



ISAP Abschlussbericht

Integrative stadt-regionale Anpassungsstrategien in einer polyzentrischen Wachstumsregion, Modellregion – Region Stuttgart

Verbundprojekt „ReglKlim“:

Integrative stadt-regionale Anpassungsstrategien in einer polyzentrischen Wachstumsregion, Modellregion – Region Stuttgart

ISAP- Gemeinsamer Verbundschlussbericht 2024

Projektlaufzeit: 1.08.2020 – 31.10.2023

Fördermaßnahme: „Regionale Informationen zum Klimahandeln (ReglKlim)“

Hinweis: Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/ beim Autor.



Universität Stuttgart
Institut für Raumordnung und Entwicklungsplanung



STUTTGART |



lifu
Deutsches Institut
für Urbanistik

pecher

i|ö|w
INSTITUT FÜR
ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG



Lohmeyer

indblik.io



Verbundpartnerschaft

Projektkonsortium	FKZ
Universität Stuttgart - Fakultät 2 Bau- und Umweltingenieurwissenschaften - Institut für Raumordnung und Entwicklungsplanung (IREUS), Stuttgart Prof. Dr.-Ing. Jörn Birkmann, Joanna McMillan, Britta Weisser, Franziska Götttsche	01LR2007A
Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Dep. Troposphärenforschung (KIT), Karlsruhe Prof. Dr. Joaquim G. Pinto, Hendrik Feldmann, Marie Hundhausen, Dr. Regina Kohlhepp, Dr. Gerd Schädler	01LR2007B
Landeshauptstadt Stuttgart - Amt für Umweltschutz, Abt. Stadtklimatologie (LHS), Stuttgart Rainer Kapp, Silke Drautz, Dr. Marselina Arkouli, Rayk Rinke	01LR2007C
Verband Region Stuttgart (VRS), Stuttgart Thomas Kiwitt, Dr. Christoph Hemberger, Corinna Schmidt, Silvia Weidenbacher	01LR2007D
Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH, gemeinnützig (IÖW), Berlin Prof. Dr. Jesko Hirschfeld, Tarin Karzai, Tobias Möllney, Dr. Steven Salecki, Catharina Püffel	01LR2007E
Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (Difu), Berlin Jens Hasse, Katharina Luig, Lisa Kutsch	01LR2007F
Dr. Pecher AG (PAG), Erkrath und Gelsenkirchen Dr. Holger Hoppe, Hendrik Janssen, Dr. Nina Altensell	01LR2007G
Lohmeyer GmbH Torsten Nagel, Dr. Benedict Brecht	(Unterauftrag 01LR2007D)
indblik.io Dr. Sten Zeibig, Dr. Naomi Radke	(Unterauftrag 01LR2007A)



Inhalt

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xi
1. ISAP – stadt-regionale Anpassungsstrategien	1
1.1 Ausgangslage – Modellregion Stuttgart	1
1.2 Zielstellung	3
1.3 Konzeptaufbau (Arbeitspaketaufbau)	3
2. Regionale Klimainformationen für die Region Stuttgart	7
2.1 Regionale Klimasimulationen als Datengrundlage für ISAP	7
2.1.1 Beschreibung des KIT-KLIWA Ensembles	8
2.1.2 Bereitstellung von Daten für nachfolgende Modellierung	9
2.1.3 Bewertung und Mehrwert der hochaufgelösten Klimasimulation	9
2.2 Hitze in der Region Stuttgart	11
2.2.1 Hitzewellen heute und in der Zukunft	11
2.2.2 Klimakenngößen	13
2.2.3 Regionale Klimaanalysen	18
2.2.4 Kaltluftsimulationen	25
2.3 Starkregen in der Region Stuttgart	26
2.3.1 Klimasimulationen heute und in der Zukunft	26
2.3.2 Regionale Starkregengefahrenkarte	30
2.4 Anpassungskapazitäten und Anpassungsnotwendigkeiten	38
2.4.1 Vulnerabilitätsanalyse: Stand der Wissenschaft	38
2.4.2 Regionale Vulnerabilitätsanalyse	39
2.4.3 Ergänzende kleinräumige Vulnerabilitätsanalyse der Stadt Stuttgart	53
2.4.4 Risikobetrachtung und Risikohotspots	56
2.4.5 Anpassungskapazitäten von Haushalten – Ergebnisse der Haushaltsbefragungen	57
2.4.6 Landnutzungszenarien	61
3. Klimaangepasste Raumentwicklung	69
3.1 Fokusraum Neckartalachse	69
3.1.1 Vorstellung des Untersuchungsgebietes	69
3.1.2 Methodik	70
3.1.3 Wirksamkeit von Maßnahmen gegenüber Starkregen	72
3.1.4 Fazit - Neckartalachse	76
3.2 Fokusraum NeckarPark	78
3.2.1 Vorstellung des Untersuchungsgebiets	78
3.2.2 Methodik & betrachtete Untersuchungsfälle	79
3.2.3 Klimatische Wirksamkeit von Maßnahmen	81
3.2.4 Integrierte Bewertung der Ökosystemleistungen	88
3.2.5 Bewertung der regional-ökonomischen Effekte	94
3.2.6 Fazit – Fokusraum NeckarPark	96
3.3 Fokusraum Neuer Stadtraum B14	97



3.3.1	Vorstellung des Untersuchungsgebiets	97
3.3.2	Methodik & betrachtete Untersuchungsfälle	99
3.3.3	Klimatische Wirksamkeit von Maßnahmen	102
3.3.4	Bewertung der regional-ökonomischen Effekte	106
4.	Der Klimaatlas als Online- Informations- und Beratungssystem	111
4.1	<i>Vorstellung des Online-Tools</i>	111
4.1.1	Säule 1: Regionale Klimainformation	112
4.1.2	Säule 2: Klimaangepasste Raumentwicklung	115
4.1.3	Säule 3: Wissensbibliothek.....	118
4.1.4	Navigationskonzept	119
4.2	<i>Nutzerbedarfe und Anforderungsergebnisse</i>	120
4.2.1	Die erhobenen Bedarfe und Anforderungen – methodisches Vorgehen	120
4.2.2	Bedarfe und Anforderungen künftiger Nutzer:innen – Ergebnisse aus der Literaturrecherche..	120
4.2.3	Bedarfe und Anforderungen künftiger Nutzer:innen – Konkretisierung durch Akteursbeteiligung	125
4.3	<i>Tool-Design – Entwicklung</i>	132
4.3.1	Entwicklungsprozess der Toolgestaltung	132
4.3.2	Technische Konzeption und Umsetzung.....	134
4.3.3	Evaluation des Tools	137
5.	Dissemination	141
5.1	<i>Austausch zur Verbreitung der Projektergebnisse in Deutschland</i>	141
5.2	<i>Austausch mit dem Querschnittsprojekt WIRKsam</i>	143
5.3	<i>Vernetzung mit der Planungsregion Northern-Virginia-USA</i>	145
5.4	<i>Abschlusskonferenz am 23.10.2023</i>	146
6.	Fazit und Ausblick	151
7.	Ergänzungen zum Inhalt	155
7.1	<i>die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises</i>	155
7.2	<i>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</i>	155
7.3	<i>Verwertbarkeit der Ergebnisse</i>	155
7.4	<i>Bekannt gewordene Fortschritte von Dritter Seite</i>	156
7.5	<i>Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen</i>	157
8.	Literaturverzeichnis.....	161



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Region Stuttgart – Gemeindeverteilung	2
Abbildung 2: Arbeitspaketaufbau - Kernergebnisse des ISAP 1-Projekts	4
Abbildung 3: KIT-KLIWA Ensemble - Modellgebiete und -Topographie. Nest 1 Europa, 50 km Gitterweite; Nest 2 Deutschland 7 km Gitterweite und Nest 3 Süddeutschland 2,8 km Gitterweite.	8
Abbildung 4: Links: Mittlere Abweichung der Temperatur von den HYRAS-DWD Beobachtungsdaten für die unkorrigierten KIT-KLIWA ERA40-Simulationen in 2,8 km und 7 km Gitterweite. Rechts: Häufigkeitsverteilung der Temperatur im Sommerhalbjahr (Mai-Oktober) für die Reanalyse (ERA40) – und GCM-angetriebenen Simulationen aus dem KIT-KLIWA Ensemble sowie der HYRAS-DWD Beobachtungsdaten (Hundhausen et al., 2023a)	9
Abbildung 5: (a) Vergleich der Wiederkehrwerte (RL; y-Achse) des 1-stündlichen Niederschlags für Wiederkehrperioden von 1 bis 100 Jahren (x-Achse) für die vier hochaufgelösten Simulationen des KIT-KLIWA Ensembles; (b) 10-jähriger Wiederkehrwert (RL10) gegen Dauerstufen und Wiederkehrperioden von den KOSTRA 2010 Daten (Hundhausen et al., 2023b)	10
Abbildung 6: Entwicklung der stärksten Hitzewelle im Untersuchungsgebiet pro Jahr bezüglich Temperaturanomalie (x-Achse), Dauer (y-Achse) und HWMI (Größe) aus den Modellergebnissen von 1971-2000 (grau), einer 2 Grad wärmeren Welt (blau) und einer 3 Grad wärmeren Welt (orange).....	12
Abbildung 7: Anzahl der Hitzetage pro Jahr von 1971 bis 2000.	15
Abbildung 8: Beobachtete Entwicklung der heißen Tage von 1951-2020 (Daten: DWD). Jeder Balken zeigt die Anzahl von heißen Tagen für das jeweilige Jahr, gemittelt über die Region Stuttgart.....	16
Abbildung 9: Erwartete zukünftige Entwicklung der Anzahl der heißen Tage pro Jahr in der Region Stuttgart bei einer globalen Erwärmung von 1, 2 und 3°C über dem vorindustriellen Niveau, basierend auf dem KIT-KLIWA-Ensemble. Die Antennen zeigen die Minimal- und Maximalwerte, die Boxen die 25- und 75-Perzentile, die schwarz gestrichelte Linie den Median (50-Perzentil) und die rote Linie den Mittelwert der Verteilung über die entsprechenden jeweils 30 Jahre und alle Gitterpunkte in der Region Stuttgart. Das globale Erwärmungsniveau +1°C entspricht dabei etwa den letzten 30 Jahren. Das globale Erwärmungsniveau +2°C wird wahrscheinlich bis Mitte des 21. Jahrhunderts erreicht. Das globale Erwärmungsniveau +3°C würde beim derzeitigen Verlauf der Treibhausgasemissionen in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts auftreten.	17
Abbildung 10: Erwartete zukünftige Entwicklung der Anzahl der heißen Tage im Jahresgang in der Region Stuttgart, für die globalen Erwärmungsniveaus 1, 2 und 3°C, basierend auf Daten des KIT-KLIWA-Ensembles. Die Balken stellen die über die Region, über alle Ensemblemitglieder und die jeweiligen 30 Jahre gemittelte Anzahl der heißen Tage dar, während die Antennen die entsprechenden Ensemble-Minimal- und Maximalwerte zeigen. Das globale Erwärmungsniveau +1°C entspricht dabei etwa den letzten 30 Jahren. Das globale Erwärmungsniveau +2°C wird wahrscheinlich bis Mitte des 21. Jahrhunderts erreicht. Das globale Erwärmungsniveau +3°C würde beim derzeitigen Verlauf der Treibhausgasemissionen in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts auftreten.	18
Abbildung 11: Rechengebiete (blaue Rahmen) und Relief der PALM-4U-Simulationen.	20
Abbildung 12: Vertikalprofile der potentiellen Temperatur als Anfangs- und Randwerte für die Modellrechnungen.	20
Abbildung 13: Ausschnitt Klimaanalysekarte – nur Klimatope (Quelle: Lohmeyer, 2023).	23
Abbildung 14: Ausschnitt Planungshinweiskarte (Quelle: Lohmeyer, 2023).	24
Abbildung 15: Ausschnitt Kaltluftvolumenstromdichte zwischen 0 m und 30 m Höhe für die Anfangsphase (Quelle: Lohmeyer, 2023).	25
Abbildung 16: Schematische Darstellung des relativen Klimaänderungssignals in Abhängigkeit der Wiederkehrperiode (Return period) und der Dauerstufe (Duration).	27
Abbildung 17: 100-jähriger Wiederkehrwert mit einer Dauerstufe von 1h. Farben unterscheiden den zugrundeliegenden Datensatz. Auf der x-Achse ist der Bezugszeitraum angegeben. Die Spannbreiten, die im Boxplot abgeschätzt werden basieren auf der Verteilung der Ergebnisse über der Region Stuttgart. Dargestellt	



sind der Median aus allen zur Region gehörenden Gitterpunkten (schwarze mittlere Linie), die 25. und 75. Perzentile (Box) und 1,5 mal der Interquartilsabstand (Antennen).	28
Abbildung 18: Darstellung der Spannweiten eines Änderungsfaktors auf Grundlage der Unsicherheiten der räumlichen Verteilung und dem abgeleiteten Klimaänderungssignal.	29
Abbildung 19: Beispiele zur Anpassung des Höhenmodells für Brückenbauwerke und Tunnel durch eine datenbasierte und (teil-)automatisierte Bearbeitung.	32
Abbildung 20: Exemplarischer Ausschnitt der regionalen Starkregengefahrenkarte – Darstellung der maximalen Wassertiefen für ein außergewöhnliches Starkregenereignis (statistische Wiederkehrzeit T= 100 a, D = 60 min, SRI 7, KOSTRA-DWD 2010R) und ein ausgewähltes Teilgebiet (Dr. Pecher AG).	35
Abbildung 21: Exemplarischer Ausschnitt der regionalen Starkregengefahrenkarte – Darstellung der maximalen Fließgeschwindigkeiten für ein außergewöhnliches Starkregenereignis (statistische Wiederkehrzeit T = 100 a, D = 60 min, SRI 7, KOSTRA-DWD 2010R) und ein ausgewähltes Teilgebiet (Dr. Pecher AG).	36
Abbildung 22: Aufbau der Kartensammlung zum Thema Vulnerabilität und Exposition.	40
Abbildung 23: Vergleich der Datenquellen hinsichtlich der Nutzeranforderungen.	41
Abbildung 24: Anteil an Einwohner*innen über 65 Jahren zur Gesamteinwohnerzahl des Wohnorts.	48
Abbildung 25: Anteil an einkommensschwächerer oder zur Miete wohnender Haushalte.	48
Abbildung 26: Grünversorgung - Durchschnittliche Quantität begrünter, öffentlicher Freiflächen je Einwohner:in.	49
Abbildung 27: Übersicht der Synthesekarten zur sozialen Vulnerabilität gegenüber Starkregen & Hitze.	49
Abbildung 28: Bruttowohndichte.	50
Abbildung 29: Karte zur baulichen Dichte und zur dominierenden Bebauungstypologie je Wohnort.	50
Abbildung 30: Karte der Beschäftigtendichte und der überwiegend nicht für Wohnen genutzte Siedlungsbereiche.	51
Abbildung 31: Agglomerationen sensibler und kritischer Infrastrukturen.	51
Abbildung 32: regionale Karten auf Gemeindeebene mit Daten der Statistisches Landesamt.	54
Abbildung 33: Karten auf Stadtviertelebene mit Daten der LHS Stuttgart.	55
Abbildung 34: Überlagerung der Karten: sensible und kritische Infrastrukturagglomerationen + Synthesekarte zur Vulnerabilität + Starkregengefahrenkarte.	56
Abbildung 35: Überlagerung: Klimatope mit hoher Hitzebelastung + soziale Vulnerabilität + Grünversorgung.	57
Abbildung 36: Anteil der Befragten, die eine hohe oder sehr hohe Hitzebelastung an den verschiedenen Orten empfinden (Angaben in Prozent).	59
Abbildung 37: Zustimmung zu der Aussage „Ich fühle mich gut auf ein kommendes Starkregenereignis vorbereitet“ nach Eigentumsverhältnissen, n = 1240 (681 aus Kirchheim unter Teck und 559 aus Stuttgart).	61
Abbildung 38: Schematische Darstellung der zwei Szenarien - dispers und kompakt.	62
Abbildung 39: Ergebnisse der Starkregenmodellierung für Szenario „Dispers“ im Vergleich zum Ist-Zustand (Kartenausschnitt).	65
Abbildung 40: Ergebnisse der Starkregenmodellierung für Szenario „Kompakt“ im Vergleich zum Ist-Zustand (Kartenausschnitt).	65
Abbildung 41: Kartenausschnitt der regionalen Ergebnisse der Klimaanalyse zum Bebauungsszenario (eine Unterscheidung zwischen Szenario „Dispers“ und „Kompakt“ war bei der Klimaanalyse nicht möglich). Diese Karte zeigt, dass Bebauung am Siedlungsrand eine Aufheizung von benachbarten bestehenden Siedlungsgebieten verursachen kann, besonders wenn die neue Bebauung eine Kaltluftströmung blockiert.	



Besonders in solchen Gebieten muss klimasensibel geplant werden und besonders auf die Bauweise und Ausrichtung der Gebäude geachtet werden.	66
Abbildung 42: Schadenspotentialberechnung bei Starkregenereignissen und Evaluation von Maßnahmenwirkungen.	71
Abbildung 43: Übersicht des Fokusraums Neckartalachse – Eingangsdaten und beispielhafte Ergebnisse der Schadenspotentialberechnungen (Quelle: Eigene Darstellungen, Hintergrundkarte: © OpenStreetMap Mitwirkende).	73
Abbildung 44: Lage des Untersuchungsgebietes NeckarPark, blau: Entwicklungsfläche. Quelle: Hintergrundkarte Luftbild 2021 / LHS.	78
Abbildung 45: Vergleich von simulierter (rote Linie) und gemessener (blaue Linie) Temperatur 80	80
Abbildung 46: 3D-Modell des Untersuchungsgebiets für den Referenzfall. Quelle: Gebäudedaten LHS.	81
Abbildung 47: 3D-Modell des Untersuchungsgebiets für den Begrünungsfall. Quelle: Gebäudedaten LHS.	81
Abbildung 48: PET-Werte in °C für den Referenzfall um 14 Uhr. Quelle: Gebäudedaten LHS.	82
Abbildung 49: Differenz der PET-Werte in °C zwischen Referenzfall und Begrünungsfall um 14 Uhr. Quelle: Gebäudedaten LHS.	83
Abbildung 50: Tagesgang der PET im Quartierspark von Referenzfall (graue Linie) und Begrünungsfall (grüne Linie).	85
Abbildung 51: Differenz der Lufttemperatur (Ta) zwischen Referenzfall und Begrünungsfall um 4 Uhr.	86
Abbildung 52: Ergebnis PALM-4U, Differenz der Lufttemperatur (Ta) zwischen Referenzfall und Begrünungsfall um 4 Uhr.	86
Abbildung 53: Differenz der Oberflächentemperatur im Dachniveau zwischen Referenzfall und Begrünungsfall um 14 Uhr.	87
Abbildung 54: Ökosystemleistung Wasserrückhalt im Fokusraum NeckarPark (Quelle: Eigene Berechnungen IÖW, Hintergrundkarte: © OpenStreetMap Mitwirkende).	91
Abbildung 55: Ökosystemleistungen Luftreinhaltung und Kohlenstoffspeicherung im Fokusraum NeckarPark (Quelle: Eigene Berechnungen IÖW, Hintergrundkarte: © OpenStreetMap Mitwirkende).	92
Abbildung 56: Beispielhafte Entscheidungssituation im Choice Experiment zur Ermittlung von Zahlungsbereitschaften für kulturelle Ökosystemleistungen (Quelle: Eigene Darstellung IÖW).	93
Abbildung 57: Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte der Grünmaßnahmen im Untersuchungsgebiet NeckarPark, nach Wertschöpfungsbestandteilen und Grünmaßnahmen (in Euro2022). Quelle: eigene Berechnungen IÖW.	95
Abbildung 58: Wertschöpfungseffekte der Grünmaßnahmen im Untersuchungsgebiet NeckarPark, nach Wirtschaftszweigen (in Euro2022). Quelle: eigene Berechnungen IÖW.	95
Abbildung 59: Modell-Domäne (graue Linie) und Untersuchungsgebiet (blaue Kontur). Quelle: Digitales Geländemodell VRS, Hintergrundkarte: Luftbild 2021.	98
Abbildung 60: Thermalkarte mit Modell-Domäne (graue Linie) und Untersuchungsgebiet (blaue Kontur) Quelle: Thermalkarte VRS, 2008.	98
Abbildung 61: Darstellung des statisches Treibers mit PALM-4U Klassen (Gebäude mit Baujahr oder Jahr der letzten Änderung/Sanierung) Quelle: Grundlagedaten VRS/LHS.	100
Abbildung 62: Ist-Zustand des Untersuchungsgebietes. Die strukturellen Veränderungen sowie die Anpassungsmaßnahmen sind in orange markiert. Quelle: Gebäudedaten LHS, Hintergrundbild: Luftbild 2021 LHS.	101
Abbildung 63: Planungsvariante I (oben) und Planungsvariante II (unten). Links sind die strukturellen Veränderungen und Anpassungsmaßnahmen aufgelistet. Quelle: Gebäudedaten LHS, Hintergrundbild: Luftbild 2021 LHS.	101
Abbildung 64: Räumliche Verteilung der Temperatur im Untersuchungsgebiet für den Ist-Zustand um 14 Uhr. Die Gebäude sind in schwarz dargestellt. Die blaue Kontur umschließt das Untersuchungsgebiet. Quelle: Gebäudedaten LHS.	102



Abbildung 65: Differenz der Temperatur zwischen Ist-Zustand und Planungsvariante II um 14 Uhr. Quelle: Gebäudedaten LHS.....	102
Abbildung 66: Differenz der Temperatur zwischen Ist-Zustand und Planungsvariante I um 14 Uhr. Quelle: Gebäudedaten LHS.....	102
Abbildung 67: Räumliche Verteilung der PET im Untersuchungsgebiet für den Ist-Zustand um 14 Uhr. Die Gebäude sind in schwarz dargestellt. Untersuchungsgebiet (blaue Kontur). Quelle: Gebäudedaten LHS.....	103
Abbildung 68: Differenz der PET zwischen Ist-Zustand und Planungsvariante II um 14 Uhr. Quelle: Gebäudedaten LHS	104
Abbildung 69: Differenz der PET zwischen Ist-Zustand und Planungsvariante I um 14 Uhr. Quelle: Gebäudedaten LHS.	104
Abbildung 70: Ökosystemleistung Wasserrückhalt im B14-Raum in beiden Planungsvarianten (Quelle: Eigene Berechnungen IÖW, Hintergrundkarte: © OpenStreetMap Mitwirkende).....	105
Abbildung 71: Ökosystemleistung Luftreinhaltung im B14-Raum in beiden Planungsvarianten (Quelle: Eigene Berechnungen IÖW, Hintergrundkarte: © OpenStreetMap Mitwirkende).....	105
Abbildung 72: Ökosystemleistung Kohlenstoffspeicherung im B14-Raum in beiden Planungsvarianten (Quelle: Eigene Berechnungen IÖW, Hintergrundkarte: © OpenStreetMap Mitwirkende).	106
Abbildung 73: Wertschöpfungseffekte der Grünmaßnahmen im Untersuchungsgebiet B14-Raum, nach Wertschöpfungsbestandteilen und Grünmaßnahmen (in Euro2022). Quelle: eigene Berechnungen IÖW.....	107
Abbildung 74: Verteilung der Wertschöpfungseffekte auf die regionalen Wirtschaftszweige über alle Maßnahmen im B14-Raum, Quelle: eigene Berechnungen IÖW.	108
Abbildung 75: Säule 1, Vergleich Darstellung Sommertage im Beobachtungszeitraum und GWL2.	113
Abbildung 76: Säule 1, Darstellung der Fließgeschwindigkeiten.	114
Abbildung 77: Säule 1, Soziale Vulnerabilität gegenüber Hitze.	115
Abbildung 78: Säule 2, Maßnahmen zur Starkregenvorsorge.	116
Abbildung 79: Säule 2, Maßnahmen zur Starkregenvorsorge.	117
Abbildung 80: Säule 2, Maßnahmen zur Starkregenvorsorge.	117
Abbildung 81: Säule 3, Erläuterungen zur Klimakenngröße der Sommertage.....	118
Abbildung 82: Säule 3, Erläuterungen zur Klimakenngröße der Sommertage.....	119
Abbildung 83: Online-Tool-Konzeption.	133
Abbildung 84: Übersicht der Themenfelder (links) und ihrer geplanten Darstellungsform (rechts) im Tool.....	134
Abbildung 85: Technischer Aufbau des Tools in der AWS Cloud.	135
Abbildung 86: Technische Schichten.	135
Abbildung 87: Auswertung einer Frage der Kategorie "Regionale Klimainformationen".	138
Abbildung 88: Bewertung der Verständlichkeit der Wissensbibliothek.....	138
Abbildung 89: Integrationsfähigkeit des Tools in Arbeitsprozesse der Testnutzer:innen.	139
Abbildung 90: ISAP-Tool als Ergänzung zu bestehenden Anwendungen.....	139
Abbildung 91: Gruppenfoto vom 2. Tag des Workshops zu "Cross-National Research to Support Local and Regional Climate Resilient Planning in Stuttgart and Northern Virginia in 6-8 März 2023".....	146
Abbildung 92: Impressionen der ISAP-Abschlusskonferenz.....	148



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Für das KIT-KLIWA verwendete Globalmodelle der CMIP5 Generation und Zeiträume in denen bei den Simulationen das GWL +2°C bzw. das GWL +3°C erreicht wird.....	8
Tabelle 2: UTCI Belastungsgrößen (nach Bröde et al., 2012).....	14
Tabelle 3: verwendetet Datenquellen für die regionale Klimaanalyse.....	19
Tabelle 4: Relevanz der verwendeten Verwundbarkeitsindikatoren.....	42
Tabelle 5: Wichtige Basisinformationen zur Analyse und zur Differenzierung der Exposition.....	42
Tabelle 6: Datengrundlagen für die Analysen zur Exposition und Vulnerabilität.	44
Tabelle 7: Methode - Synthesekarten zur Vulnerabilität bei Starkregen und bei Hitze.....	45
Tabelle 8: Methode - Schlüsselindikatoren als Einzellayer.....	45
Tabelle 9: Methode – zusätzliche Basisinformationen.	46
Tabelle 10: Definition der zwei Szenarien anhand vier Parameter.....	63
Tabelle 11: Untersuchte Maßnahmengruppen und ihr Maßnahmenraum im Fokusraum Neckartalachse.....	72
Tabelle 12: Schadenspotenziale aller untersuchten Maßnahmengruppen im Fokusraum Neckarpark im Vergleich.	74
Tabelle 13: Modell Setup und meteorologischen Anfangsbedingungen.....	79
Tabelle 14: Kategorisierung von PET in Bereiche unterschiedlichen thermischen Empfindens (Quelle: VDI, 2022)	82
Tabelle 15: Differenz der PET zwischen Referenzfall und Begrünungsfall an einem ausgewählten Baumstandort (rot). Quelle: Gebäudedaten LHS.	84
Tabelle 16: Ergebnistabelle der Ökosystemleistungsbewertung im Fokusraum NeckarPark.	88
Tabelle 17: Umsetzungsumfänge der Klimaanpassungsmaßnahmen im Untersuchungsgebiete NeckarPark und damit verbundene Investitions- und Pflegekosten (netto in Euro2022). Quelle: eigene Berechnungen IÖW.	94
Tabelle 18: Ergebnistabelle der Ökosystemleistungsbewertung im B14-Raum.....	104
Tabelle 19: Umsetzungsumfänge der Klimaanpassungsmaßnahmen im Untersuchungsgebiete NeckarPark und damit verbundene Investitions- und Pflegekosten (netto in Euro2022). Quelle: eigene Berechnungen IÖW.	107
Tabelle 20: Veranstaltungsprogramm (in vereinfachter Form) der ISAP-Abschlusskonferenz.....	146



1. ISAP – stadt-regionale Anpassungsstrategien

Auswirkungen des Klimawandels sind in der Region Stuttgart bereits heute durch den zunehmenden Hitzestress und häufigere Starkregenereignisse spürbar und sichtbar. Davon sind auch wichtige Infrastruktureinrichtungen, wie Flughafen, Hafen, Fernverkehrsstraßen und Schnellbahntrassen, mit weit über die Region hinausreichender Bedeutung betroffen. Für die Modellregion Stuttgart als polyzentrischer, hochverdichteter Raum mit starkem Wirtschaftswachstum ist die Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels daher eine zentrale Voraussetzung für die Sicherung der Wohn- und Lebensqualität für die in den 179 Städten und Gemeinden lebenden Menschen sowie für die Sicherheit und Wettbewerbsfähigkeit der Region.

Die mit dem Klimawandel einhergehenden Herausforderungen sind kaum ausschließlich innerhalb einzelner Gemarkungsgrenzen zu bewältigen. Dies gilt insbesondere für die Region Stuttgart als polyzentrischer, hochverdichteter Raum. Betroffen von den Folgen des Klimawandels sind kleinere und mittlere Kommunen als auch die Landeshauptstadt Stuttgart. Daher sind Datengrundlagen für anpassungsfähige und belastbare Raumstrukturen zu schaffen und Klimaanpassung als integraler Bestandteil einer kommunalen wie regionalen Entwicklungsplanung nachhaltig zu verankern. Klimaanpassung erfordert eine überörtliche Koordination im Rahmen der Regionalplanung, die den hohen funktionalen Verflechtungen gerecht wird und trotzdem die administrative Kleinteiligkeit der Kommunen und deren Planungshoheit adäquat berücksichtigt.

1.1 Ausgangslage – Modellregion Stuttgart

Die Region Stuttgart umfasst rund 2,8 Millionen Einwohner:innen, welche sich auf 179 Kommunen verteilen. Dabei zeichnet sie sich durch eine hohe landschaftliche Vielfalt aus, mit teilweise sehr ausgeprägter Topografie. Siedlungsstrukturell ist die dichte Besiedelung hervorzuheben: Die Region weist eine Einwohnerdichte von 763 Einwohner:innen je Quadratkilometer auf, im Vergleich zu anderen Regionen Deutschlands, wie etwa der Region München mit rund 530 Einwohner:innen je Quadratkilometer (Planungsverband Äußerer Wirtschaftsraum München) ist sie somit deutlich dichter besiedelt. Auf nur 10 % der Landesfläche leben 25 % der Bevölkerung Baden-Württembergs. Auch Arbeitsplätze und Infrastruktureinrichtungen konzentrieren sich in der Region in besonderem Maß. So befinden sich in der Region wichtige Infrastruktureinrichtungen, wie Flughafen, Hafen, Fernverkehrsstraßen und Schnellbahntrassen, mit weit über die Grenzen der Region hinausreichender Bedeutung. 30 % der Wirtschaftsleistung des Landes Baden-Württemberg werden in der Region Stuttgart erbracht, das BIP beträgt 149 Mrd. Euro. Eine besondere Rolle hinsichtlich Wirtschaftssektoren nimmt das produzierende Gewerbe ein, dieser Sektor nimmt im Hinblick auf die Branchenstruktur einen höheren Anteil ein als in vielen anderen Regionen. Bedeutende Wirtschaftsbereiche sind der Fahrzeug- und Maschinenbau, die Elektrotechnik sowie Forschung und Entwicklung. Die regionalen Beschäftigungsschwerpunkte bilden die Landeshauptstadt Stuttgart und die Mittelzentren der Region Stuttgart. Dies führt zu hohen Pendlerströmen in und aus diesen Städten (etwa 75% der sozialversicherungspflichtig beschäftigten Arbeitnehmer arbeiten nicht an ihrem Wohnort). Aufgrund der Polyzentralität der Region mit vielen Arbeitsplatzangeboten auch in Unter- und Kleinzentren sind die Pendlerdistanzen im Verhältnis zu vielen anderen Region vergleichsweise gering. Die Landschaft der Region gliedert der Neckar mit seinen zahlreichen Zuflüssen in abwechslungsreiche Einheiten. Auf die flachen, landwirtschaftlich geprägten Gäulandschaften folgen die Wälder des Keuperberglands. Die Region Stuttgart liegt größtenteils im Neckarbecken, eingebettet zwischen Schwarzwald im Südwesten, Schwäbischer Alb im Südosten, Schurwald und Schwäbischem Wald im Osten, dem Strom- und Heuchelberggebiet im Nordwesten bzw. dem Schwäbisch-Fränkischen Wald im Nordosten.



Die Kommunen der Region weisen eine hohe strukturelle Diversität (Abbildung 1) hinsichtlich ihrer flächenbezogenen Größe, Anzahl der Einwohner:innen, den Verwaltungsstrukturen und -kapazitäten sowie deren landschaftlicher und naturräumlicher Gegebenheiten auf. Rund zwei Drittel der Kommunen zählt weniger als 10.000 Einwohner:innen, ein Drittel der Kommunen zählt weniger als 5.000 Einwohner:innen. Dementsprechend sind die Kommunen der Region Stuttgart mit unterschiedlichen Ressourcen insbesondere hinsichtlich ihrer Verwaltungsstrukturen ausgestattet.

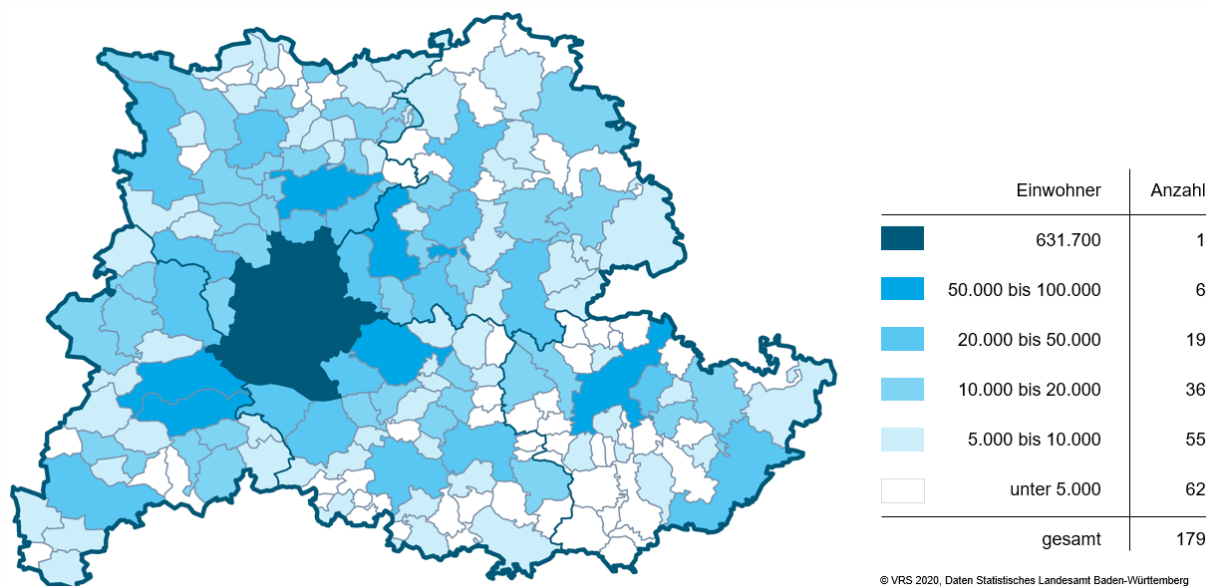


Abbildung 1: Region Stuttgart – Gemeindeverteilung.

Im Hinblick auf die Wirkungen des Klimawandels belegen diese Kenngrößen die überdurchschnittliche Dimension des Gefährdungspotentials. Damit wird deutlich, wie wichtig eine entsprechende Vorsorge gegenüber den für die Region besonders bedeutenden Gefahren des Klimawandels, wie die Zunahme von Hitzebelastung und von Extremwetterereignissen, ist. Die Realisierung geeigneter Anpassungsmaßnahmen gestaltet sich dabei wegen der bereits erreichten und noch weiter zunehmenden baulichen und funktionalen Dichte einerseits und der Notwendigkeit multifunktionale Ausgleichsräume freizuhalten und ggfs. neu zu schaffen andererseits als besonders komplex. Der Klimawandel berührt zudem als flächendeckendes Phänomen zahlreiche Themenfelder. Dementsprechend ist die Vorbereitung auf die erkennbaren Veränderungen sowie die Initiierung und Koordination entsprechender Anpassungsmaßnahmen eine überörtliche und überfachliche Querschnittsaufgabe – und damit wichtiger Gegenstand raumordnerischen bzw. regionalplanerischen Handelns. Zudem können wichtige Maßnahmen hinsichtlich der Anpassung an Hitzestress, Trockenheit und Starkregen, wie bspw. die Bereitstellung von Flächen für Kaltluftentstehung bzw. -abfluss oder die Hochwasserretention und Freihaltung von Starkregenabflussgebieten, innerhalb einzelner Gemarkungsgrenzen kaum zweckmäßig umgesetzt werden. Für die Region Stuttgart – mit einer hohen funktionalen Verflechtung, aber administrativer Kleinteiligkeit – gilt dies ganz besonders. Bewerkstelligt werden muss die Vielzahl der erforderlichen Maßnahmen letztlich von der jeweiligen Gemeinde. Insbesondere kleinere Gemeinden haben nicht immer ausreichende Ressourcen, um die unterschiedlichen Aspekte des Klimawandels vollständig aufzubereiten. Für den Verband Region Stuttgart ist die Unterstützung der Gemeinden daher von besonderer Bedeutung. Ziel ist es, Klimaanpassung nicht als zusätzlichen, solitären Handlungsbaustein zu bearbeiten, sondern als integralen Bestandteil einer kommunalen, kreisweiten oder regionalen Entwicklungsplanung.



1.2 Zielstellung

Vor diesem Hintergrund befasste sich das Verbundprojekt „Integrative stadt-regionale Anpassungsstrategien in einer polyzentrischen Wachstumsregion: Modellregion – Region Stuttgart“ (ISAP), gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, in der dreijährigen Laufzeit (August 2020 – Oktober 2023) mit der strategischen Anpassung an Extremereignisse, wie Hitzestress und Starkregen, durch Planung und Digitalisierung.

Um stadt-regionale Anpassungsbedarfe darzustellen, die Planungsgrundlagen in der Region Stuttgart zu verbessern und ihre Anwendung in Entscheidungsprozesse zu erleichtern, entwickelte das Verbundprojekt ISAP gemeinsam mit der Region Stuttgart und der Landeshauptstadt Stuttgart ein neues innovatives stadt-regionales Online-Informations- und Beratungssystem zu Klimaanpassungsfragen. Das Forschungsprojekt entwickelte dabei passgenaue stadt-regionale Informations- und Analyseinstrumente für die Klimaanpassung, wie Klimadaten, Vulnerabilitäten und Anpassungsnotwendigkeiten, die auch die speziellen Nutzer:innenbedarfe in der Modellregion fokussierten. Hierbei konnte auch auf den im Jahr 2008 veröffentlichten „Regionale Klimaatlas“ aufgebaut werden. Zur weiteren Konkretisierung von Anpassungsnotwendigkeiten zielte das Projekt auch auf die Entwicklung neuer methodischer Ansätze, u.a. zum Landnutzungswandel und deren Einfluss auf Hitze - und Starkrisiken sowie zur Erfassung der gesellschaftlichen Vulnerabilität und Exposition auf stadt-regionaler Ebene ab. Darüber hinaus setzte sich das ISAP-Projekt zum Ziel, die Wirksamkeit von Maßnahmen aufzuzeigen, um somit Anpassungshandeln in der Region zu stärken und voranzutreiben. Hierzu wurden integrierte Analyse- und Bewertungsmethoden verwendet, um die physikalische und ökonomische Wirkung von Maßnahmen darzustellen. Neben der Entwicklung des Online-Tools zu Klimaanpassungsfragen stand auch die Erprobung im Vordergrund, um die Anwendbarkeit und Nutzer:innenfreundlichkeit des Online-Tools und seiner Inhalte für formelle und informelle Planungsinstrumente sicherzustellen. Hierfür war der Dialog mit Kommunen und Regionen unerlässlich, nicht nur um die Ergebnisse auch für andere Regionen nutzbar zu machen, sondern auch um ein praxistaugliches Online-Tool zu entwickeln. ISAP ist zudem eines von sechs Modellvorhaben, die im Rahmen der Fördermaßnahme ["Regionale Informationen zum Klimahandel"](#) ([RegiKlim](#)) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) daran arbeiteten, die Klimaanpassungskapazitäten auf der Ebene von Regionen und Kommunen durch digitale Instrumente zu verbessern. Die Maßnahme ist Teil der Leitinitiative „Lokale Klima- und Umweltmodelle für Zukunftsstädte und -regionen“ der Digitalstrategie sowie des Aktionsplans "Natürlich.Digital.Nachhaltig" des BMBF.

1.3 Konzeptaufbau (Arbeitspaketaufbau)

Das Projekt ISAP gliederte sich insgesamt in 7 Arbeitspakete. Die Arbeitspakete sind dabei eng miteinander verknüpft und bauen in Teilen aufeinander auf. Die Zwischenprodukte der einzelnen Arbeitspakete mündeten in das Kernprodukt - das Online-Informations- und Beratungssystem (AP5). Im Folgenden sind die Arbeitspakete aufgelistet:

- Arbeitspaket 1: Bedarfe und Nutzerinteressen
- Arbeitspaket 2: Regionale Klimaänderungen und Extremereignisse
- Arbeitspaket 3: Anpassungsnotwendigkeiten und Anpassungskapazitäten
- Arbeitspaket 4: Integrative Bewertung auf regionaler und kommunaler Ebene
- Arbeitspaket 5: Online-Informations- und Beratungssystem
- Arbeitspaket 6: Test-Anwendung und Weiterentwicklung in Fallbeispielen
- Arbeitspaket 7: Dissemination – Stadt, Region und internationale Ebene



Die maßgeblich erzielten Ergebnisse im Rahmen des ISAP-Projekts (Abbildung 2) werden in den nachfolgenden Kapiteln im Detail dargelegt. Der Aufbau und die Struktur orientiert sich hierbei an dem Konzept des Online-Informations- und Beratungssystems.

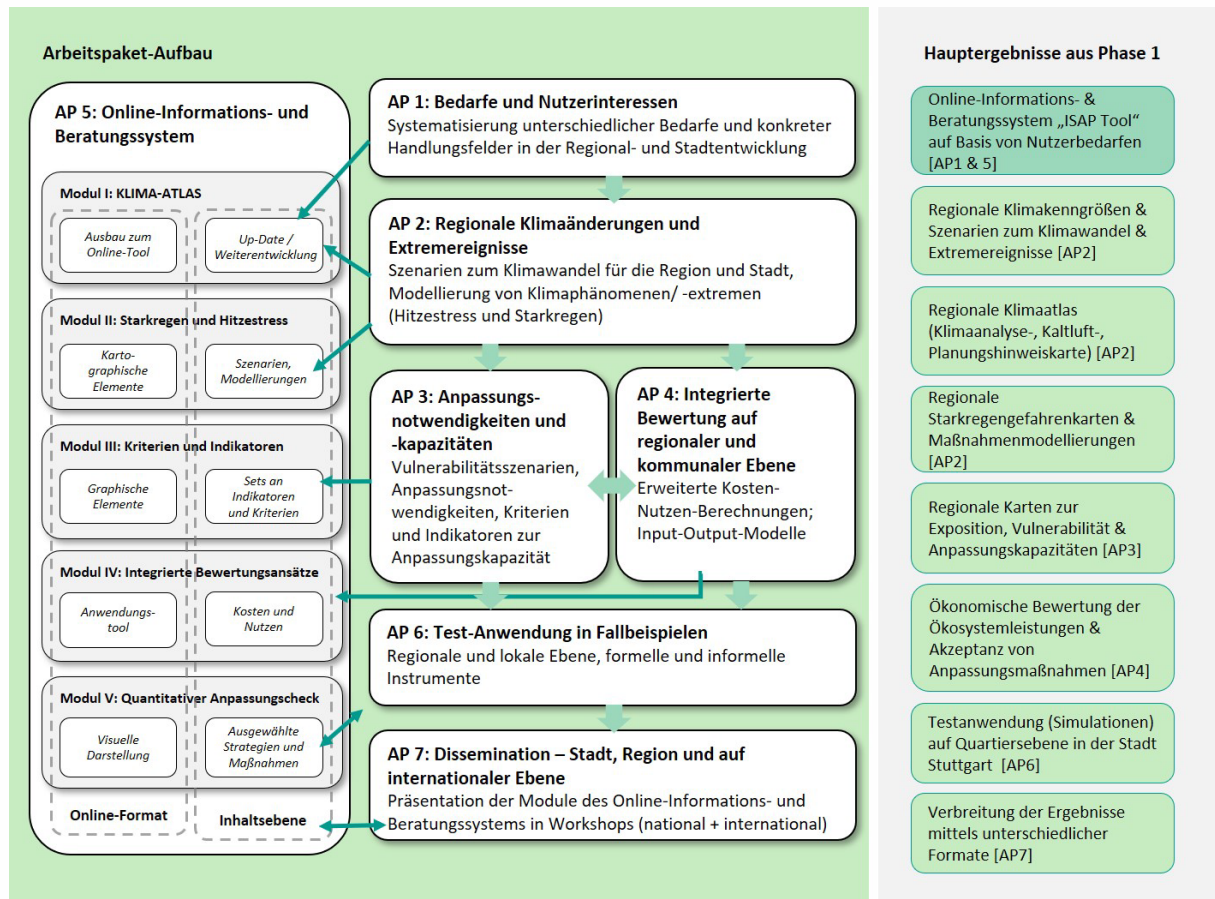


Abbildung 2: Arbeitspaketaufbau - Kernergebnisse des ISAP 1-Projekts

Kapitel 2

Regionale Klimainformationen für die Region Stuttgart





2. Regionale Klimainformationen für die Region Stuttgart

Die Bereitstellung evidenzbasierter regionaler Klima-, Vulnerabilitäts- und Anpassungsinformationen stellte ein Kernziel des ISAP-Projekts dar. Zur Charakterisierung des zukünftigen Klimas sowie der Hitze- und Starkregenrisiken für die Region Stuttgart lieferte das KIT dazu geeignete Klimasimulationen auf der Kilometer-Skala sowie Analysen der meteorologischen Klimaänderungssignale inklusive Analysen zu deren Unsicherheiten und Spannweiten (siehe Kapitel 2.1, 2.2.1, 2.3.1), welche auch als Eingabeinformationen für regionalen Klimaanalyse und Starkregengefahrenkarten bereitgestellt wurden. So führte die Lohmeyer GmbH Simulationen zur Hitzebelastung und Kaltluftberechnungen in der Region mit einem Stadtklimamodell durch (siehe Kapitel 2.2.3, 2.2.4). Die Dr. Pecher AG erzeugte Starkregengefahrenkarten mit einem hydrodynamischen Modell (siehe Kapitel 2.3.2). Weiterführende Analysen zur Erfassung der Verwundbarkeit und Exposition wurden vom IREUS entwickelt (siehe Kapitel 2.4).

2.1 Regionale Klimasimulationen als Datengrundlage für ISAP

Zuständigkeit: Arbeitspaket 2 – KIT, P-AG, Lohmeyer, VRS; LHS

Die Anpassungen an den Klimawandel für Starkregengefahren und Hitzebelastung sind die zwei zentralen Themen in ISAP. Während für die Analyse des derzeitigen Klimas auch Beobachtungsdaten verwendet werden, benötigt man für die Abschätzung zukünftiger Änderungen Klimasimulationen. Die oben genannten Kernthemen erfordern eine sehr hohe räumliche und zeitliche Auflösung dieser Simulationen. Diese ist auch wichtig, um den Skalensprung von den Klimasimulationen zur nachfolgenden Wirkmodellierung, wie sie im Projekt erfolgt ist, zu verringern. Klimasimulationen auf der Kilometerskala stellen ein noch neues Forschungsfeld dar, welches sich aktuell rapide weiterentwickelt. Da der Rechenaufwand für diese hochauflösenden Simulationen besonders groß ist, standen in der Vergangenheit in der Regel nur einzelne Simulationen über begrenzte Zeiträume und kleine Modellgebiete zur Verfügung (Prein et al., 2015). Der Vorteil dieser neuen, hochauflösenden Klimasimulationen ist, dass bei solch geringen Gitterweiten konvektive Prozesse, wie sie etwa bei Starkregenereignissen eine große Rolle einnehmen können, direkt wiedergegeben werden, wohingegen bei gröber aufgelösten Simulationen derartige Prozesse parametrisiert werden. Daher basieren die sogenannten konvektionserlaubenden Simulationen stärker auf der direkten Beschreibung physikalischer Prinzipien und reduzieren die Modellunsicherheiten. Weiterhin werden Ensembles von unterschiedlichen Klimasimulationen benötigt, um die mögliche Spannweite der zukünftigen Änderungen abschätzen zu können. Im ReglKlim Querschnittsprojekt NUKLEUS wurde in der ersten Phase ein Ensemble erstellt, welches auf der neuen CMIP6 Generation basiert und ganz Deutschland in konvektionserlaubender Auflösung darstellt, welches aber erst in der zweiten Projektphase zur Verfügung steht. Bis dahin konnte das KIT bereits in der ersten ISAP-Phase mit dem KIT-KLIWA Ensemble eine geeignete Basis für Klimaänderungsinformationen in konvektionserlaubender Auflösung auf Basis von CMIP5 bereitstellen.

In Absprache zwischen den Modellregionen und NUKLEUS in einer gemeinsamen Arbeitsgruppe von ReglKlim wurde vereinbart die Klimaänderungssignale nicht auf feste Zeitscheiben, sondern auf die sogenannten „Global Warming Level (GWL)“ zu beziehen. Diese zeigen einen Zeitraum an, in dem sich die globale Mitteltemperatur um ein bestimmtes Maß gegenüber vorindustriellen Bedingungen erhöht hat. Die GWLs haben sich als nützlich für die Verwendung in Impakt- und Anpassungsstudien gezeigt (z. B. IPCC, 2022). Für die in ISAP relevanten Fragestellungen liefern die GWLs konsistentere Änderungssignale, da sie weniger als die Zeitscheiben-Betrachtung von den gewählten Emissionsszenarien und den Klimasensitivitäten der beteiligten Modelle abhängen.



2.1.1 Beschreibung des KIT-KLIWA Ensembles

Grundlage für die Analyse des Klimawandels in der Region Stuttgart diente das KIT-KLIWA Ensemble (Schädler et al., 2018), welches aus dem Beitrag des KIT zum Bundesländer-übergreifenden Projekt KLIWA (Klimaveränderung und Wasser-wirtschaft; www.kliwa.de) entstanden ist. Dieses Ensemble wurde im ISAP-Projekt vervollständigt und bietet eine derzeit einzigartige Basis für hochaufgelöste Klimanalysen für Süddeutschland (Hundhausen et al., 2023a,b). Mit dem regionalen Klimamodell (RCM) COSMO-CLM Version 5 (CCLM, Sørland et al., 2021) wurden in drei Nesting Schritten ein Downscaling von Simulationen von vier CMIP5 Globalmodellen (GCM) im rcp8.5 Emissionsszenario durchgeführt (Abbildung 3 und Tabelle 1). In der ersten Phase des ISAP-Projekts wurde das Ensemble dahingehend erweitert, dass es nunmehr den gesamten Zeitraum von 1971 bis 2100 abdeckt. Ensembles mit transienten Klimaprojektion sind auf der Kilometer-Skala bisher einzigartig. So eignen sich damit besonders sowohl den in RegiKlim vereinbarten Ansatz der Global Warming Levels als auch für die regionspezifische Anwendung in ISAP.

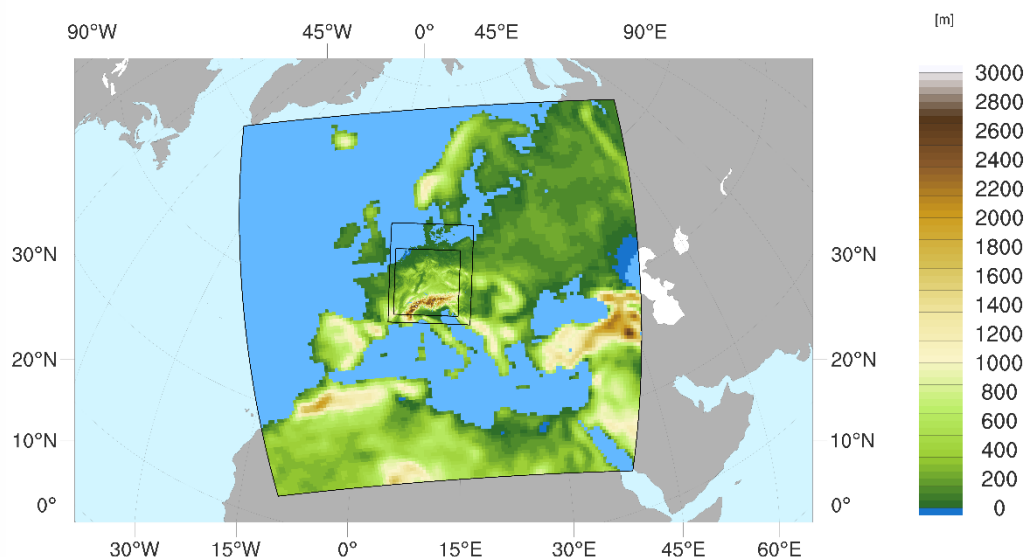


Abbildung 3: KIT-KLIWA Ensemble - Modellgebiete und -Topographie. Nest 1 Europa, 50 km Gitterweite; Nest 2 Deutschland 7 km Gitterweite und Nest 3 Süddeutschland 2,8 km Gitterweite.

Tabelle 1: Für das KIT-KLIWA verwendete Globalmodelle der CMIP5 Generation und Zeiträume in denen bei den Simulationen das GWL +2°C bzw. das GWL +3°C erreicht wird.

Globalmodell	Realisierung	Zeitraum GWL +2°C	Zeitraum GWL +3°C
CNRM-CM5	r1i1p1	2029 – 2058	2052 - 2081
MPI-ESM-LR	r1i1p1	2029 – 2058	2052 - 2081
EC-Earth	r12i1p1	2026 – 2055	2051 – 2080
HadGEM2-ES	r1i1p1	2016 – 2045	2037 - 2066



2.1.2 Bereitstellung von Daten für nachfolgende Modellierung

Sowohl für Temperatur- als auch für Niederschlagsdaten des KIT-KLIWA Ensembles wurde eine Bias Korrektur durchgeführt, um systematische Fehler der Ergebnisse zu korrigieren und die Daten damit für die Anwendung nutzbar zu machen. Die Daten und Analysen der Klimasimulationen wurden den Projektpartnern in Absprache zur Verfügung gestellt. Für die Verwendung der Daten durch die Lohmeyer GmbH mit dem Stadtklimamodell PALM4U wurden die Daten für die benötigten Parameter in stündlicher Auflösung und für den relevanten regionalen Ausschnitt bereitgestellt. Zusätzlich wurden die Charakteristika heutiger und zukünftiger Hitzewellen analysiert (siehe Kapitel 2.2.1; Hundhausen et al., 2023a). Bei der Bestimmung der Eingangsdaten für die hydrodynamische Modellierung durch die Pecher AG wurden, in Abstimmung mit diesen und weiteren Projektpartnern, Analysen durchgeführt, um geeignete Klimaänderungsfaktoren zu bestimmen (siehe Kapitel 2.3.1; Hundhausen et al., 2023b).

2.1.3 Bewertung und Mehrwert der hochaufgelösten Klimasimulation

Es wurden umfangreiche Analysen zur Bestimmung der Güte und des Mehrwerts der hochaufgelösten KIT-KLIWA Simulationen durchgeführt. Insgesamt ist das Ergebnis, dass das KIT-KLIWA Ensemble für den Bedarf im ISAP Projekt geeignet ist.

Für die Temperatur und daraus abgeleiteten Größen ist dies in Hundhausen et al. (2023a) dokumentiert. Abbildung 4 (links) zeigt die mittlere Abweichung der mit der ERA40 Reanalyse angetriebenen Simulationen mit 2,8 km Gitterweite (orange) und 7 km Gitterweite (blau) im Sommer- und Winterhalbjahr gegenüber den HYRAS Beobachtungen des DWD (Razafimaharo et al., 2020). Die unkorrigierten Simulationsdaten sind kühler als die HYRAS Daten. Die Abweichungen der höher aufgelösten 2,8 km Simulation zeigen aber vor allem im Sommer eine niedrigere Abweichung als die 7 km Simulation. Dies ist auch in Abbildung 4 (rechts) zu erkennen. Die Reanalyse-Simulation mit der höheren Auflösung stimmt mit den Beobachtungsdaten überein, wohingegen die Temperatur-Verteilung der gröberen Simulation etwas zu niedrigeren Temperaturen verschoben ist. Auch bei den GCM angetriebenen Ensemble Simulationen liefern die höher aufgelösten Simulationen geringere Abweichungen. Mittels einer Bias-Korrektur wurden die Verteilungen noch besser an die Beobachtungsdaten angepasst.

