezugsrahmen **Marburg**. Oben: Verteilung über die gesamte Fläche Marburgs. Unten: Verteilung über die Flächen, auf denen SST definiert sind, d. h. Gebäudeflächen.

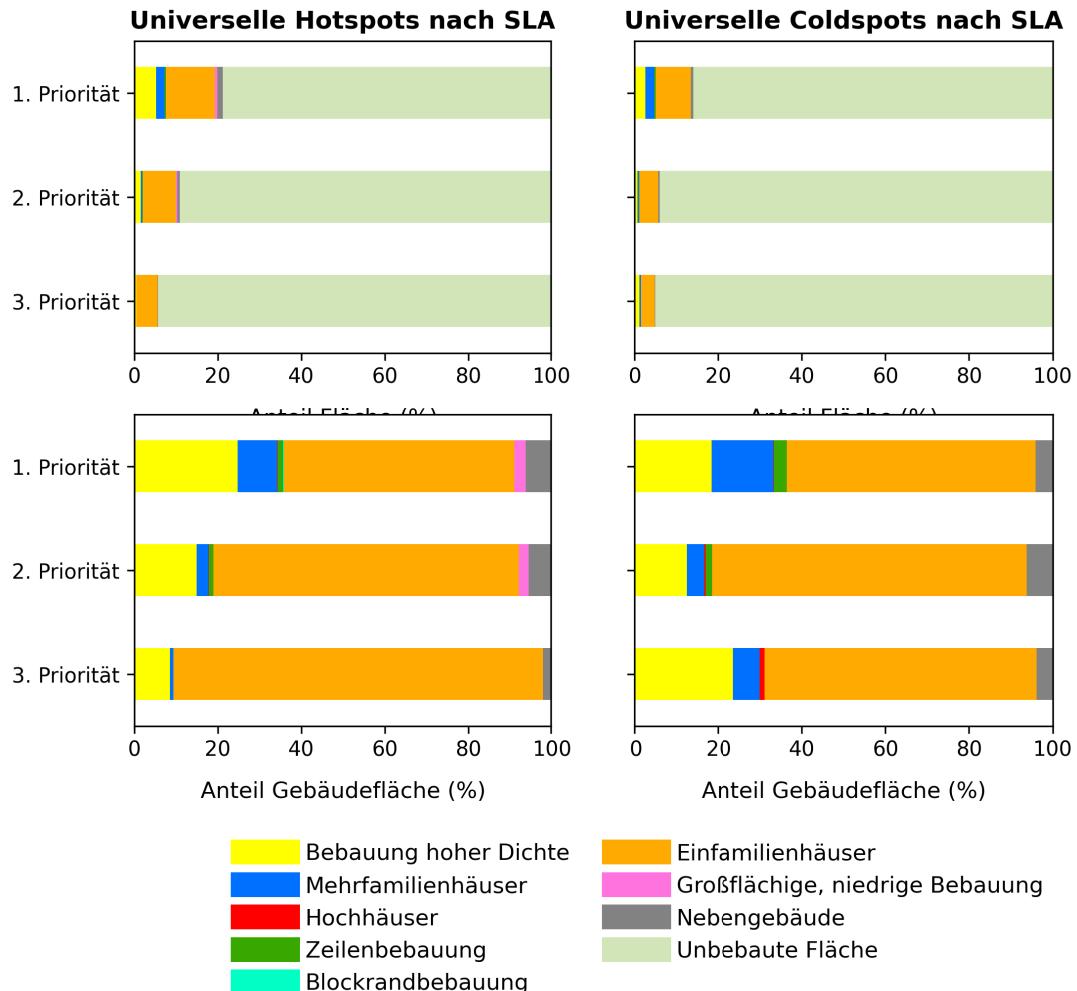


Abbildung 17.5.: Anteilige Verteilung der in Kapitel 10 definierten SST in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten nach SLA für den Bezugsrahmen **Waldeck**. Oben: Verteilung über die gesamte Fläche Waldecks. Unten: Verteilung über die Flächen, auf denen SST definiert sind, d. h. Gebäudeflächen.

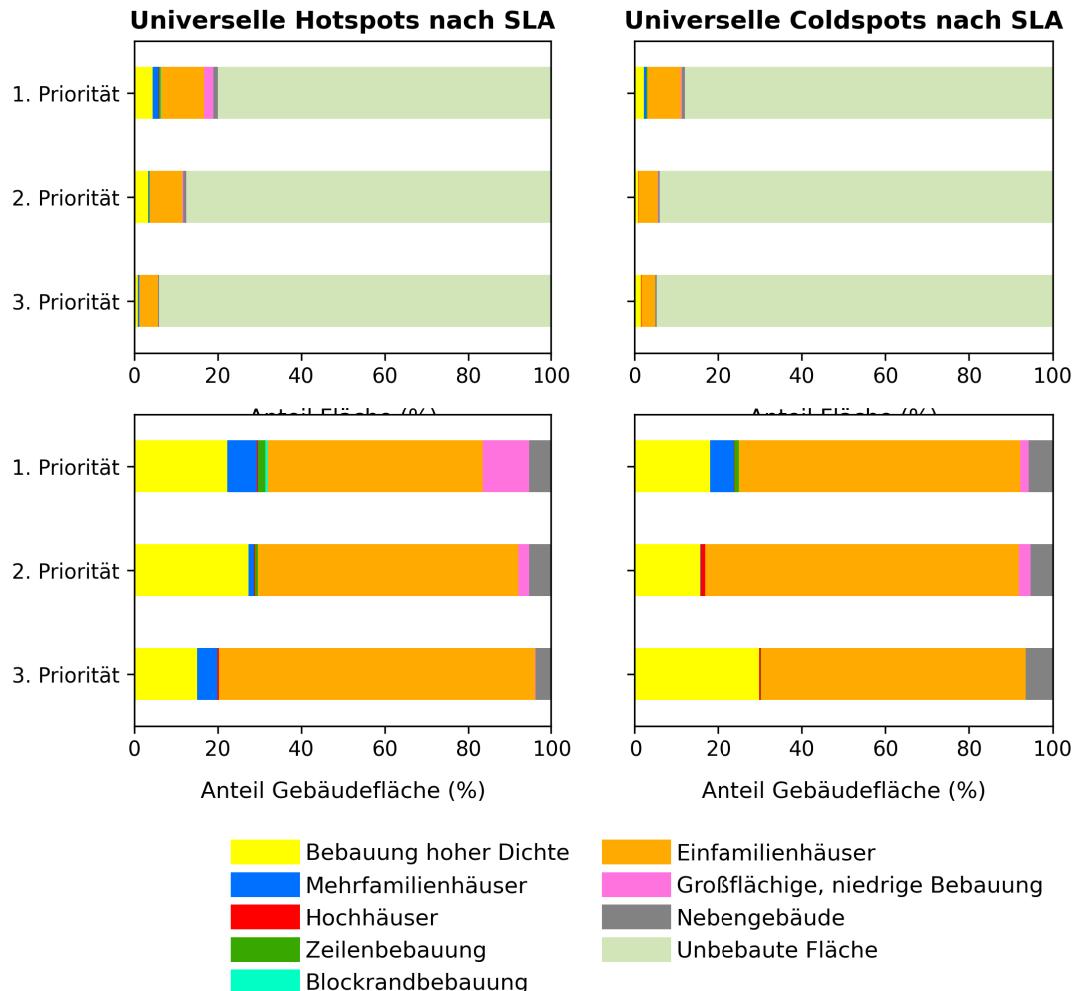


Abbildung 17.6.: Anteilige Verteilung der in Kapitel 10 definierten SST in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten nach SLA für den Bezugsrahmen **Witzenhausen**. Oben: Verteilung über die gesamte Fläche Witzenhausens. Unten: Verteilung über die Flächen, auf denen SST definiert sind, d. h. Gebäudeflächen.

17.4. Zusammenhang zwischen SLA und Landbedeckung

Die in diesem Kapitel vorgenommene Analyse der **Landbedeckung** innerhalb der priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkte zeigt, wie sich verschiedene Landbedeckungen flächenmäßig auf die Priorisierung als universeller Hot- oder Coldspot auswirken. Diese Analyse wird sowohl für den Bezugsrahmen für das gesamte Bundesland Hessen anhand der Landbedeckungsklassen aus dem Segmentierungsmodell und den vLCZ vorgenommen, als auch auf Gemeindeebene anhand einer Gegenüberstellung der Landbedeckungsklassen mit den SST.

Die in Abbildung 17.7 und Abbildung 17.8 vorgenommenen Analysen gehen zunächst auf den Bezugsrahmen Hessen ein. Wie in Abbildung 17.7 zu sehen ist, nehmen mit zunehmender Priorisierung sowohl die Vegetationsflächen (*niedrig-, mittel-, hochwüchsig*) als auch die unversiegelten Flächen deutlich ab. In den universellen Hotspot-basierten räumlichen Handlungsschwerpunkten steigen dementsprechend die Anteile an (Teil-)Versiegelung und bebauten Flächen.

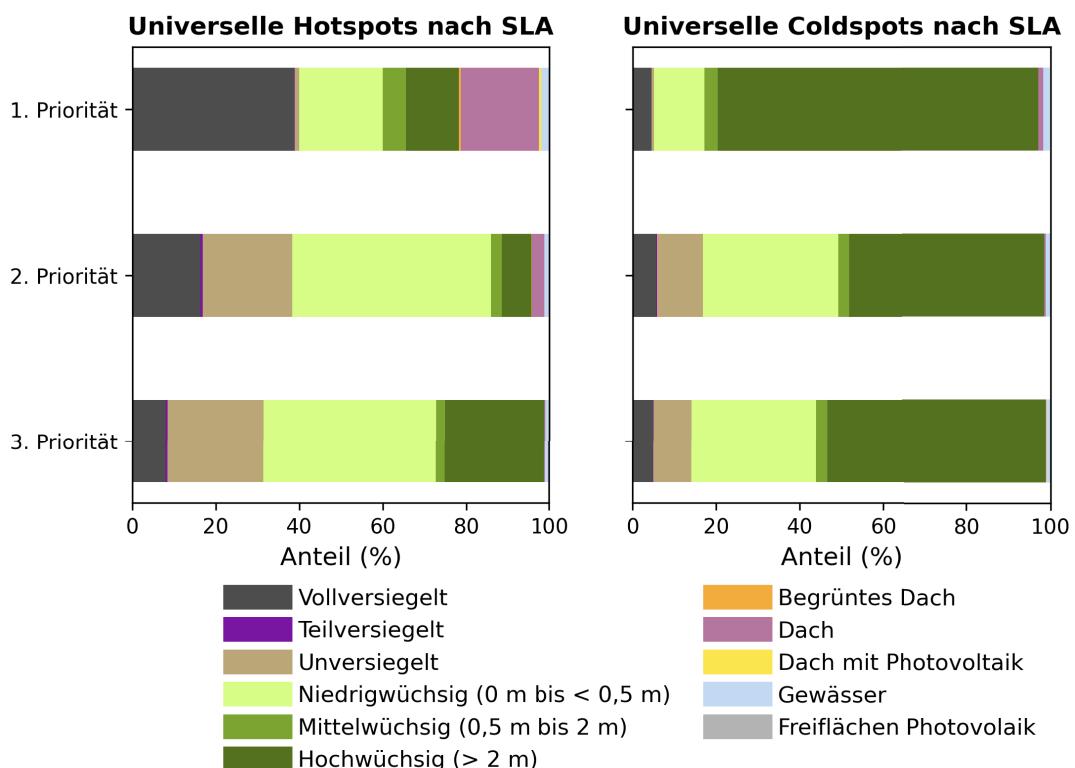


Abbildung 17.7.: Verteilung der in Kapitel 7 definierten Landbedeckungsklassen in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten nach SLA für den Bezugsrahmen Hessen.

In den universellen Coldspot-basierten Handlungs- bzw. Erhaltungsräumen haben alle Versiegelungs- und Dachflächen etwa gleiche Anteile in allen drei Priorisierungsstufen. Es zeigt sich jedoch eine Verschiebung dahingehend, dass unversiegelte Flächen und niedrige

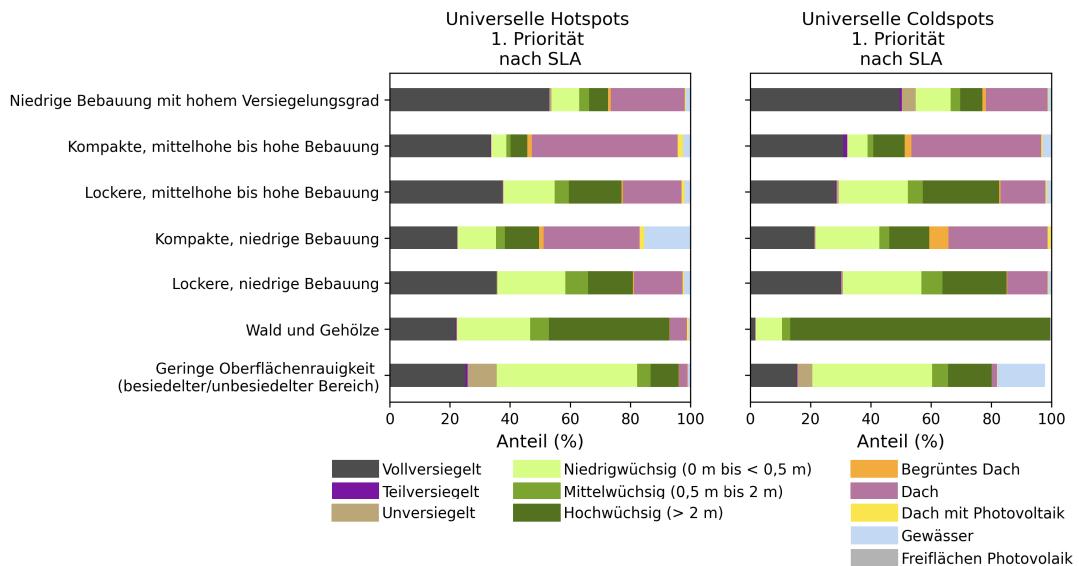


Abbildung 17.8.: Anteilige Verteilung der in Kapitel 7 definierten Landbedeckungsklassen je vLCZ-Klasse, wie in Kapitel 5 definiert, innerhalb von universellen Hotspots 1. Priorität und universelle Coldspots 1. Priorität nach SLA. Der Bezugsrahmen ist das Land Hessen.

Vegetation bei höheren Priorisierungsstufen abnehmen und insbesondere hochwüchsige Vegetation zunimmt.

Abbildung 17.8 zeigt die Flächenanteile der Landbedeckungsklassen auf die vLCZ aufgetragen, speziell für die höchste Priorisierungsstufe an Handlungs- bzw. Erhaltungsbedarf für universelle Hot- und Coldspots. In der höchsten Priorisierungsstufe der Hotspot-basierten räumlichen Handlungsschwerpunkte zeigen sich für die urban geprägten vLCZ (obere vier Zeilen in Abbildung 17.8) auch in den Landbedeckungsklassen hauptsächlich Dach- und Versiegelungsflächen. Für die anderen vLCZ nehmen die durch Vegetationsklassen geprägten Flächenanteile signifikante Anteile ein. Es zeigt sich allerdings auch, dass sich selbst in den vLCZ Gebieten mit *geringer Oberflächenrauigkeit* und *Wälder und Gehölze* vollversiegelte Flächenanteile wiederfinden, was v. a. durch die Erschließungsinfrastruktur und kleinere Dörfer und Einzelgebäude begründet sein dürfte, die in diesen Klimazonen liegen.

Besonders auffällig in den höchstpriorisierten Handlungs- bzw. Erhaltungsräumen basierend auf universellen Coldspots ist die Rolle der Gewässer. Diese nehmen flächenmäßig größere Anteile in den urban geprägten vLCZ ein, die ansonsten hohe Versiegelungs- oder Bebauungsanteile aufweisen. Dies unterstreicht die besonders wirksame Kühlfunktion von Gewässern in bebauten Gebieten.

Für die Analyse der Gemeindeebene illustrieren die Abbildungen 17.9 bis 17.12 die Landbedeckungsklassen flächenmäßig aufgetragen auf die jeweiligen SST der Gemeinden **Frankfurt, Marburg, Waldeck und Witzenhausen**. Dargestellt ist dies jeweils für die höchste Priorisierungsstufe der räumlichen Handlungsschwerpunkte sowohl für universelle Hot- als auch für Coldspots.

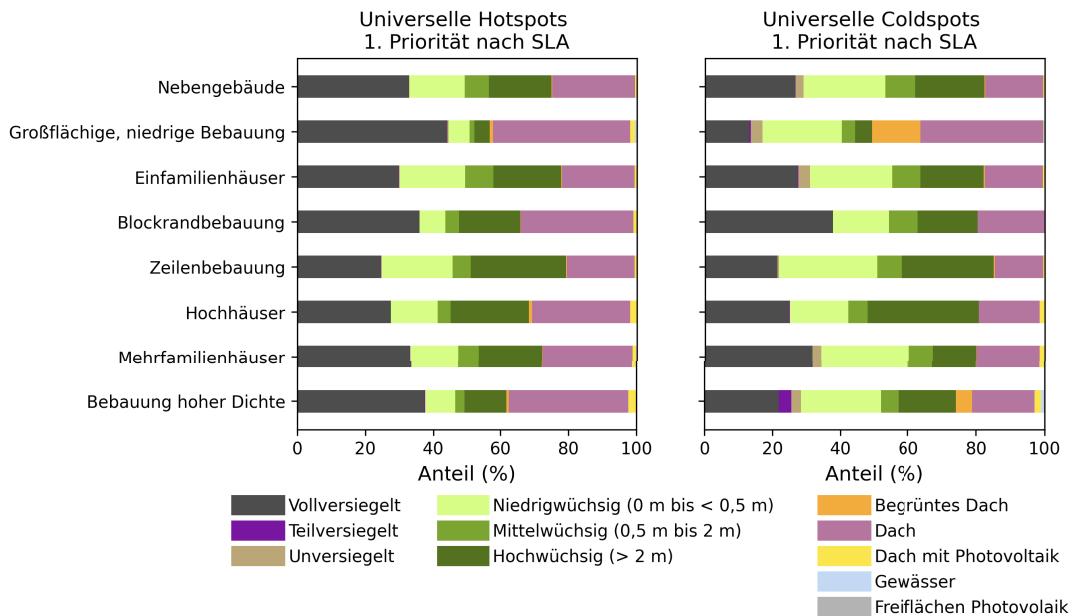


Abbildung 17.9.: Anteilige Verteilung der in Kapitel 7 definierten Landbedeckungsklassen je Siedlungsstruktur-Klasse, wie in Kapitel 10 definiert, innerhalb von universellen Hotspots 1. Priorität und universelle Coldspots 1. Priorität nach SLA. Der Bezugsrahmen ist die Gemeinde **Frankfurt**.

Über alle Gemeinden sticht heraus, dass die SST *Großflächige, niedrige Bebauung*, *Blockrandbebauung* und *Bebauung hoher Dichte* auch die geringsten Grünanteile aufweisen. Hingegen haben die SST der *Einfamilienhäuser*, *Zeilenbebauung* und *Hochhäuser* größeren Grünanteile.

Eine ähnliche Wirkung lässt sich auch bei den universellen Coldspots bzw. dem sehr großen Handlungs- und Erhaltungsbedarf beobachten. Die größeren Grünanteile in den SST der *Einfamilienhäuser*, *Zeilenbebauung* und *Hochhäuser* tragen hier zur Kühlung bei. In den dichter bebauten SST, die kaum universelle Coldspots haben, muss diese Wirkung durch die *Gewässerflächen* unterstützt werden. Dies ist in Frankfurt offensichtlich, aber auch in den kleineren Gemeinden teilweise erkennbar. Als Sonderfall sei erwähnt, dass sich in Waldeck keine *Blockrandbebauung* und keine *großflächige, niedrige Bebauung* in universellen Coldspots 1. Priorität finden, entsprechend können hier keine Verteilungen angezeigt werden. Analog verhält es sich in der Gemeinde Witzenhausen hinsichtlich der *Blockrandbebauung* in universellen Coldspots 1. Priorität.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass v. a. die versiegelten Flächen in allen Priorisierungsstufen vorkommen und demnach grundsätzlich auch Potenzial zur Entsiegelung bieten. Die ebenfalls häufig auftretende niedrige Vegetation könnte fallweise Potenziale zur Grünverdichtung aufweisen und durch Erhöhung der Grünvolumina zur Kühlwirkung beitragen. Die wichtige Rolle der Wasserflächen ist in diesem Zusammenhang ebenfalls klar nachgewiesen und zu unterstreichen.

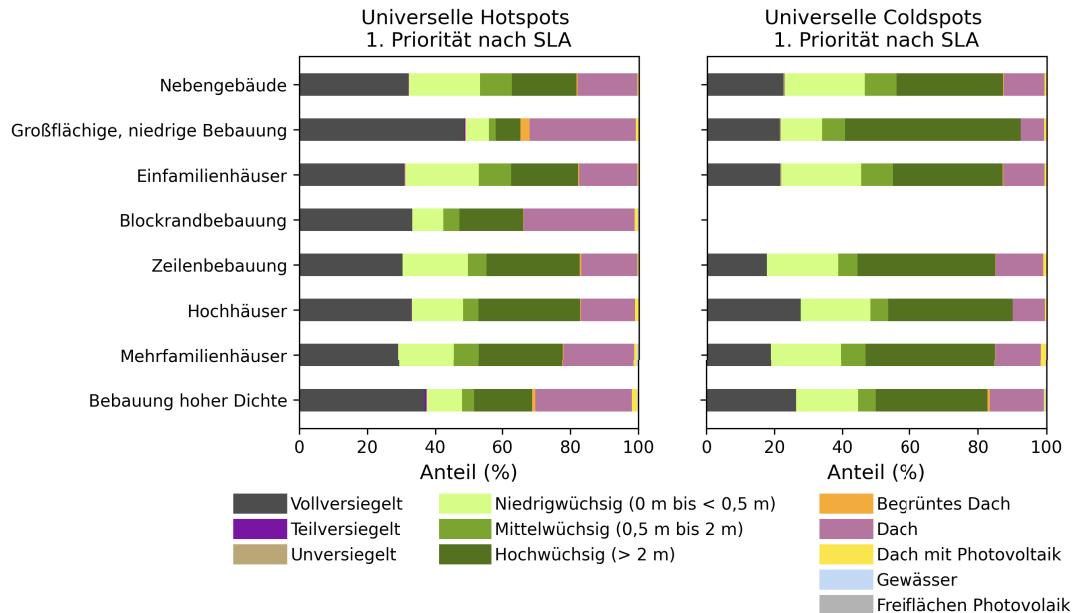


Abbildung 17.10.: Anteilige Verteilung der in Kapitel 7 definierten Landbedeckungsklassen je Siedlungsstruktur-Klasse, wie in Kapitel 10 definiert, innerhalb von universellen Hotspots 1. Priorität und universelle Coldspots 1. Priorität nach SLA. Der Bezugsrahmen ist die Gemeinde **Marburg**.

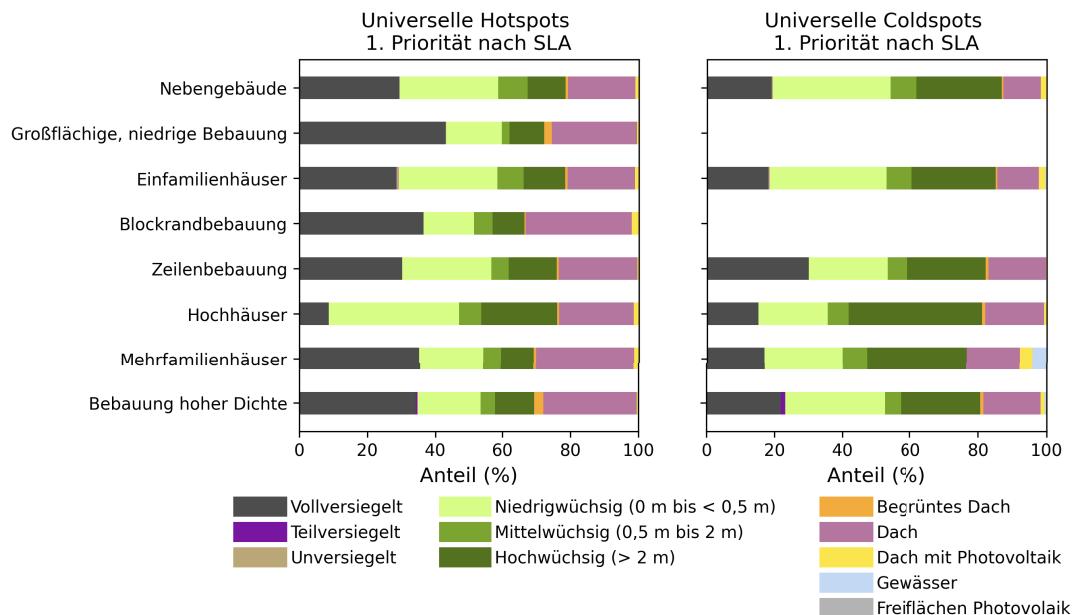


Abbildung 17.11.: Anteilige Verteilung der in Kapitel 7 definierten Landbedeckungsklassen je Siedlungsstruktur-Klasse, wie in Kapitel 10 definiert, innerhalb von universellen Hotspots 1. Priorität und universelle Coldspots 1. Priorität nach SLA. Der Bezugsrahmen ist die Gemeinde **Waldeck**.

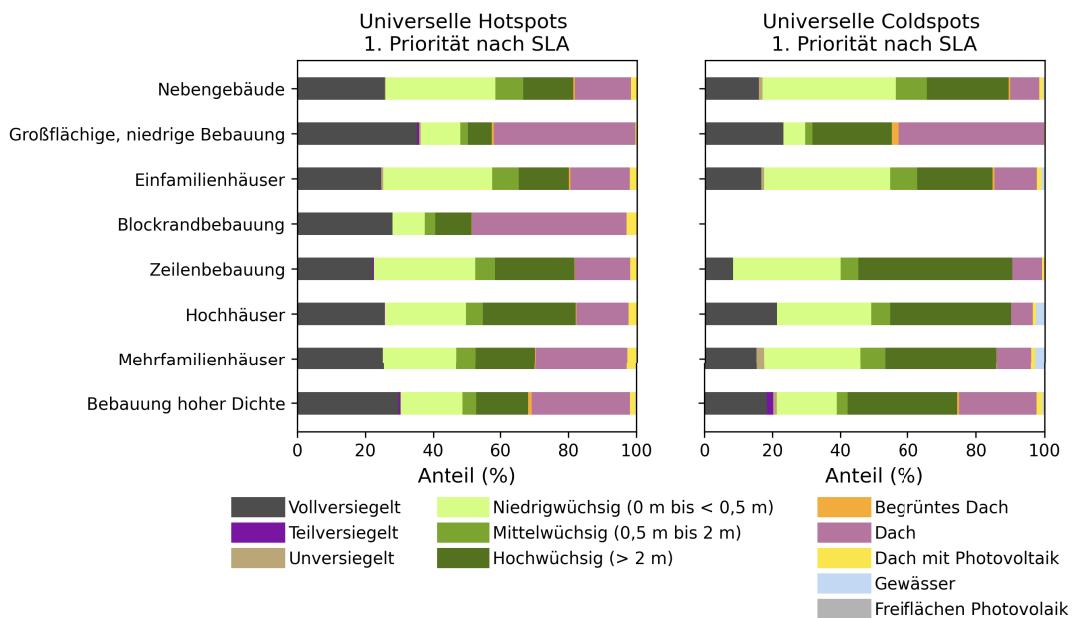


Abbildung 17.12.: Anteilige Verteilung der in Kapitel 7 definierten Landbedeckungsklassen je Siedlungsstruktur-Klasse, wie in Kapitel 10 definiert, innerhalb von universellen Hotspots 1. Priorität und universelle Coldspots 1. Priorität nach SLA. Der Bezugsrahmen ist die Gemeinde **Witzenhausen**.

17.5. Zusammenhang zwischen SLA und grünen bzw. blauen Indikatoren

Die Analyse der Grünindikatoren innerhalb der priorisierten Handlungsschwerpunkte verdeutlicht, wie Menge, Dichte und Vitalität der Vegetation und die Ermittlung von universellen Hot- und Coldspots bzw. daraus abgeleiteten Priorisierungsstufen von räumlichen Handlungsschwerpunkten zusammenhängen. Diese Analyse wird nachfolgend anhand der Grünindikatoren NDVI, Grünvolumen, Grünausstattung, GPP und Wassererreichbarkeit (siehe Kapitel 9) erläutert. Der Bezugsrahmen ist jeweils das gesamte Bundesland Hessen.

Die Abbildungen 17.13 bis 17.17 sind als sog. Violinen-Plots dargestellt. Die horizontalen blauen Balken umfassen dabei die jeweilige Spannweite der Parameterwerte (Minimum bis Maximum). Die Flächenform visualisiert die Verteilung der Parameterwerte (Histogramm), d. h. je stärker die (symmetrische) Auswölbung ist, umso häufiger kommen Parameterwerte vor. Der kurze senkrechte Strich innerhalb der Spannweite symbolisiert die Lage des Median-Wertes der Parameterwerte.

Abbildung 17.13 visualisiert das Verhalten des **NDVI** für die unterschiedlichen Priorisierungsstufen der räumlichen Handlungsschwerpunkte von universellen Hot- und Coldspots. Wie deutlich zu erkennen ist, zeigen Hotspot-basierte Handlungsschwerpunkte zunehmend schlechtere NDVI-Werte für höhere Priorisierungsstufen. Auf der anderen Seite ist eine höhere Priorisierungsstufe im Falle von universellen Coldspots durch höhere NDVI-Werte,

also mehr und mehr gesunde Vegetation, gekennzeichnet. Dies unterstreicht die wichtige Wirkung und Potenziale vitaler Vegetation.

Dass die Spannweite des NDVI v. a. bei universellen Coldspots auch in den negativen Bereich geht, dürfte mit dem Vorhandensein von Wasserflächen zusammenhängen, wie es in den vorigen Kapiteln (siehe z. B. Abschnitt 9.1.1) beschrieben ist.

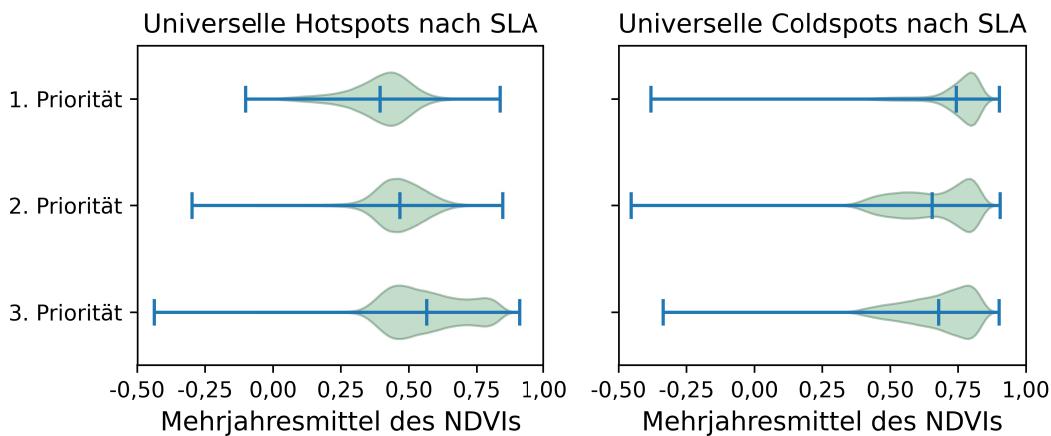


Abbildung 17.13.: Verteilung des Mehrjahresmittels des NDVI (siehe Abschnitt 9.1.1) in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten nach SLA für den Bezugsrahmen Hessen.

Die Analyse des **Grünvolumens** für die Priorisierungsstufen ist in Abbildung 17.14 visualisiert. Da aufgrund des großen Wertebereichs die Grünvolumenwerte logarithmiert aufgetragen sind, ist speziell die Lage des Medians aussagekräftig. Ein höher priorisierter Handlungsschwerpunkt bzw. Erhaltungsbedarf im Falle von universellen Coldspots geht auch mit einem erhöhten Median-Wert an Grünvolumen einher. Bei universellen Hotspots lässt sich dagegen keine klare Tendenz ableiten.

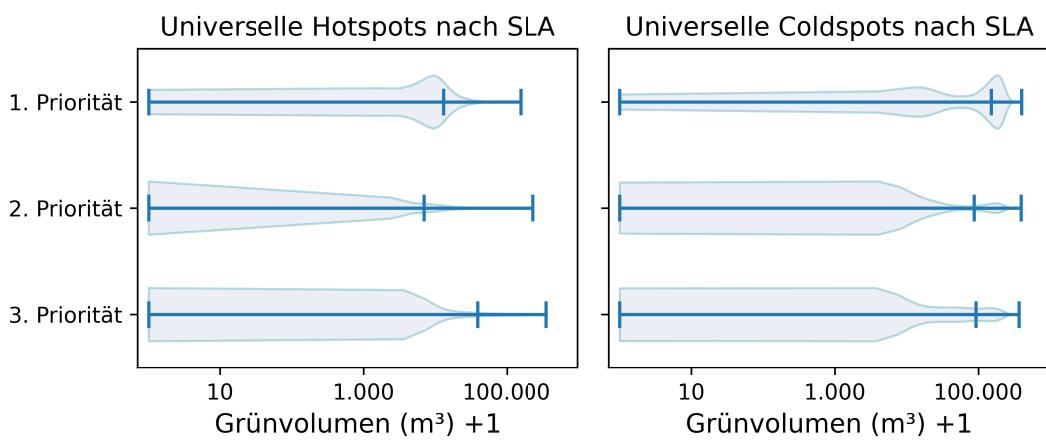


Abbildung 17.14.: Verteilung des Grünvolumens (siehe Abschnitt 9.1.3) in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten nach SLA für den Bezugsrahmen Hessen.

Deutlicher wird dies wiederum bei der **Grünausstattung** (siehe Abbildung 17.15). Räumliche Handlungsschwerpunkte basierend auf universellen Hotspots haben eine

niedrigere Grünausstattung, je höher der Handlungsbedarf ist. Das inverse Bild - wenn auch nur weniger stark ausgeprägt - zeigt sich auf der Seite der universellen Coldspots; je wichtiger ein universeller Coldspot ist, umso mehr Grünausstattung ist dort vorhanden.

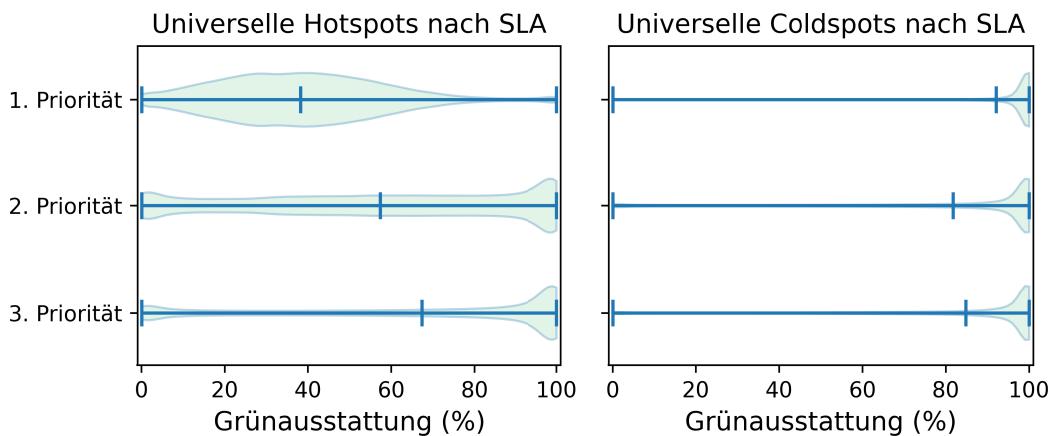


Abbildung 17.15.: Verteilung der Grünausstattung (siehe Abschnitt 9.1.2) in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten nach SLA für den Bezugsrahmen Hessen.

Abbildung 17.16 zeigt die Verteilung der **GPP** für universelle Hotspots (links) und Coldspots (rechts) aufgeschlüsselt nach drei Prioritätsstufen. Für jede Prioritätsstufe lassen sich Unterschiede in der Dichteverteilung der GPP-Werte identifizieren. Beispielsweise weisen die universellen Hotspots bei allen Prioritätsstufen ähnliche symmetrische Verteilungen auf, mit einem deutlichen Schwerpunkt um den Median. Bei den universellen Coldspots hingegen zeigt sich eine ähnliche Verteilungsstruktur, jedoch mit leicht ausgeprägteren Werten bei höheren Prioritätsstufen.

Hinsichtlich der Spannweite der GPP-Werte (blauen horizontalen Balken) sind ebenfalls Unterschiede zu erkennen. Dennoch sind die Medianwerte für universelle Hotspots und Coldspots relativ konstant, was auf eine stabile Lage der zentralen Tendenz hindeutet.

Diese in Abbildung 17.16 gegebene Darstellung kann wertvolle Hinweise für die Priorisierung von Maßnahmen geben. Die Verteilung der GPP-Werte in Coldspots zeigt, wo hohe Produktivitätspotenziale bestehen, die gezielt gefördert werden könnten, um klimatische Vorteile zu nutzen.

In Bezug auf die Verteilung der **Wassererreichbarkeit** in den priorisierten Handlungsschwerpunkten, basierend auf universellen Hot- bzw. Coldspots (siehe Abbildung 17.17), sollte der Fokus auf die maximalen Werte gelegt werden. Dieser Aspekt ist sinnvoll, da die Wassererreichbarkeit für die meisten Gebiete in Hessen gleich null ist (Verteilung auf enge Bereiche). So zeigt sich insbesondere bei der 1. und 2. Priorität eine sehr schmale Auswölbung, was auf eine geringe Variabilität der Wassererreichbarkeit hindeutet. Die 3. Priorität zeigt eine größere Spannweite, besonders bei den universellen Coldspots, was eine heterogenere Verfügbarkeit des Wassers in diesen Regionen widerspiegelt. Bei den universellen Hotspots bleibt der Median über alle Prioritätsstufen hinweg relativ konstant und liegt in einem ähnlichen Bereich wie bei den universellen Coldspots. Die breitere

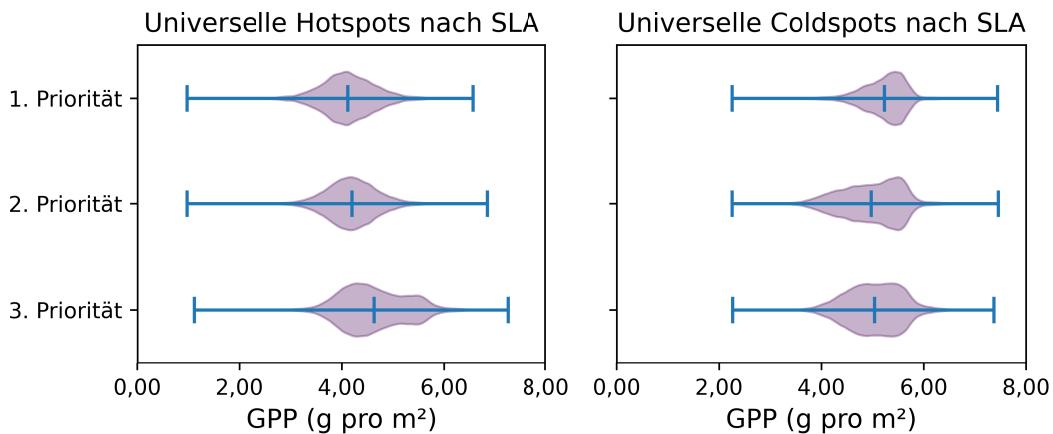


Abbildung 17.16.: Verteilung der GPP (siehe Abschnitt 9.1.4) in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten nach SLA für den Bezugsrahmen Hessen.

Spannweite der universellen Coldspots deutet jedoch auf stärkere Schwankungen in der Wassererreichbarkeit hin.

Die statistischen Ergebnisse verdeutlichen, dass die Wassererreichbarkeit als Indikator in den Hotspots stabiler ist, was eine bessere Planbarkeit von Anpassungsmaßnahmen ermöglicht. Die universellen Coldspots mit größeren Schwankungen und breiteren Spannweiten erfordern differenzierte Strategien, um Wassererreichbarkeit auszugleichen und Resilienz aufzubauen.

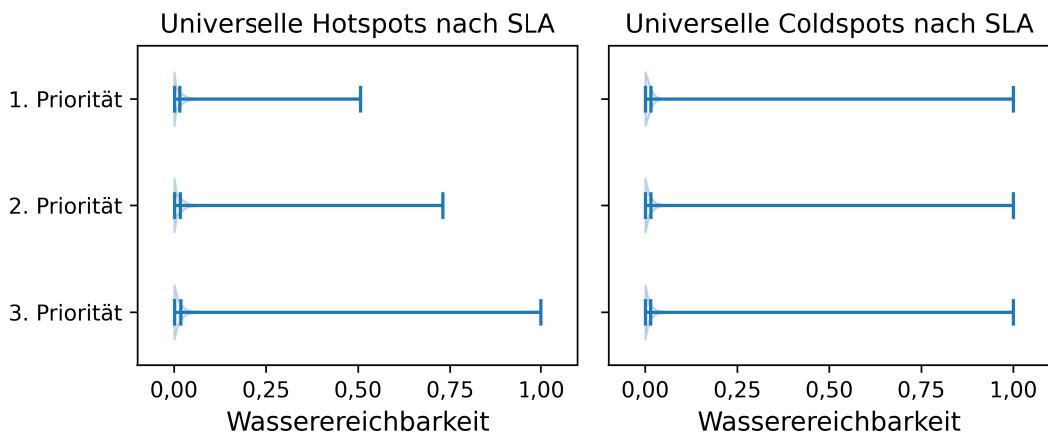


Abbildung 17.17.: Verteilung der Wassererreichbarkeit (siehe Abschnitt 9.3.1) in den priorisierten räumlichen Handlungsschwerpunkten nach SLA für den Bezugsrahmen Hessen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für den Bezugsrahmen der Landesebene in den allermeisten Fällen klare Zusammenhänge zwischen den Grünindikatoren und den Priorisierungsstufen der räumlichen Handlungsschwerpunkte oder für den Erhaltungsbedarf ersichtlich sind. Für Gebiete mit sehr hohem Handlungsbedarf sind daher auch die Defizite und Potenziale nachweisbar und messbar.