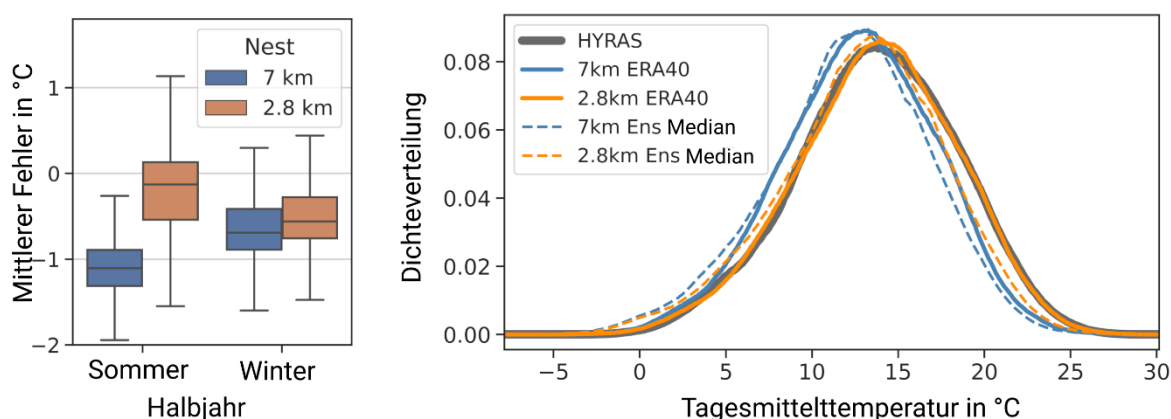


Abbildung 4: Links: Mittlere Abweichung der Temperatur von den HYRAS-DWD Beobachtungsdaten für die unkorrigierten KIT-KLIWA ERA40-Simulationen in 2,8 km und 7 km Gitterweite. Rechts: Häufigkeitsverteilung der Temperatur im Sommerhalbjahr (Mai-Oktober) für die Reanalyse (ERA40) – und GCM-angetriebenen Simulationen aus dem KIT-KLIWA Ensemble sowie der HYRAS-DWD Beobachtungsdaten (Hundhausen et al., 2023a)



Für den Niederschlag wurden die Simulationsergebnisse in Hundhausen et al., (2023b) gegenüber KOSTRA-DWD 2010 Datensatz (Malitz und Ertel, 2015) für einen weiten Bereich von Dauerstufen und Wiederkehrwerten evaluiert. Auch dabei zeigt sich eine Verbesserung der Wiedergabe der Intensitätsverteilung bei Erhöhung der Auflösung.

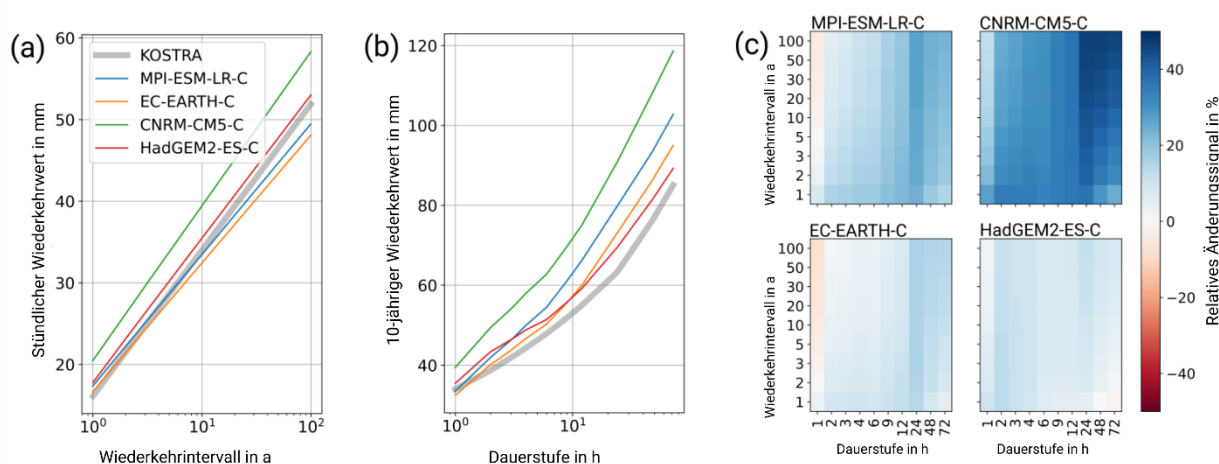


Abbildung 5: (a) Vergleich der Wiederkehrwerte (RL; y-Achse) des 1-stündlichen Niederschlags für Wiederkehrperioden von 1 bis 100 Jahren (x-Achse) für die vier hochauflösten Simulationen des KIT-KLIWA Ensembles; (b) 10-jähriger Wiederkehrwert (RL10) gegen Dauerstufen und Wiederkehrperioden von den KOSTRA 2010 Daten (Hundhausen et al., 2023b)

Abbildung 5 (a) zeigt, dass die Wiederkehrwerte des stündlichen Niederschlags, über einen weiten Bereich der Wiederkehrperioden mit den KOSTRA-Daten übereinstimmt. Ähnliches gilt auch für den 10-jährigen Wiederkehrwert des Niederschlags über einen weiten Bereich von Dauerstufen (Abbildung 5b). Die relativen Abweichungen nehmen mit der Wiederkehrperiode leicht zu (Abbildung 5c). Für stündliche Niederschläge unterschätzen die mit EC-Earth und MPI-ESM-LR angetriebenen Simulationen die Wiederkehrwerte leicht. Für alle anderen Dauerstufen und Modelle ergibt sich eine leichte Überschätzung. Eine Ausnahme ist dabei die mit CNRM-CM5 angetriebene Simulation, welche für alle Dauerstufen, besonders aber für mehrtägige Extreme die Werte überschätzt.



2.2 Hitze in der Region Stuttgart

Zuständigkeit: Arbeitspaket 2 – KIT, P-AG, Lohmeyer, VRS; LHS

Der Umgang mit Hitzerrisiken stellt bereits heute eine zentrale Herausforderung für die Region Stuttgart dar. Hierfür bedarf es passgenaue und belastbare Aussagen zu den erwarteten lokalen Veränderungen von Hitzewelle, zu Hitzehotspots und zur Kaltluftsituation. Die in ISAP entwickelten Klimainformationen zum Themenkomplex Hitze werden nachfolgend komprimiert dargestellt.

2.2.1 Hitzewellen heute und in der Zukunft

In den letzten Jahren hat die Häufigkeit von Hitzewellen in Europa zugenommen. Das Ausmaß der heißen und langen Hitzewellen in den Jahren 2003 und 2010 sind deutliche Anzeichen des fortschreitenden Klimawandels. Solche über mehrere Tage anhaltende Perioden erhöhter Temperaturen stellen eine ernsthafte Gefahr für Ökosysteme, die Wirtschaft und die menschliche Gesundheit dar. Basierend auf den hoch aufgelösten Klimasimulationsdaten des KIT-KLIWA Ensembles wurde eine Studie über die Entwicklung von Hitzewellen in Süddeutschland durchgeführt und die Eigenschaften zukünftiger Hitzewellen mithilfe verschiedener Indizes untersucht. Die vollständige Studie ist unter <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2873-2023> zu finden. Die wichtigsten Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

Änderung der Charakteristika von Hitzewellen im Klimawandel

Um die Entwicklung von Hitzewellen in Süddeutschland und damit repräsentativ für die Region Stuttgart zu untersuchen, wurden Klimasimulationen des KIT-KLIWA Ensembles ausgewertet. Die Hitzewellen wurden anhand folgender Größen charakterisiert:

- Die *Dauer* einer Hitzewelle in Tagen wurde ausgewertet. Eine Hitzewelle ist dabei definiert als mehr als drei aufeinanderfolgende Tage, an denen die Tagesmaximumtemperatur das 90. Perzentil der klimatologischen Verteilung der Tagesmaximumtemperatur (berechnet von 1971-2000) überschreitet.
- Die *maximale Temperatur* einer Hitzewelle wurde ausgewertet. Als Temperaturanomalie wird dabei die Differenz zwischen maximaler Hitzewellentemperatur und dem 90. Perzentil von Tagesmaximumtemperatur von 1971-2000 beschrieben.
- Der *Heat Wave Magnitude Index (HWMId)* wurde verwendet, um die Stärke der Hitzewellen zu bewerten. Dieser Index berücksichtigt nicht nur die Temperatur, sondern auch die Dauer der Hitzeperiode.

Berechnung:

$$HWMId = \frac{T_{max} - T_{max,25\%}}{T_{max,75\%} - T_{max,24\%}}$$

mit Tagesmaximumtemperatur T_{max} , 25. und 75. Perzentil der klimatologischen Verteilung (1971-2000) der Tagesmaximumtemperatur, $T_{max,25\%}$ und $T_{max,75\%}$. HWMId wird über die Tage einer Hitzewelle aufsummiert.

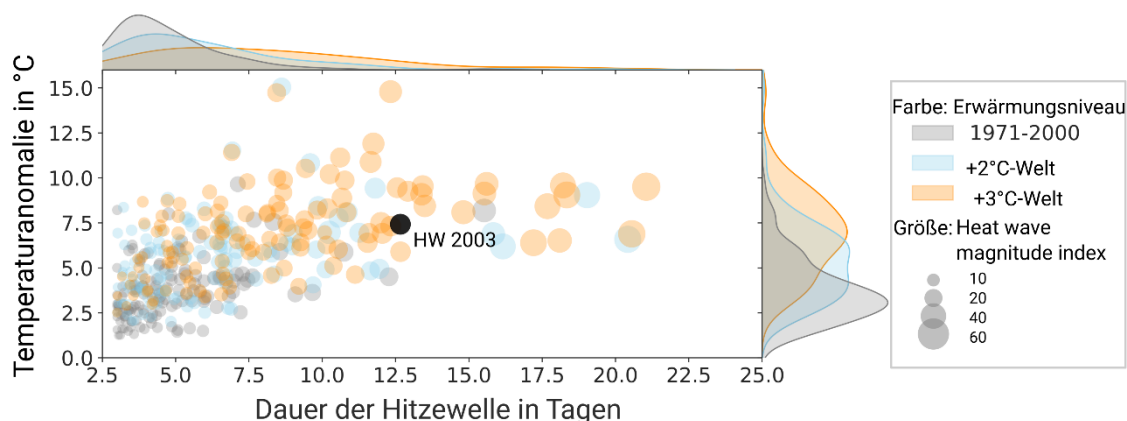


Abbildung 6: Entwicklung der stärksten Hitzewelle im Untersuchungsgebiet pro Jahr bezüglich Temperaturanomalie (x-Achse), Dauer (y-Achse) und HWMId (Größe) aus den Modellergebnissen von 1971-2000 (grau), einer 2 Grad wärmeren Welt (blau) und einer 3 Grad wärmeren Welt (orange)

Abbildung 6 stellt die drei Größen in Verbindung. Jeder Kreis zeigt die stärkste Hitzewelle im Untersuchungsgebiet pro Jahr aus den Modellergebnissen von 1971-2000 (grau), einer 2 Grad wärmeren Welt (blau) und einer 3 Grad wärmeren Welt (orange, siehe Eintrag zu Erwärmungsniveau). Auf der x-Achse ist die Dauer einer Hitzewelle aufgetragen. Je weiter rechts ein Kreis eingezeichnet ist, desto länger dauert die projizierte Hitzewelle. Auf der y-Achse ist die Temperaturanomalie aufgetragen. Je weiter oben eine Hitzewelle verzeichnet ist, desto heißer war sie im Vergleich zum langjährigen Mittel. Die Größe eines Kreises zeigt die Stärke (HWMId) einer Hitzewelle. Je größer der Kreis, desto stärker die Hitzewelle.

Die Ergebnisse legen nahe, dass mit globaler Erderwärmung die Temperaturen während der Hitzewellen noch höher werden als die Temperaturen bisher beobachteter Hitzewellen. Dies kann zu erheblichen Herausforderungen für die Gesundheitsversorgung und die Energieversorgung führen. Eine Zunahme der Dauer der Hitzewellen wird erwartet. Lag die Dauer der stärksten Hitzewellen in den Jahren 1971-2000 noch im Mittel bei 4,3 Tagen, wird sie in einer 2 (3) Grad wärmeren Welt bei 5,1 (7,5) Tagen erwartet. Längere Hitzewellen haben zum einen negative Auswirkungen auf die Gesundheit, aber beeinträchtigen auch die Landwirtschaft, Bewässerung und Trinkwasserversorgung. Die Auswertung des HWMId zeigt, dass die erwartete Zunahme von Temperatur und Dauer insgesamt zu einer Erhöhung der Stärke um 26% (100%) in einer 2 (3) Grad wärmeren Welt führt.

Um die Ergebnisse einzuordnen, werden sie mit einem tatsächlichen Referenzereignis für Deutschland verglichen – der Hitzewelle im Jahr 2003. Die Hitzewelle hatte starke wirtschaftliche und Umweltauswirkungen, verursachte tausend Todesfälle und wird als Rekord-Hitzewelle bezeichnet. Die Hitzewelle 2003 hatte in Süddeutschland eine durchschnittliche Dauer von 12,7 Tagen, eine maximale Temperaturanomalie von 7,4°C und einen HWMId-Wert von 26,7. Sie ist in schwarz in Abbildung 6 dargestellt. Wie erwartet, ist dieses Ereignis im Referenzzeitraum äußerst unwahrscheinlich. Nur ein simulierter Sommer im Referenzzeitraum übertrifft das gemessene Ereignis von 2003. In einer wärmeren Welt treten Ereignisse dieser Stärke mit höherer Wahrscheinlichkeit auf. Hinsichtlich der Dauer entspricht ein Ereignis wie die Hitzewelle 2003 in einer 3 Grad wärmeren Welt einer Wiederkehrperiode von 8 Jahren. Die Stärke der Hitzewelle 2003, parametrisiert über den HWMId, entspricht in einer 3 Grad wärmeren Welt einer Wiederkehrperiode von 6 Jahren. Zusammenfassend wird ein Ereignis, wie die Hitzewelle von 2003, in einer wärmeren Welt wahrscheinlicher, aber es wird prognostiziert, dass es ein extremes Ereignis mit einer Wiederkehrperiode von 5 bis 10 Jahren bleibt.



Für die Region Stuttgart und die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen gibt diese Analyse einen Anhaltspunkt, welche Charakteristiken zukünftige Hitzeperioden aufweisen. Die Studie zeigt auf, dass nicht unbedingt die höhere Spitzentemperatur, sondern vor allem die erwartete längere Dauer der Hitzeperioden deren Stärke beeinflusst.

2.2.2 Klimakenngrößen

Klimakenngrößen sind Indikatoren, die verwendet werden, um das Klima in einer bestimmten Region oder einem bestimmten Gebiet zu beschreiben. Diese Größen basieren auf verschiedenen Parametern, wie Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, oder Sonnenscheindauer.

Diese Größen sind von Bedeutung für die Bewertung des Klimawandels, die Entwicklung von Anpassungsstrategien, die Planung von Infrastrukturprojekten, die Landwirtschaft oder die Energieerzeugung. Sie ermöglichen es, die langfristigen klimatischen Trends und Variationen zu verstehen und darauf zu reagieren.

Die folgenden Ergebnisse der Kenngrößen „heiße Tage“ zeigen beispielhaft die Ergebnisse verschiedener Klimakenngrößen in der Region Stuttgart und wie Klimakenngrößen in verschiedenen Handlungsfeldern eingesetzt werden können. Weitere relevante Größen, die im Co-design von KIT und Lohmeyer GmbH mit der Stadt Stuttgart und Verband Region Stuttgart ausgewählt und die zugeschnittene Auswertung entwickelt wurden, sind: Tropennächte ($T_{\text{Min}} \geq 20^\circ\text{C}$), Sehr heiße Tage ($T_{\text{Max}} \geq 35^\circ\text{C}$), heiße Tage ($T_{\text{Max}} \geq 30^\circ\text{C}$), Sommertage ($T_{\text{Max}} \geq 25^\circ\text{C}$), Tage mit starker Wärmebelastung ($\text{UTCI}_{\text{Max}} \geq 32^\circ\text{C}$), Dauer der Trockenperioden im Sommerhalbjahr, Dauer der Hitzeperioden im Sommerhalbjahr, Niederschlag im Sommer- und Winterhalbjahr sowie Indizes für die Bewertung von Starkregen, Frosttage ($T_{\text{Min}} < 0^\circ\text{C}$), Eistage ($T_{\text{Max}} < 0^\circ\text{C}$), Tage mit starker Kältebelastung ($\text{UTCI}_{\text{Min}} < -13^\circ\text{C}$) und Tage mit Winterdienst. Die Auswertungen dieser Größen ist im ISAP Online-Tool zu finden.

Der UTCI (z. B. Jendritzky et al., 2009, 2012; Bröde et al., 2012) ermöglicht die Bewertung und Vorhersage der thermischen Bedingungen des Menschen im Freien. Die Bewertung erfolgt auf Basis des Fiala-Modells zur Thermoregulation des Menschen (Fiala et al., 2010, 2012) und ist mit einem Bekleidungsmodell (Havenith et al., 2012) gekoppelt. Der UTCI folgt wie bspw. die PET dem Konzept einer Äquivalenttemperatur und ist für eine Kombination von Temperatur, Wind, Strahlung und Feuchte als die Lufttemperatur einer Referenzumgebung definiert, bei der die physiologische Belastung derjenigen unter den aktuell betrachteten Bedingungen gleicht. Für detailliertere Beschreibungen sei auf die genannte Literatur verwiesen. Als meteorologische Größen gehen in die Berechnung des UTCI die Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte ein. Die mittlere Strahlungstemperatur ist definiert als die einheitliche Temperatur einer schwarz strahlenden Umschließungsfläche (Emissionskoeffizient $\epsilon = 1$), die zu dem gleichen Strahlungsenergiegewinn eines Menschen führt wie die aktuellen, unter Freilandbedingungen meist sehr uneinheitlichen Strahlungsflüsse. Die mittlere Strahlungstemperatur entspricht in Innenräumen gewöhnlich der Lufttemperatur, kann in besonnten Bereichen im Freien jedoch mehr als 30 K darüber liegen (VDI 3787 Blatt 2, 2008). Die Belastungsklassen des UTCI zeigt die folgende Tabelle (nach Bröde et al., 2012).



Tabelle 2: UTCI Belastungsgrößen (nach Bröde et al., 2012).

UTCI	Belastungsstufe	Physiologische Wirkung
> 46 °C	Extreme Wärmebelastung	Wärmebelastung
38 °C bis 46 °C	Sehr starke Wärmebelastung	
32 °C bis 38 °C	Starke Wärmebelastung	
26 °C bis 32 °C	Mäßige Wärmebelastung	
18 °C bis 26 °C	„thermischer Komfortbereich“	
9 °C bis 18 °C		Keine thermische Belastung
0 °C bis 9 °C	Schwache Kältebelastung	Kältebelastung
-13 °C bis 0 °C	Mäßige Kältebelastung	
-27 °C bis -13 °C	Starke Kältebelastung	
-40 °C bis -27 °C	Sehr starke Kältebelastung	
< -40 °C	Extreme Kältebelastung	

Heiße Tage

Definition - Was sind heiße Tage? An einem heißen Tag beträgt die Höchsttemperatur mindestens 30°C.

Heiße Tage gefährden die Gesundheit vor allem von älteren und pflegebedürftigen Personen, Säuglingen und Kleinkindern, im Freien Arbeitenden, sowie Menschen mit Erkrankungen, die den Stoffwechsel oder das Herz-Kreislauf-System beeinträchtigen. In der Landwirtschaft können heiße Tage zu vermindertem Ertrag sowie Qualität der Ernte führen. In der Wald- und Forstwirtschaft stellen heiße Tage für Bäume eine erhöhte Belastung durch Schädlinge dar. Zusätzlich erhöht sich die Waldbrandgefahr. Auch in der Stadt- und Raumplanung können häufigere Hitzeereignisse eine Anpassung notwendig machen, da Stadtbäume vermehrt Schädlingen ausgesetzt sind und sie zudem aufgrund des begrenzten Wurzelraumes an heißen Tagen schneller unter Trockenstress geraten (Schipper et al., 2016).

Die Anzahl der heißen Tage hängt aufgrund der Höhenabhängigkeit der Temperatur von der Topografie ab. Die Abbildung 7 zeigt die mittlere Anzahl der Hitzetage pro Jahr zwischen 1971 und 2000 für die Region Stuttgart. Besonders viele heiße Tage weisen die Städte und Dörfer in den Flusstälern, wie bspw. dem Filstal oder dem Neckartal, auf. Weniger heiße Tage gibt es hingegen in größeren Höhenlagen wie auf der Schwäbischen Alb.

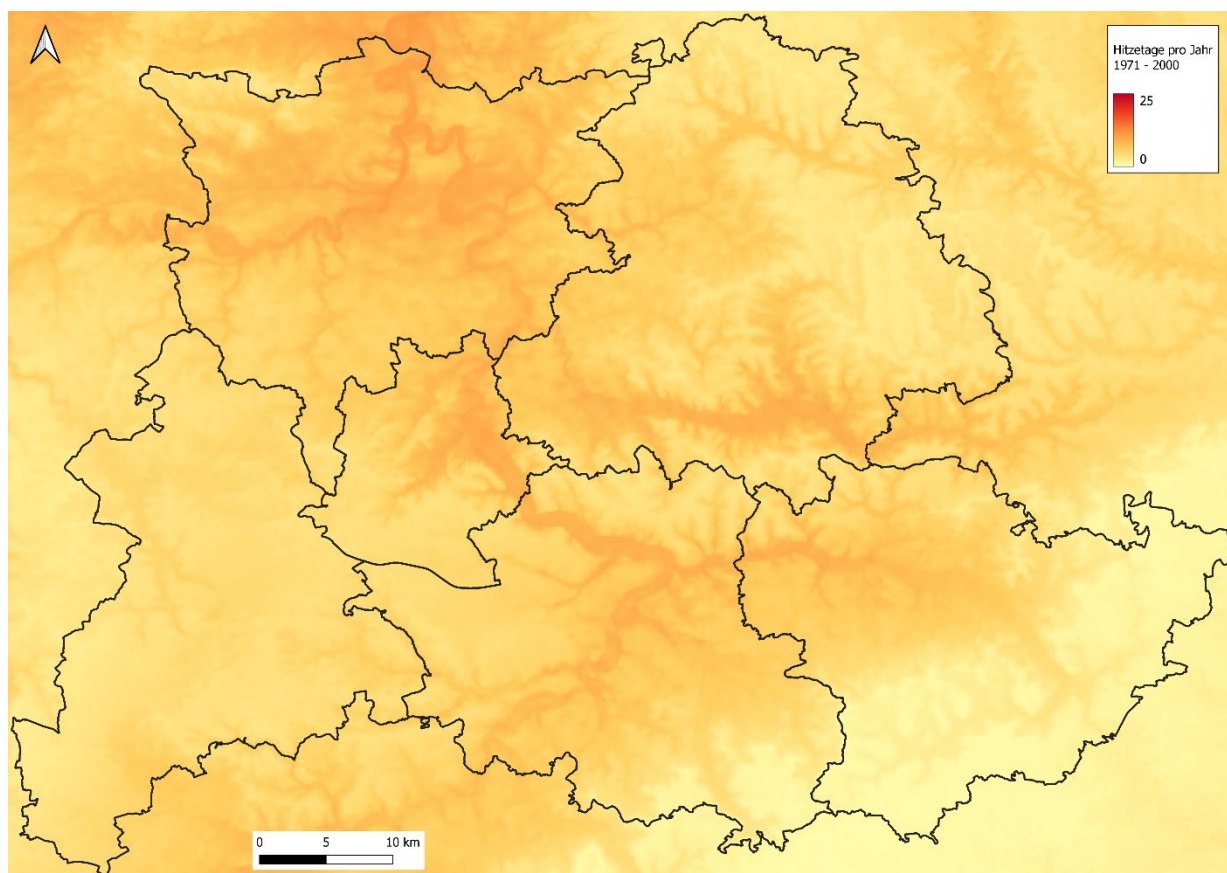


Abbildung 7: Anzahl der Hitzetage pro Jahr von 1971 bis 2000.

Beobachteter Klimawandel – Wie hat sich die Anzahl der heißen Tage bereits verändert?

Mit Beobachtungsdaten aus dem Messnetz des Deutschen Wetterdienstes kann die Entwicklung der Anzahl der heißen Tage von 1951 bis ins Jahr 2020 bestimmt werden. Hieraus können Rückschlüsse auf die bereits eingetretene Klimaänderung in der Region Stuttgart gezogen werden.

Das Balkendiagramm (Abbildung 8) zeigt die beobachtete Entwicklung seit 1951. Jeder Balken stellt die gemittelte Anzahl von heißen Tagen über die Region Stuttgart für das jeweilige Jahr dar. Die Anzahl der heißen Tage variiert von Jahr zu Jahr und bildet die natürliche Schwankung des Klimas ab. Zusätzlich ist der Trend zu sehen, dass die Anzahl der heißen Tage im Mittel zunehmen. Der Mittelwert der 30 Jahre von 1971-2000 liegt bei 5, von 1991-2020 bei 10 heißen Tagen pro Jahr. Die extremsten Sommer mit 25 heißen Tagen sind in der nahen Vergangenheit, 2003 und 2015, aufgetreten, während die Sommer mit weniger als 4 heißen Tagen pro Jahr alle vor der Jahrtausendwende liegen.

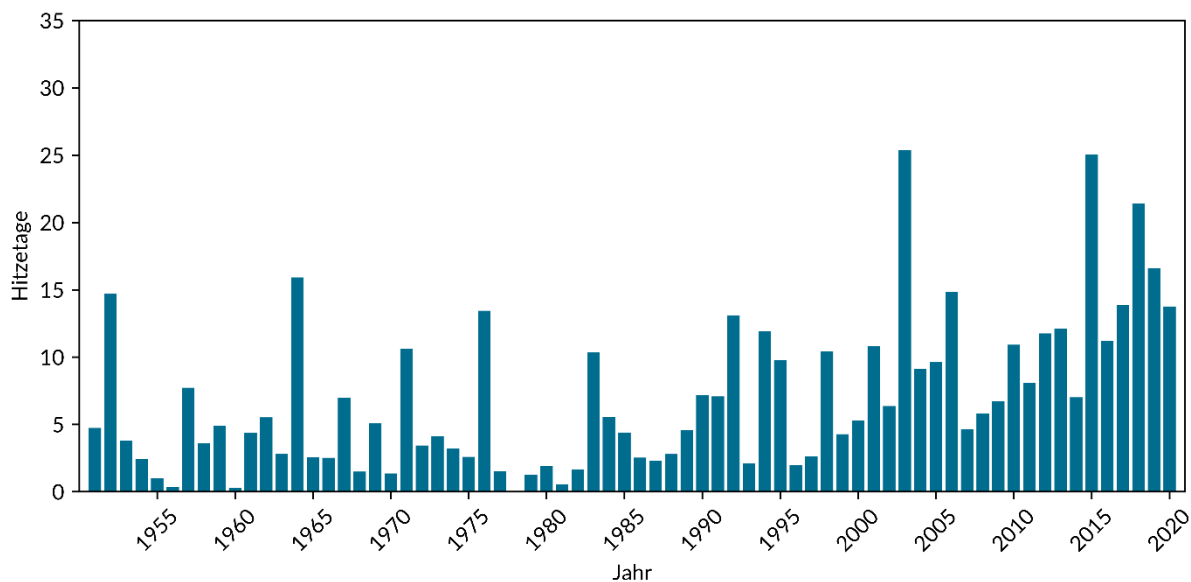


Abbildung 8: Beobachtete Entwicklung der heißen Tage von 1951-2020 (Daten: DWD). Jeder Balken zeigt die Anzahl von heißen Tagen für das jeweilige Jahr, gemittelt über die Region Stuttgart.

Klimaprojektion – Wie viele heiße Tage werden in der Zukunft erwartet?

Um die zukünftige Entwicklung des Klimas zu berechnen, werden mit Hilfe von Klimamodellen und unter der Annahme von möglichen Treibhausgas-Emissionsszenarien Klimaprojektionen erstellt. Zur besseren Abschätzung der Spannbreite der möglichen Klimasignale werden, wenn möglich, mehrere Simulationen durchgeführt und zu einem sogenannten Ensemble kombiniert.

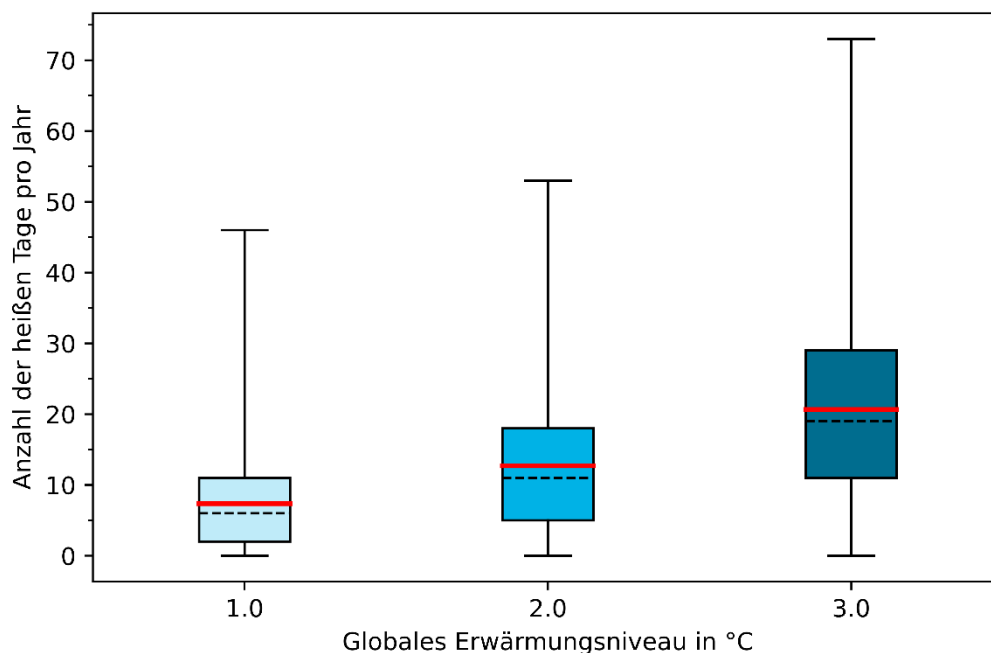


Abbildung 9: Erwartete zukünftige Entwicklung der Anzahl der heißen Tage pro Jahr in der Region Stuttgart bei einer globalen Erwärmung von 1, 2 und 3°C über dem vorindustriellen Niveau, basierend auf dem KIT-KLIWA-Ensemble. Die Antennen zeigen die Minimal- und Maximalwerte, die Boxen die 25- und 75-Perzentile, die schwarz gestrichelte Linie den Median (50-Perzentil) und die rote Linie den Mittelwert der Verteilung über die entsprechenden jeweils 30 Jahre und alle Gitterpunkte in der Region Stuttgart. Das globale Erwärmungsniveau +1°C entspricht dabei etwa den letzten 30 Jahren. Das globale Erwärmungsniveau +2°C wird wahrscheinlich bis Mitte des 21. Jahrhunderts erreicht. Das globale Erwärmungsniveau +3°C würde beim derzeitigen Verlauf der Treibhausgasemissionen in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts auftreten.

Basierend auf den Daten des KIT-KLIWA Ensembles werden die lokalen Auswirkungen einer globalen Erwärmung um 1, 2 und 3°C im Vergleich zu vorindustriellen Verhältnissen dargestellt. Jedem Erwärmungsniveau werden hierbei jeweils 30 simulierte Jahre zugeordnet. Das Erwärmungsniveau 1°C entspricht bereits in etwa den aktuellen Bedingungen, das Erwärmungsniveau 2°C wird wahrscheinlich bis Mitte des 21. Jahrhunderts erreicht und 3°C globale Erwärmung würden bei einem weiterhin unveränderten Treibhausgasausstoß voraussichtlich in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts erreicht. Die Projektionen zeigen für das gegenwärtige Klima (Erwärmungsniveau 1°C) im Mittel weniger als 10 heiße Tage in der Region Stuttgart, während die Prognosen für die Erwärmungsniveaus 2 und 3°C im Mittel bei über 10 bzw. über 20 heißen Tagen pro Jahr liegen (Abbildung 9). Momentan scheinen Jahre mit mehr als 50 heißen Tagen sehr unwahrscheinlich, während nach Erreichen des Erwärmungsniveaus 3°C auch Jahre mit über 70 heißen Tagen im Bereich des Möglichen liegen.

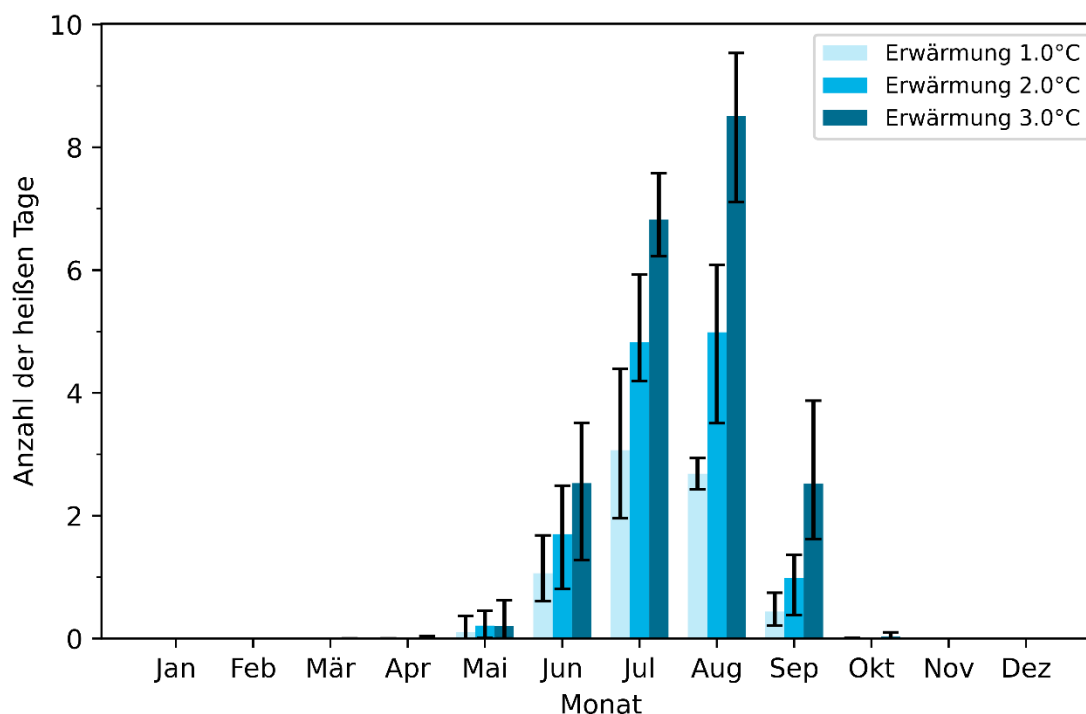


Abbildung 10: Erwartete zukünftige Entwicklung der Anzahl der heißen Tage im Jahresgang in der Region Stuttgart, für die globalen Erwärmungsniveaus 1, 2 und 3°C, basierend auf Daten des KIT-KLIWA-Ensembles. Die Balken stellen die über die Region, über alle Ensemblemitglieder und die jeweiligen 30 Jahre gemittelte Anzahl der heißen Tage dar, während die Antennen die entsprechenden Ensemble-Minimal- und Maximalwerte zeigen. Das globale Erwärmungsniveau +1°C entspricht dabei etwa den letzten 30 Jahren. Das globale Erwärmungsniveau +2°C wird wahrscheinlich bis Mitte des 21. Jahrhunderts erreicht. Das globale Erwärmungsniveau +3°C würde beim derzeitigen Verlauf der Treibhausgasemissionen in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts auftreten.

Bei der Analyse des Jahresgangs wird deutlich, dass die Wahrscheinlichkeit für heiße Tage nicht nur in den eigentlichen Sommermonaten Juni, Juli und August mit zunehmender Erwärmung ansteigt, sondern insbesondere auch im September (Abbildung 10). Im momentanen Klima wird im September im Mittel weniger als ein heißer Tag pro Jahr erwartet, während es bei Erreichen des globalen Erwärmungsniveaus 3°C knapp drei Tage sind.

2.2.3 Regionale Klimaanalysen

Im Nachfolgenden werden die ISAP-Produkte regionale Klimaanalyse und die darauf aufbauende Planungshinweiskarte erläutert, welche auch im ISAP Online-Tool zentrale Elemente für den Klimabelang darstellen.

Klimasimulationen mit PALM-4U

Um lokale Effekte, wie bspw. die städtische Überwärmung gegenüber dem Umland oder lokale Kaltluftströmungen und deren Auswirkungen auf die Temperatur und den thermischen Komfort vorweisen zu können, sind neben den Klimadaten des KIT räumlich sehr detaillierte Simulationen erforderlich. Da die beschriebenen Effekte ihre stärkste Ausprägung bei autochthonen Wetterlagen, d.h. wolkenarm und windschwach, aufweisen, werden Simulationen für einen typischen heißen Sommertag und einen typischen kalten Wintertag bei einer autochthonen Wetterlage mit dem mikroskaligen Klimamodell PALM-4U (z. B. Maronga et al., 2015, 2020) mit einer Auflösung 100 m x



100 m berechnet. Basis der Berechnungen ist die Geländehöhe und Landnutzung inklusive Informationen über die Gebäudehöhe, die Gebäudedichte und den Versiegelungsgrad. Die Geländehöhe wurde aus 1 m-Rasterdaten auf das Rastergitter interpoliert. Die Landnutzung und der Versiegelungsgrad wurde aus ALKIS-Polygonen in Kombination mit den 10m x 10m-Rasterdaten der „imperviousness density 2018“ (Quelle: <https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-imperviousness/imperviousness-density-2018>; letzter Aufruf: 01.02.2024) abgeleitet. Die mittlere Gebäudehöhe und Gebäudedichte für eine Rasterzelle der Modellierung wurde aus LoD2-Daten berechnet. Die folgende Tabelle 3 zeigt die entsprechend verwendeten Datenquellen.

Tabelle 3: verwendete Datenquellen für die regionale Klimaanalyse.

Datensatz	Datenquelle
Digitales Geländemodell	VRS, Stand: 2019
Basis-DLM	VRS, Stand: 2020
Alkis	VRS, Stand: 2020
LoD2-Daten	VRS, Stand: 2019
Imperviousness Density 2018	Copernicus, Stand: 2018

Um Randeffekte zu vermeiden und alle Kaltlufteinzugsgebiete vollständig abzubilden, wurde PALM-4U genestet angewendet, d. h. es wurde als Basis ein größeres Gebiet weit über die Grenzen der Region Stuttgart hinaus mit 200 m x 200 m Gitterweite modelliert, bevor das Zielgebiet mit 100 m x 100 m modelliert wurde. Die Simulationsgebiete und die Abgrenzung der Region Stuttgart mit den Geländehöhen sind in Abbildung 11 dargestellt. Die Simulationen beginnen um 00 UTC und reichen bis 06 UTC des Folgetages bei 24-stündigem „spinup“ zum Einschwingen der Bodentemperatur- und Bodenfeuchte. Die Auswertung erfolgt von 06 UTC bis 06 UTC. Neben den statischen Feldern, d. h. Geländehöhe, Landnutzung, Gebäudehöhe und Gebäudedichte, werden für die Simulation von PALM-4U meteorologische Anfangs- und Randbedingungen benötigt. Für typische heiße Sommertage und kalte Wintertage wurden die meteorologischen Anfangs- und Randwerte aus den Radiosondendaten der Station Stuttgart-Schnarrenberg aus dem Zeitraum 1971 – 2020 abgeleitet. Damit ergeben sich für typische heiße Sommertage und kalte Wintertage, die in Abbildung 12 dargestellten Vertikalprofile der potentiellen Temperatur.

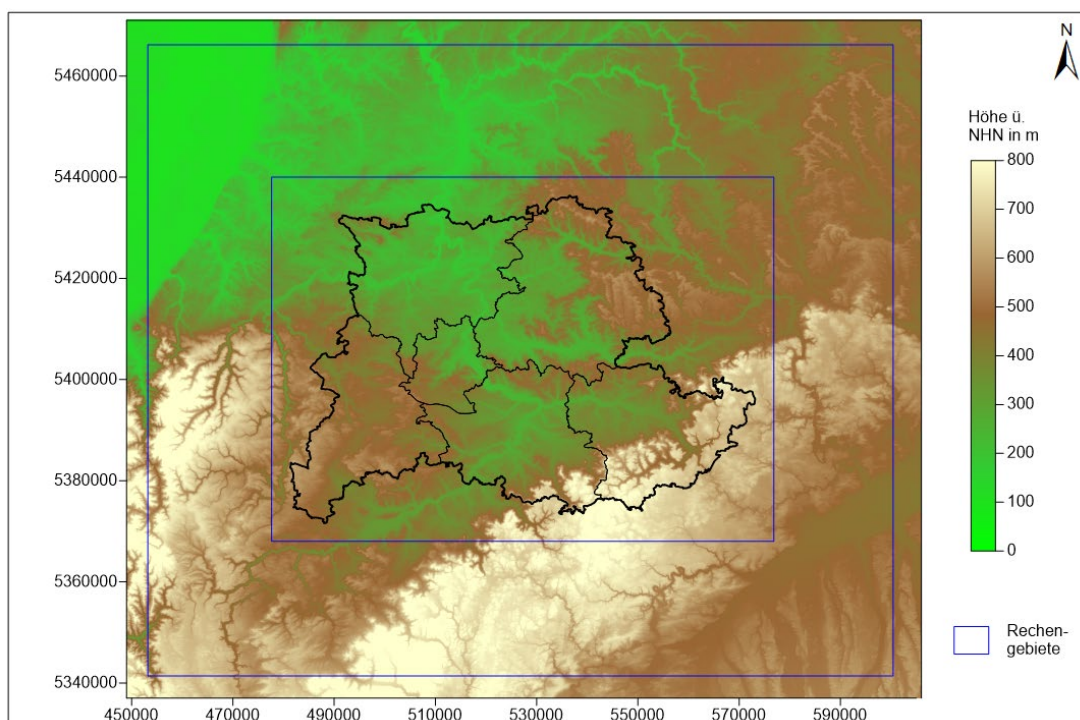


Abbildung 11: Rechengebiete (blaue Rahmen) und Relief der PALM-4U-Simulationen.

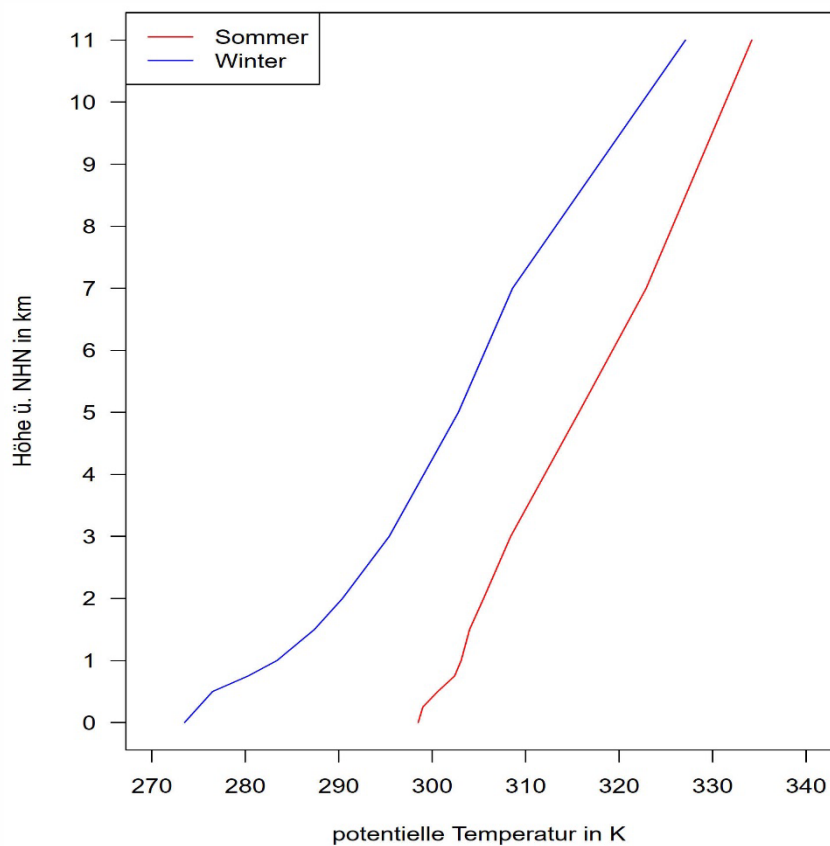


Abbildung 12: Vertikalprofile der potentiellen Temperatur als Anfangs- und Randwerte für die Modellrechnungen.



Die Ergebnisse der Simulation für einen typischen Heißen Sommertag wurden der Stadt Stuttgart als Antriebsdaten für ihre mikroskaligen Berechnungen zur Verfügung gestellt, sodass hier auch die regionalen Kaltlufteinflüsse berücksichtigt werden können.

Regionale Klimaanalyse - Grundlagen

Eine nachhaltige Raumentwicklung zielt darauf ab, wichtige ökologische Schutzgüter und Ausgleichsfunktionen dauerhaft zu sichern, um eine umweltverträgliche Entwicklung von Siedlung und Infrastruktur zu ermöglichen. Klima und Luft sind als wichtiger Belang im Rahmen der Abwägung fester Bestandteil der Regionalplanung, der Bauleitplanung, von Strategischen Umweltprüfungen sowie Umweltverträglichkeitsprüfungen und Standortuntersuchungen und gewinnen im Zuge des Klimawandels und der Umweltgerechtigkeit zunehmend an Bedeutung. Für eine sachgerechte Berücksichtigung dieser Belange werden belastbare Daten in Form von flächenbezogenen Informationen benötigt.

Zweck des Klimaatlasses ist es, die für eine Abwägung klimatischer und lufthygienischer Belange benötigten Grundlagenmaterialien zu erarbeiten und für die Planungen des Verbandes bzw. der Städte und Gemeinden in der Region Stuttgart aufzubereiten. Die Karten liegen in unterschiedlichen Maßstabsebenen vor, d. h. 1:300 000 bis 1:10 000, die von der Ebene der Regionalplanung bis zur Flächennutzungsplanung reichen. Die in den Karten verwendeten Signaturen und Symbole sind überwiegend an die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1, „Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen“ angelehnt.

Vorgehensweise

Im Zuge des Klimawandels wird u.a. in der Region Stuttgart ein Anstieg von Sommertagen, Hitzetagen und sehr heißen Tagen beobachtet. Für die Zukunft wird mittels Klimamodellen ein weiterer Anstieg solcher Tage projiziert. Die Region Stuttgart ist geprägt durch reliefiertes Gelände, sodass sich an solchen sommerlichen und heißen Tagen bei autochthonen Wetterlagen, d. h. schwachwindig und wolkenarm, mit dem Sonnenuntergang Kaltluft bildet, die sich der Geländeneigung folgend als Hangabwind in Bewegung setzt. In Einschnitten und Tälern werden die Hangabwinde zusammengeführt und können intensive Kaltluftströmungen ausbilden, die die nächtliche Belüftung von Siedlungsgebieten fördern. Deshalb werden auf Grundlage des Reliefs, der Landnutzung und der Bebauung prognostische Simulationen für einen typischen Heißen Sommertag für die Region Stuttgart durchgeführt, um u.a. die Kombination der nächtlichen Kaltluftströmungen mit den überwärmten städtischen Bereichen darzustellen. Um alle Kaltlufteinzugsgebiete für die Region Stuttgart abzubilden, wird zuerst ein hinreichend großes äußeres Simulationsgebiet bearbeitet, das die umliegenden Geländeanstiege weiträumig erfasst. Auf Basis der großräumigeren Berechnung inklusive Erfassung der überregionalen Kaltluftströmungen erfolgt mittels eines Nesting-Verfahrens (Gitterverfeinerung) die Berechnung für die Region Stuttgart.

Regionale Klimaanalysekarte

Ein wesentlicher Bestandteil des Klimaatlasses für die Region Stuttgart ist die Erstellung einer Klimaanalysekarte, die die lokalklimatischen Gegebenheiten in der Region als flächenhafte Übersicht darstellt. Die Datengrundlage bildet die lokalklimatische Simulation eines typischen Heißen Sommertages, die neben den klimatischen Eingangsdaten auf dem Relief, der Landnutzung und den Bebauungsstrukturen der Siedlungsbereiche aufbaut.

Klimatope beschreiben Gebiete mit ähnlichen mikroklimatischen Ausprägungen. Diese unterscheiden sich vornehmlich nach dem Tagesgang der Temperatur, der Rauigkeit (Windfeldstörung), der topographischen Lage bzw. Exposition und vor allem nach der Art der realen Flächennutzung. Als zusätzliches Kriterium spezieller Klimatope wird das Emissionsaufkommen herangezogen. Da in besiedelten Räumen die mikroklimatischen Ausprägungen im Wesentlichen durch die reale



Flächennutzung und insbesondere durch die Art der Bebauung bestimmt werden, sind die Klimatope in den Siedlungsbereichen nach den dominanten Flächennutzungsarten bzw. baulichen Nutzungen benannt. Die Ableitung der Klimatope in den Siedlungsbereichen erfolgt auf Basis der berechneten nächtlichen Überwärmung der Siedlungsbereiche an typischen Heißen Sommertagen in der Region Stuttgart in Kombination mit dem realen Bebauungsvolumen und Versiegelungsgrad.

Im unbebauten Bereich wird zwischen Gewässer-Klimatop, Freiland-Klimatop, Wald-Klimatop, Grünanlagen-Klimatop unterschieden. Für die Region Stuttgart werden die vier Siedlungsklimatope, d.h. Vorstadt-Klimatop, Stadtrand-Klimatop, Stadt-Klimatop, Innenstadt-Klimatop, in jeweils zwei Kategorien unterteilt, sodass insgesamt acht Siedlungsklimatope gekennzeichnet sind. Die jeweiligen Klimatope unterscheiden sich hinsichtlich ihrer nächtlichen Überwärmung in Kombination mit dem realen Bebauungsvolumen und Versiegelungsgrad. Zusätzlich werden differenzierte Gewerbe- und Industrieklimatope ausgewiesen und raumspezifische Hinweise zu Gleisanlagen und Verkehrsemissionen dargelegt.

Die Belüftung der Siedlungsgebiete durch Talabwinde und Kaltluftabflüsse ist, insbesondere bei austauscharmen Wetterlagen, von hoher Bedeutung. Deshalb sind die Kaltluftentstehungs- und Kaltluftammelgebiete, welche die nächtliche Frischluftzufuhr bewirken, in dieser Karte besonders gekennzeichnet. Die bedeutenden Kaltluftströmungen in der Region Stuttgart sind in dieser Karte generalisiert dargestellt. Das heißt, die hier dargestellten nächtlichen Kaltluftströmungen variieren in wolkenarmen und windschwachen Nächten nur gering hinsichtlich ihrer Strömungsrichtung, Intensität und Entwicklung im Laufe der Nacht. Die dickeren Pfeile zeigen intensive gesammelte mittlere nächtliche Kaltluftströmungen und beziehen sich auf die siedlungsrelevante Auswertehöhe bis 30 m über Grund. Die dünneren Pfeile zeigen etwas schwächere, aber dennoch wesentliche bodennahe Kaltluftabflüsse, die zu nächtlicher Frisch- und Kaltluftzufuhr in Siedlungsbereichen beitragen können. Relief- und Landnutzungseinflüsse führen auch in der generalisierten Darstellung zu kleinräumig variierenden Strömungsrichtungssymbolen mit teilweise entgegengesetzten Richtungen als Zusammenfassung der hochaufgelösten Simulationsergebnisse. Im Weiteren werden die angeführten Kaltluftströmungen um die mittleren Durchlüftungsverhältnisse überlagert. Damit ist die erarbeitete Klimaanalysekarte in der Phase 2 des Projekts fortzuschreiben und zu qualifizieren. Abbildung 13 zeigt einen Ausschnitt der Klimatopdarstellung der Klimaanalysekarte.

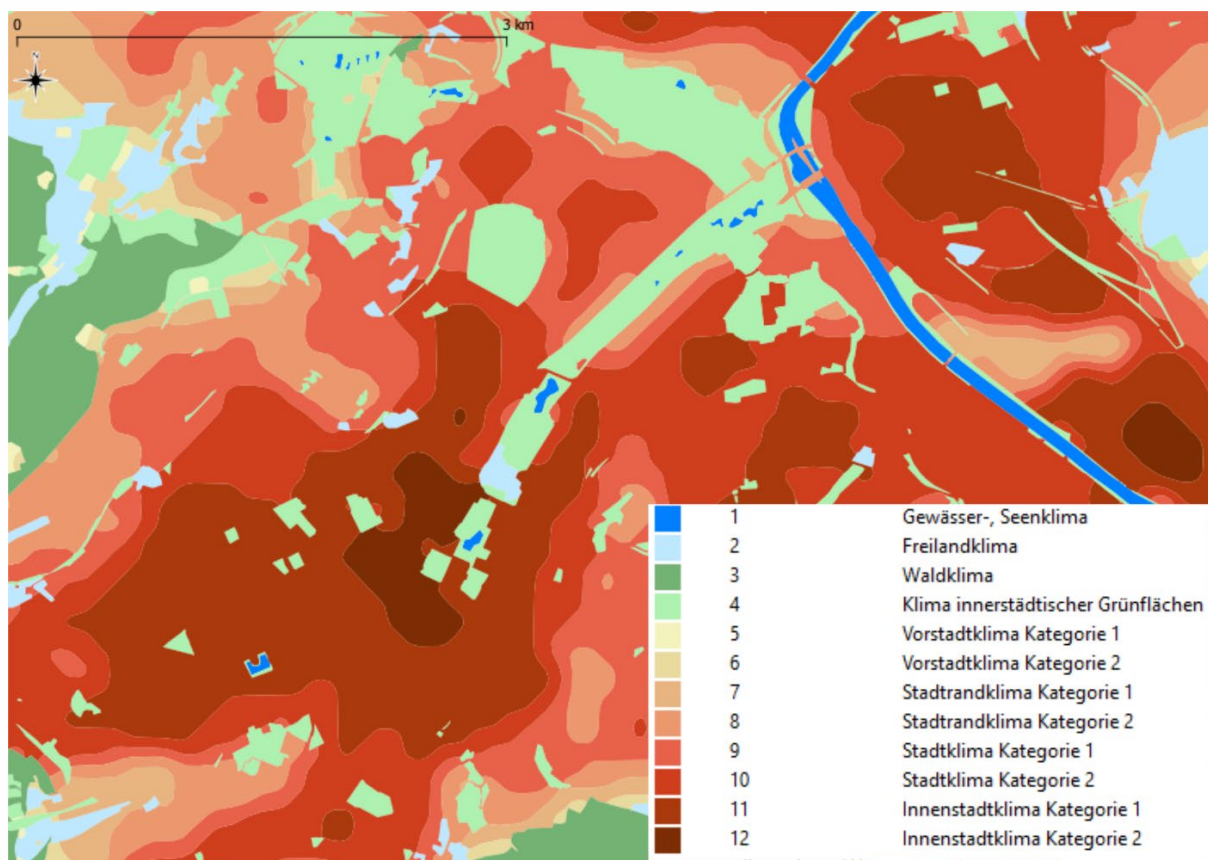


Abbildung 13: Ausschnitt Klimaanalysekarte – nur Klimatope (Quelle: Lohmeyer, 2023).

Regionale Planungshinweiskarte

Die Planungshinweiskarte enthält eine Bewertung der in der Klimaanalysekarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange auf Basis der lokalklimatischen Grundlagen. Die flächenhaften Kennzeichnungen beinhalten Hinweise über die Empfindlichkeit der jeweiligen Bereiche unter klimatisch-lufthygienischen Aspekten gegenüber Nutzungsänderungen. Die Hinweise für die Planung beziehen sich vornehmlich auf bauliche Nutzungsänderungen, insbesondere dreidimensionaler Art für Gebäude und andere Bauwerke. Eine Änderung der Vegetationszusammensetzung hat in der Regel geringere lokalklimatische Auswirkungen als großflächige Versiegelungsmaßnahmen und die Errichtung von Bauwerken. In speziellen Fällen kann sich auch eine Änderung der Vegetationszusammensetzung, wie z.B. Waldanpflanzung im Bereich einer Luftleitbahn, durchaus ungünstig auswirken.

Die Flächenausweisung der Planungshinweise ist modellgestützt erstellt, d. h. die rechnerisch ermittelten Klimatopflächen werden mit strömungstechnischen Informationen, d. h. den nächtlichen Kaltluftströmungen, überlagert. Zusammen mit den Informationen über die thermischen Parameter, wie z.B. nächtliche Abkühlungsraten an heißen Sommertagen, liegen räumliche Abgrenzungsmöglichkeiten klimatisch unterschiedlicher Bedingungen für Siedlungsbereiche und Freiräume vor und ermöglichen die Zuordnung zu den bewerteten Planungshinweisflächen.

In der Planungshinweiskarte werden Ausgleichsräume in Form von Grün- und Freiflächen kategorisiert und nach dem Maß der Bedeutung dargelegt. Gemäß der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1, sind drei Kategorien für Planungshinweise der Freiflächen auszuweisen, die jeweils weiter unterteilt werden. Grundsätzlich sind diese: Ausgleichsraum hoher Bedeutung, Ausgleichsraum mittlerer Bedeutung und



Ausgleichsraum geringer Bedeutung. Neben den Ausgleichsräumen werden in der regionalen Planungshinweiskarte auch Siedlungsflächen kategorisiert und nach dem Maß der klimarelevanten Funktion und nach der klimatisch-lufthygienischen Belastung kartiert. Die gemäß der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1, bestehenden vier Kategorien für Planungshinweise der Siedlungsbereiche – Bebaute Gebiete mit geringer klimarelevanter Funktion, Bebaute Gebiete mit klimarelevanter Funktion, Bebaute Gebiete mit bedeutender klimarelevanter Funktion und Bebaute Gebiete mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen – werden wiederum unterteilt. Ein Ausschnitt der Planungshinweiskarte ist in Abbildung 14 dargestellt. Vergleichbar mit der erarbeiteten Klimaanalysekarte ist die Planungshinweiskarte in der Phase 2 des Projekts fortzuschreiben und zu qualifizieren.

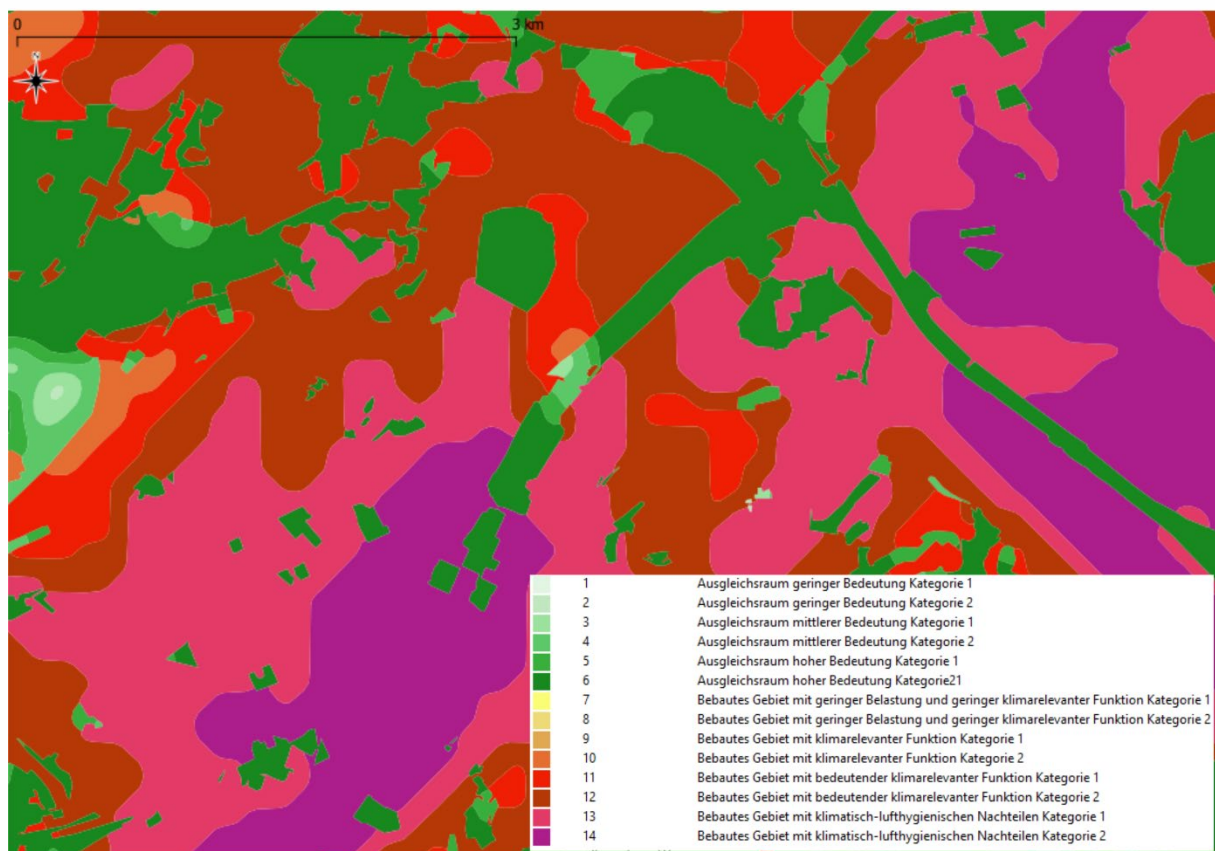


Abbildung 14: Ausschnitt Planungshinweiskarte (Quelle: Lohmeyer, 2023).



2.2.4 Kaltluftsimulationen

Neben den beschriebenen Simulationen zur Ableitung der Klimaanalyse, wurden für die nächtliche Kaltluft bei autochthonen Wetterlagen noch detailliertere Berechnungen mit PALM-4U durchgeführt. Die statischen Eingangsdaten sind analog zu den bisher beschriebenen, der Unterschied zu den bisher durchgeführten Simulationen besteht in der noch feineren Gitterauflösung von 50m x 50m, um kleinere Täler besser darstellen zu können. Die Simulation erfolgte für den typischen heißen Sommertag und konnte auf noch etwas feinerem Gitter als bisher durchgeführt werden, weil für die Kaltluft nicht der vollständige Tag mitberechnet werden musste, der aufgrund der Turbulenz und Strahlungswechselwirkung sehr rechenaufwändig ist. Als Antrieb wurden dieselben Antriebsdaten aus der oben beschriebenen 200m x 200m-Simulation für einen typischen heißen Sommertag verwendet, die Initialisierung der inneren, genesteten Kaltluftsimulation erfolgte erst zum Nachmittag. Als Ergebnisdarstellungen wurden die Kaltluftgeschwindigkeit und Kaltluftrichtung in Bodennähe sowie die Kaltluftvolumenstromdichte zwischen 0m und 30m Höhe und von der Bodenoberfläche bis zur Höhe der Kaltluftschicht für verschiedene Zeitpunkte in der Nacht erzeugt. Die Kaltluftvolumenstromdichte beschreibt die Kaltluftmenge in m^3 , die pro Sekunde durch einen 1m breiten Streifen zwischen der Erdoberfläche und der Oberkante der Schichtdicke, die senkrecht zur Strömung steht, fließt. Die Einheit ist $\text{m}^3/(\text{m s})$ bzw. m^2/s . Falls die Volumenstromdichte über einen Querschnitt konstant ist, lässt sich der Volumenstrom direkt und einfach als Volumenstromdichte mal Länge der Grundlinie dieser Fläche berechnen. Der Kaltluftvolumenstrom kann als Größe zur Beschreibung der Durchlüftungsintensität aufgefasst werden. In Abbildung 15 zeigt einen Ausschnitt der ermittelten Kaltluftvolumenstromdichten zwischen 0m und 30m Höhe für die Anfangsphase.

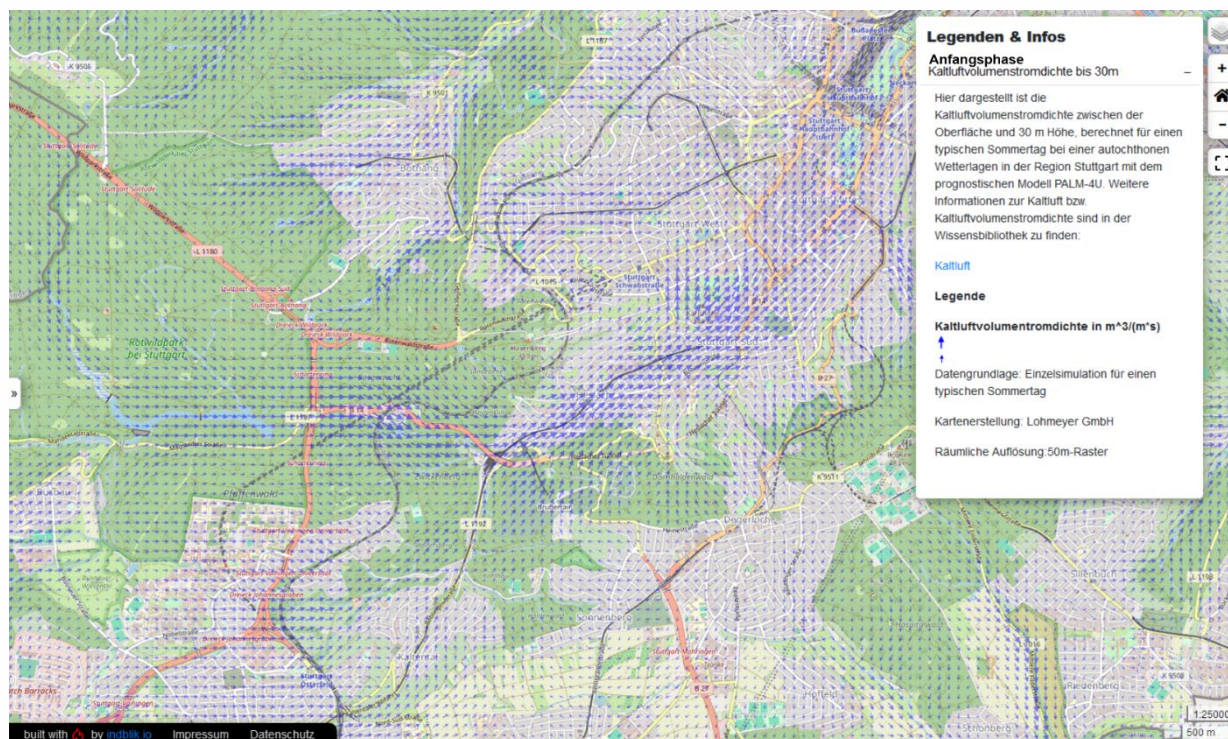


Abbildung 15: Ausschnitt Kaltluftvolumenstromdichte zwischen 0 m und 30 m Höhe für die Anfangsphase (Quelle: Lohmeyer, 2023).



2.3 Starkregen in der Region Stuttgart

Zuständigkeit: Arbeitspaket 2 – KIT, P-AG, Lohmeyer, VRS; LHS

Der Umgang mit Starkregenrisiken stellt bereits heute eine zentrale Herausforderung für die Region Stuttgart dar. Hierfür bedarf es passgenaue und belastbare Aussagen zu den erwarteten Änderungsfaktoren zu Starkregen angesichts des Klimawandels und zu potentiellen Überflutungsräume. Die in ISAP entwickelten Klimainformationen zum Themenkomplex Starkregen, wie z.B. die regionale Starkregengefahrenkarte, werden nachfolgend komprimiert dargestellt.

2.3.1 Klimasimulationen heute und in der Zukunft

Die Zunahme von Starkregen mit der Erderwärmung basiert zum einen darauf, dass eine wärmere Atmosphäre mehr Wasserdampf aufnehmen kann, welcher dann bei einem Niederschlagsereignis als Regen fällt. Der Effekt der globalen Erwärmung auf diesen thermodynamischen Prozess ist weltweit weitgehend gleichmäßig. Zusätzlich bestimmen dynamische Prozesse das Auftreten von Starkregen, z.B. die Wetterlagen und die großräumigen atmosphärischen Strömungen, die den Aufstieg feuchter Luftmassen fördern und somit schwere Niederschläge auslösen können. Die Auswirkungen des Klimawandels auf diese Prozesse sind regional daher unterschiedlich. Um das Klimaänderungssignal von Starkregen, z.B. für die Bemessung von Klimaanpassungsmaßnahmen oder eine "zukünftige Starkregengefahrenkarte" unter Berücksichtigung möglicher Klimaänderungen, ist es wichtig, sowohl den thermodynamischen als auch den dynamischen Aspekt zu berücksichtigen. Das ist z.B. in einer Klimaprojektion möglich.

Die Auswertung von Starkregenereignissen vor dem Hintergrund des Klimawandels für das Projekt ISAP wurde in zwei Schritten ausgeübt. Zunächst wurde eine deutschlandweite Bewertung von Starkregen im Simulationsensemble mit anschließender Identifizierung der kritischen Dauerstufen und Wiederkehrwerten im Klimawandel durchgeführt. Im nächsten Schritt wurde in Zusammenarbeit des KIT mit der Dr. Pecher AG, Stadt Stuttgart und Verband Region Stuttgart speziell für die Region Stuttgart ein Klimaänderungsfaktor aus den Klimasimulationen des KIT bestimmt, der in die Modellkette verwendet wurde.

Starkniederschläge Heute

Starkregenereignisse sind bereits in der Vergangenheit in der Region Stuttgart aufgetreten. Auch in ganz Deutschland konnten in der jüngeren Vergangenheit, teilweise extreme, Starkregenereignisse festgestellt werden. Starkregenereignisse können anhand des Starkregenindex nach Schmitt (Schmitt et al., 2018) klassifiziert werden. Dabei wird entsprechend der statistischen Wiederkehrzeit eines Starkregenereignisses ein Starkregenindex (SRI) zwischen 1 und 12 zugeordnet. In der Anwendungspraxis hat der SRI zur Kommunikation von Starkregenereignissen positive Resonanz erfahren (Mudersbach et al., 2023). Starkregenereignisse werden dabei u.a. als Starkregen ab einer Wiederkehrzeit $T \geq 1a$ definiert. Für die statische Einordnung von Starkregenereignissen wurde im Projekt, insbesondere die koordinierte Starkregenauswertung (KOSTRA-DWD) des Deutschen Wetterdienstes (DWD), verwendet. Dabei handelt es sich um einen bundesweiten, regionalisierten Rasterdatensatz für unterschiedliche Dauerstufen und Wiederkehrzeiten (Jungbäuer et al., 2023). Im Projekt wurde der KOSTRA-DWD 2010R genutzt, der zum 01.01.2023 durch den KOSTRA-DWD 2020 ersetzt wurde.

Änderung von Starkniederschlägen im Klimawandel in Abhängigkeit von der Wiederkehrperiode und der Dauerstufe (Hundhausen et al., 2023b)

In der Studie "Climate change signals of extreme Precipitation return levels for Germany in a transient convection-permitting simulation ensemble", Hundhausen et al. 2023b, (in Review für International Journal of Climatology) wird mit dem KIT-KLIWA Ensemble zum ersten Mal die Entwicklung zukünftiger Starkniederschläge in einem transienten, konvektionserlaubenden Ensemble von 1971 bis



2100 (1971-2005: historisch, 2006-2100: Projektion) getrackt. Dafür werden Niederschlagsintensitäten auf verschiedenen Skalen untersucht: von stündlichen bis zu mehrtägigen (3 Tage) Ereignissen und für verschiedene Wiederkehrperioden bis zu 100 a mit dem Ziel das Klimaänderungssignal für breites Spektrum von Ereignissen abzudecken, die für verschiedene Interessengruppen relevant sind, z.B. für die Stadtentwässerung oder die Regionalplanung. Die Schlüsselergebnisse sind, dass das konvektionserlaubende Ensemble stündliche Extremniederschläge besser wiedergibt, als herkömmliche Simulationen mit gröberer Auflösung. Im Ensemble wird ein maximales Klimaänderungssignal von 6 bis 8,5% Anstieg pro Grad globaler Erwärmung projiziert, wobei die größten Änderungen für kurze Dauerstufen und lange Wiederkehrperioden (Abbildung 16) erwartet werden. Darüber hinaus deutet eine Zunahme der räumlichen Varianz der Wiederkehrwerte mit der globalen Erwärmung auf ein variables zukünftiges Klima hin und zeigt, dass es immer wichtiger wird, Unsicherheiten für zukünftige Klimaanpassung zu berücksichtigen.

Für die wissenschaftliche Community ist die durchgeführte Bewertung von Niederschlagsextremen in konvektionserlaubenden Simulationen sowie die Abschätzung von Unsicherheiten von Bedeutung und ist ein Schritt in Richtung der Anwendung solcher Simulationen in der Klimaanpassung. Außerdem unterstreicht die Analyse, die Vorteile eines *transienten* Ensembles, um Unsicherheiten zu reduzieren, was für die Entwicklung zukünftiger Simulationen von Relevanz ist.

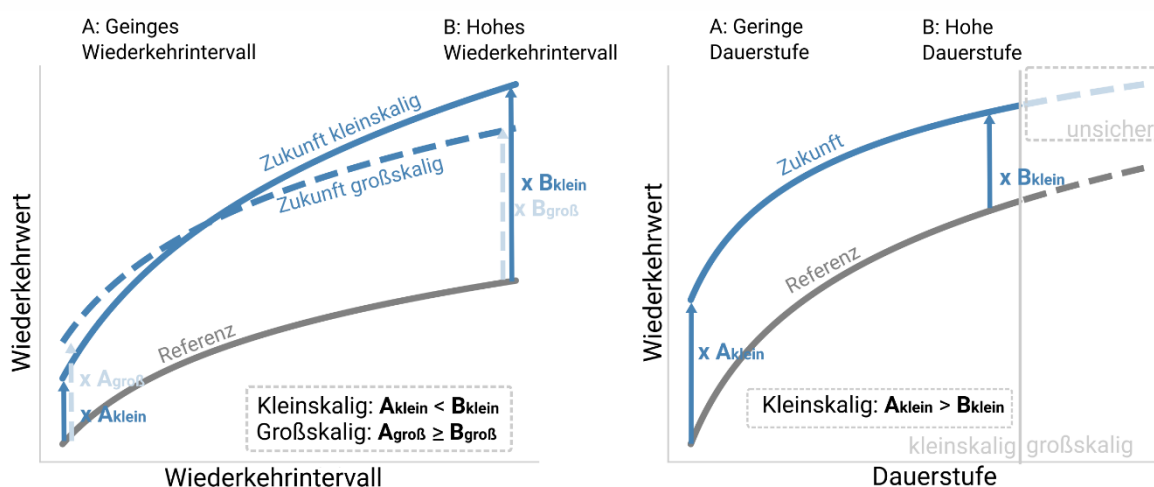


Abbildung 16: Schematische Darstellung des relativen Klimaänderungssignals in Abhängigkeit der Wiederkehrperiode (Return period) und der Dauerstufe (Duration).



Anwendung auf das Ahr/Erft Überflutungsereignis im Juli 2021

Im Juli 2021 wurde Deutschland von einem Hochwasser im Einzugsgebiet der Ahr und Erft erschüttert. Dieses Ereignis lenkte die öffentliche Aufmerksamkeit auf die Klimagefahr Starkregen. In der multi-disziplinären Studie „A multi-disciplinary analysis of the exceptional flood event of July 2021 in central Europe – Part 2: Historical context and relation to climate change“ (Ludwig et al., 2023) wurden die Erkenntnisse aus dem ISAP-Projekt zu Starkregen im KIT-KLIWA Ensemble genutzt. Der Schwerpunkt der Studie lag auf dem Vergleich und der Einordnung dieses Ereignisses in einen historischen und statistischen Kontext und der Abschätzung der zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf solche Extremereignisse. Beide Aspekte wurden aus meteorologischer, hydrologischer und hydromorphologischer Sicht untersucht.

Die Studie verdeutlicht die Klimarisiken durch Starkregen, unterstreicht damit die Dringlichkeit von Klimaanpassung an Starkregen und zeigt wie Methoden und Ergebnisse aus ISAP in andere Regionen übertragen werden können.

Ableitung von Änderungsfaktoren von Extremniederschlägen als Eingabeparameter für die Berechnung von Starkniederschlagsgefahrenkarten

Um ein lokales Klimaänderungssignal für die Region Stuttgart abzuleiten, wurden die Ergebnisse aus dem KIT-KLIWA Ensemble genutzt. Dabei wurden aus den Simulationsergebnissen stündliche Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Dauerstufen mittels Extremwertstatistik basierend auf dem Regelwerk DWA-A 531 (DWA, 2012) ausgewertet. Das Ergebnis dieser Berechnung ist ein sogenannter Wiederkehrwert. Das ist die Regenmenge des stärksten stündlichen Ereignisses, das im Mittel alle 100 Jahre auftritt.

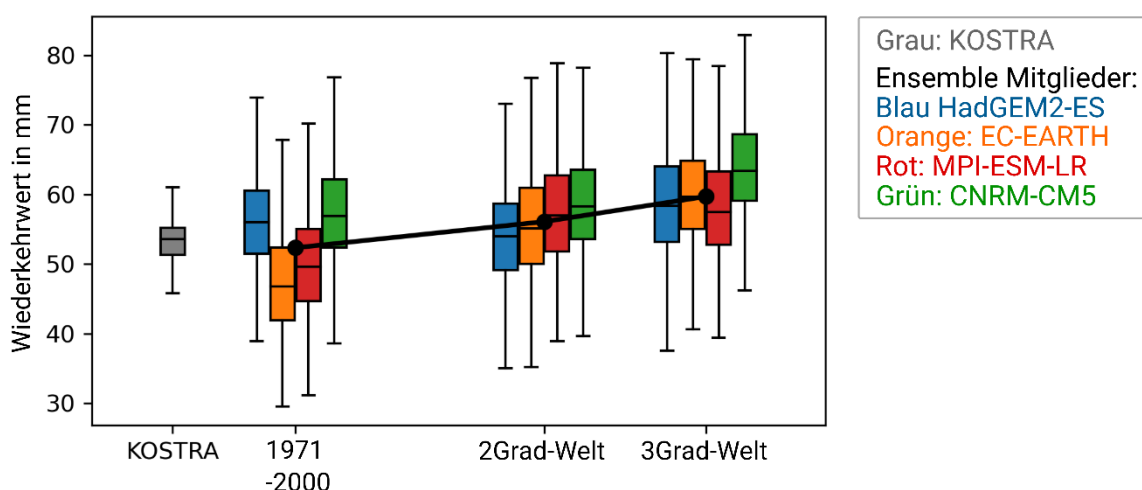


Abbildung 17: 100-jähriger Wiederkehrwert mit einer Dauerstufe von 1h. Farben unterscheiden den zugrundeliegenden Datensatz. Auf der x-Achse ist der Bezugszeitraum angegeben. Die Spannbreiten, die im Boxplot abgeschätzt werden basieren auf der Verteilung der Ergebnisse über der Region Stuttgart. Dargestellt sind der Median aus allen zur Region gehörenden Gitterpunkten (schwarze mittlere Linie), die 25. und 75. Perzentile (Box) und 1,5 mal der Interquartilsabstand (Antennen).

Das Boxdiagramm in Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse des 100 jährlichen Wiederkehrwerts über die Region Stuttgart. Links in der Abbildung sind die Ergebnisse des 100 jährlichen Wiederkehrwerts mit Dauerstufe 1hr aus den Referenzdaten KOSTRA abgebildet. Über der Region Stuttgart liegen diese im Mittel bei 53 mm pro Stunde. In Farbe folgen die Ergebnisse aus der Klimasimulation, jeweils ausgewertet über 30 Jahre (1972-2000, 2Grad-Welt und 3Grad Welt). Die Ergebnisse aus den Klimasimulationen haben eine größere Streuung, die durch lokale Ereignisse hervorgerufen wird, die



zur Abweichung der Ergebnisse an den betroffenen Gitterpunkten führen. Diese Unsicherheit in den Simulationsdaten wird vor allem auf die begrenzte Datenverfügbarkeit mit einem begrenzten Zeitraum von nur 30 ausgewerteten Daten zurückgeführt. Ein 100 jährlichen Wiederkehrwert wird bei dieser Berechnung extrapoliert. Diese Extrapolation ist mit Unsicherheiten behaftet. Im Mittelwert geben die Simulationen den Wiederkehrwert in einem plausiblen Bereich wieder.

Die Auswertung der Klimaprojektionen in einer 2 und 3 Grad wärmeren Welt zeigt, dass das Klimaänderungssignal von Starkregen mit Unsicherheiten behaftet ist. Diese Unsicherheit lässt sich in zwei grundlegende Faktoren aufteilen:

- **Unsicherheiten aus dem Ensemble:** Alle Ensemblemitglieder zeigen eine Zunahme der Intensität des 100 jährlichen Ereignis von 1971-2000 zu einer 3Grad Welt. Allerdings unterscheidet sich die Stärke des Klimaänderungssignals unter den einzelnen Ensemblemitgliedern. Diese unterschiedliche Entwicklung ist teilweise auf zufällige Unterschiede in den globalen Zirkulationsmustern zurückzuführen, teilweise auf die unterschiedlichen Annahmen in den Globalmodellen, wie z.B. eine unterschiedliche Klimasensitivität.
- **Räumliche Unsicherheit:** Starkregen tritt meist lokal und punktuell auf. In den einzelnen Gitterpunkten der Region Stuttgart unterscheidet sich das berechnete Klimaänderungssignal. In Abbildung 17 sind diese Unterschiede durch die Länge der Boxen abgebildet, die die Streuung über das Untersuchungsgebiet abbildet.

		Räumliche Verteilung in der Region			
		Median 1	66. Perzentil 1.06-1.07	75. Perzentil 1.09-1.10	90. Perzentil 1.19-1.20
Klima- änderungssignal	Median 1.07-1.08	1.07-1.08	1.13-1.16	1.17-1.18	1.27-1.30
	66. Perzentil 1.15-1.17	1.15-1.17	1.21-1.26	1.25-1.28	1.37-1.40
	Ensemble Max 1.15-1.18	1.15-1.18	1.21-1.26	1.25-1.30	1.37-1.41

Abbildung 18: Darstellung der Spannweiten eines Änderungsfaktors auf Grundlage der Unsicherheiten der räumlichen Verteilung und dem abgeleiteten Klimaänderungssignal.

Die Abschätzung des Klimaänderungssignal bewegt sich damit in einem möglichen Bereich (Abbildung 18). Die untere oder konservative Grenze liegt etwa bei 7% Erhöhung der Intensität pro Grad Erderwärmung. Um die Auswirkungen des Klimawandels und damit die mögliche auftretende Intensität des Starkregens nicht zu unterschätzen, wurde das Risikofaktor mit einem höheren Perzentil im Ensemble und in der räumlichen Unsicherheit mit Faktor 1,25 von 1971-2000 zu einer 2Grad-Welt abgeschätzt. Diese Abschätzung liegt also über dem im Mittel erwarteten Wert aus den Klimasimulationen, aber im Bereich der möglichen lokalen Änderung gegenüber KOSTRA unter Berücksichtigung der Unsicherheiten.



2.3.2 Regionale Starkregengefahrenkarte

Für das Gebiet der Region Stuttgart wurde eine regionale Starkregengefahrenkarte auf Grundlage eines 2D-Oberflächenabflussmodells entwickelt. Diese stellt mögliche Gefahrenbereiche für starkregenbedingte Überflutungen in der gesamten Region dar. Mit der regionalen Starkregengefahrenkarte wurde erstmals eine einheitliche Planungs- und Informationsgrundlage für den Themenbereich Starkregen in der Region Stuttgart geschaffen. Bei der Erstellung der Starkregengefahrenkarte mussten zudem Anforderungen aus anderen Arbeitspaketen des Projekts ISAP bedacht werden, da diese modellbasierte Eingabedaten benötigten (z. B. Analysen in der Fokusachse Neckartalachse, Betrachtung von Landnutzungsszenarien). Eine Besonderheit bei der Erstellung der regionalen Starkregengefahrenkarten war die Berücksichtigung von Ergebnissen aus der aktuellen regionalen Klimamodellierung. Auf dieser Grundlage wurde ein Abflussszenario für den Ist-Zustand und für einen Zukunft-Zustand betrachtet. Dies ist bei bislang in der Praxis erstellten Starkregengefahrenkarten nicht möglich gewesen. Im Fokus der Bearbeitung stand das übergeordnete Ziel erstmals eine einheitliche Grundlage für regionale Planungsprozesse und weitergehende Risikobetrachtungen zu erstellen. Kommunale Starkregengefahrenkarten, wie sie für einige Kommunen zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung schon vorliegen (z. B. in Stuttgart), werden durch die regionale Starkregengefahrenkarte nicht ersetzt, sondern ergänzt. Für Kommunen, die bislang über keine eigene kommunale Starkregengefahrenkarte verfügen, erlauben die regionalen Karten eine orientierende Betrachtung hinsichtlich der potentiellen Gefährdung infolge von starkregenbedingten Überflutungen.

Der Erstellungsprozess von kommunalen Starkregengefahrenkarten in Baden-Württemberg wird in dem Leitfaden der LUBW (2016) beschrieben. Dabei werden Vorgaben an die Modellansätze und die Erstellung der Berechnungsergebnisse definiert und eine umfassende Datengrundlage für die Erstellung der kommunalen Starkregengefahrenkarten zur Verfügung gestellt. Bei der Erstellung kommunaler Starkregengefahrenkarten sind zahlreiche Detailbetrachtungen erforderlich. Diese können nur bei räumlich begrenzten Betrachtungsgebieten durchgeführt werden. Dadurch und auf Grund der geplanten Verwendung von Klimasimulationen, stand vor Beginn des Erstellungsprozesses der regionalen Modellierung fest, dass die Bearbeitung mit einer angepassten Methodik erfolgen musste. Für die Erstellung der regionalen Starkregengefahrenkarte wurde der Aufbau eines hydrodynamischen 2D-Oberflächenabflussmodells vorgesehen. Als Simulationsansatz war eine ungekoppelte Berechnung der Oberfläche vorgesehen ("UnO" gemäß KLAS-Praxisleitfaden (HSB, 2017)). Der Modellansatz basiert auf einer vollständigen Lösung der tiefengemittelten 2D-Flachwassergleichungen. Als Berechnungsnetz wurde ein rasterbasierter Ansatz mit einer Auflösung von 1x1 m für das gesamte Einzugsgebiet der Region Stuttgart ausgewählt. Durch die Oberflächenabflusssimulation konnten maximale Wassertiefen, maximale Fließgeschwindigkeiten und die Richtungskomponenten der maximalen Fließgeschwindigkeiten für die beiden Szenarien "Ist-Zustand" und "Zukunftsszenario" ermittelt werden.

Datengrundlage

Um unabhängig von spezifischen Datensätzen, die nicht flächendeckend verwendet vorliegen, eine einheitliche Planungsgrundlage für die weiteren Prozesse zu liefern, wurden für den Modellaufbau nur Daten verwendet, die für die gesamte Region in einer einheitlichen Struktur flächendeckend vorlagen. Der Einfluss spezifischer Detaildaten wurde im Projektverlauf herausgearbeitet. Bei der Interpretation sind die Datengrundlagen und der jeweilige Datenstand zu berücksichtigen.

Im Projekt wurden folgende Datengrundlagen berücksichtigt:

- Digitales Geländemodell mit einer Auflösung von 1x1 m (Quelle VRS, Stand 2019)
- Auszug aus den ALKIS-Katasterdaten (ALKIS-Daten, Quelle VRS, Stand 2020)
- Auszug aus den ATKIS-Katasterdaten (ATKIS-Daten, Quelle VRS, Stand 2020)



- Digitales Landschaftsmodell (Basis-DLM, Quelle VRS, Stand 2020)
- Anlagenkataster Wasserbau (AKWB, Quelle LUBW, Stand 2021, © LUBW, Daten der Landesanstalt für Umwelt Baden- Württemberg; 2021, Link: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de>)
- Copernicus-Daten UrbanAtlas (Quelle Copernicus, Stand 2018)
- Gewässernetz (UDO LUBW, Stand 2021, © LUBW, Daten der Landesanstalt für Umwelt Baden- Württemberg; 2021, Link: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de>)

Das digitale Geländemodell bildete die Grundlage für das Höhenmodell. Als Fließhindernisse wurden Objekte (Gebäude) aus den ALKIS- und ATKIS-Daten verwendet. Flächennutzungsdaten aus den ALKIS-, ATKIS- und DLM-Daten wurden für die Oberflächenparameter kombiniert. Zur Bearbeitung von Fließwegen wurden Daten zum Gewässernetz, zu Bauwerken im Gewässer- und Verkehrsbereich (ALKIS-ATKIS) sowie das „Anlagenkataster Wasserbau“ verwendet.

Erstellung der regionalen Starkregengefahrenkarte

Der Modellaufbau erfolgte für das hydrologisch relevante Einzugsgebiet der Region Stuttgart. Dieses wurde zunächst auf Grundlage des Gewässernetzes bzw. auf Grundlage der Gewässereinzugsgebiete ermittelt. Anschließend wurden auf Basis der Datengrundlage die einzelnen Modellbestandteile aufgebaut. Die Modellbestandteile werden in Mudersbach et al. (2023), LUBW (2016) und im DWA-M 119 (2016) beschrieben und können übergeordnet für die regionale Starkregengefahrenkarte, wie folgt, aufgeteilt werden:

- Höhenmodell (flächendeckende Auflösung von 1x1 m)
- Oberflächenparameter
- Oberflächenrauheit
- Versickerung
- Verlustansätze (Wirkung Kanalnetz)
- Niederschlagsbelastung

Höhenmodell

Als Grundlage für das Höhenmodell wurde das digitale Geländemodell DGM1 verwendet, welches durch den VRS bereitgestellt wurde. Auf die Verwendung des HydTerrain der LUBW wurde verzichtet, da das verwendete Geländemodell in einigen Bereichen einen aktuelleren Datenstand abbildet.

Das DGM1 wurde um die Gebäude aus Liegenschaftskatastern (ATKIS/ALKIS) ergänzt. Bei den Gebäuden aus den ALKIS-ATKIS-Daten wurde zudem die Durchströmbbarkeit bewertet. Gebäude, die auf Grund ihrer relativen Lage zur Geländeoberfläche (z. B. „unter der Erdoberfläche“ oder „aufgeständert“) oder ihrer Funktion (z. B. „Durchfahrt“ oder „Ausragende Geschosse“) nicht als Fließhindernis wirken, wurden nicht in das Höhenmodell integriert. Sehr neue Gebäude, die nach der Erfassung der Grundlagendaten fertiggestellt wurden (z. B. Neubaugebiete), konnten daher noch nicht im Datenbestand erfasst werden. Für Neubaugebiete lassen sich in den meisten Fällen bereits aus dem angrenzenden Gelände dennoch wichtige Hinweise zur möglichen Überflutung ableiten.

Das Höhen- bzw. Oberflächenmodell wurde auf Grundlage der ATKIS-, ALKIS-, DLM- und AKWB-Daten z.B. in Bereichen von Brücken, Tunneln, Verrohrungen und Durchlässen optimiert. Relevante Gewässerverrohrungen und Durchlässe wurden aufgrund ihrer Bedeutung für die Ableitungswirkung von Oberflächenwasser als Elemente in das Modell aufgenommen. Um diese Elemente zielgerichtet einbauen zu können, wurden zunächst für die gesamte Region Testberechnungen durchgeführt. Auf diese Weise konnten unplausible Aufstaupunkte und Fließwege identifiziert werden, die anzupassen



waren. Dieser Schritt wird im Starkregenrisikomanagement als “Modellprüfung und Modelloptimierung” bezeichnet. Auch dabei ist zu berücksichtigen, dass ausschließlich Datensätze verwendet wurden, die für die gesamte Region in einem einheitlichen Format vorlagen. Diese Daten beinhalteten derzeit flächendeckend keine Detailinformationen zu den eingearbeiteten Durchlässen, sodass nur Lageinformationen vorlagen. Angaben zur Geometrie oder zum Betriebsverhalten von Verrohrungen, Durchlässen etc. lagen nicht vor. Hier mussten entsprechende Annahmen getroffen werden. Vorliegende Daten in den Kommunen konnten im Projekt nicht angefragt und verarbeitet werden. Dies ist eine Aufgabe im kommunalen Starkregenrisikomanagement. Die Modelloptimierung im kommunalen Starkregenrisikomanagement basiert zudem auf einer detaillierten Prüfung der Testberechnungen und der Durchführung von Ortsbegehungen. Auch diese Prozesse konnten auf Grund der Größe des regionalen Betrachtungsgebietes nicht in gleicher Weise flächendeckend umgesetzt werden. Die im Verlauf der Verbundtreffen durchgeführten Ortsbegehungen wurden für eine Prüfung kleinerer Gebiete zur Plausibilisierung genutzt. Für die Modelloptimierung wurden ergänzend vorhandene Prozesse zur datenbasierten, (teil-)automatisierten Modelloptimierung verwendet bzw. weiterentwickelt.

Brückenbauwerke, die in den Testberechnungen relevante Aufstaupunkte erzeugten, wurden dabei durch Interpolationsprozesse in das Modell eingebaut. Einfache und kurze (< 100 m) Tunnel, Verrohrungen, Verdolungen und Durchlässe wurden als Elemente mit Senken-Quellen-Funktion in dem Modell berücksichtigt. Bezüglich der Geometrie wurden dabei aus dem Höhenmodell Werte für die Breite ermittelt und pauschale Annahmen, insbesondere bei Verdolungen, getroffen. Dabei wurde ein “pessimistischer” Ansatz gewählt, um die Leistungsfähigkeit von Durchlässen und Verdolungen nicht zu überschätzen. Mauern wurden in diesem Bearbeitungsschritt ebenfalls eingebaut, sofern Informationen hierzu verfügbar waren. Bei den Mauern ist davon auszugehen, dass nur ein kleiner Anteil der tatsächlich vorhandenen Mauern durch die verfügbaren Datensätze abgebildet wurde. Komplexe Strukturen aus dem o. g. Prozess wurden nochmals gesondert betrachtet. Dabei handelte es sich um z.B. verzweigte Verdolungen und Tunnel oder besonders lange Elemente. Diese wurden manuell geprüft und bei Bedarf in das Modell integriert.

Durch die Bearbeitungsschritte konnten im Rahmen der Modelloptimierung über 40.000 Elemente geprüft und eingearbeitet werden.

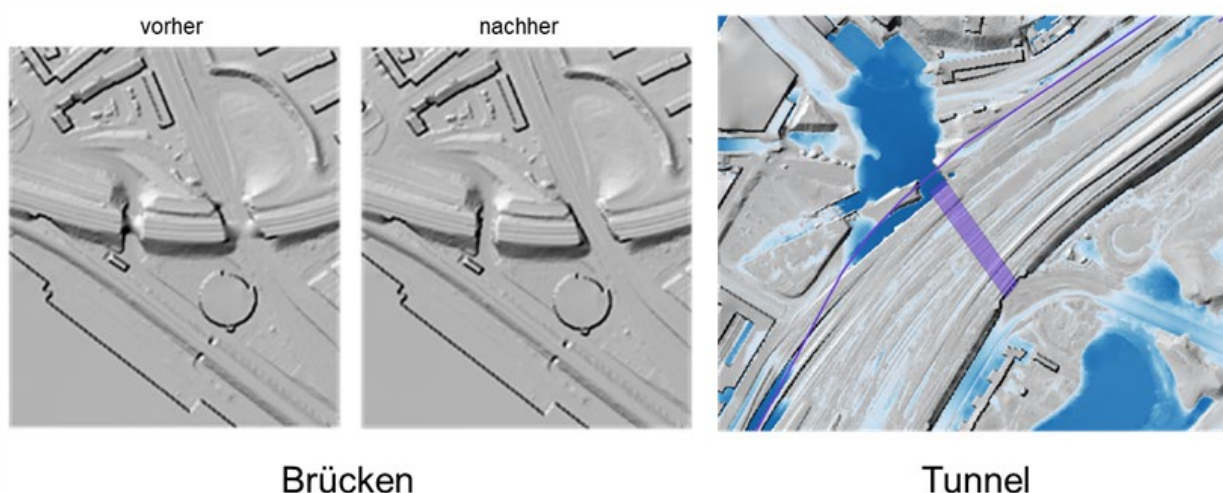


Abbildung 19: Beispiele zur Anpassung des Höhenmodells für Brückenbauwerke und Tunnel durch eine datenbasierte und (teil-)automatisierte Bearbeitung.



Oberflächenparameter - Rauheit

Je nach Flächennutzung liegen verschiedene Oberflächeneigenschaften vor, diese wurden im Modell über unterschiedliche Oberflächenparameter abgebildet. Die Zuordnung von Oberflächenrauheiten erfolgte auf Grundlage der Empfehlungen der LUBW (2016, 2020). Dabei wurde eine tiefenabhängige Oberflächenrauheit berücksichtigt. Die Zuordnung erfolgte auf Grundlage der unterschiedlichen Nutzungsinformationen (ALKIS-ATKIS).

Oberflächenparameter - Infiltration

Infiltrations- und Interzeptionsprozesse haben je nach Lastfall und Nutzungs-/Bodeneigenschaften einen maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse, der zu bewerten ist. Im kommunalen Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg finden die Infiltrationsprozesse über die Eingangsdaten Berücksichtigung. Durch die sog. Oberflächenabflusskennwerte (OAK) werden effektive Abflüsse für verschiedene Szenarien flächendeckend vorgegeben, die durch das hydrologische Modell RoGeR ermittelt wurden (LUBW, 2016). Diese Daten konnten im Projekt nicht unmittelbar verwendet werden, da in dem "Zukunftsszenario" die Berücksichtigung der Klimamodellierungen erfolgen sollte und das hydrologische Modell hierzu nicht zur Verfügung stand. Daher wurden Infiltrationseffekte über modifizierte Horton-Kurven abgebildet. Die Horton-Kurven wurden dabei unter Berücksichtigung der OAK festgelegt, die für einzelne Gebiete durch die LUBW zur Verfügung gestellt wurden. Dabei wurden z.B. auch entsprechende Anfangsverluste berücksichtigt. Zudem erfolgten Vergleichssimulationen mit und ohne Berücksichtigung von OAK-Werten, so dass die modifizierten Horton-Kurven weiter optimiert wurden. Die Flächenzuordnung der angepassten Horton-Kurven erfolgte ebenfalls auf Grundlage der Flächennutzung.

Oberflächenparameter – Weitere Verluste

Bei den zu betrachtenden Abflussszenarien mit hohen Intensitäten kann davon ausgegangen werden, dass der größte Anteil des Niederschlagswassers oberirdisch abfließt, wobei im urbanen Raum sowohl die Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes als auch der Überstau des Kanalnetzes einen Einfluss auf die Überflutungssituation haben. Der niederschlagsabhängige Einfluss des Kanalnetzes, auch bei Starkregenereignissen, konnte aufgrund fehlender flächendeckender Daten im Rahmen der regionalen Starkregen Gefahrenkarte nicht detailliert berücksichtigt werden. Daher erfolgte eine vereinfachte Berücksichtigung der „positiven“ Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes über die Abbildung eines Verlustansatzes für Straßen- und Dachflächen in Siedlungsbereichen. Eine weitergehende Betrachtung des Kanalnetzes, z.B. durch eine gekoppelte Simulation oder die Abbildung von Überstauschächten, konnte im regionalen Modellansatz nicht umgesetzt werden.

Niederschlagsbelastung

Die Simulationen wurden für zwei Abflussszenarien durchgeführt und die Auswahl der Niederschlagsbelastungen erfolgte in Abstimmung mit den Projektbeteiligten und auf Basis der Auswertungen des KIT (siehe Kapitel 2.3.1). Da sich gezeigt hat, dass die Einflüsse des Klimawandels, hier abgebildet auf Grundlage der Klimamodellierung, derzeit nur über die Variation der Niederschlagsbelastung sinnvoll abgebildet werden konnten, musste eine Niederschlagsbelastung für ein "Ist-Szenario" und ein "Zukunft-Szenario" ermittelt werden. Als Ausgangsbedingung sollte für das "Ist-Szenario" ein außergewöhnliches Starkregenereignis mit dem SRI 7 mit einer mittleren statistischen Wiederkehrzeit von $T = 100$ a und einer Dauerstufe von 60 min betrachtet werden. Die Auswertungen des KIT haben gezeigt, dass eine Abbildung des Ist-Zustands durch den KOSTRA-DWD 2010R sinnvoll ist. Es wurde dabei ein Blockregen berücksichtigt. Die räumlichen Unterschiede werden durch das KOSTRA-Raster abgebildet. Für das Zukunftsszenario wurde ein zusätzlicher "Änderungsfaktor" auf Basis der Auswertungen des KIT berücksichtigt (siehe Kapitel 2.3.1). Dazu wurde im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse die Spannweite der möglichen Änderungsfaktoren in drei unterschiedlichen Betrachtungsgebieten simuliert und die maximalen Überflutungstiefen und



Fließgeschwindigkeiten ausgewertet. Darauf basierend wurde in gemeinsamer Abstimmung ein Änderungsfaktor von 1,25 für das Zukunftsszenario festgelegt.

Es erfolgte eine vollständige Berechnung des hydrologischen Einzugsgebiets. Überlagerungsprozesse einzelner Teilgebiete werden nur durch eine begrenzte Leistungsfähigkeit und die Abbildung einer unendlichen Leistungsfähigkeit ausgewählter Gewässer "unterbrochen". Dabei wurde Gewässern 1. Ordnung und Bundesschiffahrtsstraßen eine unendliche Leistungsfähigkeit im Modell zugeordnet, da diese für die Starkregenvorsorge eine untergeordnete Rolle einnehmen und im Rahmen der Hochwasservorsorge betrachtet werden. Diese Gewässer und weitere Gewässer zu denen Ergebnisse aus dem Hochwasserrisikomanagement vorliegen, werden in der Starkregengefahrenkarte dargestellt.

Ergebnisse der regionalen Starkregengefahrenkarte

Auf Grundlage des aufgebauten Oberflächenabflussmodells konnten die beiden Szenarien für die gesamte Region simuliert werden. Dabei wurde das Gebiet der Region in 23 Teileinzugsgebiete aufgeteilt, die sich gegenseitig deutlich überlappen, sodass die Modellergebnisse durch die modelltechnische Aufteilung nicht beeinflusst werden. Die Ergebnisse zu den maximalen Wassertiefen, maximale Fließgeschwindigkeiten und die Fließrichtung in einer Auflösung von 1x1 m der einzelnen Teileinzugsgebiete wurden anschließend wieder zusammengefügt. Die Zuordnung erfolgte auf Grundlage der maximalen Wassertiefe. Als Ergebnisse wurden für beide Szenarien jeweils drei Rasterdatensätze erzeugt und für die Integration in das ISAP-Tool aufbereitet. In der Abbildung 20 ist ein Ausschnitt aus der regionalen Starkregengefahrenkarte zur maximalen Überflutungstiefe und in der Abbildung 21 ein Ausschnitt zur Fließgeschwindigkeit dargestellt.

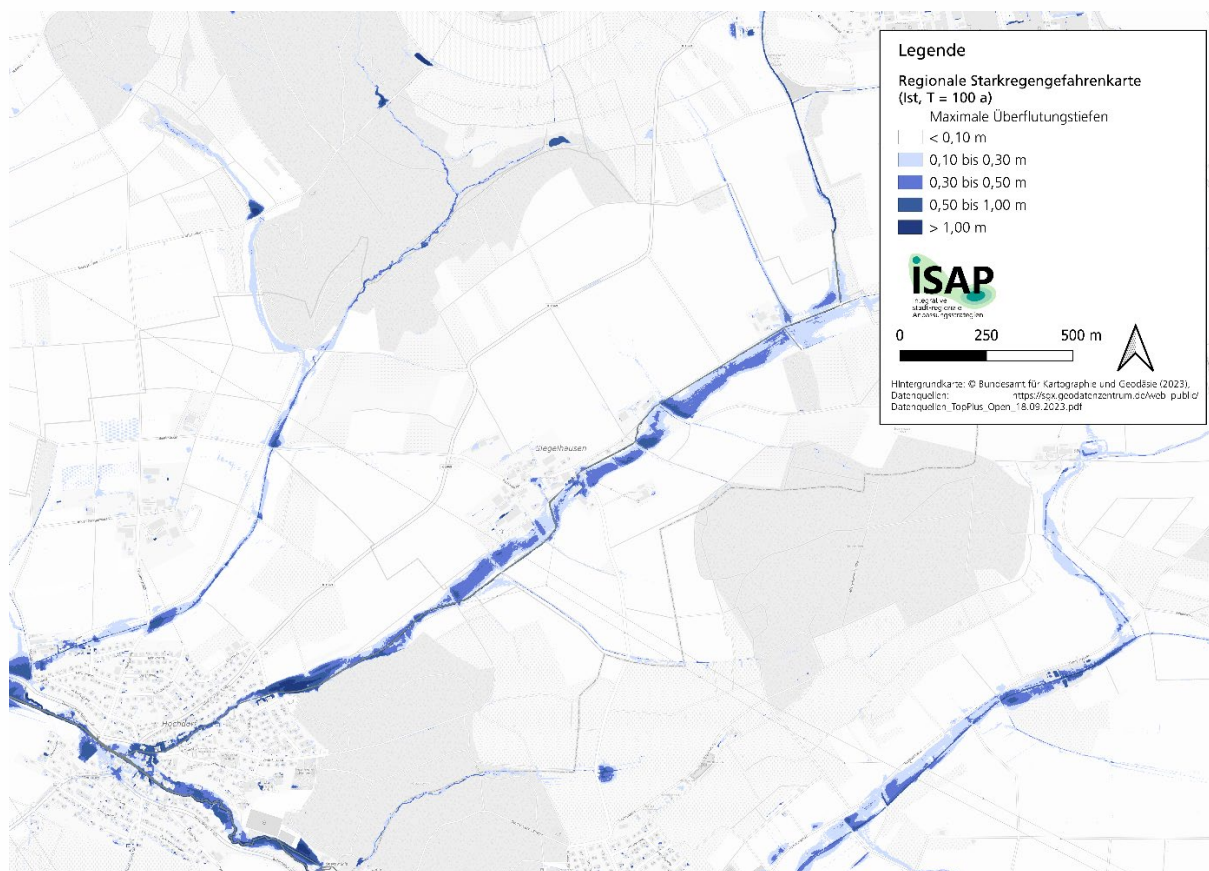


Abbildung 20: Exemplarischer Ausschnitt der regionalen Starkregengefahrenkarte – Darstellung der maximalen Wassertiefen für ein außergewöhnliches Starkregenereignis (statistische Wiederkehrzeit T= 100 a, D = 60 min, SRI 7, KOSTRA-DWD 2010R) und ein ausgewähltes Teilgebiet (Dr. Pecher AG)

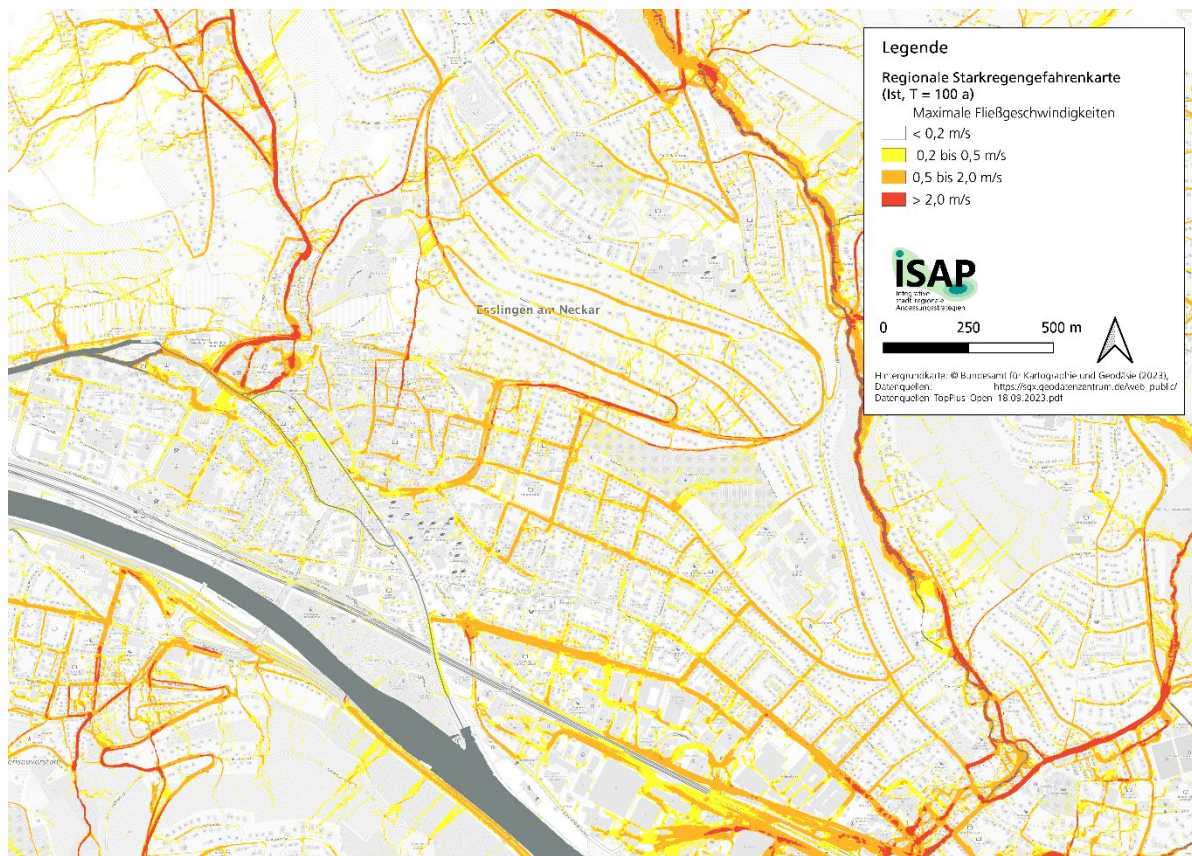


Abbildung 21: Exemplarischer Ausschnitt der regionalen Starkregengefahrenkarte – Darstellung der maximalen Fließgeschwindigkeiten für ein außergewöhnliches Starkregenereignis (statistische Wiederkehrzeit T = 100 a, D = 60 min, SRI 7, KOSTRA-DWD 2010R) und ein ausgewähltes Teilgebiet (Dr. Pecher AG).

Überprüfung der Modellergebnisse

Die Ergebnisse für die regionale Starkregengefahrenkarte wurden mit ausgewählten Kommunen detailliert geprüft und die Aussagekraft bewertet. Gemeinsam mit dem VRS wurden dazu Workshops zur Anwendung der Starkregengefahrenkarte (AP 6) durchgeführt. Den Kommunen wurden bereits Zwischenergebnisse zur Verfügung gestellt. Die Bearbeiter:innen hatten die Möglichkeit über einen Webviewer georeferenziert Detailinformationen zu übergeben und Hinweise zu möglichen Modellfehlern zu markieren. Hinweise wurden anschließend in das Modell übernommen und anhand von Vergleichssimulationen erfolgte eine Überprüfung der regionalen Starkregengefahrenkarte.

Dieser kommunale Beteiligungsprozess in ISAP hat gezeigt, dass die regionale Starkregengefahrenkarte bereits einen sehr guten, realistischen Überblick über die grundsätzliche Gefahrenlage gibt. Abflusswege und Hotspots konnten plausibilisiert werden. Auch die Gefährdung einzelner Gebäude wird in der regionalen Starkregengefahrenkarte auf Grund des Detailgrads (1x1 m) dargestellt. Bei einer Detailbetrachtung lässt sich, wie zu erwarten, noch Optimierungspotential durch kommunale Starkregenrisikomanagementprojekte identifizieren. Insbesondere die Datengrundlage und -aktualität muss bei der Betrachtung der Karte berücksichtigt werden.