18. Lokal differenzierte Potenzial- und Defizitanalyse am Beispiel von sechs Hektar in Frankfurt am Main

Die lokal differenzierte Potenzial- und Defizitanalyse findet für sechs exemplarische 100 m-Gitterzellen innerhalb Frankfurts statt und wird basierend auf den in den Kapiteln zuvor generierten Ergebnissen betrachtet. Analysiert werden u. a. klimatische Belastungen, Bebauungsstrukturen sowie verschiedene Grünindikatoren. Zudem ist die Interpretation der sechs Gitterzellen als Räume mit Indizfunktion für Handlungsschwerpunkte gegeben. Die Ergebnisse können eine fundierte Ausgangslage für planerische Interventionen mit dem Ziel der Klimaanpassung in einem urbanen Kontext bieten.

Abbildung 18.1 zeigt die sechs ausgewählten 100 m-Gitterzellen in Frankfurt am Main, die anhand von Orthofotos visualisiert sind. Jede Gitterzelle ist mit ihrer im Vorhaben verwendeten eindeutigen Kennung (z. B. 100mN29999E42255) versehen, die der 100 m-Gitterzelle entspricht. Gleichzeitig ist für die leichtere Interpretierbarkeit eine Nummerierung von (A) bis (F) gegeben, beginnend mit der nordwestlichsten Zelle als (A). Diese Luftbildaufnahmen geben u. a. einen visuellen Eindruck der Landbedeckung und damit auch des Grünanteils sowie dem Ausmaß an Versiegelung und Bebauung.

Die sechs untersuchten Gitterzellen lassen sich über die in der Tabelle 18.1 zusammengestellten Indikatoren und Parameter detailliert charakterisieren. Tabelle 18.1 enthält wesentliche Faktoren wie die Priorisierung des räumlichen Handlungsbedarfs, klimatische Belastungen (z. B. klassifizierte PET-Werte, klassifizierte Tropennächte, klassifizierte Oberflächentemperaturen), Bebauungsstrukturen (SST, Verdichtung, Versiegelung) sowie Grün- und Freiflächenpotenziale.

Die Zellen stehen für unterschiedlich priorisierte räumliche Handlungsbereiche und unterschiedliche Klassifizierungen als universelle Hot- & Coldspot. Auch die weiteren Werte erlauben eine Betrachtung gegensätzlicher räumlicher Ausprägungen. In Abbildung 18.2 werden diese Eigenschaften graphisch dargestellt.

Klimatische Belastung Die Auswertung zeigt, dass vier der sechs untersuchten Gitterzellen – (A) bis (D) – besonders hohe klimatische Belastungen in den gezeigten klassifizierten Parametern aufweisen. Diese Zellen (A) bis (E) sind als priorisierte räumliche Handlungsschwerpunkte mit einem „sehr hohen Handlungsbedarf“ (Stufe 1) klassifiziert.

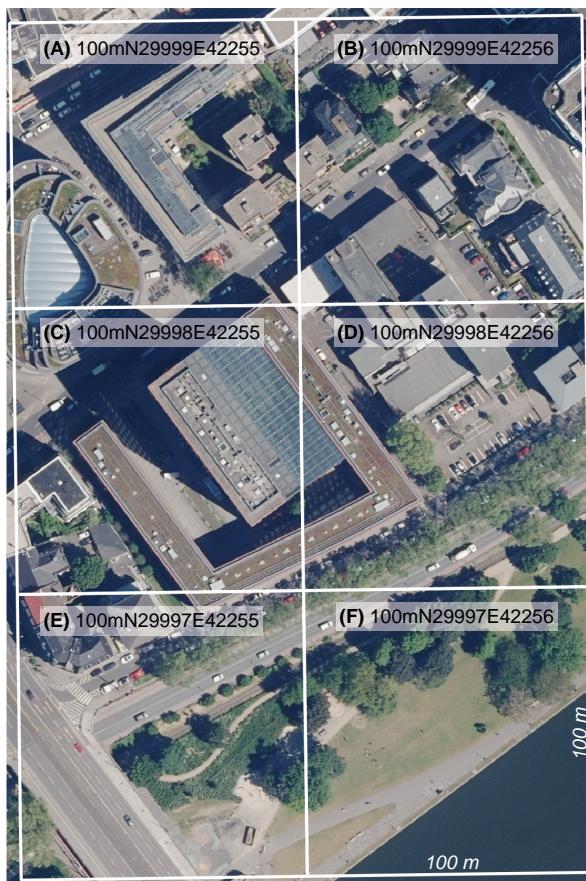


Abbildung 18.1.: Orthofoto-Darstellung der sechs ausgewählten 100 m-Gitterzellen in Frankfurt am Main. Datengrundlage: Orthofoto von 2021.

Zudem sind sie (A) bis (D) „universelle Hotspots Tag und Nacht“¹ mit extremen Oberflächentemperaturen (LST Tag und Nacht) und hoher PET-Belastung. Die Anzahl (#) der Tropennächte ist in allen Zellen hoch, was auf eine mangelnde nächtliche Abkühlung hinweist.

Im Gegensatz dazu weist die Gitterzelle (F) eine geringere klimatische Belastung auf. Hier liegt die PET-Klassifizierung auf niedrigster Stufe, und die tagsüber auftretenden Hitzeextreme sind weniger ausgeprägt. Dennoch bleibt auch in diesen Bereichen die nächtliche Wärmebindung gegeben.

Stadtstruktur und Versiegelung In Hinblick auf die städtebauliche Struktur (Stadtstrukturtypen) zeigen sich deutliche Unterschiede in der Bebauungsdichte und der Bodenversiegelung (Landbedeckung):

- Zellen (A) bis (D) weisen einen hohen Anteil an dichter Bebauung auf (zwischen 25 % bis 40 %), wodurch sich ein stark ausgeprägtes urbanes Wärmeinsel-Effekt-Phänomen ergibt (siehe auch Absatz zuvor).
- Die Vollversiegelung ist in diesem 4 ha-Bereich besonders hoch (bis zu 57 %), während die Vegetationsbedeckung vergleichsweise gering ist.

¹Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich

- Die 1 ha-Zelle (F) hingegen hat eine deutlich geringere Bebauungsdichte und weniger versiegelte Flächen, wie z. B. 14 % vollversiegelt, was sich positiv auf das lokale Mikroklima auswirkt.
- Die Zelle (E) hat aufgrund der Straßenkreuzung einen sehr hohen Anteil an Vollversiegelung mit 57 %, was auch einen hohen klassifizierten LST-Tagwert bedingt.

Grün- und Freiflächenpotenziale Die Verfügbarkeit von Grünflächen variiert erheblich zwischen den ausgewählten Gitterzellen. Insbesondere das urbane Grün spielt eine entscheidende Rolle für das städtische Mikroklima, die Biodiversität und die Lebensqualität. Eine ausreichende Begrünung trägt maßgeblich zur Reduktion von Hitzeinseln bei, verbessert die Luftqualität und erhöht den Erholungswert für die Bevölkerung. Gerade in dicht bebauten Gebieten sind Erhaltung und gezielte Schaffung von Grünflächen essenziell, um die klimatischen Belastungen zu mindern und langfristig eine nachhaltige Stadtentwicklung zu gewährleisten. Im Vergleich der sechs Gitterzellen untereinander ergeben sich die folgenden Aspekte:

- In den hochverdichteten Zellen (A) bis (D) liegt der Grünanteil lediglich zwischen 8 % bis 26 % unter Betrachtung der niedrig- bis hochwüchsigen Vegetation (Landbedeckung).
- Hinsichtlich der Grünvolumenverfügbarkeit bieten die Zellen (D),(E) und (F) mit bis zu $26 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ deutlich bessere Grünraumqualitäten.
- Das Grünvolumendefizit ist insbesondere in den hochverdichteten Bereichen stark ausgeprägt, während die Vegetation in den Zellen (E) und (F) sowohl flächenmäßig als auch in Volumen eine bessere Ausstattung aufweist.
- Der mittlere NDVI-Wert als Maß für die Vitalität der Vegetation bestätigt diese Unterschiede: Während die stark versiegelten Bereiche niedrige Werte (0,17 bis 0,20) aufweisen, erreichen die Zellen (E) und (F) mit 0,35 bis 0,51 deutlich bessere Werte.

Visualisierung der verschiedenen Parameter für die sechs Gitterzellen Abbildung 18.2 veranschaulicht die räumlichen Unterschiede der ausgewählten Gitterzellen. Die jeweils im linken Bereich der einzelnen Zellen dargestellten Radardiagramme (auch Spinnendiagramme oder Netzdiagramme) dienen dazu, mehrere Parameter (Dimensionen) gleichzeitig zu visualisieren, um diese miteinander zu vergleichen. Hierzu wird eine skalierte Darstellung gewählt, bei der die Werte der ausgewählten Parameter jeweils zwischen 0 und 1 transformiert werden. Die Skalierung der Werte erfolgt nach dem Min-Max-Normalisierungsverfahren, wobei der niedrigste Wert eines Parameters als 0 und der höchste Wert als 1 gesetzt wird (hier: Parameterwerte der sechs Zellen). Für die Flächenanteile im Radardiagramm gilt, dass ein größerer Flächenanteil in einer Dimension eine stärkere Ausprägung des entsprechenden Parameters zeigt.

Beispielsweise ist zu erkennen, dass in den stark verdichteten und klimatisch belasteten Gebieten (z. B. (A) bis (D)) Parameter wie hohe Versiegelung, geringe Grünvolumenverfügbarkeit und hohe Temperaturen dominieren. In den weniger belasteten Zellen (E) und (F) sind die Werte für Grünerreichbarkeit und Grünvolumen ausgeprägter, was sich positiv auf das Mikroklima auswirkt.

Neben den Radardiagrammen befinden sich Tortendiagramme. Sie veranschaulichen die Verteilung von Grün- und Versiegelungsanteilen. Plausibel wird hier gezeigt, dass hochverdichtete Gebiete nur geringe Grünanteile aufweisen, während niedrigere Bebauungsdichten zu einer besseren Durchgrünung führen.

Nennung von planerischen Möglichkeiten Basierend auf der exemplarisch gezeigten Analyse für die sechs ausgewählten Gitterzellen lassen sich Empfehlungen für die Maßnahmenentwicklung ableiten (siehe auch Kapitel 20). Beispiele hierfür sind u. a.:

- Erhöhung der Grünvolumenverfügbarkeit: Maßnahmen wie Dach- und Fassadenbegrünungen, Baumneupflanzungen und Entsiegelung von Flächen (z. B. Uferweg entlang des Mains in (F) oder Gehwege und Plätze in (A) und (B)) sind notwendig, um den Wärmeinseleffekt in den kritischen Bereichen (A) bis (D) zu reduzieren.
- Schaffung von Kaltluftschneisen: Durch strategische Freihaltung von Luftleitbahnen kann die nächtliche Abkühlung verbessert werden. Hierzu benötigt es noch weitere Daten zu genaueren Analysen der Luftströmung.
- Anpassung der Bebauungsstruktur: Bei Änderungen der Bebauung durch beispielsweise Ersatzneubauten sollte die Bauleitplanung Vorgaben zur Reduzierung der Versiegelung, offenen Bebauungsformen sowie die Einbindung von sog. Mikroklimazellen machen.
- Erhalt und Pflege von Bestandsgrünflächen: Die höherwertigen Grünflächen in Zellen (E) und (F) sollten geschützt und gepflegt werden, um ihre kühlende Funktion für die Umgebung zu bewahren und zu entwickeln.
- Integration wassergebundener Elemente: Insbesondere in verdichteten Bereichen (Zelle (A)) sollten Maßnahmen wie Wasserspiele oder, wo möglich, begrünte Retentionsflächen das Mikroklima verbessern.

Fazit zur lokal differenzierten Potenzial- und Defizitanalyse Die vorliegende Analyse zeigt deutlich, dass die räumlichen Gegebenheiten innerhalb der untersuchten Gitterzellen erheblich variieren und unterschiedlich starke Herausforderungen in Bezug auf Klimaanpassung bestehen. Während hochverdichtete Gebiete besonders unter Wärmelastungen und mangelnder Grünverfügbarkeit leiden, bieten weniger versiegelte Flächen mit höherer Vegetationsdichte Potenzial für klimatische Entlastung. Die beispielhaft gezeigten Gitterzellen unterstreichen die Notwendigkeit, Maßnahmen gezielt an die jeweiligen räumlichen Bedingungen anzupassen. Deutlich wird dabei auch, dass möglichst lokale Kontexte zu beachten sind und nicht eine 100 m-Gitterzelle isoliert in Betracht gezogen werden sollte, um nachhaltige und wirkungsvolle Maßnahmen zu entwickeln. Die Beispiele zeigen auch auf, welche Potenziale die Analyse für eine gezielte planerische Steuerung besitzt und Klimaanpassungsmaßnahmen in den besonders betroffenen Bereichen zu implementieren und langfristig die Resilienz der Stadt gegenüber Hitzeextremen zu stärken.

Unter Betrachtung einzelner Maßnahmen, wie z. B. der Schaffung von höherem Grünvolumen, kann folgendes Fazit gezogen werden. Die Schaffung von Grünvolumen ist eine essenzielle Maßnahme zur Verbesserung des Mikroklimas in urbanen Gebieten, jedoch ist sie nicht in jeder Situation uneingeschränkt umsetzbar. „Grünvolumen ist nicht gleich

Grünvolumen“, entscheidend ist nicht nur die absolute Menge, sondern auch die räumliche Verteilung, die Artenzusammensetzung und die Vitalität der Vegetation. Die Anpassung von Maßnahmen an örtliche Gegebenheiten ist zentral für deren Erfolg. Die beispielhafte Analyse zeigt hier das Potenzial für eine wissensbasierte Entscheidungsfindung seitens vielfältiger Akteure in der Klimaanpassung. Deutlich wird auch, dass das Grünvolumen nicht isoliert betrachtet werden, sondern in ein ganzheitliches Konzept der Stadtplanung integriert werden muss, das Aspekte wie Luftzirkulation, Wassermanagement und Aufenthaltsqualität einbezieht.

Abschließend kann somit gesagt werden, dass die im Rahmen dieses Vorhabens generierten Geodaten und Parameter (auch oft als Themenkarten benannt) eine fundierte und objektive Analyse der klimatischen und strukturellen Gegebenheiten ermöglichen, wodurch gezielte Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können. Wichtig ist hierbei die Kombination der datenbasierten Erkenntnisse mit lokalem Wissen und gesamt- und fachplanerischer Expertise. Eine rein numerische Argumentation kann die vielschichtigen, oft kontextabhängigen und sich rasch ändernden Herausforderungen der Stadtplanung nicht vollständig erfassen. Insbesondere die Umsetzbarkeit von Maßnahmen und die langfristige Vitalität des Grüns erfordern eine enge Abstimmung mit den örtlichen Gegebenheiten und eine interdisziplinäre Planungsperspektive.

Tabelle 18.1.: Indikatoren und Parameter für die sechs ausgewählten 100 m-Gitterzellen.

Folgende Abkürzungen werden genutzt: Räumliche Handlungsschwerpunkte (RHS) mit „1 – Sehr hoher Handlungsbedarf“ und „2 – Hoher Handlungsbedarf“, PET, LST Tag / Nacht und Anzahl (#) der Tropennächte klassifiziert mit „4 – Priorität 1: Sehr erwärmt (> 90 %)“, „3 – Priorität 2: Erwärmmt (> 70 und ≤ 90 %)“ und „2 – Priorität 3: Geringere Extreme (> 30 und ≤ 70 %)“, Universelle Hot- & Coldspots mit „5 – Universeller Hotspot Tag und Nacht**“, wobei * = „Maßstabsbedingt keine Bewertung der örtlichen Kaltluftentstehung möglich“ bedeutet, und „3 – Keine Tagesextreme mit geringer nächtlicher Abkühlung“, vLCZ mit „6 – Kompakte, mittelhohe bis hohe Bebauung“, „5 – Lockere, mittelhohe bis hohe Bebauung“ und „1 – Geringe Oberflächenrauigkeit (besiedelter / unbesiedelter Bereich)“.

Gittername bzw. Parameter	A	B	C	D	E	F
Priorisierte RHS Hotspot	1	1	1	1	1	2
Universelle Hot- & Coldspots	5	5	5	5	3	3
PET klassifiziert	4	4	4	4	2	2
LST Nacht klassifiziert	4	4	4	4	4	4
LST Tag klassifiziert	4	4	4	4	3	2
# Tropennächte klassifiziert	4	4	4	4	4	4
vLCZ	6	5	6	5	1	1
Bebauung hoher Dichte in %	40,84	24,98	37,61	35,45	4,57	–
Zeilenbebauung in %	0	0	0	0	1,76	–
Blockrandbebauung in %	2,12	4,68	0	0,49	1,56	–
Großflächige, niedrige Bebauung in %	0	3,04	19,04	0	0,17	–
Vollversiegelt in %	42,19	55,23	37,75	38,93	57,23	14,00
Niedrigwüchsige in %	2,97	2,89	1,99	5,88	15,61	29,21
Mittelwüchsige in %	0,84	2,51	1,23	1,74	2,37	1,88
Hochwüchsige in %	6,49	7,79	4,63	21,88	16,79	26,40
Begrüntes Dach in %	4,61	0,07	4,84	5,3	0,98	0
Dach in %	42,63	31,51	48,62	26,28	7,02	0
Dach mit PV %	0,28	0	0,83	0	0	0
Wasser in %	0	0	0,12	0	0	28,52
Grünausstattung in %	10	13	7	29	34	57
Niedrigwüchsige im 300 m-Radius in ha	2,03	1,99	2,08	2,54	2,41	0
Mittlerer NDVI	0,17	0,19	0,2	0,33	0,35	0,51
Grünvolumen in m ³ ha ⁻¹	5,10	7,23	3,87	26,29	24,67	25,62
Grünvolumendefizit in m ³ m ⁻²	0,29	0,22	0,27	0,27	0	0



Abbildung 18.2.: Geostatistische Analyse der sechs ausgewählten 100 m-Gitterzellen in Frankfurt am Main. Die prozentualen Landbedeckungsanteile der Tortendiagramme finden sich in Tabelle 18.1.

19. 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. Nachfolgend werden folgende Abkürzungen für Singular und Plural verwendet: übergeordnetes Umweltziel (üUZ) und verfeinertes Umweltziel (vUZ).

Die im Rahmen dieses Projekts definierten **üUZ** beziehen sich auf ganz Hessen. Die gutachterlich daraus abgeleiteten und **vUZ** adressieren die Ebene der Regionalplanung und die örtliche Ebene (Kommune, Schwerpunkt besiedelter Bereich im Stadtgebiet). Diese Umweltziele werden als **Handlungsstrategien** formuliert, welche die landesweiten üUZ verfeinern und von der Regionalplanung und örtlichen Ebene weiter konkretisiert werden können.

Das Projekt unterlegt die Umweltziele auf der örtlichen Ebene mit beispielhaften **Maßnahmentypen** (siehe Kapitel 20). Die Maßnahmentypen können, sobald sie umgesetzt sind, zur Zielerreichung beitragen.

19.1. Landesebene

Für die landesweite Ebene werden folgende üUZ 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 LWKA.**

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 üUZ 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.

19.2. Regionale Ebene

Für die regionale Planungsebene können die landesweiten üUZ zum Beispiel durch folgende Handlungsstrategien verfeinert werden:

(1) Handlungsstrategien zur Dämpfung der Temperaturmaxima in den universellen Hotspots:

- **1a:** Minderung der **urbanen** Hitzebelastung in den räumlichen Handlungsschwerpunkten mit sehr hohem bis hohem Handlungsbedarf durch Beiträge zur Steigerung der Beschattung und der Verdunstungskühlung.
Beispiel: Festlegung von textlichen Grundsätzen u. a. zur Erhöhung der großvolumigen Grünanstattung, wie Bäume, und zur Verringerung der Vollversiegelung.
- **1b:** Forcierung von Umsetzungsstrategien sowie Bereitstellung von Informationen in den großflächigen räumlichen Handlungsschwerpunkten des **Offenlandes** mit sehr hohem bis hohem Handlungsbedarf.
Beispiel: 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.
- **1c:** Erhalt der Tag-Nacht-Temperaturmuster in den **urbanen** räumlichen Handlungsschwerpunkten mit mittlerem Handlungsbedarf.
Beispiel: Festlegung von textlichen Grundsätzen zum Erhalt des Grünvolumens und zur Minimierung neuer abflussrelevanter Vollversiegelungen.

(2) Handlungsstrategien zur Schonung der Kühlfunktion in den universellen Coldspots:

- **2a:** Erhalt und Aufwertung der großflächigen kühlwirksamen Flächennutzungen in den räumlichen Handlungsschwerpunkten mit sehr hohem bis hohem Handlungsbedarf durch geeignete planerische Sicherung dieser Flächen.
Beispiel: Festlegung geeigneter Vorranggebiets-Kategorien in den Regionalplänen, etwa durch Vorranggebiete für die Forstwirtschaft, Vorranggebiete für die Landwirtschaft, jeweils mit textlicher Ergänzung ihrer Klimafunktionen und Ausschluss von mit dieser Funktion nicht vereinbaren Nutzungen.
- **2b:** Schonung der Kühlfunktion in großflächigen räumlichen Handlungsschwerpunkten mit mittlerem Handlungsbedarf.
Beispiel: Textliche Festlegungen/Hinweise in den Regionalplänen und ihre transparente Berücksichtigung bei Abwägungsentscheidungen.

(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):

- **4a: Offenland:** Erhalt von großflächigen Rückhalteflächen einschließlich natürlicher Wasser- und CO₂-Speicher durch geeignete planerische Sicherung dieser Flächen.
Beispiel: Textliche und zeichnerische Festlegungen zur Schonung geeigneter Räume, u. a. solchen mit hohem GPP.
- **4b: Urbaner Raum:** Erhalt und Entwicklung von Flächen zur Niederschlagspeicherung und geeignete planerische Sicherung dieser Flächen.
Beispiel: Textliche Beiträge der Raumordnung zur Verbesserung des Rückhaltepoteziels des Bodens und zur multifunktionalen Flächennutzung.

(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.

Beispiel: Aufnahme geeigneter textlicher Beiträge in die Begründung von Regionalplänen.

(6) Konkretisierung der dreifachen Innenentwicklung und der energieeffizienten Siedlungsentwicklung.

Beispiel: Erstellung von entsprechenden Planungskonzeptionen im Zuge der Regionalplanaufstellung und Berücksichtigung des Umweltziels in den Festlegungen zur regionalen Siedlungsstruktur.

Erläuterungen:

- **Zu 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 Grünanpassung in Form von Bäumen sowie der Minderung der Vollversiegelung) eine besondere Bedeutung zu.
- **Zu 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 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 Nr. 2a:** Die mittels FE 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 LWKA (näher unter Nr. 3).

Bei dem Schutz der regional bedeutsamen Kaltluftentstehungsgebiete und der zugehörigen Luftleitbahnen der LWKA 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 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) Grünanstattung dazu beitragen.
- **Zu Nr. 3:** Für die in der LWKA identifizierten regionalbedeutsamen Kaltluftentstehungsgebiete und die zugehörigen Luftleitbahnen trifft bereits die 3. Änderung des LEP Hessen 2000 unter 4.2.3 Regelungen zur Festlegung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten für besondere Klimafunktionen auf Ebene der Regionalplanung.
- **Zu Nr. 4a:** Zur Steigerung der Schwammwirkung im Offenland sind geeignete Rückhalteflächen zu identifizieren. Die in diesem Projekt ermittelten Flächen mit hohem GPP beschreiben Räume, die wertvolle Wasser- und CO₂-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 kommt.
- **Zu 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 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 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 Grünanstattung, 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.

19.3. 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 diesem Projekt – aufbauend auf SST – Räume mit **Indizfunktion** als Handlungsschwerpunkte für die Klimaanpassung benannt. Diese können durch eigene Erhebungen unter Einbeziehung weiterer Kriterien konkretisiert und, falls aufgrund der besonderen Verhältnisse erforderlich, auf örtlicher Ebene modifiziert werden. Für die Räume mit Indizfunktion als Handlungsschwerpunkte für die Klimaanpassung hat dieses Projekt Maßnahmentypen entwickelt.

Die vorausgegangenen Ausführungen 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 Raumordnungsgesetz (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). Im Freiraum sind Darstellungen zu Kaltluftleitbahnen, Kühlflächen, bioklimatischen Entlastungsbereichen oder Retentionsflächen möglich.

2. Konkretisierung der Umweltziele: Die in diesem Bericht 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), der Kühlung durch Verdunstung (z. B. durch Mehrung des Grünvolumens) und der vermehrten Beschattung dienen. Eine hervorgehobene Bedeutung besitzen diese Daten im Rahmen von ganzheitlichen Konzepten zur dreifachen Innenentwicklung.

20. Auswahl und Verortung von Maßnahmentypen

20.1. Einführung und Übersicht

Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben die Vorgehensweise und beispielhaft Ergebnisse zur Auswahl und Verortung von Maßnahmentypen, die von der Forschungsnehmerin zusammengestellt wurden. Die Kapitelinhalte wurden in Abstimmung mit dem Forschungsgeber in dieser gestrafften Form zusammengefasst, um die Lesbarkeit zu verbessern.

Zur Ermittlung von Maßnahmenoptionen zur Umsetzung der Umweltziele wurde in einem ersten Schritt über ein Review bestehender Handlungshilfen und Leitfäden zur kommunalen Klimaanpassung eine Übersicht potenzieller Maßnahmentypen erarbeitet, die mindestens einem, z. T. mehreren der sechs üUZ der Landesebene zugeordnet werden können. Es entstand eine umfangreiche Sammlung von insgesamt 97 Maßnahmentypen aus diversen Leitfäden zur kommunalen Klimaanpassung, die sehr umfassend ist, jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt [40, 7, 8, 2, 13, 24, 39, 40, 56, 68, 45].

Ausgangspunkt für die weitere Untergliederung und Gruppierung der Maßnahmentypen bildete das G22-Gutachten mit dem Titel „Versickerung, Retention und Verdunstung als Beitrag zur wassersensiblen Siedlungsentwicklung (Leitfaden“ [59]). Die Maßnahmentypen der wassersensiblen Siedlungsentwicklung sind im G22-Gutachten anhand verschiedener **Kategorien** unterteilt und gruppiert worden. Die erste Kategorie „M1 - Versickerung“ gruppiert beispielsweise fünf Maßnahmentypen, die der Versickerung dienen (von Flächenversickerung (M1-1) bis Mulden-Rigole (M1-5)). Mit Maßnahmen zur Hitzevorsorge wurde in diesem Projekt analog verfahren. Diese stammen großteils aus dem Rahmenplan Hitze der Stadt Karlsruhe [6]. Beide Quellen bieten einen Ansatz, die Maßnahmentypen verschiedenen SST zuzuordnen und sind damit dem besiedelten Raum zuzuordnen. Die entstandenen Maßnahmenkategorien sind M1 bis M12 in der Tabelle und umfassen eine Vielzahl an Maßnahmentypen. Diese große Gruppe an Maßnahmentypen ist weitgehend dadurch charakterisiert, dass sie den Siedlungsbereich bzw. die kommunale Planungsebene betreffen und mithilfe der Bauleitplanung festsetzbar sind. Weitere Maßnahmentypen sind gebäudespezifisch und der Objektplanung zuzuordnen oder betreffen den bauplanungsrechtlichen Außenbereich (Wälder, landwirtschaftliche Flächen, naturnahe Flächen) und sind daher der Landes- oder Regionalplanung zuzuordnen.

Neben Leitfaden und Bericht wurden in einer Tabelle für jeden Maßnahmentyp, soweit verfügbar, umfassende Informationen und weiterführende Erläuterungen systematisiert

und zusammengefasst [siehe hierzu 17]. Diese Daten bieten dem Planenden eine schnelle Übersicht und grobe Einschätzung der einzelnen Klimaanpassungsmaßnahmen.

Alle weiteren Maßnahmenkategorien (M13 bis M19) sowie die ihnen zugeordneten 40 Maßnahmentypen, die auch das Offenland und andere Anpassungsfelder betreffen, sind in den folgenden Abschnitten zu der Maßnahmentypenauswahl anhand von üUZ aufgeführt.

Die konkrete räumliche Verortung der Maßnahmentypen kann dabei anhand von drei verschiedenen Kriterien erfolgen. Diese werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt, es handelt sich dabei um:

- Maßnahmentypenauswahl anhand der Ziele für universelle Hot- und Coldspots
- Maßnahmentypenauswahl anhand von üUZ
- Maßnahmentypenauswahl anhand von Stadtstrukturtypen

20.2. Maßnahmentypenauswahl anhand der Ziele für universelle Hot- und Coldspots

Die in Kapitel 19 beschriebenen Umweltziele dienen der Klimaanpassung auf verschiedenen Planungsebenen und zielen u. a. je nach thermischer Situation auf die Dämpfung der Temperaturextreme oder den Erhalt der Kühlfunktion. Hier besteht also ein direkter Zusammenhang zwischen üUZ und den Themenkarten der universellen Hot- und Coldspots. Um Redundanzen zu vermeiden, wird aufgrund dieses engen Zusammenhangs darauf verzichtet, Maßnahmenzuordnungen zu den universellen Hot- und Coldspots in einem separaten Kapitel vorzunehmen.

Stattdessen werden im Folgenden zunächst die Zusammenhänge zwischen den universellen Hot- und Coldspots und den üUZ aufgezeigt. Die in den darauf folgenden Abschnitten beschriebenen Anpassungsziele sowie Maßnahmentypen der einzelnen üUZ gelten entsprechend der ihnen zugeordneten Schwerpunkte zu den universellen Hot- und Coldspots (siehe Tabelle 20.1).

Ein relevantes Kriterium für eine zielgerichtete Auswahl von Maßnahmentypen für die einzelnen üUZ ist die Frage danach, ob und, wenn ja, auf welche Art der Landbedeckung diese sich maßgeblich beziehen. Es macht einen großen Unterschied in Bezug auf die verwendbaren Maßnahmentypen, ob sich das üUZ vorwiegend auf den Siedlungsbereich und die damit verbundene Ebene der Kommunalplanung bezieht oder auf das Umland. Die Beantwortung dieser Frage kann indirekt über die Verteilung der universellen Hot- und Coldspots in den verschiedenen Klassen der vLCZ erfolgen, wie in Abbildung 20.1 dargestellt.

Universelle Coldspots der Priorität 1 und 2 finden sich überwiegend in der vLCZ-Klasse „Wald und Gehölze“, während die Prioritätsstufe 3 ebenso ausgeprägt in Bereichen mit „geringer Oberflächenrauigkeit“ (niedrige Vegetation und offener Boden) zu finden ist. Die universellen Coldspots umfassen daher insbesondere Flächennutzungen, wie Wälder

Tabelle 20.1.: Zuordnung der üUZ zu den universellen Hot- und Coldspots

Nr.	üUZ	Zuordnung universelle Hot- bzw. 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	Regionalplanerisch bedeutsame Kaltluftbahnen und zugehörige Kaltluftentstehungsgebiete gemäß der Landesweiten Klimaanalyse Hessen
4	Steigerung der Niederschlagsretention (Schwammwirkung)	Universelle Hot- und Coldspots
5	Schonung der Ressource Wasser	Schwerpunkt besiedelter Raum, Univ. Hotspots
6	Forcierung von Synergien der Klimaanpassung	Schwerpunkt besiedelter Raum, Univ. Hotspots

bzw. Forste und Gehölze, je nach Bewirtschaftung aber auch Flächen der Landwirtschaft sowie andere vegetationsbestandene Flächen, wie z. B. Moore und Landschafts- und Naturschutzgebiete.

Ackerflächen und innerorts versiegelte Flächen ohne Gebäude (z. B. Parkplätze oder Stadtplätze ohne oder mit wenig Begrünung) sind ein Sonderfall, da sie insbesondere nach der Ernte hohe Tagestemperaturen aufweisen und daher in die Klasse der Hotspots Tag zählen, jedoch nachts eine starke nächtliche Abkühlung aufweisen und dadurch vergleichsweise wertvoll für die nächtliche Abkühlung sind. Der hohe Anteil an universellen Hotspots der Priorität 2 bei vLCZ „geringe Oberflächenrauigkeit“ erklärt sich durch dieses Phänomen.

Universelle Hotspots der Priorität 1 und 2 sind wie zu erwarten deutlich überwiegend den vLCZ-Klassen der Bebauung (die oberen fünf Balken in Abbildung 20.1) zugeordnet.

Das üUZ „Dämpfung der Temperaturmaxima in den universellen Hotspots“ bezieht sich auf universelle Hotspots, sodass die Maßnahmentypen zur Zielerreichung vor allem die vLCZ-Klassen des besiedelten Bereichs betreffen. Entsprechend liegt der Schwerpunkt der Maßnahmenauswahl zur Dämpfung der Temperaturmaxima auf Maßnahmentypen, die im Siedlungsbereich umgesetzt werden können (siehe Abschnitt 20.3.1).

Das üUZ „Schonung der Kühlfunktion in den Universellen Coldspots“ bezieht sich im Gegensatz dazu auf universelle Coldspots und damit vor allem auf die vLCZ-Klassen „Wälder und Gehölze“ und „geringe Oberflächenrauigkeit“. Maßnahmentypen, die diesem Ziel dienen, sind daher überwiegend dem Bereich der Wald- und Forstwirtschaft, des Naturschutzes und der Landwirtschaft zugeordnet (siehe Abschnitt 20.3.2).

Das üUZ „Steigerung der Schwammwirkung“ ist grundsätzlich für alle Bereiche relevant, insbesondere bezüglich der Starkregenvorsorge, da diese nicht von der thermalen Zuordnung der universellen Hot- und Coldspots abhängt (siehe Abschnitt 20.3.4). Im besiedelten Raum ist mit einer Steigerung der Schwammwirkung auch eine Zunahme der Verdun-

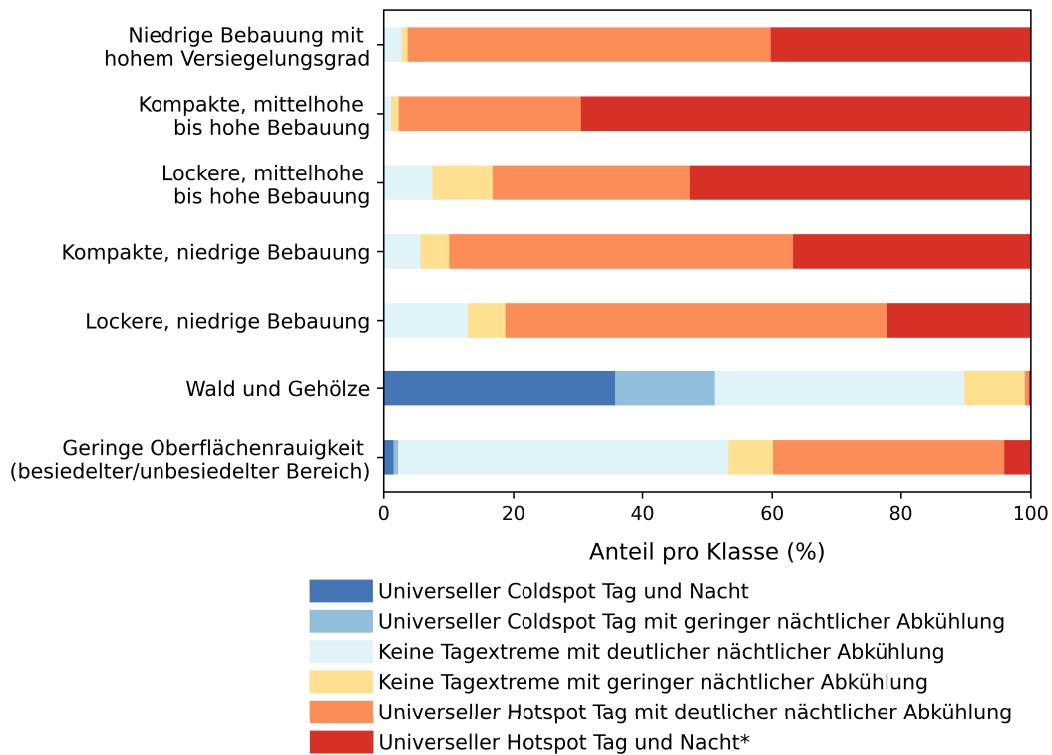


Abbildung 20.1.: Verteilung universeller Coldspots nach vLCZ.

tungsleistung und der damit verbundenen Kühlleistung zu erwarten, was insbesondere für Hotspotbereiche einen wünschenswerten Zusatzeffekt darstellt. Da sich die Klimaanpassungsmaßnahmen für den besiedelten und unbesiedelten Raum (Wälder, naturnahe und Landwirtschaftsflächen) grundsätzlich unterscheiden, werden sie differenziert dargestellt.

Die verbliebenen üUZ „Erhalt der Kühlfunktion von identifizierten Kaltluftentstehungsgebieten und Kaltluftbahnen“ (siehe Abschnitt 20.3.3), „Schonung der Ressource Wasser“ (siehe Abschnitt 20.3.5) und „Forcierung von Synergien der Klimaanpassung mit der dreifachen Innenentwicklung und der energieeffizienten Siedlungsentwicklung“ (siehe Abschnitt 20.3.6) erfordern jeweils durch ihre spezifische Ausrichtung weitgehend individuelle Maßnahmentypen. Eine Ableitung der Maßnahmentypen auf Basis der universellen Hot- und Coldspots wie bei den vorangegangenen Umweltzielen ist daher hier nicht zielführend.

20.3. Maßnahmentypenauswahl anhand von übergeordneten Umweltzielen

Basierend auf den üUZ zur Dämpfung sommerlicher Hitzeextreme und zur Steigerung der Niederschlagsretention lassen sich verfeinerte Umweltziele bzw. Anpassungsziele formulieren, denen konkrete Maßnahmentypen anhand ihrer Wirkweise zugeordnet werden

können. Es sind daher automatisch nur Anpassungsziele entwickelt worden, denen – über ein Review von Leitfäden zur kommunalen Klimaanpassung (Stand Oktober 2024) – auch konkrete Maßnahmentypen zugeordnet werden können. Die entsprechenden Anpassungsziele sowie die auf sie hinwirkenden Maßnahmentypen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Neben der Tabelle steht zu jedem Anpassungsziel eine kurze Erläuterung der Maßnahmenwirksamkeit, die bei Bedarf in den Erläuterungstext zum Festsetzungsteil des Bebauungsplanes übernommen werden und dadurch der Begründung dieser Maßnahmentypen anhand des Abwägungsbelanges der Klimaanpassung dienen können.

Einige Maßnahmentypen gehören zu mehreren Anpassungszielen und weisen damit Synergieeffekte auf. Eine intensive Dachbegrünung (M2-2) beispielsweise unterstützt die Anpassungsziele „Grünausstattung verbessern“, „Erhöhen der Transpiration“ und „Wasserrückhaltung des Normalniederschlags im Siedlungsgebiet“. Der Maßnahmentyp „Neuversiegelung minimieren“ (M6-4) dient den Anpassungszielen „Versiegelungsmanagement“, „Grünausstattung verbessern“, „Erhöhen der Transpiration“, „Versickerungsleistung des Bodens erhöhen“ und „Wasserrückhaltung des normalen Niederschlags im Siedlungsgebiet“.

20.3.1. Dämpfung der sommerlichen Temperaturmaxima in den universellen Hotspots

Die Handlungsstrategien dieses ersten und übergreifenden üUZ „Dämpfung der Temperaturmaxima“ zielen im urbanen Bereich auf die Minderung der urbanen Hitzebelastung durch Beiträge zur Steigerung der Beschattung und der Verdunstungskühlung sowie auf den Erhalt der Tag-Nacht-Temperaturmuster, unter anderem durch den Erhalt des Grünvolumens und durch die Minimierung neuer abflussrelevanter Vollversiegelungen.

Wie im Abschnitt 20.2 erläutert, bezieht sich das üUZ „Dämpfung der Temperaturmaxima in den universellen Hotspots“ direkt auf universelle Hotspots, sodass die Maßnahmentypen zur Zielerreichung vor allem die vLCZ-Klassen des besiedelten Bereichs betreffen. Diese sind nachfolgend in Tabelle 20.2 aufgelistet.

Tabelle 20.2.: Maßnahmentypenauswahl anhand des üUZ „Dämpfung der Temperaturmaxima“.

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

Kategorie	ID	Maßnahmentypen
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
Grünanstattung 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“
Erhöhen der Transpiration (Verbesserung der Grünanstattung 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

Kategorie	ID	Maßnahmentypen
	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.

In Tabelle 20.2 werden die aufgeführten Anpassungsziele und die jeweils damit verknüpften Maßnahmentypen anhand einer Kurzerläuterung thematisch-fachlich verknüpft. Diese Kurzerläuterung kann u. a. auch der Argumentation von Maßnahmenfestlegungen im B-Plan dienen.

Das üUZ „Dämpfung der Temperaturmaxima in den universellen Hotspots“ betrifft einerseits die Schonung und den Erhalt der Kühlfunktionen von universellen Coldspots (üUZ-2) oder von Kaltluftbereichen und Luftleitbahnen (üUZ-3). Zudem spielt die indirekte Kühlwirkung durch Wasserverdunstung eine Rolle, deren Anteil durch die Steigerung der Schwammwirkung (üUZ-4) und die verstärkte Speicherung und Nutzung von Niederschlagswasser (üUZ-5) zukünftig erhöht werden soll.

Daher tragen auch viele der dort genannten Maßnahmentypen in gewissem Umfang zur Zielerreichung des üUZ-1 „Dämpfung der Temperaturmaxima in den universellen Hotspots“ bei.

20.3.2. Schonung der Kühlfunktion in den universellen Coldspots

Dieses üUZ zielt auf den Erhalt und die Aufwertung der großflächigen, kühlwirksamen Flächen und ihrer Nutzungen in den räumlichen Handlungsschwerpunkten mit sehr hohem bis hohem Handlungsbedarf.

Wie in Abschnitt 17.2 nachgewiesen wurde, sind universelle Coldspots der Priorität 1 und 2 überwiegend der Klasse „Wald und Gehölze“ zugeordnet, während die Prioritätsstufe 3 in gleichem Maße, wie in Wäldern auch in Bereichen mit geringer Oberflächenrauigkeit (niedrige Vegetation und offener Boden) zu finden ist. Die universellen Coldspots umfassen daher insbesondere Flächennutzungen, wie Wälder bzw. Forste und Gehölze, je nach Bewirtschaftung, aber auch Flächen der Landwirtschaft sowie andere vegetationsbestandene Flächen, wie z. B. Moore sowie Landschafts- und Naturschutzgebiete.