Abgrenzung zu den Ergebnissen des kommunalen Starkregenrisikomanagements in Baden-Württemberg

Für die Möglichkeit des Vergleichs kommunaler Starkregengefahrenkarten mit der regionalen Starkregengefahrenkarte wurden die wesentlichen Unterschiede ausgearbeitet und für die Integration in das ISAP-Tool (Lesehilfen) zusammengestellt:

- Für die Erstellung der regionalen Starkregengefahrenkarte wurde nicht das HydTerrain als Grundlage für das Höhenmodell verwendet, sondern ein digitales Geländemodell (DGM 1), welches durch den VRS zur Verfügung gestellt wurde.
- Für die regionale Starkregengefahrenkarte erfolgte keine Aufteilung in "Berechnungsgebiete", die kleiner gleich 5 km² sind. Die Abgrenzung von Überlagerungsprozessen erfolgte durch eine Begrenzung der Nachlaufzeit (60 Minuten) und durch den Ansatz einer "unendlichen Leistungsfähigkeit" für Bundesschiffahrtsstraßen und Gewässer 1. Ordnung.
- Neben der Berücksichtigung größerer Berechnungsgebiete wurden auch andere Belastungsszenarien betrachtet.
- Für die Bearbeitung gemäß Leitfaden werden in Baden-Württemberg Oberflächenabflusskennwerte (OAK) für unterschiedliche Abflussszenarien zur Verfügung gestellt. Diese OAK bilden einen ungleichmäßigen Niederschlagsverlauf ab und berücksichtigen zudem abflussmindernde Prozesse, wie z.B. Infiltrationsprozesse. Für die regionale Starkregengefahrenkarte erfolgte eine Abbildung durch einen Blockregen (gleichmäßig verteilter Niederschlag), welcher auf Grundlage des KOSTRA2010R (DWD) erstellt wurde. Zudem werden abflussmindernde Prozesse, wie z.B. Versickerung und Verluste für an das Kanalnetz angeschlossene Flächen, direkt im Modell abgebildet. In Kombination mit der Berücksichtigung von größeren Berechnungsgebieten ist festzuhalten, dass in der regionalen Starkregengefahrenkarte ein kritischeres Szenario betrachtet wird als bei einem außergewöhnlichen Abflussszenario gemäß Leitfaden des LUBW.
- Im Rahmen einer kommunalen Karte können kleinräumig wirkende Elemente, wie z.B. Durchlässe, Verdolungen/Verrohrungen oder Mauern, noch detaillierter betrachtet werden. Durch Ortsbegehungen und eine detaillierter, nicht regional vorliegende, Datengrundlage können diese Elemente mit ihren tatsächlichen Abmessungen in das Oberflächenabflussmodell eingebaut werden, sodass die kleinräumigen Abflussprozesse noch realitätsnäher abgebildet werden. Die regionale Starkregengefahrenkarte berücksichtigt bereits eine hohe Anzahl an eingebauten Elementen, wobei bei der Abbildung im Modell Annahmen zur Geometrie getroffen wurden.



2.4 Anpassungskapazitäten und Anpassungsnotwendigkeiten

Zuständigkeit: Arbeitspaket 3 – IREUS, VRS; IÖW, P-AG, Lohmeyer

Für eine ganzheitliche Anpassungsstrategie zur Reduzierung der Hitze- und Starkregenrisiken ist das Hinzuziehen weiterer Analysegrundlagen zur Vulnerabilität und zur Exposition notwendig. Ein Anpassungsbedarf besteht, wenn als Reaktion auf die in ihrer Häufigkeit und Intensität zunehmenden Klimagefahren, wie extreme Hitze oder Starkregenereignisse, Handeln notwendig ist, um die Sicherheit der Bevölkerung zu gewährleisten und Vermögenswerte zu sichern (IPCC, 2018). Ein dringender Anpassungsbedarf besteht insbesondere dort, wo ein hohes Risiko besteht. Es besteht ein hohes Risiko, wenn das Potential besteht, dass wertige „Systeme“, wie Menschen, Infrastrukturen, Existenzgrundlagen von dem Auftreten gefährlicher Extremereignisse exponiert sind und dem Ereignis gegenüber vulnerable sind und dadurch negativ betroffen sein könnten. Deswegen sind neben den Gefahrenanalysen, Analysen zur Exposition und Vulnerabilität erforderlich, um Anpassungsnotwendigkeiten zu identifizieren. Die Starkregengefahrenkarte (siehe Kapitel 2.3.2) und Klimaanalyse (siehe Kapitel 2.2.3) sollen daher mit Karten zur Vulnerabilität und Exposition ergänzt werden und dienen somit als zusätzliche Informationsgrundlage, mit dem Zweck passgenaue und bedarfsorientierte Anpassungsoptionen abzuleiten und diese priorisieren zu können.

2.4.1 Vulnerabilitätsanalyse: Stand der Wissenschaft

Vulnerabilität (auch genannt Verwundbarkeit) ist „die Neigung oder Prädisposition nachteilig betroffen zu sein“ (IPCC, 2018). Es beschreibt die Sensitivität (auch Empfindlichkeit oder Anfälligkeit) gegenüber Schäden und die mangelnde Fähigkeit zur Bewältigung und Anpassung. Vulnerabilität ist das Ergebnis komplexer Wechselwirkungen vieler Faktoren. Zu diesen zählen individuelle Eigenschaften, aber auch sozioökonomische und strukturell-institutionelle Kontexte (Birkmann, 2008; Biswas and Nautiyal, 2023). Vulnerabilität ist nicht direkt messbar, daher gilt es als übliche Praxis, Indikatoren und Indizes zu verwenden, die zudem in der Regel räumlich kartiert werden (Fekete, 2019; Kuhlicke et al., 2023). Es gibt zahlreiche Fallstudien zur Entwicklung von Indikatoren, Indizes und Karten zur sozialen Vulnerabilität. Relevante Beispiele für die Berücksichtigung der Vulnerabilitätsdimension zur Erfassung von Klimarisiken sind das Climate Just Tool in Großbritannien (Lindley et al., 2011; Breil et al., 2018) und mehrere Studien im deutschen Raumkontext (Welle et al., 2014; Scholze, Riach und Glaser, 2020; Birkmann et al., 2021; Hölzl et al., 2021; Greiving et al., 2023; von Szombathely et al., 2023). Der Umfang und die Auflösung solcher Indizes reichen vom Ländervergleich auf globaler Ebene über den Vergleich von Kommunen bis hin zur räumlichen Differenzierung innerhalb von Städten. Soziale Vulnerabilitätsindizes klassifizieren Orte nach verschiedenen sozioökonomischen Variablen. Viele dieser Studien orientieren sich hierbei an dem Ansatz von Cutter et al. (2003). In einer Auswertung empirischer Studien zur Vulnerabilität ermittelten Li et al. (2023) die am häufigsten verwendeten Vulnerabilitätsindikatoren. Diese sind nachfolgend aufgelistet: Alter, Einkommen/Beruf, Geschlecht und Bildungsniveau, ethnischer Zugehörigkeit/Minderheit, Zugang zu Grün- und Blauflächen (z. B. Parks, Seen), soziale Isolation, Sprachkenntnisse und Zugang zu Gesundheitsdiensten, Gesundheitszustand/Behinderung, Urbanität und Wohneigentum.

In der Forschung besteht ein breiter gemeinsamer Konsens darüber, dass Vulnerabilität räumlich differenziert abzubilden ist und dass ein Indikatoren basierter Ansatz zur Kartierung von Vulnerabilität am besten eignet (Christmann et al., 2012; Fekete, 2019) ist. Eine standardisierte Methodik existiert jedoch noch nicht, u.a. aufgrund von Einschränkungen in der Datenverfügbarkeit und -qualität. Auch die praktische Anwendbarkeit solcher Ergebnisse wird aufgrund der herausfordernden Ableitung interpretativer Aussagen in der Forschung stets noch diskutiert (Fekete, 2009, 2019; Rufat, 2013; Heesen et al., 2014; Weichselgartner und Kelman, 2015). Im ISAP-Projekt erarbeitete das IREUS



daher möglichst anwendungsorientierte Planwerke zur Vulnerabilität und Exposition, wobei nicht nur die Kartenwerke selbst, sondern auch der Prozess bis zum Ergebnis im Vordergrund stand, um möglichst nutzerfreundliche Analysen zu erstellen (für weitere Informationen siehe McMillan et al. 2024).

2.4.2 Regionale Vulnerabilitätsanalyse

Die Analyse zur Vulnerabilität und Exposition hat zum Ziel, Grundlagen für die raumspezifische Abschätzung von Anpassungsnotwendigkeiten für die Region Stuttgart zu schaffen. Die regionale Exposition und Verwundbarkeit unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen und Siedlungsstrukturtypen sollen erfasst und ermittelt werden.

Vorgehensweise & Anforderungen

Im Austausch mit Planer:innen auf regionaler und lokaler Ebene in der Region Stuttgart wurden folgende Schlüsselkriterien für die Verwendbarkeit der Karten in Planungsprozessen identifiziert:

- Genauigkeit und Aktualität: Die Datengrundlage sollten nicht älter als ein oder zwei Jahre sein, damit Planer:innen sicher sein können, dass ihre Pläne auf Informationen auf der aktuellen tatsächlichen Situation basieren und somit einer rechtlichen Prüfung standhalten.
- Räumliche Auflösung: Die Karten sollen eine Differenzierung sowohl innerhalb der Kommunen als auch zwischen den Kommunen ermöglichen, um sowohl für die lokale als auch für die regionale Planungsebene relevant zu sein. Der Maßstab sollte außerdem fein genug sein, um eine sinnvolle Überlagerung mit den kleinräumigen Gefahrenkarten zu ermöglichen.
- Präzision: Die Datengrundlage sollte mit der Datengrundlage der Gefahrenkarten (Hitze und Starkregen) kompatibel sein, um eine deckungsgleiche Überlagerung der Informationen zu ermöglichen.
- Abdeckung: Die Informationen sollten für die gesamte Region verfügbar sein, nicht nur für die Großstädte, da insbesondere die kleinen Gemeinden keinen Zugang zu solchen Informationen haben und diese benötigen.
- Transparenz und Nachvollziehbarkeit: Die Datenquellen, ihre Qualitäten und die Analysemethoden sollten klar dokumentiert und frei verfügbar sein, damit Planer:innen die Bedeutung der Ergebnisse beurteilen und interpretieren können.
- Verständlichkeit: Die Ergebnisse sollten einfach verständlich sein, damit Planer:innen die daraus resultierenden Pläne begründen können und somit ein besseres Verständnis für Klimaanpassungshandeln bei der Verwaltung und der Öffentlichkeit implizieren können.

Die Analyse zielt auf kleinräumige und aussagekräftige Ergebnisse für die gesamte Region Stuttgart ab. Dabei soll sowohl eine Anwendbarkeit für Planer:innen auf lokaler als auch regionaler Ebene gewährleistet sein. Zur Stärkung eines vielfältigen Anwendungsgebiets sind zum einen die einzelnen Indikatoren und zum anderen die zwei Synthesekarten mit den kombinierten Schlüsselindikatoren zur Erfassung der Vulnerabilität im Tool abrufbar (Abbildung 22). Die Vulnerabilitätskarten als Synthese der Schlüsselindikatoren (Alter, sozioökonomische Struktur, Grünversorgung) helfen bei der Identifizierung prioritärer Handlungsräume zur Entwicklung einer integrierten Klimaanpassungsstrategie, während die einzelnen Indikatoren als Einzellayer bei konkreten Fragestellungen in Kontext der Maßnahmenentwicklung nutzbar sind.

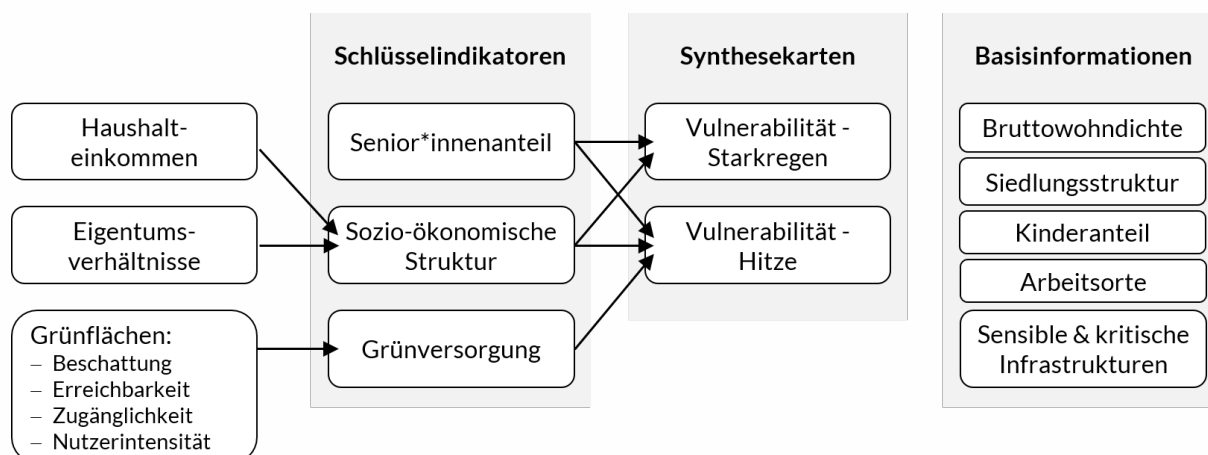


Abbildung 22: Aufbau der Kartensammlung zum Thema Vulnerabilität und Exposition.

Auswertung der Datenoptionen

Eine vertiefte Auswertung der Datenlage zum Thema soziale Vulnerabilität stellte eine Schlüsselaufgabe bei der Erstellung stadt-regionaler Kartenwerke dar. Die Vulnerabilitätsanalyse benötigt soziale Daten für die ganze Region auf kleinräumiger Ebene. Zensusdaten stellen in der Regel eine gute kleinräumige Datenquelle dar, aber da der neue Zensus unerwartet erst 2024 fertiggestellt wird und der letzte Zensus von 2011 veraltet ist, konnte diese Art an Datenquelle im Rahmen dieser Projektphase nicht verwendet werden. Das statistische Landesamt Baden-Württemberg aktualisiert die sozialen Statistiken jährlich, aber diese sind nur auf Gemeindeebene (administrative Gemeindegrenzen: Spannweite zwischen Gemeinde Birkenbach mit einer Fläche von 2,5km² und die Landeshauptstadt Stuttgart mit 207,3km²) vorhanden. Diese Datenschärfe passt nicht mit den kleinräumigen Modellierungsdaten der Gefahrenkartierung (Hitzegefahrenkarte: 100m x 100m, Starkregengefahrenkarte: 1m x 1m) überein. Einzelne Städte und Kommunen der Region haben kleinräumige und aktuelle soziale Daten, diese sind aber nicht für die ganze Region gleichermaßen verfügbar. Aus diesen Gründen wurde für die ISAP-Analyse Daten von Nexiga GmbH eingekauft (Abbildung 23).

Die Geodatenfirma Nexiga GmbH (Firmensitz Bonn) erhält Daten vom statistischen Landesamt und der Agentur für Arbeit und ergänzt diesen mit eigenen Erhebungsdaten. Nexiga verwendet ein statistisches Verfahren, um die Datensätze auf eine kleinräumige Ebene zu disaggregieren. Auf Grund des von Nexiga angewendeten Verfahrens können Ungenauigkeiten und Abweichungen entstehen. Doch stichprobenartige Prüfungen durch kommunal verfügbare Daten zeigten deren Validität. Für die ISAP-Analyse wurden Daten auf Ebene der Wohnquartiere (KGS22) verwendet. Der Zeitstempel der Daten ist der 31.12.2020. Vorteil dieser Daten ist auch deren Raumeinheit, die Wohnquartiere (KGS22) von Nexiga, die wir mit dem Siedlungsbereich (ALKIS-Ortslagen 2020) verschnitten haben um sogenannte Wohnorte zu bilden. Die „Wohnorte“ bilden die räumliche Grundlage für diese Analyse. Die Wohnorte orientieren sich an administrativen Grenzen, sind aber keine offiziellen Raumeinheiten, sondern von der Firma Nexiga nach ähnlichen Raum- und Sozialstrukturen datenbasiert generierte Wohnorte. Wohnorte sind kleiner als Stadtteile mit durchschnittlich 1245 Einwohner:innen und 594 Haushalten. Diese Wohnorte sind eine passende, räumliche Einheit für räumliche Planungsfragestellungen und weisen eine ähnliche Detailschärfe wie die Raumeinheiten der Gefahrenkartierungen auf, sodass eine Überlagerung dieser Karten zur Identifizierung von prioritäreren Handlungsräumen ermöglicht wird.



Datenquelle (Verfügbarkeit/ Auflösung)	Aktualität	Räumliche Auflösung	Abdeckung	Transparenz
Zensus 2011 (national / 100m-Gitter)	unbefriedigend	angemessen	zufriedenstellend	angemessen
Statistisches Landesamt (regional/ Gemeindescharf)	zufriedenstellend	unbefriedigend	angemessen	angemessen
Lokale statistische Ämter (kommunal / untersch.)	angemessen	angemessen	unbefriedigend	zufriedenstellend
Geodaten Firma (extern / Wohnquartierscharf)	angemessen	zufriedenstellend	angemessen	unbefriedigend

unbefriedigend
 angemessen
 zufriedenstellend

Abbildung 23: Vergleich der Datenquellen hinsichtlich der Nutzeranforderungen.

Auswahl der Indikatoren

Die Auswahl der verwendeten Indikatoren basiert auf einer Literaturrecherche, der Datenverfügbarkeit und einer Relevanzprüfung durch statistische und räumliche Vergleichsanalyse. Einige der relevanten Indikatoren, ermittelt durch die Literaturrecherche, konnten mangels an Datenverfügbarkeit nicht in die Analysen integriert werden. Hierzu zählen u.a. Bildungsniveau, Gesundheitszustand bzw. Behinderung, Zugehörigkeit zu einer Minderheit, soziale Isolation und Sprachkenntnisse. Andere Faktoren waren aus anderen Gründen nicht operationalisierbar. Kinder sind vulnerable, aber die räumliche Verteilung des Indikators zeigt in der Region Stuttgart keine aussagekräftigen Muster. Das Geschlecht ist auch ein relevanter Faktor bei der Vulnerabilitätsbetrachtung. Männer sind häufiger von den unmittelbaren Folgen von Extremereignisse betroffen, während Frauen häufiger unter den langfristigen Folgen leiden (Butsch et al., 2023). Doch diese Differenzierung ist für das Verwendungsziel dieser Analysen nicht notwendig. Die empirische Grundlage für die Auswahl der Vulnerabilitätsindikatoren lieferte u.a. der aktuelle Deutsche Sachstandsbericht zum Klimawandel und Gesundheit (2023). Dieser Bericht analysiert und fasst Studien zu den gesundheitlichen Auswirkungen extremer Wetterereignisse (insbesondere Überschwemmungen, Stürme, Dürren und Brände, siehe Butsch et al., 2023) und extremer Temperaturen (insbesondere Hitze, siehe Winkelmayr et al., 2023) zusammen.

In Übereinstimmung mit den oben dargelegten Planungsanforderungen und der Datenverfügbarkeit, den in diesem Abschnitt dargelegten empirischen Belegen und unsere vorbereitende statistische und räumliche Analyse der Daten, wurde die folgenden drei Schlüsselindikatoren für die Vulnerabilität ausgewählt: Alter, sozioökonomischer Status und Grünflächenversorgung (Tabelle 4).



Tabelle 4: Relevanz der verwendeten Verwundbarkeitsindikatoren.

Indikator:	Senior:innenanteil	Sozio-ökonomische Struktur	Grünversorgung
Gemessen an:	Anteil an Einwohner:innen über 65 Jahren oder älter zur Gesamteinwohner:innenzahl pro Wohnort	Anteil einkommensschwächerer oder zur Miete wohnender Haushalte	Quadratmeter öffentlicher, wohnungsnaher, beschatteter, grüner Freiflächen je Einwohner:in
Begründung:	Im Durchschnitt körperliche Einschränkungen und gesundheitliche Vorbelastungen	Eher geringere finanzielle Mittel und limitierter Handlungsmöglichkeiten eigene Anpassungsmaßnahmen zu implementieren, hängt auch mit dem Gesundheitszustand zusammen	Solche Flächen sind wichtige Rückzugsorte für heiße Tage
Gefahrenrelevanz:	Hitze und Starkregen	Hitze und Starkregen	Hitze*
Quellen:	Sandholz et al., 2021; DKKV, 2022; Winklmayr et al., 2023	Laranjeira et al., 2021; Butsch et al., 2023	Arnberger et al., 2017; Sandholz et al., 2021

*Grünflächen sind als Retentionsflächen ebenso bedeutsam für eine klimaresiliente Planung im Kontext von Starkregenvorsorge, jedoch wurden in der dargelegten Analyse ausschließlich die Grünversorgung und der Zugang für die Menschen als Aufenthaltsorte bewertet und aufgrund nicht vorhandener Datenlagen deren Retentionsfähigkeit.

Neben der Betrachtung der relativen Vulnerabilität sind weitere Karten zur Exposition im Tool verfügbar (Tabelle 5). Diese ergänzenden Informationen im Siedlungsbereich zu Einwohner:innen, Beschäftigten, Bebauungstypologien, sensiblen sowie kritische Infrastrukturen — können eine Exponiertheit von Raumstrukturen erklären, um bedarfsorientierte Anpassungsbedarfe zu identifizieren und differenzieren.

Tabelle 5: Wichtige Basisinformationen zur Analyse und zur Differenzierung der Exposition.

Indikator:	Bruttowohndichte (Einwohnerdichte)	Arbeitsorte	Siedlungsstruktur	Sensible und kritische Infrastrukturen
Gemessen an:	Anzahl der Einwohner:innen je Hektar Wohnbaufläche	Beschäftigtendichte und Landnutzung	Dominierende Bebauungstypologie und bauliche Dichte	Verortung von punktuellen Standorten von sensiblen und kritischen Infrastrukturen
Begründung:	In besonders dichten Gebieten trifft solch eine Krise eine Vielzahl an Menschen.	Tagsüber sind neben den Wohnorten auch die Arbeitsorte wichtig zu betrachten.	Unterschiedliche Exposition und Anpassungsbedarf (Beispiel Einfamilienhaus vs. Blockrandbebauung).	Sind bedeutsam für die Aufrechterhaltung wichtiger gesellschaftlicher Funktionen. Häufig halten sich dort besonders schutzwürdige Personengruppen auf.



Kartenlayer - Bruttowohndichte

Der Indikator Bruttowohndichte stellt eine wichtige Planungsgröße dar. Es wird dadurch deutlich, wo besonders viele Menschen wohnen. So ist sichtbar, in welchen Gebieten besonders viele Menschen potentiell von einem Extremereignis betroffen sind oder in welchen Gebieten besonders viele Personen von einer Anpassungsmaßnahme profitieren können.

Kartenlayer - Arbeitsorte

Da aber Menschen sich nicht nur an ihrem Wohnort aufhalten, sondern vor allem tagsüber sich im regionalen Raum bewegen, um zur Arbeit, zu Bildungsstätten oder zu anderen alltäglichen Einrichtungen zu gelangen, ist die Erfassung solcher Arbeitsorte ebenso für eine Klimaanpassungsvorsorge relevant. Der Indikator „Arbeitsorte“ bildet daher solche Orte im Siedlungsbereich ab, wo viele Beschäftigte arbeiten oder wo die Flächennutzung überwiegend von Nutzungen, wie z.B. Gewerbe und Industrie, Bildung oder andere öffentliche Einrichtungen, geprägt ist. Diese sogenannte „Arbeitsorte“ sind Orten, an den Menschen tagsüber gegenüber Extremereignissen exponiert sein könnten.

Kartenlayer – Siedlungsstruktur

Beim Indikator „Siedlungsstruktur“ handelt es sich um eine Beschreibung der Wohnorte anhand der baulichen Dichte und des dort am häufigsten vorkommenden Gebäudetyps. So ist sichtbar, wo bspw. eher lockere Einfamilienhausgebiete oder dichte Mehrfamilienhausgebiete lokalisiert sind. Aspekte der Siedlungsstruktur sind relevante Vulnerabilitätsfaktoren, aber ohne weitere Informationen zum Baujahr, Sanierungsstand und Bauqualität lässt sich keine detailliertere Vulnerabilitätsbewertung der Gebäude ermitteln. Jedoch bietet diese Karte relevante Zusatzinformationen für eine erste Differenzierung der Anpassungsbedarfe.

Kartenlayer – kritische und sensible Infrastrukturen

Zuletzt sind kritische und sensible Infrastrukturen abgebildet. Die Exposition solcher Einrichtungen gegenüber Starkregen oder extremer Hitze kann schwerwiegende Folgen verursachen, die durch Anpassungsmaßnahmen vermieden werden können. Auch der Ausfall wichtiger Notfalldienste kann bei der Bewältigung solch eines Extremereignisse zu weitreichenden Folgen führen. Zudem sollten sensible Infrastrukturen, wie z.B. Schulen, Kindergärten, Pflegeheime, Einrichtungen, in denen sich besonders schutzwürdige Personen aufhalten, eine bedeutende Rolle bei der vorsorgenden Anpassungsplanung einnehmen.

Datengrundlage

In der Tabelle 6 sind die verwendeten Datensätze und Datenquellen für die Analysen zur Erfassung der Vulnerabilität und Exposition aufgelistet. Neben der oben beschriebenen Sozialdaten wurden Daten zur Gebäudeform, -typ und -nutzung und zur Landnutzung benötigt. Diese bestehen primär aus dem ALKIS (das Amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem, Stand 2020). Zusätzlich wurden diese in Teilen mit OpenStreetMap-Daten ergänzt. Die von Nutzer:innen dort eingepflegten Daten werden anhand eines systematischen Verfahrens validiert, sind aber flächendeckend nicht auf dem gleichen Detail-Stand.



Tabelle 6: Datengrundlagen für die Analysen zur Exposition und Vulnerabilität.

Datensatz	Datenquelle	Verwendung in der Analyse	Aktualität	Beschreibung
Einwohner:innenzahlen	Nexiga GmbH	Bruttowohndichte Grünversorgung Senior:innenanteil Sozio-ökonomische Struktur	Stichtag 31.12.2020	Statistische Fortführung und Disaggregation von amtlichen und nicht-amtlichen soziale Statistiken
Einwohner:innenalter	Nexiga GmbH	Senior:innenanteil		
Zur Miete wohnenden Haushalte	Nexiga GmbH	Sozio-ökonomische Struktur		
Haushaltseinkommen	Nexiga GmbH	Sozio-ökonomische Struktur		
Beschäftigtendichte	Nexiga GmbH	Arbeitsorte		
Tatsächliche Nutzung	ALKIS (LGL)	Grünversorgung Arbeitsorte	Stand 2020	Das Amtliche Liegenschaftskataster vom Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg
Gebäude	ALKIS (LGL)	Infrastrukturstandorte		
LOD2-Gebäudevolumen	LGL	Siedlungsstruktur (Bauliche Dichte)	Stand 2021	Gebäudehöhen vom Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg
Parkzugänglichkeit	OpenStreet Map	Grünversorgung	Stand 2023	Frei verfügbare Daten von OpenStreetMap-Mitwirkenden
Gebäudenutzung	OpenStreet Map	Infrastrukturstandorte		
Straßenbäume	Copernicus EEA	Grünversorgung	Stand 2018	Urban Atlas Street Tree Layer, nicht vollständig validiert
Haustyp	Zensus	Siedlungsstruktur	Stand 2011	Geführt bundesweit von den Statistischen Ämtern des Bundes und der Länder

GIS-basierte Analysemethoden

Das Kartenwerk zur Erfassung der Vulnerabilität und Exposition besteht aus drei Bausteinen:

1. Synthesekarten zur Erfassung der relativen Vulnerabilität gegenüber Hitze und Starkregen, mit dem Kernziel sozial-räumliche Hotspots auf Basis der Schlüsselindikatoren zu erfassen (Mehrfachbelastungen aus sozialer Perspektive)
2. Schlüsselindikatoren als Einzelkartenlayer zur Darstellung der jeweiligen Indikatoren-basierenden sozial-räumlichen Betroffenheiten
3. Basisinformationen als Zusatzkarten zur Exposition, mit dem Ziel mit den ergänzenden Informationen die Anpassungsbedarfe vor Ort weiter zu konkretisieren.



In den folgenden Tabellen werden die Kartenwerke zur Vulnerabilität und Exposition anhand ihrer Indikatoren sowie der GIS-gestützten Methodik vorgestellt. Zuvor werden kurz Hinweise zum Inhalt und zum Gebrauch der Karten gegeben. Weitere Details zur Methode finden Sie im Tool verlinkt mit den Karten und in McMillan et al. (2024).

Tabelle 7: Methode - Synthesekarten zur Vulnerabilität bei Starkregen und bei Hitze.

Synthesekarten	Vulnerabilität gegenüber Starkregen
	<i>Indikatoren</i> Senior:innenanteil und Sozioökonomische Struktur (Tabelle 5) <i>GIS-gestützte Methodik</i> Hierfür wurde ein einfacher Index durch die Addition der einzelnen Indikatoren gebildet. Die Wohnorte werden dann mit der Quantil-Klassifikationsmethode in 5 Klassen unterteilt. Die mittlere Klasse bildet in diesem Fall sowohl den Median als auch den Durchschnitt ab.
	Vulnerabilität gegenüber Hitze
	<i>Indikatoren</i> Senior:innenanteil, Sozioökonomische Struktur, und Grünversorgung (Tabelle 5) <i>GIS-gestützte Methodik</i> Hierfür wurde ein einfacher Index durch die Addition der einzelnen Indikatoren gebildet. Die Wohnorte werden dann mit der Quantil-Klassifikationsmethode in 5 Klassen unterteilt. Die mittlere Klasse bildet in diesem Fall sowohl den Median als auch den Durchschnitt ab.

Tabelle 8: Methode - Schlüsselindikatoren als Einzellayer.

Schlüsselindikatoren als Einzellayer	Senior:innenanteil
	<i>Indikatoren</i> Anteil an Einwohner:innen älter als 65 Jahre an der Gesamteinwohnerzahl des Wohnorts. <i>GIS-gestützte Methodik</i> Es erfolgte eine Klassifizierung der Wohnorte in 5 Klassen (Quantil-Klassifikationsmethode). Datengrundlage: Nexiga 2020.
	Sozioökonomische Struktur
	<i>Indikatoren</i> 1. Eigentumsverhältnisse (Anteil zur Miete wohnender Haushalte an Gesamtanzahl der Haushalte je Wohnort); 2. Haushaltseinkommen (Anteil an Haushalte mit einem monatlichen Nettoeinkommen von unter 1 500 EUR an Gesamtanzahl der Haushalte je Wohnort) Korrelation von $r = 0,65$ <i>GIS-gestützte Methodik</i> Hierfür erfolgte eine Standardisierung mit der Quantilmethode. Die Klassen wurden in 1 bis 5 benannt. Die Klasse 5 stellt hierbei den höchsten Anteil der Mieterquote und den höchsten Anteil an Haushalte mit niedrigem Einkommen dar. Der jeweilige Durchschnitt dieser zwei klassifizierten Merkmale bildet den kombinierten Schlüsselindikator „sozioökonomische Struktur“. Im finalen Schritt wurde die Klassifizierung in 5 Klassen vorgenommen. Datengrundlage: Nexiga 2020.



Grünversorgung

Indikatoren

Flächennutzung, Beschattung, Erreichbarkeit, Zugänglichkeit, und Nutzungsintensität

GIS-gestützte Methodik

Um die Versorgung Hitze-relevanter Grünflächen pro Einwohner:in zu berechnen, wurden die folgend aufgelisteten Flächenarten berücksichtigt: Wald, Parks, Grünanlagen, Gartenland und Friedhöfe (ALKIS und ATKIS Flächennutzungsdaten) innerhalb von 200 m eines Wohnorts nach Luftlinienentfernung. Berücksichtigt wurde nur Flächen die öffentlich zugänglich sind (nach OpenStreetMap-Daten), d.h. private Gärten und auch gemeinschaftliche Gärten von Mehrfamilienhäusern wurden hierbei exkludiert.

Zusätzlich wurden ausschließlich Flächennutzungsarten, die zumindest teilweise beschattet sind (nach Copernicus Street Tree Layer), verwendet. Aus diesem Grund wurden weder Streuobstwiesen, Weinberge, Felder noch Straßenbäume berücksichtigt. In der Grünversorgungskarte wurden daher auch die für die Berechnung berücksichtigten Grünflächen visuell hervorgehoben.

Nach der Identifizierung dieser öffentlichen, beschatteten Grünflächen wurde die Verfügbarkeit von solchen Grünflächen je Einwohner:in ermittelt. Dafür wurde die Einwohner:innenzahlen von Nexiga (2020) für jedes Wohnquartier verwendet. Eine Grünfläche wurde als fußläufig erreichbar bewertet, wenn die Grünfläche innerhalb 200m der Wohnortsgrenze liegt (nach Luftlinie). Bestimmte Grünflächen oder Teile von Grünflächen sind rechnerisch damit von mehreren „Einwohnerquellen“ bzw. Wohnorten erreichbar, während andere eher nur von wenigen erreichbar sind. Diese gibt somit die potentielle Nutzungsintensität an. Bspw. hat ein sehr kleiner Park mitten in einem dicht bewohnten Stadtteil eine andere erwartete Nutzungsintensität als ein Wald am Stadtrand. Deswegen wurde in einem nächsten Schritt die Nutzungsintensität der erfassten Grünflächen und danach die effektive Größe von Grünflächen je Einwohner:in berechnet. Das Ergebnis ist die durchschnittliche Quadratmeteranzahl erreichbarer Grünfläche je Einwohner:in für jeden Wohnort.

Tabelle 9: Methode – zusätzliche Basisinformationen.

Bruttowohndichte

Indikatoren

Anzahl der Einwohner:innen je Hektar Wohnbaufläche

GIS-gestützte Methodik

Bei der Bruttowohndichte handelt es sich um eine in der Regionalplanung übliche Kennzahl zur Erhebung der baulichen Dichte auf regionaler Ebene. Für diese Karte wurde die Bruttowohndichte als Anzahl der Einwohner:innen (Datengrundlage: Nexiga 2020) je Hektar Wohnbaufläche nach der tatsächlichen Nutzung gemäß ALKIS (Wohnbaufläche, Handel und Dienstleistungen, Fläche gemischter Nutzung) berechnet.

Siedlungsstruktur

Indikatoren

Bauliche Dichte und dominierender Gebäudetyp

GIS-gestützte Methodik

Die bauliche Dichte wurde anhand der LOD2-Daten (LGL / VRS 2020) als Baumasse in Kubikmeter (Gebäudevolumen) über der gesamten Fläche der Wohnorte berechnet. Der Schwellenwert für niedrige bzw. hohe Dichte ist der regionale Median ($5\text{m}^3/\text{m}^2$). Der am häufigste vorkommende Gebäudetyp des Wohnorts wurde aus den verfügbaren Zensusdaten (Zensus 2011) auf 100m^2 -Gitter ermittelt.



Arbeitsorte

Indikatoren

Beschäftigtendichte und Flächennutzung

GIS-gestützte Methodik

Zur Ermittlung der maßgeblichen Arbeitsorte in der Region Stuttgart erfolgte die Berechnung anhand der Beschäftigtendichte und der primären Nutzungsart der Fläche.

Zunächst wurden die Flächen mit einer hohen Dichte an Beschäftigten (größer als 3500 Beschäftigten je Quadratkilometer, Datengrundlage: Nexiga 2020) ermittelt.

Hinsichtlich der Nutzungsart wurde als Prämisse gesetzt, dass es sich bei dem größten Anteil der Fläche nicht um eine ausschließliche Wohnnutzung handeln soll, sondern um Industrie- und Gewerbeflächen (dazu gehören sowohl große Fabrikgelände also auch innenstädtische Einkaufsorte), um Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen (z. B. Sportkomplexe und Festgelände), oder um Flächen besonderer funktionaler Prägung (z. B. Schulen, Krankenhäuser, Polizeigelände, Ämter und andere öffentliche Einrichtungen). Als Datenrundlage für die Nutzungsarten wurden die tatsächliche Nutzung nach ALKIS 2020 verwendet.

Als ein wichtiger Hinweis ist hier anzumerken, dass der Sektor der Agrar- und Landwirtschaft und Arbeitsorte im Außenbereich bei der Berechnung exkludiert wurden.

Sensible und kritische Infrastruktur

Indikatoren

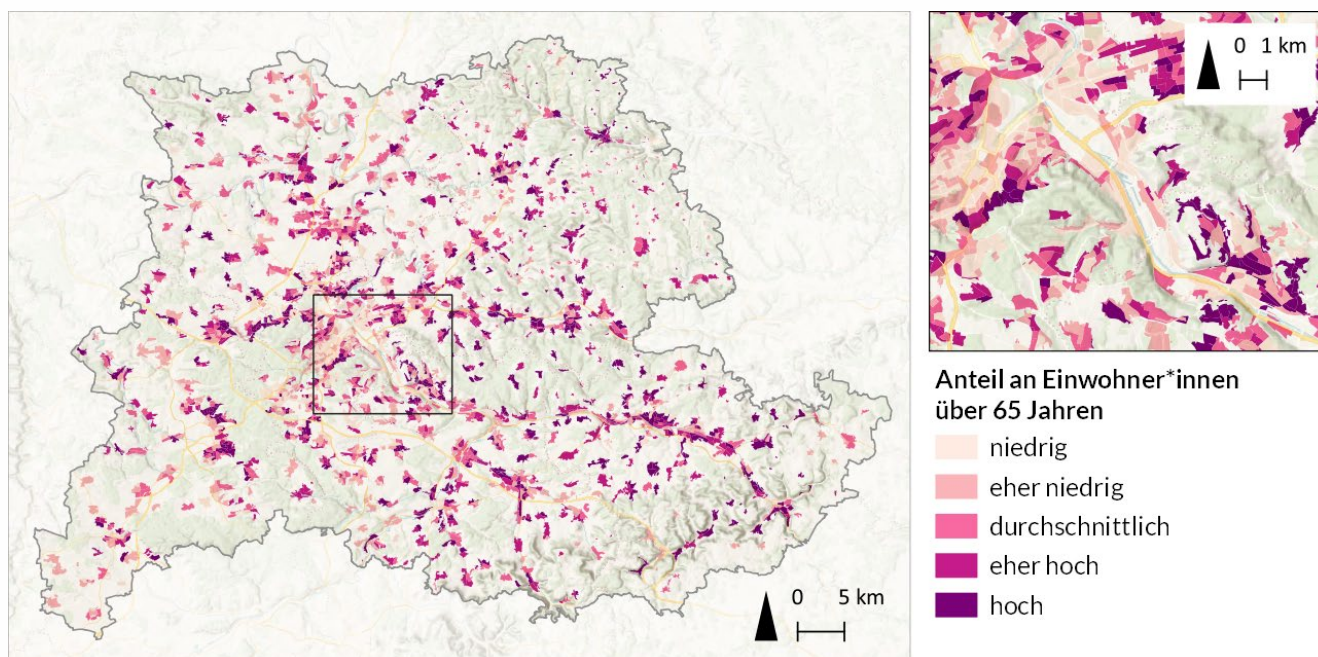
Verortung von sensibler und kritischer Infrastruktur kategorisiert nach den unterschiedlichen Arten wie z.B. Krankenhäuser, Schulen, Energieversorgungsanlagen

GIS-gestützte Methodik

Die Verortung der Infrastruktureinrichtungen erfolgte auf Basis der Datengrundlagen von „Gebäude“ nach ALKIS LGL NORA-Basis-DLM 2020. Zusätzlich wurden diese mit Hilfe von Daten aus OpenStreetMap (2022) ergänzt. Dadurch fehlen teilweise Einrichtungen oder es sind Einrichtungen abgebildet, die aktuell nicht mehr vorhanden sind. Neben der Verortung wurden diese nach ihrer Art kategorisiert und Bereiche markiert, die eine besonders hohe Dichte an wichtigen Infrastrukturen aufweisen. Trotz der Datensets und ihrer Schwächen, wie Aktualität und Vollständigkeit des Datensets, geben die Karten erste Hinweise auf kritische Bereiche. Für detailliertere Planungen sind dann die eigenen Kommunaldaten zu verwenden.

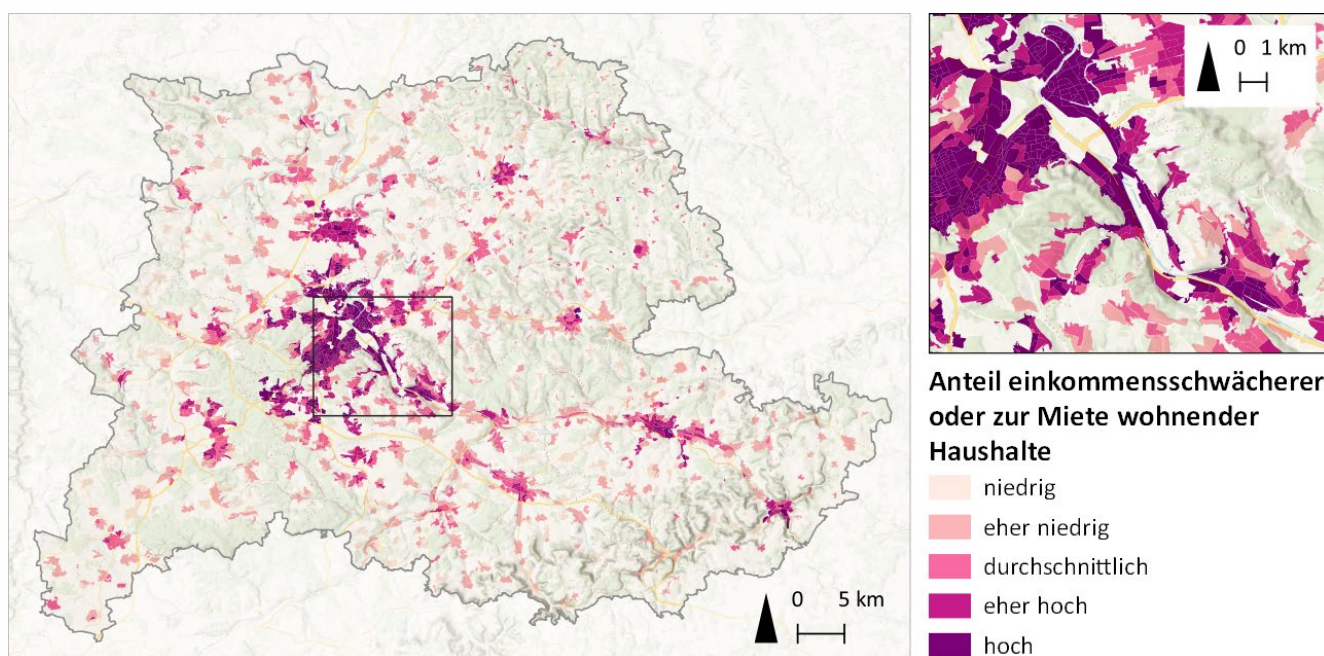
Ergebnisse: kleinräumige Vulnerabilitätskarten für die gesamte Region Stuttgart

Die Vulnerabilitätskarten geben wichtige Informationen in Ergänzung zu den der Klimaanalyse und Starkregengefahrenkarte, indem diese eine räumlich differenzierte Darstellung zu Anpassungsnotwendigkeiten liefern, womit spezifische Ansätze für die Anpassung entwickelt und Handlungsräumen priorisiert werden können. Für die gesamte Region sind daher aussagekräftige Grundlagen zur Vulnerabilität, d.h. zur räumliche Alterungsverteilung, zu sozio-ökonomischen Ressourcen der Bevölkerung und zu der öffentlichen Grünraumversorgung verfügbar und somit für kommunale Strategieentwicklungen im Kontext der Klimaanpassung nutzbar.



Kartenerstellung: IREUS Universität Stuttgart, 2023. Datensatz: Einwohner nach Altersklasse, Nexiga GmbH 31.12.2020. Hintergrundkarte: Voyager Map tiles by CartoDB, under CC BY 3.0. Data by OpenStreetMap, under ODbL. ESRI World Hillshade, Esri, Airbus DS, USGS, NGA, NASA, CGIAR, N Robinson, NCEAS, NLS, OS, NMA, Geodatastyrelsen, Rijkswaterstaat, GSA, Geoland, FEMA, Intermap, and the GIS user community.

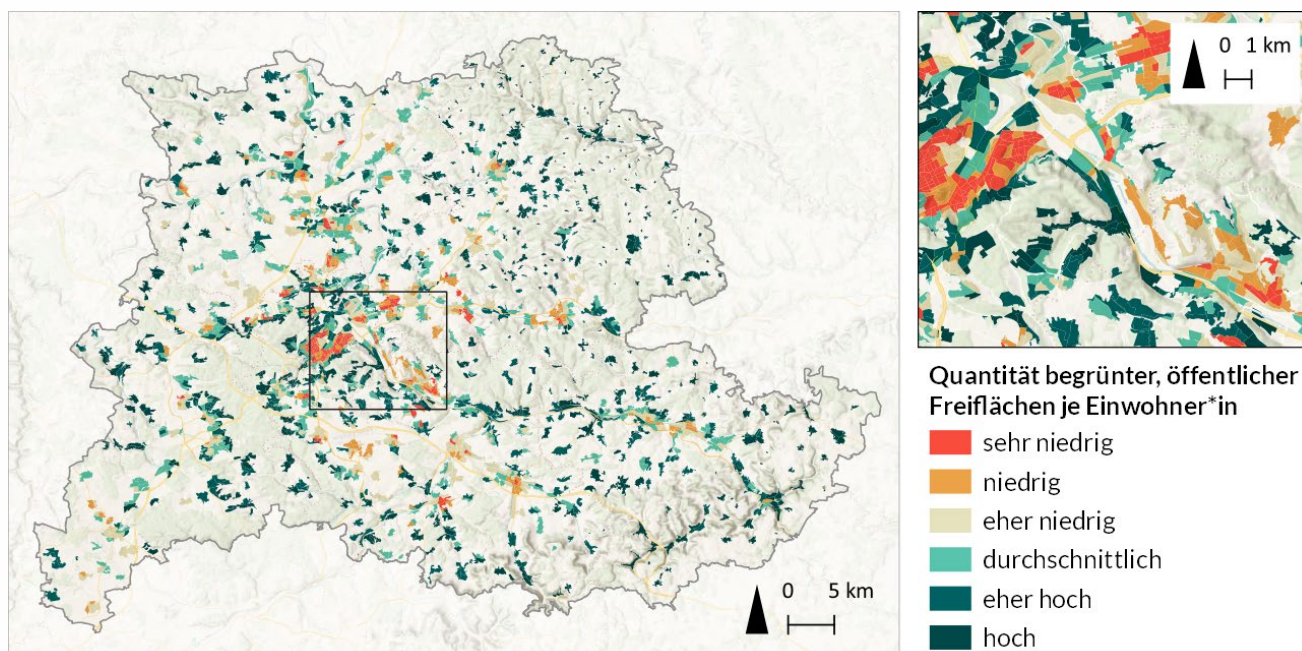
Abbildung 24: Anteil an Einwohner*innen über 65 Jahren zur Gesamteinwohnerzahl des Wohnorts.



Kartenerstellung: IREUS Universität Stuttgart, 2023. Datensatz: Haushalte nach Einkommensklassen und Haushalte nach Mieter- und Eigentümerquote, Nexiga GmbH 31.12.2020.

Hintergrundkarte: Voyager Map tiles by CartoDB, under CC BY 3.0. Data by OpenStreetMap, under ODbL. ESRI World Hillshade, Esri, Airbus DS, USGS, NGA, NASA, CGIAR, N Robinson, NCEAS, NLS, OS, NMA, Geodatastyrelsen, Rijkswaterstaat, GSA, Geoland, FEMA, Intermap, and the GIS user community.

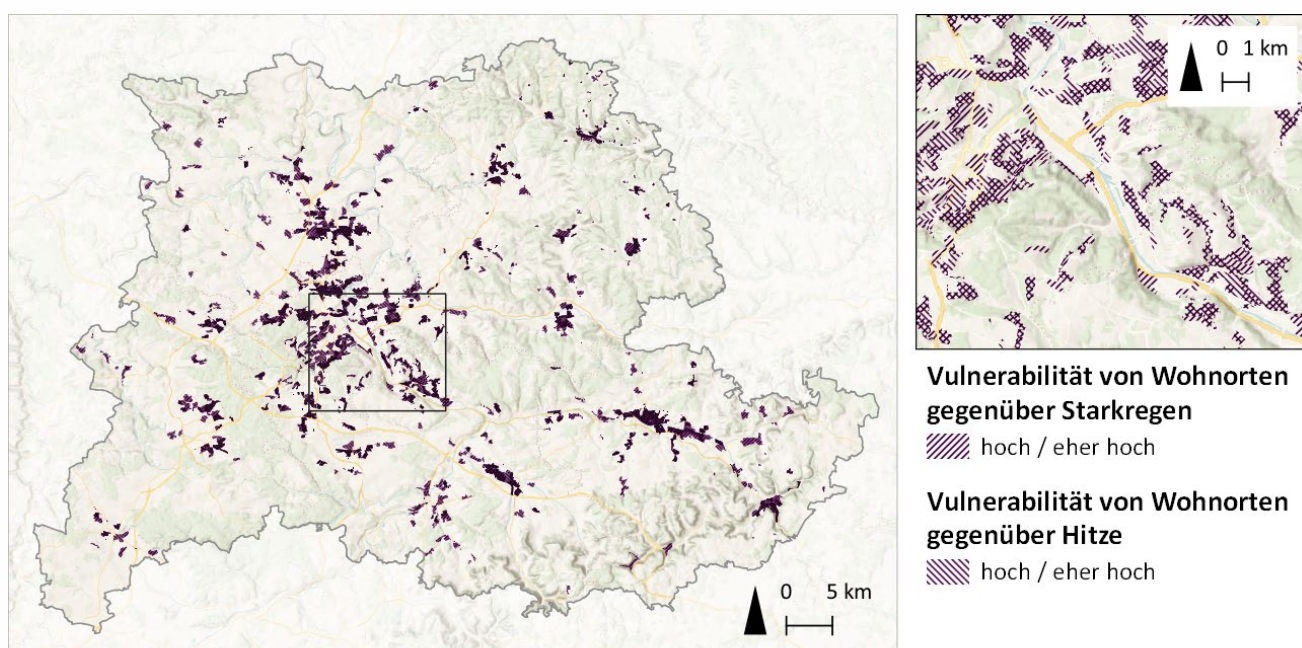
Abbildung 25: Anteil an einkommensschwächerer oder zur Miete wohnender Haushalte.



Kartenerstellung: IREUS Universität Stuttgart, 2023. Datensätze: 1) ALKIS und ATKIS tatsächliche Nutzung 2020 (LGL www.lgl-bw.de); 2) Einwohnerzahlen Nexiga GmbH 2020; 3) OpenStreetMap Flächennutzung 2022 (OpenStreetMap-Mitwirkende); 5) Copernicus Street Tree Layer 2018 (Generated using European Union's Copernicus Land Monitoring Service information: <https://doi.org/10.2909/205691b3-7ae9-41dd-abf1-1fbf60d72c8c>).

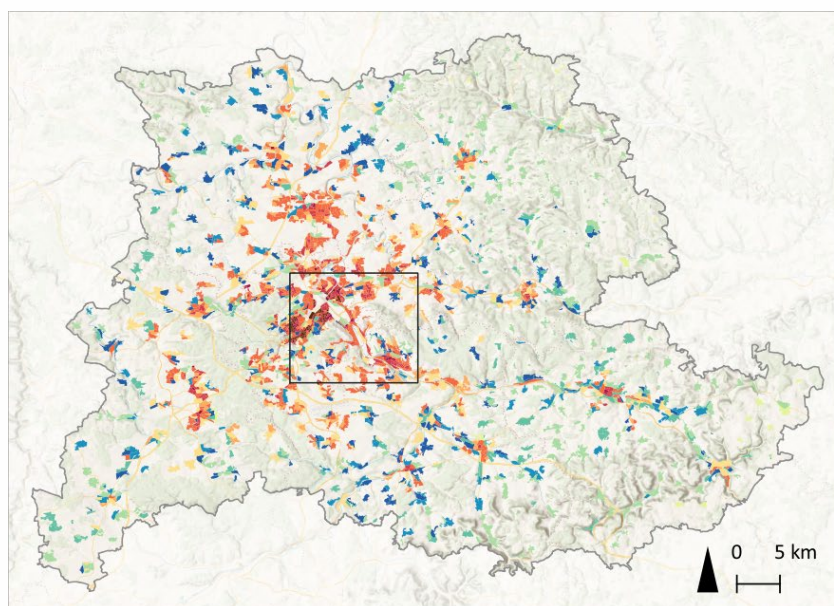
Hintergrundkarte: Voyager Map tiles by CartoDB, under CC BY 3.0. Data by OpenStreetMap, under ODbL. ESRI World Hillshade, Esri, Airbus DS, USGS, NGA, NASA, CGIAR, N Robinson, NCEAS, NLS, OS, NMA, Geodatastyrelsen, Rijkswaterstaat, GSA, Geoland, FEMA, Intermap, and the GIS user community.

Abbildung 26: Grünversorgung - Durchschnittliche Quantität begrünter, öffentlicher Freiflächen je Einwohner:in.



Kartenerstellung: IREUS Universität Stuttgart, 2023. Datensatz: Vulnerabilitätsanalyse auf Basis sozioökonomische Daten (Nexiga GmbH 31.12.2020). Hintergrundkarte: Voyager Map tiles by CartoDB, under CC BY 3.0. Data by OpenStreetMap, under ODbL. ESRI World Hillshade, Esri, Airbus DS, USGS, NGA, NASA, CGIAR, N Robinson, NCEAS, NLS, OS, NMA, Geodatastyrelsen, Rijkswaterstaat, GSA, Geoland, FEMA, Intermap, and the GIS user community.

Abbildung 27: Übersicht der Synthesekarten zur sozialen Vulnerabilität gegenüber Starkregen & Hitze.



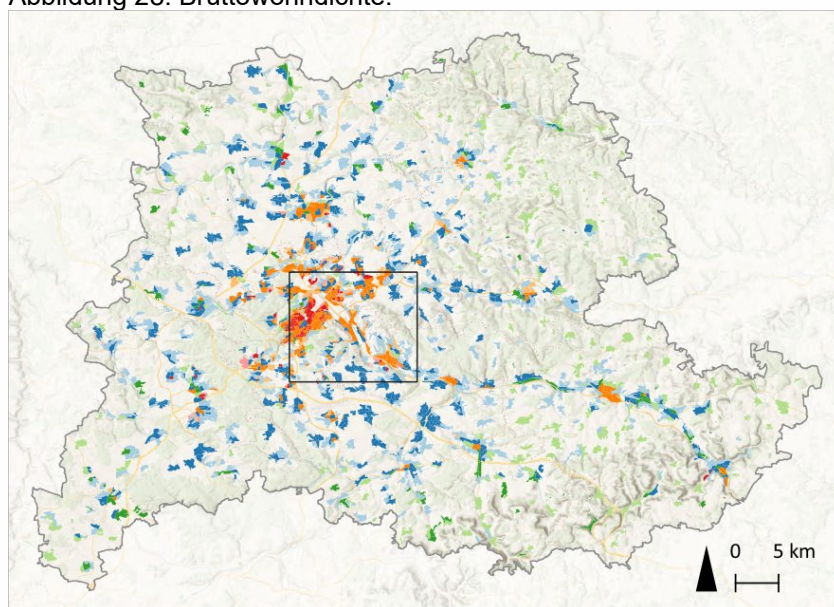
Kartenerstellung: IREUS Universität Stuttgart, 2023. Datensätze: 1) Einwohnerzahlen je Wohnort, Nexiga GmbH 31.12.2020; 2) ALKIS tatsächliche Nutzung 2020, LGL www.lgl-bw.de. Hintergrundkarte: Voyager Map tiles by CartoDB, under CC BY 3.0. Data by OpenStreetMap, under ODbL. ESRI World Hillshade, Esri, Airbus DS, USGS, NGA, NASA, CGIAR, N Robinson, NCEAS, NLS, OS, NMA, Geodatastyrelsen, Rijkswaterstaat, GSA, Geoland, FEMA, Intermap, and the GIS user community.



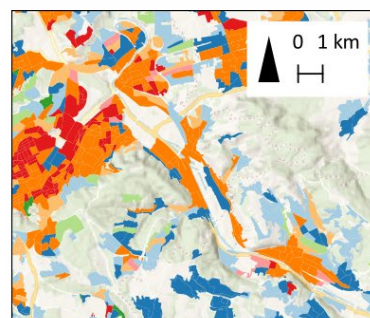
Anzahl an Einwohner*innen
je Hektar Wohnortsfläche

- 0 - 10
- 10 - 30
- 30 - 50
- 50 - 55
- 55 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 150
- 150 - 250
- 250 - 300
- 300 - 740

Abbildung 28: Bruttowohndichte.



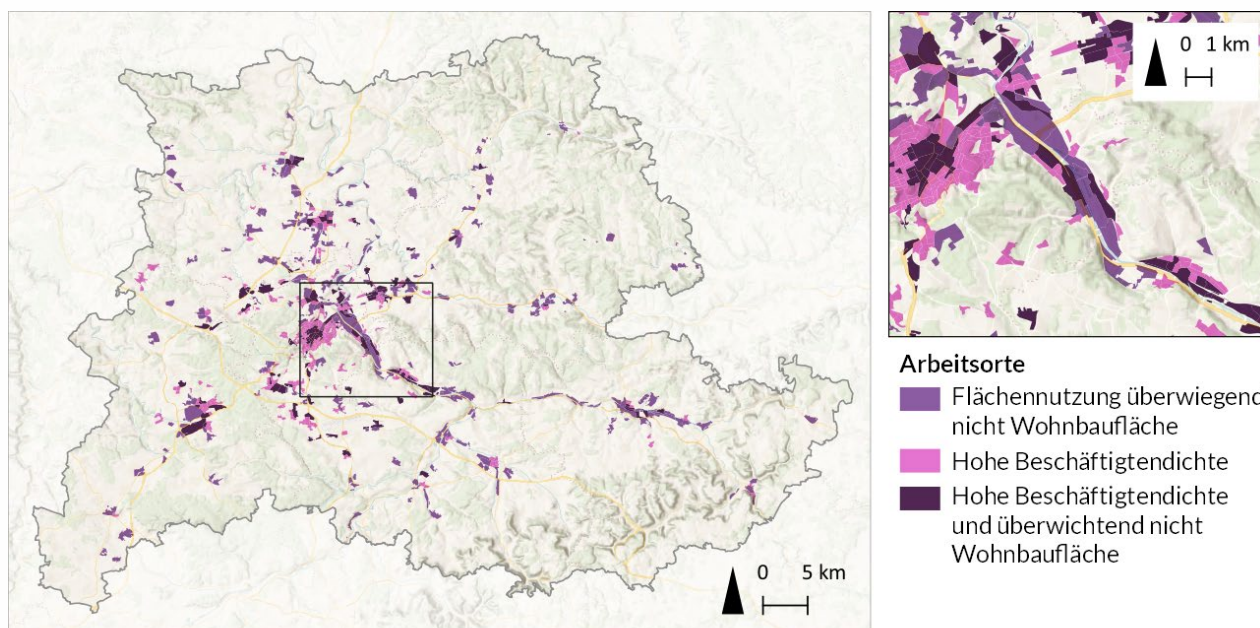
Kartenerstellung: IREUS Universität Stuttgart, 2023. Datensätze: 1) LOD2 Gebäudevolumen, LGL 2020 www.lgl-bw.de; 2) Gebäudetyp, Zensus 2011. Hintergrundkarte: Voyager Map tiles by CartoDB, under CC BY 3.0. Data by OpenStreetMap, under ODbL. ESRI World Hillshade, Esri, Airbus DS, USGS, NGA, NASA, CGIAR, N Robinson, NCEAS, NLS, OS, NMA, Geodatastyrelsen, Rijkswaterstaat, GSA, Geoland, FEMA, Intermap, and the GIS user community.



Siedlungstypologie

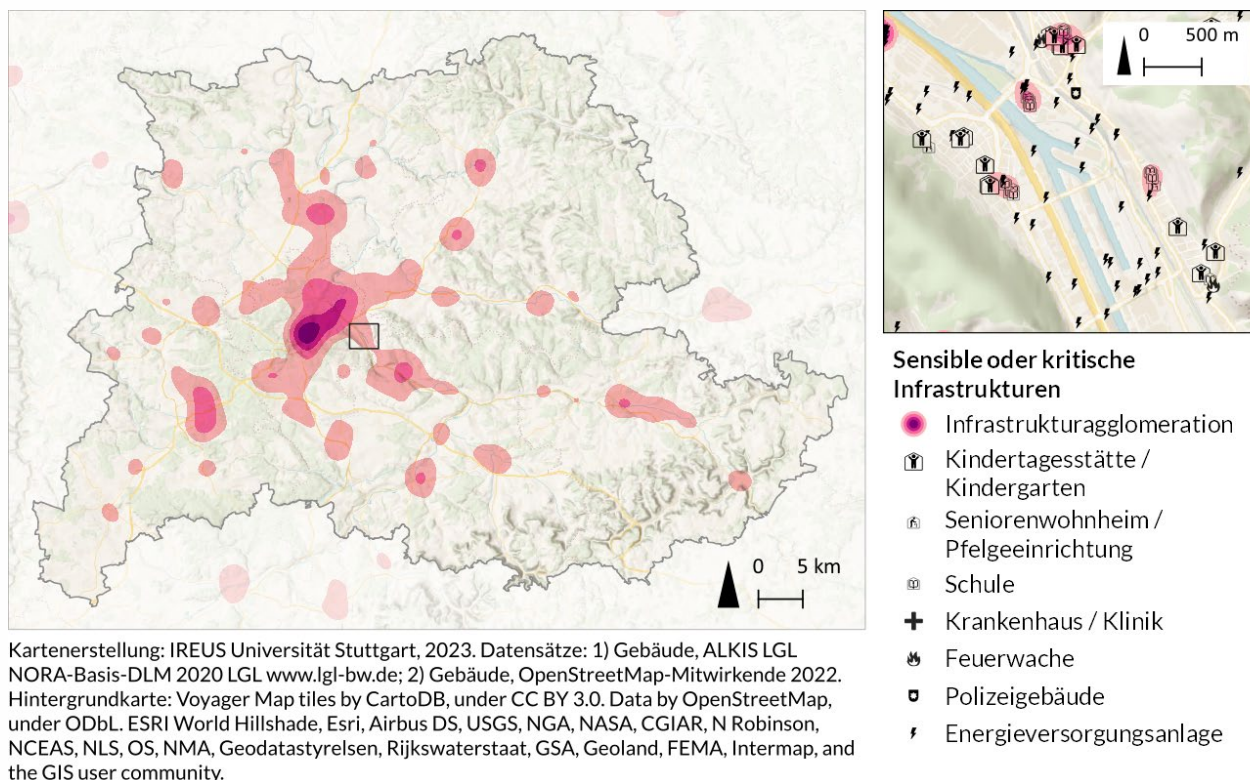
- Freistehendes Einfamilienhaus, niedrige Dichte
- Freistehendes Einfamilienhaus, höhere Dichte
- Zweifamilienhaus/Doppelhaus-hälfte/Reihenhaus, niedrige Dichte
- Zweifamilienhaus/Doppelhaus-hälfte/Reihenhaus, höhere Dichte
- Mehrfamilienhaus 3-6 Wohnungen, niedrige Dichte
- Mehrfamilienhaus 3-6 Wohnungen, hohe Dichte
- Mehrfamilienhaus 7 und mehr Wohnungen, niedrigere Dichte
- Mehrfamilienhaus 7 und mehr Wohnungen, höhere Dichte

Abbildung 29: Karte zur baulichen Dichte und zur dominierenden Bebauungstypologie je Wohnort.



Kartenerstellung: IREUS Universität Stuttgart, 2023. Datensätze: 1) Beschäftigtenzahlen, Nexiga GmbH 31.12.2020; 2) LGL NORA-Basis-DLM 2020 www.lgl-bw.de. Hintergrundkarte: Voyager Map tiles by CartoDB, under CC BY 3.0. Data by OpenStreetMap, under ODbL. ESRI World Hillshade, Esri, Airbus DS, USGS, NGA, NASA, CGIAR, N Robinson, NCEAS, NLS, OS, NMA, Geodatastyrelsen, Rijkswaterstaat, GSA, Geoland, FEMA, Intermap, and the GIS user community.

Abbildung 30: Karte der Beschäftigtdichte und der überwiegend nicht für Wohnen genutzte Siedlungsbereiche.



Kartenerstellung: IREUS Universität Stuttgart, 2023. Datensätze: 1) Gebäude, ALKIS LGL NORA-Basis-DLM 2020 LGL www.lgl-bw.de; 2) Gebäude, OpenStreetMap-Mitwirkende 2022. Hintergrundkarte: Voyager Map tiles by CartoDB, under CC BY 3.0. Data by OpenStreetMap, under ODbL. ESRI World Hillshade, Esri, Airbus DS, USGS, NGA, NASA, CGIAR, N Robinson, NCEAS, NLS, OS, NMA, Geodatastyrelsen, Rijkswaterstaat, GSA, Geoland, FEMA, Intermap, and the GIS user community.

Abbildung 31: Agglomerationen sensibler und kritischer Infrastrukturen.



Diskussion zentraler Erkenntnisse mit ergänzende grobräumigeren Vulnerabilitätsanalyse

Wesentliche Erkenntnisse zu der Ableitung von Anpassungsnotwendigkeiten sind nachfolgend zusammengefasst dargestellt. Hierfür wurden zudem gemeindescharfe Daten des statistisches Landesamts Baden-Württemberg genutzt (Abbildung 32), um hier generalisierte Trends und Tendenzen zur Vulnerabilität abzuleiten. Außerdem wurden die Ergebniskarten zur Vulnerabilität und Exposition in einem Validierungsworkshop mit Regionalplaner:innen der Region Stuttgart diskutiert, wodurch die Karten hinsichtlich der Plausibilität geprüft und die sich abzeichnenden Raummuster diskutiert wurden.

Besonders bei der Altersgruppe der über 65-Jährigen zeigt sich eine räumlich differenzierte Verteilung in der Region und innerhalb von Kommunen. D.h., in einigen Wohnorten sind anteilig deutlich mehr ältere Einwohner:innen als in anderen Orten wohnhaft (Abbildung 24 und Abbildung 32). Es zeigt sich zudem ein eindrückliches Raummuster, dass mehr ältere Einwohner:innen eher außerhalb oder an den Außenrändern der Städte und Gemeinden leben und im Vergleich dazu der Anteil an Älteren in den Innenstadtbereichen, insbesondere bei Ober- und Mittelzentren, eher niedriger ist. Der demografische Wandel ist auch in der Region Stuttgart zu spüren und schreitet voran (Abbildung 32). In der gesamten Region wird der Anteil an älteren Einwohner:innen wahrscheinlich deutlich zunehmen. Aktuell ist der durchschnittliche Anteil der 65-Jährigen bei 20,4% (Stand 2022, statistisches Landesamt Baden-Württemberg) aber nach der Vorausschätzung (obere Variante, statistisches Landesamt Baden-Württemberg) wird ein Anstieg auf 25,0% bis 2040 erwartet. Diese prognostizierte Alterung der Gesellschaft ist bei der Entwicklung von Anpassungsstrategien u.a. im Gesundheitssektor, beim Bevölkerungsschutz und in der Stadtentwicklung zu berücksichtigen. Denn neben dem fortschreitenden Klimawandel wird sich auch die Bevölkerung wandeln, d.h. bei der Entwicklung vorausschauender klimaadaptiver Strategien ist die Integration solcher gesellschaftlichen Veränderungsprozesse und der damit verbundenen veränderten Raumannsprüche essentiell.

Die regionale Verteilung der sozio-ökonomischen Struktur (Abbildung 25 und Abbildung 32) zeigt im Vergleich der Senior:innenverteilung ein deutlich differenteres Raumbild. Haushalte, die zur Miete wohnen oder eher über ein niedrigeres Haushaltseinkommen verfügen, sind anteilig deutlich mehr in den innerstädtischen Bezirken von Groß- und Mittelstädten lokalisiert. In den kleineren Kommunen ist die Eigentumsquote höher als in den Städten, aber ein höheres Einkommen ist nicht unbedingt daran geknüpft. Dieses ist in einigen kleineren Gemeinden, wie in den kleineren Orten des Schwäbisch-Fränkischen Walds, sichtbar, wo der Anteil von Haushalten mit eher niedrigem Einkommen relativ hoch ist.

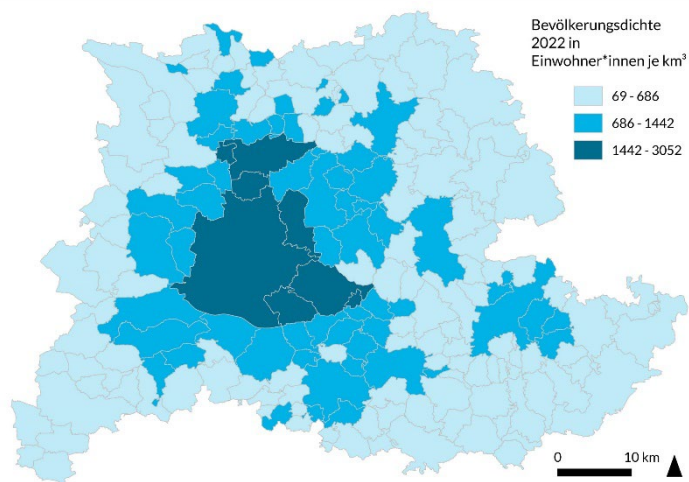
Bei der Kombination dieser zwei Faktoren - Alter und sozio-ökonomische Ressourcen - zu der Vulnerabilitätskarte gegenüber Starkregen (Abbildung 27) werden Gebiete ersichtlich, wo beide Vulnerabilitätsfaktoren relativ hoch sind und dort hinsichtlich der Vulnerabilitätsbewertung eine Mehrfachbelastung vorliegt. Solche Gebiete sind eher am Stadtrand, in Mittelstädten und entlang der regionalen Entwicklungsachsen zu verzeichnen, obgleich auch solche verwundbaren Gebiete in sehr kleinen Ortschaften auftreten. Diese Gebiete mit einem höheren Anteil an verwundbarer Bevölkerung sind sowohl in dicht besiedelten städtischen Orten als auch in dörflichen Raumstrukturen oder Einfamilienhausgebiete lokalisiert. D.h., eine hohe Verwundbarkeit ist nicht direkt von der Größe der Kommunen abhängig. Zur Überführung solcher Informationen in passgenaue Lösungen sind Informationen über den Raumtyp mit Aussagen zur Bruttowohndichte und zu den Bebauungstypologien notwendig (Abbildung 28 und Abbildung 29). Die Synthesekarte „Vulnerabilität gegenüber Hitze“ (Abbildung 27) weist ein ähnliches Raummuster auf, aber die urbanen Bereiche sind noch stärker als verwundbar klassifiziert. Hierfür ist der zusätzliche Indikator „Grünversorgung“ ursächlich. Die Grünversorgung (Abbildung 26) zeigt relativ defizitäre Versorgungsräume in primär innerstädtischen Lagen. Im Konkreten bedeutet das, dass nicht genügend verfügbare, öffentlich-



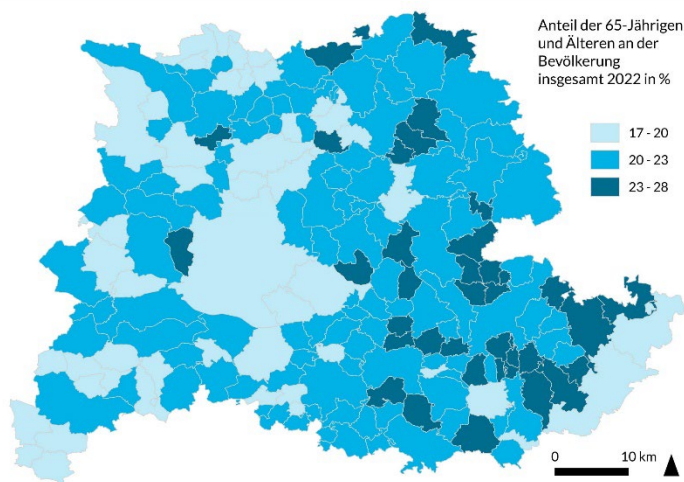
zugängliche Grünflächen je Einwohner:in, u.a. durch die erhöhte Nutzungsintensität aufgrund tendenziell höherer Einwohner:innendichte in Innenstädten, (siehe hierfür auch Abbildung 28) vorhanden sind. Markant bei der regionalen Grünversorgung ist zudem auch, dass kleine Orte mit einem Gründefizit gekennzeichnet sind. Dieses Defizit resultiert vor allem dadurch, dass Felder und Privatgärten nicht in der Berechnung der Grünversorgung inkludiert wurden. Obwohl in solchen Orten viele ein eigenes Haus und einen eigenen Garten besitzen (Abbildung 29), sind öffentliche Grünräume auch dort bedeutsam. Auch im Hinblick auf zukünftige Siedlungsentwicklung ist gleichzeitig sowohl auf eine höhere Bebauungsdichte (Kompaktes Bauen, Flächensparansatz) als auch auf qualitätsvollem-grünen Freiraum zu achten. Solche qualitätsvollen Grünflächen als Rückzugsorte an heißen Tagen sind auch in der Nähe von Arbeitsstätten wichtig. Die Karte „Arbeitsorte“ (Abbildung 30) gibt daher Hinweise darüber, wo zum einen eine hohe Anzahl an Beschäftigten tätig ist oder zum anderen Gebiete mit besonderer gewerblicher Nutzung charakterisiert sind (Abbildung 32). Aktuell gibt es auch bereits gute Ansätze zur Begrünung solcher Gewerbegebiete, Büroflächen oder sonstigen Arbeitsorten, um auch langfristig das Arbeiten unter gesunden Bedingungen auch unter Zunahme von Hitzetagen zu sichern. Neben dieser flächenhaften räumlichen Differenzierung der Region hinsichtlich vulnerabler Bevölkerungsgruppen, ist auch die Betrachtung von einzelnen kritischen und sensiblen Infrastrukturen ein wichtiges Element der Risikobetrachtung. Dazu zählen Einrichtungen für vulnerable Menschen, wie bei der Kinderbetreuung oder Pflegeeinrichtungen, um deren Schutz zu gewährleisten. Auch zu betrachten sind der mögliche Ausfall, die Beschädigung oder die eingeschränkte Funktion von überörtlich bedeutsamen Infrastrukturen, wie z.B. ein Krankenhaus. Hinsichtlich der Verortung der Infrastruktureinrichtungen stellt sich eine sehr differente Verteilung in der Region Stuttgart dar (Abbildung 31). Die kartierte Dichte der Infrastruktureinrichtungen spiegelt auch die Abhängigkeit zur Kommengröße wieder, da aufgrund der Daseinsvorsorge Kommunen je nach Größe und überörtlicher Bedeutung in der Pflicht stehen, lebensnotwendige Infrastrukturen, wie z.B. Bildungseinrichtungen, bereitzustellen. Aus diesem Grund zeigt sich u.a. eine besondere Häufung an Infrastruktureinrichtungen auch in der Stadt Stuttgart und in den Mittelzentren der Landkreise.

2.4.3 Ergänzende kleinräumige Vulnerabilitätsanalyse der Stadt Stuttgart

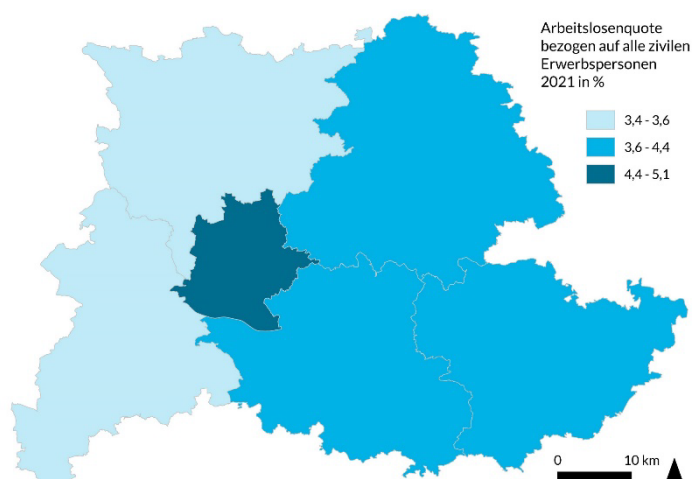
Neben der regionalen Analyse, die im Online-Tool zur Verfügung steht, wurden auch ergänzende Vulnerabilitätsanalysen durchgeführt, um verschiedene Datenquellen zu vergleichen und um die Ergebnisse zu validieren. Die Daten der LHS Stuttgart stellen eine besonders gut geeignete Quelle für diese Zwecke dar. Hierfür wurden Sozialdaten für die Ebene der Stadtviertel bereitgestellt. Diese Stadtviertel haben eine ähnliche Geometrie und Größe zu den Wohnorten der regionalen Analyse. Dieses ermöglichte einen visuellen Vergleich einiger Datensätze, um die regionalen Daten zu validieren (Abbildung 33). Die Einwohnerdichte ist wie erwartet höher in den innerstädtischen Stadtteilen. Der Senior:innenanteil und die Eigentümerquote ist, wie in der regionalen Analyse abgebildet, tendenziell höher in den äußeren Stadtteilen. Mit diesem Validierungsansatz konnten die Indikatoren Einkommen oder sozioökonomische Ressourcen mangels räumlicher Daten nicht überprüft werden. In dem Sozialdatenatlas der LHS Stuttgart auf Stadtviertelebene gab es jedoch verschiedene weitere Vulnerabilitätsrelevante Merkmale, die in dem verwendeten regionalen Datensatz fehlten: nämlich alleinerziehende Familien und Wohndauer der Haushalte am Wohnort. Weder der im ISAP-Projekt verwendete regionale Datensatz noch der Zensusdaten bieten solche Datensätze. Solche kombinierten Merkmale, die abbilden, dass ein Mensch aus mehreren Hinsichten statistisch betrachtet eine höhere Vulnerabilität aufweist, sind für eine Vulnerabilitätsbetrachtung wertvoll aber selten. Für eine langfristige und transferierbare Lösung wäre es wünschenswert, wenn die Zensusdaten ähnlicher Weise aufbereitet werden könnten, um solche sogenannte Intersektionalität abbilden zu können.



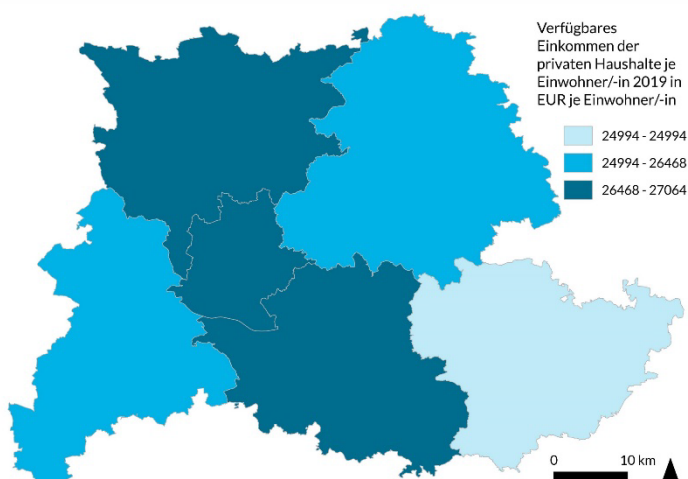
Datenquelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Bevölkerungsfortschreibung zum 31.12., Feststellung des Gebietsstandes. © Kartengrundlage: Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (LGL), www.lgl-bw.de



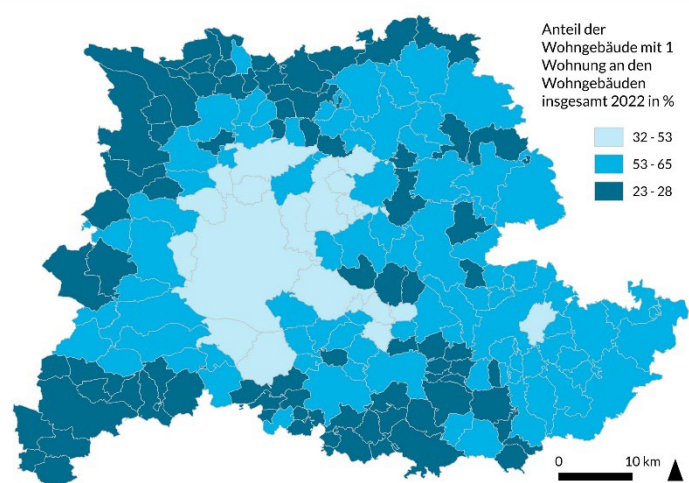
Datenquelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Bevölkerungsfortschreibung zum 31.12.
© Kartengrundlage: Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (LGL), www.lgl-bw.de



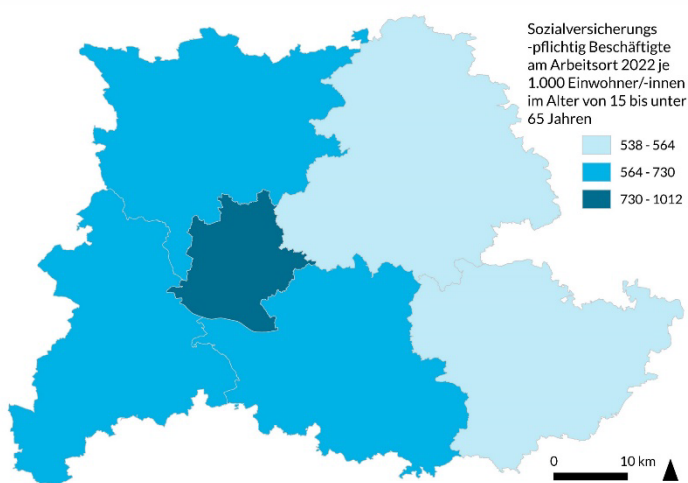
Datenquelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Arbeitsmarktstatistik der Bundesagentur für Arbeit, Jahresdurchschnitt. © Kartengrundlage: Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (LGL), www.lgl-bw.de



Datenquelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Arbeitskreis 'Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder' (www.vgrdl.de), Berechnungsstand: August 2020. Statistisches Bundesamt, Fortschreibung des Bevölkerungsstandes. © Kartengrundlage: Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (LGL), www.lgl-bw.de



Datenquelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Fortschreibung des Wohngebäude- und Wohnungsbestandes. © Kartengrundlage: Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (LGL), www.lgl-bw.de



Datenquelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Beschäftigungsstatistik der Bundesagentur für Arbeit (BA) zum 30.06., Bevölkerungsfortschreibung zum 31.12. des Vorjahres. © Kartengrundlage: Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (LGL), www.lgl-bw.de

Abbildung 32: regionale Karten auf Gemeindeebene mit Daten der Statistisches Landesamt.

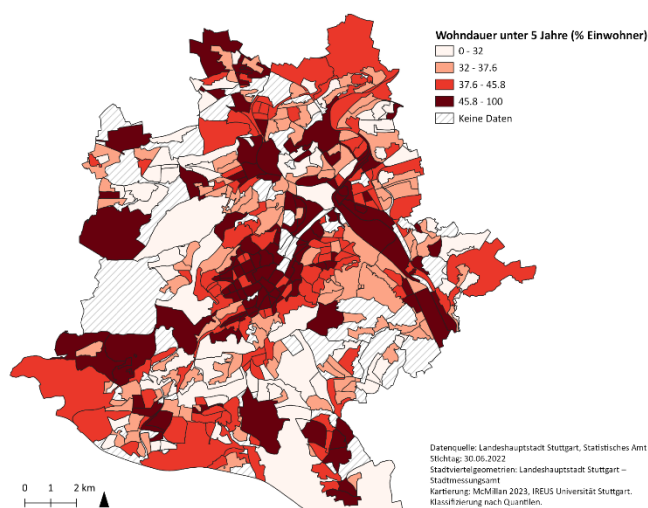
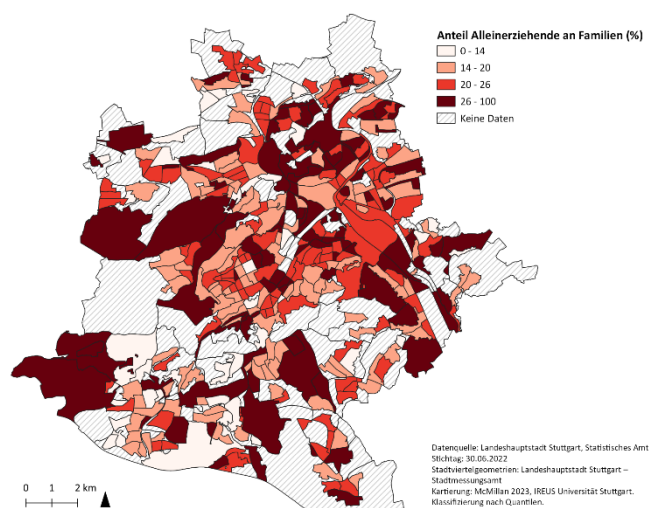
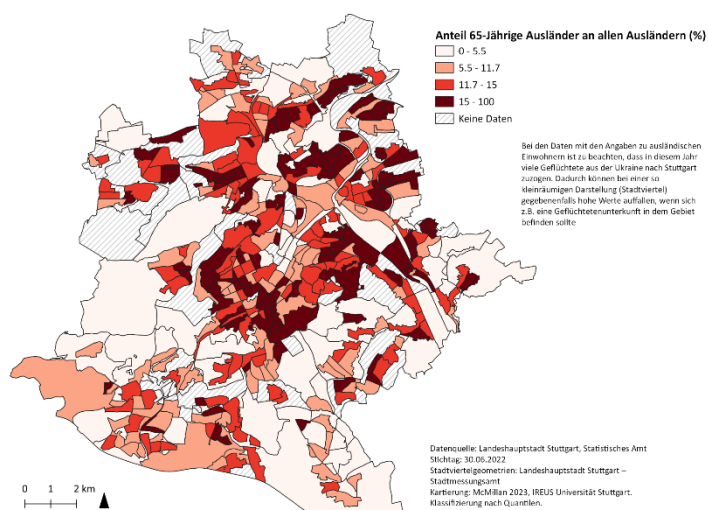
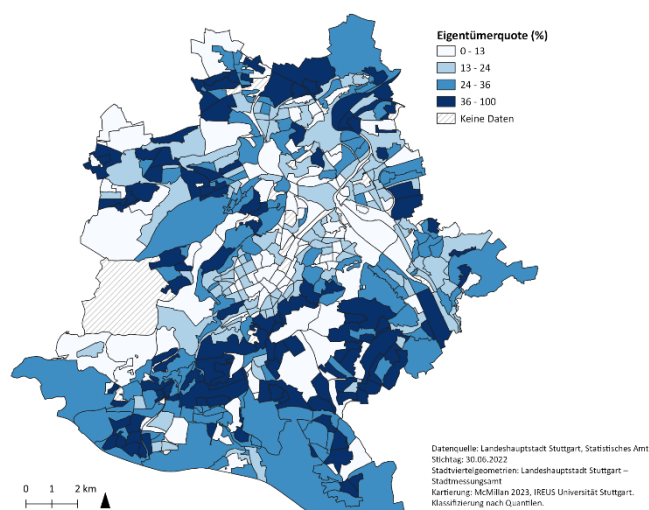
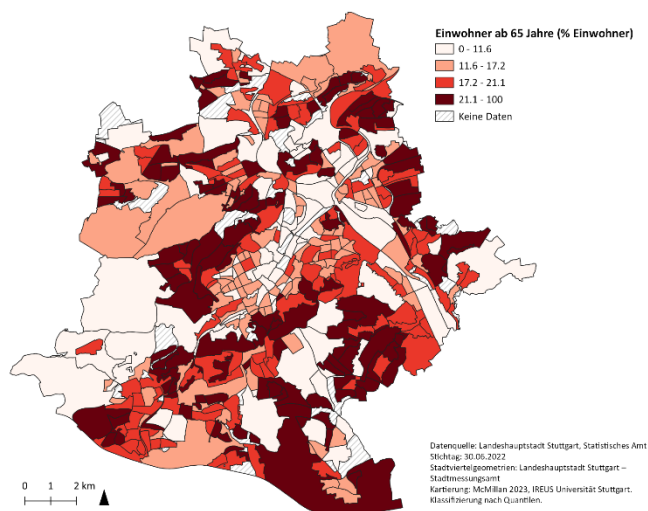
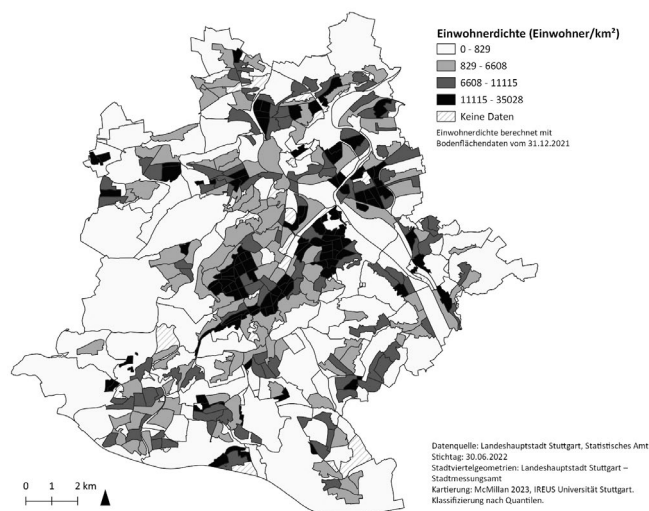


Abbildung 33: Karten auf Stadtviertelebene mit Daten der LHS Stuttgart.



2.4.4 Risikobetrachtung und Risikohotspots

Für die Abschätzung des konkreten Anpassungsbedarfs in der Region Stuttgart, auch im Sinne der Identifizierung von Gebieten mit besonderem Handlungsbedarf, ist die Überlagerung der verschiedenen Informationen zur Erfassung der Starkregen- und Hitzerrisiken von entscheidender Bedeutung. Denn die über die Gefahrenkartierung hinausgehende Betrachtung der sozialen und stadträumlichen Vulnerabilitätsstrukturen gibt bedeutsame strategisch-planerische Hinweise für die stadt-regionale Klimaanpassung und für die weitere räumliche Entwicklung im Außen- und Innenbereich.

So zeigen sich z.B. differente Raummuster bei der Betrachtung von Starkregenrisiken: vor allem Räume, in denen Überflutungsgefahren auf verwundbare Anwohner:innen und besonders schutzwürdige Infrastruktureinrichtungen treffen, sind besonders prioritär zu behandeln (Abbildung 34). In ähnlicher Weise zeigen sich bei der Kombination der Klimaanalysekarte mit den Vulnerabilitätskarten eine weitere Differenzierung von Risikogebieten innerhalb der dicht besiedelten Innenstädte (Abbildung 35). Diese Mehrfachbelastungen lassen eine klare Ableitung von Anpassungserfordernissen zu. Darüber hinaus weisen die Ergebnisse u.a. auf Anpassungserfordernisse in den Entwicklungsachsen mit überregionaler Bedeutung hin, z.B. Neckartalachse, Agglomerationsraum Stuttgart. Auch die Bedeutung der interkommunalen Zusammenarbeit im Hinblick auf die Minderung von Hitze- und Starkregenrisiken nimmt zu, z.B. durch Abhängigkeiten bei der Kaltluftströmungszufuhr oder bei der Retention potentiellen Starkregenniederschlags.

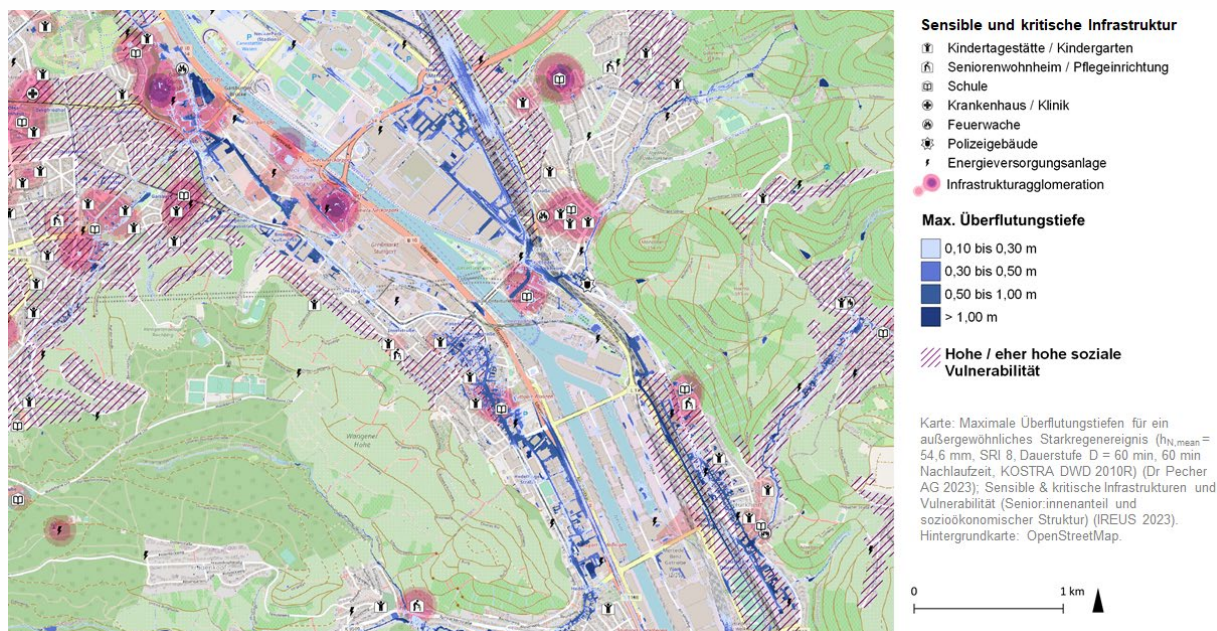


Abbildung 34: Überlagerung der Karten: sensible und kritische Infrastrukturaagglomerationen + Synthesekarte zur Vulnerabilität + Starkregengefahrenkarte.

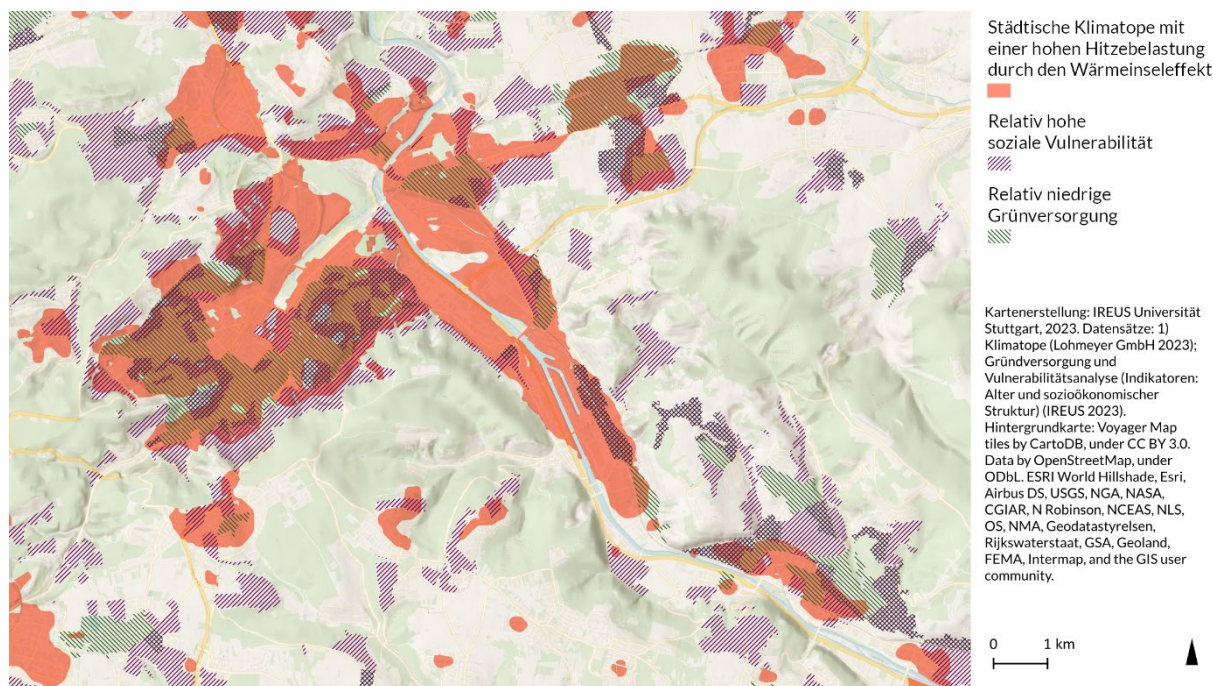


Abbildung 35: Überlagerung: Klimatope mit hoher Hitzebelastung + soziale Vulnerabilität + Grünversorgung.

2.4.5 Anpassungskapazitäten von Haushalten – Ergebnisse der Haushaltsbefragungen

Ziel der Haushaltsbefragung war es, Wissen über aktuelle Anpassungsmaßnahmen und zukünftige Anpassungsoptionen privater Haushalte – insbesondere in Bezug auf Hitzestress und Starkregen – in der Region Stuttgart zu erheben. Darüber hinaus wurden so Erkenntnisse über die Bewertung unterschiedlicher Anpassungskapazitäten aus Sicht der aktuell oder potentiell betroffenen Bürger gewonnen.

Fragebogenentwicklung

Die Entwicklung des Fragebogens erfolgte auf Grundlage von bereits vorhandenen Fragebögen, Literaturrecherchen zur Methodik und zur Klimaresilienz und in Abstimmung mit dem ISAP-Team und den Befragungsstädten. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden Fragen entwickelt, welche thematischen Blöcken zugeordnet wurden. Die Fragen wurden während des Arbeitsprozesses kontinuierlich weiterentwickelt und verfeinert. Im Ergebnis lassen sich die Fragen acht Hauptkategorien zuordnen:

- Klimawandel und extreme Wetterereignisse
- Erfahrung mit Hitzewellen
- Vorbereitung auf Hitzewellen
- Erfahrung mit Starkregen
- Vorbereitung auf Starkregen
- Entscheidungs-Experiment
- Angaben zum Gebäude und Wohnumfeld
- Wohnen und Arbeiten
- Angaben zur Person und zum Haushalt



Es wurden Informationen zur Wahrnehmung von Risiken im Kontext von Hitzewellen und Starkregenereignissen wie auch ihrem derzeitigen Vorsorgeverhalten erhoben. Des Weiteren wurden Erfahrungen zu vergangenen Extremwetterereignissen (z. B. Belastungen durch Hitze, Schäden durch Starkregen) sowie Verhaltensänderungen der betroffenen Haushalte erfasst.

Durchführung

Die Haushaltsbefragungen mit dem gleichen Fragebogen wurden sowohl in Stuttgart als auch in Kirchheim unter Teck (Kirchheim u.T.) durchgeführt. In Kirchheim u.T. fand die Befragung vom 13. Dezember 2021 bis zum 31. Januar 2022 statt. Kirchheim u.T. ist eine Mittelstadt mit knapp unter 40.000 Einwohner:innen und mit der S-Bahn an die Stadt Stuttgart angebunden. Im Juni 2021 war Kirchheim u.T. von schweren Hagel- und Starkregenereignissen betroffen. Die zweite Befragung wurde in der Landeshauptstadt Stuttgart vom 26. Oktober 2022 bis zum 07. Dezember 2022 durchgeführt. Die Stadt Stuttgart ist eine Großstadt mit ca. 670.000 Einwohner:innen. Stuttgart war im Juni 2021 von Starkregen und im Sommer 2022 von Hitze mit 26 Tagen über 30°C, insbesondere während der europäischen Hitzewelle im August, betroffen.

In Kirchheim u.T. hatte die Stichprobe eine Größe von 4.500 Personen und in Stuttgart eine Größe von 6.000 Personen. Die Befragung erfolgte in erster Linie online mit einem standardisierten Fragebogen. Durch ein postalisch zugesendetes Anschreiben erhielten die Befragten den Link bzw. Barcode zur Umfrage mit persönlichem Zugangscode. Auf Anfrage wurde der Fragebogen in Papierform zugeschickt, um Personen ohne Internetzugang oder -kenntnisse nicht von der Befragung auszuschließen. Es sind insgesamt 1.279 gültige Fragebögen eingegangen, 703 aus Kirchheim u.T. und 576 aus Stuttgart. Davon wurden 65 Fragebögen postalisch zurückgeschickt. Die Rücklaufquote beträgt 15,6% in Kirchheim u.T. und 9,6% in Stuttgart. Hinsichtlich des sozioökonomischen Hintergrunds der Teilnehmer:innen zeigt sich eine grundsätzlich heterogene Mischung, allerdings sind Personen mit hohem Bildungsabschluss und höherem Einkommen etwas überproportional stark vertreten.

Ergebnisse

Die vollständigen Ergebnisse sind in zwei Berichten für die beiden befragten Städte dokumentiert. Wesentliche zentrale Ergebnisse werden nachfolgend zusammenfassend dargelegt.

Insgesamt haben bereits 97% der Befragten eine oder mehrere Hitzewellen erlebt. 42% leiden sehr oft/oft unter Trägheit/Abgeschlagenheit, 37% klagen über Schlafstörungen und 27% über Konzentrationsprobleme. Es gibt Personen, die besonders anfällig gegenüber Hitzewellen sind oder diese eher schlecht vertragen. Dazu zählen Personen mit chronischen Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems, der Atemwege/Lunge (Asthma) und der Nieren sowie Personen mit Bluthochdruck, Diabetes Typ 2, Demenz, starkem Unter- oder Übergewicht, psychischen Erkrankungen und Schwangere. Von den Befragten zählen sich 25% zu dieser Personengruppe. Die Hitzebelastung wird vor allem in der Innenstadt und in öffentlichen Verkehrsmitteln als hoch, in Wäldern und Parks/Gärten als niedrig empfunden (Abbildung 36).

Tendenziell fühlen sich vor allem Personen, die zur Miete wohnen, durch die Hitze in ihrer Wohnung belastet (63%). Im Vergleich dazu fühlen sich nur 44% der Befragten, die im Eigentum leben, von Hitze negativ belastet. Außerdem nehmen mehr Befragte in ihrem Stadtviertel die Hitze belastend wahr, wenn das Wohnumfeld durch wenig Grün und wenig Platz zwischen den Gebäuden geprägt ist (81%), als Befragte in einem Wohnumfeld mit viel Grün und viel Platz zwischen den Gebäuden (57%). Auch das Einkommen steht in Zusammenhang mit der empfundenen Hitzebelastung, so fühlen sich 79% der Haushalte mit einem monatlichen Nettoeinkommen von unter 2.000€ an ihrem Wohnort von Hitze belastet, im Vergleich zu 60% der Befragten mit einem Einkommen von über 6.000€.

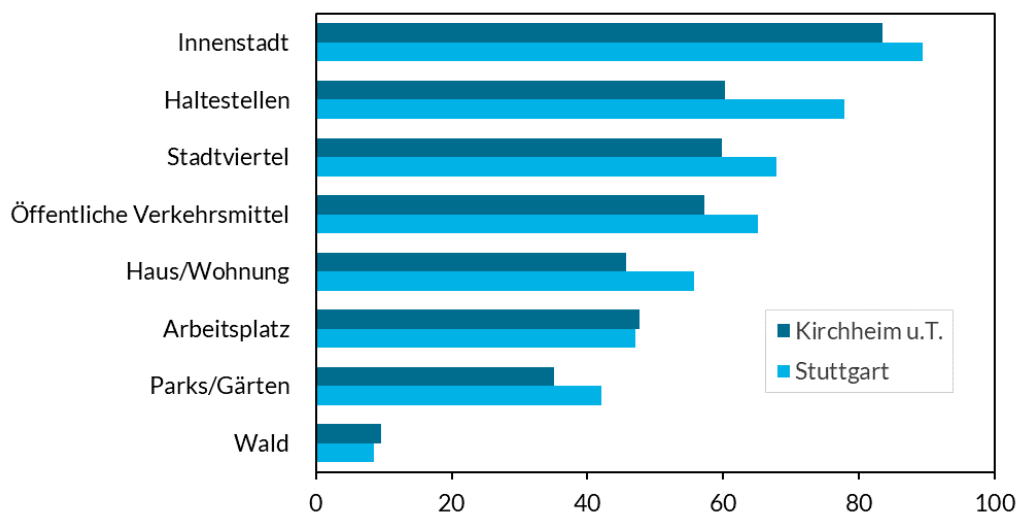


Abbildung 36: Anteil der Befragten, die eine hohe oder sehr hohe Hitzebelastung an den verschiedenen Orten empfinden (Angaben in Prozent).

Während einer Hitzewelle gibt es viele Möglichkeiten sich selbst und sein Haus/seine Wohnung vor zu starker Hitze zu schützen. Die deutliche Mehrheit der Befragten wendet bereits eine Vielzahl an Maßnahmen an, darunter:

- Lüften (nachts oder früh morgens)
- Geschlossene Fenster und Rollläden tagsüber
- Unten werden einige dieser Möglichkeiten aufgelistet.
- Meiden besonders heißer Orte
- Besuchen kühlerer Orte
- Möglichst viel morgens oder abends erledigen
- Hitzeangepasste Kleidung
- Ausreichend Wasser trinken (jeweils über 80%).

Auch weitere Abkühlungsmaßnahmen werden bereits angewendet: 57% der Befragten gaben an klimatisierte Verkehrsmittel zu nutzen. Weitere 46% gaben an, Ventilatoren zu nutzen und 11% der Befragten verwenden auch Klimaanlage. Die Anpassung der Arbeitszeiten wird von 34% der Befragten als bereits genutzte adaptive Maßnahme angegeben.

Über 90% der Befragten stimmten der Aussage zu, dass die Anpassung an Hitzewellen eine hohe Priorität in der Stadtentwicklung haben sollte (94% stimmen absolut oder eher zu). Die geringste Zustimmung findet die Bereitschaft zum Umzug in eine hitzeangepasste Wohnumgebung laut den Befragten in Kirchheim u.T. (44% stimmten absolut oder eher zu), in Stuttgart dagegen ist die Zustimmung etwas höher (56%). Im Hinblick auf die Starkregenvorsorge findet die Aussage, dass die Anpassung an Starkregenereignisse eine hohe Priorität in der Stadtentwicklung haben sollte, die größte Zustimmung (94% stimmen absolut oder eher zu). In Kirchheim u.T. haben 94% der Befragten seit dem Jahr 2000 ein Starkregenereignis erlebt. Davon waren 50% indirekt betroffen und 40% direkt betroffen, d.h. es kam zu Überflutungen am Haus bzw. an der Wohnung. In Stuttgart haben 77% der Befragten ein Starkregenereignis erlebt, 83% waren nicht direkt betroffen und 18% direkt betroffen. Der Hauptgrund für diesen Unterschied ist es, dass in der Stichprobe in Kirchheim u.T. die von Starkregen betroffenen Stadtteile bewusst übergewichtet wurden. Von den Personen, die nicht direkt am Wohnort betroffen waren, haben 88% in Kirchheim u.T. und 70% in Stuttgart die Überflutungen in



anderen Teilen der Stadt miterlebt, 59% der Befragten in Kirchheim u.T. und 38% der Befragten in Stuttgart hatten Betroffene im Bekanntenkreis und weitere 33% in Kirchheim u.T. und 30% in Stuttgart waren vom eingeschränktem Verkehrsangebot betroffen.

Bei einem Starkregen besteht die Gefahr, dass Regenwasser in ein Gebäude eindringt und zu Schäden führt. Von den Befragten, die direkt an der Wohnung bzw. am Haus betroffen waren, haben die meisten auch Schäden erlitten (76% in Kirchheim u.T. und 69% in Stuttgart). Dabei kam es vor allem zu Schäden am Grundstück, zu Gebäudeschäden und Schäden am Hausrat. Bei fast der Hälfte (49%) gelang das Wasser über (Keller-)Türen und (Keller-)Fenster ins Haus bzw. in die Wohnung. Der zweithäufigste Eintrittsweg (bei Betrachtung beider Städte) war das Eindringen von Wasser aus der Kanalisation in Räume unterhalb des Straßenniveaus über Abläufe, Toiletten, Duschen (34%) und über außenliegende Treppen und/oder Lichtschächte (32%). In 17% der Fälle drang das Wasser durch die Wände ein, in 16% durch das Dach, in 15% durch die Garage und in 13% durch eine defekte Rückstauklappe. Das Wasser stand häufiger im Kellergeschoss (77% der betroffenen Haushalte) als im Erdgeschoss (12%). Der Wasserstand lag meist unter 20cm, teilweise stand das Wasser im Keller aber auch höher (14% der betroffenen Haushalte).

Bei der Summe der Schäden am Hausrat, verursacht durch Starkregenereignisse, liegen die meisten finanziellen Schäden unter 5.000€ (64%), aber knapp 3% geben sogar Schäden über 20.000€ an. Die Summe der Schäden an Gebäuden und Grundstücken zeigt sich eine höhere finanzielle Belastung, u.a. 54% mit Schäden zwischen 1.000€ und 20.000€ und 9% mit Schäden über 20.000€. Als weitere Auswirkungen des Starkregenereignisses gaben 18% psychische Belastungen und 15% Beeinträchtigungen im Alltag an. Bestimmte Maßnahmen am Haus können helfen, Schäden zu minimieren. Auf die Frage, welche Maßnahmen die Befragten bereits umgesetzt haben, wurden am häufigsten Maßnahmen wie wasserbeständiger Bodenbelag (31%), Rückstausicherung (30%) und in Richtung Straße abfallende Einfahrten (23%) genannt. Diese Maßnahmen wurden meistens bereits vor dem letztem Starkregen installiert. Maßnahmen, die am häufigsten nach dem letzten Starkregenereignis umgesetzt wurden um sich in Zukunft besser zu schützen, waren die dauerhafte Verlagerung von Wertgegenständen und Vorhaltung von Sandsäcken.

In Kirchheim u.T. haben 46% der bisher betroffenen Personen angegeben, nach dem Ereignis keine Veränderungen durchgeführt zu haben, um sich zukünftig besser vor Starkregen zu schützen, während in Stuttgart dies 75% der Befragten angaben. Als Gründe, warum keine Veränderungen durchgeführt wurden, wird in beiden Städten am häufigsten angeführt, dass die Person in einer Wohnung in einem Mehrfamilienhaus wohnt und daher Änderungen nicht eigenständig oder nur in limitierter Form möglich seien (35% in Kirchheim u.T. und 54% in Stuttgart). Auch der Abschluss von Versicherungen zeigt ein differentes Bild bei den zwei befragten Städten. 65% der Befragten in Kirchheim u.T. und 45% in Stuttgart haben eine Hausratsversicherung mit Elementarschäden abgeschlossen. 69% der Befragten in Kirchheim u.T. und 39% in Stuttgart haben eine Gebäudeversicherung mit Elementarschäden abgeschlossen. Die Unterschiede zwischen den zwei Städten hinsichtlich des Ergreifens von Vorsorgemaßnahmen könnte plausibel durch die unterschiedliche Wohnsituation erklärt werden. In Stuttgart wohnt die Hälfte (51%) der Befragten zur Miete, während in Kirchheim u.T. nur 20% der Befragten zur Miete leben. Insgesamt fühlen sich 52% Befragten mit Eigentum gut auf ein kommendes Starkregenereignis vorbereitet, im Vergleich zu 36% der zur Miete wohnenden.

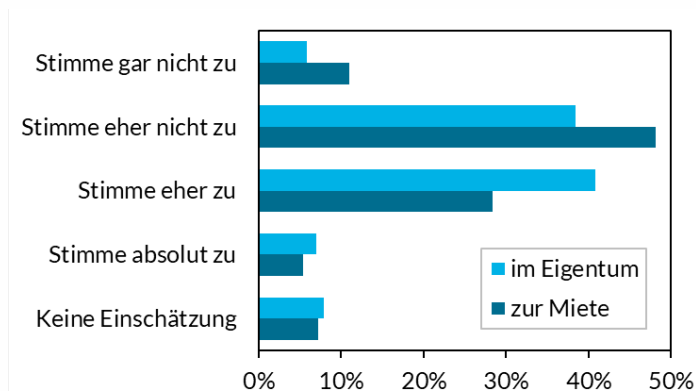


Abbildung 37: Zustimmung zu der Aussage „Ich fühle mich gut auf ein kommendes Starkregenereignis vorbereitet“ nach Eigentumsverhältnissen, n = 1240 (681 aus Kirchheim unter Teck und 559 aus Stuttgart).