Entsprechende Maßnahmenvorschläge sind in der folgenden Tabelle 20.3 ab M14 zu finden. Da universelle Coldspots der Priorität 3 auch im besiedelten Raum anzutreffen sind, wenn auch in deutlich geringerem Umfang, sind hierzu entsprechende Maßnahmentypenvorschläge in der Tabelle aufgeführt (M10 und M13).

Tabelle 20.3.: Maßnahmentypenauswahl anhand des üUZ-2 „Schonung der Kühlfunktion in den universellen Coldspots“, mit Schwerpunkt im unbesiedelten Raum.

Kategorie	ID	Maßnahmentypen
Überörtliche und Gesamtstädtische Maßnahmen, insbesondere zur Sicherstellung einer ausreichenden Siedlungsdurchlüftung	M10-1 M10-2 M10-3	Freihaltung von Frischluftschneisen Erhalt, Entwicklung und Schaffung von Kaltluftleitbahnen und Kaltluftentstehungsgebieten Erhalt, Entwicklung und Schaffung großräumiger Grün-, Wald- und Freiflächen
Schutz, Erhalt, Schonung und Entwicklung vorhandener Kühlstrukturen und von Flächen mit Kühlfunktion im besiedelten Raum	M13-1 M13-2 M13-3 M13-4 M13-5	Schutz und Erhalt großkroniger (Alt-)Bäume im urbanen Raum Schutz, Erhalt und Schonung unversiegelter Flächen im urbanen Raum Schutz, Erhalt und Entwicklung kleinräumiger Grün-, Wald- und Freiflächen Schutz, Erhalt und Entwicklung von urbanen Kleingärten, Pocket Parks, Innenhofbegrünungen u. ä. Schutz vor kühlwirksamen Flächen, Nutzungen und Funktionen
Klimaanpassung der Wälder im unbesiedelten Raum	M14-1 M14-2	Entwicklung standort- und klimawandelgerechter Mischwälder Klimaangepasstes Waldmanagement

Kategorie	ID	Maßnahmentypen
Regionale, überörtliche Maßnahmen zum Erhalt der Kühl- und Frischluftfunktion von Kaltluftgebieten und Frischluftleitbahnen	M15-1	Schutz, Erhalt und Entwicklung regionalbedeutsamer Luftleitbahnen sowie von Kaltluftentstehungsgebieten
	M15-2	Festlegen von „Vorranggebieten bzw. Vorbehaltungsgebieten für besondere Klimafunktionen“
	M15-3	Entwicklung und Einführung eines Klimaanpassungs-Monitorings für Raumordnungspläne
	M15-4	Schutz, Erhalt und Entwicklung von Gebieten mit hoher bis sehr hoher Bedeutung für die Durchlüftung eines Wirkraums

20.3.3. Erhalt der Külfunktion der regionalbedeutsamen Kaltluftentstehungsgebiete und der Funktion der zugehörigen Luftleitbahnen der landesweiten Klimaanalyse

Das dritte üUZ bezieht sich auf den Schutz und Erhalt der Külfunktion der dafür relevanten Gebiete und Strukturen sowohl im Siedlungsbereich als auch im Umland. Die nachfolgende Tabelle 20.4 bietet eine nicht abschließende Auswahl an Strukturen bzw. Gebieten, für die dieses Umweltziel Anwendung finden kann.

Die Maßnahmentypen wurden aus den bestehenden Maßnahmentypen des üUZ 1 „Dämpfung der Temperaturextreme“ entwickelt (gilt für M13, siehe Abschnitt 20.3.2), oder beziehen sich auf die regional bedeutsamen Kühlflächen aus der LWKA (gilt für M14, siehe Kapitel 15).

Tabelle 20.4.: Maßnahmentypenauswahl anhand des üUZ-3 „Erhalt der Kühlfunktion der regionalbedeutsamen Kaltluftentstehungsgebiete und der Funktion der zugehörigen Luftleitbahnen der LWKA“.

Kategorie	ID	Maßnahmentypen
Überörtliche und Gesamtstädtische Maßnahmen, insbesondere zur Sicherstellung einer ausreichenden Siedlungs durchlüftung	M10-1 M10-2 M10-3	Freihaltung von Frischluftschneisen Erhalt, Entwicklung und Schaffung von Kaltluftleitbahnen und Kaltluftentstehungsgebieten Erhalt, Entwicklung und Schaffung großräumiger Grün-, Wald- und Freiflächen
Regionale, überörtliche Maßnahmen zum Erhalt der Kühl- und Frischluftfunktion von Kaltluftgebieten und Frischluftleitbahnen	M15-1 M15-2 M15-3 M15-4	Schutz, Erhalt und Entwicklung regionalbedeutsamer Luftleitbahnen sowie von Kaltluftentstehungsgebieten Festlegen von „Vorranggebieten bzw. Vorbehaltsgebieten für besondere Klimafunktionen“ Entwicklung und Einführung eines Klimaanpassungs-Monitorings für Raumordnungspläne Schutz, Erhalt und Entwicklung von Gebieten mit hoher bis sehr hoher Bedeutung für die Durchlüftung eines Wirkraums

20.3.4. Steigerung der Niederschlagsretention (Schwammwirkung) im besiedelten und unbesiedelten Raum

Das vierte üUZ zielt auf die Minderung von Abflussextremen und die Steigerung des Rückhalts der wertvollen Ressource Wasser. Dies wird erforderlich, da in Folge des Klimawandels in Hessen sowohl zu viel rasch abfließendes Wasser in Form von Starkregenfällen, als auch zu wenig – insbesondere pflanzenverfügbares – Wasser im Sommer durch langanhaltende Dürren zu erwarten ist [14]. Im unbesiedelten Raum geht es gemäß der definierten Umweltziele unter anderem um den Erhalt von großflächigen Rückhalteflächen einschließlich natürlicher Wasser- und CO₂-Speicher, während im besiedelten Raum der Erhalt und die Entwicklung von Flächen zur Niederschlagsspeicherung sowie eine insgesamt wassersensible Stadtentwicklung im Fokus stehen.

Maßnahmentypen für den unbesiedelten Raum sind beispielhaft in Abschnitt 20.3.4 aufgelistet. Die Liste an Maßnahmentypen zum unbesiedelten Raum hat ihren Schwerpunkt auf Wäldern, Mooren und landwirtschaftlichen Flächen. Sie ist nicht abschließend, sondern als beispielhafte Sammlung zu verstehen. Für weitere Informationen sind weitere Leitfäden zur Klimaanpassung in Wald/Forstwirtschaft, Landwirtschaft und Naturschutz heranzuziehen.

Maßnahmentypen für den besiedelten Raum sind in Tabelle 20.5 zu finden. Ergänzend bietet Tabelle 20.6 eine Kurzerläuterung zu den in Tabelle 20.5 genannten Anpassungszielen. Diese Kurzerläuterung kann u. a. auch der Argumentation von Maßnahmen-Festlegungen im B-Plan dienen.

Tabelle 20.5.: Maßnahmentypenauswahl anhand des üUZ „Steigerung der Schwammwirkung“ im besiedelten Raum.

Kategorie	ID	Maßnahmentypen
Starkregenabflüsse zurückhalten und leiten	M2-4	Retentionssächer
	M9-1	Offene Ableitung von Regenwasser
	M9-2	Notentwässerung (Ableitung) über Straßen und Wege
	M9-3	Multifunktionsflächen
Versickerungsleistung des Bodens erhöhen	M1-1	Flächenversickerung
	M1-2	Muldenversickerung
	M1-3	Tiefbeete
	M1-4	Rigolen/-systeme
	M1-5	Mulden-Rigole
	M6-1	Voll-/Teilentsiegelung
	M6-2	Wasserdurchlässige Beläge
	M6-3	Rückbau (Entdichtung)
	M6-4	Neuversiegelung minimieren
	M9-3	Multifunktionsflächen

Kategorie	ID	Maßnahmentypen
Wasserrückhaltung des Normalniederschlags im Siedlungsgebiet	M11-4	Anlage von Grünflächen
	M2-1	Extensive Dachbegrünung
	M2-2	Intensive Dachbegrünung
	M2-3	Verdunstungsdach
	M2-4	Retentionssächer
	M3	Bepflanzte Regenwassersysteme (alle Typen)
	M4	Speicher zur Regenwassernutzung (alle Typen)
	M5	Fassadenbegrünung (alle Typen)
	M6	Entsiegelung / Reduktion der Bodenversiegelung (alle Typen)
Wasserversorgung und Verdunstungsleistung des Stadtgrüns und Bodens verbessern	M9-3	Multifunktionsflächen
	M9-4	Sicherung und Schaffung von Retentionsflächen
	M3-1	Optimierte Baumstandorte (Rigolen)
	M3-2	Verdunstungsbeete
	M3-3	Klimakomfortplatz
Brauchwassermanagement einführen/optimieren	M4-1	Oberirdische Regenwasserspeicher
	M4-2	Unterirdische Regenwasserspeicher
	M4-1	Oberirdische Regenwasserspeicher
	M4-2	Unterirdische Regenwasserspeicher
Wasserführende Flächen schaffen	M4-3	Regenwassernutzung als Betriebswasser
	M4-4	Regenwassernutzung zur Gebäudekühlung
	M7-1	Teiche
	M7-2	Urbane Feuchtgebiete
	M7-3	Stützung vorhandener Kleingewässer
	M7-4	Neueinrichtung von erlebbarem Wasser im öffentlichen Raum (z. B. Wasserspielplätze)
Schutz, Erhalt, Schonung und Entwicklung vorhandener Kühlstrukturen und von Flächen mit Kühlfunktion im besiedelten Raum	M9-3	Regenwasserplatz / temporäre Rückstauräume (Multifunktionsflächen)
	M9-4	Sicherung und Schaffung von Retentionsflächen
	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.

Tabelle 20.6.: Kurzbeschreibung der Anpassungsziele des üUZ-4 „Steigerung der Niederschlagsretention (Schwammwirkung)“

Anpassungsziel	Kurzbeschreibung
Starkregenabflüsse zurückhalten und leiten	Die Maßnahmen dienen der gezielten Ab- und Einleitung von Regenabflüssen in weniger gefährdete Bereiche.
Versickerungsleistung des Bodens erhöhen	Jede Fläche im Plangebiet, die zur Wasserversickerung oder Retention fähig ist, mindert die sich ggf. anstauenden Wassermengen und damit das Überflutungsrisiko. Gleichzeitig wird die urbane Schwammwirkung und damit verbunden die Verdunstungskühlung im Falle von Normalniederschlag gesteigert.
Wasserriickhaltung des Normalniederschlags im Siedlungsgebiet	Die Rückhaltung von Niederschlag im Siedlungsraum trägt zur Minderung von Trockenstress bei und verbessert das Mikroklima.
Wasserversorgung und Verdunstungsleistung des Stadtgrüns und Bodens verbessern	Die Maßnahmen dienen der ressourcenschonenden Bewässerung des Stadtgrüns und der Erhöhung der Verdunstungsleistung.
Brauchwassermanagement einführen/optimieren	Die Maßnahmen dienen dem ressourcenschonenden Ersatz von Trinkwasser.
Wasserführende Flächen schaffen	Die Maßnahmen tragen zu einer nachhaltigen Wassernutzung, Wasserrückhalt, Verdunstungskühlung und einer Verbesserung des Kleinklimas bei.
Schutz, Erhalt, Schonung und Entwicklung vorhandener Kühlstrukturen und von Flächen mit Kühlfunktion im besiedelten Raum	Der Schutz und Erhalt bestehender Kühlstrukturen, insbesondere unversiegelter und begrünter Bereiche, sichert deren Funktionen zur Niederschlagsversickerung, Wasserrückhaltung und Verdunstungskühlung.

20.3.5. Schonung der Ressource Wasser vorrangig im besiedelten Raum

Das Ziel des üUZ 5 ist die Schonung der Ressource Wasser zur Sicherung eines sparsamen Umgangs mit den insbesondere in sommerlichen Trockenzeiträumen zunehmend unter Nutzungsdruck stehenden Wasserreserven. Hierzu soll eine vermehrte Speicherung und Nutzung des Niederschlagswassers im urbanen Raum angestrebt werden, insbesondere durch die planerische Verknüpfung mit den Zielen zur Dämpfung der Temperaturmaxima in Räumen mit hohem und sehr hohem Handlungsbedarf. Bezüglich der Anpassungsziele und Maßnahmenoptionen zur Dämpfung der Temperaturmaxima wird inhaltlich auf Abschnitt 20.3.1 verwiesen, der sich ebenso wie dieses üUZ-5 vorrangig auf den besiedelten Raum bezieht.

Maßnahmentypen, die der direkten Zielerreichung des üUZ-5 dienen, sind diejenigen der Maßnahmenkategorie M4 zur „Speicherung und Nutzung von Niederschlagswasser“. In diesem Kontext sei darauf hingewiesen, dass aktuelle Forschungsprojekte und technische

Tabelle 20.7.: Maßnahmentypenauswahl anhand des üUZ „Steigerung der Schwammwirkung“ im unbesiedelten Raum.

Kategorie	ID	Maßnahmentypen
Humusaufbauende und Bodenerhaltende Bewirtschaftung	M16-1	Förderung humusmehrender Maßnahmen
	M16-2	Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber den Folgen des Klimawandels stärken
	M16-3	Förderung erosionsvermeidender Maßnahmen
	M16-4	Förderung einer standortgerechten Nutzung von Moorböden
	M16-5	Förderung einer standortangepassten, nassen Nutzung
	M16-6	Erhalt und Ausweitung von Dauergrünland, insbesondere Dauergrünland mit hohem Naturschutzwert, Förderung von Weidetierhaltung
	M16-7	Rückhaltsorientierte Acker- und Waldbewirtschaftung
Wasserrückhalt in Wäldern stärken	M17-1	Beitrag der Wälder zur Optimierung des Landschaftswasserhaushaltes
	M17-2	Verbesserung der Wasserretention
	M17-3	Künstliche Entwässerungsstrukturen im Wald zurückbauen
	M17-4	Auwälder als Retentionsflächen gestalten
Schonung der Ressource Grundwasser	M19-1	Grundwasserneubildung und Bodenversickerung fördern
	M19-2	Wasserentnahme reduzieren

Weiterentwicklungen im Bereich der Grauwassernutzung (z. B. Duschwasser-Recycling) vielversprechende Ansätze für eine ressourcenschonende Wassernutzung bieten.

Während andere Maßnahmenkategorien auf den ersten Blick nur bedingt zur Wasserschonung im urbanen Raum beitragen, wird bei genauerer Betrachtung deutlich, dass beispielsweise der hohe Bewässerungsbedarf junger Stadtbäume ein zentrales Thema darstellt. Gerade in den ersten Jahren benötigen diese eine intensive Bewässerung, bis sie ein stabiles Wurzelwerk zur Selbstversorgung ausgebildet haben. Maßnahmen zum Schutz und Erhalt bestehender Stadtbäume (siehe M13) tragen somit wesentlich zur Schonung der Ressource Wasser bei. Selbst wenn künftig vermehrt Niederschlags- oder Grauwasser für die Pflanzenbewässerung genutzt wird, bleibt ungewiss, inwieweit diese alternativen Wasserressourcen den steigenden Bewässerungsbedarf decken können.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass das Aufwachsen von Bäumen bis zu einer mikroklimatisch wirksamen Größe – also bis zur effektiven „Dämpfung von Temperaturmaxima“ für üUZ-1 – einen langen Zeitraum beansprucht. Während dieser Zeit fällt ein erheblicher Ressourceneinsatz an Wasser und personellem Aufwand an, der nicht außer Acht gelassen werden sollte.

Tabelle 20.8.: Maßnahmentypenauswahl anhand des üUZ „Schonung der Ressource Wasser“ für den besiedelten (M13 und M14) sowie unbesiedelten (M16 und M18) Raum.

Kategorie	ID	Maßnahmentypen
Speicher zur Regenwassernutzung	M4-1	Oberirdische Regenwasserspeicher
	M4-2	Unterirdische Regenwasserspeicher
	M4-3	Regenwassernutzung als Betriebswasser
	M4-4	Regenwassernutzung zur Gebäudekühlung
Schutz, Erhalt, Schonung und Entwicklung vorhandener Kühlstrukturen und von Flächen mit Kühlfunktion im besiedelten Raum	M13-1	Schutz und Erhalt großkroniger (Alt-)Bäume 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.
Humusaufbauende und bodenerhaltende Bewirtschaftung	M16-1	Förderung humusmehrender Maßnahmen
	M16-2	Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber den Folgen des Klimawandels stärken
	M16-3	Förderung erosionsvermindernder Maßnahmen
	M16-6	Erhalt und Ausweitung von Dauergrünland, insbesondere Dauergrünland mit hohem Naturschutzwert, Förderung von Weidetierhaltung
	M16-7	Rückhalterorientierte Acker- und Waldbewirtschaftung

Da zudem durch anhaltende Trockenphasen und steigende Temperaturen in den Sommermonaten der Bewässerungsbedarf weiter ansteigen wird – sowohl für die Stadtvegetation als auch in der Landwirtschaft – sind umfassendere Maßnahmen wie die Humusmehrung (M16) von Bedeutung. Humus im Boden ist ein exzenter Wasserspeicher und kann den Bewässerungsbedarf erheblich reduzieren. In diesem Zusammenhang sind auch Maßnahmen zur Information und Sensibilisierung (M18) von Relevanz. Die Berücksichtigung des Umlandes trägt dem übergeordneten Projektziel Rechnung, eine vernetzte Stadt-Umland-Betrachtung zu fördern und Synergien in diesem Kontext zu schaffen.

20.3.6. Synergien der Klimaanpassung mit der dreifachen Innen- und der energieeffizienten Siedlungsentwicklung

Das sechste üUZ strebt Synergien zwischen der Thematik der Klimaanpassung und den Zielen bzw. Konzepten der dreifachen Innenentwicklung (Flächen für Mobilität, Grün- und Freiflächen sowie Bauen) und der energieeffizienten Siedlungsentwicklung (Kompaktheit, Flächensparsamkeit, Erneuerbare Energien) an.

Betrachtet man die genannten Ziele der Konzepte im Vergleich mit den Inhalten der vorangegangenen Kapitel zu den einzelnen üUZ der Klimaanpassung, ist ein hohes Potenzial

an Synergien erkennbar. Im Folgenden werden Synergiepotenziale für die dreifache Innenentwicklung und für die energieeffiziente Siedlungsentwicklung getrennt voneinander aufgezeigt.

Das planerische Leitbild der dreifachen Innenentwicklung zielt darauf ab, den Bedarf insbesondere an Wohnraum und der damit verbundenen Nachverdichtung im Siedlungsbereich mit den Bedarfen einer klimaresilienten und lebenswerten Stadt in Einklang zu bringen. Hierfür ist „eine multifunktionale und flächeneffiziente Siedlungs-, Verkehrs-, Frei- und Grünraumplanung [...] ein zentraler Schlüssel für mehr Umwelt- und Lebensqualität in Städten“ (siehe <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/dreifache-innenentwicklung>, zugegriffen März 2025). Hohe Synergien mit der Klimaanpassung bestehen insbesondere in den gemeinsamen Zielen, mehr blaue und grüne Infrastrukturen bzw. mehr Vegetation in Städten zu integrieren, Flächen möglichst multifunktional zu nutzen und Gebäude klimaschonend zu integrieren. Viele der aufgeführten Maßnahmenkategorien bzw. Anpassungsziele dienen daher auch der dreifachen Innenentwicklung.

Die avisierte verstärkte Schaffung von Wohnraum ist teils mit einem hohen Flächenbedarf für neue Gebäude verbunden – umso wichtiger ist dadurch eine ausreichende Kenntnis sowie der Schutz und Erhalt von relevanten Kühlstrukturen und Flächen mit Kühlfunktion, insbesondere in den universellen Hotspots (M13), um eine nachhaltige Stadtentwicklung sicherzustellen. Dafür sind vor allem im privaten Bereich Kartierungen von Biotypen und Gehölzen vor Ort notwendig, da diese i.d.R. nicht Teil der öffentlichen, städtischen Baumkataster sind [16]. Jedoch gerade die privaten städtischen Flächen, sogar in stark bebauten Bereichen wie Blockrandbebauungen, können deutlich höhere Grünflächenanteile und Baumbestände aufweisen als die stark genutzten öffentlichen Bereiche [15].

Eine energieeffiziente Siedlungsentwicklung (Kompaktheit, Flächensparsamkeit, Erneuerbare Energien) dient insbesondere den Zielen des Klimaschutzes und trägt wesentlich zu einer klimaresilienten Stadtentwicklung bei. Insbesondere die gemeinsame Verwendung von Dachbegrünung und PV-Anlagen stellt einen hohen Mehrwert dar, da durch die beschattende Wirkung der PV-Anlagen die Verdunstung im darunterliegenden begrünten Bereich gemildert und damit die Vitalität und verbundene Kühlfunktion der Vegetation erhöht wird. Durch die erhöhte Kühlfunktion der Dachbegrünung wird der durch Hitze ausgelöste Leistungsabfall der PV-Anlage im Sommer wiederum abgemildert. Als entsprechende Maßnahmentypen sind hier zu nennen: M2-5 PV-Nutzung, M11-8 belüftungs- und beschattungsoptimierte Gebäudestruktur und Straßenführung, M12-1 Erhöhung der Oberflächen-Albedo (Reflektion)/Cool Roofs, M12-2 sommerlicher Wärmeschutz an Gebäuden und M12-3 energetische Gebäudesanierung. Weitere und darüber hinausgehende Hinweise bietet der Klimaplan Hessen [36].

Die im Teil III beschriebenen Möglichkeiten des Monitorings von bestehenden Photovoltaikanlagen sowie von Potenzialflächen zum weiteren Ausbau stellen ein wertvolles Maßnahmeninstrumentarium dieses Projekts dar. Hier sind darüber hinaus weiterführende Analysen und Bewertungsansätze zur energieeffizienten Stadtentwicklung beschrieben.

Die hier nicht näher beschriebenen Möglichkeiten zum flächensparsamen Bauen (z. B. Aufstockung) sind gleichzeitig wichtiger Bestandteil der energieeffizienten Siedlungs- als auch

der dreifachen Innenentwicklung, um eine weitere Synergie zu nennen. Tiefergehende Informationen rund um das Themenfeld Klimaschutz, energieeffiziente, flächensparende und kompakte Siedlungsentwicklung bieten diverse Informationswebseiten und Leitfäden verschiedenster Ministerien, Behörden und Verbände in Deutschland. Im Folgenden werden für die energieeffiziente Siedlungsentwicklung relevante Maßnahmentypen aus der Maßnahmentabelle dieses Projekts gelistet, die nur einen kleinen Ausschnitt der Möglichkeiten und thematischen Aspekte rund um dieses umfangreiche Thema darstellen.

20.4. Maßnahmentypenauswahl anhand von Stadtstrukturtypen

Die in dem Projekt entwickelten SST wurden auf Basis von Gebäudegeometrien und Flurstücksinformationen entwickelt. Sie sind hessenweit als Information pro 100 m-Gitterzelle verfügbar und auch direkt vergleichbar. Sie bieten sich daher ideal als ein Element der Zuordnung von Klimaanpassungsmaßnahmen und Maßnahmenpaketen anhand des dominanten SST an. Folgende Hinweise für die Planung sind zu geben:

- Eine 100 m-Gitterzelle gibt den SST des dominierenden Gebäudetyps wider. Da sich i. d. R. weitere, untergeordnete SST in der Gitterzelle befinden, dient im konkreten Planungsfall der tatsächlich (vor Ort) vorliegende SST als Planungsgrundlage, nicht der dominierende Typ der 100 m-Gitterzelle.
- Die tatsächliche Auswahl von Maßnahmentypen hängt sehr stark von den Bedingungen und der Flächenverfügbarkeit im tatsächlichen Planungs- bzw. Sanierungs-/Entwicklungsgebiet ab und muss im Einzelfall geprüft werden.
- Im Falle eines Neubaus, insbesondere bei der Entwicklung neuer Stadtquartiere, sollten alle Maßnahmentypen in Betracht gezogen und genügend Freiraum für Maßnahmen der Starkregenvorsorge sowie der Schaffung kleiner Klimawohlfühlorte eingeplant werden. In Bezug auf die technische Machbarkeit sind gebäudespezifische Maßnahmen, wie die Nutzung von Regenwasser zur Kühlung oder als Brauchwasser in Neubauten, deutlich einfacher umzusetzen als in Bestandsgebäuden. Sie sind jedoch nicht über das Instrument der Bauleitplanung festsetzbar, sondern der nachfolgenden Objektplanung zuzuordnen.
- Eine Priorisierung, welche Maßnahmen innerhalb eines Quartiers ggf. vorrangig umgesetzt werden sollten, war nicht Gegenstand und Ziel des Projekts. Der Maßnahmenkatalog kann hierzu durch die Darstellung der Wirksamkeit, ggf. einer Kostenabschätzung, des Flächenbedarfs usw. für die Planung Hinweise liefern. Letztlich obliegt es jedoch den Planenden, die für den konkreten Planungsfall idealen Maßnahmenpakete zusammen zu stellen.

Für die konkrete Zuordnung von Maßnahmentypen zu den einzelnen SST des Projekts wurde auf bestehende Fachliteratur zurückgegriffen. Zwei konkrete Planungsprojekte widmeten sich in der Vergangenheit der Frage, welche Klimaanpassungsmaßnahmen für be-

stimmte SST im Bestand besondere Relevanz besitzen bzw. besonders geeignet für die Umsetzung sein können. Bezüglich der Thematik Hitze bzw. Dämpfung der Temperatur-Maxima ist dies der „Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung für die Stadt Karlsruhe (Teil II)“ [6], bezüglich der Thematik Wasser bzw. Steigerung der Schwammwirkung ist dies der Leitfaden des HMLU zur „Versickerung, Retention und Verdunstung als Beitrag zur wassersensiblen Siedlungsentwicklung“ [59]. In diesem Kontext soll auf eine weitere Planungshilfe aufmerksam gemacht werden, die speziell für die zwischen den Gebäudekomplexen liegenden Straßenräume ein Konzept zur wassersensiblen und klimaangepass-ten Gestaltung erarbeitet hat - in Form eines Leitfadens [11] sowie einer Übersicht der Maßnahmen in Form von Steckbriefen [12].

Zunächst soll exemplarisch die Zuordnung der Projekt-SST zu den SST des Rahmenplans Hitze aufgezeigt werden, mit detaillierten Beschreibungen der SST, denen die Maßnahmentypen ursprünglich zugeordnet waren (siehe Tabelle 20.9). Dies erleichtert den Planenden eine bessere Zuordnung der Maßnahmentypen anhand der tatsächlich vorliegenden baulichen Struktur. SST bieten eine gute Vergleichbarkeit der baulichen Situation über kommunale und regionale Grenzen hinweg, jedoch sind für konkrete Planungen spezifischere Betrachtungen unabdingbar.

Tabelle 20.9.: Vergleich zwischen den SST aus dem Projekt und den SST nach HMLU (2022).

SST Projekt	ID	Beschreibung (Projekt)	SST nach HMLU	Beschreibung (HMLU)
1	OEG	Bebauung hoher Dichte	ST01	Altstadtkerne, Gründerzeitliche Bebauung
2	MFH	Mehrfamilienhäuser	ST04	Einzel-, Reihen- und Doppelhausbebauung
3	HH	Hochhäuser	–	Zuordnung ggf. zu MFH
4	MFH-Z	Zeilenbebauung	ST03	Zeilenbebauung
5	MFH-BR	Blockrandbebauung	ST02	Gründerzeitliche Bebauung
6	EFH	Einfamilienhäuser	ST04	Einzel-, Reihen- und Doppelhausbebauung
7	WGL	Großflächige, niedrige Bebauung	ST06	Gewerbegebiet
8	NG	Nebengebäude	–	Teil der Hauptgebäudetypen
–	–	Neubau - MFH	ST05	Neubebauung im Geschosswohnungsbau
–	–	Teil der Hauptgebäudetypen	ST07	Parks/Grünflächen
–	–	Teil der Hauptgebäudetypen	ST08	Straßen/Plätze

Die Zuordnung der projekteigenen SST zu den beiden Literaturquellen ist in Tabelle 20.10 verdeutlicht. Dabei wurden die Erläuterungen zu den jeweiligen SST in den beiden Leit-

fäden mit den Charakteristika der Projekt-SST abgeglichen und so ausgewählt, dass es eine möglichst hohe Überschneidung bezüglich des jeweiligen Gebäudetyps und der baulichen Dichte gibt. So war es letztlich möglich, den SST des Projekts den in den beiden Literaturquellen genannten Maßnahmentypen direkt zuzuordnen. Diese Zuordnung ist in Tabelle 20.11 sowie Tabelle 20.12 für die Thematik Hitze bzw. Dämpfung der Temperatur-Maxima zu finden, für die Thematik Wasser bzw. Steigerung der Schwammwirkung in Tabelle 20.13.

Tabelle 20.10.: SST Projekt Zuordnung je Gitterzelle und je Kachel bzw. Bestand.

SST Projekt (pro Gitterzelle bzw. Bestand)			SST nach [59]	
1 OEG	Bebauung hoher Dichte		ST01	Altstadtkerne, Gründerzeitliche Bebauung
2 MFH	Mehrfamilienhäuser		ST04	Einzel-, Reihen- und Doppelhausbebauung
3 HH	Hochhäuser			<i>Zuordnung ggf. zu MFH</i>
4 MFH-Z	Zeilenbebauung		ST03	Zeilenbebauung
5 MFH-BR	Blockrandbebauung		ST02	Gründerzeitliche Bebauung
6 EFH	Einfamilienhäuser		ST04	Einzel-, Reihen- und Doppelhausbebauung
7 WGL	großflächige, niedrige Bebauung		ST06	Gewerbegebiet
8 NG	Nebengebäude			<i>Teil der Hauptgebäudetypen</i>
	Neubau - MFH		ST05	Neubebauung im Geschosswohnungsbau
			ST07	Parks/Grünflächen
			ST08	Straßen/Plätze
<i>Teil der Hauptgebäudetypen</i>				
<i>Teil der Hauptgebäudetypen</i>				

SST Projekt (pro Kachel bzw. Bestand)			SST nach [6]	
1 OEG	Bebauung hoher Dichte		ST04 + 09	Ortskern, Großstrukturen (öffentliche Gebäude)
2 MFH	Mehrfamilienhäuser		ST05	Aufgelockerte Bebauung mittlerer Dichte
2 MFH	Mehrfamilienhäuser		ST02	Offene Blockrandbebauung
3 HH	Hochhäuser		ST08	Hochhausgebiete mit überwiegender Wohnnutzung
4 MFH-Z	Zeilenbebauung		ST03	Zeilenbebauung
5 MFH-BR	Blockrandbebauung		ST01	Geschlossene Blockrandbebauung
6 EFH	Einfamilienhäuser		ST05	Ortskern (offene Bauweise von Einfamilienhäusern)
7 WGL	großflächige, niedrige Bebauung		ST10 + 13	Gewerbe + Industrie
8 NG	Nebengebäude			<i>Teil der Hauptgebäudetypen</i>

Tabelle 20.11.: Von Stadtstrukturtypen zu Maßnahmen, Temperatur - Teil I
(nach [6], verändert).

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

Tabelle 20.12.: Von Stadtstrukturtypen zu Maßnahmen, Temperatur - Teil II
(nach [6], verändert).

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

Tabelle 20.13.: Von SST zu Maßnahmen, Schwammwirkung (nach [59], verändert). Hierbei bedeutet o *geringe Relevanz*, x *relevante Maßnahme* und xx *besonders relevant*.

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 Maßnahmennzuordnung kann anhand der Bebauungsdichte und vorhandenen Freiräume den eher locker bebauten MFH-Typen oder den eher dicht bebauten OEG bzw. MFH-BR zugeordnet werden.	

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

Im Folgenden sind Erläuterungen zu den einzelnen SST des G22-Gutachtens sowie des Rahmenplans Hitze extrahiert und in Kurzform dargestellt.

Erläuterungen zu einzelnen SST des G22-Gutachtens *Hinweis: Die Benennung und Abkürzungen der SST basiert hier auf dem Projekt-SST. Die Zuordnung zu den SST des G22-Gutachtens sind aus der vorangegangenen Tabelle zu entnehmen.*

Zu den Typen Einfamilienhaus (EFH) und Mehrfamilienhaus (MFH) zählen Baustrukturen in offener Bauweise mit ein- bis zweigeschossigen Einfamilien-, Reihen- und Doppelhäusern sowie auch Villen und Stadtvillen. In vielen Städten nimmt dieser Typ in den äußeren Stadtbereichen den größten Anteil der Fläche ein. Außerdem findet sich dieser Typ häufig in kleinstädtisch und dörflich geprägten Siedlungen. Der Versiegelungsgrad ist niedrig und der Anteil (meist privater) Grünflächen hoch. Bis 1945 wurden die Häuser entlang der Straße gebaut. So entstanden im Inneren eines Karées große zusammenhängende Grünflächen. Die einzelnen Parzellen sind dabei meist durch Hecken und Zäune voneinander abgegrenzt.

Häuser des Typs Blockrandbebauung (MFH-BR) bilden überwiegend eine geschlossene Reihe an den Straßen. Mit seinen meist 3 – 5 Geschossen hat dieser Siedlungstyp eine Traufhöhe zwischen 12 m und 20 m. Die Flächen sind in viele Parzellen geteilt, dicht bebaut und zu einem Großteil versiegelt. Teilweise wurden Blockinnenbereiche im Zuge städtebaulicher Sanierungen entkernt, zu Grünflächen oder PKW-Stellplätzen umgestaltet und mit Tiefgaragen unterbaut. Zum Teil wurden Baulücken bebaut, Blöcke weiter verdichtet. Vereinzelt wurden und werden niedrige Gebäude durch höhere ersetzt, Dachgeschosse ausgebaut oder Bauten aufgestockt.

Bei der Zeilenbebauung (MFH-Z) lassen sich zwei Baustile unterscheiden: Bauten der 1920er- und 1930er-Jahre sind senkrecht zur Straße und streng linear ausgerichtet. Anlagen der Nachkriegszeit haben diese Strenge durchbrochen. Bauten aus den Jahren 1950 bis 1970 sind oft auch modular oder in der Kette angeordnet. Zudem stehen die Zeilen nicht mehr zwingend im rechten Winkel zur Straße, sondern folgen lediglich einer Ost-West-Ausrichtung. Typisch für die Zeilenbebauung sind eine reine Wohnnutzung, langgestreckte, meist drei- bis viergeschossige Gebäude und weite Freiräume zwischen den Bauten.

Der Typ Bebauung hoher Dichte (OEG) bildet den Kern von Städten, in dem die Bebauungsstruktur siedlungsgeschichtlich größtenteils auf dem historischen Stadtgrundriss beruht. Charakteristisch ist die meist sehr dichte Bebauung in den Altstadtzentren und es sind in der Regel nur wenige öffentliche und private Grün- und Freiflächen vorhanden.

Hochhäuser (HH) sind in der Quelle nicht gesondert aufgeführt. Die Maßnahmenzuordnung kann anhand der Bebauungsdichte und vorhandener Freiräume den eher locker bebauten MFH-Typen oder den eher dicht bebauten OEG bzw. MFH-BR zugeordnet werden.

Parks und Grünflächen bilden das Grundgerüst des öffentlichen Stadt- und Siedlungsgrüns. Es sind für Spiel, Bewegung und Aufenthalt angelegte Grün- und Naturräume,

die i. d. R. allgemein zugänglich und dadurch für das Stadtbild und die Erholung von besonderer Bedeutung sind. Gestaltung und Aussehen können erheblich variieren – in Repräsentativität, Natürlichkeit und Intensität der Nutzung der Parks und Grünanlagen. Einige Anlagen sind kulturell bedeutsam und stehen unter Denkmalschutz.

Mit den Typen „Straßen“ bzw. „Plätzen“ sind alle öffentlichen Straßen, Wege und Plätze gemeint, die dem öffentlichen Verkehr gewidmet sind. Sie verbinden Stadtteile sowie Siedlungsflächen und dienen der Fortbewegung. Als öffentliche Räume sind sie Identifikationsorte und Treffpunkte der Quartiere. Trends wie (temporäre) Spielstraßen, das Urban Gardening und Sportarten wie Parkour sind ein Ausdruck dafür, dass sie immer mehr als Gemeinschaftsorte in Anspruch genommen werden. Viele Straßen sind mit Straßenbäumen und anderen Bepflanzungen ausgestattet und sind somit Teil des Ortsbildes und der Durchgrünung der Städte.

Erläuterungen zu einzelnen SST des Rahmenplans Hitze Die Empfehlungen für den **SST1 (OEG): Bebauung hoher Dichte** sind eine Kombination der beiden SST 04 „Ortskern“ (dichte, offene Bauweise) und 09 „Bereiche mit Großstrukturen“ der Quell-Literatur [6, S. 134ff, S. 168ff]. Unter dem SST „Ortskern“ subsumieren sich alle Dorf- oder Stadtkerne. Je nach Entstehungszeit sind die Ortskerne durch überlieferte, oft dichte Gebäudestellung mit meist kleineren, 2- bis 3-geschossigen Gebäuden charakterisiert. An zentralen Positionen befinden sich häufig Sonderbauten wie Kirchen. Die z. T. Jahrhunderte alten Stadtkerne weisen vielschichtige Transformationen aus allen Zeiten auf, sodass historische Altbauten im Mosaik mit Neu- und Anbauten das Bild der Quartiere prägen können. Die Nutzung ist vorwiegend gemischt (Handel, Büros, Dienstleistungen, Handwerk, Gewerbe, Gastronomie,...), weist dabei aber einen erheblichen Wohnanteil auf. Bei dem SST „Bereiche mit Grossstrukturen“ handelt es sich um je nach Nutzung sehr differenzierte und spezialisierte Gebäudekomplexe größerer Kubatur, wie Krankenhäuser, Forschungseinrichtungen, Hochschulcampus, Schulen, Großverwaltungen. Eine weitergehende interne Typisierung des Strukturtyps ist aufgrund der Individualität der einzelnen Strukturen nicht sinnvoll möglich. Sie weisen verschiedene Gebäudehöhen und -tiefen, haben unterschiedliche Geschossigkeiten und die Gebäudeanordnung entspricht den funktionalen Anforderungen der Bauten. Im Maßnahmenpaket ist in erster Linie ein eventueller Rückbau der stark nachverdichteten Innen- und Hinterhöfe zu überprüfen, da sich in dieser Instanz des SST „Ortskern“ relativ wenig Raum für bioklimatisch relevante Eingriffe anbietet. Innen- und Hinterhofbegrünungen sowie Pocket-Parks bilden zentrale, im Fußwegenetz liegende Treffpunkte. Entsiegelung und grüne Parkierung minimieren die Oberflächentemperatur. Das gebäudespezifische Maßnahmenpaket, bestehend aus der energetischen Sanierung, der Dach- und Fassadenbegrünung sowie einer Erhöhung der Oberflächen-Albedo auf Dächern und Fassaden, ist mit dem Denkmalschutz abzustimmen [6, S. 13]. Als zusätzliche Maßnahme zum quartierspezifischen Maßnahmenpaket kann in einigen stark nachverdichteten Bereichen nach Abstimmung mit dem Denkmalschutz M 06 „Rückbau“ erwogen werden [6, S. 142]. Das quartierspezifische Maßnahmenpaket des Strukturtyps „Bereiche mit Großstrukturen“ setzt sich gebäudebezogen aus sommerlichem Wärmeschutz und der Dachbegrünung zusammen. Der größte Eingriff wäre die Entsiegelung und grüne Parkierung sowie die Verschattung stark versiegelter und sonnenexponierter Flächen. Innerhalb der Großstrukturen können sich hohe Anteile an versiegelten Flächen befinden, die z. B. einer umfassenden Verschattung und Entsiegelung,

um die Oberflächentemperatur zu reduzieren, dienen. Besonders intensive Dachbegrünungen sind auf ihre Machbarkeit zu überprüfen. Das Anbringen von Fassadenbegrünung in Form von Modulen könnte neben dem bioklimatischen Profit ebenso ein interessantes Gesamtbild der unterschiedlich genutzten Großstrukturcluster ergeben [6, S. 172]. Da es sich bei diesem SST um einen nutzungsbezogen sehr individuellen Typ handelt, können zusätzliche Maßnahmen wie „die Neueinrichtung von Pocket-Parks“, „energetische Gebäudesanierung“ und „erlebbares Wasser im öffentlichen Raum“ erwogen werden [6, S. 178].

Die Empfehlungen für den **SST2 (MFH): Mehrfamilienhäuser** sind dem SST 02 „Offene Blockrandbebauung“ [6, S. 114ff] und 05 „aufgelockerte Bebauung mittlerer Dichte“ der Quell-Literatur entnommen [6, S. 148]. Die offene Blockrandbebauung ist eine Bebauungsform, bei der die Hauptgebäude an den Blockrändern positioniert sind, im Gegensatz zum geschlossenen Blockrand stehen die zumeist 3- bis 4-geschossigen Gebäude jedoch einzeln oder in kleineren Gruppen und bieten daher mehr Durchlässigkeit. Die Blockinnenhöfe sind zudem eher selten durch größere Baukörper ergänzt worden. Bei Mehrfamilienhäusern in aufgelockerter Bauweise handelt es sich vorwiegend um kleinräumige Ergänzungsquartiere zu anderen SST, die im Rahmen von Nachverdichtungsmaßnahmen entstanden sind. Als bevorzugter Nachverdichtungstyp werden Mehrfamilienhäuser in aufgelockerter Bauweise aber im Rahmen der zukünftigen Stadtentwicklung vermutlich an Bedeutung gewinnen. Die 3- bis 5-geschossigen Gebäude sind meist als Reihung mehrerer Einheiten ausgeführt und weisen in der Regel unterschiedliche Gebäudestellungen auf, was sie beispielsweise von der Zeilenbauweise unterscheidet. Der angrenzende Freiraum ist häufig direkt als öffentlicher Straßenraum ausgeprägt, private Grünflächen finden sich in Form von meist gemeinschaftlich genutzten Haus- oder Mietergärten [6, S. 144]. Grundsätzlich ist eine energetische Optimierung der Gebäude und, soweit möglich, Dach- bzw. Fassadenbegrünung zu empfehlen. Des Weiteren ist zu überprüfen, inwieweit der offene Blockrand von kleinteiliger Bebauung in den rückwärtigen Bereichen befreit und damit entdichtet werden kann. Bei dieser Instanz des SST befinden sich außerdem große z. T. stark versiegelte Parkierungsflächen, die durch Entsiegelung und vor allem durch Verschattung klimatisch zu optimieren sind. Pocket-Parks innerhalb des offenen Blockrands bilden zudem Aufenthaltsräume für die umliegenden Nutzer und Bewohner. Sie können mit Elementen des erlebbaren Wassers im öffentlichen Raum optimiert werden [6, S. 117]. Bedingt übertragbar sind die Maßnahmen „Dachbegrünung“, „Rückbau“, „Pocket-Parks“ und „Verschattung“, da der Bedarf und die Möglichkeit der Umsetzung in den Quartieren teils voneinander abweichen [6, S. 121]. Das Maßnahmenpaket für den universellen Hotspot des SST „aufgelockerte Bebauung mittlerer Dichte“ konzentriert sich auf die energetische Gebäudesanierung, Dach- und Fassadenbegrünung sowie eine Erhöhung der Oberflächen-Albedo an allen Gebäuden. Bei vollversiegelten Flächen ist zu überprüfen, inwieweit eine Entsiegelung wegen darunterliegender Tiefgaragen möglich ist. Abstandsflächen an den Gebäuden können mit Pocket-Parks ausgestattet werden [6, S. 148]. Im Prinzip können alle in diesem Paket enthaltenen Maßnahmen gut auf die anderen betroffenen Quartiere desselben SST übertragen werden. Bedingt übertragbar sind die Maßnahmen „Entsiegelung“, „Erhöhung der Oberflächen-Albedo“ und „Neueinrichtung von Pocket-Parks“, da die Möglichkeiten zur Umsetzung in den Quartieren teils voneinander abweichen [6, S. 154].

Die Empfehlungen für den **SST2 (HH)**: **Hochhäuser** sind dem SST 08 „Hochhausgebiete mit überwiegender Wohnnutzung“ der Quell-Literatur entnommen [6, S. 15]. Bei Hochhausgebieten sind für die sonnenexponierten Gebäude Dach- und Fassadenbegrünungen, eine Erhöhung der Oberflächen-Albedo, sommerlicher Wärmeschutz sowie die energetische Gebäudesanierung zu empfehlen. Dem hohen Versiegelungsgrad ist durch Entsiegelung und grüne Parkierung entgegenzuwirken. Verschattung durch Bäume ermöglicht zudem eine Reduktion von Sonneneinstrahlung und der damit verbundenen Oberflächentemperatur. Auch die Einrichtung von Pocket-Parks kann Entlastung bringen. Bedingt übertragbar ist die Maßnahme „Entsiegelung“ und „Verschattung von Straßen, Plätzen und Gebäuden“, da die Bedarfe in einigen Quartieren teils voneinander abweichen [6, S. 160, S. 166].

Die Empfehlungen für den **SST5 (MFH-Z)**: **Zeilenbebauung** sind dem SST 03 „Zeilenbebauung“ der Quell-Literatur entnommen [6, S. 124ff]. Die Zeilenbebauung ist in vielen deutschen Großstädten die typische Bauform der Nachkriegsjahrzehnte 1950 – 1970. Bei der Bebauung handelt es sich um zeilenförmige Gebäudetypen, bei denen meist mehrere Einzelgebäude in Geschosswohnungsbauweise verkettet sind. Die zwischen 5- und 6-geschossigen Zeilen wurden in der Regel als größere Einheiten geplant und realisiert. In den Quartieren herrscht die Wohnnutzung vor, meist finden sich ergänzende Sozial- und Bildungseinrichtungen sowie Versorgungseinheiten. Die Quartiere sind regelmäßig durch private Grünflächen zwischen den Gebäuden sowie z. T. auch durch Garagenhöfe charakterisiert. Zusätzlich wurden häufig begleitende Grünzüge eingerichtet und/oder öffentliche Grünflächen als Spielplätze in die Siedlungen integriert [6, S. 124]. Zeilenbebauung birgt in sich das große Potenzial der Abstandsgrünflächen, die durch das Anbringen von PocketParks und Wasser im öffentlichen Raum aktiviert werden können und insbesondere den hochbetagten Bewohnerinnen und Bewohnern zugutekommen. Des Weiteren bedarf es einer energetischen Anpassung der Gebäude durch energetische Gebäudesanierung, des Anbringens von sommerlichem Wärmeschutz sowie der Dach- und Fassadenbegrünung. Vollversiegelte Flächen sind ebenso zu entsiegeln. Vollversiegelte Garagenhöfe sollten durch eine klimatisch optimierte Lösung ersetzt werden, z. B. durch eine Entsiegelung der Fläche und die Umgestaltung in eine Tiefgarage, falls der Erhalt der Parkplätze unabdingbar ist [6, S. 127, S. 132].

Die Empfehlungen für den **SST5 (MFH-BR)** **Blockrandbebauung** sind dem SST 01 „Geschlossene Blockrandbebauung“ der Quell-Literatur entnommen [6, S. 102ff]. Die geschlossene Blockrandbebauung ist eine typische innerstädtische, ältere Bauform, alle Seiten eines Blocks sind typischerweise durch Gebäude geschlossen, wodurch sich in ihrer Mitte ein Innenhof bildet. Die Innenhöfe der Baublöcke sind zum Teil bebaut (Wohnhäuser, Garagen, Kleingewerbe, ...), Restflächen zum Teil begrünt. Die Anpassungsmaßnahmen in diesem Quartier konzentrieren sich zum einen auf Eingriffe an den Gebäuden selbst, hier ist jedoch häufig zu prüfen, inwieweit der Denkmalschutz berücksichtigt werden muss. Zum anderen spielen vor allem die Innenhöfe der Blockrandbebauungen eine wichtige Rolle: Durch Entsiegelung, Verschattung und die Einrichtung von Pocket-Parks und erlebbarem Wasser im öffentlichen Raum entstehen kleinere, insbesondere fußläufig sehr gut eingebundene Entlastungsflächen, die den Bewohnern:innen neben den bioklimatischen Vorteilen auch Räume mit hoher Aufenthaltsqualität zur Verfügung stellen. Die Pocket-Parks als Treffpunkte erzeugen außerdem potenzielle Möglichkeiten zu sozialer Interaktion und damit verbunden auch die Kopplung ergänzender gesellschaftlicher

Maßnahmen. In vielen Innenhöfen schlummert noch Potenzial zur Entsiegelung und klimaoptimierten Gestaltung durch Begrünung. Hier liegt die Herausforderung in der Aktivierung der Eigentümer:innen [6, S. 106]. Als zusätzliche Maßnahme zum quartierspezifischen Maßnahmenpaket kann in einigen stark nachverdichteten Blockinnenbereichen M 06 „Rückbau“ erwogen werden [6, S. 112].

Die Empfehlungen für den **SST1 (EFH) Einfamilienhäuser** sind dem SST 04 „Ortskern“ mittlerer Dichte der Quell-Literatur entnommen [6, S. 148]. Unter dem SST „Ortskern“ subsumieren sich alle Dorf- oder Stadtkerne. Die mögliche Spannweite der Diversität innerhalb des SST 04 „Ortskern“ umfasst sowohl die offene Bauweise von Einfamilienhäusern mit großzügigeren privaten Gärten und Freiflächen bis zu dichter, offener Bauweise entlang von Hauptverkehrsstraßen und breiten Straßenquerschnitten [6, S. 143]. Da sich das Maßnahmenpaket des Rahmenplans auf die eher hochverdichteten Bauweisen mit hohem Anteil denkmalgeschützter Gebäude des „Ortskerns“ konzentriert, weniger auf die locker bebaute Einfamilienhaussituation, sind die Maßnahmentypen entsprechend ausgerichtet. Aufgrund geringeren Abstimmungsbedarfs im Vergleich zu Mehrfamilienhaus-Typen mit unterschiedlichen Eigentümern:innen sind gebäude- und grundstücksspezifische Maßnahmen bei EFH leichter umsetzbar und über Förderprogramme steuerbar. Des Weiteren sind kleinteilige Maßnahmen, wie das Verbot von Schottergärten, die Installation von PV, Regenwassernutzung zur Gartenbewässerung, der Einbau von energiesparenden Geräten und Smart-Home-Technologien usw., je nach privater Finanzlage einfach ein- und umsetzbar.

Die Empfehlungen für den **SST7 (WGL): Großflächige, niedrige Bebauung** (Gebäude für Wirtschaft und Gewerbe) sind eine Kombination der beiden SST 10 „Gewerbe“ und 11 „Industrie“ der Quell-Literatur [6, S. 180ff, S. 193ff]. Der Strukturtyp „Gewerbe“ besteht vorwiegend aus Gewerbebauten verschiedener Arten, Größen und Formen. So finden sich vor allem Hallen, Fabrikationsgebäude, Lager und Verkaufsräume für Produktion, Handel, Logistik und Handwerk. Vereinzelt sind aber auch Wohn- oder Verwaltungsgebäude, bisweilen auch ganz andere Typologien (Kirchen, Kioske, Gastronomie) eingestreut. Neben Straßenräumen mit Stellplätzen für PKW/LKW sind öffentliche Räume nur in sehr geringem Umfang vorhanden, Plätze und Grünflächen fehlen fast völlig. Private Flächen sind meist funktional ausgestaltet und bestehen somit zu einem erheblichen Anteil aus ausgedehnten Verkehrs-, Stellplatz- oder Lagerflächen. Private Grünflächen sind sehr selten und treten nur in Zusammenhang mit Wohnnutzung auf [6, S. 180] Industriegebiete zeichnen sich durch vorwiegend großkubaturige Gebäude und Gebäudekomplexe mit interner Eigenlogik je nach Branche und Produktionsabläufen aus. Die Gebiete bestehen aus großen Hallen und Fabrikanlagen sowie einigen Verwaltungsgebäuden. Die industrielle Nutzung wird nur sehr selten und in geringem räumlichen Umfang durch andere Nutzungen ergänzt (z. B. Eigentümerwohnen) [6, S. 190]. Versiegelte Flächen und Parkierungen, die erheblichen Raum einnehmen, sind zu entsiegeln und ebenso zu verschatten, um eine Reduktion der Oberflächentemperatur zu ermöglichen. Pocket-Parks, die an die umliegenden Entlastungsflächen anbinden, bilden Entlastungsräume für die arbeitenden Menschen [6, S. 183]. Versiegelte Flächen machen bei diesem SST einen erheblichen Anteil aus. Da viele dieser Flächen Lasten tragen müssen (Außenhallen, Rangierhöfe etc.), stellen sich grüne und baumbestandene Parkierungen als umso wichtiger dar. Dach- und Fassadenbegrünung: Großvolumige Gebäude bieten für diese gebäudespezifischen Maßnahmen viel Fläche. Bei der Dachbegrünung ist die Machbarkeit einer intensiven Begrünungsart zu

überprüfen. Für Fassadenbegrünung können Begrünungsmodule in Betracht gezogen werden. Erhöhung der Oberflächen-Albedo: Ein effektiver und zügig umsetzbarer Eingriff. Auch als Alternative, falls eine Fassadenbegrünung nicht umsetzbar ist. Bei Gewerbegebieten bestehen oft bestimmte Funktionsräume, die sich nicht ohne weiteres in großem Umfang klimagerecht optimieren lassen. Ein großes Potenzial stellen jedoch die Straßenräume, Abstandsflächen und Brachen dar, die durch Verschattung, klimaoptimierte Gestaltung oder den Umbau zu Pocket-Parks klimarelevante Aufgaben übernehmen können. Große, teilweise stark versiegelte Flächen bedürfen einer umfassenden Entsiegelung und Verschattung, um die Oberflächentemperatur senken zu können.

Teil III.

Darstellung der Ergebnisse im Kontext des Klimaschutzes

21. Überblick zum Themenschwerpunkt des Klimaschutzes

Im Rahmen des Projekts werden Potenziale und Bestände der Photovoltaik (PV)-Nutzung systematisch analysiert. Dabei stehen sowohl Freiflächen- als auch Dachflächen im Fokus, unterstützt durch Fernerkundungsverfahren und KI-basierte Methoden.

Im Detail wird das Thema PV wie folgt behandelt:

1. **Analyse der Flächenpotenziale für die PV-Nutzung:**
 - a) Im unbesiedelten Bereich werden in mehreren Arbeitsschritten (besonders konfliktarme) Flächen für die FF-PV-Nutzung identifiziert (siehe Abschnitt 22.1).
 - b) Im besiedelten Bereich wird das Potenzial an Parkplatzfläche mit über 50 Stellplätzen identifiziert, das für den PV-Einsatz in Frage kommt (siehe Abschnitt 22.2).
2. **Ermittlung des Bestandes an FF-PV-Anlagen:** Ziel ist die zuverlässige Detektion bestehender Anlagen anhand einer automatisierten datenbasierten Vorgehensweise. Hierzu wurde ein Trainingsdatensatz bestehend aus multispektralen Bilddaten (sichtbarer und infraroter Spektralbereich) und bekannten FF-PV-Standorten zusammengestellt (siehe Kapitel 23), um mittels eines Künstlichen Intelligenz (KI)-Ansatzes bereits installierte PV-Anlagen zu erkennen.
3. **Ermittlung des Bestandes an Dach-PV-Anlagen.** Zur Bestimmung von Dach-PV-Anlagen wird ein zweistufiges Verfahren eingesetzt. In der ersten Stufe werden im Rahmen einer umfangreichen, KI-basierten Klassifikation unterschiedliche Landbedeckungsklassen - darunter auch Hausdächer - identifiziert. In einer nachgeschalteten Analyse werden anschließend die Dächer auf die Existenz von PV-Anlagen untersucht.

Auf dem Gebiet des Klimaschutzes wurde im vorliegenden Projekt außerdem auf die **energieeffiziente Siedlungsentwicklung** eingegangen. Dabei steht u. a. die Kompaktheit der Gebäude und Flächensparsamkeit der Siedlungsentwicklung im Fokus. Hierzu wurden Konzepte entwickelt und Untersuchungen durchgeführt, die den Mehrwert der Hinzunahme von FE-Daten für eine energieeffiziente Siedlungsentwicklung abschätzen sol-

len. Kapitel 24 greift hierzu auf verschiedene Arbeitsergebnisse dieses Forschungsprojekts zurück, z. B. auf mittels FE identifizierte SST (siehe Kapitel 10).

22. Themenschwerpunkt: FF-PV-Potenziale

Das Hessische Energiegesetz enthält die Nutzung von PV-Anlagen in einer Größenordnung von einem Prozent der Fläche des Landes als Zielvorgabe. Nach einer vorliegenden Potentialstudie [57] muss zur Erfüllung dieser Zielvorgabe etwa die Hälfte als FF-PV 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.

22.1. Ermittlung der FF-PV-Potenziale für Hessen

Die Potenzialanalyse geeigneter und zusätzlich auch konfliktarmer Flächen im unbesiedelten Bereich erfolgt in einer detaillierten Untersuchung in mehreren „Schritten“. Basierend auf einem im Vorhaben erarbeiteten sequenziellen Algorithmus werden **alle Flächen ≥ 1 ha** identifiziert, die **für FF-PV geeignet** sind (FF-PV-Potenzialflächen).

22.1.1. Methodisches Vorgehen der schrittweisen FF-PV-Potenzialanalyse

Das Verfahren zur Identifikation von konfliktarmen FF-PV-Potenzialflächen ist sequentiell konzeptioniert und wird in Abbildung 22.1 schematisch visualisiert. Die Ausgangsfläche Hessens wird schrittweise durch Ausschluss bestimmter Gebiete (Schritte 1 bis 3) reduziert. Am Ende von Schritt 4 verbleiben die konfliktarmen FF-PV-Potenzialflächen.

Veranschaulicht ist dieser Prozess in Form eines Zwiebelschichtmodells (siehe Abbildung 22.1), bei dem jede Schicht einen weiteren Bearbeitungsschritt darstellt. Mit jedem Schritt wird die Fläche weiter reduziert, bis schließlich die potenziellen Freiflächen für PV-Anlagen identifiziert sind.

So werden in einem **ersten Schritt** (siehe Abbildung 22.1, links oben) alle Flächen ausgeschlossen, die hinsichtlich der Flächennutzung und Topografie ungeeignet für FF-PV sind. Hierzu zählen Nordhänge mit einer Neigung von $> 5^\circ$, Steillagen mit über $> 30^\circ$

Neigung sowie Verkehrs- und Siedlungsflächen. Auch Fließgewässer inklusive eines 10 m-Gewässerrandstreifens werden von der Gesamtfläche abgezogen. Wälder werden ebenfalls ausgeschlossen, wobei zusätzlich ein Verschattungspuffer von 30 m berücksichtigt wird. Flächenhafte Gehölze werden mit einem zusätzlichen 20 m-Verschattungspuffer entfernt, während bereits bestehende FF-PV-Anlagen ebenfalls nicht in die weiteren Betrachtungen einfließen.

Im **zweiten Schritt** werden Schutzgebiete und ökologisch relevante Flächen eliminiert, in denen das Naturschutz- oder das Wasserrecht keine FF-PV-Nutzung ermöglicht.

Dazu gehören Nationalparks, Naturschutzgebiete und Biosphärenreservate in den Zonen I und II. Ebenso werden Überschwemmungsgebiete, Wasserschutzgebiete (Zone I und II) sowie nationale Naturmonumente in den Zonen I und II aus der potenziellen Fläche entfernt. Weiterhin werden prioritäre Gewässerentwicklungskorridore und avifaunistische Schwerpunktträume windenergiesensibler Arten ausgeschlossen. Die avifaunistischen Schwerpunktträume beruhen auf der Flächenkulisse des landesweiten Fachgutachtens von Schnell et al. (2021) [75].

Der **dritte Schritt** konzentriert sich auf den Ausschluss von landwirtschaftlich wertvollen Böden. Hierbei wird sich auf die derzeit gültigen regionalplanerischen Vorranggebiete Landwirtschaft (VRG LW, siehe Abbildung 22.1, rechts oben) fokussiert.

Von den Ausschlussflächen zu differenzieren sind die Restriktionsflächen, die einer Einzelfallprüfung bedürfen. Hierzu zählen unter anderem Natura 2000-Gebiete sowie Landschaftsschutzgebiete, gesetzlich geschützte Biotope und bestimmte FFH-Lebensraumtypen außerhalb von Natura 2000-Gebieten. Weitere Beispiele für Restriktionsgebiete sind der landesweite Biotopverbund für Waldlebensräume, Ausgleichs- und Kompensationsflächen sowie Gewässerentwicklungskorridore entlang der nach der Europäische Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) relevanten Gewässer. Diese Flächen werden nicht grundsätzlich ausgeschlossen, sondern für eine detaillierte Einzelfallprüfung markiert.

Die FF-PV-Potenzialflächenanalyse wird zusätzlich auch für den nach dem BauGB baurechtlich privilegierten 200 m-Korridor sowie für den nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) förderfähigen 500 m-Korridor durchgeführt.

Im Ergebnis handelt es sich um eine GIS-basierte FF-PV-Flächenpotenzialanalyse, die auf derzeit geltenden naturräumlichen, rechtlichen und raumordnerischen Rahmenbedingungen aufbaut und für die Entwicklung konfliktarmer Planungskonzepte verwendet werden kann. Eine auf diesen Informationen aufbauende planerische Steuerung der FF-PV-Nutzung wird im Rahmen dieses Projekts nicht vorgenommen; dies bleibt den dafür zuständigen Planungsbehörden vorbehalten. Im Zuge der konkreten Flächenplanung bzw. FF-PV-Anlagenplanung sind über die hier gegebenen Informationen hinaus weitergehende lokale Aspekte (z. B. Bodendenkmäler) für die konfliktarme Standortsuche von Relevanz, die aufgrund des landesweiten Prüfmaßstabes nicht mit betrachtet werden konnten.

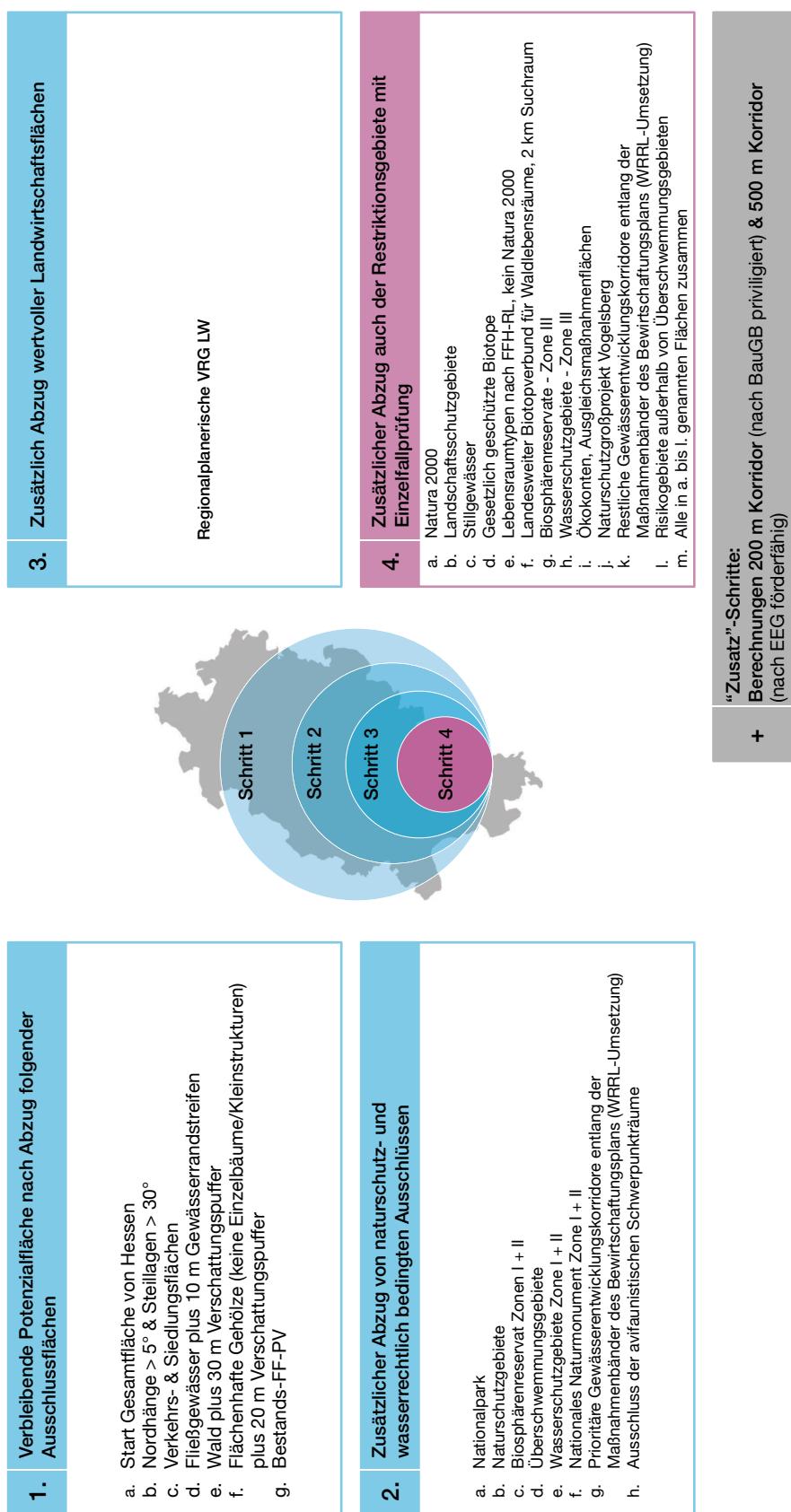


Abbildung 22.1.: Schematische Visualisierung der Analyse zu den Flächenpotenzialen für die FF-PV-Nutzung im unbesiedelten Bereich („Zwiebelschalen-Prinzip“).

22.1.2. Visualisierung der Potenzialanalyse-Ergebnisse

Abbildung 22.2 zeigt die Ergebnisse der schrittweisen Analyse der Suchraumkulissen mit FF-PV-Potenzialflächen (magenta) in Hessen. Auf ihrer linken Seite sind die Potentialflächen nach Abzug der Ausschlussflächen der ersten beiden Schritte zu sehen, mittig nach Abzug der in Schritt 3 ausgeschlossenen Flächen zum Schutz wertvoller Landwirtschaftsböden und rechts nach Abzug auch der Restriktionsgebiete mit erforderlicher Einzelfallprüfung. Die nach Schritt 4 verbleibende Potentialfläche stellt die konfliktarme Potentialfläche für die FF-PV-Nutzung dar.

Das Balkendiagramm in Abbildung 22.3 stellt beispielhaft die entsprechende hessenweite Statistik zu Abbildung 22.2 dar. Gezeigt sind für die Schritte 1 bis 4 die verbleibenden Flächen (magenta) und die im entsprechenden Schritt ausgeschlossenen Flächen (blau). Entsprechend zu Abbildung 22.2, links, ist die Abzugsfläche in Schritt 2 zur Unterscheidung dunkler gefärbt.

Analog zur landesweiten Darstellung von Abbildung 22.2 visualisiert Abbildung 22.4 das Ergebnis der FF-PV-Potenzialanalyse für eine Beispielgemeinde; hier wurde Dietzenbach gewählt.

Bezogen auf die landwirtschaftlichen Ausschlussflächen in Schritt 3 wurden ergänzend verschiedene Szenarien betrachtet. Darunter befinden sich z. B. der Ausschluss aller landwirtschaftlichen Flächen außerhalb landwirtschaftlich benachteiligter Gebiete, Gebiete der Agrarplanung (Stufe 1 und Stufe 1 und 2) sowie Flächen mit verschiedenen Bodenzahlen, die teilweise Gegenstand von Grundsatzregelungen der 3. Änderung des LEP Hessen 2000 sind. Die Ergebnisse zum jeweils verbleibenden Flächenpotenzial sind im Kapitel 26 dargestellt.

22.1.3. Hardware-Spezifikationen und Ergebnisdokumentation der Potenzialberechnung

Die FF-PV-Potenzialanalyse ist in Form von python-Skripten umgesetzt worden, welche auf die bereits in Abschnitt 2.2 beschriebene Datenbank zugreifen und die nötigen Rechenoperationen auf der lokalen Hardware umsetzen (Intel® Core™ i7-12700K Prozessor). Für die vollständige Berechnung aller Arbeitsschritte inklusive entsprechender Qualitätssicherung mittels Skripten und stichprobenartigen Untersuchungen der Ergebnis-Shapefiles kann mit der vorliegenden Hardware für eine Gesamtanalyse ein Zeitraum von etwa fünf Tagen angenommen werden, wobei diese Einschätzung lediglich für den aktuellen Stand der Potenzialanalyse gilt. Eine generalisierte Abschätzung der Berechnungszeit kann nicht pauschal veranschlagt werden, da sich u. a. die Eingangsdaten ändern können.

Tabelle 22.1 fasst die Art der Ergebnisse zusammen. Zu jedem vorgenommenen Schritt werden sowohl die verbleibende Potenzialfläche als auch die invertierte Potenzialfläche, bezogen auf die Grundfläche, zur Verfügung gestellt. Zudem wird der Abzug im Vergleich zum vorherigen Schritt und der Abzug im Vergleich zur Gesamtfläche berechnet und ausgegeben.

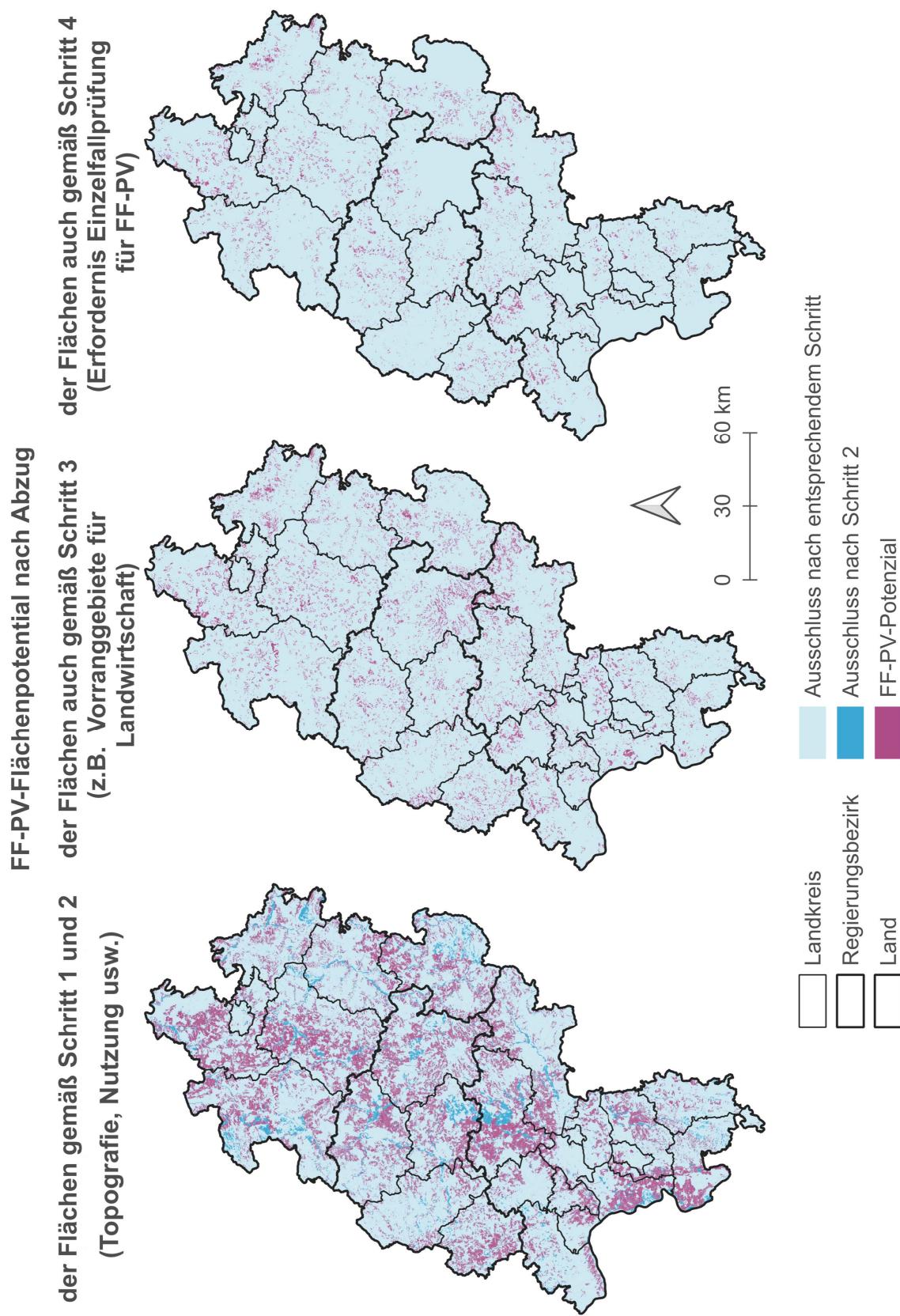


Abbildung 22.2.: Ergebnisvisualisierung der Analyse zu den Flächenpotenzialen für die FF-PV-Nutzung im unbesiedelten Bereich für die Schritte 1 bis 4 (siehe Abbildung 22.1). Schritt 3 bezieht sich hierbei auf die regionalplanerischen VRG LW.

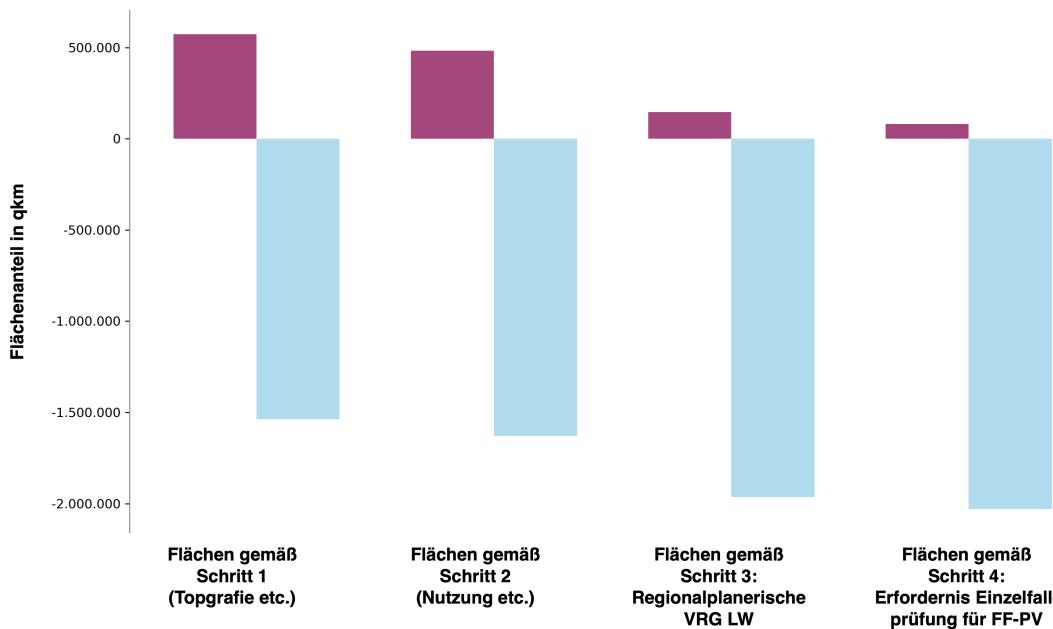


Abbildung 22.3.: Visualisierung der Analyse zu den Flächenpotenzialen für die FF-PV-Nutzung im unbesiedelten Bereich für die Schritte 1 bis 4 für Hessen. Flächenabzüge sind in Blautönen und die verbleibende FF-PV-Flächen für die Schritte in magenta dargestellt. Entsprechend zur Abbildung 22.2, links, ist die Abzugsfläche in Schritt 2 zur Unterscheidung dunkler gefärbt. Schritt 3 bezieht sich hierbei auf die regionalplanerischen VRG LW.

Die Eingangsdaten sind größtenteils frei verfügbar. Durch die Datenbeschaffung sind keine zusätzlichen Kosten angefallen. Lediglich die Vorverarbeitung ist in manchen Fällen zeitintensiv, erfordert entsprechende Expertise im Umgang mit Geodaten und ist nicht in den oben genannten Skripten integriert, da die Daten vor ihrer Einspeisung in der Datenbank entsprechend manuell vorverarbeitet vorliegen müssen.

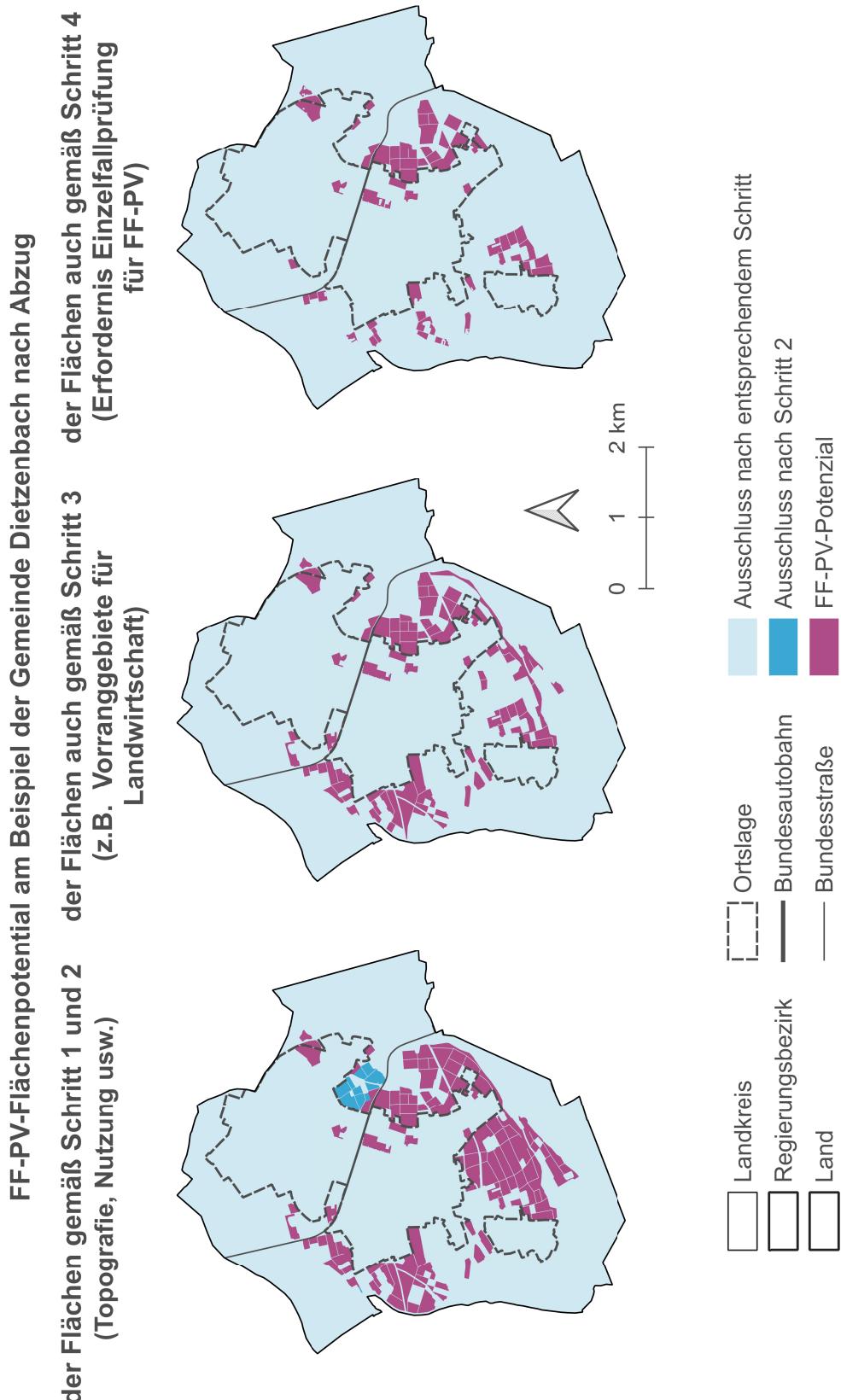


Abbildung 22.4.: Ergebnisvisualisierung der Analyse zu den Flächenpotenzialen für die FF-PV-Nutzung im unbesiedelten Bereich für die Schritte 1 bis 4 (siehe Abbildung 22.1) am Beispiel der Gemeinde Dietzenbach. Schritt 3 bezieht sich hierbei auf die regionalplanerischen VRG LW.

Tabelle 22.1.: Übersicht über die Ergebnisse der FF-PV-Analyse, die dem AG zur Verfügung stehen. Weitere Details finden sich in Kapitel 26.

Datentyp	Art
Excel-Tabelle	Ergebnisflächen in Hektar und Prozent auf Gemeinde-, Kreis-, Regierungsbezirks- und Landesebene
Excel-Tabelle	Ergebnisflächen in dem nach BauGB privilegierten 200 m-Bereich in Hektar und Prozent auf Gemeinde-, Kreis-, Regierungsbezirks- und Landesebene
Excel-Tabelle	Ergebnisflächen in dem nach EEG 2023 festgelegten 500 m-Förderbereich in Hektar und Prozent auf Gemeinde-, Kreis-, Regierungsbezirks- und Landesebene
Shapefile	Ergebnisflächen der FF-PV-Potenzialanalyse auf Gemeindeebene
Shapefile	Ergebnisflächen der FF-PV-Potenzialanalyse in dem nach BauGB privilegierten 200 m-Bereich auf Gemeindeebene
Shapefile	Ergebnisflächen der FF-PV-Potenzialanalyse in dem nach EEG 2023 festgelegten 500 m-Förderbereich auf Gemeindeebene
PDF-Datei	Metadaten-Dokument zu den Schritten und ihrer Benennung
Dokumentation	Beschreibung der Vorverarbeitung, Skripte und der einzelnen Schritte

22.2. PV-Potenziale auf Parkplätzen

Die Identifikation von PV-Potenzialen auf Parkplätzen erfolgt rein datengetrieben für ganz Hessen. Zielsetzung ist, die in Hessen vorhandenen Parkplatzflächen ab einer Größe von ≥ 50 Stellplätzen in **geeignet** und **ungeeignet** automatisiert zu bestimmen und die Potenziale zu quantifizieren. Diese Zielsetzung kann als Klassifikationsaufgabe interpretiert und mithilfe eines KI-Einsatzes gelöst werden. Abbildung 22.5 visualisiert schematisch die methodische Vorgehensweise, die in den nachfolgenden Abschnitten erläutert wird.

22.2.1. Referenzdaten und Klassendefinitionen

In einem ersten Vorverarbeitungsschritt werden Parkplätze aus den Datenquellen OSM und ATKIS für Hessen extrahiert und aufbereitet. Aus OSM werden Parkplatzflächen basierend auf bestimmten „tags“, wie `parking`, `capacity` und `access`, sowie nach Flächentypen wie `surface` und `rooftop` extrahiert. Anschließend wird die Fläche der Parkplätze berechnet, wobei nur solche mit einer Mindestgröße von 900 m^2 ausgewählt werden, was in etwa einer Fläche mit mehr als 50 Parkplätzen entspricht. Parallel dazu werden relevante Parkplätze mit derselben Mindestfläche aus den ATKIS-Verkehrsflächen-Daten gewonnen.

Parkplätze, die in beiden Datenquellen enthalten sind, werden im Zuge einer Datenfusion abgeglichen sowie Redundanzen und Bereiche außerhalb der Landesgrenzen gelöscht. Dieser Prozess stellt eine strukturierte Auswahl und Aufbereitung der Parkplatzflächen sicher, sodass nur gut definierte und relevante Flächen für zukünftige Analysen bereitstehen.