Neben der Wohnsituation nimmt auch das Haushaltseinkommen bei der Starkregenvorsorge eine entscheidende Rolle ein. Mehr Befragte mit höheren Einkommen sind bereit, privates Geld zu investieren, um ihr Haus/ihre Wohnung vor Starkregen als im Vergleich zu Befragten mit weniger Einkommen zu schützen (z. B. bei Haushalten mit einem monatlichem Nettoeinkommen unter 3.000€ stimmen 68% der Aussage „Ich bin bereit, privates Geld zu investieren, um mein Haus/meine Wohnung vor Starkregen zu schützen“ absolut oder eher zu, im Vergleich zu 83% bei einem Einkommen über 5.000€).

Aus den Befragungsergebnissen lässt sich ableiten, dass die zwei in der regionalen Analyse verwendeten Indikatoren der sozioökonomischen Struktur, Einkommen und Eigentumsverhältnisse, relevante Faktoren für die potentielle Anpassungskapazität bilden, d.h. die Bereitschaft und Möglichkeit sich auf Hitze und Starkregenereignisse vorzubereiten. Die Befragung bestätigt aber auch weitere relevante Faktoren der Anpassungskapazität, die nicht als räumliche Indikatoren operationalisiert werden konnten.

2.4.6 Landnutzungszenarien

Bevölkerungswachstum und Wohnraumknappheit in der Region Stuttgart führen zu einem zunehmenden Handlungsdruck, neue Siedlungsflächen an Orts- und Stadträndern zu entwickeln. Angenommen, sämtliche Wohnbauflächenpotentiale würden bebaut werden, welche potentiellen Auswirkungen hätte dies auf Starkregen- und Hitzetrisiken in diesen Orten und Städten? Macht es aus Sicht der Klimaanpassung einen Unterschied, wie dort gebaut wird? Im Folgenden werden die ISAP-Aktivitäten zu Landnutzungszenarien beschrieben. Mit Hilfe dieser Szenarien wurde untersucht, ob die Art und Weise der Bebauung einen Unterschied in Bezug auf die Risiken nicht nur für neu zu bebauende Gebiete, sondern auch für das bereits bestehende, angrenzende Siedlungsgebiet macht.

Hierfür wurde die ganze Region Stuttgart untersucht, wie fiktive großflächige Siedlungserweiterungen sich auf den aktuellen Siedlungsbereich bezüglich Starkregen- und Hitzebelastung auswirken könnte. Für die Szenarien wurde angenommen, dass alle rein theoretisch bebaubaren Flächen der Region bebaut werden. Grundlage für diese Annahme waren sowohl die Wohnbauflächenpotentiale in den Flächennutzungsplänen als auch die Ziele und Grundsätze des Regionalplans.



Es wurde zwei unterschiedliche Szenarien hinsichtlich der Art und Weise der Gestaltung solcher Flächen entwickelt (Abbildung 38):

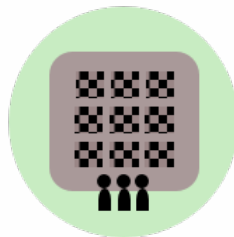
1. Szenario Dispers: alle Potentialflächen werden mit ortsüblicher Gebäudehöhe, Versiegelungsgrad und Grünflächenanteil bebaut.
2. Szenario Kompakt: alle Potentialflächen werden mit einer höheren baulichen Dichte, höheren Gebäuden, weniger Flächeninanspruchnahme und einem Regenrückhalt auf der Neubaufäche bebaut.

Um die „ortsübliche Bebauung“ in Szenario Dispers zu ermitteln, wurden die durchschnittlichen Parameter je Ortslage verwendet. Für das Szenario Kompakt wurde zu den ortsüblichen Parametern ein pauschaler Aufschlag hinsichtlich der Gebäudehöhe und dem Grünflächenanteil differenziert nach der Größe und Zentralität des Ortes hinzugezogen.

Für die Region wurden dann ein Heißer Sommertag (Lohmeyer GmbH) und ein Starkregenereignis (Dr. Pecher AG) für die aktuelle Situation und für die zwei Entwicklungsszenarien dispers und kompakt simuliert.

Szenario dispers

mehr
Flächenverbrauch,
weniger dichte
Bebauung



Szenario kompakt

weniger
Flächenverbrauch,
dichtere Bebauung,
Regenrückhalt in der
Fläche

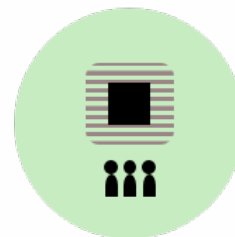


Abbildung 38: Schematische Darstellung der zwei Szenarien - dispers und kompakt.

Methodik: Erstellung der Szenariengrundlagen

Auf der regionalen Ebene wurden Landnutzungsszenarien entwickelt. Dabei handelt es sich nur um die Neubebauung auf bisher unbebauten größeren Flächen, für die Durchschnittswerte ermittelt wurden. Einzelne fiktive Gebäude etc. wurden nicht platziert. Beide Szenarien sind Wachstumsszenarien und im Rahmen des geltenden Regionalplans theoretisch möglich, d.h. wo sog. „Entwicklungsflächen“ und wie dicht (nach regionalplanerischen Mindestanforderungen) bebaut wird. Zusätzlich ist die fiktive Neubebauung auf den Entwicklungsflächen an der ortstypischen Bebauung (Dichte, Höhe) angelehnt, da die Entwicklungsflächen direkt an bestehende Orte/Städte anschließen, und nach Raumtypen der Orte differenziert. Die Szenarien bilden nicht realistisch zu erwartenden Zukunftsszenarien ab, sondern sollen zwei „extreme“ Möglichkeiten darstellen. Als Grundlage für die weiteren Modellierungen wurde eine Shapedatei mit allen potentiellen Entwicklungsflächen der Region mit der mittleren Bebauungshöhe, dem Grünanteil, der bebauten Fläche und dem Gebäudevolumen für jede Fläche für die beiden Szenarien erstellt (Tabelle 10).



Tabelle 10: Definition der zwei Szenarien anhand vier Parameter.

Raumtypologie basiert auf Regionalplanerische Kategorien			Grundannahmen Szenario "dispers"				Grundannahmen Szenario "kompakt"			
Bez.	Mindest-bruttowohn-dichte	Zentral-örtlichkeit & Siedlungs-tätigkeit der Teilort	Änderung der mittlere Gebäude-höhe	Änderung der Grün-anteil	Änderung der bebauten Fläche	Änderung der Gebäudevolum	Änderung der mittlere Gebäude-höhe	Änderung der Grün-anteil	Änderung der bebauten Fläche	Änderung der Gebäudevolum
Raum -typ 1	80 - 90 EW/ha	Oberzentrum, Mittelzentren und Schwerpunkte des Wohnungsbaus	Bleibt beim Ortsdurchschnitt	Bleibt beim Ortsdurchschnitt	Bleibt beim Ortsdurchschnitt	Bleibt beim Ortsdurchschnitt	+9m (3 Geschosse) von den Ortsüblichen	+20% von den Ortsüblichen	-20% von den Ortsüblichen	Bleibt beim Ortsdurchschnitt
Raum -typ 2	60 - 70 EW/ha	Unterzentren und sonstige Gemeinden mit verstärkter Siedlungstätigkeit	Bleibt beim Ortsdurchschnitt	Bleibt beim Ortsdurchschnitt	Bleibt beim Ortsdurchschnitt	Bleibt beim Ortsdurchschnitt	+6m (2 Geschosse) von den Ortsüblichen	+20% von den Ortsüblichen	-20% von den Ortsüblichen	Bleibt beim Ortsdurchschnitt
Raum -typ 3	50 - 55 EW/ha	Gemeinden beschränkt auf Eigenentwicklung	Bleibt beim Ortsdurchschnitt	Bleibt beim Ortsdurchschnitt	Bleibt beim Ortsdurchschnitt	Bleibt beim Ortsdurchschnitt	+3m (1 Geschoss) von den Ortsüblichen	+20% von den Ortsüblichen	-20% von den Ortsüblichen	Bleibt beim Ortsdurchschnitt

Methodik: Simulation der Szenarien in den Starkregen – und Klimamodellierungen

Zur Bewertung unterschiedlicher Landnutzungsszenarien wurden ebenfalls Wirksimulationen mit dem 2D-Oberflächenabflussmodell durchgeführt. Ziel war es auf Grundlage der maximalen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten die beiden Szenarien zu vergleichen. Da der erforderliche Detailgrad der Modellergebnisse nicht so hoch, wie für die regionale Starkregengefahrenkarte war, wurde die Auflösung des Berechnungsgitters reduziert (3x3m). Die Anpassung der Auflösung bedingte, dass auch ein neuer Ist-Zustand simuliert werden musste. Für die Neuberechnung des Ist-Zustands wurde nur die Rasterauflösung angepasst. Alle weiteren Modellgrundlagen und -einstellungen wurden beibehalten.

Die Betrachtung von Landnutzungsszenarien bedingt, dass diese konzeptionell in das 2D-Oberflächenabflussmodell eingebaut werden. Mit einer Bebauung von Entwicklungsflächen geht eine Veränderung der Geländehöhen und der Oberflächeneigenschaften einher. Es entstehen neue Fließwege (z. B. auf Straßen), Senken werden ggf. aufgefüllt und es werden zusätzliche Fließhindernisse (z. B. Gebäude und Mauern) errichtet. Durch die Bebauung bzw. Versiegelung werden die Oberflächeneigenschaften geändert, sodass in der Regel mehr Niederschlag abflusswirksam wird und auch schneller abfließt. Diese Veränderungen können auch Auswirkungen auf den angrenzenden Bestand haben. Die detaillierte Verortung der Änderungen (Bebauung) in den einzelnen Gebieten hat einen hohen Einfluss auf die kleinräumige Überflutungssituation. Da die Entwicklung der betrachteten Gebiete grundsätzlich (noch) nicht festgesetzt bzw. bekannt ist, gibt es auch keine Informationen zu den konkreten Entwicklungen (Anordnung von einzelnen Gebäuden oder Straßen). Daher erfolgte keine Anpassung des Höhenmodells, sondern ausschließlich eine Anpassung der Oberflächeneigenschaften auf Grundlage des Grünanteils. Dieser wurde definiert auf Grundlage der ortsüblichen Bebauung und es erfolgte eine Ableitung für eine disperse und eine kompakte Entwicklung. Das kompakte Szenario hat einen höheren Grünanteil. Es wird in der



Simulation davon ausgegangen, dass die “eingesparten Flächen” bei einer kompakten Bebauung auch der Regenwasserbewirtschaftung und Starkregenvorsorge zur Verfügung stehen (z.B. Anordnung von Mulden etc.). Daher wurden zur Abbildung der Szenarien die Oberflächenrauheit, die Versickerungsklasse und der Verlustansatz angepasst.

Im Zuge der Anpassung erfolgte eine flächenspezifische Bewertung des Ist-Zustands und eine Anpassung der Modelleigenschaften auf Grundlage des Grünanteils. Die Oberflächenrauheit (Stricklerwerte) wurde auf Grundlage des Grünanteils erhöht. Die Versickerungseigenschaften wurden auf Grundlage des Grünanteils reduziert. Beim Verlustansatz wird davon ausgegangen, dass die befestigten Flächen an das Kanalnetz oder dezentrale Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen angeschlossen werden, sodass ein Niederschlag mit einer Wiederkehrzeit von $T = 3$ a im Modell “abgezogen” werden kann (nicht abflusswirksam). Dieses Volumen wird durch das Kanalnetz bzw. die dezentralen Maßnahmen abgeführt und es entstehen dadurch keine Oberflächenabflüsse. Beim kompakten Szenario wird nicht nur ein erhöhter Grünanteil berücksichtigt, sondern auch davon ausgegangen, dass die Maßnahmen zum Regenwassermanagement größer dimensioniert werden und so auch Abflüsse von unbefestigten Flächen bis zu einem gewissen Grad vermieden werden. Hier erfolgt eine zusätzliche Berücksichtigung eines Verlustansatzes mit der Wiederkehrzeit $T = 10$ a.

Die Anpassungen der Oberflächeneigenschaften sorgen für Veränderungen der maximalen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten, die die Grundlage für den weiteren Vergleich der Landnutzungsszenarien waren. Auf Grund der notwendigen Annahmen der Modellierungen können die Ergebnisse nicht dafür genutzt werden, um einzelne Flächen kleinräumig zu bewerten, sondern die Wirkung und die Vorteile einer klimaangepassten Entwicklung zu zeigen.

Zur Bewertung eines Landnutzungsszenarios auf die lokalklimatischen Verhältnisse wurde analog der beschriebenen Vorgehensweise (siehe Kapitel 2.2.3) eine zusätzliche Simulation durchgeführt und die Ergebnisse mit der Referenzsimulation verglichen. Für die potentiellen Entwicklungsflächen wurde die Landnutzung an den entsprechenden Orten angepasst, wobei bei der aktuellen Version des Modells (Stand: 2022) in Kombination mit der für einzelne Entwicklungsflächen “groben” Auflösung von 100m x 100m keine Unterscheidung zwischen den beiden Szenarien “kompakt” und “dispers” durchgeführt werden konnte.

Ergebnisse: Auswirkungen der Szenarien auf Starkregen

Bei einer Bebauung in der Fläche (Szenario Dispers) wirkt sich dies auf das angrenzende Siedlungsgebiet aus. Bei einem Starkregenereignis kommt es dann zu höheren Fließgeschwindigkeiten und zu größeren Wassertiefen bei einer Überflutung im angrenzenden Siedlungsgebiet (Abbildung 39). Bei einer kompakten Bebauung (Szenario Kompakt) verschlechtert sich die Situation durch die neue Bebauung eher weniger und kann sogar tendenziell zu einer Verbesserung führen, wenn im Neubaugebiet gezielt Maßnahmen zum Wasserrückhalt umgesetzt werden (Abbildung 40).

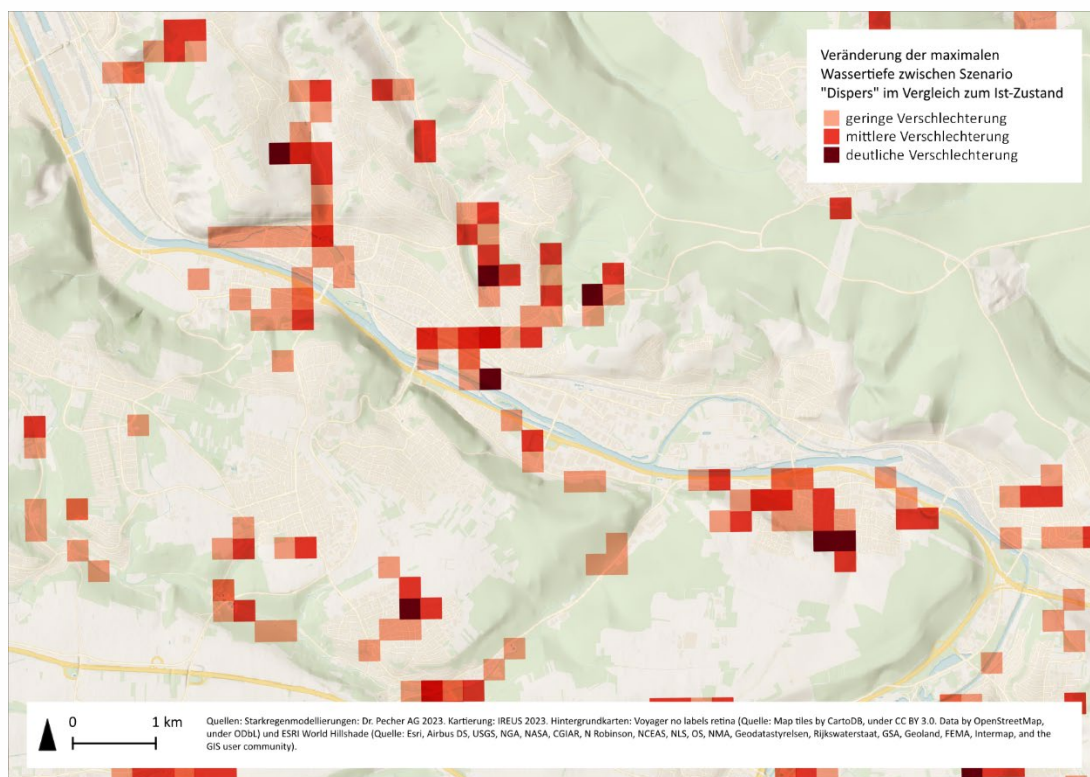


Abbildung 39: Ergebnisse der Starkregenmodellierung für Szenario "Dispers" im Vergleich zum Ist-Zustand (Kartenausschnitt).

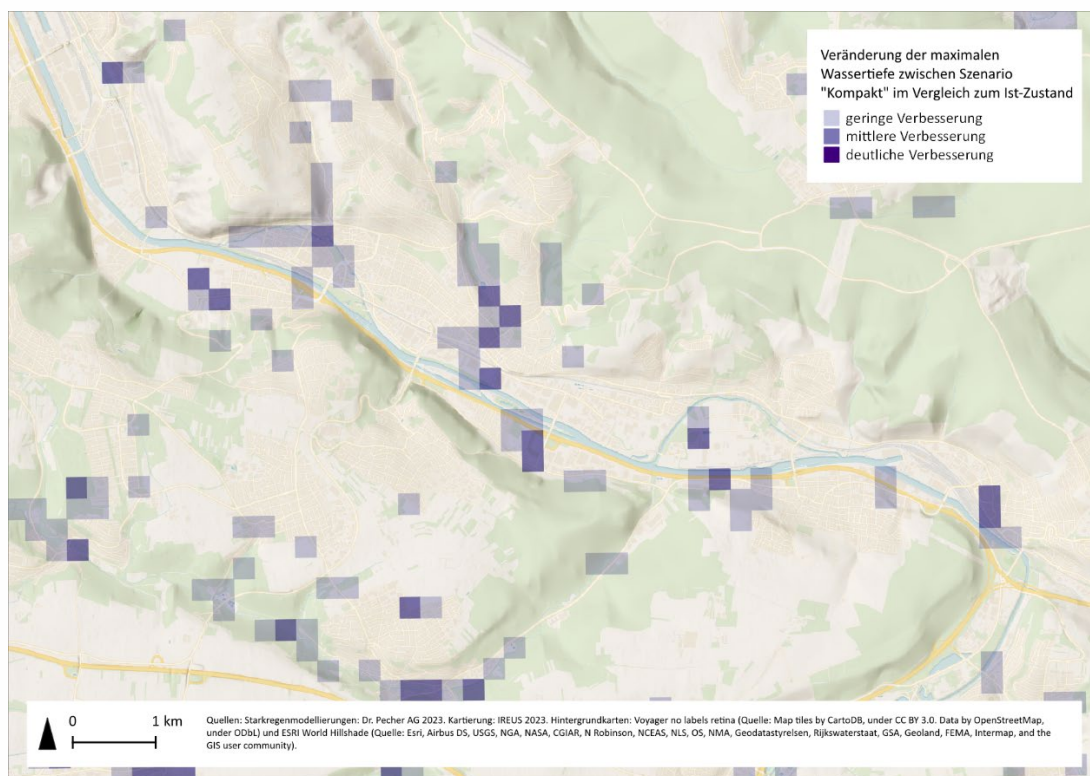


Abbildung 40: Ergebnisse der Starkregenmodellierung für Szenario "Kompakt" im Vergleich zum Ist-Zustand (Kartenausschnitt).



Ergebnisse: Auswirkungen der Szenarien auf das Stadtklima

Die Ergebnisse zeigen für die bodennahe Lufttemperatur tagsüber keine signifikanten Unterschiede, die einzelnen Potentialflächen zugeordnet werden können. Nachts zeigen die Berechnungen für die bodennahe Lufttemperatur, dass die bauliche Entwicklung auf bisher unbebauten Flächen überwiegend zu einer Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur führt. Im Bereich von Kaltluftabflüssen ist der Einfluss auch im Lee einer potentiellen Entwicklungsfläche deutlich zu erkennen (z.B. Abbildung 41). Dies zeigt die Bedeutung zur Notwendigkeit eines sensiblen Umgangs mit baulichen Potentialflächen, damit die nächtliche Durchlüftung bzw. die Abkühlung von bestehenden Wohngebieten durch angrenzende Neubebauung nicht verschlechtert wird.

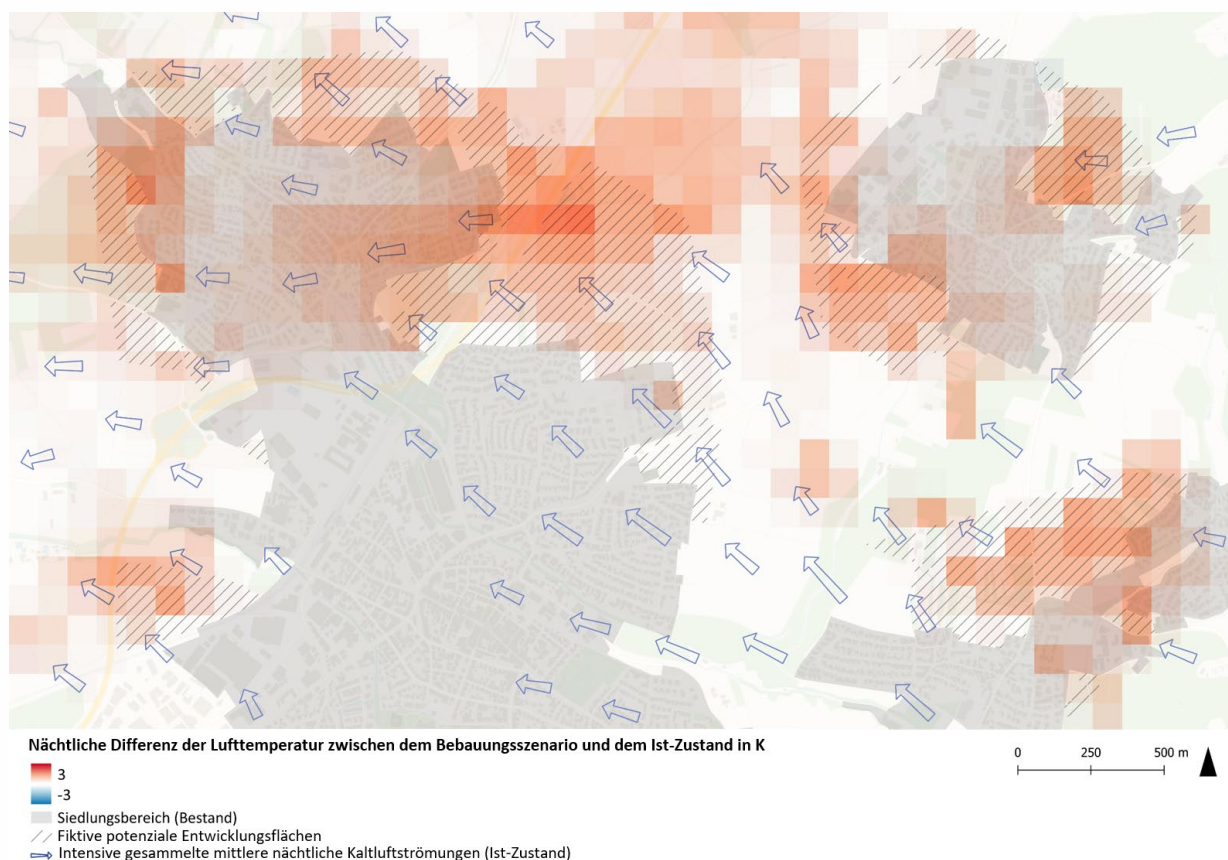


Abbildung 41: Kartenausschnitt der regionalen Ergebnisse der Klimanalyse zum Bebauungsszenario (eine Unterscheidung zwischen Szenario „Dispers“ und „Kompakt“ war bei der Klimanalyse nicht möglich). Diese Karte zeigt, dass Bebauung am Siedlungsrand eine Aufheizung von benachbarten bestehenden Siedlungsgebieten verursachen kann, besonders wenn die neue Bebauung eine Kaltluftströmung blockiert. Besonders in solchen Gebieten muss klimasensibel geplant werden und besonders auf die Bauweise und Ausrichtung der Gebäude geachtet werden.



Kapitel 3

Klimaangepasste Raumentwicklung





3. Klimaangepasste Raumentwicklung

Neben den in den vorigen Kapiteln dargelegten entwickelten regionalen Klimainformationen lag der Fokus bei ISAP ebenfalls auf dem Aufzeigen von Lösungsansätzen für die klimaangepasste Raumentwicklung. Anpassungsmaßnahmen auf stadt-regionaler Ebene wurden hierfür quantifiziert bewertet. Im Sinne des integrativen Ansatzes wurden die Maßnahmen nicht nur hinsichtlich ihrer physikalischen Wirkung geprüft, sondern auch hinsichtlich ihrer Wirkungen auf die weiteren ökonomischen, ökologischen und kulturellen Systemleistungen. Dieser integrierte Ansatz bietet den Mehrwert, den Anwender:innen die Vielschichtigkeit von Klimaanpassungsmaßnahmen und ihrer Wirkungen näher zu bringen. Zudem zeigt der Ansatz auf, dass die Implementierung von Anpassungsmaßnahmen nicht nur die Temperatur oder die Überschwemmungstiefe senkt, sondern auch zur Sicherung stadt-regionaler Funktionen (wie z.B. Verkehr, Wohnen, Erholung, Arbeit) und in Summe somit zur Sicherung der heutigen und zukünftigen Lebensqualität in den Städten und Gemeinden in der Region Stuttgart notwendig ist.

Nachfolgend sind die in ISAP-entwickelten Befunde zur Wirksamkeit von Klimaanpassungsmaßnahmen im Detail dargelegt. Da die Wirkung von Maßnahmen zum einen von ortsspezifischen Gegebenheiten aber zum anderen auch von der Ausgestaltung der Maßnahmen abhängt, wurden die Maßnahmen anhand von lokalen Fokusgebieten – dem Fokusraum Neckartalachse (siehe Kapitel 3.1), dem Fokusraum Neckarpark (siehe Kapitel 3.2) und dem Fokusraum Neuer Stadtraum B14 (siehe Kapitel 3.3) – untersucht.

3.1 Fokusraum Neckartalachse

Zuständigkeit: Arbeitspaket 4 & 6 – P-AG, IÖW, KIT; VRS, IREUS

Starkregenereignisse haben in der Vergangenheit bereits zu erheblichen Schäden in der Region Stuttgart geführt. Als Folge des Klimawandels ist in Zukunft noch mit einer Zunahme sowohl der Häufigkeit als auch der Intensität dieser Ereignisse zu rechnen. Diese Zunahme wurde für die Region Stuttgart untersucht und in der regionalen Starkregengefahrenkarte für ein Klimaszenario dargestellt (siehe Kapitel 2.3.2). Auf dieser Grundlage kann eine Zunahme der Schäden durch intensivere Starkregenereignisse bewertet werden.

Die erwarteten Zunahmen an Häufigkeit und Intensität sowie der durch Starkregenereignisse verursachten Schäden zeigen auf, dass eine effektive Starkregenvorsorge von großer Bedeutung ist. Diese kann die Auswirkungen der Ereignisse deutlich mindern. Sie sollte dabei im Sinne einer kommunalen Gemeinschaftsaufgabe erfolgen und durch Akteur*innen auf allen Planungsebenen betrieben werden. Alle Maßnahmen der Starkregenvorsorge haben das übergeordnete Ziel, das Risiko durch starkregenbedingte Überflutungen zu vermindern. Ziel ist es dabei das potentielle Schadenspotential und bzw. oder die Überflutungsgefährdung zu reduzieren. Informationsmaßnahmen können etwa darauf abzielen, das Verhalten vor und im Starkregenfall zu beeinflussen und so potentielle Schäden zu minimieren. Bauliche Maßnahmen hingegen wirken über eine allgemein verringerte Ausprägung der Überflutungen. Im Folgenden stehen derartige bauliche bzw. technische Maßnahmen im Fokus. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, wie Maßnahmen unterschiedlich wirken und dass für eine effektive Starkregenvorsorge ein Maßnahmenmix erforderlich ist. Einen 100%igen Überflutungsschutz kann es dabei jedoch nicht geben. Zur nachhaltigen Schadensreduktion ist ein zusätzlicher individueller Objektschutz sowie informiertes Verhalten im Starkregenfall erforderlich.

3.1.1 Vorstellung des Untersuchungsgebietes

Für die räumliche Untersuchung von unterschiedlichen Maßnahmengruppen der Starkregenvorsorge wurde die sog. „Neckartalachse“ als Betrachtungsraum ausgewählt. Die Neckartalachse beinhaltet mit



einer Gesamtfläche von rund 9.542 ha Teile der Stuttgarter Stadtteile Stuttgart Ost, Bad Cannstatt und Sommerrain und erstreckt sich flussaufwärts bis nach Berkheim und Zell (Oberesslingen). Die Grenze des Betrachtungsraums orientiert sich dabei nicht an den Gemarkungsgrenzen, sondern wurde auf Grundlage von hydrologischen Einzugsgebieten festgelegt.

Die Landschaft ist geprägt durch den Flusslauf des Neckars, der das Gebiet von Südost nach Nordwest durchquert. Hinzu kommen weitere, über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilte, kleine Gewässerläufe, wie der Hainbach, Belzbach, Zimmerbach und Mühlbach. Topographisch wird das Gebiet stark durch das Flusstal des Neckars und die daran angrenzenden Anhöhen geprägt.

Die Flächen der Landwirtschaft haben mit 29,8 % den größten Anteil des Gebiets und befinden sich vor allem an den meist sehr steilen Hängen des Neckartals. Die Wald- und Vegetationsflächen, die sich vorrangig in den höheren Lagen befinden, haben mit 20,9 % den zweitgrößten Anteil, gefolgt von Wohnbau- (18,3 %) und Verkehrsflächen (13 %). Auf den Flächen, welche sich nah entlang des Neckars erstrecken, befinden sich vor allem Wirtschafts- und Industrieareale (11,1 %). Der Rest der Flächen weist andere Landnutzungen, wie z.B. Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen, (4,8 %) und Wasserflächen (2,1 %) auf.

3.1.2 Methodik

Starkregen-Modellierung

Kern der Untersuchung sind Wirksamsimulationen mit einem Oberflächenabflussmodell im Bereich der Neckartalachse. Dabei kommt das Modell zum Einsatz, das bereits für die Erstellung der regionalen Starkregengefahrenkarten verwendet wurde. Die Ergebnisse aus der Oberflächenabflusssimulation dienen anschließend als Grundlage zur Ermittlung von direkten monetären Schäden durch die simulierten Überflutungen. Durch den Vergleich dieser Schäden und ihrer Verteilung in der Fläche des Untersuchungsgebiets ist eine Aussage zu den unterschiedlichen Wirkungsbereichen einzelner Maßnahmengruppen möglich. Die Wirksamsimulationen wurden für einen außergewöhnlichen Starkregen (analog zum Ist-Szenario der regionalen Starkregengefahrenkarte) durchgeführt. Hinweise zu den Modellgrundlagen zur Interpretation der Ergebnisse sind Kapitel 2.3.2 (und in Säule 3) zu finden. Im Rahmen eines Auswahlprozesses wurden sechs Maßnahmengruppen festgelegt, die unterschiedliche Bereiche der Starkregenvorsorge abbilden sollen. Maßnahmen zum lokalen Objektschutz, im Bereich des Kanalnetzes oder verhaltensbezogene Maßnahmen wurden dabei nicht untersucht. Die ausgewählten Maßnahmen wurden ohne die Berücksichtigung detaillierter lokaler Gegebenheiten (vorliegende Planungen, Eigentumsverhältnisse, Umsetzbarkeit etc.) im Oberflächenabflussmodell implementiert. Anschließend wurden die Wirksamsimulationen durchgeführt und die maximalen Überflutungstiefen ausgewertet.

Schadensberechnung bei Starkregenereignissen

Für die Schadensberechnung der simulierten Starkregenereignisse im Untersuchungsgebiet "Neckartalachse" wurde ein mesoskaliger, flächennutzungsbezogener Ansatz angewandt. Dieses vor allem für großräumige Untersuchungsgebiete geeignete Vorgehen beruht auf der Methodik des Rheinatlas der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR). Die Berechnung der bei Überflutung entstehenden Vermögensschäden erfolgt dabei anhand von Schadensfunktionen, die den Landnutzungstyp und die Überflutungstiefe berücksichtigen. Das Vorgehen eignet sich gut, um die Gesamtschäden großer Untersuchungsgebiete abzuschätzen, Risikogebiete zu lokalisieren und unterschiedliche Starkregenvorsorgemaßnahmen miteinander zu vergleichen. Abbildung 42 gibt einen grafischen Überblick über diese Methodik.

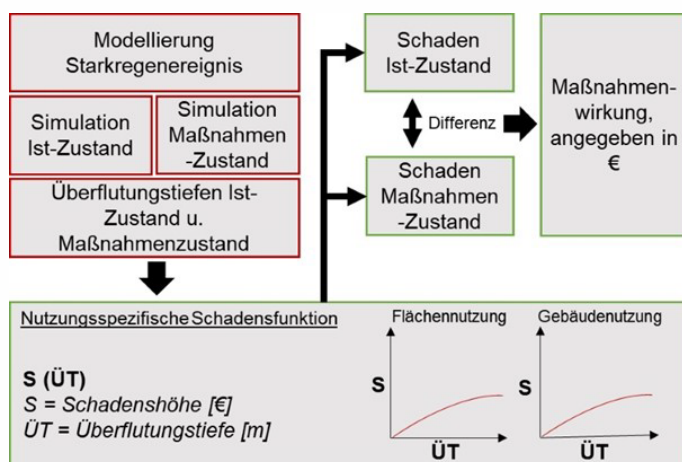


Abbildung 42: Schadenspotentialberechnung bei Starkregenereignissen und Evaluation von Maßnahmenwirkungen.

In der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass hierbei lediglich die direkten monetären Schäden des Starkregenereignisses berücksichtigt werden, also etwa die Beschädigung von Immobilien, Hausrat oder Produktionsmitteln. Andere Faktoren, wie bspw. daraus resultierende Produktionsausfälle oder auch Personenschäden, finden in dieser Methodik dagegen keine Berücksichtigung. Ausgangsdaten zur Schadensberechnung waren die maximalen Überflutungstiefen mit einer Auflösung von 1 m² aus der Starkregenmodellierung sowie die Landnutzungsdaten aus dem amtlichen Liegenschaftskataster Informationssystem (ALKIS, Stand 2020). Die Schadensfunktionen stammen aus dem Rheinatlant der IKS und weiteren Quellen mit vergleichbarer Methodik (siehe auch Kok et al., 2005; Reese et al., 2003) und wurden, wenn nötig, für geringe Überflutungstiefen leicht angepasst. Die auf jedem Landnutzungstyp vorkommenden Vermögenswerte wurden primär aus den Zahlen des Statistischen Landesamts Baden-Württemberg errechnet, darunter unter anderem das Nettoanlagevermögen von Wohn- und Wirtschaftsbauten, das entsprechend der Nutzungsart Hausrat, Ausrüstung und Anlagen umfasst (Landeshauptstadt Stuttgart Statistisches Amt, 2020). Darüber hinaus sind KFZ-Vermögen und Vermögenswerte der Landwirtschaft, der Infrastruktur und weiterer Landnutzungsflächen enthalten.

Als ein Zwischenschritt zur Schadensberechnung musste die Methodik speziell an die hochaufgelösten Wassertiefen-Rasterdaten angepasst werden. In der Starkregensimulation sind die Gebäude als wasserundurchdringliche Hindernisse definiert, die den Abfluss des Wassers beeinflussen, die somit jedoch selber per Definition keine positive Überflutungshöhe aufweisen können. Bei einer direkten Anwendung der Schadensfunktionen auf die Starkregensimulationsergebnisse würde folglich für Gebäudeflächen kein Schaden ausgewiesen. Da in der Realität jedoch abhängig von der Überflutungshöhe in der direkten Umgebung Wasser in die Gebäude eindringt, wurde jedem Gebäudeareal die durchschnittliche Überflutungshöhe aus einem 1-Meter Puffer um das Gebäude herum zugewiesen.

Um dem mesoskaligen Berechnungsansatz Rechnung zu tragen, wurden die Ergebnisse zur abschließenden Darstellung auf ein Raster von 100 m x 100 m aggregiert. Eine höher aufgelöste Darstellung würde eine Genauigkeit suggerieren, die anhand des pauschalen Vorgehens nach Landnutzungstyp nicht möglich ist. So können etwa bei einzelnen Gebäuden gegebenenfalls bereits implementierte Schutzmaßnahmen gegen Starkregen nicht berücksichtigt werden. Dafür wäre ein mikroskaliges Vorgehen mit Vor-Ort-Begutachtung nötig, was bei einem Untersuchungsgebiet dieser Größe jedoch nicht praktikabel ist. Das angewandte mesoskalige Vorgehen eignet sich dagegen gut, um Gesamtschäden in großen Untersuchungsgebieten abzuschätzen, Hot-Spots zu lokalisieren und



verschiedene großflächige Anpassungsszenarien miteinander zu vergleichen. Die untersuchten Maßnahmen und ihre ermittelten Wirkungen werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

3.1.3 Wirksamkeit von Maßnahmen gegenüber Starkregen

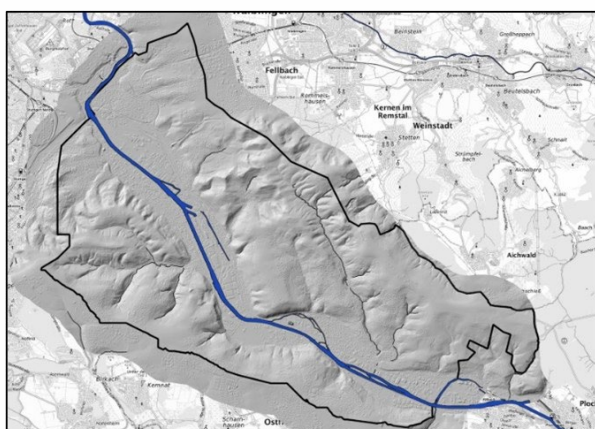
Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass die einzelnen Maßnahmengruppen auf unterschiedlichen Flächen umgesetzt werden. Der „Maßnahmenraum“ einer Maßnahmengruppe beschreibt die Flächen, auf denen für diese Gruppe jeweils Änderungen im Modell vorgenommen werden. Die Maßnahmenräume unterscheiden sich dabei in ihrer Gesamtfläche erheblich. Bereiche, in denen sich das Überflutungsgeschehen durch die Maßnahmen maßgeblich ändert, werden als „Wirkungsräume“ bezeichnet. Dabei können Maßnahmen- und Wirkungsräume räumlich mitunter deutlich auseinanderfallen. Diesen Umstand, sowie die deutlich unterschiedlichen Dimensionen der Maßnahmenräume gilt es bei der Bewertung der Effektivität der Maßnahmen zu berücksichtigen.

Tabelle 11 beschreibt die Größe des Maßnahmenraums aller untersuchten Maßnahmengruppen, um einen Eindruck über die Dimension der angenommenen Maßnahmen zu vermitteln. Abbildung 43 gibt einen Überblick über die genutzten Eingangsdaten im Fokusraum und zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Schadenspotentialberechnungen im Ist-Zustand ohne Maßnahmen und einmal den Vergleich Ist-Zustand mit der Maßnahmengruppe „Rückhalt im Außengebiet“.

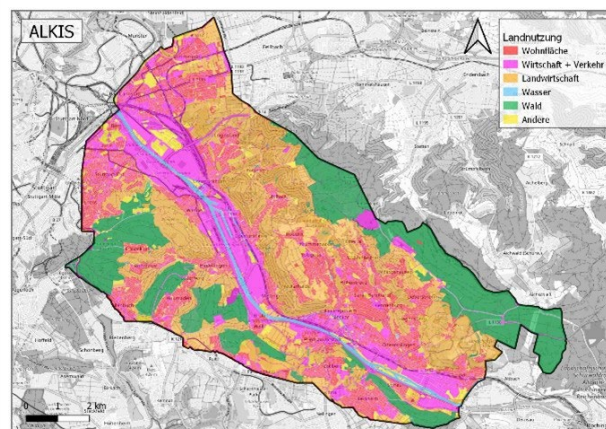
Tabelle 11: Untersuchte Maßnahmengruppen und ihr Maßnahmenraum im Fokusraum Neckartalachse.

Maßnahmengruppe	Maßnahmenraum	
	ha	%*
Rückhalt im Außengebiet	5.050	53,0
Gebäudeflächen	940	9,9
Gewässer	28	0,3
Verkehrsraum	795	8,3
Multifunktionale Flächennutzung von Plätzen	222	2,3
Ortsnahe Versickerung und Entsiegelung	865	9,1

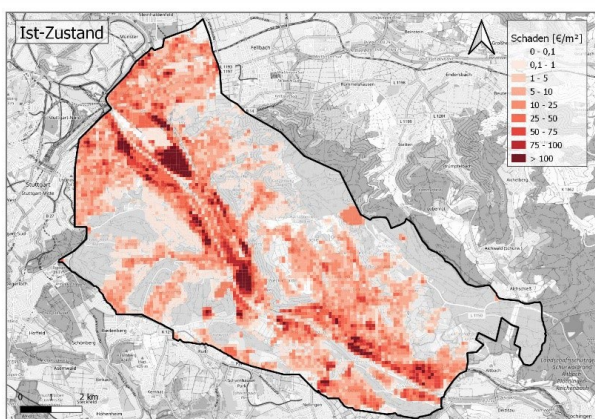
*Die Prozentangabe bezieht sich auf den Anteil am Untersuchungsgebiet



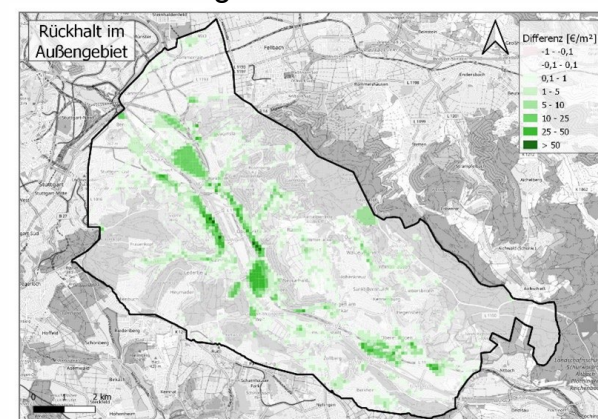
A Topografie



B Landnutzung



C Schadenspotential Ist-Zustand



D Differenz des Schadenspotentials zwischen Maßnahmengruppe „Rückhalt im Außengebiet“ und Ist-Zustand

Abbildung 43: Übersicht des Fokusraums Neckartalachse – Eingangsdaten und beispielhafte Ergebnisse der Schadenspotentialberechnungen (Quelle: Eigene Darstellungen, Hintergrundkarte: © OpenStreetMap Mitwirkende).

Maßnahmengruppen

Die Bewertung wurde für sechs Maßnahmengruppen durchgeführt. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um baulich-technische Maßnahmen, die durch unterschiedliche Akteur:innen umgesetzt werden können. Die Maßnahmengruppen können dabei unterschiedliche Einzelmaßnahmen umfassen, die in dem jeweiligen Bereich umgesetzt werden können. Die einzelnen Maßnahmen, die als Grundlage der Maßnahmengruppen dienen, basieren auf Umfrageergebnissen und einem Diskussionsprozess.

Es ist hervorzuheben, dass die technische Umsetzbarkeit der Maßnahmen für die Abbildung im Modell nicht berücksichtigt wurde und dass eine pauschale Umsetzung im gesamten Untersuchungsgebiet erfolgt ist. Bei der Maßnahmenumsetzung vor Ort sollten immer lokale Verhältnisse untersucht und berücksichtigt werden. Eine Ableitung und Umsetzung von Maßnahmen allein auf Grundlage der nachfolgenden Darstellung ist nicht zulässig. Die Untersuchungen sollen zeigen, dass Maßnahmen unterschiedlich wirken und eine effektive Starkregenvorsorge nur gelingt, wenn man integral und gemeinschaftlich arbeitet. Die Maßnahmengruppen werden nachfolgend beschrieben. Zu jeder Maßnahmengruppe lassen sich auch alternative Maßnahmen finden, die im Falle einer fehlenden



Umsetzbarkeit der Maßnahmengruppe geprüft werden können. Für die hier betrachteten Maßnahmengruppen sind die Ergebnisse in Form von Schadenspotentialen in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Schadenspotentiale aller untersuchten Maßnahmengruppen im Fokusraum Neckarpark im Vergleich.

Maßnahmengruppe	Schaden gesamt	Differenz zu IST	
		Mio. €	%
Ist-Zustand	1.007	-	-
Rückhalt im Außengebiet	897	110	10.9
Ortsnahe Versickerung und Entsiegelung	947	60	5.9
Gebäudeflächen	867	140	13.9
Gewässer	969	38	3.8
Multifunktionale Flächennutzung	993	14	1.4
Verkehrsraum	931	76	7.6

Maßnahmengruppe "Rückhalt im Außengebiet"

Insbesondere bei außergewöhnlichen Starkregenereignissen kann es sein, dass Abflüsse aus den Außengebieten in Richtung Siedlungsgebiet fließen. Dabei kann das Wasser diffus, z.B. über landwirtschaftliche Flächen, oder gesammelt, z.B. über Gewässer und Gräben, in das Siedlungsgebiet eintreten. Maßnahmen dieser Maßnahmengruppe haben das Ziel, die Abflüsse zentral oder dezentral in den Außengebieten zurückzuhalten. Dies kann z.B. durch eine retentionsorientierte Land- und Forstwirtschaft, eine angepasste Wegegestaltung oder die Schaffung von Retentionsräumen erfolgen. Zur Abbildung im Rahmen der Wirksamkeitsanalyse wurden die Abflüsse aus den Außengebieten vollständig entfernt. Verbleibende Überflutungen werden durch Abflüsse in den Siedlungsgebieten selbst hervorgerufen. Die Maßnahmengruppe „Rückhalt im Außengebiet“ weist mit einer Fläche von 5.050 ha in der modelltechnischen Betrachtung den größten Raum für die Maßnahmenumsetzung im Untersuchungsgebiet auf. Durch die vollständige Entfernung der Abflüsse in den Außengebieten wird hier keine Schadensreduktion abgebildet. Innerhalb des Siedlungsraums werden die Überflutungen im Bereich der Hauptfließwege und der Hotspots verringert. In der Differenzdarstellung ist erkennbar, dass sich der Wirkungsraum über Außen- und Siedlungsgebiete erstreckt. Es gibt jedoch auch einige Bereiche im Siedlungsgebiet, die nicht unter dem Einfluss von Außengebieten stehen, sodass es in diesen Bereichen zu keiner Schadensreduktion kommt. Zudem ist auch erkennbar, dass die Abflüsse aus dem Siedlungsraum selbst auch zu Überflutungen mit monetären Auswirkungen führen können.

Maßnahmengruppe „Ortsnahe Versickerung und Entsiegelung“

Niederschlag, der auf befestigten Flächen fällt, wird eher abflusswirksam als auf unbefestigten Flächen. Auch wenn bei Starkregen der Niederschlag auf unbefestigten Flächen ebenfalls abflusswirksam werden kann, sind die Abflüsse oftmals deutlich geringer als von befestigten Flächen. Eine Entsiegelung von befestigten Flächen kann daher einen Beitrag zu Starkregenvorsorge liefern. In den Wirksamkeitsanalysen wurden befestigte Flächen in Wohn-, Misch- und Gewerbegebieten (keine Gebäude und Straßen) teilweise entsiegelt, sodass die Versickerungseigenschaften erhöht wurden.

Die zur Verfügung stehende Fläche für die Maßnahmengruppe „Ortsnahe Versickerung und Entsiegelung“ beträgt im Untersuchungsgebiet 865 ha. Die Schadensreduktion konzentriert sich im Untersuchungsgebiet besonders auf die Senken im Siedlungsgebiet. Es ist zu beachten, dass die Modellbedingungen so eingestellt sind, dass bei dem gewählten Lastfall auch auf unversiegelten Flächen ein Abfluss entstehen kann. Bei anderen Lastfällen (z. B. bei einer geringeren



Niederschlagsbelastung) kann die Wirkung der Maßnahmengruppe deutlich größer sein. Auch hier zeigt sich, dass die Maßnahmen wirksam sind, wenn diese flächenhaft umgesetzt werden.

Maßnahmengruppe „Gebäudeflächen“

Gebäudeflächen bilden einen großen Anteil der versiegelten Flächen in einem Siedlungsgebiet und sind oftmals über die Grundstücksentwässerungsanlagen an die Kanalisation angeschlossen. Durch eine Abkopplung von Dachflächen oder einen dezentralen Rückhalt auf den Dachflächen können Kanalnetz- und Oberflächenabflüsse im Siedlungsgebiet reduziert werden. Bei Abkopplung wird das Wasser auf dem Grundstück zurückgehalten und ggf. zur Bewässerung genutzt oder es erfolgt eine Versickerung auf dem Grundstück. Ein Rückhalt kann z.B. durch Grün- bzw. Retentionsdächer umgesetzt werden. Ein dezentraler Rückhalt kann auch durch technische Anlagen (Mulden, Mulde-Rigolen-Systeme) sichergestellt werden. In den Wirksimulationen wurde der Abfluss auf den Dachflächen vollständig „entfernt“, sodass von einem 100 % Rückhalt und einer 100 % Umsetzung ausgegangen wurde. In der Realität können lokale Verhältnisse (Denkmalschutz, Beschaffenheit des Dachs, Statik, Grundstücksverhältnisse, Bodenverhältnisse etc.) eine Umsetzung verhindern. Die Maßnahmengruppe „Gebäudeflächen“ verfügt über einen Maßnahmenraum von 940 ha und führt zu der höchsten Schadensreduktion. Die Wirkung konzentriert sich hauptsächlich auf Senken in Siedlungsgebieten oder in unmittelbarer Nähe dazu. In den Bereichen in denen die Maßnahmengruppen „Gewässer“ und „Rückhalt in den Außengebieten“ zu einer höheren Schadensreduktion geführt haben, ist die Schadensreduktion durch die Maßnahmengruppe „Gebäudefläche“ nicht so hoch, wie bei den anderen Maßnahmengruppen. Die Wirkungsbereiche verteilen sich gleichmäßiger über die gesamte Neckartalachse und nehmen eine größere Fläche ein. Es zeigt sich deutlich, dass die Wirkung aus der flächendeckenden Umsetzung resultiert. Außerdem überschneidet sich der Maßnahmenraum mit dem Siedlungsraum, dem Raum in dem sich die höchsten Schadenspotentiale befinden. Das erklärt die hohe Schadensreduktion dieser Maßnahmengruppe.

Maßnahmengruppe „Gewässer“

Im Bereich der Gewässer können sich Synergien zwischen der Starkregen- und der Hochwasservorsorge ergeben. Insbesondere bei kleinen Gewässern sind die beiden Themen nicht voneinander zu trennen. Ziel der Maßnahmen ist die Schaffung von Retentionsräumen durch naturnahe Gestaltung und/oder technische Bauwerke und die Entschärfung von Abflusshindernissen. Dadurch soll ein unkontrolliertes Ausufern der Gewässer weitestgehend vermieden werden. In der Modellierung wurden zur Abbildung der Maßnahme die Abflüsse im Bereich der Gewässer vollständig „entfernt“, sodass keine Ausuferung mehr stattfinden kann. Das bedeutet, dass selbst ein starker Zufluss in das Gewässer, bspw. infolge eines Starkregenereignisses, nicht zu einem Schadensereignis führen kann. Falls die Maßnahmen aus einer naturnahen Gestaltung der Gewässer bestehen, ergeben sich neben einer erhöhten Wasserretention weitere Synergien mit anderen Ökosystemleistungen. Die Maßnahmengruppe „Gewässer“ verfügt einen (umgesetzten) Maßnahmenraum von 28 ha. Der Maßnahmenraum ist damit nicht nur deutlich kleiner als bei der Maßnahmengruppe „Rückhalt in Außengebieten“, sondern besitzt auch insgesamt die kleinste Maßnahmenfläche. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass eine Umsetzung von Maßnahmen im Gewässer sehr wahrscheinlich weitere angrenzende Flächen in Anspruch nehmen wird. Auch der Wirkungsbereich der Maßnahme ist ausschließlich im (Einfluss-) Bereich der Gewässer zu erkennen. Hier ergibt sich aber zum Teil eine stärkere Reduktion als in der vorherigen Maßnahmengruppe „Rückhalt in den Außengebieten“. Das zeigt, dass bei Starkregen die kleineren Gewässer auch mit Abflüssen aus den Siedlungsgebieten deutlich belastet werden.

Maßnahmengruppe „Multifunktionale Flächennutzung“

Eine multifunktionale Flächennutzung im Sinne der Starkregenvorsorge beschreibt, dass eine Fläche mit einer bestimmten Hauptnutzung (z. B. Sportfläche, Park oder Parkplatz) temporär zur



Starkregenvorsorge genutzt wird. Die Fläche wird dann zur Retention, Versickerung oder Ableitung von Abflüssen verwendet. In der Neckartalachse wurden Plätze und Sport- und Freizeitflächen im Sinne einer multifunktionalen Flächennutzung zur Retention untersucht. Die Flächen wurden dafür in der Wirksimulation "tiefer gelegt". Die dadurch entstehenden Senken erzeugen ein zusätzliches Retentionsvolumen für Oberflächenabflüsse. Alternativ zur Tieferlegung kann dieses Retentionsvolumen, z.B. durch die Installation von unterirdischen Rigolen oder gezielte Wallanlagen, geschaffen werden. Die ursprüngliche Nutzung der Plätze kann durch eine geeignete Planung und technische Umsetzung beibehalten werden. Die Maßnahmengruppe "Multifunktionale Flächennutzung von Plätzen" konzentriert sich auf die Plätze, Sport- und Freizeitanlagen innerhalb des Untersuchungsgebiets, die eine Fläche von 222 ha umfassen. Im Rahmen der Modellierung ist die Wirkung der Plätze stark auf ihre unmittelbare Umgebung begrenzt. Der Wirkungsraum kann in der Realität durch die Schaffung entsprechender Zuleitungen zu den Flächen weiter vergrößert werden. Zudem können auch weitere Flächen multifunktional genutzt werden. Durch den Rückhalt der Abflüsse auf den Flächen kommt es lokal zu einer Erhöhung des Schadens.

Maßnahmengruppe „Verkehrsraum“

Die Maßnahmengruppe „Verkehrsraum“ bezieht sich auf die Verkehrsflächen des Untersuchungsgebietes. Auf Verkehrsflächen bilden sich häufig Hauptabflusswege bei Starkregen. Insbesondere bei höheren Abflusstiefen kann es sein, dass Wasser dann unkontrolliert in Richtung von Gebäuden fließt und zu Schäden führen kann. Zusätzlich sind Verkehrsflächen versiegelte Flächen auf denen Abflüsse entstehen können. Durch eine angepasste Planung können Verkehrsflächen als Notabflusswege oder Retentionsräume ausgebildet werden. Z.B. lassen sich durch eine Tieferlegung bzw. Profilierung, unterirdische Speicherräume oder angepasstes Begleitgrün (Tiefbeete, Mulden etc.) gezielt Retentionsräume aktivieren. Durch eine Anordnung von Fließhindernissen und eine entsprechende Profilierung können Abflusswege angepasst werden.

Zur Abbildung dieser Maßnahmenansätze wurden im Rahmen der Simulation alle Straßenräume "tiefer gelegt". So entstehen neue Abflusswege und Retentionsräume. Die Tieferlegung kann dazu führen, dass sich in bereits vorhandenen Senken höhere Überflutungstiefen einstellen, sodass es zu einer Erhöhung des Schadens kommen kann. Dies ist im Rahmen einer konkreten Maßnahmenplanung zu vermeiden (Verschlechterungsverbot). Zudem müssen nicht alle neu entstehenden Fließwege eine positive Wirkung auf das Überflutungsgeschehen haben.