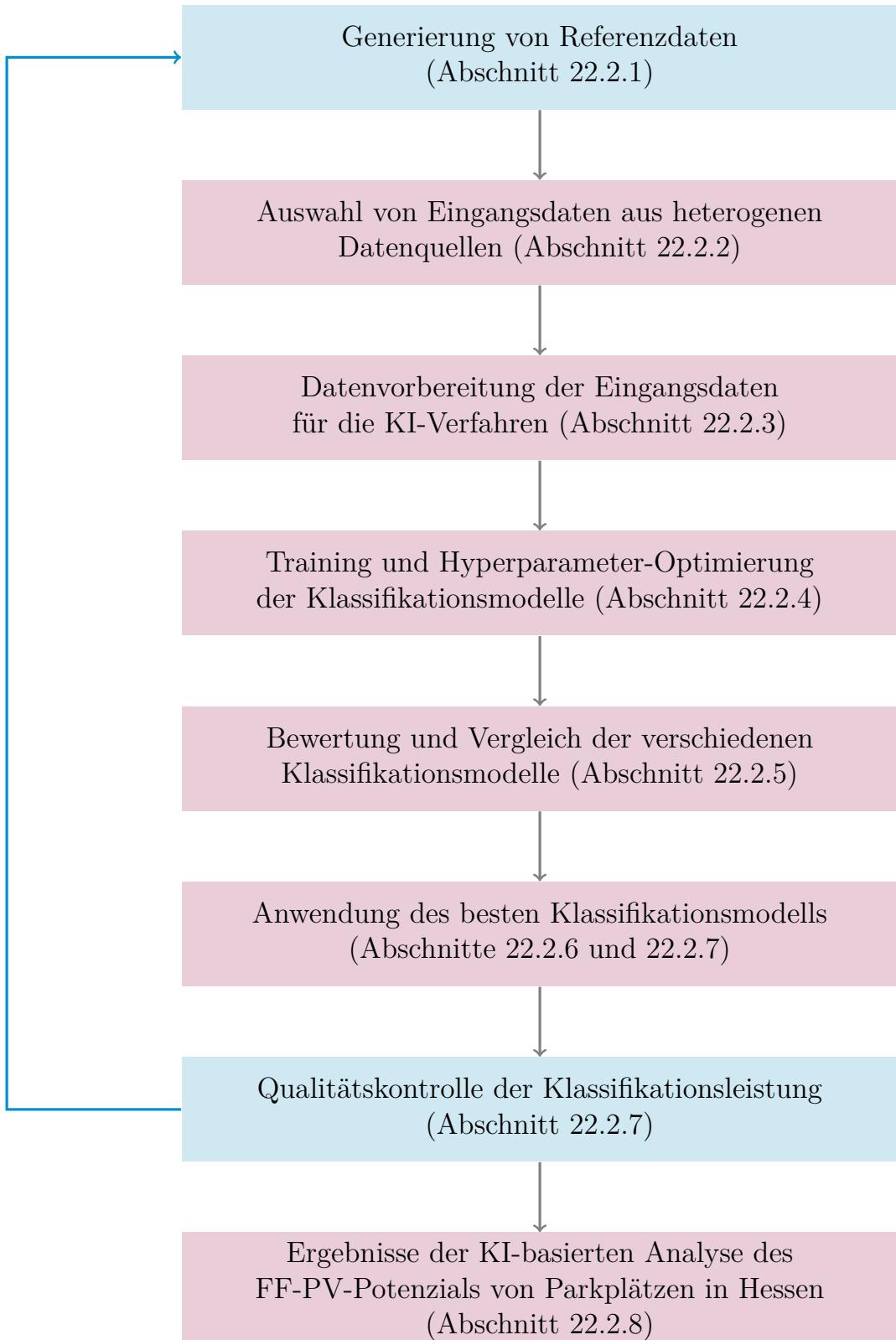


Abbildung 22.5.: Schematische Visualisierung zur KI-basierten Analyse von PV auf Parkplätzen in Hessen. Hellblaue Boxen repräsentieren Prozessschritte, die Expertenwissen voraussetzen, während die pinken Boxen automatisierte Prozesse symbolisieren.

Für die Referenzdatengenerierung werden die Parkplätze zunächst in drei Klassen eingeteilt. Diese Einteilung erfolgt aufgrund der Eignung für die Installation von PV und beinhaltet die folgenden Klassen: **geeignet**, **bedingt geeignet** und **ungeeignet**. Die Einteilung basiert auf der manuellen Analyse des AN von 1155 Parkplätzen mittels hochauflösender Satellitenbilder. Die Einführung der bedingt-geeigneten Klasse folgt dabei hauptsächlich Notwendigkeiten der internen Qualitätsanalyse. Sie wird, nach Zwischenstufen, für das finale Ergebnis wieder aufgelöst. Im Folgenden werden die drei Klassen hinsichtlich ihrer Eignung für die Installation von PV erläutert und definiert.

Parkplätze der Klasse „geeignet“ sind optimal für die Installation von PV. Sie lassen sich basierend auf den nachfolgenden Kriterien beschreiben:

- Vollversiegelte Fläche: Vollständig asphaltierte oder betonierte Parkplätze mit minimaler oder keiner Vegetation. Das Verhältnis von Versiegelung zu Vegetation ist besonders vorteilhaft.
- Frei von großen Bäumen: Keine großen Bäume auf oder in unmittelbarer Nähe des Parkplatzes. Diese sind schützenswert und wichtig für die Beschattung, sodass Eingriffe 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, die „bedingt geeignet“ für PV sind, weisen Einschränkungen auf, sind aber unter bestimmten Voraussetzungen geeignet.

- Teilweise Vegetation: Parkplätze mit Vegetation, jedoch ohne große Bäume. Die versiegelte Fläche überwiegt oder es gibt eine ausreichend große, zusammenhängende, versiegelte Fläche. Sowohl das Verhältnis von Versiegelung zu Vegetation als auch das Vorhandensein einer zusammenhängenden ungestörten Fläche wurden berücksichtigt.
- Bedingte Größe und Ausrichtung: Parkplätze, deren Größe, Geometrie und Ausrichtung zwar nicht optimal, aber für eine potenzielle PV-Nutzung geeignet sind.

Parkplätze, die „ungeeignet“ für PV sind, eignen sich aufgrund ungünstiger Bedingungen nicht.

- Versiegelung und Vegetation: Ein hoher Vegetationsanteil im Vergleich zur versiegelten Fläche, insbesondere durch große oder in Reihen gepflanzte Bäume, die starke Beschattung verursachen oder Eingriffe in die Vegetation erfordern würden.
- Nähe zu Wald oder Naturräumen: Parkplätze in unmittelbarer Nähe zu Wäldern oder schützenswerten Naturräumen, bei denen Eingriffe vermieden werden sollen.

Abbildung 22.6 auf Seite 262 zeigt ausgewählte Beispiele von Parkplätzen, die den drei Klassen zugeordnet sind.

22.2.2. Eingangsdaten aus heterogenen Datenquellen

Um eine KI-basierte bzw. datengetriebene Klassifikation durchführen zu können, werden neben den Referenzdaten auch Eingangsdaten benötigt, die ebenfalls generiert werden müssen.

Tabelle 22.2 gibt eine Übersicht über die für die Analyse verwendeten Eingabelayer und Geofachdaten zur Potenzialbewertung von PV auf Parkplätzen. Die einzelnen Geofachdaten werden im Folgenden beschrieben.

- **Parkplätze:** Dieser Datensatz enthält Geometrieinformationen zu insgesamt 11574 Parkplätzen in Hessen und dient als primäre Datengrundlage zur Identifikation potenzieller Flächen für die Installation von PV.
- **Referenzparkplätze:** Dieser Datensatz umfasst eine manuelle Klassifikation von 8 Beispielsätzen mit jeweils 50 bis 200 Parkplätzen in urbanen und ländlichen Gebieten in Hessen, wobei auf eine entsprechende Ausbalancierung und Gewichtung der Klassen geachtet wurde.
- **Ausschlussflächen:** Dieser Layer klassifiziert Gebiete hessenweit, die aufgrund bestimmter Kriterien auszuschließen sind. Zu den Ausschlusskriterien zählen u. a. Nordhänge mit einer Steigung von mehr als 5° sowie Steilhänge mit einer Steigung von mehr als 30°.
- **Segmentierte Flächentypen:** Dieser Geodatensatz beschreibt verschiedene Flächentypen und ist durch ein Segmentierungsmodell erstellt worden. Die Unterkategorien umfassen Vegetationsflächen, Siedlungsflächen, bebaute Flächen und Verkehrsflächen. Weitere Details zur KI-basierten Segmentierung finden sich in Kapitel 7 und 8.
- **Segmentierte Rasterdaten aus Segmentierungsmodell:** Dieser Datensatz besteht aus 435 Rasterdateien, die eine pixelweise Klassenvorhersage des Segmentierungsmodells in einer Auflösung von $0,2\text{ m} \times 0,2\text{ m}$ darstellen.
- **NDVI-Vegetationsindex:** Der NDVI-Layer ist ein Rasterdatensatz mit einer Auflösung von $10\text{ m} \times 10\text{ m}$, der zur Bewertung der Vegetationsdichte und -gesundheit dient. Weitere Details finden sich in Abschnitt 9.1.1.
- **Grünvolumen-Gitter:** Dieser Datensatz berechnet das Grünvolumen in Hessen und aggregiert es auf eine 100 m-Gitterzelle. Weitere Informationen zu diesem Layer sind in Abschnitt 9.1.3 beschrieben.

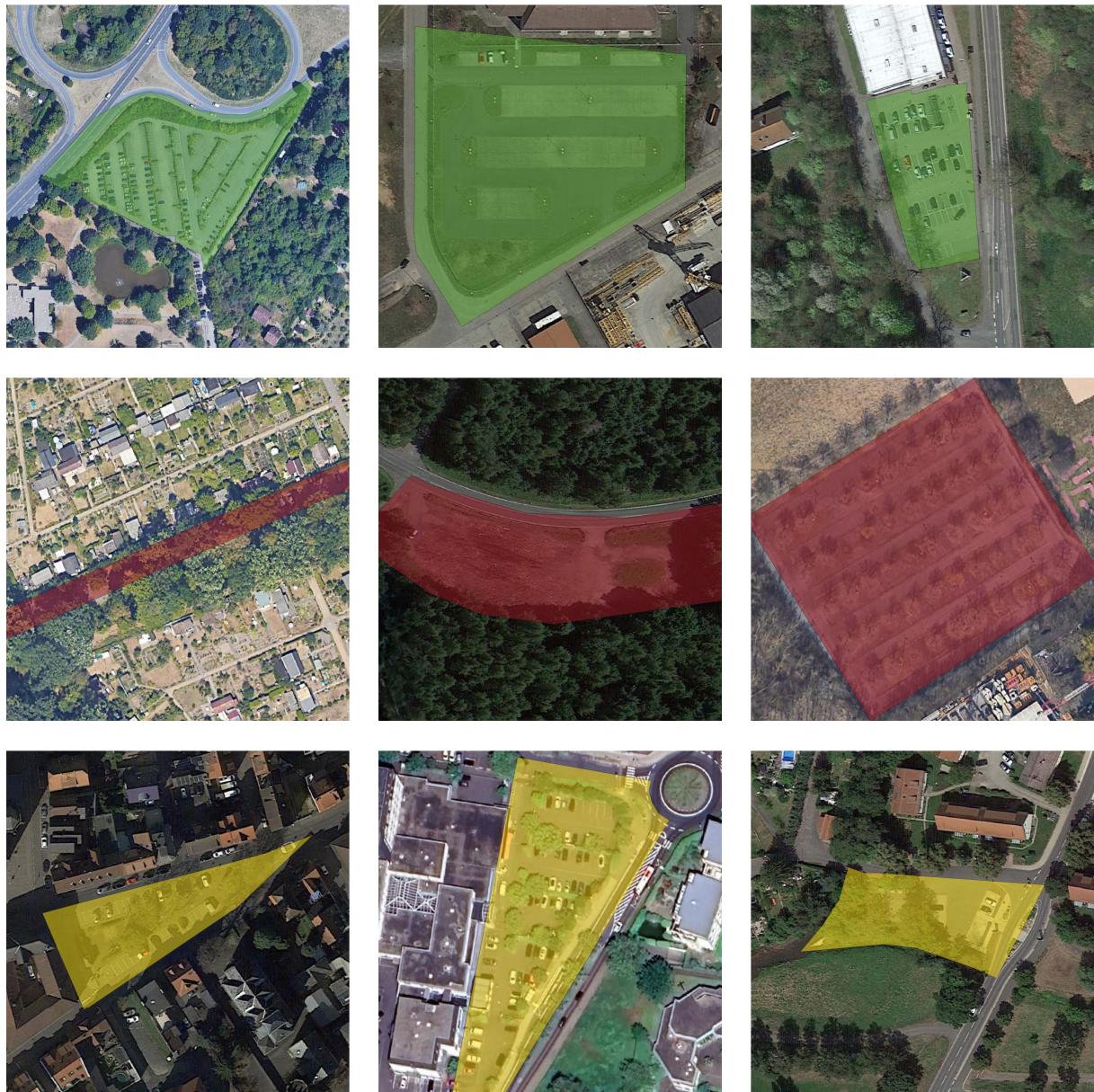


Abbildung 22.6.: Exemplarische Visualisierung von Parkplätzen für PV und die Klassifizierung in die drei beschriebenen Klassen. Die erste Reihe zeigt Beispiele der **Klasse „geeignet“**, die zweite Reihe der **Klasse „ungeeignet“** und die dritte Reihe der **Klasse „bedingt geeignet“**. Die entsprechend eingefärbten Polygone symbolisieren die Parkplatzflächen.

Tabelle 22.2.: Übersicht zu den verwendeten Eingangsdaten für die Klassifikationsaufgabe und letztendlich generierten Ausgangsdaten für die Analyse der PV-Potenziale auf Parkplätzen.

Eingabelayer	Datentyp	Anwendungsbereich
Parkplätze	Vektor	Identifikation potenzieller Flächen durch Zuordnung der in Abschnitt 22.2.1 beschriebenen Klassen
Referenzparkplätze	Vektor	Training und Validierung der KI-Verfahren
Ausschlussflächen	Vektor	Ausschlusskriterien für PV, wie z. B. Hangneigung
Segmentierte Flächen	Vektor	Klassifikation von Flächentypen mittels KI
Segmentierte Pixel-Raster	Raster	Klassifikation von Flächentypen auf Pixelebene in einer $0,2\text{ m} \times 0,2\text{ m}$ -Auflösung
NDVI-Vegetationsindex	Raster	Bewertung der Vegetationsdichte und -gesundheit (siehe hierzu Kapitel 9)
Grünvolumen-Gitter	Vektor	Berechnung des Grünvolumens auf einem Gitter mit $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ -Auflösung (siehe hierzu Kapitel 9)

22.2.3. Datenvorverarbeitung

Im Rahmen der ersten Vorverarbeitungsschritte werden Objekte mit identischer Geometrie im Parkplatz- und Referenzdatensatz als Duplikate identifiziert und entfernt. Multigone Objekte werden in einfache Polygone überführt, indem jeweils nur das Polygon mit der größten Fläche beibehalten und die übrigen entfernt werden. Anschließend wird für jedes verbleibende Parkplatzpolygon die Fläche, die für PV ungeeignet ist, mithilfe einer geometrischen Subtraktion bereinigt. Zudem wird durch einen Filterprozess sichergestellt, dass lediglich Objekte mit mindestens 50 Stellplätzen im Datensatz verbleiben.

Die Datenaggregation erfolgt in mehreren Schritten, um eine umfassende Analyse der Eignung von Parkplätzen für PV zu ermöglichen. Nachfolgend werden diese Schritte beschrieben.

Erstellung von Puffern: Nach der Bereinigung des Parkplatzdatensatzes werden Pufferzonen (Flächen um die Parkplätze) erstellt. Diese Pufferzonen wurden in Abständen von **0, 1, 2, 5, 7, 10, 15, 20 und 25 Metern** angelegt. Die unterschiedlichen Pufferdistanzen ermöglichen eine detaillierte Erfassung der Parkplatzumgebung und dienen als Basis für die Aggregation relevanter statistischer Daten in den nachfolgenden Analyse-schritten.

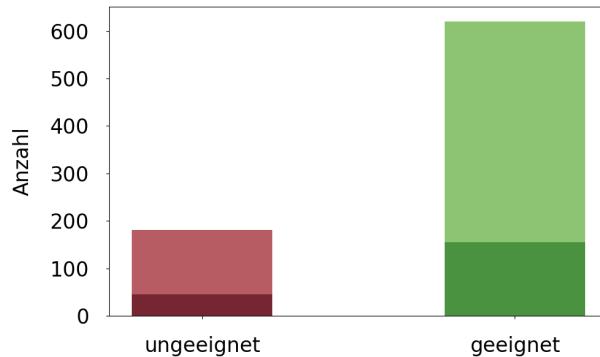


Abbildung 22.7.: Klassenverteilung im Trainings- und Testdatensatz. Rot: ungeeignet für PV, Grün: geeignet für PV. Hellere Bereiche: Testdatensatz, dunklere Bereiche: Trainingsdatensatz.

Merkmale für die KI-Verfahren: Für die verschiedenen Pufferdistanzen der Parkplatzflächen werden statistische Informationen ermittelt. So wird für jede Pufferdistanz und Klasse (wie „vollversiegelt“, „teilversiegelt“, „unversiegelt“ etc.) ein Satz an Variablen erstellt, der die flächenmäßigen Anteile der Klassen an den Puffer- und Parkplatzflächen beschreibt. Insgesamt resultierten daraus 300 Eingangsmerkmale (Attribute). Zusätzlich werden der NDVI-Index (siehe Abschnitt 9.1.1) und das Grünvolumen (siehe Abschnitt 9.1.3) in den Datensatz integriert und daraus ebenfalls statistische Kenngrößen sowie Flächenanteile berechnet. Dies führte zur Generierung von weiteren 180 Merkmalen. Zur Charakterisierung der Form und Struktur jedes Parkplatzobjekts werden weiterhin 14 geometrische Merkmale berechnet. Diese Merkmale werden nur für die Parkplatzobjekte selbst und nicht für die Pufferzonen ermittelt.

Durch eine Korrelationsuntersuchung wird die Anzahl der Merkmale reduziert, indem stark korrelierte Merkmale mit einem Korrelationskoeffizienten von über 95 % ausgeschlossen werden, sodass 70 finale Eingabemerkmale verbleiben. Diese Auswahl gewährleistet eine umfassende Beschreibung der Parkplatzobjekte und ihrer Umgebung. Gleichzeitig wird berücksichtigt, dass eine hohe Anzahl an Merkmalen im Verhältnis zur Anzahl der Referenzobjekte bei vielen KI-Verfahren zu Herausforderungen führen kann. Daher werden für die vorliegenden Klassifikationsaufgaben Verfahren ausgewählt, die robust gegenüber solchen Herausforderungen agieren und eine zuverlässige Modellleistung sicherstellen.

Datensatzaufteilung zum Training und Test der KI-Verfahren: Die Eingangsmerkmale werden mit dem Referenzdatensatz (siehe Abschnitt 22.2.1) verknüpft und stratifiziert in Trainings- und Testdaten im Verhältnis 80 : 20 aufgeteilt, wobei ein zufälliger Seed die Robustheit und Unabhängigkeit sicherstellt.

Die Testdaten umfassen Parkplatzflächen, die der Evaluierung dienen und nicht im Training integriert sind. Zur Visualisierung werden beide Datensätze in ein GIS-System als Layer eingeführt.

22.2.4. Training und Hyperparameter-Optimierung der KI-Verfahren

Zur Klassifizierung der Eignung von Parkplätzen für PV wurden fünf verschiedene KI-Verfahren trainiert und optimiert: **Random Forest**, **XGBoost**, **Extra Trees**, **LightGBM** und **CatBoost**. Diese Modelle eignen sich gut für die Verarbeitung großer und heterogener Datensätze, nachdem sie verschiedene Ansätze zur Entscheidungsbaum- und Ensemblemodellierung abdecken.

Die Hyperparameter-Optimierung erfolgte mithilfe von **Bayesian Optimization** über das **BayesSearchCV**-Verfahren, welches eine effiziente Auswahl optimaler Parameterkombinationen ermöglicht. Die Optimierung umfasste für jedes Modell 100 Iterationen, unter Einsatz einer dreifachen Kreuzvalidierung, um die Verlässlichkeit der Ergebnisse sicherzustellen und Überanpassungen zu vermeiden.

Wie eingangs angeführt, stellt sich eine klare Abgrenzung der Klasse „bedingt geeignet“ als schwierig dar, was durch diverse Testläufe und Evaluierungen untersucht und nachgewiesen werden konnte. Eine visuelle Überprüfung ergab, dass die Fehlklassifikationen auch für den Menschen schwierig zuzuordnen sind.

Basierend auf dieser Erkenntnis wurde im Rahmen eines verfeinerten Nachtrainings inkl. Neu-Labeling ein 2-Klassenproblem zugrunde gelegt, welches die Parkplätze entweder der Klasse **geeignet** oder der Klasse **ungeeignet** zuordnet. Wichtig ist dabei festzuhalten, dass die Informationen über die Klasse **bedingt geeignet** nicht verloren gehen und auch in weitergehenden Modellverfeinerungen verwendet werden können. In Abbildung 22.7 ist die Klassenverteilung dargestellt: *ungeeignet für PV* in Rot, *geeignet für PV* in Grün, wobei dunklere Bereiche die Testdaten und hellere die Trainingsdaten repräsentieren.

22.2.5. Evaluierung der Klassifikationsergebnisse

Die Leistungsfähigkeit der Klassifikationsverfahren wird anhand folgender Metriken bewertet (vgl. auch Tabelle 22.3):

- **Balanced Accuracy (Train und Test):** Misst die Genauigkeit unter Berücksichtigung einer ausgewogenen Klassenverteilung und gibt eine robustere Einschätzung bei unausgeglichenen Klassen.
- **Precision:** Gibt den Anteil der korrekt als positiv klassifizierten Objekte an.
- **Recall:** Zeigt die Fähigkeit des Modells, alle relevanten positiven Beispiele zu erkennen.
- **F1-Score:** Ein harmonisches Mittel zwischen Precision und Recall, das die Balance zwischen diesen Metriken bewertet.
- **Log Loss:** Ein Maß für die Unsicherheit in den Wahrscheinlichkeitsvorhersagen des Modells, wobei niedrigere Werte eine höhere Sicherheit in den Vorhersagen signalisieren.

Tabelle 22.3.: Vergleich der Modelle basierend auf Testgenauigkeit, Präzision, Recall, F1-Score und Log Loss.

Modell	Balanced Accuracy	Precision	Recall	F1 Score	Log Loss
Random Forest	0.98	1.00	0.96	0.98	0.10
XGBoost	0.99	1.00	0.98	0.99	0.05
Extra Trees	0.99	1.00	0.98	0.99	0.06
LightGBM	0.99	1.00	0.98	0.99	0.12
CatBoost	0.99	1.00	0.98	0.99	0.05

Während der algorithmischen Optimierungen wurden auch noch weitere Evaluierungsmetriken verwendet, die eine noch gezieltere Analyse der Genauigkeitseigenschaft erlauben. Hierunter fallen v. a.:

- **Train und Test Balanced Accuracy:** Misst die Genauigkeit unter Berücksichtigung einer ausgewogenen Klassenverteilung und gibt eine robustere Einschätzung bei unausgeglichenen Klassen.
- **Brier Score:** Bewertet die Genauigkeit der Wahrscheinlichkeitsschätzungen des Modells; ein niedrigerer Wert weist auf eine genauere Vorhersage hin.
- **Receiver Operating Characteristic (ROC):** Zeigt die Sensitivität des Modells gegenüber verschiedenen Schwellenwerten.
- **Area Under the Curve (AUC):** Die Fläche unter der ROC-Kurve gibt die Fähigkeit des Modells an, zwischen den Klassen zu unterscheiden. Ein höherer Wert zeigt eine bessere Trennleistung.
- **Average Precision:** Der Durchschnitt der Precision über alle Recall-Werte, der die Gesamtgenauigkeit der positiven Vorhersagen des Modells widerspiegelt.

22.2.6. Vergleich der Klassifikationsmodelle

Alle KI-Verfahren zeigten vergleichbar gute Leistungen mit hohen Genauigkeitswerten und starken Ergebnissen in verschiedenen Metriken (siehe Tabelle 22.3). Unter den Modellen sticht der **XGBoost-Klassifikator** hervor, der die höchste Test-Balanced-Accuracy (0,99) sowie herausragende Präzisions-, Recall- und F1-Score-Werte (1,00, 0,98, 0,99) erzielte. Gemeinsam mit **CatBoost** weist XGBoost den niedrigsten Log-Loss-Wert (0,05) auf, was auf eine gute Kalibrierung und zuverlässige Vorhersagen hinweist.

Obwohl die Modelle **Random Forest** und **LightGBM** etwas höhere Log-Loss-Werte aufweisen (0,10 bzw. 0,12), liefern sie dennoch robuste Ergebnisse in Bezug auf Balanced Accuracy und F1-Score (0,98 und 0,99).

22.2.7. Auswahl des besten Klassifikationsverfahrens und dessen Analyse

Aufgrund der konstanten Klassifikationsleistung des XGBoost-Klassifikators wird dieses Verfahren für weitergehende Analysen und zur Klassifikation der hessenweiten Parkplätze in die beiden Klassen geeignet und ungeeignet für PV ausgewählt.

Abbildung 22.8 zeigt die Klassifikationsergebnisse des XGBoost-Modells auf den Trainings- und Testdatensätzen. Diese Konfusionsmatrix verdeutlicht die Anzahl der korrekt und inkorrekt klassifizierten Flächen für die Kategorien **geeignet für PV** und **ungeeignet für PV** auf den entsprechenden Parkplätzen.

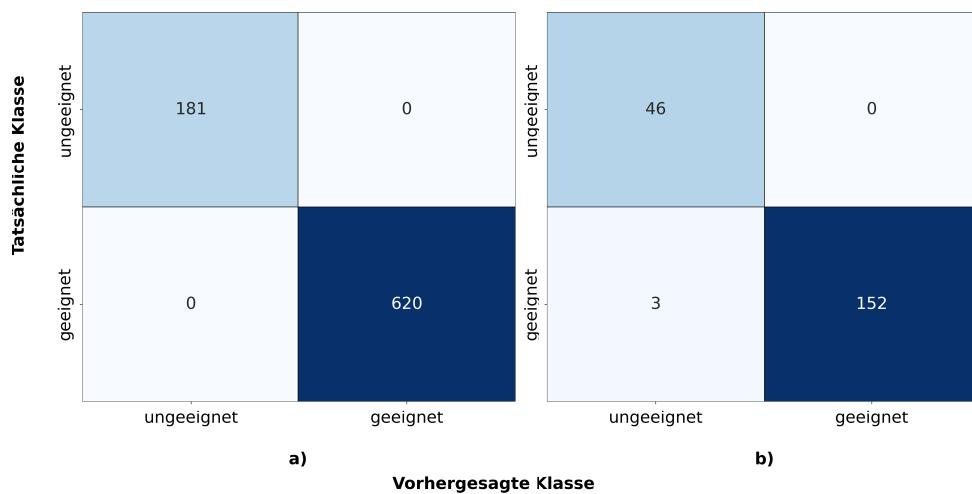


Abbildung 22.8.: Konfusionsmatrix des XGBoost-Modells für den (a) Trainings- und (b) Testdatensatz (rechts).

Abbildung 22.9 zeigt eine sog. SHAP Visualisierung, wie sie in der erklärbaren KI Anwendung findet. Die SHAP-Werte bieten eine quantitative Einschätzung des Beitrags jedes einzelnen Eingangsmerkmals zu einer spezifischen Vorhersage (hier: Klassifikation). Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass die wichtigen Eingangsmerkmale aus einer Kombination von geometrischen Eigenschaften (Verhältnis der Versiegelung zu Vegetation) und Indikatoren zur Vegetation (NDVI) bestehen.

Qualitätskontrolle der Klassifikation

Das beste Klassifikationsverfahren wird nun auf alle Parkplätze angewendet, wobei die vorhergesagten Klassen sowie deren Vorhersagewahrscheinlichkeiten gespeichert werden. Diese Vorhersagen werden zunächst visuell in GIS überprüft und nach erfolgreicher Qualitätskontrolle zur modellgestützten Analyse des PV-Potenzials der Parkplatzflächen in Hessen verwendet. Zusätzlich werden die Flächen der vorhergesagten Klassen innerhalb der Parkplätze sowie die Lage innerhalb und außerhalb des Siedlungsgebiets in den Analysedatensatz aufgenommen.

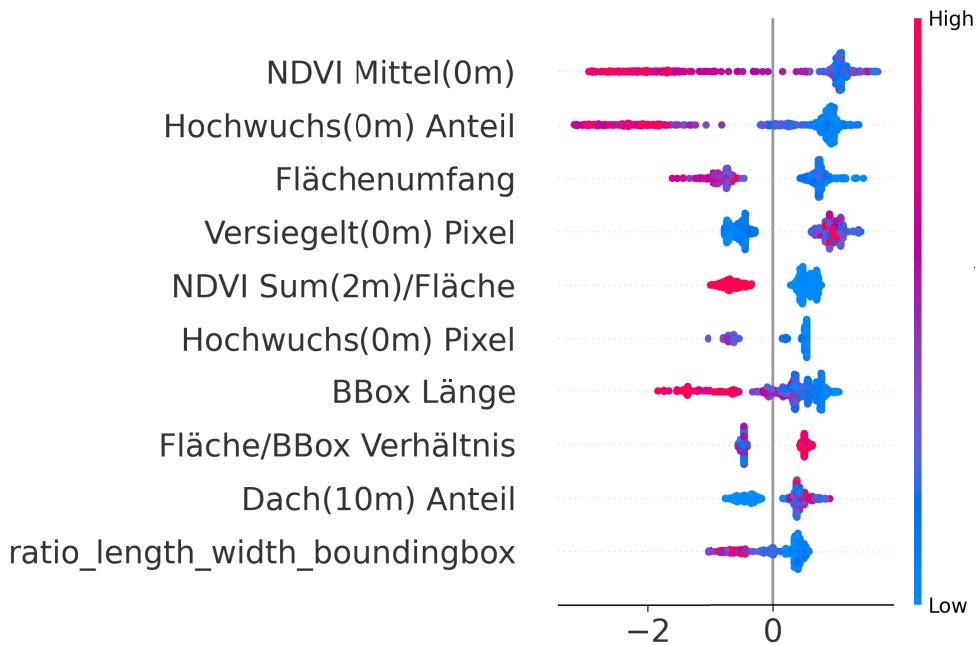


Abbildung 22.9.: SHAP-Visualisierung zur Interpretation der Einflussstärke der Eingangsmerkmale im XGBoost-Klassifikationsmodell. Die Farbgebung zeigt die jeweiligen Feature-Werte an: hohe Werte sind rot, niedrige Werte blau.

22.2.8. Ergebnisse der KI-basierten PV-Potenzialanalyse von Parkplätzen für Hessen

Abschließend werden die Flächenpotenziale für PV für alle ausgewählten Parkplätze mit mehr als 50 Stellplätzen basierend auf der Klassifikation des besten Modells ermittelt. Es findet eine Unterteilung in Parkplätze des Referenzdatensatzes (gelabelt durch AN) und neu vom Klassifikationsmodell unbekannten Parkplätzen statt. Ebenso wird eine Differenzierung nach der Parkplatzlage innerhalb und außerhalb des Siedlungsgebiets betrachtet.

Zur Berechnung der Klassifikationsunsicherheit des gewählten KI-Verfahrens, die als Fehlerbalken im Histogramm dargestellt ist, wird für jede Klasse eine gewichtete Fläche berechnet. Diese gewichtete Fläche basiert auf der tatsächlichen Fläche jedes Parkplatzes, multipliziert mit der Vorhersagewahrscheinlichkeit, die das Modell für die jeweilige Klasse angibt. Für die Berechnung der Standardabweichung der gewichteten Flächen werden diese gewichteten Flächen innerhalb und außerhalb des Siedlungsgebiets getrennt summiert und anschließend deren Abweichung ermittelt. Diese Unsicherheitsberechnung liefern die in Abbildung 22.10 gezeigten Fehlerbalken (schwarze Boxplots).

Tabelle 22.4 gibt einen Überblick über das Flächenpotenzial für die PV auf Parkplätzen in Hessen. Insgesamt ergibt sich ein Potenzial von **28,5 km²** an als geeignet klassifizierten Parkplätzen für die PV-Nutzung, mit einer Modellvorhersageunsicherheit von 0,47 km². Diese Parkplätze entsprechen etwa 0,1 % der Gesamtfläche Hessens. Von diesen geeigneten Flächen wurden **1,6 km²** bestehender Dachflächen ausgeschlossen. Diese sind zwar für PV geeignet, jedoch nicht Bestandteil dieser Analyse. Zusätzlich wurden von den iden-

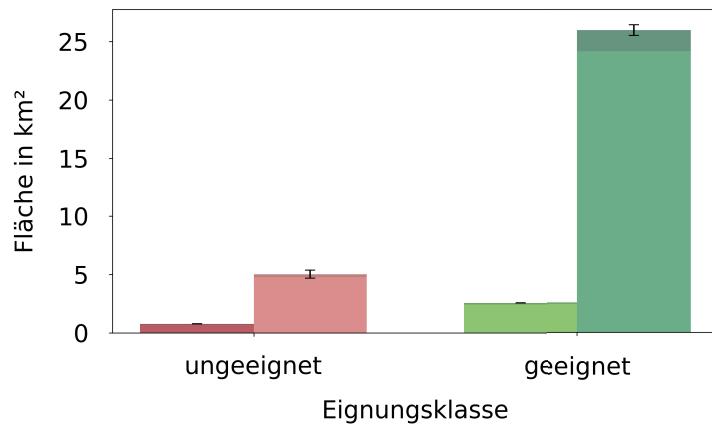


Abbildung 22.10.: Histogramm der Parkplatzflächen der beiden Eignungsklassen innerhalb und außerhalb des Siedlungsgebiets für die Referenzdaten (links) und für alle Daten des Datensatzes vorhergesagt mit dem besten Modell (rechts). Die jeweils dunkleren Bereiche der Balken sind Parkplätze außerhalb des Siedlungsgebiets.

Tabelle 22.4.: Zusammenfassung der Flächenpotenziale für die Installation von PV-Anlagen nach Eignungsklassen.

Eignungsklasse	Vorhergesagte Fläche in km ²	Versiegelt in km ²	Vegetation Mittel- & Hochwüchsige in km ²
0: Für PV ungeeignet	5,8	2,3	1,9
1: Für PV geeignet	28,5	21,8	2,0

tifizierten Parkplatzflächen diejenigen mit Abschattung durch hochwüchsige Vegetation (**1,6 km²**) bzw. mittelwüchsige Vegetation (**0,4 km²**) abgezogen, da die Entfernung dieser Vegetation erhebliche ökologische Auswirkungen hätte. Unter Berücksichtigung dieser Ausschlüsse verbleibt ein Potenzial von **24,9 km²**, das für die PV-Installation auf Parkplätzen zur Verfügung steht.

Um die Eingriffsintensität weiter zu minimieren, sollten PV-Installationen bevorzugt auf versiegelten Flächen erfolgen. Dies reduziert das verfügbare Potenzial auf **21,8 km²**, was etwa 76 % des theoretischen Flächenpotenzials auf Parkplätzen entspricht. Diese Zahlen stimmen mit den oberen Schätzungen aus vorherigen Studien zum Flächenpotenzial von PV auf Parkplätzen überein.

Zusammenfassend ermöglicht diese Analyse eine flexible Planung unter Berücksichtigung der Versiegelung und des Erhalts höherer Vegetation.

22.2.9. Plausibilisierung der Modellvorhersage anhand einer Solarstrahlungsanalyse für eine Beispielregion

Zur weiterführenden Plausibilisierung des vorgeschlagenen KI-Ansatzes werden für eine Beispielregion durchschnittliche jährliche Globalstrahlungsdaten herangezogen. Diese Daten sind für 193 ausgewählte Parkplätze, d. h. für etwa 20 % der Parkplatzfläche Frankfurts, abgefragt worden. Hierbei sind manuelle Umrisszeichnungen der Polygonflächen der ausgewählten Parkplätze basierend auf hochauflösenden Strahlungsinformationen des hessischen Solarkatasters der Landes Energie Agentur Hessen aggregiert worden [58]. Das Solarkataster Hessen ist ein Online-Tool, das die Eignung von Dachflächen und Freiflächen für PV-Installationen bewertet, wobei Faktoren wie Solarstrahlung, Verschattung und Ausrichtung berücksichtigt werden. Die so gewonnenen Strahlungsdaten werden ausschließlich für die Plausibilisierung und Validierung genutzt und sind kein Bestandteil der Eingangsdaten.

Abbildung 22.11 vergleicht die Solarstrahlung (kWh m^{-2}) von 193 Parkplätzen in Frankfurt am Main, die vom XGBoost-Modell als geeignet oder ungeeignet klassifiziert wurden. Ein Mann-Whitney-U-Test bestätigt, dass Parkplätze, die als geeignet klassifiziert wurden, eine signifikant höhere Solarstrahlung aufweisen als die als ungeeignet klassifizierten ($p < 0.001$, Cliff's $\Delta = -0.848$). Der Mann-Whitney-U-Test (auch Wilcoxon-Mann-Whitney-Test oder U-Test) ist ein nichtparametrischer statistischer Test, der überprüft, ob zwei unabhängige Stichproben aus unterschiedlichen Verteilungen stammen, indem er deren Ränge vergleicht und so Unterschiede in der zentralen Tendenz bewertet. Geeignete Parkplätze zeigen eine mittlere Solarstrahlung von 950 kWh m^{-2} , während ungeeignete Parkplätze nur 702 kWh m^{-2} aufweisen.

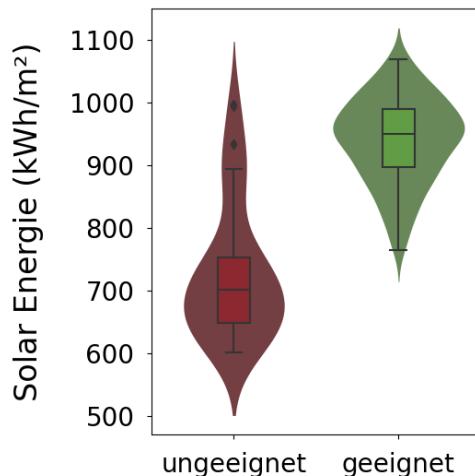


Abbildung 22.11.: Violinendiagramme zum Vergleich der Solarstrahlung für ungeeignete (rot) und geeignete (grün) Parkplätze in Frankfurt, klassifiziert durch das XGBoost-Modell (siehe Abschnitt 22.2.7).

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass das Modell effektiv Standorte mit höherem solaren Potenzial identifiziert, obwohl Solarstrahlung nicht als Eingangsmerkmal für die KI-Verfahren genutzt worden ist. Zudem belegen die Ergebnisse, dass die manuelle Erstellung der Referenzdaten (siehe Abschnitt 22.2.1) der ausgewählten Parkplätze als geeignet oder ungeeignet korrekt durchgeführt worden ist.

Sollten die durchschnittlichen jährlichen Globalstrahlungsdaten landesweit über das Solar-Kataster Hessen verfügbar gemacht werden, können die hier gezeigten Plausibilisierungsanalysen flächendeckend auf alle ausgewählten Parkplätze angewendet werden.

23. Themenschwerpunkt: PV-Bestand

Im vorliegenden Projekt wurde ein Verfahren zur Detektion von bereits installierten PV-Anlagen auf Freiflächen (FF-PV) und Dächern (Dach-PV) entwickelt. Die hieraus gewonnenen Daten geben einen quantifizierten, flächenbezogenen Überblick über den aktuellen PV-Bestand. Wichtig ist in diesem Zusammenhang zu erwähnen, dass diese Aktualität maßgeblich von den zugrunde gelegten Datenquellen abhängt. Neben der Beschreibung des Verfahrens wird daher nachfolgend näher auf die Datengrundlage eingegangen.

23.1. PV-Detektion

Die Detektion von PV-Anlagen auf Freiflächen und Dächern erfolgt mithilfe eines eigenen Segmentierungsmodells, das auf einem tiefen neuronalen Netz basiert. In diesem KI-Ansatz wird eine Segmentierung implementiert, die Bildpixel in drei Kategorien einteilt: Hintergrund (keine PV-Anlagen vorhanden), PV-Anlagen auf Dächern (Kategorie 1) und PV-Anlagen auf Freiflächen (Kategorie 2).

23.1.1. Datengrundlage

Generierung der Referenz- und Eingangsdaten

Die Trainingsdaten für die Detektion von Freiflächen- und Dach-PV-Anlagen basieren auf Informationen aus dem Klassen- bzw. tag-Katalog von ATKIS und OSM sowie auf eigens erhobenen Daten des Leibniz-Instituts für ökologische Raumentwicklung e. V. Dresden (IÖR). Um ein konsistentes Datenformat für das Modell zu gewährleisten, werden die Daten zunächst harmonisiert, auf die Landesgrenze von Hessen zugeschnitten und anschließend miteinander fusioniert. Im Zuge dieser Fusion werden 47 zusätzliche Flächen aus dem ATKIS-Datensatz den OSM-Daten hinzugefügt, da diese detailliertere Informationen enthalten. Die Daten sind über die Gitternetz-IDs mit den Referenzdaten verknüpft.

Die Eingangsdaten für das Segmentierungsmodell bestehen aus multispektralen Orthobildern (RGBI) mit einer räumlichen Auflösung von 20 cm aus den bisher aktuellsten Befliegungen der Jahre 2021 und 2022. Da die Infrarotkanäle aus verschiedenen, nicht einheitlich kalibrierten Befliegungen stammen, werden ausschließlich die drei RGB-Kanäle

verwendet. Zusätzlich wird die Dachneigung aus dem LOD2-Modell des Landes Hessen abgeleitet und als vierter Kanal in die Eingangsdaten integriert.

Zur Erhöhung der Robustheit des Modells wird ein zusätzlicher Datensatz herangezogen. Basierend auf den frei verfügbaren OpenNRW-Daten [80] werden Orthobilder sowie GML-Daten genutzt, aus denen die Dachneigungen abgeleitet werden. Da die Orthobilder ursprünglich eine Auflösung von 10 cm besitzen, werden sie auf eine räumliche Auflösung von 20 cm reskaliert.

Auswahl der Trainingsdaten im Trainingsprozess

Herausfordernd für den Trainingsprozess ist das große flächenmäßige Ungleichgewicht zwischen PV-Flächen und allen anderen Bildregionen (Hintergrund). Zudem führt die hohe Variabilität der PV-Anlagen in Größe, Form und Anordnung zu Schwierigkeiten bei der automatischen Erkennung. Ähnliche Dachstrukturen wie Lüftungsanlagen oder Dachfenster können die Segmentierung zusätzlich erschweren, indem sie leicht mit PV-Anlagen verwechselt werden. Diese Aspekte werden durch die gezielte Auswahl der Trainingsdaten und den Aufbau des Modells adressiert.