Die Maßnahmengruppe "Verkehrsraum" verfügt über eine Fläche von 795 ha für die Umsetzung. Das größte Potential zur Umsetzung liegt in bebauten Gebieten, da dort die Straßenflächendichte am höchsten ist. Bei der Bewertung der Maßnahme ist zu beachten, dass es im gewählten Ansatz in Teilbereichen auch zu einer Erhöhung des Schadens kommt. Durch die Umsetzung der Maßnahmen entstehen nicht nur Retentionsräume, sondern auch (Not-)Abflusswege, die es vorher noch nicht gab. Diese Abflusswege können in einigen Bereichen zu einer Schadensreduktion führen, da das Wasser nicht mehr in Richtung der Gebäudeinfrastruktur fließt. Wenn die Notabflusswege jedoch nicht bis zu einem Gewässer oder einer Freifläche ohne hohem Schadenspotential gehen, sondern z. B. vor Straßen- und Bahndämmen enden, kann es in diesen Senken zu einer Erhöhung des Schadens kommen. Dies wird besonders in der Differenzendarstellung deutlich. Bei einer angepassten Durchführung der Maßnahmen und einer besonderen Betrachtung der Senken könnte bzw. muss die Schadenserrhöhung vermieden werden (Verschlechterungsverbot).

3.1.4 Fazit - Neckartalachse

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass alle Maßnahmengruppen, bei denen die Niederschlagsbelastung reduziert wird, indem Abflüsse aus dem Modell entfernt werden, ausschließlich zu einer Verbesserung der Überflutungssituation führen (können). Im Gegensatz dazu stehen die Maßnahmengruppen



"Verkehrsraum" und "Multifunktionale Flächennutzung von Plätzen", bei denen es aufgrund der Veränderung der Abflusswege zu einer Umverteilung und einem gezielten Rückhalt der Abflüsse kommt. Dadurch besteht potentiell auch die Möglichkeit lokaler Verschlechterungen der Überflutungssituation. Die gezielte Retention von Oberflächenabflüssen im Straßenraum oder auf Plätzen ist hierbei jedoch nicht zwingend als solche zu interpretieren. Bei entsprechender Planung können gerade dadurch Schäden minimiert werden. Bei der Interpretation der vorgestellten Ergebnisse muss bedacht werden, dass eine vollständige Ausreizung der Maßnahmenräume äußerst unrealistisch ist. Bspw. können Denkmalschutz, Statik und Materialbeschaffenheit eine flächendeckende Umsetzung der Maßnahmengruppe „Gebäudeflächen“ verhindern. Maßnahmen, die flächendeckend wirken, erfordern häufig auch eine flächendeckende Umsetzung (etwa Maßnahmengruppen „Gebäudeflächen“ und „Ortsnahe Versickerung und Entsiegelung“). Eine solche Umsetzung ist kurzfristig kaum möglich, sollte aber in langfristigen Prozessen durchaus angestrebt werden. Maßnahmen, die in bestimmten Räumen besonders gut wirken, lassen sich eher durch gezielte und räumlich begrenzte Veränderungen umsetzen. Dabei können vielfältige dezentrale Maßnahmen ihre Wirkung im Zusammenspiel verbessern. Es wird daher empfohlen, Maßnahmen aus verschiedenen Maßnahmengruppen miteinander zu kombinieren. Die hier vorgestellten Maßnahmenräume in Kombination mit den für sie ermittelten Wirkungsräumen dienen als erste Anhaltspunkte bei der Auswahl geeigneter Flächen für die Umsetzung. Darüber hinaus ist es wichtig, auf Synergien mit anderen Ökosystemleistungen zu achten und diese geschickt zu nutzen, wenn dies möglich ist. Beispielhaft hierfür sind eine naturnahe Gewässergestaltung und die Schaffung zusätzlicher Grünflächen in urbanen Gebieten. Neben besserer Wasserretention ließen sich dadurch zahlreiche weitere positive Ökosystemleistungs-Effekte erzielen. Hier ist es von großer Bedeutung, Gelegenheitsfenster, wie bevorstehende Planungen, aktiv wahrzunehmen.

Die Betrachtungen wurden für ein außergewöhnliches Starkregenereignis (statistische Wiederkehrzeit $T = 100$ a) durchgeführt, für das Maßnahmen und auch das Kanalnetz in der Regel nicht dimensioniert werden (können). Aufgrund der großen Niederschlagsbelastung ergeben sich trotz umgesetzter Vorsorgemaßnahmen hohe Schadenssummen und eine Schadensvermeidung von höchstens 13,9 %. Jedoch ist zu beachten, dass die vermiedenen Schäden sich nur auf dieses eine Starkregenereignis beziehen. Tatsächlich würden die Maßnahmen, wenn sie einmal umgesetzt sind, über Jahre und Jahrzehnte ihre Wirkung entfalten. Die vermiedenen Schäden würden sich dementsprechend bei jedem neuen Starkregenereignis aufsummieren. Weiterhin gilt, dass die Wirkung der Maßnahmen abhängig von den Vorbedingungen und der Beschaffenheit des Niederschlags ist. Bei geringeren Niederschlagsbelastungen ist daher eine höhere relative Schadensminderung zu erwarten.

Die Betrachtungen zeigen, wie Starkregenvorsorgemaßnahmen räumlich differenziert wirken. Daraus wird ersichtlich, dass sie für die bestmögliche Wirkungsentfaltung in Kombination gedacht und angelegt werden müssen. Neben den hier vorgestellten flächigen baulichen Maßnahmen sind dabei der lokale Objektschutz und das richtige Verhalten vor und im Starkregenfall weitere essenzielle Bausteine.



3.2 Fokusraum NeckarPark

Zuständigkeit: Arbeitspaket 4 & 6 – LHS, IÖW, KIT; VRS, IREUS

An Hand des Fokusraums NeckarPark, verortet in der Stadt Stuttgart, wird die Wirksamkeit lokaler Hitzeanpassungsvorsorge untersucht. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Vorgehensweise und die zentralen Ergebnisse zum NeckarPark im Detail dargelegt, mit dem Ziel die Wirkungen von Anpassungsmaßnahmen zu quantifizieren.

3.2.1 Vorstellung des Untersuchungsgebiets

Der „NeckarPark“ befindet sich im Stadtteil Veielbrunnen (Stadtbezirk Bad Cannstatt) und ist östlich der Stuttgarter Innenstadt im Neckartal gelegen. Der Stadtteil besitzt hohe Anteile an Industrie- und Gewerbeflächen sowie Verkehrsflächen. Sowohl Wohnbauflächen als auch Grünanlagen wie Sport, Freizeit- und Erholungsflächen machen bisher nur untergeordnete Anteile aus (Landeshauptstadt Stuttgart, Statistisches Amt, 2020). Auf dem ca. 22 ha großen Areal des ehemaligen Güterbahnhofs in Bad Cannstatt entsteht das neue Wohn- und Gewerbegebiet NeckarPark (Abbildung 44). Der NeckarPark gehört zu den bedeutendsten Entwicklungsflächen der Stadt und wird als ein gemischt genutztes, urbanes Quartier mit 850 Wohneinheiten, Gewerbeflächen, Parks, Plätzen und Straßen entwickelt. Insgesamt sollen hier mehr als 2.000 Menschen wohnen. Der städtebauliche Rahmenplan des NeckarParks wird mit vier (Teil-)Bebauungsplänen umgesetzt. In diesen werden auch Anpassungsmaßnahmen zur Minimierung der Auswirkungen von Starkregen oder Hitzewellen festgesetzt.



Abbildung 44: Lage des Untersuchungsgebietes NeckarPark, blau: Entwicklungsfläche. Quelle: Hintergrundkarte Luftbild 2021 / LHS.

Das Untersuchungsgebiet unterliegt den für die Neckartalzone typischen stadtklimatischen Merkmalen, die sich neben einer starken thermischen Belastung durch ein geringes Austauschvermögen bei niedriger jahresmittlerer Windgeschwindigkeit auszeichnen (Verband Region Stuttgart, 2008). Dadurch gewinnen die bei Strahlungswetterlagen bodennah entstehenden, thermisch induzierten Windsysteme für den Luftaustausch, die Nachtkühlung und auch die Luftqualität an



Bedeutung. Im Neckartal kommt es zu erheblichen nächtlichen Kaltluftansammlungen, die insbesondere auch regionalen Ursprungs sind und sich langsam von Südosten nach Nordwesten mit zunehmender Schichthöhe entlang des Neckartals bewegen. Auch die Freiflächen der benachbarten Randhöhen fungieren als Kaltluftentstehungsgebiete und bewirken aufgrund der Reliefverhältnisse nächtliche Hangabwinde bzw. Kaltluftabflüsse in das Neckartal, einerseits flächenhaft in den Hangbereichen, andererseits in Leitbahnen den seitlichen Taleinschnitten folgend.

3.2.2 Methodik & betrachtete Untersuchungsfälle

Für die Modellierung wurde das Modell ENVI-met (Version 5.0.2) verwendet. ENVI-met ist ein Stadtklimamodell für die Simulation und Analyse des urbanen Mikroklimas (Bruse und Fleer, 1998). Das Programm ermöglicht die komplexen physikalischen Wechselwirkungen zwischen Gebäuden, Vegetation und Atmosphäre in städtischen Gebieten zu simulieren. ENVI-met liefert räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Simulationsergebnisse für eine große Zahl verschiedener klimatischer und human-biometeorologischer Variablen, wie bspw. Lufttemperatur, Luftfeuchte, Strahlungswärme und physiologisch äquivalente Temperatur (PET). Das Programm kann eingesetzt werden, um die Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen gegenüber Wärmebelastung zu bewerten. Im Vergleich zu früheren Versionen von ENVI-met lassen sich durch die „full forcing“-Funktion der Modellversion 5.0.2 realistischere Simulationsergebnisse erzielen, da eine Berücksichtigung stündlich gemessener, meteorologischer Eingangsdaten erfolgen kann.

Modell Setup

Im Untersuchungsfall wurde eine horizontale Gitterauflösung von 3 m gewählt. Das Modellgebiet umfasst eine Fläche von 1.500 m x 840 m, unterteilt in 500 x 280 Gitterzellen. Die vertikale Gitterauflösung beträgt ebenfalls 3 m bis zu einer Höhe von 90 m. Das Modellierungszeitraum beträgt insgesamt 24 Stunden beginnend um 0:00 MEZ. Der Simulationstag stellt einen sehr heißen Tag während einer Hitzewelle (25. Juli 2019) dar. Es wurde eine Spinup-Zeit von 24 Stunden angesetzt. Diese ermöglicht dem Modell, einen statistischen Gleichgewichtszustand unter den vorgegebenen Randbedingungen zu erreichen. Die „full forcing“-Funktion wurde verwendet, um dem Modell gemessene meteorologische Parameter wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, horizontale Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Strahlung vorzugeben. Die meteorologischen Antriebsdaten (außer Strahlung) stammen von der stadteigenen Messstation Branddirektion (Amt für Umweltschutz, Stuttgart - etwa 100 m entfernt und repräsentativ für das Untersuchungsgebiet). Für die Strahlung wurde auf Messwerte der Messstation Schnarrenberg des Deutschen Wetterdiensts (DWD) zurückgegriffen. Das Modell Setup und die meteorologischen Anfangsbedingungen sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Modell Setup und meteorologischen Anfangsbedingungen

Simulationstag	25.07.2019, 0 MEZ
Simulationszeitschritt	1 h
Simulationsdauer	48 h
Modellgittergröße	3 m x 3 m x 3 m
mittl. / min. / max. Windgeschwindigkeit	1,5 / 0 / 5,7 m/s
Windrichtung (10-16 Uhr / 14 Uhr / 4 Uhr)	NO-SO / NO / SO
Tages- / Minimum- / Maximumtemperatur	30,4 / 21,9 / 38,2°C
Boden- / Wassertemperatur	20 / 20 °C
Bodenfeuchtigkeit (0-20 / 20-50 / 50-200 / unter 200 cm)	65 / 70 / 75 / 75 %



Zusätzlich werden Gelände-, Gebäude-, Landnutzungs- und Vegetationsdaten benötigt. Die Geländedaten wurden aus dem Digitalen Geländemodell (DGM) des Verbands Region Stuttgart abgeleitet. Daten zu Gebäuden, Landnutzung und Bäumen wurden vom Stadtmessungsamt der Stadt Stuttgart zur Verfügung gestellt bzw. aus den zugehörigen Bebauungsplänen entnommen. Die im Modell verwendeten Oberflächenmaterialien orientieren sich an denen, die im Untersuchungsgebiet zu finden sind, wie bspw. Asphalt für Straßen, Beton für Gehwege und Gebäude, Gras und Wasser. Die verwendeten Werte für die Albedo, die Emissivität der berücksichtigten Materialien sowie die LAD (leaf area density) entstammen den ENVI-met Database Tables.

Die Simulationsergebnisse wurden mit gemessenen meteorologischen Daten (AfU-Messstation S-Bad Cannstatt (Branddirektion): Temperatur, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit) verglichen. Abbildung 45 zeigt, dass ENVI-met im konkreten Fall die Nachttemperatur etwas überschätzt (ca. $1,1^{\circ}\text{C}$) und die Temperatur in den Morgenstunden bis zum Mittag unterschätzt (ca. $-1,7^{\circ}\text{C}$). Insgesamt wurde ein hoher Korrelationskoeffizient von $R^2 = 0,95$ zwischen den Datensätzen ermittelt.

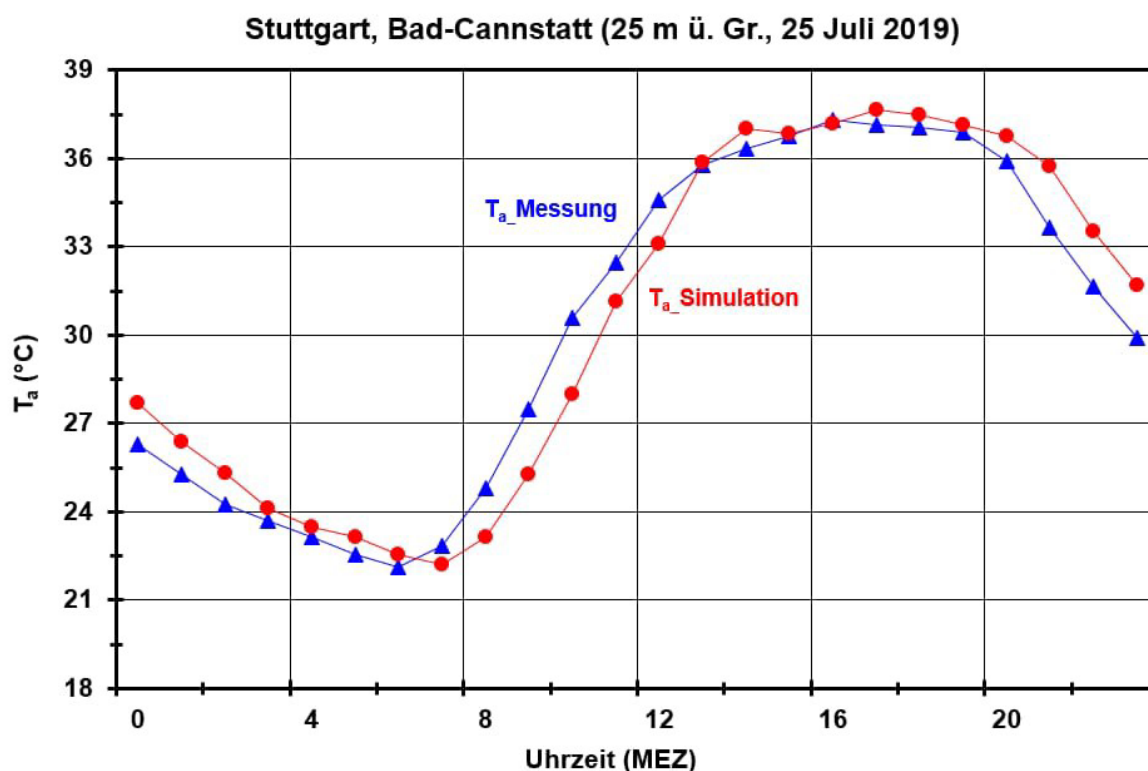


Abbildung 45: Vergleich von simulierter (rote Linie) und gemessener (blaue Linie) Temperatur

Betrachtete Untersuchungsfälle

Die Auswirkungen von Begrünung auf das Mikroklima wurden durch zwei Untersuchungsfälle: a) einem „Referenzfall“ (ohne Begrünung) und b) einem Begrünungsfall“ ermittelt. Der Referenzfall und der Begrünungsfall sind in Abbildung 46 bzw. Abbildung 47 dargestellt. Die Untersuchungsfälle unterscheiden sich durch die Einführung der folgenden Begrünungsmaßnahmen im „Begrünungsfall“:

- eine zentrale Grünanlage von 8000 m² Größe (Quartierspark „Grüne Mitte“) mit 53 Baumstandorten sowie weitere Grünanlagen (insbesondere zwei Sportflächen (Sportrasen))
- insgesamt 418 Straßenbäume (in Straßenräumen und im öffentlichen Raum)
- flächige, extensive Begrünung aller Dachflächen der Gebäude
- Begrünung von 30 % der Fassadenflächen



Ein Vergleich der beiden Untersuchungsfälle ist unter Beachtung der getroffenen Annahmen und der Leistungen des Modells eine Möglichkeit, die Wirkung der Begrünungsmaßnahmen anhand von Differenzdarstellungen adäquat zu beschreiben.



Abbildung 46: 3D-Modell des Untersuchungsgebiets für den Referenzfall. Quelle: Gebäudedaten LHS.



Abbildung 47: 3D-Modell des Untersuchungsgebiets für den Begrünungsfall. Quelle: Gebäudedaten LHS.

3.2.3 Klimatische Wirksamkeit von Maßnahmen

Im Nachfolgenden werden die Simulationsergebnisse durch Betrachtung des Referenzfalls und der Differenz zwischen Referenz- und Begrünungsfall für unterschiedliche meteorologische Parameter aufgezeigt.

Physiologische-äquivalente Temperatur (PET)

Zur Quantifizierung des thermischen Komforts wurde die Physiologisch-äquivalente Temperatur (PET) berechnet. PET ist definiert als diejenige Lufttemperatur, bei der in einer typischen Innenraumumgebung (ohne Wind- und Sonneneinstrahlung) das Wärmebudget des menschlichen Körpers mit der gleichen Kern- und Hauttemperatur wie unter Außenbedingungen ausgeglichen wird (Hoeppe, 1999). PET berücksichtigt einen Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung. Es sind vier meteorologische Parameter erforderlich, um PET zu berechnen: Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und mittlere Strahlungstemperatur (MRT). Die Bewertung des menschlichen thermischen Empfindens erfolgt nach einer Skala mit neun PET-Kategorien. Diese sind in Tabelle 14 aufgelistet (VDI, 2022).



Tabelle 14: Kategorisierung von PET in Bereiche unterschiedlichen thermischen Empfindens (Quelle: VDI, 2022)

PET in °C	Thermisches Empfinden	Belastungskategorie
PET > 41	sehr heiß	extrem starke Wärmebelastung
35 < PET ≤ 41	heiß	starke Wärmebelastung/Hitzestress
29 < PET ≤ 35	warm	moderate Wärmebelastung
23 < PET ≤ 29	leicht warm	leichte Wärmebelastung
18 < PET ≤ 23	komfortabel (neutral)	kein thermischer Stress
13 < PET ≤ 18	leicht kühl	leichter Kältestress
8 < PET ≤ 13	kühl	moderater Kältestress
4 < PET ≤ 8	kalt	starker Kältestress
PET ≤ 4	sehr kalt	extremer Kältestress

In Abbildung 48 sind die PET-Werte im Untersuchungsgebiet um 14 Uhr, einem typischen Zeitpunkt zur Bewertung des maßgeblichen, thermischen Komforts tagsüber für den Referenzfall dargestellt. Im gesamten Untersuchungsgebiet herrscht unter den berücksichtigten Randbedingungen überwiegend eine extrem starke Wärmebelastung (PET > 41°C). Bereiche jeweils unmittelbar nördlich bzw. nordöstlich der Gebäude stellen sich etwas günstiger dar, wogegen die höchsten PET- Werte im Quartier unmittelbar im Bereich vor den in süd- bzw. südwestliche Richtungen orientierten Gebädefassaden sowie vermehrt in geschlossenen Innenhofbereichen auszumachen sind.



Abbildung 48: PET-Werte in °C für den Referenzfall um 14 Uhr. Quelle: Gebäudedaten LHS.



Die Differenz PET-Werte zwischen Referenzfall und Begrünungsfall um 14 Uhr ist in Abbildung 49 dargestellt. Die größten Differenzen zwischen den beiden betrachteten Fällen ergeben sich in den baumbestandenen Bereichen. Insbesondere im Bereich des Quartiersparks findet die im Mittel deutlichste Reduzierung der PET und damit auch der thermischen Belastung statt. Im Bereich begrünter Flächen sind PET-Differenzen von über 4 - 6°C auszumachen, in baumbestandenen Bereichen von über 8 - 12°C. Das thermische Empfinden ändert sich dort stellenweise um über eine Bewertungskategorie.



Abbildung 49: Differenz der PET-Werte in °C zwischen Referenzfall und Begrünungsfall um 14 Uhr.
Quelle: Gebäudedaten LHS.

Im Begrünungsfall sind alle Begrünungsmaßnahmen enthalten, so dass die Wirkung von Bäumen in der vorliegenden Betrachtung nicht explizit als Einzelwirkung auftritt. Um zu zeigen, dass die Wohlfahrtswirkung von Bäumen auch in einer versiegelten Umgebung deutlich ist, wurde explizit ein sonnenexponierter Baumstandort in einem versiegelten, jedoch baumbestandenen Straßenraum näher betrachtet (Tabelle 15). Im Zeitraum zwischen 10 und 16 Uhr wird die PET in 1,5 m Höhe dort im Mittel um etwa 5°C reduziert, zum Zeitpunkt um 14 Uhr kann unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen auch in einer versiegelten Umgebung im Bereich des Baumes die PET ebenfalls signifikant um etwa 12°C reduziert werden.

In beiden betrachteten Fällen (Baum im besonnten, begrünten Quartierspark und Baum im besonnten, versiegelten Straßenraum) wird der thermische Komfort insbesondere im unmittelbaren Baumschatten um über eine Belastungskategorie gesteigert.



Tabelle 15: Differenz der PET zwischen Referenzfall und Begrünungsfall an einem ausgewählten Baumstandort (rot). Quelle: Gebäudedaten LHS.



Differenz der PET

Mittelwert (10-16 Uhr) ca. 5°C

Maximalwert (14 Uhr) ca. 12°C

Weiter ist zu beachten, dass für die zuvor quantifizierte Wirkung großkronige Bäume angenommen wurden (Baumhöhe 11 m, Kronenbreite 7 m, Baumart Gleditsia). Die Wirkung ist von der Dimension (Baumhöhe, Stammausmaße, Kronenausmaße, Blattflächendichte) der Bäume und damit auch von der jeweiligen Spezies abhängig. Die thermische Belastung lässt sich umso wirkungsvoller reduzieren, je mehr Baumstandorte realisiert werden, da sowohl Verschattungseffekt als auch Verdunstungskühlung mit einer größeren Anzahl zunehmen.

Für die Wirkungsabschätzung einer unversiegelten, begrünten Freifläche ist ebenfalls eine Betrachtung der PET im Bereich entsprechender Flächen, wie bspw. dem Quartierspark, geeignet. Auch dort kann die Wirkung über die Differenz der PET zwischen Referenzfall und Begrünungsfall aufgezeigt werden (Abbildung 49). Zur weiteren Verdeutlichung dient Abbildung 50, welche die Tagesgänge der PET für den Referenzfall (graue Kurve) und den Begrünungsfall (grüne Kurve) im Bereich des Quartiersparks enthält. Ein Vergleich der beiden Kurven zeigt, dass sich unversiegelte und gleichzeitig begrünte Freiflächen über den Tag hinweg deutlich weniger aufheizen als versiegelte Freiflächen. Der Unterschied ist mit etwa 11°C um 9 Uhr am Tag am stärksten ausgeprägt, aber auch um 14 Uhr ist ein deutlicher Unterschied von etwa 6°C auszumachen.



Tagesgänge der PET im Quartierpark

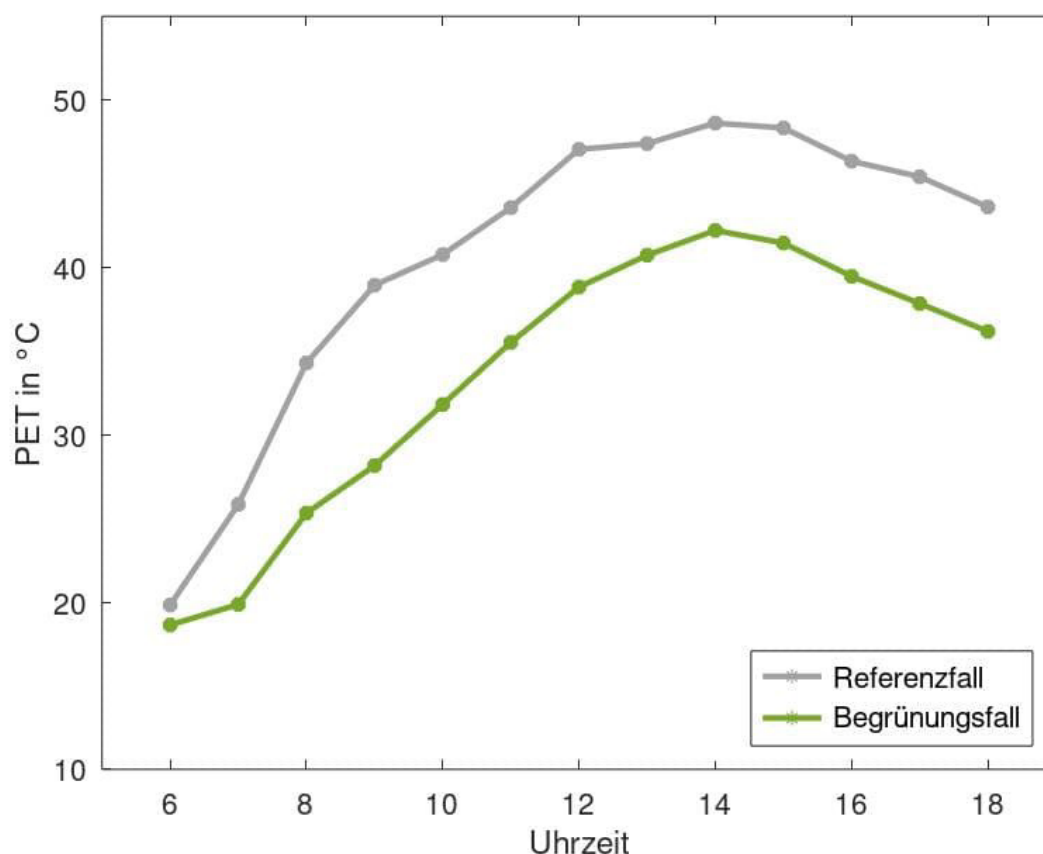


Abbildung 50: Tagesgang der PET im Quartierspark von Referenzfall (graue Linie) und Begrünungsfall (grüne Linie).

Insbesondere in der Nacht entstehen zwischen den begrünten und den versiegelten Flächen aufgrund der Temperaturunterschiede Ausgleichsströmungen, die auch in das bebaute hineinreichen und so eine Reduzierung der dortigen thermischen Belastung bewirken. Je größer die begrünte Freifläche, desto größer dieser Effekt (Hupfer et al., 2005). Dies kann bspw. in Abbildung 51 nachvollzogen werden.

Lufttemperatur (T_a)

Für die Ermittlung der Wirkung von Begrünungsmaßnahmen in der Nachtsituation ist der Parameter Lufttemperatur (T_a) geeignet. Um die entsprechende Wirkung darzustellen, wird wiederum die Differenz zwischen Referenzfall und Begrünungsfall betrachtet. Diese ist in Abbildung 51 für den für die Nachtsituation repräsentativen Zeitpunkt 4 Uhr dargestellt. Insbesondere in den Bereichen der unversiegelten und gleichzeitig begrünten Freiflächen, wie dem Quartierspark und den Sportflächen, sind die größten Differenzen auszumachen. Auffällig ist außerdem, dass sich von den begrünten Freiflächen ausgehend Bereiche mit reduzierter T_a in die bebauten und versiegelten Flächen hineinziehen und auch dort durch einen thermischen Ausgleich für eine gewisse Abkühlung sorgen. Bestätigt werden die angeführten Ergebnisse auch bei Simulation mit dem Stadtklimamodell PALM-4U (siehe Kapitel 3.3.2)(Abbildung 52).



Abbildung 51: Differenz der Lufttemperatur (Ta) zwischen Referenzfall und Begrünungsfall um 4 Uhr.

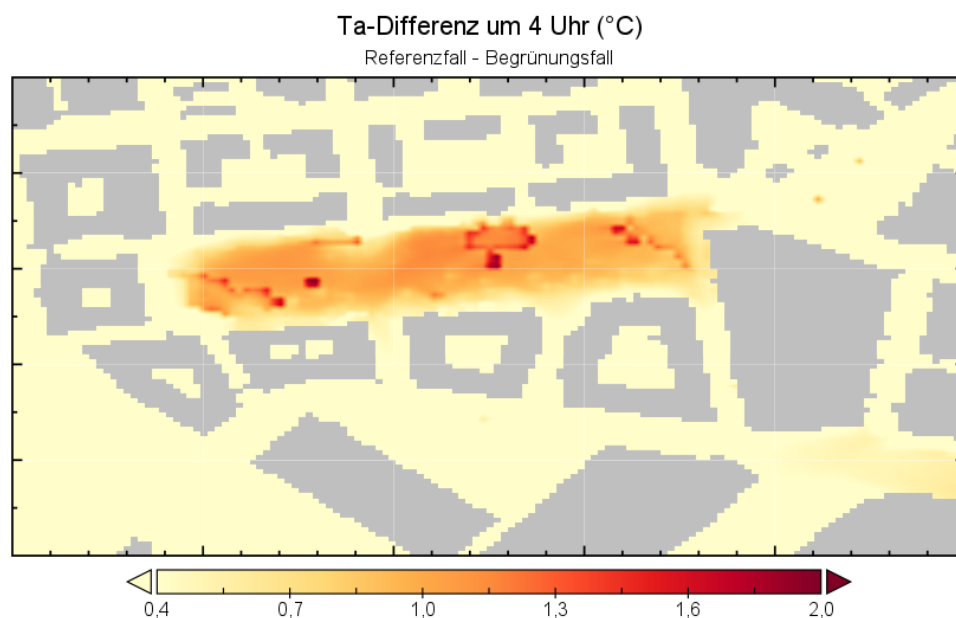


Abbildung 52: Ergebnis PALM-4U, Differenz der Lufttemperatur (Ta) zwischen Referenzfall und Begrünungsfall um 4 Uhr.

Oberflächentemperatur

Im Begrünungsfall wurden alle Dächer im Untersuchungsgebiet mit extensiver Dachbegrünung versehen und die Gebäudefassaden wurden zu jeweils 30 % begrünt. Die Oberflächentemperatur ist eine geeignete Größe, um die Wirkung der Gebäudebegrünungsmaßnahmen abschätzen zu können, da Bauwerksbegrünung neben der Verdunstungskühlungsleistung insbesondere durch eine Änderung



der Oberflächeneigenschaften (Änderung Wärmespeicherkapazität der Oberfläche, Verschattung von Fassade und Dach, Dämmung von Dach und Fassaden, Änderung der Strahlungsbilanz) wirkt (Coutts et al., 2013). Abbildung 53 zeigt die Differenz der Oberflächentemperatur über Dachniveau zwischen Referenzfall und Begrünungsfall um 14 Uhr. Im Bereich der Dachflächen ist ein signifikanter Unterschied der Oberflächentemperatur von vermehrt 24 - 28°C festzustellen.

Um die Wirkung der begrünten Fassaden zu bewerten, wurde die Oberflächentemperatur u.a. für eine sonnenexponierte Fassade analysiert. Hierfür werden verschiedene Gitterzellen (diskretisierte Elemente) sowohl mit als auch ohne Fassadenbegrünung verglichen. Für eine Höhe in 1,5 m ergibt sich eine Differenz der Oberflächentemperatur an den Süd- und Westfassaden etwa 6 - 7°C.

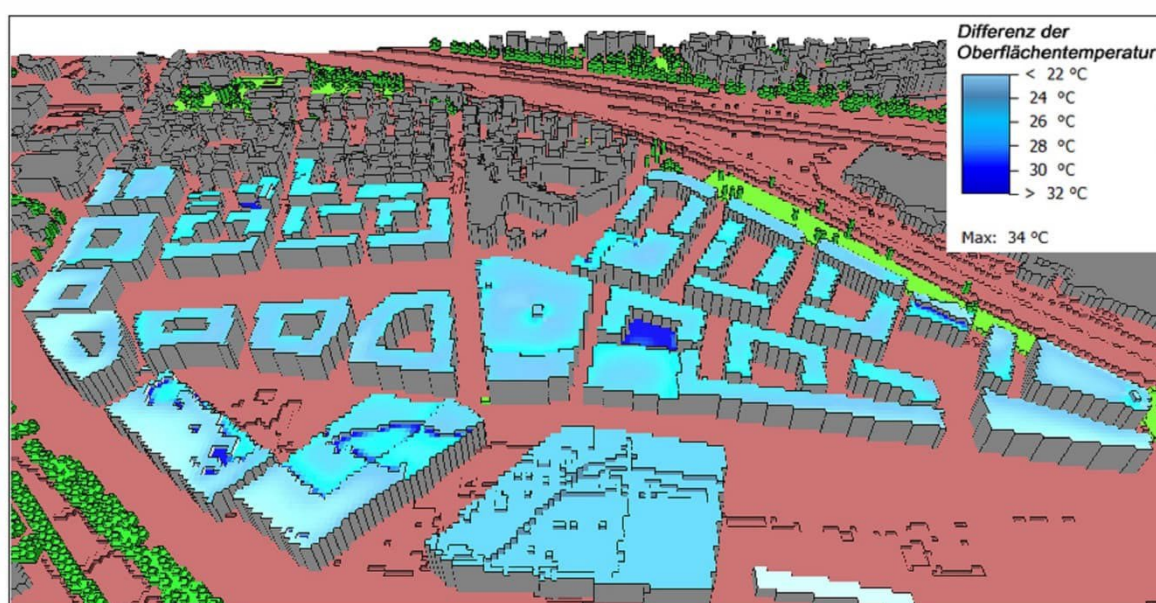


Abbildung 53: Differenz der Oberflächentemperatur im Dachniveau zwischen Referenzfall und Begrünungsfall um 14 Uhr

Zusammenfassung der lokalklimatischen Wirksamkeit

Die durchgeführten Simulationen und die Wahl der Parameter sind geeignet, um die Wirkungen der verschiedenen Begrünungsmaßnahmen unter Annäherung aufgrund getroffener Annahmen abschätzen zu können. Die Wirkungsabschätzung von Bäumen stellt großkronige Bäume als eine sehr effektive Maßnahme – in Bezug auf das betrachtete Gebiet die effektivste Maßnahme – heraus, um den thermischen Komfort unmittelbar im Bezugsraum „Baum“ maßgeblich zu steigern. Auch die Schaffung von unversiegelten, begrünten Freiflächen ist eine sehr effektive Maßnahme, um den thermischen Komfort auf der jeweiligen Fläche und insbesondere nachts auch im umgebenden Siedlungsraum deutlich zu steigern. Die Maßnahme Gebäudebegrünung ist aufgrund der deutlichen Reduzierung der Oberflächentemperatur eine für das Stadtklima insgesamt wirkungsvolle Maßnahme. Bei der Betrachtung der Simulationsergebnisse für den Begrünungsfall und auch der Differenzermittlungen wird deutlich, dass jede der Maßnahmen für sich schon eine effektive Wirkung aufweist, dass jedoch insbesondere das Zusammenspiel aller betrachteten Begrünungsmaßnahmen (und auch darüber hinaus – beispielsweise Wasserflächen) eine deutliche Steigerung des thermischen Empfindens bewirkt und für eine Anpassung an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels – neben der hier nicht aufgezeigten klimatischen Optimierung der städtebaulichen Planungen – effektive und damit unverzichtbare Maßnahmen sind.

Die positiven Effekte der Begrünung sind nicht auf den hier betrachteten thermischen Komfort beschränkt. Insgesamt erbringt die Begrünung im NeckarPark vielfältige Ökosystemleistungen.



3.2.4 Integrierte Bewertung der Ökosystemleistungen

Die TEEB-Studie „Naturkapital Deutschland – TEEB DE“ (Kowarik et al., 2016) definiert diese so: „Ökosystemleistungen bezeichnen direkte und indirekte Beiträge von Ökosystemen zum menschlichen Wohlergehen, das heißt Leistungen und Güter, die dem Menschen einen direkten oder indirekten wirtschaftlichen, materiellen, gesundheitlichen oder psychischen Nutzen bringen.“

Temperaturregulation ist eine dieser Leistungen. Weitere sogenannte regulierende Ökosystemleistungen der grünen Klimaanpassungsmaßnahmen sind Wasserrückhalt bei Starkregen sowie Luftreinhaltung und Kohlenstoffspeicherung. Neben regulierenden Ökosystemleistungen erbringen insbesondere Grünflächen (aber auch Straßen-, Dach- und Fassadenbegrünung) zudem kulturelle Ökosystemleistungen, indem sie das Stadtbild verändern, Raum für Begegnung, Sport und Erholung bieten, Naturerfahrungen ermöglichen und die Aufenthaltsqualität steigern können. Um diese Leistungen in Entscheidungsprozessen sichtbar zu machen, kann es hilfreich sein, ihren ökonomischen Wert zu ermitteln. Nachfolgend wird zunächst das Konzept der Ökosystemleistungen kurz erläutert. Anschließend werden für die genannten regulierenden und kulturellen Ökosystemleistungen die verwendeten Quantifizierungs- und Bewertungsverfahren beschrieben und die Ergebnisse für den Fokusraum NeckarPark dargestellt. Tabelle 16 fasst die Ergebnisse kompakt zusammen.

Tabelle 16: Ergebnistabelle der Ökosystemleistungsbewertung im Fokusraum NeckarPark.

Ökosystemleistung		Physische Einheiten	€ pro Jahr
Regulierende	Wasserrückhalt	1164,70 m ³	58.678 €
	Luftreinhaltung	1,18 t/a	28.065 €
	Kohlenstoffspeicherung	94,42 t/a	18.411 €
Kulturelle Ökosystemleistungen		(Stadtbild)	415.662 €
Gesamt			520.816 €

Ökosystemleistungen

Ein Ökosystem beschreibt die Wechselwirkungen zwischen Lebewesen und der abiotischen Umwelt in einem abgegrenzten Naturraum (Kowarik et al., 2016, S. 293). Diese Beschreibung ist auf den Amazonas-Regenwald ebenso anwendbar wie auf eine städtische Grünanlage. Ökosysteme sind offen, dynamisch und komplex. Sie sind offen, da sie Stoffe und Energie mit ihrer Umgebung austauschen, z.B. Sauerstoff und Wärme. Sie sind dynamisch, weil sie nie ganz im Gleichgewicht sind und deswegen ständig Veränderungen stattfinden. Und sie sind komplex, weil all die unterschiedlichen Lebewesen und ihre Umwelt sich unentwegt gegenseitig beeinflussen. Menschen sind Teil des Ökosystems und nutzen viele Leistungen, die das Ökosystem bereitstellt.

Viele dieser Leistungen nehmen wir als selbstverständlich hin, z.B. die Bereitstellung von sauberer Luft oder Trinkwasser. Häufig merken wir erst, wenn Ökosysteme in ihrer Funktionsweise beeinträchtigt oder sogar zerstört sind, wie wichtig sie für uns sind. Denn dann werden etwa teure technische Anlagen zur Aufbereitung von Trinkwasser notwendig oder die Gesundheitskosten steigen, da mehr Menschen aufgrund der schlechten Luftqualität krank werden.

Weil diese Aspekte zunächst abstrakt und schwer greifbar sind, werden sie in politischen und privaten Entscheidungen häufig unzureichend berücksichtigt. Die ökonomische Perspektive auf Ökosystemleistungen erlaubt es, die Leistungen der Natur für uns Menschen sicht- und messbar zu machen, um sie angemessen in Entscheidungsprozesse mit einzubeziehen (Kowarik et al., 2016, S.13). Gerade im Kontext der Flächennutzung in dicht besiedelten Städten kann dies eine wertvolle



zusätzliche Perspektive sein. So lassen sich etwa Mehrkosten von Planungsvarianten relativieren, die in der Umsetzung teurer sind, aber vielfältige Ökosystemleistungen erbringen.

Diese Leistungen kann man in drei Kategorien einteilen: versorgende Ökosystemleistungen, regulierende Ökosystemleistungen und kulturelle Ökosystemleistungen (CICES o.J.). In der Betrachtung von städtischem Grün wie Parks, Straßenbäumen sowie begrünten Dächern und Fassaden sind vor allem regulierende und kulturelle Ökosystemleistungen relevant. Diese werden im Folgenden näher erläutert. Versorgende Ökosystemleistungen, etwa die Bereitstellung von Rohstoffen oder Nahrungsmitteln, spielen bei den hier betrachteten Grüntypen dagegen keine nennenswerte Rolle.

Temperaturregulation

Durch den menschengemachten Klimawandel kommt es zu immer mehr sehr heißen Tagen mit Temperaturen über 30 °C oder sogar 35 °C. Besonders von der Hitze betroffen sind Städte, denn die vielen Gebäude und versiegelten Flächen speichern die Hitze, sodass es selbst nachts kaum noch abkühlt. An manchen Sommertagen ist es daher in der Stadt um bis zu zehn Grad heißer als auf dem Land (DWD 2023). Stadtgrün wirkt dieser Aufheizung entgegen, denn es spendet Schatten und kühlt durch Verdunstung die lokale Umgebung.

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebene Klimamodellierung des NeckarParks zeigen im Begrünungsfall gegenüber dem grauen Referenzfall eine eindeutige Verbesserung der Aufenthaltsqualität im Freien in der Nähe der Parks und in begrünten Straßen. Die temperaturregulierende Wirkung der Klimaanpassungsmaßnahmen betrifft jedoch auch Menschen in Innenräumen. Durch geringeren Hitzestress erkranken Anwohner:innen weniger häufig und Beschäftigte sind bei der Arbeit konzentrierter.

Ursprünglich geplant war, diese beiden Effekte über eingesparte Behandlungskosten und höhere Arbeitsproduktivität monetär zu bewerten. Dafür wurden entsprechende Funktionen recherchiert und die notwendigen soziodemographischen Daten zur erwartbaren Zusammensetzung der Wohnbevölkerung und der Beschäftigten im NeckarPark aufbereitet. Letztlich konnten Unsicherheiten und die Unschärfe der ökonomischen Modellierungen noch nicht zu einem belastbaren Grad reduziert werden. Aus diesem Grund und um falsche Schlussfolgerungen zu vermeiden wird diese Ökosystemleistung hier nicht bewertet.

Schwierigkeiten in der Umsetzung waren zum einen, dass die mikroklimatischen Effekte sehr kleinräumig anfielen. Die hoch aufgelösten mikroklimatischen Modellierungsergebnisse, die den Schattenwurf einzelner Bäume anzeigen können, standen im Kontrast zu der für die Ökosystemleistungsbewertung gewählten Rastergröße von 100 x 100 m, unter anderem bedingt durch nur in dieser Auflösung verfügbaren Daten zu von der Hitze betroffenen Personen. Zum anderen, stellt die Modellierung ein Maß der Temperatur in den Mittelpunkt (PET), für welches keine geeigneten etablierten und für die geplante ökonomische Bewertung funktionalisierbaren Zusammenhänge in der Literatur gefunden werden konnten. Bisherige Untersuchungen stellen zumeist allein auf Lufttemperatur und Luftfeuchte (kombiniert in einem Maß der gefühlten Temperatur) ab (z. B. European Commission. Joint Research Centre., 2018; Li et al., 2016; Michelozzi et al., 2009), während die PET basierend auf einem Energiebilanzmodell des menschlichen Körpers die Wahrnehmung der Temperatur umfassender abbildet. Zwar lässt sich die PET theoretisch in eine für die ökonomische Modellierung geeignete Temperatureinheit umwandeln. Allerdings ist dies mit einigen Annahmen verbunden, die Unsicherheiten und die Unschärfe der Ergebnisse zusätzlich verstärken, sodass die Belastbarkeit nicht mehr gegeben wäre.



Wasserrückhalt

Die Vielzahl versiegelter Flächen und eine oft geringe Ausstattung an Grün haben einen starken Einfluss auf den urbanen Wasserhaushalt. Nur ein geringer Teil des Wassers kann versickern oder durch Evapotranspiration an die Atmosphäre abgegeben werden. In der Folge kommt es zu stark erhöhtem Oberflächenabfluss, der durch die Kanalisation aufgenommen werden muss (Breuste et al., 2016).

Begrünung hilft, im Fall starker Regenfälle den Oberflächenabfluss zu reduzieren. Ein Teil des Wassers wird zurückgehalten und kann versickern, verdunsten oder fließt erst zeitverzögert langsam ab. Das entlastet die Kanalisation. Diese Entlastung kann zunächst in physischen Größen (m^3 zurückgehaltenes Wasser) quantifiziert und im zweiten Schritt über den sogenannten Ersatzkostenansatz monetär bewertet werden. Dabei wird untersucht, wie hoch die Kosten für technische Bauwerke zum Regenrückhalt wären, die eine vergleichbare Rückhalteleistung erbrächten. Diese Kosten können als monetärer Wert der durch die Begrünung bereitgestellten Ökosystemleistung Wasserrückhalt interpretiert werden.

Die Abflussbeiwertmethode ermöglicht, aus der Regenspende ($\text{l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$) und dem Abflussbeiwert (Quotient aus Oberflächenabfluss und Gesamtniederschlag) für verschiedene Oberflächentypen jeweils die Menge des abfließenden und zurückgehaltenen Wassers zu ermitteln. Lokale Starkregenniederschlagsspenden für ganz Deutschland stehen im KOSTRA-DWD Rasterdatensatz zur Verfügung (KOSTRA-DWD, 2022). Den Empfehlungen für Wohngebiete und Stadtzentren der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) entsprechend, wurde als Bemessungsregen ein 2-jährlicher 10-Minuten Regen angesetzt (DWA-A 118, 2022). Geeignete Abflussbeiwerte für unterschiedliche Flächentypen, u.a. Grünflächen und Gründächer, wurden den Veröffentlichungen der DWA (DWA-A 118, DWA-M 153) und DIN Normen (DIN 1986-100) entnommen. Diese Abflussbeiwerte wurden anschließend mit den hoch aufgelösten und frei verfügbaren Landnutzungs- bzw. -bedeckungsklassen des Urban Atlas Datensatzes verknüpft (Urban Atlas, 2018), der Metropolregionen in ganz Europa abdeckt. Die in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Untersuchungsfälle wurden abgebildet, indem entsprechend für die Dächer und Flächen entweder die Abflussbeiwerte im versiegelten oder begrünten Zustand angesetzt wurden. So wurde ermittelt wie viel m^3 Wasser bei dem Bemessungsregenereignis im Begrünungs- gegenüber dem Referenzfall zurückgehalten werden. Die mittleren jährlichen Kosten pro m^3 Volumen für Retentionsbauwerke zur Monetarisierung dieser Leistung wurden basierend auf Leimbach et al. (2018) angesetzt.

Abbildung 54 zeigt, in einem $100 \times 100 \text{ m}$ Raster, wo im NeckarPark die Ökosystemleistung Wasserrückhalt erbracht wird, also der zusätzliche Wasserrückhalt im Begrünungsfall gegenüber dem Referenzfall. Für jede Zelle im Raster wird dabei die Summe der Leistung innerhalb dieser Zelle angezeigt. Insbesondere der Quartierspark und die begrünten Dächer im Quartier weisen eine hohe Rückhalteleistung auf und sind durch ihre tiefblaue Einfärbung hier gut wiederzuerkennen.

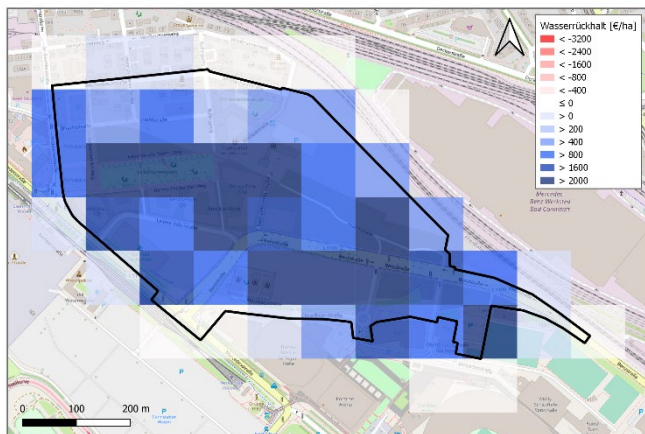


Abbildung 54: Ökosystemleistung Wasserrückhalt im Fokusraum NeckarPark (Quelle: Eigene Berechnungen IÖW, Hintergrundkarte: © OpenStreetMap Mitwirkende).

Insgesamt werden durch die Grünflächen und Gründächer beim Bemessungsregen 1164,70m³ Wasser zurückgehalten, was einer jährlichen Leistung von 58.678 € entspricht.

Luftreinhaltung

Schlechte Luftqualität in Städten ist ein erhebliches Gesundheitsrisiko. Auch hier können grüne Klimaanpassungsmaßnahmen in Form von Parks, Straßenbäumen oder begrünten Fassaden eine wertvolle Ökosystemleistung erbringen, indem sie Schadstoffe filtern. Je nach Schadstoff und Vegetationstyp variiert die Rückhalteleistung. Berücksichtigt wurden hier Kohlenstoffmonoxid (CO), Ammoniak (NH₃), Stickstoffdioxid (NO₂), Ozon (O₃), Schwefeldioxid (SO₂) und Feinstaub (PM₁₀, PM_{2,5}). Zur Berechnung der aus der Luft entfernten Menge an Schadstoffen wurden für die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Vegetationstypen durchschnittliche Rückhalteleistungen in Tonnen pro Hektar bzw. pro Baum pro Jahr recherchiert und mit den Umsetzungsumfängen der Grünmaßnahmen multipliziert. Die so ermittelte physische Menge an Luftschadstoffen, die im Begrünungsfall gegenüber dem Referenzfall zusätzlich zurückgehalten werden, wurde anschließend mit den einheitlichen Umweltkostensätzen des Umweltbundesamts (UBA, 2020) monetär bewertet. Diese Kostensätze beschreiben die monetären Schäden, die pro Kilogramm Luftschadstoff pro Jahr insbesondere durch Gesundheitskosten entstehen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 55 gemeinsam mit der Ökosystemleistung Kohlenstoffspeicherung dargestellt, die im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

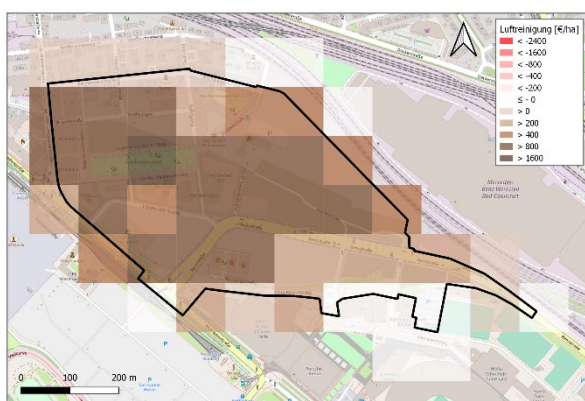
Kohlenstoffspeicherung

Grün in der Stadt hat nicht nur direkt vor Ort viele Vorteile, sondern leistet auch auf globaler Ebene einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz. Kohlenstoffdioxid CO₂ ist ein Treibhausgas, das maßgeblich zum Klimawandel beiträgt. Es entsteht vor allem durch die Verbrennung fossiler Energieträger. Stadtgrün kann die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre senken, indem es im Prozess der Photosynthese das Gas aus der Atmosphäre aufnimmt und den Kohlenstoff als Teil der Pflanzenbiomasse bindet. Auf diese Weise helfen die grünen Klimaanpassungsmaßnahmen im NeckarPark den Treibhauseffekt zu mindern und global zahlreichen Schäden durch den Klimawandel vorzubeugen. Besonders wirksam sind hierbei Bäume, da sie mehr Biomasse aufbauen als andere Vegetationstypen und den Kohlenstoff auch längerfristig binden. Diese Fähigkeit wird als Kohlenstoffregulation bezeichnet oder auch als Kohlenstoffsinkenleistung. Sowohl für Bäume als auch für Grünflächen, Dächer und Fassadengrün wurden analog zur Rückhalteleistung von Luftschadstoffen die Kohlenstoffsinkenleistung in Tonnen pro Flächeneinheit und Jahr recherchiert.

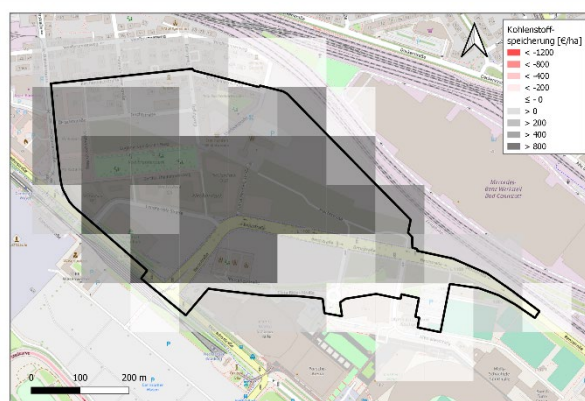


Dazu wurden vorhandene wissenschaftliche Studien ausgewertet, die diesen Sachverhalt unter ähnlichen klimatischen Bedingungen wie in Deutschland untersuchen, damit die Werte zur Kohlenstoffregulation übertragbar sind. Für jeden der Stadtgrün-Typen wurde daraus schließlich ein Mittelwert der Retentionsleistung berechnet.

Bewertet wird diese Leistung über die zahlreichen Schäden des Klimawandels, wie Dürren, Stürme, Überschwemmungen oder Biodiversitätsverlust, die so vermieden werden. Angesetzt wird dazu der aktuelle Kostensatz des Umweltbundesamts in Höhe von 195€ pro Tonne CO₂-Äquivalente (UBA, 2020). Abbildung 55 zeigt die Ökosystemleistungen Luftreinhaltung und Kohlenstoffspeicherung, die sich Begrünungsfall gegenüber dem Referenzfall ohne Begrünung ergeben. Ähnlich zum Regenwasserrückhalt lässt sich sowohl bei der Luftreinhaltung als auch der Kohlenstoffspeicherung wieder der Quartierspark als ein Hauptort der Erbringung dieser Ökosystemleistungen erkennen. Dafür ist nun jedoch nicht maßgeblich die große Grünfläche an sich, sondern die zahlreichen Bäume darauf verantwortlich. Dies zeigt der Blick auf den südöstlichen Teil des NeckarParks, dort befinden sich im Begrünungsfall Sportplätze, also offene begrünte Flächen, jedoch ohne großen Baumbestand. Während diese unversiegelten Flächen eine hohe Wasserrückhalteleistung erbringen (Abbildung 54), spielen sie für Luftreinhaltung und Kohlenstoffbindung kaum eine Rolle. Auch entlang der Straßen spielen Bäume eine deutlich größere Rolle als begrünte Dächer und Fassaden: Zellen, die Straßen enthalten, sind hier deutlich dunkler als solche, die hauptsächlich Gebäude enthalten, beim Wasserrückhalt ist es tendenziell umgekehrt.



Luftreinigung



Kohlenstoffspeicherung

Abbildung 55: Ökosystemleistungen Luftreinhaltung und Kohlenstoffspeicherung im Fokusraum NeckarPark (Quelle: Eigene Berechnungen IÖW, Hintergrundkarte: © OpenStreetMap Mitwirkende) Kulturelle Ökosystemleistungen.