Die ursprünglichen Luftbilder mit einer Auflösung von jeweils 5000×5000 Pixel werden für die Verarbeitung in kleinere Patches mit einer Größe von 512×512 Pixel unterteilt. Diese Patches werden mit einem Stride von 256 Pixel extrahiert, wodurch sich benachbarte Patches überlappen und kontextuelle Informationen an den Patch-Grenzen erhalten bleiben. Andere Datensätze werden analog zugeschnitten und verarbeitet. Für das Training werden ausschließlich Patches verwendet, die Labels für PV-Systeme enthalten; alle anderen werden ausgeschlossen. Der Datensatz wird in 70 % Trainings-, 15 % Validierungs- und 15 % Testdaten aufgeteilt. Während des Trainings werden zusätzliche Datenaugmentierungstechniken angewendet, um die Robustheit des Modells zu erhöhen. Alle Eingabedaten werden vor der Weitergabe an das Modell normalisiert, um eine einheitliche Skalierung sicherzustellen und die Trainingsstabilität zu verbessern.

Es ist zu beachten, dass die Daten aus unterschiedlichen Erfassungszeitpunkten stammen, wodurch infolge von Bau- oder Umbauarbeiten Variationen in der Dachstruktur und den Photovoltaikanlagen auftreten können. Diese zeitliche Diskrepanz stellt eine Herausforderung bei der Generierung konsistenter Referenzdaten dar. Zudem erfassen die automatisiert erstellten Labels die PV-Anlagen lediglich grob (siehe Abbildung 23.1).

Um dieser Problematik zu begegnen, wurden 30 Kacheln zufällig ausgewählt und manuell nachgelabelt, um detailliertere Referenzdaten zu erstellen. Dadurch ergeben sich insgesamt 46.682 automatisch gelabelte und 2.122 manuell nachgelabelte Patches. Zusätzlich wurden etwa 40 zufällig ausgewählte Kacheln aus dem OpenNRW-Datensatz manuell nachgelabelt, um die Qualität und Konsistenz der Referenzdaten weiter zu verbessern.

Dieser Zusatzaufwand ermöglicht ein zweistufiges Training: zunächst auf Basis der Originaldaten und anschließend mit den zusätzlich nachgelabelten Daten, um die Modellgenauigkeit weiter zu verbessern. Für den Trainingsprozess selbst werden Batches der Größe

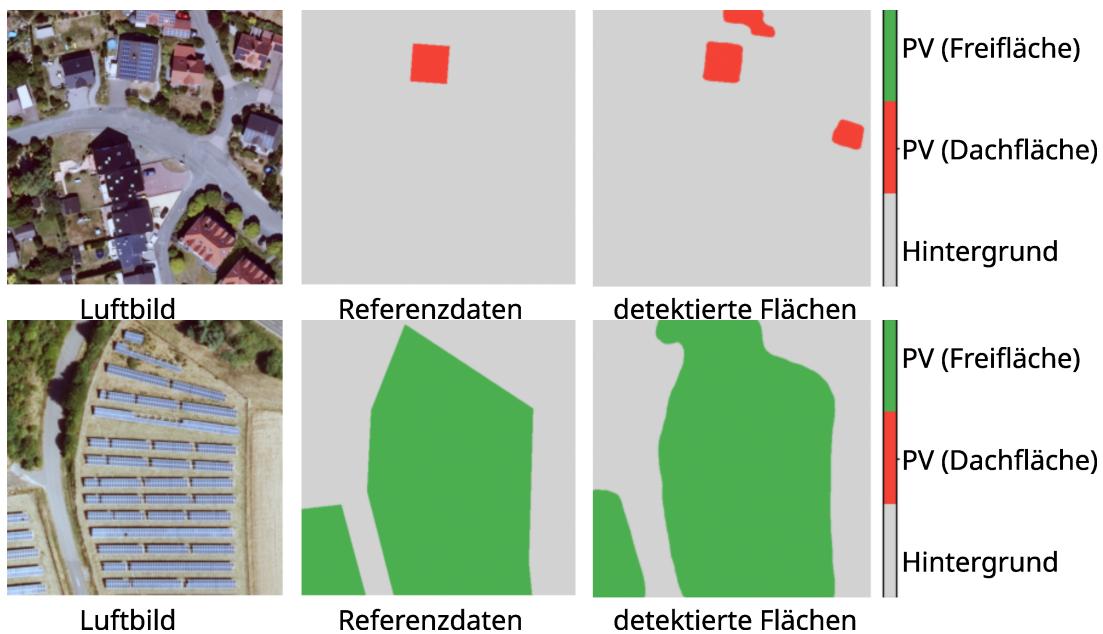


Abbildung 23.1.: Beispiele der PV-Detektion anhand der automatisiert generierten Label: Luftbild (links), Referenzdaten (mittig), automatisch detektierte Flächen (rechts). Die automatisiert generierten Labels erfassen die PV-Anlagen lediglich grob.

16 gebildet, wobei eine gewichtete, zufällige Auswahl der Datenpunkte auf Basis der Objektanzahl in den Bildern erfolgt. Die Gewichtung der einzelnen Bilder richtet sich dabei nach dem Anteil der Vordergrund-Pixel (PV-Anlagen) im Verhältnis zur Gesamtanzahl der Pixel (Vorder- und Hintergrund), sodass Bilder mit einem geringeren Objektanteil eine höhere Gewichtung erhalten. Dies dient dazu, das Ungleichgewicht in den Daten zu minimieren und die Modellleistung auf den weniger häufigen Klassen zu verbessern.

Für den ersten Schritt im Training wird der sog. Adam-Optimierer mit einer Lernrate von 0,00005 und einem Gewichtungsverlust von 0,001 verwendet. Dieser Schritt dient der stabilen Grundanpassung der Modellparameter und umfasst maximal 25 Epochen. Ein Early-Stopping-Mechanismus ist implementiert, sodass das Training nach 19 Epochen mit den automatisch generierten Labels beendet wird.

Im anschließenden Feintraining wird das Modell zunächst für 4 Epochen mit den manuell nachgelabelten Kacheln des OpenNRW-Datensatzes weitertrainiert. Danach folgt ein weiteres Feintraining mit den manuell nachgelabelten Daten aus Hessen über 6 Epochen. In diesen Feintrainingsschritten wird kein Early Stopping verwendet.

23.1.2. Aufbau des Segmentierungsmodells

Als Grundlage für das Segmentierungsmodell wird eine **Unet**-Architektur verwendet. In Kapitel 8 finden sich weiterführende Informationen zur KI-basierten Segmentierung. Für die Implementierung wird die **Segmentation Toolbox** [42] zusammen mit **PyTorch** verwendet. Das **Unet** ist ein symmetrisches Encoder-Decoder-Netzwerk, das Eingaben mithilfe

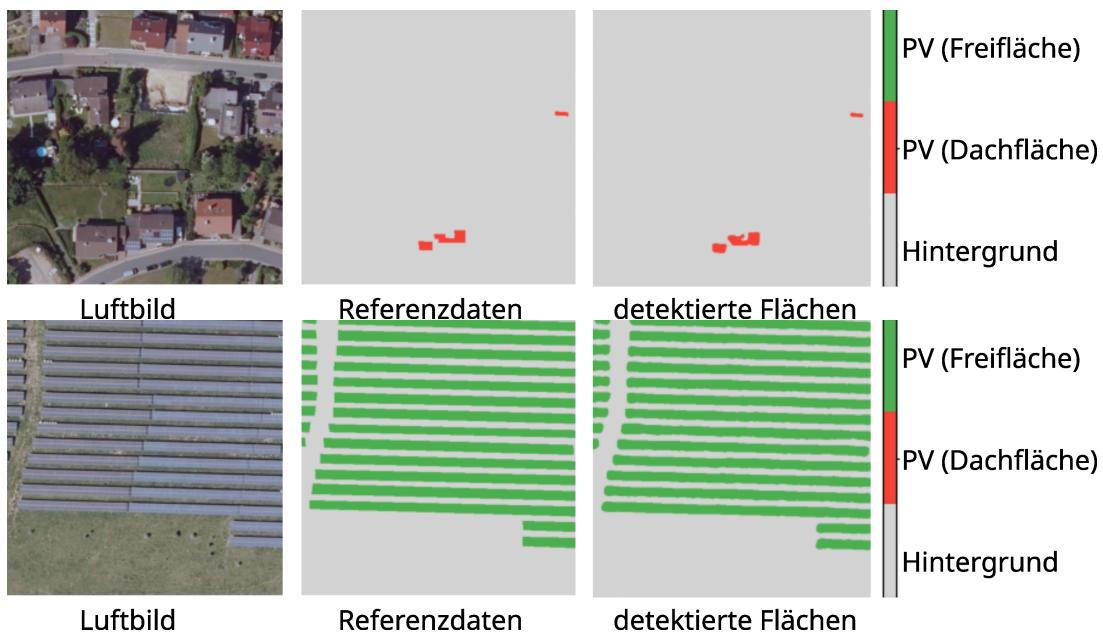


Abbildung 23.2.: Beispiele der PV-Detektion: Luftbild (links), Referenzdaten (mittig), automatisch detektierte Flächen (rechts). Unterschiedliche PV-Anlagen werden von dem Modell überwiegend richtig erfasst.

von Downsampling-Schichten verarbeitet und über die Upsampling-Schichten Segmentierungsergebnisse liefert. Die Encoder-Schichten extrahieren Merkmale und reduzieren die Auflösung, während die Decoder-Schichten die Auflösung wiederherstellen und detaillierte Segmente erzeugen. Die Erweiterung **Unet++** wird in diesem Forschungsprojekt genutzt, da sie zusätzliche Skip-Verbindungen zwischen den Encoder- und Decoder-Ebenen enthält, wodurch die segmentierten Objekte präziser abgegrenzt werden können. Dies verbessert besonders bei komplexen und kleinteiligen Strukturen wie PV-Anlagen die Modellleistung. Für die Encoder-Architektur wird **ResNet34** verwendet, das vorgenutzt auf dem *ImageNet*-Datensatz implementiert wird. Die Eingangsbilder wurden entsprechend normalisiert, um die Farbwerte in ein einheitliches Spektrum zu bringen. Der Einsatz eines vorgenutzten Encoders erleichtert das Lernen und ermöglicht eine effizientere Erfassung der PV-Anlagen.

23.1.3. Bewertung der Modellergebnisse

Für die Bewertung des Modells während des Trainings wird der Dice-Loss verwendet. Dieser ist besonders vorteilhaft bei unbalancierten Datensätzen, wie es bei der Segmentierung von FF-PV und Dach-PV der Fall ist, da er die Überlappung zwischen den vorhergesagten und den tatsächlichen Segmentierungen direkt optimiert. Tabelle 23.1 zeigt die Ergebnisse des trainierten Segmentierungsmodells sowohl nach dem Basistraining als auch nach der Nachtrainingsphase, unterstützt durch die visuelle Darstellung in den Abbildungen 23.1 bis 23.3.

Die Accuracy (Genauigkeit) misst den Anteil der korrekt klassifizierten Pixel an der Gesamtanzahl der Pixel im Bild. Ein Wert von 99,46 % nach der Nachtrainingsphase zeigt,

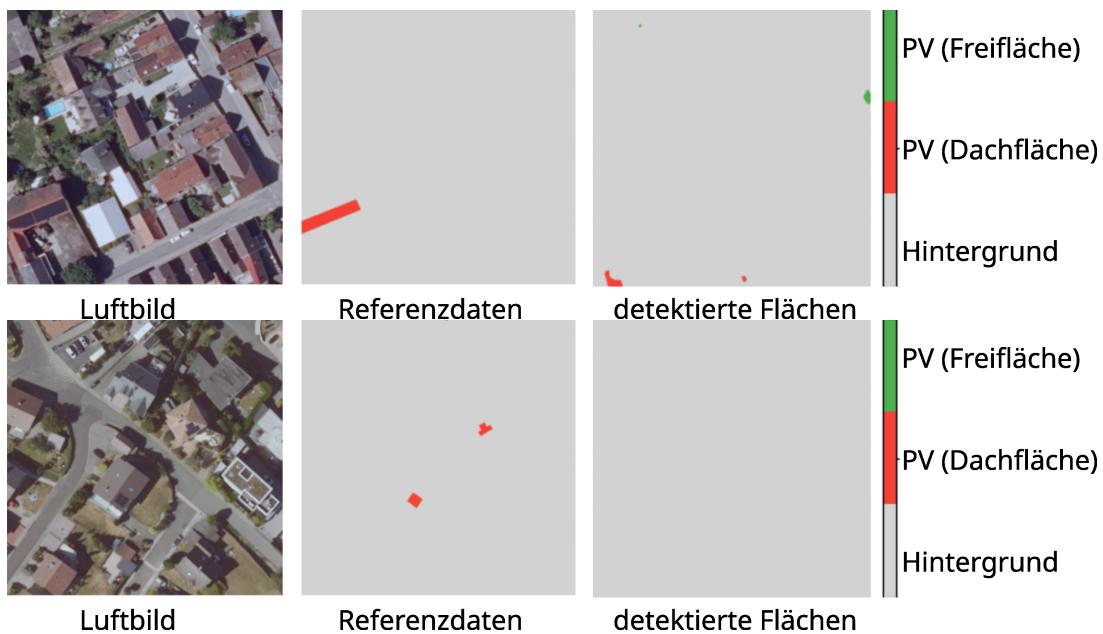


Abbildung 23.3.: Beispiele der PV-Detektion: Luftbild (links), Referenzdaten (mittig), automatisch detektierte Flächen (rechts). Die Erfassung von schmalen und kleinen Anlagen stellt eine Herausforderung dar.

Tabelle 23.1.: Ergebnisse des trainierten Segmentierungsmodells nach dem Basistraining und den Nachtrainingsphasen. Diese Ergebnisse zeigen die Leistungssteigerungen und -veränderungen, die durch das zusätzliche Training erreicht wurden. Die Evaluierung erfolgte jeweils auf den manuell gelabelten Daten aus Hessen.

Segmentierungsmetriken	Basistraining	Nachtraining I	Nachtraining II
Accuracy	0.9926	0.9941	0.9946
Balanced Accuracy	0.9278	0.9370	0.9501
Precision	0.8952	0.9096	0.9204
Recall	0.8903	0.9093	0.9281
IoU	0.8161	0.8423	0.8654
F1-Score	0.8923	0.9090	0.9242

dass das Modell insgesamt sehr gut darin ist, die Pixel korrekt zu klassifizieren. Allein diese Metrik zu betrachten, ist jedoch nicht immer ausreichend, insbesondere wenn die Häufigkeit der Klassen sehr unterschiedlich ausfällt, wie im Fall der PV-Anlagen. Zu einer besseren Interpretation der Leistungsfähigkeit des Klassifikators sollten daher weitere Metriken hinzugezogen werden:

Balancierte Genauigkeit (Balanced Accuracy) berücksichtigt das Ungleichgewicht in den Klassen und zeigt eine realistischere Bewertung. Mit einem Wert von 95,01 % ist sie dennoch sehr hoch.

Der F1-Score ist eine zentrale Metrik für die Bewertung der Modellleistung, da er das harmonische Mittel von Precision (Präzision) und Recall (Sensitivität) darstellt. Ein höherer F1-Score deutet auf ein gutes Gleichgewicht zwischen diesen beiden Metriken hin, was für eine zuverlässige Segmentierung von Bedeutung ist. Die Präzision ist ein Maß der Zu-

Tabelle 23.2.: Klassenweise Ergebnisse des finalen Modells. Diese Ergebnisse umfassen die Leistungskennzahlen für jede Klasse sowie den Durchschnitt über alle Klassen.

Metriken	Hintergrund	Dachflächen-PV	Freiflächenflächen-PV	Gesamt
Accuracy	0.9922	0.9970	0.9950	0.9946
Precision	0.9963	0.8413	0.9238	0.9204
Recall	0.9955	0.8480	0.9410	0.9281
IoU	0.9918	0.7311	0.8732	0.8654
F1-Score	0.9959	0.8446	0.9323	0.9242

verlässigkeit und gibt an, wie viele der detektierten Flächen tatsächlich PV-Flächen sind, während der Recall die Vollständigkeit angibt und jenen Anteil der PV-Flächen misst, die korrekt erkannt wurden. Die Intersection over Union (IoU) ist eine weitere kritische Metrik, welche das Verhältnis der Fläche, die von den als positiv klassifizierten Pixeln abgedeckt wird, zur Gesamtfläche der tatsächlichen positiven Pixel misst.

Der F1-Score von 92,42 % zeigt ein gutes Gleichgewicht zwischen Precision und Recall. Dies ist ein positives Zeichen dafür, dass das Modell in der Lage ist, sowohl die Relevanz als auch die Sensitivität in der Segmentierungsaufgabe zu wahren.

Bei einer detaillierten Betrachtung der Metriken anhand der Tabelle 23.2, getrennt nach den verschiedenen Klassen (Hintergrund, Dachflächen-PV und Freiflächen-PV) zeigt sich, dass das Modell sehr gute Ergebnisse bei der Erkennung des Hintergrunds sowie der FF-PV-Anlagen liefert. Besonders die Dachflächen-PV-Anlagen weisen jedoch noch Erweiterungspotenziale auf. Dies ist nachvollziehbar, da diese Klasse oft komplexe Strukturen und Variationen aufweist, die selbst für das menschliche Auge schwer zu erkennen sind. Insbesondere die Präzision und der IoU-Wert für diese Klasse zeigen, dass das Modell hier noch Schwierigkeiten hat, die PV-Anlagen präzise zu identifizieren und von anderen Objekten oder dem Hintergrund zu trennen.

23.1.4. Fazit zur KI-basierten Detektion von PV

In Summe ist festzuhalten, dass das entwickelte Verfahren in der Lage ist, den PV-Bestand aus Bild- und Oberflächendaten mit einer Zuverlässigkeit von circa **99,46 %** (Accuracy) und Vollständigkeit von circa **92,81 %** (Recall) zu erfassen. Auch die Unterscheidung der verschiedenen Arten von PV funktioniert mit der KI-basierten Detektion sehr zuverlässig aus den Befliegungsdaten. Zu beachten ist, dass es sich hierbei um Evaluierungsmaßnahmen für eine vollständig automatisierte Neu-Detektion aller bestehender PV-Anlagen aus Bilddaten handelt, ohne dass Zusatzinformationen aus anderen Datenquellen in die Ergebnisse eingeflossen sind.

Weiterhin finden diese Ergebnisse Eingang in die in Kapitel 7 gezeigten Methoden und Ergebnisse, um die Segmentierung von weiteren Landbedeckungsparametern wie Vegetation bzw. Vegetationswuchshöhen, Dächer mit PV und Versiegelungsflächen zu unterstützen.

24. Unterstützung der Energieeffizienten Siedlungsentwicklung durch FE

24.1. Einleitung

Den Abschluss der fernerkundungsbezogenen Projektarbeiten bilden die Untersuchungen, inwiefern FE-Daten und -Methoden zu Aspekten der energieeffizienten Siedlungsentwicklung beitragen können. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass FE auf der Skala der Stadtstrukturen, im Regelfall also basierend auf Luftbilddaten, grundsätzlich bestimmte Stärken hat, aber auch gewissen Limitierungen unterworfen ist. Als Vorteile lassen sich anführen, dass die Fernerkundung

- flächendeckende Analysen, wenn auch nur synoptisch, unterstützt;
- detaillierte 3D-Geometrien im Aufnahmezyklus der Luftbilder ableiten kann;
- detaillierte Analysen der sichtbaren Oberflächen, insbesondere bzgl. Versiegelung, Grünflächen, Vegetation, ermöglicht;
- weitere semantische Informationen, die nicht in Geofachdatenbanken verfügbar sind, ableiten kann, z. B. Fahrzeuge;
- Veränderungen durch Auswertung weiterer Befliegungen monitoren kann.

Die im Kontext der Fragestellung gegebenen Limitierungen sind, dass die FE

- keine Eigentumsgrenzen abbildet;
- räumlich keine ausreichend aufgelösten Temperaturdaten für entsprechend große Gebiete liefern kann;
- im Falle von Luftbildern weitestgehend Nadirsichten (d. h. senkrecht nach unten blickend) und nur wenig Schrägsichten auf Fassaden liefert;
- keine Information über das Innere von Gebäuden, v. a. Dämmung, Dachausbau, Wärmebedarf o. ä. liefern kann;
- keine ausreichend aufgelösten Daten aus tieferen Schichten, z. B. von begrünten Dächern oder Vorgärten, die auf den Wasserbedarf schließen lassen, erheben kann.

Vor dem Hintergrund dieser Gegenüberstellung ist die Leistungsfähigkeit der FE auch hinsichtlich der Unterstützung zur energieeffizienten Siedlungsentwicklung zu bewerten. Für diese Fragestellung wurden wichtige Teilbereiche im Laufe dieses Projekts erarbeitet, insbesondere die flächenmäßige, FE-gestützte Erhebung:

- der gesamten Dachflächen bzw. des existierenden PV-Bestandes auf Dächern,
- die FF-PV-Potenziale auf großen Parkplatzflächen in Siedlungen,
- sowie im Zuge der Potenzial- und Defizitanalyse von räumlichen Handlungsschwerpunkten die quantitative Ermittlung von versiegelten Flächen, Gebäude(dach)flächen im Vergleich zu teil- oder unversiegelten Flächen.

Ebenfalls von Relevanz sind die im Kapitel 10 definierten und mit Unterstützung von FE-Daten ermittelten SST, v. a. in Verbindung mit den Zensus-Daten über die Bevölkerungsdichte (siehe Kapitel 6). Das hiermit verbundene Umweltziel (üUZ6 - Forcierung von Synergien der Klimaanpassung mit der dreifachen Innenentwicklung und der energieeffizienten Siedlungsentwicklung) umfasst die Identifikation energieeffizienter Siedlungsstrukturen anhand der Kriterien Flächensparsamkeit und Kompaktheit der Bebauung bzw. Bebauungsdichte (siehe Kapitel 19). Sich daran orientierend wird in den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen der Grundsatzfrage nachgegangen, welche Möglichkeiten mittels Fernerkundungsmethoden bestehen, diese Kriterien flächendeckend transparent zu machen und relevante Indikatoren abzuleiten, die auf der Skala der SST eine energieeffiziente Siedlungsentwicklung unterstützen. In den beiden nachfolgenden Unterkapiteln wird zunächst auf die Parameter der Flächensparsamkeit und Bebauungsdichte eingegangen, bevor ein Konzept vorgestellt wird, wie auf Skala der Stadtstrukturen mittels GIS- und FE-gestützten Indikatoren eine Schnittstelle zu energetischen Stadtraumtypen geschaffen werden kann.

24.2. Analysen zur Flächensparsamkeit, Kompaktheit und Bebauungsdichte

Für die Erläuterung der Analysen zur Flächensparsamkeit und Bebauungsdichte wird auf die Daten der SST (vgl. Kapitel 10) sowie der räumlichen Handlungsschwerpunkte der Priorität 1 zurückgegriffen (vgl. Kapitel 14 und Kapitel 17). Für niedrigere Prioritäten lassen sich analoge Analysen erstellen.

Als Flächensparsamkeit wird hier zunächst die bebaute Fläche im Vergleich zur umgebenden Fläche verstanden. Der Bezug zur Anzahl an Bewohnern:innen folgt anschließend. Basierend auf der Potenzial- und Defizitanalyse der räumlichen Handlungsschwerpunkte ergibt sich für die Beispielgemeinden Frankfurt, Marburg, Waldeck und Witzenhausen die in Abbildung 24.1 dargestellte Verteilung an Grün-, Versiegelungs- und Dachflächen. Hierbei werden Dachflächen als ausreichend äquivalent mit Gebäudegrundflächen gesehen.

Das Zusammenspiel zwischen der so definierten Flächensparsamkeit mit der Bebauungsdichte ergibt sich durch die gemeinsame Analyse mit den jeweiligen SST. Betrachtet man die Flächensparsamkeit von Gebäuden, indem die bebaute Fläche aus den segmentierten Dachflächen abgeleitet wird, ergeben sich, wie zu erwarten war, die besten Werte für lockere Bebauungsformen (Ein- und Mehrfamilienhäuser) sowie teilweise auch Hochhäuser. Ebenso ist die Zeilenbebauung recht flächensparsam. Nimmt man noch Versiegelungsflächen als notwendige Erschließungsflächen hinzu, verstärkt sich dieses Bild. Insbesondere

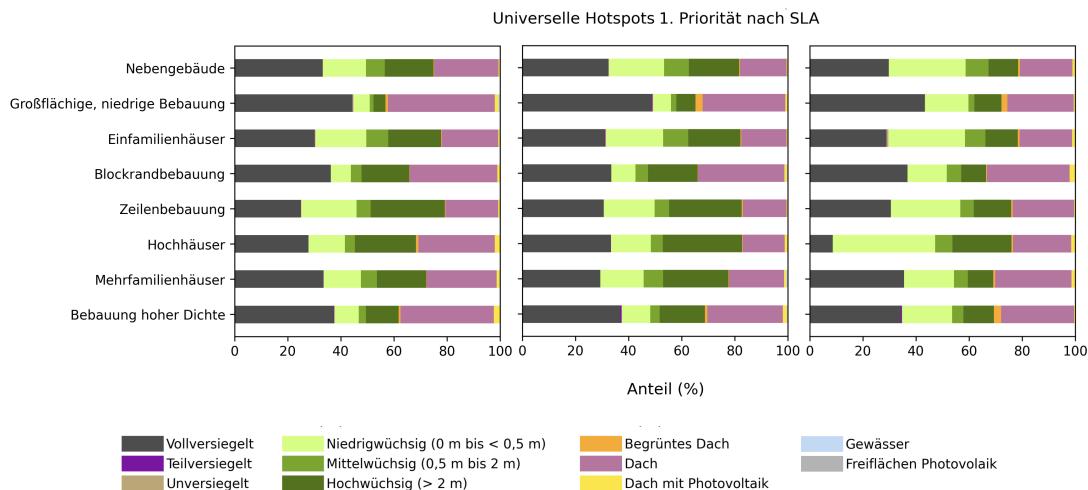


Abbildung 24.1.: Flächenanteile von SST in räumlichen Handlungsschwerpunkten mit Priorität 1 (universelle Hotspots): Frankfurt (links), Marburg (mittig) und Waldeck (rechts).

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.

Neben einer rein flächenbezogenen Betrachtung ermöglicht der in Abbildung 24.1 gezeigte Vergleich auch eine höhenbezogene (dreidimensionale) Analyse, da sowohl die SST als auch die Vegetationsklassen Höheninformation enthalten. So zeigt sich bspw. für nahezu alle SST (ggf. mit Ausnahme der beiden Typen zu großflächiger bzw. dichter Bebauung), dass in allen drei Beispielkommunen niedrige und mittelhohe Vegetation gegenüber hoher Vegetation deutlich überwiegt. Hier herrscht demnach ein Ansatzpunkt, um durch Anpflanzung hoher und dichter Vegetation mehr Grünvolumen zu generieren. Auch Anteile an teilversiegelten und unversiegelten unbewachsenen Flächen enthalten Potenzial für eine Erhöhung des Grünvolumens. Diese besitzen zwar gemessen an der Gesamtfläche nur kleine Anteile, können aber bei einer lokalen Betrachtung bspw. einzelner Quartiere stark an Bedeutung gewinnen.

Erweitert man die Betrachtungsweise um die Anzahl an Bewohnern:innen, die pro Flächeneinheit versorgt werden, nachfolgend der leichteren Unterscheidung wegen als **einwohnerbezogene Flächensparsamkeit bezeichnet**, verändert sich das Bild. Auch hierfür geben die SST wichtige Anhaltspunkte. Nicht verwunderlich nehmen dann isoliert stehende Hochhäuser ein sehr günstiges Verhältnis von Gebäude- und Versiegelungsflächen pro Einwohner:innen an und erlauben gleichzeitig viele Grünflächen. Kleinere Gebäude mit wenigen Bewohnern:innen, insbesondere Einfamilienhäuser, sind dagegen besonders ungünstig. Eine Integration der Bevölkerungsdichte aus Zensus-Daten in diese Auswertung komplettiert das Bild.

Abbildung 24.2 zeigt die Überlagerung der klassifizierten SST mit den Daten der Bevölkerungsdichte des Zensus 2022 in 100 m-Gitterzellen eines Teilbereichs von Dietzenbach.

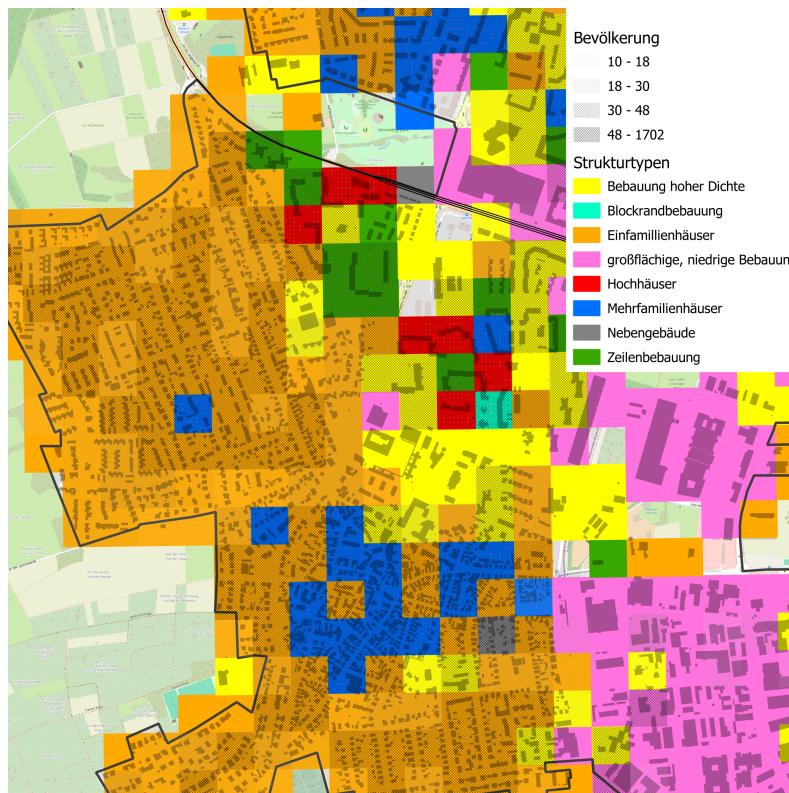


Abbildung 24.2.: Darstellung von Einwohnerdichte und SST in einem Teilbereich von Dietzenbach.

Dunklere Grautöne symbolisieren eine höhere Bevölkerungsdichte. Deutlich zu erkennen sind die hohen Bevölkerungszahlen im mittleren Bildbereich sowie die südwestlich unmittelbar angrenzenden Bereiche mit deutlich geringerer Bevölkerungsdichte aufgrund der in diesem Fall vorhandenen Schul- und Funktionsbauten.

Grundsätzlich von Interesse für die energieeffiziente Siedlungsentwicklung ist die Bebauungsdichte, die den Anteil überbauter Fläche darstellt. In der folgenden Abbildung 24.3 wird für die Gemeinde Dietzenbach die Bebauungsdichte in 100 m-Gitterzellen gezeigt. Deutlich hervortreten die historischen Ortslagen und die Bereiche mit industrieller oder gewerblicher Nutzung mit Dichten von bis zu 93%. Zudem zeichnen sich die recht geringen Dichten in einigen Einfamilienhausgebieten ab.

Ein weiterer wichtiger 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). Ein geringes A/V-Verhältnis ist demnach besonders günstig.

In Abbildung 24.4 wird die Auswertung der Kompaktheit von Gebäuden mit der einwohnerbezogenen Flächensparsamkeit in 100 m-Gitterzellen für das Beispiel der Gemeinde Dietzenbach gegenübergestellt. Eine hellere Einfärbung bedeutet eine günstigere Flächensparsamkeit und Kompaktheit. Deutlich sieht man die Korrelation der beiden Parameter im zentralen Bereich der Ortslage, in der man - wie auch in Abbildung 24.2 visualisiert -

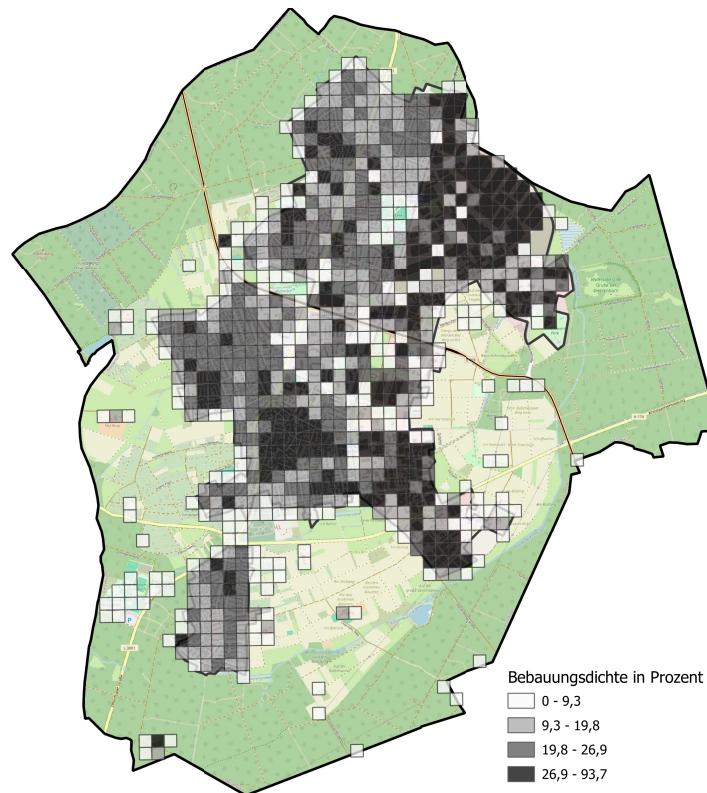


Abbildung 24.3.: Darstellung der Bebauungsdichte [Prozent bebauter Fläche einer 100 m-Gitterzelle] in Dietzenbach nach Quartilen.

eine große Bevölkerungsdichte sowie die für innerstädtische Bereiche typischen kompakten Bebauungsformen vorfindet.

Am Industriegebiet im südöstlichen Teil der Ortslage erkennt man, dass eine Korrelation zwischen einwohnerbezogener Flächensparsamkeit und Kompaktheit nicht immer gegeben sein muss. Die Gebäudeformen sind in Einkaufs- und Industriegebieten häufig bewusst kompakt, d. h. energieeffizient optimiert, errichtet. Die Flächensparsamkeit ist jedoch ungünstig, da dort große Bauten in Kombination mit einer niedrigen Bevölkerungsdichte vorherrschen. In einer umfassenderen Analyse müssen solche Auswertungen jedoch noch um weitere Aspekte ergänzt werden. Insbesondere Daten zur Arbeitsplatz- oder Besuchendenanzahl (tagsüber), die in den verwendeten Zensus-Daten nicht vorliegen, sind ein wichtiger Baustein für eine Gesamtanalyse.

In Summe lässt sich festhalten, dass GIS- und FE-gestützte Analysen in der Lage sind, eine ausreichend gute geometrische Beschreibung der Bebauung zu liefern. Thematische Auswertungen zu Versiegelungs- und Grünflächen sowie die Integration von Zensus-Daten ergänzen die Aussagekraft der geometrischen Analyse. Andere Parameter, die z. B. die potenzielle Energienachfrage der Einwohner:innen oder die Energieeffizienz der Baustruktur erfassen, müssen jedoch aus anderen Datenquellen hinzugezogen werden. Hierauf wird im folgenden Kapitel eingegangen.

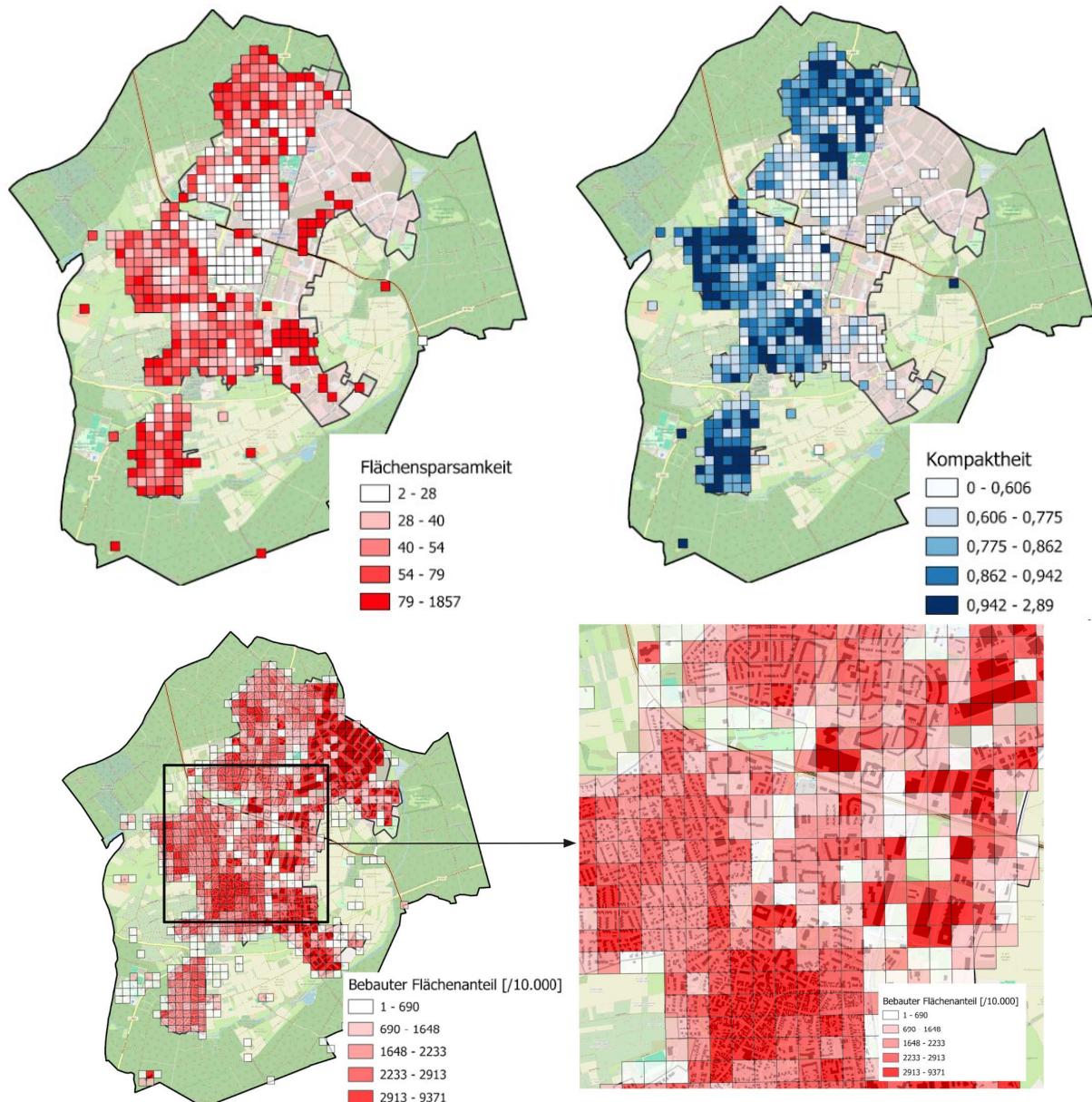


Abbildung 24.4.: Gesamträumliche Auswertung der Flächensparsamkeit [Grundfläche aller Gebäude in qm/Einwohner:in] bezogen auf eine 100 m-Gitterzelle (oben links), der Kompaktheit der Bebauung [mittl. Gebäudehüllfläche/Grundfläche in $m^2 m^{-3}$] pro Gitterzelle (oben rechts) sowie des Anteils der bebauten Fläche [bebaute Fläche pro Gitterzelle in $m^2 ha^{-1}$] (unten) für die Gemeinde Dietzenbach im Jahr 2022.

24.3. Verknüpfung von FE und energetischen Stadtraumtypen

Die nachfolgend vorgestellte Arbeit adressiert die Schnittstelle zwischen Daten, die mittels FE- und GIS-Analysen erhoben werden können, mit sog. energetischen Stadtraumtypen. Wie die Bezeichnung vermuten lässt, werden für die Abgrenzung dieser Stadtraumtypen auch energetische Gesichtspunkte herangezogen, wohingegen die in diesem Projekt verwendeten SST mehr unter strukturellen bzw. geometrischen Gesichtspunkten definiert sind.

Das Konzept der energetischen Stadtraumtypen wird in [26] aufgegriffen. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich eine Stadt aus unterschiedlichen „Stadtbausteinen“ zusammensetzt. Stadtbausteine können zum einen herausstechende Einzelemente wie z. B. Kirchen o. ä. sein, oder Wasserflächen oder verschiedene Stadtraumtypen. Stadtraumtypen stellen eine Abstraktion von Bereichen innerhalb einer Stadt dar, innerhalb derer vergleichbare Bedingungen herrschen. Dies geschieht unter der Annahme, dass Siedlungsräume in Deutschland eine städtebaulich ähnliche Entwicklung durchlaufen haben. Innerhalb von Stadtraumtypen treten homogene und wiederkehrende bauliche, freiräumliche und technische Gegebenheiten auf, sodass sich hierüber unterschiedliche Stadtraumtypen abgrenzen lassen. Das bedeutet z. B., dass eine Bilanzierung von Bedarfen oder Potenzialen für einen Stadtraumtyp in einer ausgewählten Stadt eine repräsentative Aussage für andere Gebiete (ggf. in anderen Städten), die dem gleichen Stadtraumtyp angehören, erlauben soll. Für eine energetische Stadtraumentwicklung stellen [26] insgesamt zehn Stadtraumtypen, teils mit Unterkategorien, zusammen Abb. 24.5.

- Energetische Stadtraumtypen mit überwiegender Wohnnutzung**
 - EST1 – kleinteilige, freistehende Wohnbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit
 - EST2 – Reihenhausbebauung
 - EST3 – Zeilenbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit
 - EST4 – großmaßstäbliche Wohnbebauung hoher Geschossigkeit
 - EST5 – Blockrandbebauung
- Energetische Stadtraumtypen mit überwiegender Mischnutzung**
 - EST6 – dörfliche Bebauung
 - EST7 – historische Altstadtbebauung
 - EST8 – Innenstadtbebauung
- Energetische Stadtraumtypen mit überwiegender Büro- und gewerblicher Nutzung**
 - EST9 – Geschäfts-, Büro- und Verwaltungsgebiet
 - EST10 – Gewerbegebiet

Abbildung 24.5.: Definition der energetischen Stadtraumtypen (EST) aus [26].

Im Rahmen von relativ groß angelegten empirischen Untersuchungen wurden für jeden Stadtraumtyp sog. energetische Steckbriefe erhoben. Diese Steckbriefe umfassen einerseits bauliche und nutzungsbezogene Parameter, die Größen wie bauliche Dichte, Blockgröße, Parzellenform, Nutzungsverteilung, Gebäudegeometrie und den Gebäudetyp beschreiben und dazu statistische Größen wie Median und Spannweite angeben. Andererseits wurden korrespondierende energetische Kenngrößen für jeden Stadtraumtyp erfasst, die Potenziale

und Bedarfe für die Energieträger Strom, Wärme und Warmwasser quantifizieren. Die Potenziale werden zudem noch feiner aufgegliedert in unterschiedliche Systeme, wie PV, Solarthermie, Wärmepumpen usw. Gleichermaßen gilt für die Bedarfe, die in Abhängigkeit von Baualtersklassen und Sanierungsstufen aufgeschlüsselt werden. Abb. 24.6 illustriert eine dieser Übersichten an Bedarfen und Potenzialen aus [26] für das Beispiel des energetischen Stadtraumtyps EST 1 (kleinteilige, freistehende Wohnbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit).

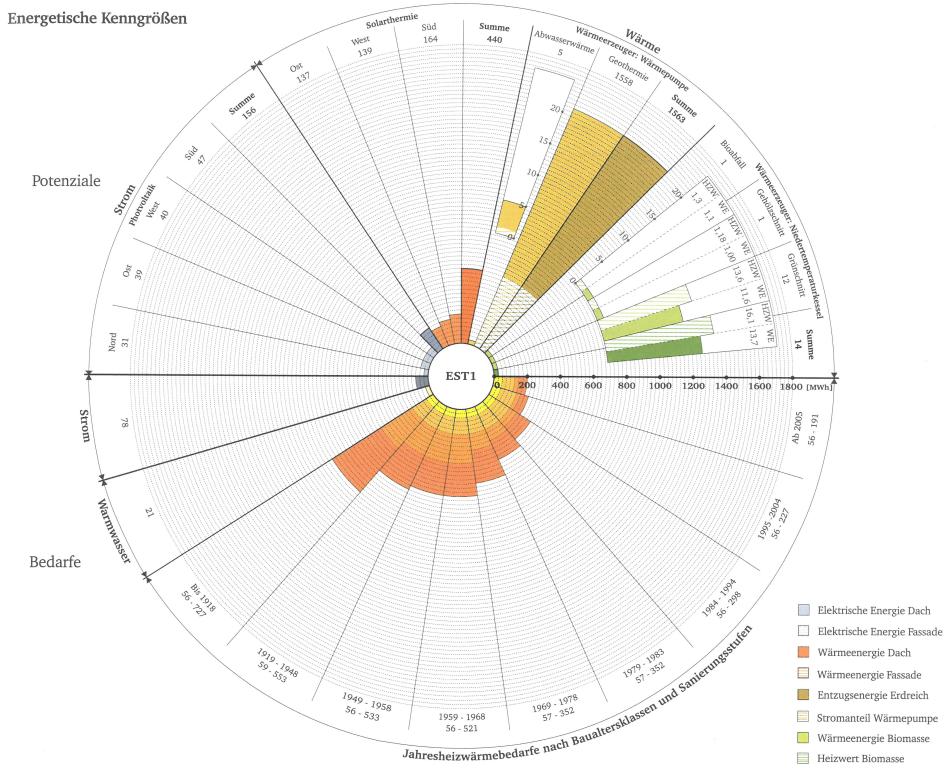


Abbildung 24.6.: Beispiel für die Zusammenstellung energetische Kenngrößen aus [26] für EST 1 (kleinteilige, freistehende Wohnbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit).

Das im Folgenden vorgeschlagene Konzept stellt eine Verknüpfung von wichtigen energetischen Stadtraumtypen aus [26] mit den in diesem Projekt erhobenen Daten auf Skala der SST dar. Abbildung 24.7 zeigt den grundsätzlichen Ablauf.

Grundlage dieser Schnittstelle sind die in Kapitel 10 definierten und durch einen KI-Ansatz gefundene SST. Wie auch aus Abb. 24.5 ersichtlich ist, lässt sich für die SST Einfamilienhäuser, Zeilenbebauung, Blockrandbebauung, Hochhäuser sowie Gewerbegebäuden (niedrige, großflächige Bebauung) eine gute Übereinstimmung mit den Energetischen Stadtraumtypen (EST) 1, 3, 5, 4, 10 identifizieren, vgl. Abbildung 24.8. Die Zuweisung von Mehrfamilienhäusern ist nur approximativ möglich (hier EST 2).

Grundsätzlich können hiermit die energetischen Steckbriefe aus [26] auch für die o. g. SST übernommen werden, wie dies auf der linken Seite von Abb. 24.7 skizziert ist. Um diese Übertragbarkeit zu plausibilisieren, wird vorgeschlagen, noch weitere Parameter hinzuzuziehen, die sowohl für die SST als auch für die EST vorliegen oder berechnet werden

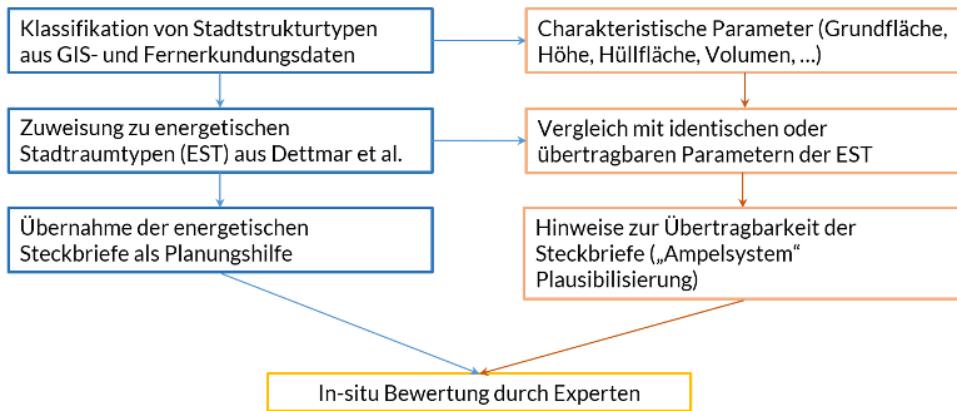


Abbildung 24.7.: Konzept zur Verknüpfung von SST mit energetischen Stadttraumtypen (links) und Plausibilisierung anhand von Parametern (rechts).

können. Dies ist insbesondere unter dem Blickwinkel zu sehen, dass nicht nur die Zuweisung von SST und EST gewissen Unschärfen unterworfen ist, sondern auch die automatisierte Klassifikation der SST aus Kapitel 10. Wie die rechte Seite von Abbildung 24.7 illustriert, werden die jeweils aus SST und EST extrahierten Parameter miteinander verglichen und die Betragsdifferenz in Form eines Ampelsystems ausgegeben, welches die Übereinstimmung der Parameter symbolisiert.



Abbildung 24.8.: Zuweisung von SST (links, inkl. Bildbeispiele) zu einer Auswahl an energetischen Stadttraumtypen (EST, rechts): In einigen Fällen unterscheiden sich die Definitionen, so dass grundlegend nur approximative Zuweisungen möglich sind.

Somit kann zur energetischen Siedlungsentwicklung ein automatisierter Hinweis gegeben werden, ob ein energetischer Steckbrief auf ein zu analysierendes Gebiet eines SST übertragen werden kann oder nicht. Da die zugrundeliegenden Klassifikationen und Zuweisungen genauso wie die Steckbrieferstellung mit Unsicherheiten verbunden sind, sollte jedoch in jedem Fall eine in-situ-Bewertung durch Experten:innen erfolgen.

Die skizzierte Vorgehensweise ist für eine Beispielfläche aus Wiesbaden für vier Gitterzellen exemplarisch vorgestellt (vgl. Abbildung 24.9, Abbildung 24.10 und Abbildung 24.11). Für jede Gitterzelle wird zunächst der vorherrschende SST ermittelt. Wie in Abb. 24.9 symbolisiert, handelt es sich in diesem Beispiel um je zwei Gitterzellen für Zeilenbebauung und für Mehrfamilienhäuser.

Als vergleichende Parameter wurden

- die Gebäudegrundfläche
- die Geschossflächenanzahl (für jeden SST aus Gebäudehöhe errechnet)
- die Kompaktheit, d. h. das Verhältnis zwischen Hüllfläche und Volumen (A/V-Verhältnis)

verwendet. Die Parameter basieren auf den in Kapitel 10 vorgestellten Metriken. Bei der Geschossflächenanzahl handelt es sich um einen Schätzwert, der empirisch aus der Gebäudehöhe für typische Geschoss- und Dachhöhen abgeleitet wurde und nur für Wohngebäude wie in diesem Beispiel anwendbar ist [34].

Zusätzlich wurde aus den Zensus-Daten 2022 als weitere Plausibilisierung und zur Abschätzung der betroffenen Einwohner:innen noch die Bevölkerungsanzahl hinzugezogen. Für die Differenzberechnung wurde jeweils der Median aus [26] und der entsprechende Wert aus den Gitterzellen der SST entnommen.

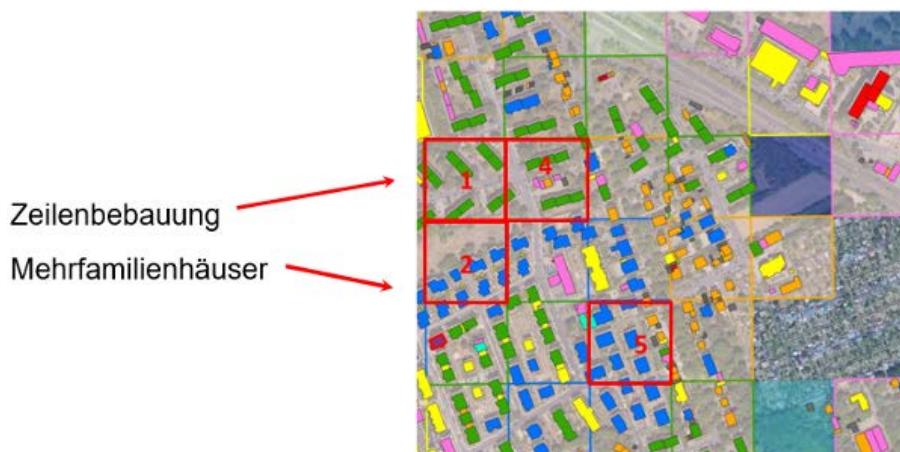


Abbildung 24.9.: Beispiel für klassifizierten SST (100 m-Kacheln): Zeilenbebauung (Gitterzellen 1 und 4), Mehrfamilienhäuser (Gitterzellen 2 und 5).

Test auf Kongruenz oder Abweichung		
Zeilenbebauung:	Kachel 1	Kachel 4
Gebäudegrundfläche: (Median Dettmar et al.: 155 m ²)	161,5	139,2
Geschossflächen: (Median Dettmar et al.: 4)	4	3,1
A/V-Verhältnis: (Median Dettmar et al.: 0,41 m ³ /m ²)	0,45	0,49
Bevölkerungsanzahl	120	83



Abbildung 24.10.: Auswertung Zeilenbebauung: Gitterzelle 1 weist in allen Parametern eine gute Übereinstimmung vor, Gitterzelle 4 annähernd.

Die exemplarische Auswertung für die Zeilenbebauung Abbildung 24.10 zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den Parameterwerten, sodass für diese beiden Gitterzellen eine Übertragung der energetischen Steckbriefe als plausibel erscheint. Für die Beispiele der Mehrfamilienhäuser ergeben sich tendenziell etwas größere Abweichungen (siehe Abbildung 24.11). Dies unterstreicht die obige Einschätzung, dass eine Zuweisung des SST Mehrfamilienhäuser zu EST 2 und damit eine Übertragung der energetischen Steckbriefe zwar nicht abwegig ist, aber überlegt vorgenommen werden sollte.

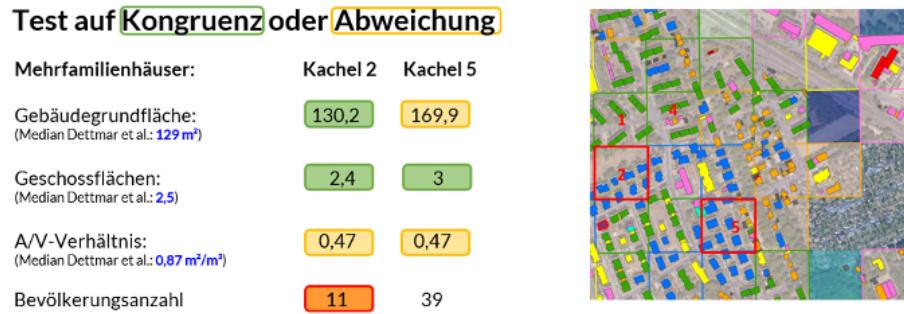


Abbildung 24.11.: Auswertung Mehrfamilienhäuser: Gitterzelle 2 weist annähernde Übereinstimmung in den Parametern vor, Gitterzelle 5 weniger gut. Die Bevölkerungsanzahl in Zelle 2 ist gemessen an der Gebäudeanzahl nicht plausibel.

24.4. Fazit

Als Fazit ist festzuhalten, dass Informationen, die über eine Auswertung von FE- oder GIS-Daten erfolgen, eine Unterstützung in der energieeffizienten Siedlungsentwicklung sein können. Der Hauptnutzen kommt v. a. dann zum Tragen, wenn geometrische oder semantische Informationen über die Bilddaten der (sichtbaren) Oberfläche abgeleitet werden sollen. Dies konnte an den Beispielen zur Bestandsanalyse von Dach-PV, der Potenzialanalyse von FF-PV über großen Parkplätzen in Siedlungsgebieten sowie letztlich auch durch die FF-PV-Potenzialanalyse entlang von Infrastrukturkorridoren eindrücklich nachgewiesen werden.

Ebenso lassen sich aus Luftbilddaten zuverlässig Gebäude- bzw. Dachflächen sowie Versiegelungs- und Grünflächen verschiedener Ausprägung ableiten, die weitere Analysen auf Skala der SST erlauben. So lässt sich daraus bspw. der Flächenverbrauch von Gebäuden und der umgebenden Versiegelungsflächen bestimmen.

Weitergehende Informationen über Energiebedarfe und –Potenziale im Rahmen einer energieeffizienten Siedlungsentwicklung können jedoch nur unter Integration weiterer Datenquellen, die v. a. energetische umfassen, abgeleitet werden. Hierzu konnte im Rahmen der oben ausgeführten, exemplarischen Studie ein Konzeptvorschlag erstellt werden, der die FE- und GIS-basierte Bestimmung und Auswertung von SST mit energetischen Stadtraumtypen verknüpft. Die Machbarkeit konnte anhand von Beispielen nachgewiesen werden. Festzuhalten bleibt jedoch auch, dass der zusätzliche Nutzen von FE-Daten für solche Ansätze im Vergleich zu den zuvor vorgestellten FF-PV-Analysen geringer ist.

Literatur

- [1] Deutscher Wetterdienst (DWD). *INKAS: Informationsportal Klimaanpassung in Städten*. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/inkas/inkasstart.html>. 2023. URL: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/inkas/inkasstart.html>.
- [2] BLAG ALFFA. *Wälder und ihre Bewirtschaftung im Klimawandel*. Techn. Ber. Bund-Länder-Arbeitsgruppe Klimaschutz und Klimaanpassung in Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur, 2023. URL: <https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/BLAG-ALFFA/Waelder-und-ihre-Bewirtschaftung-im-Klimawandel.pdf>.
- [3] Armando Apan et al. „Detecting sugarcane ‘orange rust’ disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery“. In: *International Journal of Remote Sensing* 25.2 (Jan. 2004), S. 489–498. ISSN: 1366-5901. DOI: 10.1080/01431160310001618031. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160310001618031>.
- [4] Farshid Aram et al. „Urban green space cooling effect in cities“. In: *Helijon* 5.4 (Apr. 2019), e01339. ISSN: 24058440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01339. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844019300702> (besucht am 12.12.2023).
- [5] Juliana Azevedo, Lee Chapman und Catherine Muller. „Quantifying the Daytime and Night-Time Urban Heat Island in Birmingham, UK: A Comparison of Satellite Derived Land Surface Temperature and High Resolution Air Temperature Observations“. In: *Remote Sensing* 8.2 (Feb. 2016), S. 153. DOI: 10.3390/rs8020153. URL: <https://doi.org/10.3390/rs8020153>.
- [6] Björn Beerman et al. *Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung für die Stadt Karlsruhe (Teil II)*. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), 2014.
- [7] Björn Beermann et al. *Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung für die Stadt Karlsruhe (Teil II)*. Techn. Ber. Karlsruhe, Deutschland: LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2014. URL: <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/>.
- [8] Jan Benden et al. *Multifunktionale-Retentionsflächen. Teil 3: Arbeitshilfe für Planung, Umsetzung und Betrieb*. Techn. Ber. Köln, Deutschland: MURIEL Publikation, 2017. URL: <https://epflicht.ulb.uni-bonn.de/content/titleinfo/462677>.
- [9] Filip Biljecki und Yoong Shin Chow. „Global Building Morphology Indicators“. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 95 (2022). DOI: 10.1016/j.comenvurbssys.2022.101809.

- [10] Joern Birkmann, Hans Sauter und Matthias Garschagen. „New methods for local vulnerability scenarios to heat stress to inform urban planning—case study City of Ludwigsburg/Germany“. In: *Climatic Change* 166.1 (2021), S. 1–19.
- [11] BlueGreenStreets. *BlueGreenStreets Toolbox – Teil A. Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere*. Techn. Ber. Erstellt im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft“ (RES:Z). Hamburg: BMBF, FONA, 2022. URL: www.hcu-hamburg.de/bluegreenstreets.
- [12] BlueGreenStreets. *BlueGreenStreets Toolbox – Teil B. Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere*. Techn. Ber. Erstellt im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft“ (RES:Z). Hamburg: BMBF, FONA, 2022. URL: www.hcu-hamburg.de/bluegreenstreets.
- [13] BMUV. *Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel 2024 (DAS 2024)*. Techn. Ber. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), 2024. URL: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaanpassung/das_2024_strategie_bf.pdf.
- [14] Denise Böhnke und Stefan Norra. „Stadtquartiere im Wandel, Kommunales Niederschlagsmanagement in Bestand und Neubau – Erkenntnisse praxisnaher Forschung“. In: *Transforming cities* 3 (2021), S. 34–39.
- [15] Denise Böhnke et al., Hrsg. *Grünbestände in privaten Innenhöfen und deren Ökosystemleistungen im Stadtquartier*. Berlin, Deutschland: Rhombos-Verlag, 2021, S. 149–157.
- [16] Denise Böhnke et al. „Mapping Urban Green and Its Ecosystem Services at Microscale—A Methodological Approach for Climate Adaptation and Biodiversity“. In: *Sustainability* 14.15 (2022), S. 1–28. DOI: [10.3390/su14159029](https://doi.org/10.3390/su14159029).
- [17] Denise Heike Böhnke und Madita Elisa und Walter. *Übersicht der Maßnahmentypen zur Klimaanpassung in der räumlichen Gesamtplanung mittels Fernerkundung_Juni-2025*. Dataset, veröffentlicht auf KITopen, CC BY-NC-ND 4.0. 2025. DOI: [10.35097/fsrxsf86r6v7m7vh](https://doi.org/10.35097/fsrxsf86r6v7m7vh). URL: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000182654>.
- [18] Janine Bolliger und Janet Silbernagel. „Contribution of Connectivity Assessments to Green Infrastructure (GI)“. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9.4 (30. März 2020), S. 212. ISSN: 2220-9964. DOI: [10.3390/ijgi9040212](https://doi.org/10.3390/ijgi9040212). URL: <https://www.mdpi.com/2220-9964/9/4/212> (besucht am 30.10.2023).
- [19] Nick Brooks. „Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework“. In: *Tyndall Centre Working Paper* 38 (2003).
- [20] Statistische Ämter des Bundes und der Länder. *Zensus 2022*. 2024. URL: <https://atlas.zensus2022.de/>.
- [21] TC Chakraborty et al. „On the land emissivity assumption and Landsat-derived surface urban heat islands: A global analysis“. In: *Remote Sensing of Environment* 265 (Nov. 2021), S. 112682. DOI: [10.1016/j.rse.2021.112682](https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112682). URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112682>.
- [22] Liang-Chieh Chen et al. „Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation“. In: *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*. 2018, S. 801–818.

- [23] Tianqi Chen und Carlos Guestrin. „XGBoost: A Scalable Tree Boosting System“. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (2016). URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:4650265>.
- [24] Lisa Deister et al. *Wassersensible Stadt- und Freiraumplanung*. Techn. Ber. Stuttgart, Deutschland: Universität Stuttgart, Institut für Landschaftsplanung und Ökologie, 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-9319>.
- [25] Matthias Demuzere et al. „Combining expert and crowd-sourced training data to map urban form and functions for the continental US“. In: *Scientific Data* 7.1 (Aug. 2020). DOI: 10.1038/s41597-020-00605-z. URL: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00605-z>.
- [26] Jörg Dettmar, Christoph Drebes und Sandra Sieber. *Energetische Stadtraumtypen: strukturelle und energetische Kennwerte von Stadträumen*. Fraunhofer IRB Verlag, 2020.
- [27] Abwasser und Abfall e. V. (DWA) Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft. *Arbeitsblatt DWA-A 138: Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser*. Techn. Ber. <https://de.dwa.de/de/regelwerk-news-volltext/entwurf-arbeitsblatt-dwa-a-138-1-anlagen-zur-versickerung-von-niederschlagswasser-teil-1-planung-bau-betrieb.html>. Hennef, Deutschland: DWA, 2005.
- [28] Jianquan Dong et al. „Heatwave-induced human health risk assessment in megacities based on heat stress-social vulnerability-human exposure framework“. In: *Landscape and Urban Planning* 203 (2020), S. 103907. ISSN: 0169-2046. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103907>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204619316767>.
- [29] Wilfried Endlicher. „Stadtnatur für die Anpassung an den Klimawandel 4“. In: *Ökosystemleistungen und deren Inwertsetzung in urbanen Räumen* (2018), S. 23.
- [30] Annett Frick et al. „Wo fehlt Grün? – Defizitanalyse von Grünvolumen in Städten“. In: (2020).
- [31] Léo Grinsztajn, Edouard Oyallon und Gaël Varoquaux. *Why do tree-based models still outperform deep learning on tabular data?* 2022. arXiv: 2207.08815 [cs.LG]. URL: <https://arxiv.org/abs/2207.08815>.
- [32] Neha Gupta, Aneesh Mathew und Sumit Khandelwal. „Analysis of cooling effect of water bodies on land surface temperature in nearby region: A case study of Ahmedabad and Chandigarh cities in India“. In: *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 22.1 (2019), S. 81–93.
- [33] Robert Hecht. *Automatische Klassifizierung von Gebäudegrundrissen: ein Beitrag zur kleinräumigen Beschreibung der Siedlungsstruktur*. IÖR-Schriften 63. Berlin: Rhombos-Verl, 2014. 412 S. ISBN: 978-3-944101-63-7.
- [34] Robert Hecht et al. „Mapping long-term dynamics of population and dwellings based on a multi-temporal analysis of urban morphologies“. In: *International Journal of Geo-Information* (2019). DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi8010002>.

- [35] Umwelt und Geologie (HLNUG) Hessisches Landesamt für Naturschutz. *Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie in Hessen Bewirtschaftungsplan 2021-2027*. Hrsg. von Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV). Wiesbaden, 2021.
- [36] Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. *KLIMAPLAN HESSEN - Auf dem Weg zur Klimaneutralität*. report. Abschlussbericht, online verfügbar. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2023, S. 76. URL: https://landwirtschaft.hessen.de/sites/landwirtschaft.hessen.de/files/2023-03/der_klimaplan_hessen_barrierefrei.pdf.
- [37] Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. *Zukunftsplan Wasser: Wasserwirtschaftlicher Fachplan Hessen*. Zugriff am 07. November 2024. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2022. URL: https://hessen.de/sites/hessen.hessen.de/files/2022-10/zukunftsplan_wasser.pdf.
- [38] HLNUG. *Handlungsleitfaden zur kommunalen Klimaanpassung in Hessen: Hitze und Gesundheit, KLIMPRAX Stadtklima*. Hrsg. von Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. 2019.
- [39] HLNUG. *Hitze in der Stadt und kommunale Planung: Klimawandel in Hessen — Schwerpunktthema*. Hrsg. von Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie und Fachzentrum Klimawandel Hessen. 2017.
- [40] HMLU. *Versickerung, Retention und Verdunstung als Beitrag zur wassersensiblen Siedlungsentwicklung. Leitfaden*. Techn. Ber. Wiesbaden, Deutschland: Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat, Hessen, 2022. URL: https://landwirtschaft.hessen.de/sites/landwirtschaft.hessen.de/files/2024-08/leitfaden_wassersensible_siedlungsentwicklung_stand_240724_0.pdf.
- [41] Gao Huang et al. „Densely connected convolutional networks“. In: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2017, S. 4700–4708.
- [42] Pavel Iakubovskii. *Segmentation Models Pytorch*. https://github.com/qubvel/segmentation_models.pytorch. 2019.
- [43] Mathias Jehling und Robert Hecht. „Do land policies make a difference? A data-driven approach to trace effects on urban form in France and Germany“. In: *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science* 49.1 (Jan. 2022), S. 114–130. ISSN: 2399-8083, 2399-8091. DOI: 10.1177/2399808321995818. URL: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2399808321995818> (besucht am 04.02.2022).
- [44] Laurence Jones et al. „A typology for urban Green Infrastructure to guide multifunctional planning of nature-based solutions“. In: *Nature-Based Solutions* 2 (1. Dez. 2022), S. 100041. ISSN: 2772-4115. DOI: 10.1016/j.nbsj.2022.100041. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772411522000337> (besucht am 04.01.2023).

- [45] Stadt Karlsruhe. *Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung. Anpassungskomplex "Hitze"*. Techn. Ber. Karlsruhe, Deutschland: Stadt Karlsruhe, 2014. URL: <https://www.karlsruhe.de/mobilitaet-stadtspiel/stadtplanung/staedtebauliche-projekte/klimaanpassungsplan>.
- [46] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. *3D-Gebäudemodelle LoD2 Deutschland (LoD2-DE)*. 2024. URL: <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/3d-gebaudemodelle-lod2-deutschland-lod2-de.html> (besucht am 07.11.2024).
- [47] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. *Points of Interest Open (POI-Open)*. Version 2023. 2024. URL: <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/points-of-interest-open-poi-open.html>.
- [48] Annika T H Keeley, Paul Beier und Jeff S Jenness. „Connectivity metrics for conservation planning and monitoring“. In: *Biological Conservation* 255 (März 2021), S. 109008. ISSN: 00063207. DOI: 10.1016/j.biocon.2021.109008. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0006320721000604> (besucht am 10.10.2023).
- [49] Sina Keller. „Fusion hyperspektraler, LWIR- und Bodenradar-Daten mit maschinellen Lernverfahren zur Bodenfeuchteschätzung“. In: *Digitale Bildverarbeitung und Geoinformation. Datenfusion unter geometrischen, physikalischen und semantischen Aspekten*. Hrsg.: S. Hinz. Wichmann, Berlin, 2019, S. 217–250. ISBN: 978-3-87907-638-3.
- [50] Sina Keller. „Konzeption und Einsatz Maschineller Lernverfahren zur Schätzung physikalischer Größen aus heterogenen Daten der Geoinformation“. Deutsch und Englisch. Habilitation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2023. 267 S.
- [51] Sina Keller et al. *Entwicklung von Planungshilfen für Klimaschutz und Klimaanpassung in der räumlichen Gesamtplanung mittels Fernerkundung - Abschlussbericht*. KITopen, 2025.
- [52] Sina Keller et al. „Modeling Subsurface Soil Moisture based on Hyperspectral Data: First Results of a Multilateral Field Campaign“. In: *Tagungsband der Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie* 37 (2018), S. 34–48.
- [53] Christine Ketterer et al. *Erstellung Einer Landesweiten Klimaanalyse/ Kaltluftströmungssituation Unter Berücksichtigung Des Klimawandelbedingten Temperaturanstiegs*. Abschlussbericht. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen, 2022, S. 116.
- [54] Roland Kraemer und Nadja Kabisch. „Parks under stress: Air temperature regulation of urban green spaces under conditions of drought and summer heat“. In: *Frontiers in Environmental Science* 10 (2022), S. 849965.
- [55] Svea Krikau und Susanne Benz. „Zeitliche und räumliche Muster von Hitzeextremen in Hessen, Deutschland“. Zur Veröffentlichung in Environmental Research Communications angenommen. 2025. eprint: ERC-103181.R2.
- [56] Wilhelm Kuttler. „Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 2, Maßnahmen“. In: *Environmental Sciences Europe* 23.21 (2011). DOI: 10.1186/2190-4715-23-21.
- [57] LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH. *Potenzialstudie Photovoltaik für Hessen – Endbericht*. Zugriff am 13.06.2025. LEA Hessen GmbH. 2022. URL: <https://www.lea-hessen.de/mediathek/publikationen/4093>.

- [58] LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH. *Solar-Kataster Hessen*. Zugriff am 30. Januar 2025. 2025. URL: <https://www.lea-hessen.de/buergerinnen-und-buerger/sonnenenergie-nutzen/solar-kataster-hessen/>.
- [59] *Leitfaden Versickerung, Retention und Verdunstung als Beitrag zur wassersensiblen Siedlungsentwicklung*. Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat (HMLU) und Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum (HMWVW), 2022.
- [60] Yang Liu, Ting-Ting Huang und Xi Zheng. „A method of linking functional and structural connectivity analysis in urban green infrastructure network construction“. In: *Urban Ecosystems* 25.3 (Juni 2022), S. 909–925. ISSN: 1083-8155, 1573-1642. DOI: 10.1007/s11252-022-01201-2. URL: <https://link.springer.com/10.1007/s11252-022-01201-2> (besucht am 30.10.2023).
- [61] Scott Lundberg und Su-In Lee. *A Unified Approach to Interpreting Model Predictions*. 2017. arXiv: 1705.07874 [cs.AI]. URL: <https://arxiv.org/abs/1705.07874>.
- [62] Schew-Ram Mehra und Schew-Ram Mehra. „Städtische Atmosphäre und Stadt-klima“. In: *Stadtbauphysik: Grundlagen klima-und umweltgerechter Städte* (2021), S. 71–149.
- [63] Hans G Mücke und Julia M Litvinovitch. „Heat extremes, public health impacts, and adaptation policy in Germany“. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17.21 (2020), S. 7862.
- [64] Markus Münzinger. *3D Building Metrics Germany 2023*. Version V1. 2025. DOI: 10.71830/SKBCSI. URL: <https://doi.org/10.71830/SKBCSI>.
- [65] Silvia E Pappalardo, Claudia Zanetti und Veronica Todeschi. „Mapping urban heat islands and heat-related risk during heat waves from a climate justice perspective: A case study in Padua, Italy“. In: *Landscape and Urban Planning* 230 (2023), S. 104594.
- [66] Liudmila Prokhorenkova et al. „CatBoost: unbiased boosting with categorical features“. In: *Advances in neural information processing systems* 31 (2018).
- [67] Mohammad A Rahman, Leonidas M F Stratopoulos und Andrea Moser-Reischl. „Traits of trees for cooling urban heat islands: A meta-analysis“. In: *Building and Environment* 172 (2020), S. 106634.
- [68] Mathias Riechel et al. *Maßnahmensteckbriefe der Regenwasserbewirtschaftung. Ergebnisse des Projektes KURAS*. Techn. Ber. Berlin, Deutschland: KURAS-Projekt, 2017. URL: http://kuras-projekt.de//fileadmin/Dokumenten_Verwaltung/pdf/Steckbriefe_komplett_web.pdf.
- [69] Felix M Riese und Sina Keller. „Introducing a Framework of Self-Organizing Maps for Regression of Soil Moisture with Hyperspectral Data“. In: *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Valencia, Spain, 2018, S. 6151–6154.
- [70] Felix M Riese und Sina Keller. „Supervised, Semi-Supervised, and Unsupervised Learning for Hyperspectral Regression“. In: *Hyperspectral Image Analysis - Advances in Computer Vision and Pattern Recognition*. Hrsg. von Saurabh Prasad und Jocelyn Chanussot. Springer Nature Switzerland AG, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-38617-7_7.

- [71] Olaf Ronneberger, Philipp Fischer und Thomas Brox. „U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation“. In: *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, Proceedings, Part III 18*. Springer. 2015, S. 234–241.
- [72] Steve Running, Qiaozhen Mu und Maosheng Zhao. *MODIS/Terra Gross Primary Productivity 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061*. 2021. doi: 10.5067/MODIS/MOD17A2H.061. URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a2hv061/>.
- [73] Karsten Rusche, Mario Reimer und Rico Stichmann. „Mapping and Assessing Green Infrastructure Connectivity in European City Regions“. In: *Sustainability* 11.6 (26. März 2019), S. 1819. ISSN: 2071-1050. doi: 10.3390/su11061819. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/6/1819> (besucht am 11.10.2023).
- [74] Dieter Scherer et al. „Quantification of heat-stress related mortality hazard, vulnerability and risk in Berlin, Germany“. In: *DIE ERDE – Journal of the Geographical Society of Berlin* 144 (2013), S. 238–259. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:52406619>.
- [75] Martin Schnell et al. *Ermittlung von Maßnahmenflächen sowie konzeptionelle Maßnahmenplanung zur Aufwertung der Brut- und Nahrungshabitate von Rotmilan und Schwarzstorch in Hessen*. Techn. Ber. Unter fachlicher Begleitung von Mammen, U. und Mammen, K. (Ökotop, Halle). Wiesbaden, Hungen: Konzept im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen, Okt. 2021, S. 98.
- [76] Sebastian Seisenberger et al. „Entscheidungsunterstützung für die Daseinsvorsorge: Indikatoren für fachübergreifende GIS-Analysen“. In: Bd. 4/2023 (im Druck). gis.Science. Berlin: Wichmann, 2023.
- [77] Statistisches Bundesamt (Destatis). *Erhebung der öffentlichen Wasserversorgung, Wassergewinnung*. de. 2024. URL: <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/url/9b716c3e>.
- [78] Ian D Stewart und Tim R Oke. „Local climate zones for urban temperature studies“. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 93.12 (2012), S. 1879–1900.
- [79] Britta Stumpe et al. „Soil texture mediates the surface cooling effect of urban and peri-urban green spaces during a drought period in the city area of Hamburg (Germany)“. In: *Science of The Total Environment* 859 (2023), S. 160112.
- [80] Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen. *OpenGeodaten.NRW*. Accessed: 2025-02-04. 2025. URL: <https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/>.
- [81] Yuhong Tian et al. „Assessing Structural Connectivity of Urban Green Spaces in Metropolitan Hong Kong“. In: *Sustainability* 9.9 (19. Sep. 2017), S. 1653. ISSN: 2071-1050. doi: 10.3390/su9091653. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/9/1653> (besucht am 30.10.2023).
- [82] *Wie grün sind deutsche Städte?* Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2022. URL: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2022/bbsr-online-03-2022-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (besucht am 11.12.2023).

- [83] OpenStreetMap Wiki. *Key:surface* — OpenStreetMap Wiki. 2023. URL: <https://wiki.openstreetmap.org/w/index.php?title=Key:surface&oldid=2590022>.
- [84] Di Wu et al. „Thermal environment effects and interactions of reservoirs and forests as urban blue-green infrastructures“. In: *Ecological Indicators* 91 (2018), S. 657–663.
- [85] Andreas Wunsch, Tanja Liesch und Stefan Broda. „Deep learning shows declining groundwater levels in Germany until 2100 due to climate change“. In: *Nature communications* 13.1 (2022), S. 1221.
- [86] Qijiao Xie, Lu Ren und Chenzhe Yang. „Regulation of water bodies to urban thermal environment: Evidence from Wuhan, China“. In: *Frontiers in Ecology and Evolution* 11 (2023), S. 983567.
- [87] Pan Zhang, Debarchana Ghosh und Sohyun Park. „Spatial measures and methods in sustainable urban morphology: A systematic review“. In: *Landscape and Urban Planning* 237 (2023). DOI: 10.1016/j.landurbplan.2023.104776.

Teil IV.

Anhänge

25. Datengrundlage

Tabelle 25.1.: Übersicht vorhandener Datensätze, deren Verortung in der LB sowie der Status ihrer Beschaffung.

Index	Bezeichnung nach LB	Quelle	Seite	Jahr	Status	Themenschwerpunkt
1	Daten für das Zentrale-Orte-Modell in Hessen	HMWEVW	12		frei verfügbar	alle
2	Daten zur Einwohnerzahl/-dichte in Hessen	Hess. Statistisches Landesamt, Hessen			frei verfügbar	Hitze
3	L-19-Gutachten „Landschaftswasserhaus- halt unter Klimawandel stabilisieren“ mit zugehöriger Thermalmapkarte für ganz Hes- sen	HMWEVW	12		erhalten	Wasser
4	Daten aus Projekt „Hitzekarten für Hes- sen“; Kartenprodukte im vor der Veröf- fentlichung stehenden Viewer und Daten- blätter	HLNUG	12	2022	noch nicht veröf- fentlicht	Hitze, Grünflächen
5	Landesweite Klimaanalyse Hessen	HMWEVW	12	2022	erhalten	Hitze
6	Zukunftsplan Wasser - Wasserwirtschafts- licher Fachplan Hessen	HMUKLV	13	2022	erhalten	Wasser
7	FF-PV-Monitoringergebnisse	Landesenergie Agen- tur	13		erhalten	FFPV

8	Digitales Höhenmodell Hessen in verschiedenen Auflösungen	HVBG	13	2009 bis 2020	frei verfügbar	FFPV, Wasser
9	Gefährdungsanalyse von Verkehrsinfrastrukturen gegenüber Klimaauswirkungen	TU Darmstadt		2021	erhalten	Temperatur
10	ALKIS-Daten ohne Eigentümerdaten, insbesondere Gebäudebestand Orthophotos 2021/22	HVBG	13		erhalten	alle
11		HVBG	13		erhalten	FFPV, Wasser, Versiegelung, Grünflächen
12	ATKIS-Daten zu den hessischen Siedlungsgebieten und den Grünflächen in Hessen (Wälder, Parkanlagen, Wiesen usw.)	HVBG	13		erhalten	alle
13	Natureg-Geodaten (Biotoptkartierungen, Schutzgebiete)	HLNUG, RP Kassel		2010 bis 2021	frei verfügbar	FFPV, Grünflächen
14	Daten aus dem Geoportal Hessen Biotoptkartierung und Grünflächenkatalog aus dem Geoportal Frankfurt	Stadt Frankfurt		2020, 2015	frei verfügbar	alle Grünflächen
15		HLNUG		2022	erhalten	FF-PV
16	Agrarfachplanung Bodenzahl	HVBG			erhalten	FF-PV

Tabelle 25.2: Einsetzbare Produkte im Bereich FE. Hinweis: Der Lebenszyklus der Satellitenmissionen ist häufig begrenzt, jedoch stellen die entsprechenden Programme eine nachhaltige Sicherung der Dateneigenschaften sicher. In Bezug auf den manuellen Aufwand zur Vorverarbeitung und Prozessierung wurde in drei Klassen eingestuft: „gering“ = Daten direkt nutzbar, „mittel“ = Anwendung von beispielsweise einer Bewölkungsfilterung und „hoch“ = verschiedene sequenzielle Vorverarbeitungsschritte notwendig.

Bezeichnung	Wiederholrate Monitoring	Räumliche Auflö- sung	Manueller wand zu verarbeitung & Prozessierung	Auf- kosten	Anschaffungs- kosten	Benötigte Infra- struktur, Archi- vierungsaufwand	Planungs-ebene	
							Themen- schwerpunkt	Land
Sentinel 3	27 Tage	300 m	mittel	frei verfügbar	keine, nicht nötig			
Sentinel 2 MODIS	3-4 Tage 4 mal pro Tag	10 m 500 m, 1000 m	LST: gering	frei verfügbar frei verfügbar frei verfügbar	keine, nicht nötig keine, nicht nötig keine, nicht nötig			Land
Landsat 8	16 Tage	30 m 100 m	mittel	frei verfügbar	keine, nicht nötig			
Landsat 9	16 Tage	30 m	mittel	frei verfügbar	keine, nicht nötig			Region
Ecostress (LST)	1 bis 4 Tag(e)	70 m	mittel	frei verfügbar	keine, nicht nötig			Region
Sentinel-1 für Bo- denfeuchte	6-12 Tage	5 m	hoch	frei verfügbar	keine, nicht nötig			Region
Planet	Earth	täglich	0,5 bis 3 m	mittel	nicht frei verfü- bar	Abo-Modell		Kommune
(RGB; max. 8 Bänder)								
Airbone	Laser	bei Bedarf	nicht zutreffend	hoch	nicht frei verfü- bar	eigene Archivie- rung	alle	
Daten								
EmMAP Daten	off-Nadir: 4 Tage, Nadir: 27 Tage	30 m	mittel	frei verfügbar	keine, nicht nötig			Region

Tabelle 25.3.: Sonstige Daten i. S. von erarbeiteten FE-Produkten und notwendige Referenzdaten für Klassifikations- und Segmentierungsaufgaben.

Bezeichnung	Wiederholrate Monitoring	Räumliche Auflösung	Manueller Aufwand zu Verarbeitung & Prozessierung	Aufkosten	Anschaffungskosten	Benötigte Infrastruktur, Archivierungsaufwand	Themen- schwerpunkt	Planungsebene
Copernicus Land Monitoring Service - High Resolution Layers - Imperviousness Referenzdaten IÖR	Rückfragen bei Zeitreihen, da Wechsel im Daten	bei 10 m	gering	frei verfügbar	keine, nicht nötig		Kommune	
	bei Bedarf		gering	frei verfügbar, nach Anmeldung		Forschungs- datenzentrum, Repository	Kommune	

26. Anhänge: FF-PV

26.1. Visualisierung weiterer Potenzialanalyse-Ergebnisse

Abbildungen 26.1 und 26.2 zeigen die Ergebnisse der Schritte 1 bis 3 bei der Ermittlung der FF-PV-Flächenpotenziale in Hessen und der Beispielgemeinde Dietzenbach, wenn bei Schritt 3 als landwirtschaftliche Ausschlussfläche die in der 3. Änderung des LEP Hessen 2000 enthaltene Grundsatz-Regelung zugrunde gelegt wird, Flächen mit Boden- und Grünlandgrundzahlen > 60 besonders zu schonen. Die magenta eingefärbten Flächen stellen die nach Schritt 3 verbleibenden FF-PV-Potenzialflächen dar.

Abbildungen 26.3 und 26.4 stellen weitere Szenarien bei Schritt 3, bei den zugrunde gelegten landwirtschaftlichen Ausschlussflächen, dar.

Abbildung 26.5 stellt die Flächen der Agrarfachplanungen mit den Gesamtbewertungen 1a und 1b dar. Dabei zeigt sich, dass die Flächen mit der Bewertung 1a etwa 90 % und die Flächen mit der Bewertung 1b etwa 10 % der gesamten Flächenkulisse von 1a und 1b ausmachen. Vor diesem Hintergrund lässt sich die Relevanz eines eigenständigen 1a-Szenarios im Verhältnis zur Gesamtkulisse einordnen.

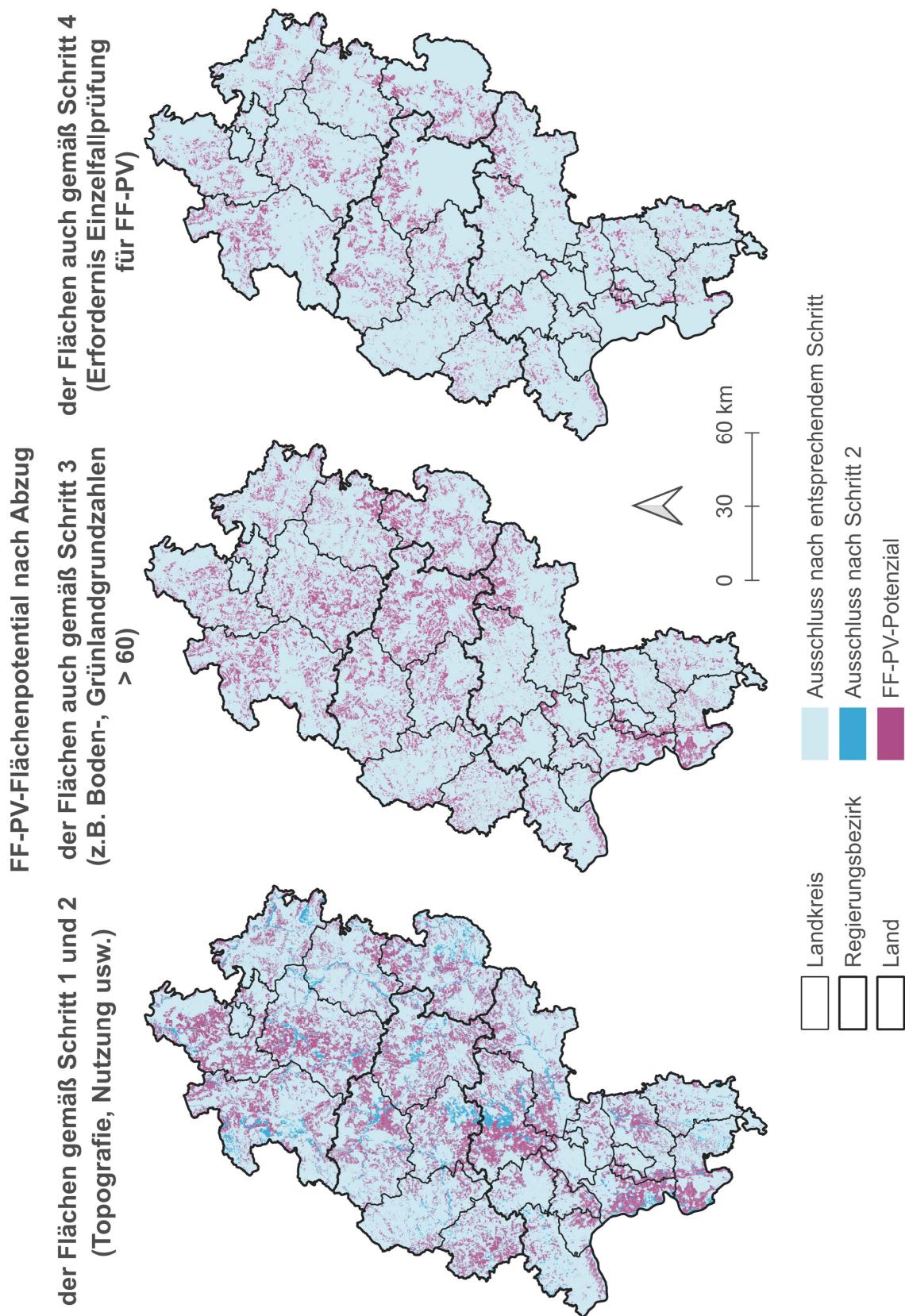


Abbildung 26.1.: Ergebnisvisualisierung der Analyse zu den Flächenpotenzialen für die FF-PV-Nutzung im unbesiedelten Bereich für die Schritte 1 bis 4 (siehe Abbildung 22.1). Schritt 3 bezieht sich hierbei auf die LEP-Grundsatzregelung der Schonung von Boden- und Grünlandgrundzahlen > 60.

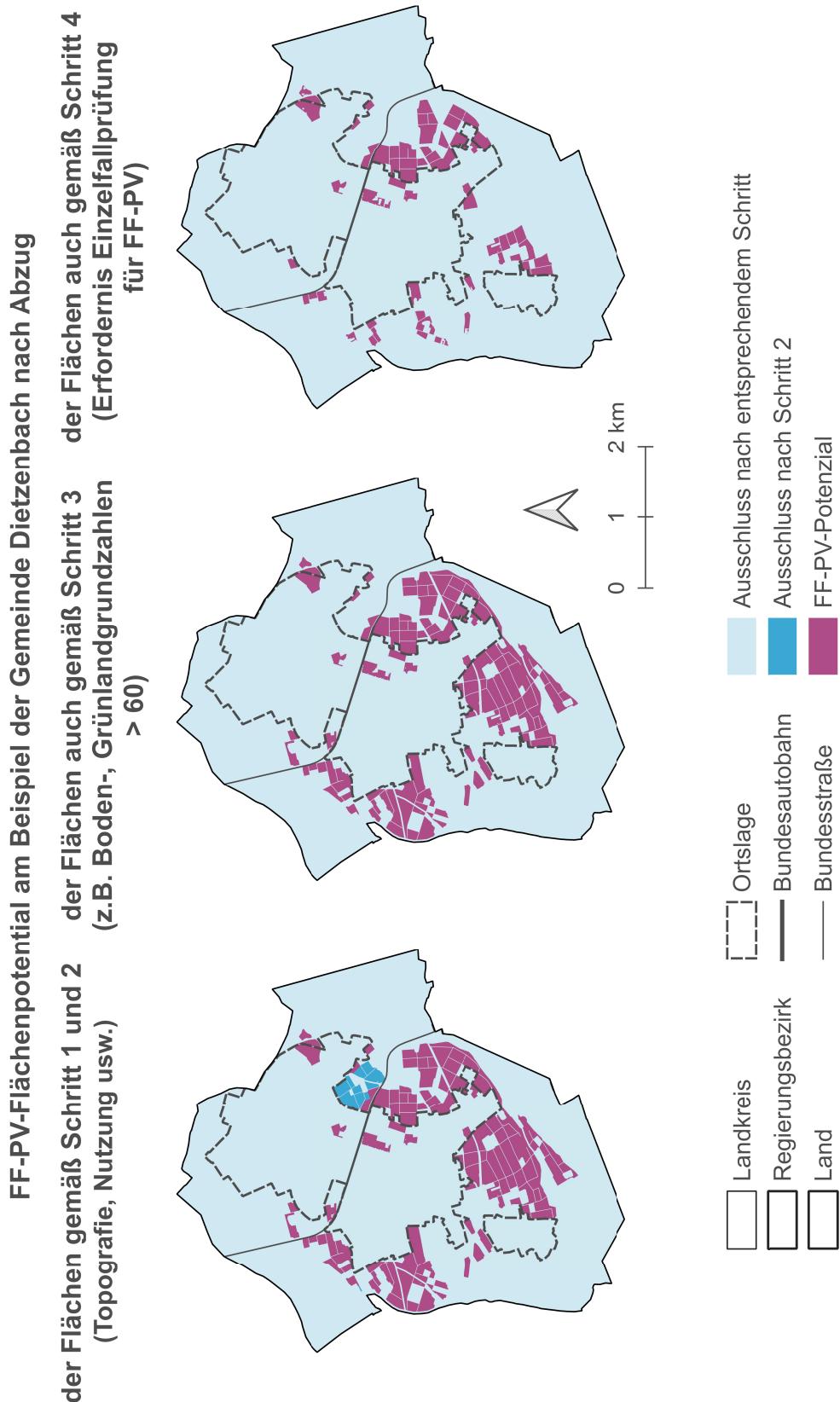


Abbildung 26.2.: Ergebnisvisualisierung der Analyse zu den Flächenpotenzialen für die FF-PV-Nutzung im unbesiedelten Bereich für die Schritte 1 bis 4 (siehe Abbildung 22.1) am Beispiel der Gemeinde Dietzenbach. Schritt 3 bezieht sich hierbei auf die LEP-Grundsatzregelung der Schonung von Boden- und Grünlandgrundzahlen > 60.

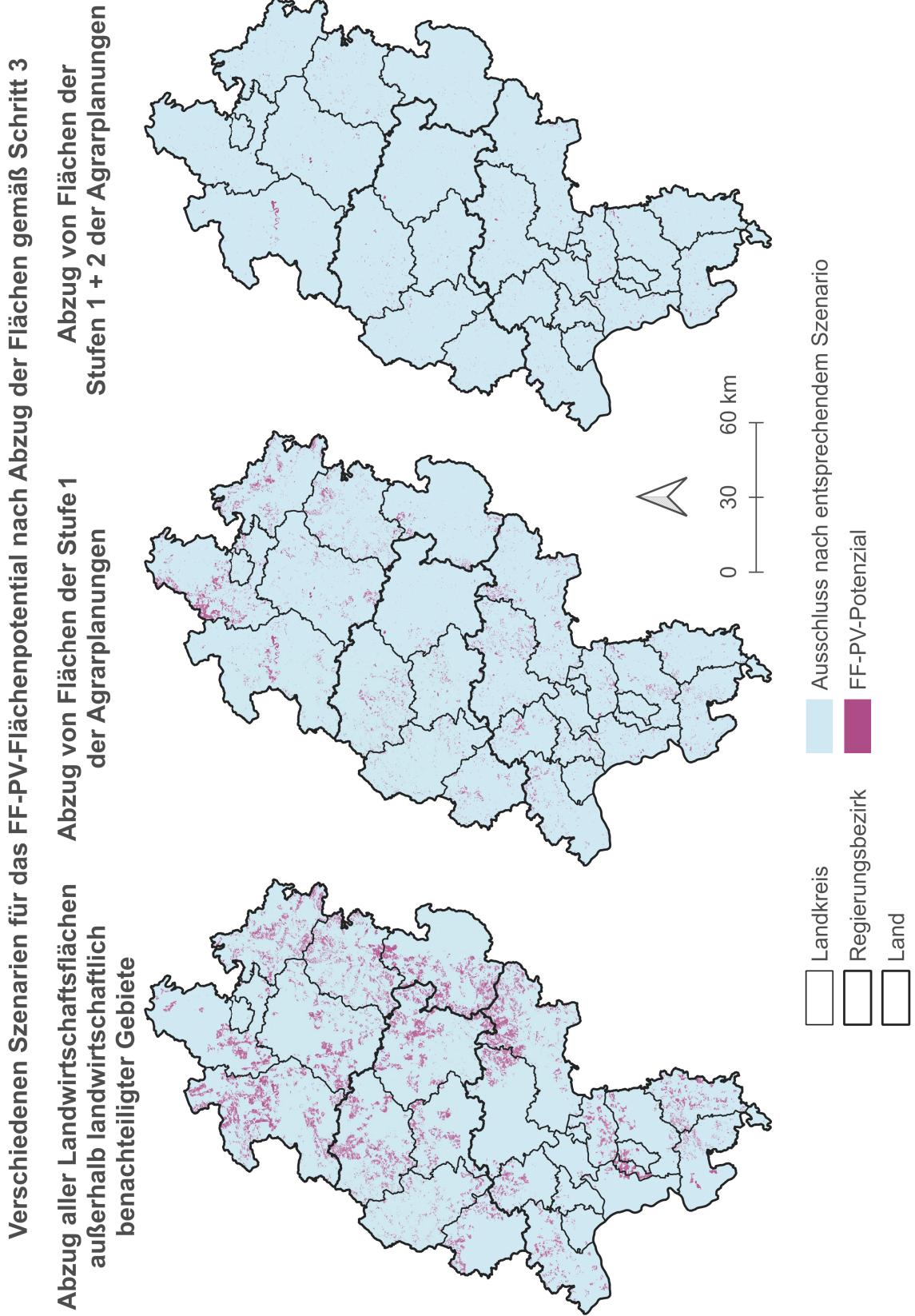


Abbildung 26.3.: Ergebnisvisualisierung der Analyse zu den verschiedenen Szenarien der Flächenpotenziale für die FF-PV-Nutzung im unbesiedelten Bereich für Schritt 3 (siehe Abbildung 22.1) in Hessen.

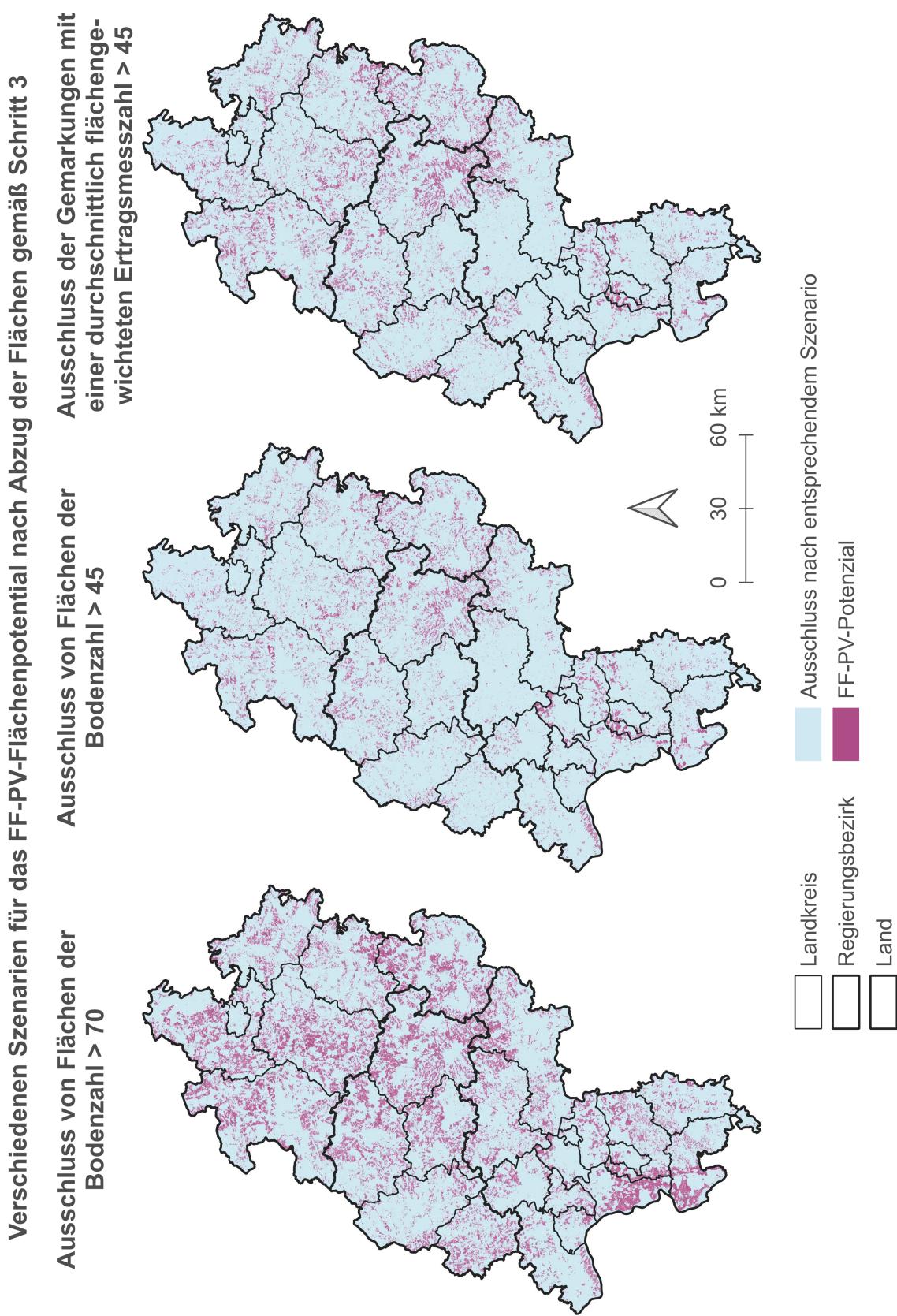


Abbildung 26.4.: Ergebnisvisualisierung der Analyse zu den verschiedenen Szenarien der Flächenpotenzialen für die FF-PV-Nutzung im unbesiedelten Bereich für Schritt 3 (siehe Abbildung 22.1) in Hessen.

Flächen der Agrarfachplanungen mit Gesamtbewertung 1a und 1b

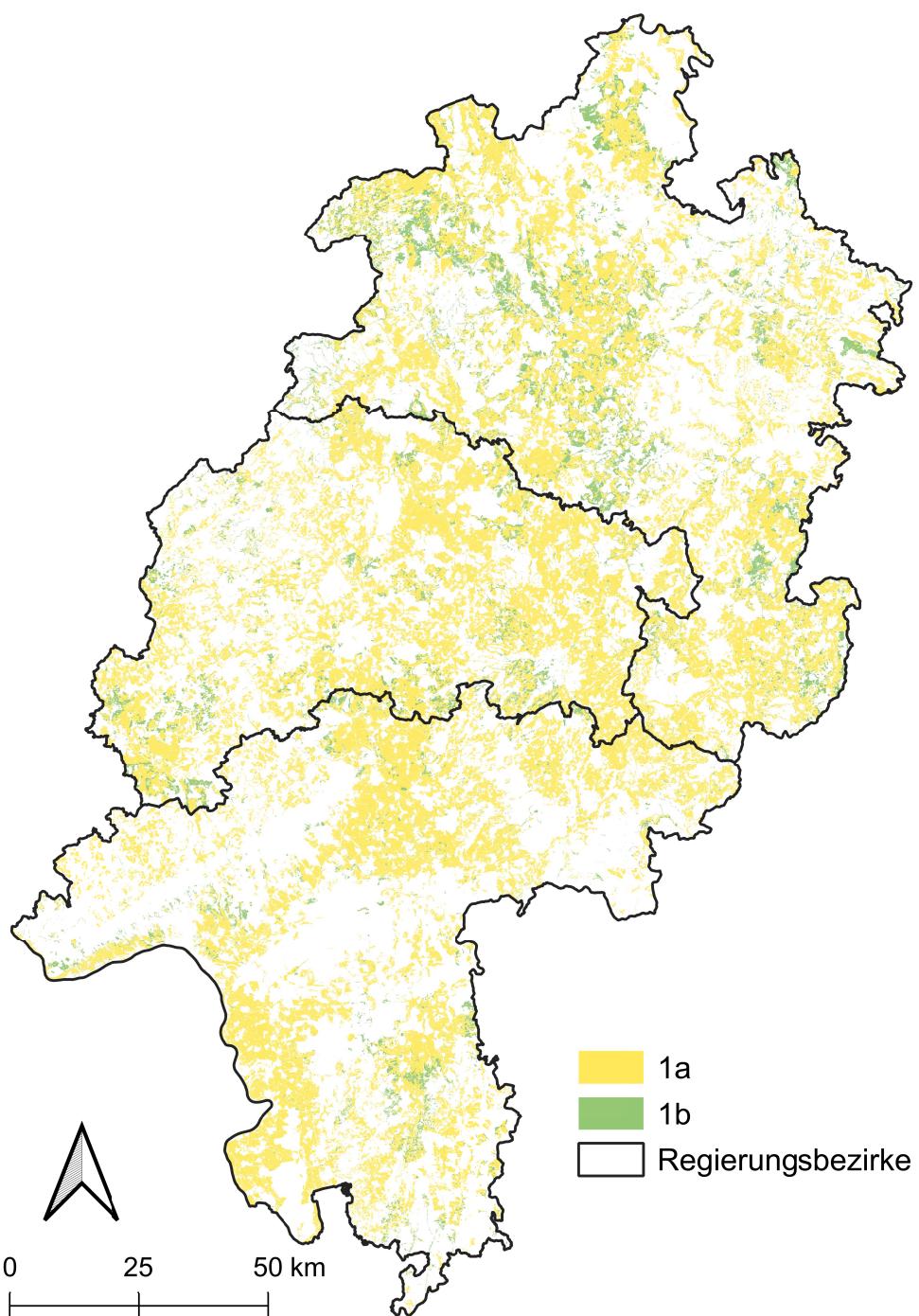


Abbildung 26.5.: Flächen der Agrarfachplanungen mit der Gesamtbewertung 1a und 1b.

26.2. Basisdaten

Verwaltungsgrenzen

- **Datenbezeichnung:** Verwaltungseinheiten Hessen
- **Datenstand:** Unbekannt, heruntergeladen am 14.02.2023
- **Quelle:** HVBG
- **Datenverwendung:** Originaldatensatz

26.3. Ausschlussflächen

1. Nordhänge und Steillagen ($> 30^\circ$)

- **Datenbezeichnung:** Digitales Geländemodell 1 (DGM1)
- **Datenstand:** Heruntergeladen am 09.03.2023
- **Quelle:** HVBG
- **Datenverwendung:** Abgeleitet aus DGM1 durch folgende Schritte:
 - a) DGM zu $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ resampeln
 - b) Slope und Aspect berechnen
 - c) Berechnung der südlichen Ausrichtung: `aspect_south = aspect > 90 AND aspect < 270`
 - d) Geeignete Flächen berechnen: `(aspect_south = 0 AND slope < 5) OR (aspect_south = 1 AND slope < 30)`
 - e) Konvertierung von Raster zu Polygonen und Ausschluss von Polygonen $< 500\text{ m}^2$

2. Verkehrs- und Siedlungsflächen

- **Datenbezeichnung:** Basis digitales Landschaftsmodell (DLM)-Daten
- **Datenstand:** 08.02.2024
- **Quelle:** HVBG

- **Datenverwendung:** Siedlungsflächen, Verkehrsflächen, Verkehrslinien, die in „Klasse“ nicht „Fußweg“, „Rad- und Fußweg“, „Sonstiges“, „Weg, Pfad, Steig“, „Wirtschaftsweg“, „Hauptwirtschaftsweg“ enthalten, gepuffert mit 5 m, zu einer Vektordatei vereint

3. Fließgewässer plus 10 m Gewässerrandstreifen

- **Datenbezeichnung:** Basis-DLM-Daten
- **Datenstand:** Unbekannt, heruntergeladen am 12.02.2024
- **Quelle:** HVBG und HLNUG
- **Datenverwendung:** Vereinigung von Datensatz „Gewässernetz 1 : 25.000“ (Liniendatensatz, HLNUG) mit 10 m puffern plus den Datensatz „Fließgewässer“ (Flächenhafte Shapefiles) aus den ATKIS-Daten, ebenso mit 10 m flächenhaft gepuffert.

4. Wald plus 30 m Verschattungspuffer

- **Datenbezeichnung:** Vegetationsfläche (Basis-DLM-Daten)
- **Datenstand:** Heruntergeladen am 12.02.2024; Datenstand 08.02.2024
- **Quelle:** HVBG
- **Datenverwendung:** Alle Gebiete aus dem ATKIS-Layer Vegetationsflaeche mit der Objektart „Wald“, gepuffert mit 30 m und vereint

5. Flächenhafte Gehölze plus 20 m Verschattungspuffer

- **Datenbezeichnung:** Vegetationsfläche (Basis-DLM-Daten)
- **Datenstand:** Heruntergeladen am 12.02.2024; Datenstand 08.02.2024
- **Quelle:** HVBG
- **Datenverwendung:** Alle Gebiete aus dem ATKIS-Layer Vegetationsflaeche mit der Objektart „Gehoelz“, gepuffert mit 20 m und vereint.

6. Bestands-FF-PV

- **Datenbezeichnung:** Bauwerksfläche (Basis-DLM-Daten)
- **Datenstand:** Unbekannt, heruntergeladen am 03.04.2023
- **Quelle:** HVBG

- **Datenverwendung:** Alle Gebiete mit der Klasse „Solarzellen“ im ATKIS-Layer Bauwerksfläche

7. Nationalparks

- **Datenbezeichnung:** Nationalpark
- **Datenstand:** 08.10.2020; heruntergeladen am 24.01.2024
- **Quelle:** Natureg Viewer; HLNUG
- **Datenverwendung:** Originaldatensatz

8. Naturschutzgebiete

- **Datenbezeichnung:** Naturschutzgebiete
- **Datenstand:** Heruntergeladen am 20.02.2024; Aktualitätsstand: 20.11.2023
- **Quelle:** Natureg Viewer; HMLU
- **Datenverwendung:** Originaldatensatz

9. Biosphärenreservat Kern- und Pflegezonen

- **Datenbezeichnung:** Biosphärenreservats-Zonen
- **Datenstand:** Oktober 2013 (ergänzt September 2023)
- **Quelle:** Die Zonen I, II und III wurden vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) vorgegeben (kein rechtsverbindlicher Stand).
- **Datenverwendung:** Alle Gebiete, in denen „Zone“ I oder II enthalten sind

10. Überschwemmungsgebiete

- **Datenbezeichnung:** Überschwemmungsgebiete_HQ100_nach_HWG
- **Datenstand:** Heruntergeladen am 20.02.2024; zeitliche Ausdehnung bis 23.08.2023; letzte Überarbeitung: 24.01.2024
- **Quelle:** HLNUG
- **Datenverwendung:** Originaldatensatz

11. Wasserschutzgebiete Zone I + II

- **Datenbezeichnung:** TWS_HQS_TK25
- **Datenstand:** Heruntergeladen am 20.02.2024; letzte Überarbeitung: 24.01.2024
- **Quelle:** HLNUG
- **Datenverwendung:** Alle Polygone, in denen „Zone“, „Schutzzzone I“, „Qualitative Schutzzzone I“, „Schutzzzone II“, „Schutzzzone II/1“, „Schutzzzone II/2“, „Schutzzzone II/3“ oder „Qualitative Schutzzzone II“ enthalten ist

12. Nationales Naturmonument Grünes Band Hessen: Zonen I + II

- **Datenbezeichnung:** Nationale Naturmonumente Hessen
- **Datenstand:** 27.06.2023, heruntergeladen am 03.07.2023
- **Quelle:** Natureg Viewer
- **Datenverwendung:** Alle Polygone, in denen „Zone“ I oder II enthalten ist

13. Gewässerentwicklungskorridore

- **Datenbezeichnung:** Gewässerentwicklungskorridore GEF (GEF_20230726), Maßnahmenbänder des Bewirtschaftungsplans zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) (Maßnahmenbaender_GEF)
- **Datenstand:** Übermittlung an AN im August 2023 (Aktualisierungstand: 26.07.2023)
- **Quelle:** HMLU, nicht frei verfügbar
- **Datenverwendung:**
 - a) Umwandlung von pot_nat_gef_mindestbreite in gef_single (temporär)
 - b) Auflösen von gef_single, unzusammenhängende Objekte trennen lassen; Feld(er) auflösen: „gef_brei_1“ \Rightarrow gef_single_dissolved (temporär)
 - c) Konvertierung von massnahmenbaender_gef in baender_single (temporär)
 - d) Verschneidung: baender_single mit gef_single_dissolved \Rightarrow baender_single_intersect (temporär)
 - e) Auflösen: baender_single_intersect; Unzusammenhängende Objekte trennen lassen „Ja“; Feld(er) auflösen: „gef_brei_1“ \Rightarrow baender_single_intersect_dissolved (temporär)

- f) Puffer: baender_single_intersect_dissolved; Attributfeld, Feldtyp „gef_brei_1“; Endstil „Rund“; Verbindungsstil „Rund“; Ergebnis auflösen „Ja“ \Rightarrow baender_buffered (temporär)
- g) Verschneidung: baender_buffered mit gef_single_dissolved \Rightarrow gef_prioritaer_pre (temporär)
- h) Differenz: gef_prioritaer_pre abziehen von gef_single_dissolved \Rightarrow gef_nicht_prioritaer_pre (temporär) gef_prioritaer_pre + „generelle Vorverarbeitung“ \Rightarrow gef_prioritaer gef_nicht_prioritaer_pre + „generelle Vorverarbeitung“ \Rightarrow gef_nicht_prioritaer

14. Avifaunistischen Schwerpunktträume

- **Datenbezeichnung:** Avifaunistische Schwerpunktträume
- **Datenstand:** Heruntergeladen am 06.11.2024; Datenstand 02.11.2021
- **Quelle:** HMWVW, Landesplanung Hessen
- **Datenverwendung:** Originaldatensatz

26.4. Landwirtschaftsszenarien

1. Landwirtschaftsflächen außerhalb landwirtschaftlich benachteiligter Gebiete

- **Datenbezeichnung:** Kulisse benachteiligte Gebiete
- **Datenstand:** 05.11.2020, 01.10.2010
- **Quelle:** HMUKLV, Anlage 1 AGZ, 2015
- **Datenverwendung:** Landesfläche abzüglich Originaldatensatz

2. Vorranggebiete für Landwirtschaft der drei Regionalpläne

- **Datenbezeichnung:** Regionalplanung Mittelhessen, Regionalplanung Südhessen, Regionalplanung Nordhessen
- **Datenstand:** Unbekannt, heruntergeladen am 03.04.2023
- **Quelle:** HMWVW
- **Datenverwendung:** Download über WFS, Vereinigung der drei Layer zu einer Vektordatei

3. Agrarfachplanungen

- **Datenbezeichnung:** Agrarplanung Hessen
- **Datenstand:** 06.08.2021, heruntergeladen am 15.04.2023
- **Quelle:** HMUKLV
- **Datenverwendung:** Alle Polygone, in denen `f_ges` folgende Werte enthalten:
 - a) 1a oder 1b
 - b) 1a, 1b oder 2

4. Landwirtschaftsflächen in Abhängigkeit der Bodenzahl > 70, > 60 und > 45

- **Datenbezeichnung:** Bodenschätzung
- **Datenstand:** 15.11.2022, heruntergeladen am 13.04.2023
- **Quelle:** HVBG, ATKIS
- **Datenverwendung:** Alle Polygone, in denen Bodenzahl folgende Werte aufweist:
 - a) >70
 - b) >60 oder
 - c) >45

5. Gemarkungen mit einer durchschnittlichen flächengewichteten EMZ > 45

- **Datenbezeichnung:** Gemarkung_EMZ
- **Datenstand:** Heruntergeladen am 23.06.2023
- **Quelle:** Staatsanzeiger für das Land Hessen – 13.06.2022; Seite 652
- **Datensatznutzung:** Alle Polygone, in denen Wert > 45

6. Landnutzungen (Grün, Acker, Sonstiges)

- **Datenbezeichnung:** Basis-DLM-Daten
- **Datenstand:** Heruntergeladen am 12.02.2024; Datenstand 08.02.2024

- **Quelle:** HVBG
- **Datenverwendung:**
 - **Grün:** Vegetationsfläche mit Klasse = „Grünland“
 - **Acker:** Vegetationsfläche mit Klasse = „Ackerland“
 - **Sonstiges:** Grundfläche abzüglich Grün und Acker

26.5. Restriktionsflächen

1. Natura 2000

- **Datenbezeichnung:** Vogelschutzgebiete, Fauna-Flora-Habitate
- **Datenstand:** Unbekannt, heruntergeladen am 14.02.2023
- **Quelle:** Natureg Viewer
- **Datenverwendung:** Vogelschutzgebiete und FFH-Gebiete vereint

2. Landschaftsschutzgebiete

- **Datenbezeichnung:** Landschaftsschutzgebiete
- **Datenstand:** Heruntergeladen am 20.02.2024, Aktualitätsstand 20.11.2023
- **Quelle:** Natureg Viewer
- **Datenverwendung:** Originaldatensatz

3. Stillgewässer

- **Datenbezeichnung:** Gewässerfläche (Basis-DLM-Daten)
- **Datenstand:** Unbekannt, heruntergeladen am 04.03.2023
- **Quelle:** HVBG
- **Datenverwendung:** Filterung nach Objektart „Stehendes Gewässer“

4. Gesetzlich geschützte Biotope

- **Datenbezeichnung:** GESCH_BIOTYPE

- **Datenstand:** Heruntergeladen am 20.02.2024, Aktualitätsstand November 2022
- **Quelle:** HLNUG
- **Datenverwendung:** Originaldatensatz

5. Lebensraumtypen nach FFH-RL

- **Datenbezeichnung:** Fauna-Flora-Habitate
- **Datenstand:** Heruntergeladen am 20.02.2024, Aktualitätsstand November 2022
- **Quelle:** Natureg Viewer
- **Datenverwendung:** Verschneidung von „HLBK_2014_2022“ und „FFH“; Ausschluss von Gebieten außerhalb der FFH-Gebiete

6. Landesweiter Biotopverbund Waldlebensräume

- **Datenbezeichnung:** Landesentwicklungsplan
- **Datenstand:** Heruntergeladen Juni 2023
- **Quelle:** HMWVW
- **Datenverwendung:** Originaldatensatz

7. Biosphärenreservate Entwicklungszonen

- **Datenbezeichnung:** Biosphärenreservatszonen
- **Datenstand:** Oktober 2013 (ergänzt September 2023)
- **Quelle:** Zonen I, II und III wurden vom HMUKLV vorgegeben.
- **Datenverwendung:** Alle Gebiete, in denen „Zone“ 3 enthalten ist, nicht rechtlich bindend

8. Wasserschutzgebiete Zonen III

- **Datenbezeichnung:** TWS_HQS_TK25
- **Datenstand:** Heruntergeladen am 20.02.2024, letzte Überarbeitung 24.01.2024
- **Quelle:** HLNUG

- **Datenverwendung:** Alle Polygone, in denen „Zone“, „Qualitative Schutzzone III“, „Qualitative Schutzzone III/1“, „Qualitative Schutzzone III/2“, „Schutzzone III/A“, „Schutzzone III/B“, „Schutzzone III“ oder „Schutzzone III1“, „Schutzzone III/2“, „Schutzzone IIIA“, „Schutzzone IIIA1“, „Schutzzone IIIA2“, „Schutzzone IIIB“ enthält.

9. Ökokonten, Ausgleichsmaßnahmenflächen

- **Datenbezeichnung:** Kompensationsflächen Hessen, Ökokontoflächen Hessen
- **Datenstand:** Beide heruntergeladen am 20.02.2024; Aktualitätsstand Ökokonten: 20.11.2023; Aktualitätsstand Kompensationsflächen: 20.11.2023
- **Quelle:** Natureg Viewer
- **Datenverwendung:** Vereinigung beider Datensätze

10. Naturschutzgroßprojekte

- **Datenbezeichnung:** Naturschutzgroßprojekt Vorgelsberg
- **Datenstand:** 01.02.2017
- **Quelle:** HLNUG
- **Datenverwendung:** Nur die Flächen des Shapefiles „Vogelsberg“ werden abgezogen; alle anderen Naturschutzgroßprojekte werden nicht in die Berechnung einbezogen

11. Gewässerentwicklungskorridore

- **Datenbezeichnung:** Gewässerentwicklungskorridore GEF (GEF_20230726)
- **Datenstand:** Übermittelt an AN im August 2023, Aktualisierungsstand 26.07.2023
- **Quelle:** HLNUG
- **Datenverwendung:** Verändert

12. Risikogebiete außerhalb von Überschwemmungsgebieten

- **Datenbezeichnung:** Risikogebiete außerhalb von Überschwemmungsgebieten (RisikoAussUeGeb)
- **Datenstand:** Übermittelt an AN im August 2023, Aktualisierungsstand 01.08.2023

- **Quelle:** HLNUG
- **Datenverwendung:** Originaldatensatz

13. Naturparke (Informative Darstellung)

- **Datenbezeichnung:** Naturparke
- **Datenstand:** Unbekannt, heruntergeladen am 14.02.2023
- **Quelle:** Landesbetrieb HessenForst
- **Datenverwendung:** Originaldatensatz

26.6. Baurechtlich privilegierte und förderfähige Bereiche

1. Baurechtlich privilegierter Bereich nach BauGB (d. h. im Abstand von 200 m entlang des digital übermittelten überörtlichen Straßen- und Schienennetzes)
 - **Datenbezeichnung:** Basis-DLM-Daten
 - **Datenstand:** Bahnstrecken: März 2023, Autobahnen: April 2023
 - **Quelle:** HVBG, Bahnstrecken: Auswahl nach Vorgabe Ref. V2 (HMWVW), Autobahn
 - **Datenverwendung:** Vereinigung von BAB und Schienennetz (gemäß des übermittelten Datensatzes), Puffer von 200 m
2. Baurechtlich privilegierter Bereich nach BauGB (d. h. im Abstand von 200 m entlang des digital übermittelten überörtlichen Straßen- und Schienennetzes) abzüglich Tunnel-/Brückenbauwerke (Abzug nur beim Layer des privilegierten Bereichs)
 - **Datenbezeichnung:** Basis-DLM-Daten Objektart: AX_BauwerkImVerkehrsbereich
 - **Datenstand:** Unbekannt, heruntergeladen am 04.03.2023
 - **Quelle:** HVBG
 - **Datenverwendung:**

- a) Vereinigung von BAB und Schienennetz (gemäß des übermittelten Datensatzes)
 - b) Puffern der linienhaften Bauwerke mit Klasse „Tunnel“ oder „Brücke“
 - c) Selektion der flächenhaften Bauwerke mit der Klasse „Tunnel“ oder „Brücke“
 - d) Vereinigung der beiden Layer
 - e) Berechnung der geometrischen Differenz zum BAB/Schienennetz-Layer
 - f) Puffer von 200 m der verbleibenden Linien im BAB/Schienennetz-Layer
3. **500 m EEG-Förder-Korridor entlang von allen Schienen und Autobahnen abzüglich Tunnel-/Brückebauwerke**
- **Datenbezeichnung:** Basis-DLM-Daten, Objektarten: AX_Strasse, AX_Bahnverkehr
 - **Datenstand:** Unbekannt, heruntergeladen am 04.03.2023
 - **Quelle:** HVBG
 - **Datenverwendung:** Vereinigung von Autobahnen und Schienen, Puffer von 500 m

27. Anhänge: Landbedeckung

Tabelle 27.1.: Einteilung der Klassen des OSM-surface-tags [83] nach ihrem geschätzten Abflussbeiwert und einige weitere, gewünschte Klassen für die Segmentierung versiegelter Flächen.

OSM-surface-tag	deutsche Bezeichnung	Versiegelungsart
<code>paved</code>	Versiegelte Oberfläche	Vollversiegelt
<code>wood</code>	Holz	Vollversiegelt
<code>rock</code>	Fels	Vollversiegelt
<code>nicht enthalten</code>	Kiesdächer	Vollversiegelt
<code>asphalt</code>	Asphalt	Vollversiegelt
<code>chipseal</code>	Spanversiegelung	Vollversiegelt
<code>concrete</code>	Beton	Vollversiegelt
<code>concrete:lanes</code>	Lange, schmale Betonelemente	Vollversiegelt
<code>concrete:plates</code>	Betonplatten	Vollversiegelt
<code>unhewn_cobblestone</code>	rohes Kopfsteinpflaster	Vollversiegelt
<code>stepping_stones</code>	„Trittsteine“	Vollversiegelt
<code>rubber</code>	Gummi, z.B. Spielplatz	Vollversiegelt
<code>tartan</code>	synthetische Allwetteroberfläche, z.B. bei Laufstrecken	Vollversiegelt
<code>carpet</code>	Teppich, z.B. Sportplätze	Vollversiegelt
<code>nicht enthalten</code>	Flachdächer, geneigte Dächer	Vollversiegelt
<code>fine_gravel</code>	Fester Split oder Grant	Vollversiegelt
<code>paving_stones</code>	Pflastersteine	Vollversiegelt
<code>sett</code>	behauen Pflasterstein	Vollversiegelt
<code>cobblestone</code>	Kopfsteinpflaster	Vollversiegelt
<code>artificial_turf</code>	Kunstrasen	Vollversiegelt
<code>acrylic</code>	Acryl, z.B. Basketballplätze	Vollversiegelt
<code>compacted</code>	verdichtet, z.B. Parkwege	Teilversiegelt
<code>grass_paver</code>	Rasen-Pflastersteine	Teilversiegelt
<code>nicht enthalten</code>	Natursteinpflaster mit weiten Fugen, versickerungsfähiges (Öko-)Pflaster	Teilversiegelt
<code>pebblestone</code>	Kieselstein	Teilversiegelt
<code>gravel</code>	Kies - loser Schotter	Teilversiegelt

metal	Metall, z.B. Gleise	Teilversiegelt
unpaved	Ungepflastert, ein Merkmal, das überwiegend unversiegelt unbefestigt ist; d. h. es hat eine lockere Beschichtung, die von verdichtetem Steinschlag bis zur Erde reicht.	Unversiegelt
woodchips	Hackschnitzel	Unversiegelt
dirt	Wird dort verwendet, wo die Oberfläche Erde/Erde/Schmutz frei liegt, aber nicht Sand oder Kies oder Fels ist	Unversiegelt
ground	naturbelassene Oberfläche	Unversiegelt
earth	s. o.	Unversiegelt
<i>nicht enthalten</i>	Gründächer	Gründach
metal_grid	Metallgitter	Sonstiges