Stadtgrün hat neben den bisher betrachteten regulierenden Funktionen eine große soziale und kulturelle Bedeutung für den Menschen. Parks und Grünanlagen etwa laden ein zu Spiel und Sport und bieten somit Begegnungsorte für sozialen Austausch. Andererseits können sie auch als Rückzugs- und Ruheorte dienen. Abstrakter gefasst lassen sich noch viele weitere Aspekte wie z.B. ästhetisches Empfinden oder Heimatgefühl als kulturelle Ökosystemleistungen verstehen, die das Stadtgrün erbringen kann (Kowarik et al., 2016, S. 291). Bei kulturellen Ökosystemleistungen grüner Klimaanpassungsmaßnahmen geht es im Kern also um die Frage, welchen subjektiven Wert Menschen diesen Maßnahmen beimessen. Diese subjektive Wertschätzung lässt sich mit verschiedenen umweltökonomischen Methoden messen und in Geldwerten abbilden. Für die Bewertung der Begrünungsmaßnahmen im NeckarParks wurden die Ergebnisse eines sogenannten „Choice-Experiment“ verwendet. Auf Grundlage des Choice Experiments konnten die (hypothetischen)



Zahlungsbereitschaften für die Umsetzung unterschiedlicher Begrünungsmaßnahmen ermittelt werden.

Konkret wurden die Zahlungsbereitschaften für die folgenden Maßnahmen untersucht:

- Reduzierung des Flächenverbrauchs von begrünten und unbebauten Flächen
- Naturnahe Umgestaltung von naturfernen Gewässerabschnitten
- Zusätzliche Straßenbaumbepflanzung
- Begrünung des Straßenraumes (bzw. Umwandlung von Parkplatzflächen in Grünflächen)

		Szenario 1	Szenario 2	„Übliche Praxis“
Flächenverbrauch von begrünten und unbebauten Flächen		Wird halbiert (9,5 ha pro Jahr)	Wird gestoppt (0 ha pro Jahr)	Bleibt unverändert (19 ha pro Jahr)
Durchschnittliche Anzahl Straßenbäume pro 100m Straße		9 Bäume	3 Bäume	3 Bäume
Naturnahe Umgestaltung von naturfernen Gewässerabschnitten		50% der bisher naturfernen Gewässerabschnitte	75% der bisher naturfernen Gewässerabschnitte	0% der bisher naturfernen Gewässerabschnitte
Begrünte Flächen im Straßenraum		50% der Parkplätze werden begrünt	75% der Parkplätze werden begrünt	0% der Parkplätze werden begrünt
Jährlicher Beitrag pro Person		60 €	6 €	0 €

Abbildung 56: Beispielhafte Entscheidungssituation im Choice Experiment zur Ermittlung von Zahlungsbereitschaften für kulturelle Ökosystemleistungen (Quelle: Eigene Darstellung IÖW).

Die befragten Personen wurden gebeten, in acht aufeinander folgenden Entscheidungssituationen jeweils ein Maßnahmenzenario auszuwählen. Eine Entscheidungssituation umfasste jeweils drei alternativ auswählbare Maßnahmenzenarien. Die wählbaren Szenarien innerhalb der Entscheidungssituationen setzten sich aus unterschiedlichen Umsetzungsumfängen der oben genannten Klimaanpassungsmaßnahmen zusammen. Eins der drei Szenarien bestand immer aus dem Status-Quo Zustand („Übliche Praxis“), also keiner Veränderung zur jetzigen Situation. Die zwei anderen Szenarien enthielten variierende Umsetzungsumfänge der Klimaanpassungsmaßnahmen. Jedes Szenario enthielt zudem einen jährlichen Zahlungsbetrag, welcher zur Finanzierung der Maßnahmen durch die befragte Person aufgebracht werden müsste. Ebenso wie die Umsetzungsumfänge der Maßnahmen, unterschieden sich auch die jährlichen Beiträge pro Person von Szenario zu Szenario, wobei der Beitrag des Status-Quo Szenarios immer null Euro betrug.

Abbildung 56 stellt beispielhaft eine Entscheidungssituation des Choice Experiments dar. Die befragten Personen sollten in jeder Entscheidungssituation zwischen den unterschiedlichen Maßnahmenzenarien sowie dem dazugehörigen jährlichen Beitrag abwägen und das Szenario wählen, dessen Umsetzung sie am stärksten befürworten würden. Dabei stellt die Möglichkeit, die „Übliche Praxis“ ohne individuellen Finanzierungsbeitrag zu wählen, sicher, dass jede befragte Person immer die Option hat, keine Zahlungsbereitschaft zu signalisieren. Anschließend wurden die Entscheidungen der befragten Personen statistisch ausgewertet, um die Zahlungsbereitschaften für die einzelnen Maßnahmen in ihren möglichen Abstufungen und Kombinationen zu bestimmen und die



Maßnahmen zu identifizieren, welche durchschnittlich eine positive Wertschätzung durch die Bevölkerung erfahren.

In Stuttgart haben insgesamt 574 Personen an dem Choice Experiment teilgenommen und insgesamt 4.592 Entscheidungen („Choices“) getroffen. Die Auswertung der Antworten der Befragten hat ergeben, dass die Bürger:innen der Stadt die Reduzierung der Flächenverbrauchsrate, zusätzliche Straßenbaumpflanzungen, eine naturnahe Umgestaltung von naturfernen Gewässerabschnitten und die zusätzliche Umwandlung öffentlicher Parkplatzflächen in Grünflächen im Durchschnitt befürworten und positiv wertschätzen. Für die Begrünungsmaßnahmen (Straßenbaumbepflanzung und Erhalt einer unbebauten Grünfläche) im NeckarPark ergibt sich in Stuttgart insgesamt eine durchschnittliche Zahlungsbereitschaft in Höhe von 415.662€ pro Jahr.

3.2.5 Bewertung der regional-ökonomischen Effekte

Im Untersuchungsgebiet NeckarPark wurden Umsetzungsszenarien für ausgewählte Klimaanpassungsmaßnahmen ausgestaltet. Zu den Maßnahmen gehören die Begrünung von geeigneten Dachflächen, die Entsiegelung und Begrünung öffentlicher und gewerblicher Freiflächen sowie die Anpflanzung von Bäumen im Straßenbereich (siehe Kapitel 3.2.2). Je nach Eigentümerschaft bzw. Verantwortlichkeit für die Flächen, auf denen diese Maßnahmen umgesetzt werden, tragen verschiedene Akteursgruppen die Kosten für die Umsetzung. Dachflächen sind zum Teil in öffentlicher, aber auch in privater Hand. Die öffentlichen Liegenschaften können hier mit gutem Beispiel vorangehen, während private Akteure mit geeigneten Beratungs- und Fördermaßnahmen in der Umsetzung unterstützt werden können. Auch sind Nutzungskonkurrenzen bspw. zu Photovoltaik-Dachanlagen zu berücksichtigen. Kombinierte Grün- und PV-Dächer stellen allerdings auch eine Option dar. Ähnliches gilt für Freiflächen, wobei hier ggf. eine stärkere Konkurrenz zu anderen Nutzungsvarianten besteht. Straßenbäume werden i.d.R. von jeweils zuständigen Grünflächenamt geplant, gepflanzt und gepflegt. Mögliche Umsetzungsumfänge der Grünmaßnahmen im Untersuchungsgebiet NeckarPark wurden im Rahmen der Wirkungsmodellierungen aufgestellt. Mit der Umsetzung der Maßnahmen fallen zum einen einmalige Investitionskosten an und zum anderen jährliche Pflegekosten der Grünflächen und der Straßenbäume. Die Pflegekosten werden dabei nur in der Höhe der zusätzlichen Grünflächen bzw. Straßenbäume berücksichtigt.

Tabelle 17: Umsetzungsumfänge der Klimaanpassungsmaßnahmen im Untersuchungsgebiete NeckarPark und damit verbundene Investitions- und Pflegekosten (netto in Euro2022). Quelle: eigene Berechnungen IÖW.

Grünmaßnahmen	Umsetzungsumfang	Jährliche Investitionskosten	Jährliche Pflegekosten
Straßenbäume	418 Stk.	255.600€	17.800€
Gründächer	150.819m ²	1.449.000€	225.900€
Freiflächen	11.328m ²	25.600€	5.500€

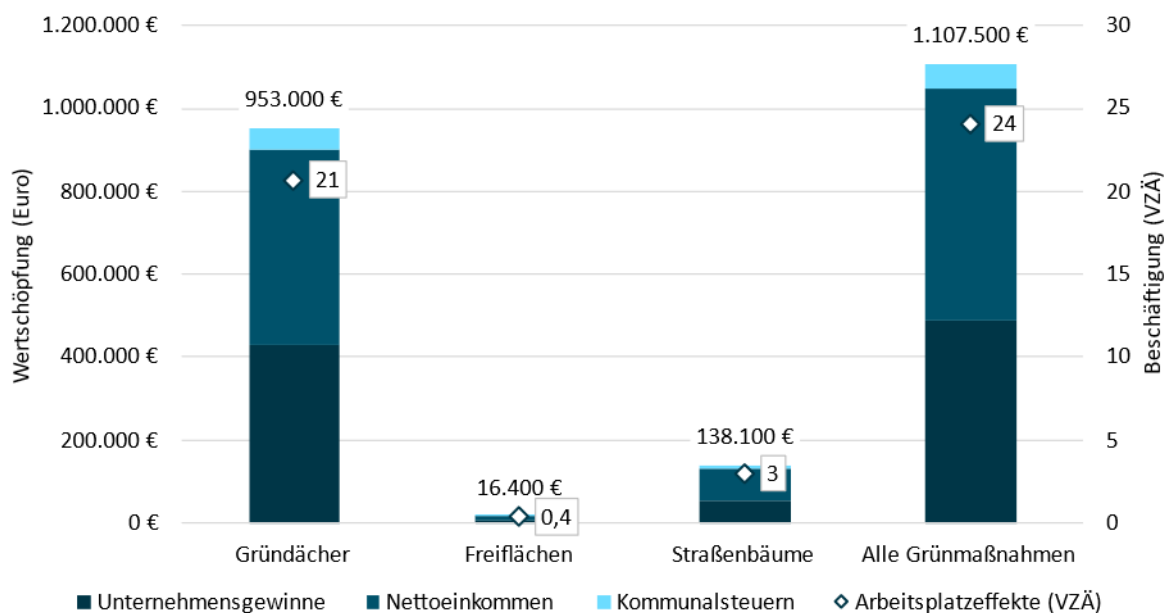


Abbildung 57: Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte der Grünmaßnahmen im Untersuchungsgebiet NeckarPark, nach Wertschöpfungsbestandteilen und Grünmaßnahmen (in Euro2022). Quelle: eigene Berechnungen IÖW.

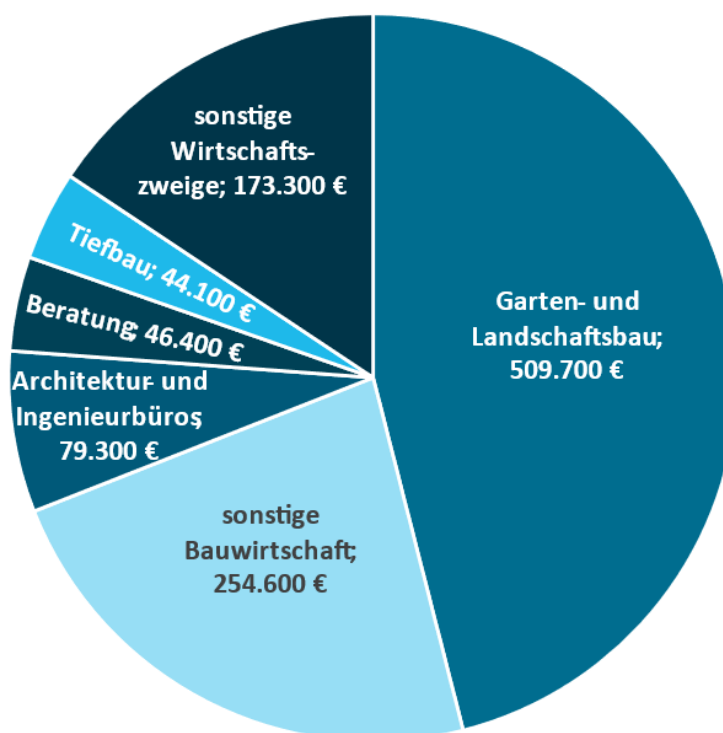


Abbildung 58: Wertschöpfungseffekte der Grünmaßnahmen im Untersuchungsgebiet NeckarPark, nach Wirtschaftszweigen (in Euro2022). Quelle: eigene Berechnungen IÖW.



Bei den mit der Umsetzung der Grünmaßnahmen und der Grünflächenpflege betrauten Akteuren lösen die hochgerechneten Investitions- und Pflegekosten Umsätze in gleicher Höhe aus. Diese wirtschaftlichen Tätigkeiten wiederum generieren Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte in der Region, sofern diese Akteure in der Region ansässig sind. Die einzelnen Bestandteile der Wertschöpfung summieren sich dabei über alle Grünmaßnahmen hinweg auf ca. 1,1 Mio. € auf. Dabei entfällt der größere Teil auf Beschäftigteneinkommen, die mit den berechneten ca. 24 Vollzeitarbeitsplätzen verbunden sind. Einen ebenfalls hohen Anteil nehmen die Unternehmensgewinne ein, die mit den Aktivitäten generiert werden. Auf Beschäftigteneinkommen und Unternehmensgewinne werden zudem Steuern gezahlt, die zum Teil in die kommunalen Haushalte der Region fließen. Beim hier unterstellten Umfang der Grünmaßnahmen können die Kommunen mit zusätzlichen jährlichen Steuereinnahmen in Höhe von ca. 60.000€ rechnen.

Die Verteilung der ermittelten Wertschöpfung auf die beteiligten Wirtschaftszweige macht deutlich, dass der größte Teil mit ca. 500.000€ bei den Garten- und Landschaftsbauunternehmen anfällt, welche die Grünmaßnahmen direkt umsetzen. Dazu gehören aber auch weitere Wirtschaftszweige, wie bspw. die Bauwirtschaft (ca. 250.000€) oder Architektur- und Ingenieurbüros (ca. 80.000€), welche vorgelagerte Planungstätigkeiten übernehmen. Unter „sonstige Wirtschaftszweige“ (ca. 170.000€) sind sämtliche Branchen gefasst, die als Zulieferer mit den anderen aufgeführten Wirtschaftszweigen verflochten sind.

3.2.6 Fazit – Fokusraum NeckarPark

Begrünungsmaßnahmen sind unverzichtbar zur Anpassung an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels. Dabei wirkt jede einzelne der beschriebenen Maßnahmen schon für sich genommen, aber erst in der Summe und sich gegenseitig ergänzend entfalten sie ihr volles Potential. Die Simulationsergebnisse zeigen deutlich, dass es gerade das Zusammenspiel der vielfältigen Begrünungsmaßnahmen ist, dass eine deutliche Minderung der thermischen Belastung für den Menschen ermöglicht. Die positiven Effekte der Begrünung sind nicht auf den thermischen Komfort beschränkt. Insgesamt erbringt die Begrünung im NeckarPark vielfältige Ökosystemleistungen im Wert von über einer halbe Million Euro im Jahr. Diese Bewertungsmethodik weist naturgemäß Unsicherheiten auf, stellt aber insgesamt eine konservative Schätzung dar, da nur eine begrenzte Auswahl an Ökosystemleistungen erfasst wurden, für die gute Datengrundlagen und Bewertungsmethoden vorliegen. Die vorliegenden Modellierungs- und Bewertungsergebnisse zeigen räumlich und zeitlich explizit, wie die Begrünungsmaßnahmen im NeckarPark wirken: Vom thermischen Komfort über kulturelle Ökosystemleistungen bis hin zu regionalen Wertschöpfungseffekten. Diese Darstellungen sollen den langjährig regelmäßig anfallenden Nutzen der Maßnahmen greifbar machen. Höherer Aufwand bei der Planung sowie Investitions- und Instandhaltungskosten können so angemessen in Perspektive gesetzt werden. In einer umfassenden Betrachtung grüner Klimaanpassungsmaßnahmen, sollten all diese Aspekte Berücksichtigung finden.



3.3 Fokusraum Neuer Stadtraum B14

Zuständigkeit: Arbeitspaket 4 & 6 – LHS, IÖW, KIT, VRS, IREUS

Die Stadt Stuttgart hat das Ziel, den Stadtraum der B14 stadtverträglich umzugestalten. Im Rahmen des städtebaulichen Projektes "Neuer Stadtraum B14" sollen u.a. der Verkehr um 50% reduziert, eine attraktive Infrastruktur für Fußgänger und Radfahrer und neue Wohn- und Lebensräume sowie die Begrünung des Stadtraumes geschaffen werden. Hierzu wurde ein städtebaulicher Wettbewerb durchgeführt. Das Wettbewerbsgebiet erstreckt sich entlang der B14 vom Marienplatz bis zum Schwanenplatztunnel (ca. 5 km). Für die Modellierung wird ein Abschnitt der B14 als Untersuchungsgebiet definiert (vom Österreichischen Platz bis zum Wilhelmplatz), in dem auch strukturelle Veränderungen vorgesehen sind. Es ist in Abbildung 59 blauumrandet dargestellt. Hier sollen die Auswirkungen von baulichen Veränderungen auf das Mikroklima und den thermischen Komfort untersucht werden.

3.3.1 Vorstellung des Untersuchungsgebiets

Die gewählte Modell-Domäne weist Höhenunterschiede von rund 260 m (220 und 482 m ü. NN) auf und ist in Abbildung 59 dargestellt. Das Untersuchungsgebiet liegt im Stadtzentrum und zieht sich entlang des Nesenbachtals. Das Stadtzentrum zeichnet sich durch den höchsten Anteil an Siedlungs- und Verkehrsfläche in der Stadt Stuttgart aus. Der Anteil an Grünflächen pro Einwohner ist hier am geringsten. Grün- und Erholungsflächen befinden sich nur auf rund 10 % der Gesamtfläche von Stuttgart-Mitte (Landeshauptstadt Stuttgart, Statistisches Amt, 2020). Es herrschen ungünstige klimatische und lufthygienische Verhältnisse (Verband Region Stuttgart, 2008). Die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit ist sehr niedrig ($< 1,5$ m/s) und die Durchlüftungssituation schlecht. Das Nesenbachtal gilt als Kaltluftammelgebiet und Hauptfrisch-/kaltluftschneise und ist damit von besonderer Bedeutung für die nächtliche Abkühlung der Innenstadt (Verband Region Stuttgart, 2008). Die klassifizierte Thermalkarte (Abbildung 60) mit der räumlichen Verteilung der kombinierten Oberflächentemperaturdifferenzen (Abend, Morgen) und -mittelwerte zeigt, dass sich das Untersuchungsgebiet in einer Zone mit schwacher bis starker städtischer Wärmeinsel (gelb bis rot) befindet. Die städtische Wärmeinsel beschreibt die Ausprägung der insbesondere nächtlichen Temperaturerhöhung in der Stadt gegenüber dem Umland. Dies ist auf Faktoren wie die solare Aufheizung der Gebäude, Straßen und Plätze und Abwärme produzierende menschliche Aktivitäten zurückzuführen.

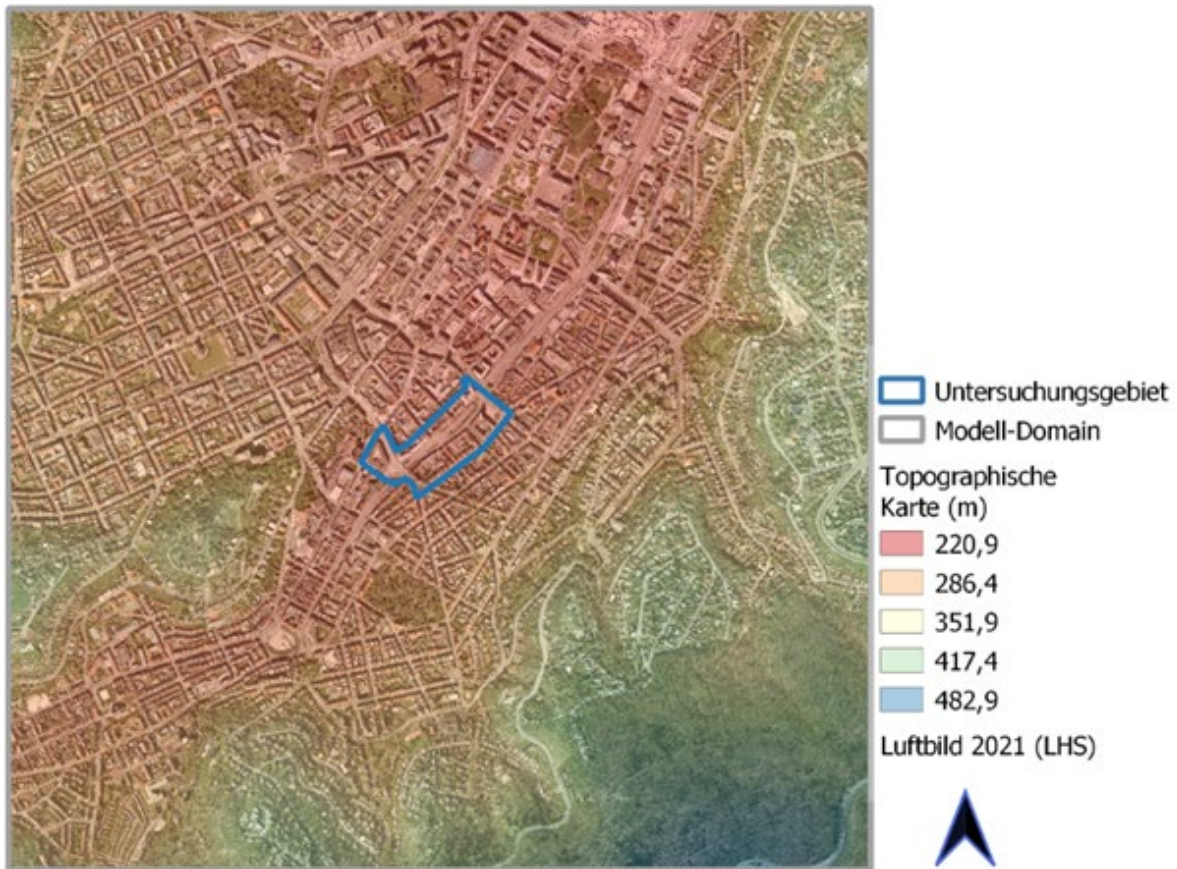


Abbildung 59: Modell-Domäne (graue Linie) und Untersuchungsgebiet (blaue Kontur). Quelle: Digitales Geländemodell VRS, Hintergrundkarte: Luftbild 2021.

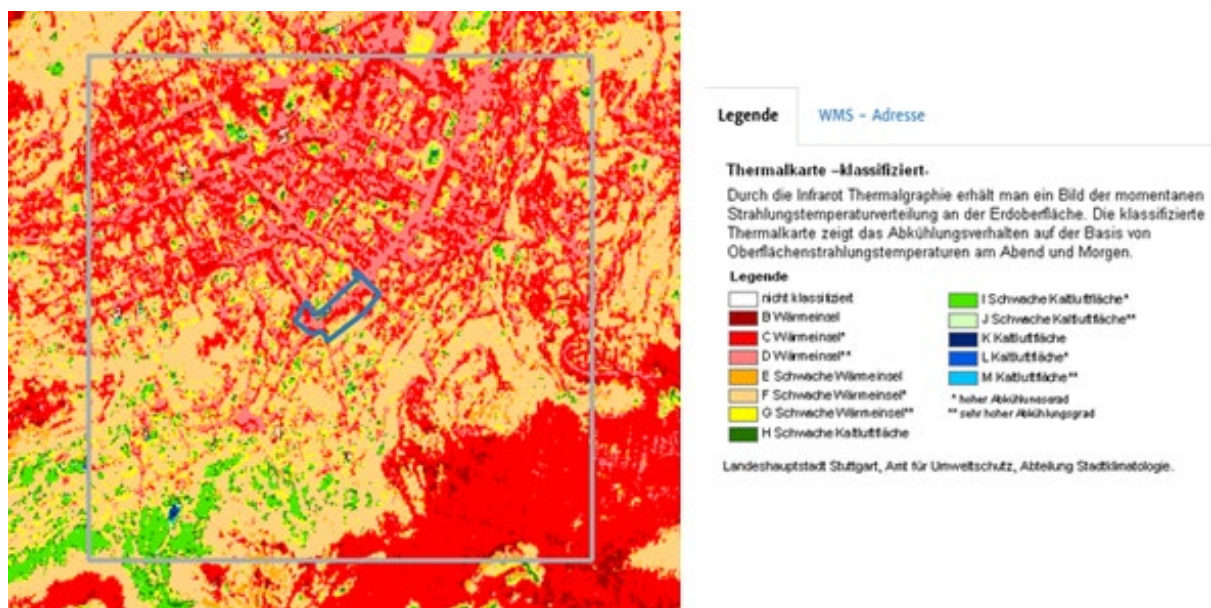


Abbildung 60: Thermalkarte mit Modell-Domäne (graue Linie) und Untersuchungsgebiet (blaue Kontur) Quelle: Thermalkarte VRS, 2008.



3.3.2 Methodik & betrachtete Untersuchungsfälle

Für die Modellierung wird das Stadtklimamodell PALM-4U verwendet. PALM-4U wurde im Rahmen des BMBF-Projekts [UC]² (Urban Climate Under Change) entwickelt. PALM-4U ist ein turbulenzauflösendes, mikroskaliges Modellsystem und besteht aus verschiedenen Modulen, die Simulationen des urbanen Klimas ermöglichen (Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover, 2023). Für die Simulationen zum thermischen Komfort werden folgende Module eingesetzt: das urban land surface, das land surface, das radiation, das plant-canopy und das biometeorological Modul.

Es können zwei verschiedene Nesting-Methoden verwendet werden. Das mesoskalige Nesting ermöglicht es, PALM-4U mit extern abgeleiteten meteorologischen Daten aus mesoskaligen Modellsimulationen oder Messdaten zu steuern. Die zweite Methode ist das PALM to PALM Selbstnesting (LES-LES Nesting), das eine Lupenfunktion für kleine Gebiete ermöglicht, z.B. um die Auswirkungen eines Gebäudes auf die lokale Umgebung zu untersuchen (Maronga et al., 2020; B. Maronga et al., 2015). PALM-4U liefert räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Simulationsergebnisse für eine große Zahl verschiedener klimatischer und human-biometeorologischer Variablen, wie bspw. Lufttemperatur, Luftfeuchte (relative und absolut), Oberflächentemperatur und biometeorologische Parameter (PET, UTCI).

Die Simulationen werden mit einer horizontalen und vertikalen Gitterauflösung von 5 m durchgeführt. Das Modellgebiet umfasst insgesamt eine Fläche von 3000 x 3000 m. Die vertikale Auflösung wird oberhalb von 500 m leicht gespreizt (Faktor 1,08). Der erstellte dynamische Treiber umfasst das potentielle Temperaturprofil, die Windkomponenten und die Mischungsverhältnisse für die zeitlichen und vertikalen Grenzen des Gebiets. Der Modellierungszeitraum beträgt 30 Stunden beginnend um Mitternacht (0:00 UTC). Eine Spinup-Zeit von 24 Stunden wurde eingesetzt. Der Spinup ermöglicht es dem Modell, die Turbulenz unter den angewandten Anfangsbedingungen zu entwickeln.

Zusätzlich zum dynamischen Treiber wird ein statischer Treiber benötigt. Dieser beinhaltet Gelände-, Gebäude-, Landnutzungsdaten und Baumdaten. Die im Modell verwendeten Oberflächen-/Baumaterialien entstammen samt ihren physikalischen Eigenschaften der modellinternen Datenbank und bilden die Wirklichkeit möglichst realistisch ab. Bezüglich der physikalischen Eigenschaften sind insbesondere Rauigkeitslängen, Wärme-Rauigkeitslängen, Albedo, Emissivität oder Blattflächenindex relevant. In Abbildung 61 ist der statische Treiber für den Ist-Zustand mit den modellinternen Klassifizierungen dargestellt. Die Rasterung der Daten auf das gewählte Gitter erfolgt über die Benutzeroberfläche PALM-4U GUI (Hinweis: Die PALM-4U GUI wurde im Rahmen des BMBF-Projekts ProPolis durch das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP in Kooperation mit EC&SD entwickelt.).

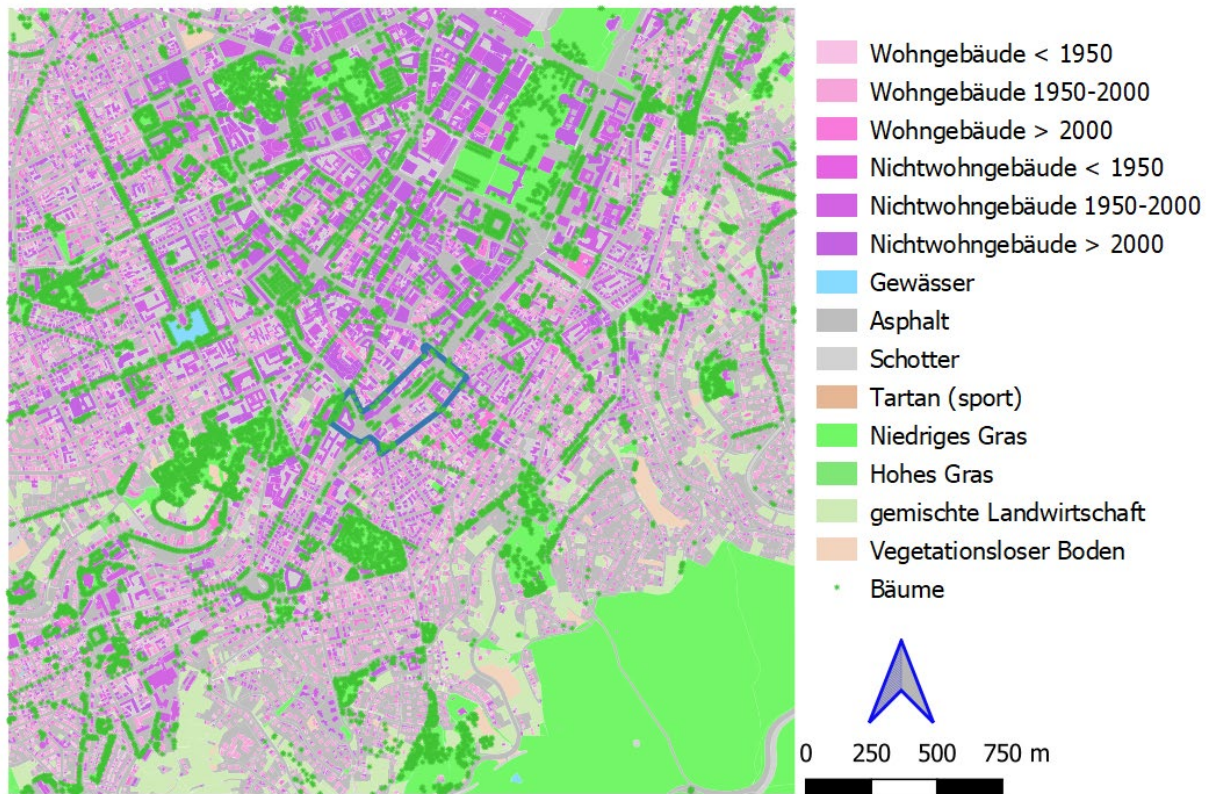


Abbildung 61: Darstellung des statisches Treibers mit PALM-4U Klassen (Gebäude mit Baujahr oder Jahr der letzten Änderung/Sanierung) Quelle: Grundlagedaten VRS/LHS

Betrachtete Untersuchungsfälle

Die Auswirkungen von strukturellen Veränderungen und Anpassungsmaßnahmen auf das Mikroklima und den thermischen Komfort wurden in drei verschiedenen Fällen untersucht. Im ersten Fall ist das Untersuchungsgebiet nicht begrünt und als Ist-Zustand definiert (Abbildung 62). In Abbildung 63 sind die Planungsvariante I und II als weitere Untersuchungsfälle dargestellt und die strukturellen Veränderungen mit den Anpassungsmaßnahmen aufgelistet. Beide Varianten umfassen die Reduzierung der Straße von vier auf drei Fahrspuren. Die strukturellen Veränderungen gemäß dem Siegerentwurf des städtebaulichen Wettbewerbes (asp Architekten GmbH/Koeber Landschaftsarchitektur GmbH, Wettbewerb, 2020) sind in Planungsvariante I berücksichtigt. Im Bereich der gewonnenen Fläche ist zum einen eine Nachverdichtung mit neuen Gebäuden geplant, zum anderen sind weitere Baumstandorte im Straßenraum geplant. Die zusätzlichen sowie die benachbarten Bestandsgebäude sind mit Bauwerk Begrünung (100% Dachbegrünung und 30% Fassadenbegrünung) ausgestattet und die Innenhöfe sind begrünt. In der Planungsvariante II hingegen ist anstelle einer Nachverdichtung die gewonnene Fläche begrünt und mit Bäume versehen. Beide Varianten beinhalten eine parkähnliche Struktur im Bereich des Wilhelmplatzes.

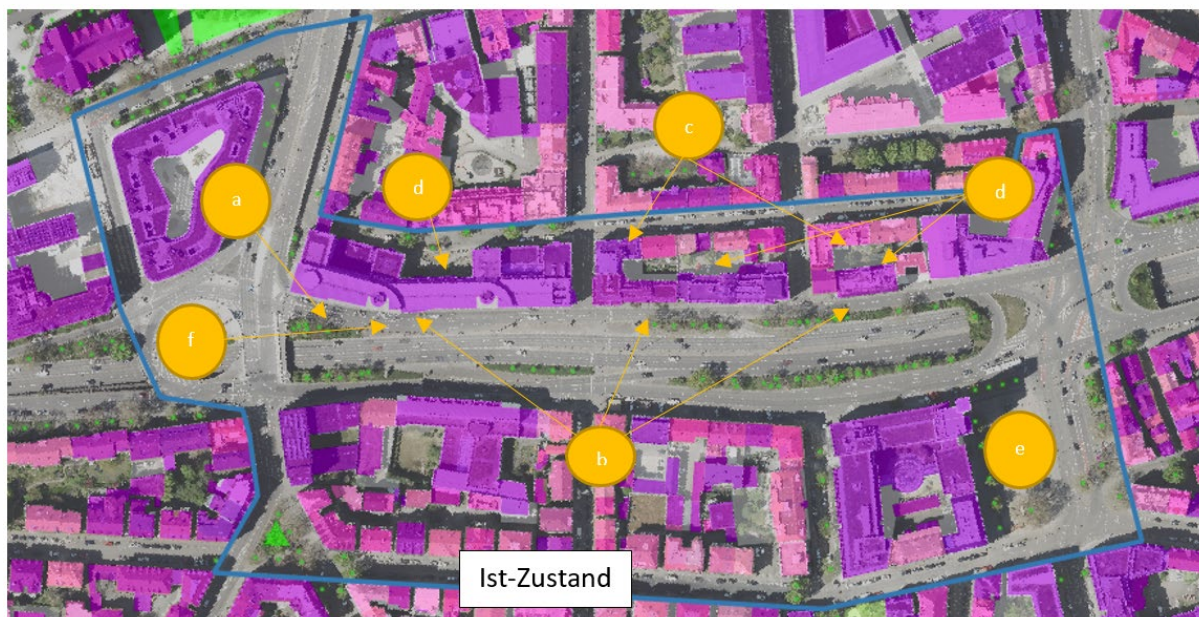


Abbildung 62: Ist-Zustand des Untersuchungsgebietes. Die strukturellen Veränderungen sowie die Anpassungsmaßnahmen sind in orange markiert. Quelle: Gebäudedaten LHS, Hintergrundbild: Luftbild 2021 LHS.

	a. Erhöhung Baumanzahl im Straßenraum b. neue Gebäude mit Bauwerkbegrünung c. Bestandsgebäude mit Bauwerkbegrünung d. Begrünte Innenhöfe e. Parkstruktur (Wilhelmplatz)
	f. Neue Grünflächen mit Erhöhung Anzahl der Bäume im Straßenraum

Abbildung 63: Planungsvariante I (oben) und Planungsvariante II (unten). Links sind die strukturellen Veränderungen und Anpassungsmaßnahmen aufgelistet. Quelle: Gebäudedaten LHS, Hintergrundbild: Luftbild 2021 LHS.



3.3.3 Klimatische Wirksamkeit von Maßnahmen

Lufttemperatur

Abbildung 64 zeigt beispielhaft das Simulationsergebnis für die Lufttemperatur um 14 Uhr in 2,5 m Höhe für den Ist-Zustand. Die Gebäude sind schwarz dargestellt. Die höchsten Temperaturen werden in stark sonnenexponierten und schlecht durchlüfteten Bereichen erreicht und betragen bis etwa 33°C. In stärker beschatteten und begrünten Bereichen werden dagegen etwa 29°C erreicht. Die Veränderungen durch die strukturellen Maßnahmen werden als Differenz der Lufttemperaturen zwischen dem Ist-Zustand und den Planungsvarianten quantifiziert und sind in Abbildung 66 bzw. 65.

Die zusätzliche Bebauung in Variante I (Abbildung 66) führt in Teilbereichen zu deutlich höheren Lufttemperaturen, mit Differenzen von bis zu etwa 3°C. In beiden Varianten zeigen sich Kühleffekte durch Begrünung und Baumschatten, am ausgeprägtesten mit etwa 2°C unter dichterem Baumbestand.

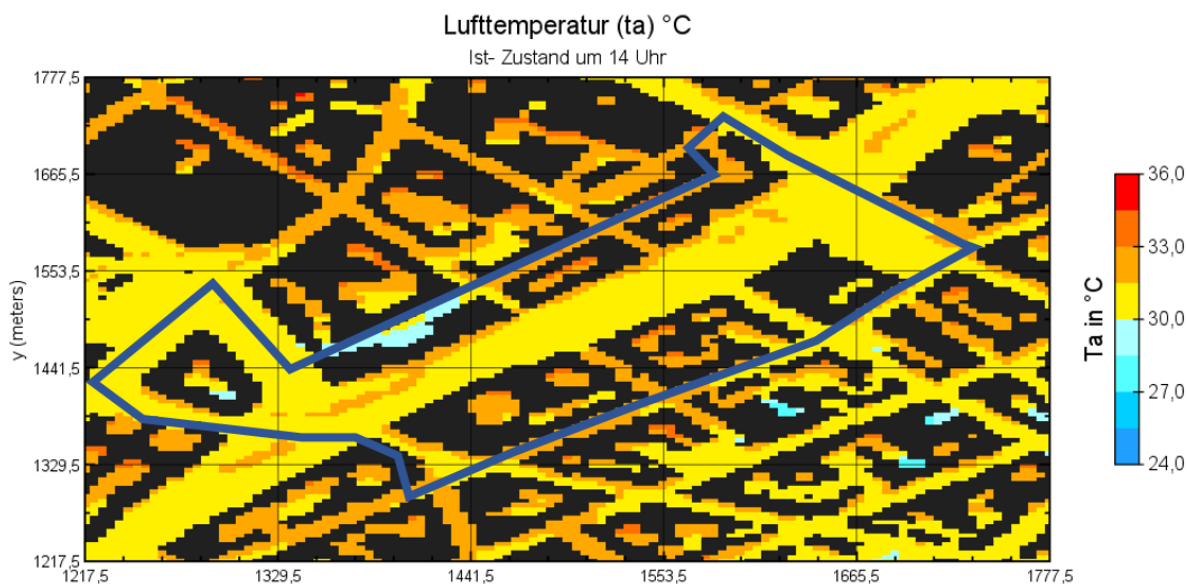


Abbildung 64: Räumliche Verteilung der Temperatur im Untersuchungsgebiet für den Ist-Zustand um 14 Uhr. Die Gebäude sind in schwarz dargestellt. Die blaue Kontur umschließt das Untersuchungsgebiet. Quelle: Gebäudedaten LHS.

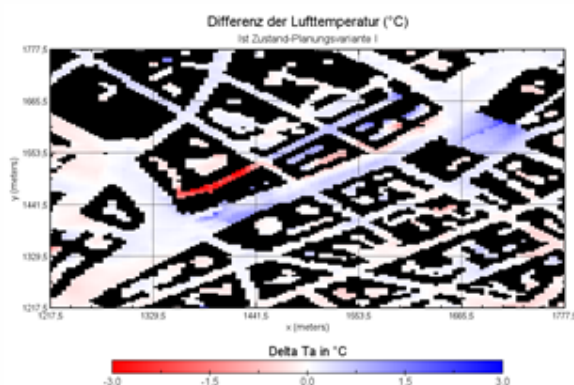


Abbildung 66: Differenz der Temperatur zwischen Ist-Zustand und Planungsvariante I um 14 Uhr. Quelle: Gebäudedaten LHS.

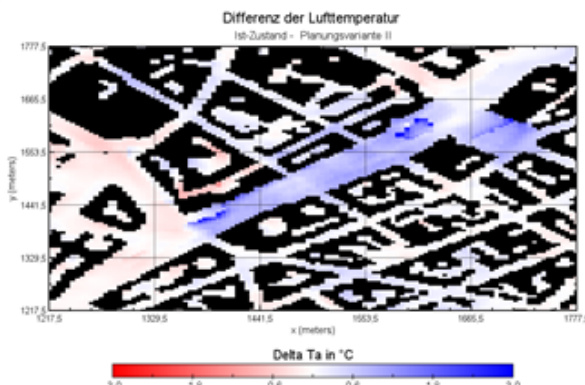


Abbildung 65: Differenz der Temperatur zwischen Ist-Zustand und Planungsvariante II um 14 Uhr. Quelle: Gebäudedaten LHS.



Physiologische Äquivalenttemperatur (PET)

Ein weiteres Ergebnis ist die vergleichende Darstellung der PET um 14 Uhr als Maß für den thermischen Komfort bzw. die Aufenthaltsqualität im Untersuchungsgebiet. Abbildung 67 zeigt die PET-Werte für den Ist-Zustand weist ebenfalls in stark exponierten Bereichen die höchsten Werte von etwa 58°C und damit auf eine extreme Hitzebelastung hin (siehe Kapitel 3.2.3 Tabelle mit PET-Kategorien). Begrünte und verschattete Bereiche reduzieren die Hitzebelastung sehr deutlich, hier werden teilweise knapp 30°C erreicht. Die Veränderungen durch die strukturellen Maßnahmen werden als Differenz der PET zwischen dem Ist-Zustand und den Planungsvarianten quantifiziert und sind in Abbildung 69 bzw. Abbildung 68 dargestellt. Es zeigt sich ein ähnliches, aber im Vergleich zur Lufttemperatur wesentlich stärker ausgeprägtes Bild, d.h. die zusätzliche Bebauung in Variante I (Abbildung 69) führt in Teilbereichen zu deutlich höheren PET-Werten, mit Differenzen von bis zu etwa 18°C. In beiden Varianten zeigen sich Kühleffekte durch Begrünung und Baumschatten, am ausgeprägtesten wiederum mit über 20°C unter dichterem Baumbestand. Insgesamt zeigt damit die Planungsvariante II gegenüber der Variante I, aber auch dem Ist-Zustand deutliche Vorteile hinsichtlich des thermischen Komforts bzw. der Wärmebelastung und damit für die Aufenthaltsqualität tagsüber in diesem innerstädtischen Gebiet.

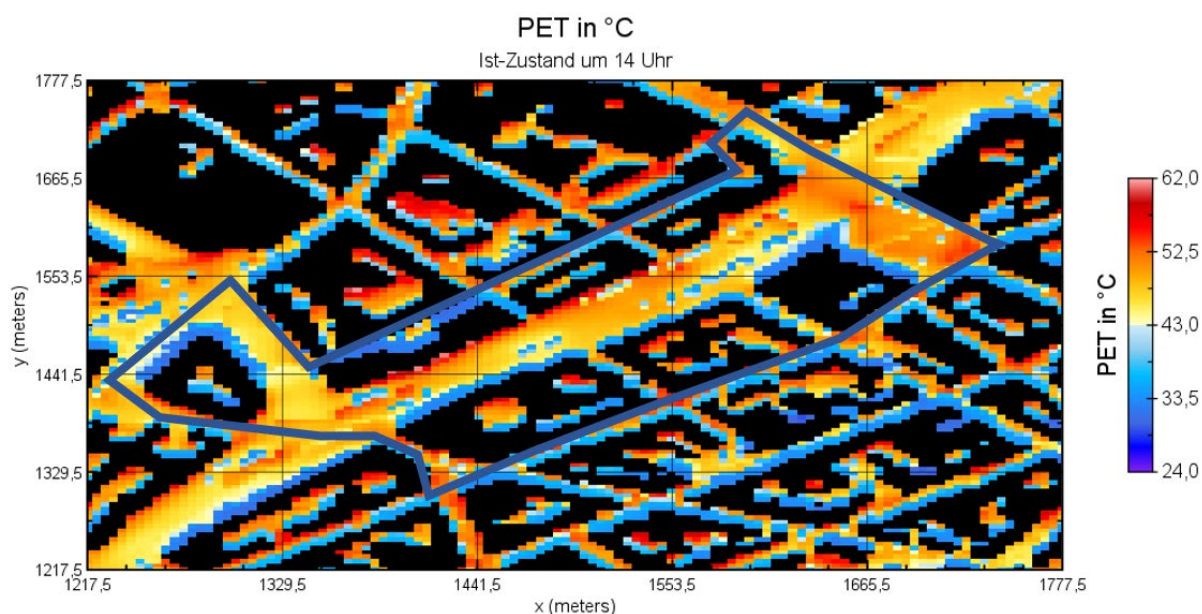


Abbildung 67: Räumliche Verteilung der PET im Untersuchungsgebiet für den Ist-Zustand um 14 Uhr. Die Gebäude sind in schwarz dargestellt. Untersuchungsgebiet (blaue Kontur). Quelle: Gebäudedaten LHS.

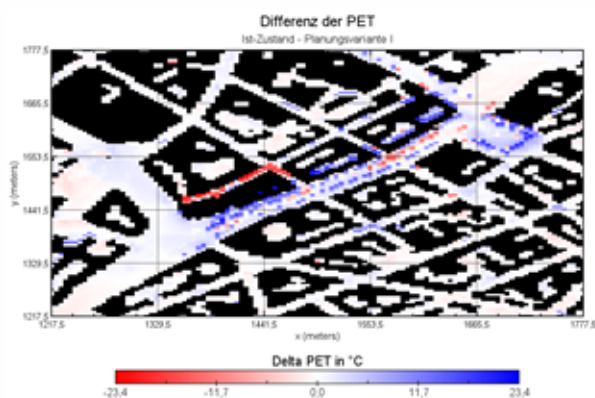


Abbildung 69: Differenz der PET zwischen Ist-Zustand und Planungsvariante I um 14 Uhr.
Quelle: Gebäudedaten LHS.

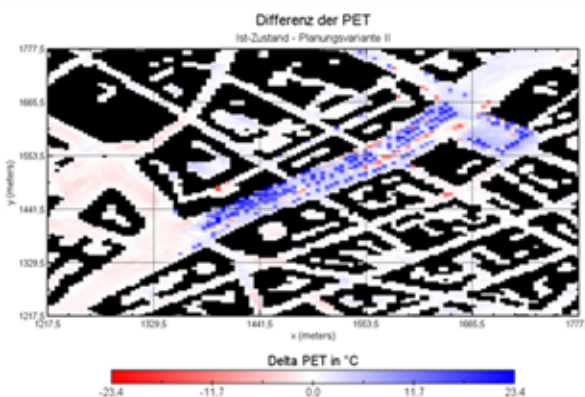


Abbildung 68: Differenz der PET zwischen Ist-Zustand und Planungsvariante II um 14 Uhr.
Quelle: Gebäudedaten LHS

Integrierte Bewertung der Ökosystemleistungen

Analog zum NeckarPark wurde mit den bereits erläuterten Methoden (siehe Kapitel 3.2.5) eine integrierte Bewertung der beiden in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Planungsvarianten im Untersuchungsgebiet "Neuer Stadtraum B14" (im Folgenden kurz "B14-Raum") durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 für die zwei Planungsvarianten jeweils in Referenz zum Ist-Zustand dargestellt und nach Ökosystemleistungen aufgeschlüsselt. Durch die Betrachtung im Vergleich zum Ist-Zustand bilden die physisch und monetär quantifizierten Ökosystemleistungen die Effekte ab, die durch die Maßnahmen der zusätzlichen Begrünung im B14-Raum erzielt werden.

Tabelle 18: Ergebnistabelle der Ökosystemleistungsbewertung im B14-Raum.

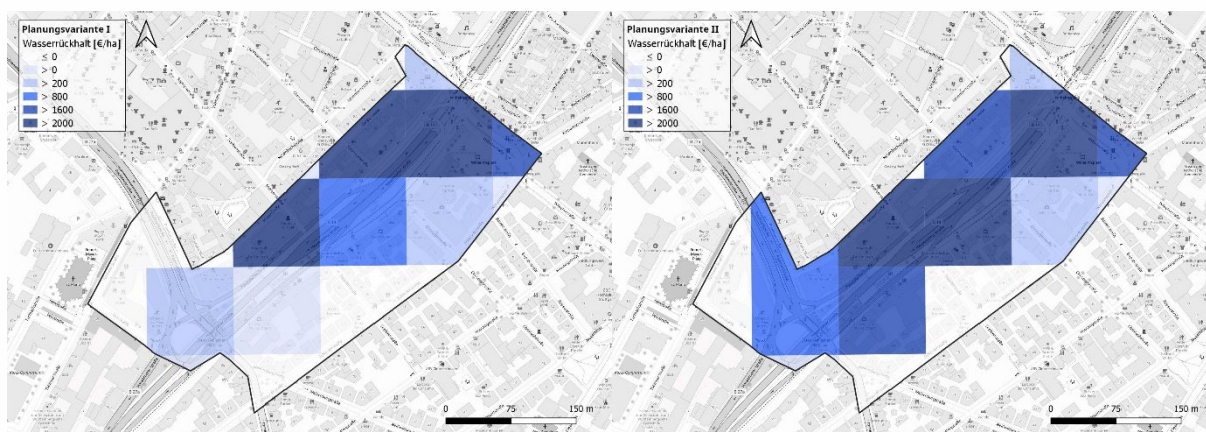
		Planungsvariante I		Planungsvariante II	
Ökosystemleistung		Physische Einheiten	€ pro Jahr	Physische Einheiten	€ pro Jahr
Regulier-ende	Wasserrückhalt	254,2 m³	12.807 €	368,5 m³	18.565 €
	Luftreinhaltung	0,25 t/a	6.109 €	0,21 t/a	6.123 €
	Kohlenstoff-speicherung	21 t/a	4.097 €	19 t/a	3.760 €
Kulturelle Ökosystemleistungen		(Stadtbild)	120.042 €	(Stadtbild)	257.607 €
Gesamt			143.055 €		286.055 €

Regulierende Ökosystemleistungen

Abbildung 70 zeigen die Ergebnisse der Ökosystemleistungsbewertung für die regulierenden Ökosystemleistungen beider untersuchter Planungsvarianten im B14-Raum. Analog zum Fokusraum NeckarPark erfolgt, werden die Ergebnisse in einem 100 m x 100 m Raster dargestellt. Trotz der geringen Größe des B14-Raums lassen sich die in Abbildung 70 dargestellten und den Berechnungen zu Grunde liegenden Planungsvarianten gut wiedererkennen. Der Regenwasserrückhalt ist in



Planungsvariante etwa besonders auf den begrünten Dächern entlang der nördlichen Flanke des B14-Raums hoch. In Planungsvariante II dagegen spielen vor allem die weitreichend auf Teilen der ehemaligen Hauptstätter Straße angelegten Grünflächen im Zentrum des untersuchten Gebiets eine wichtige Rolle. Dies gilt in ähnlicher Weise für die Luftreinigung und die Kohlenstoffspeicherung, wobei für diese beiden Ökosystemleistungen insbesondere die in Planungsvariante II zahlreichen Baumneupflanzungen deutlich wirksam werden. In Summe ergeben sich für Planungsvariante I regulierende Ökosystemleistungen in Höhe von 23.013 € und für Planungsvariante II in Höhe von 28.448 €.



Wasserrückhalt, Planungsvariante I

Wasserrückhalt, Planungsvariante II

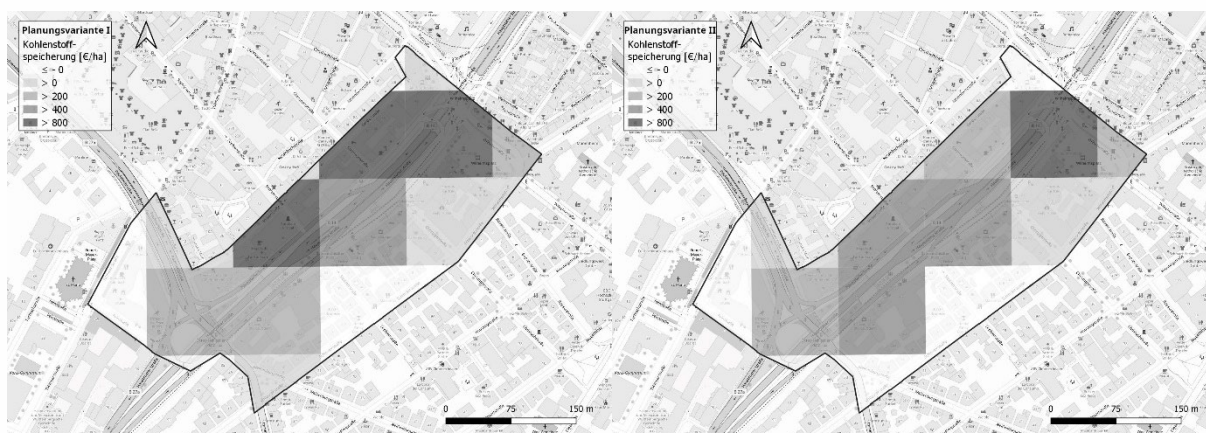
Abbildung 70: Ökosystemleistung Wasserrückhalt im B14-Raum in beiden Planungsvarianten (Quelle: Eigene Berechnungen IÖW, Hintergrundkarte: © [OpenStreetMap Mitwirkende](#)).



Luftreinigung, Planungsvariante I

Luftreinigung, Planungsvariante II

Abbildung 71: Ökosystemleistung Luftreinigung im B14-Raum in beiden Planungsvarianten (Quelle: Eigene Berechnungen IÖW, Hintergrundkarte: © [OpenStreetMap Mitwirkende](#)).



Kohlenstoffspeicherung, Planungsvariante I Kohlenstoffspeicherung, Planungsvariante II
Abbildung 72: Ökosystemleistung Kohlenstoffspeicherung im B14-Raum in beiden Planungsvarianten
(Quelle: Eigene Berechnungen IÖW, Hintergrundkarte: © [OpenStreetMap Mitwirkende](#)).

Kulturelle Ökosystemleistungen

Mithilfe der durchschnittlichen Zahlungsbereitschaften aus dem in Stuttgart durchgeführten Choice Experiment (siehe Kapitel 3.2.4) wurde der Nutzen der zusätzlichen Straßenbaumbepflanzung und der zusätzlichen Grünflächen, die durch Entsiegelung geschaffen werden, bewertet. Die gesamte durchschnittliche Zahlungsbereitschaft in Stuttgart liegt für die genannten Klimaanpassungsmaßnahmen im B14-Raum in Planungsvariante I bei 120.042 € pro Jahr und in Planungsvariante II bei 257.607 € pro Jahr. Die deutlich höhere Wertschätzung für Planungsvariante II ergibt sich aus der deutlich höheren Anzahl gepflanzter Bäume (Variante I: +73, Variante II: + 129 gegenüber dem Ist-Zustand) und geschaffener Grünfläche (Variante I: +8.800 m², Variante II: +19.400m²). Die in Variante I geplante umfangreich Dach- und Fassadenbegrünung dagegen wurde hier nicht bewertet, da im Choice Experiment dafür keine Zahlungsbereitschaften ermittelt wurden. Der Wert der kulturellen Ökosystemleistungen für Planungsvariante I ist somit eher eine Unterschätzung, während Planungsvariante II, die keine Dach- und Fassadenbegrünung aufweist, genauer abgebildet wird.

3.3.4 Bewertung der regional-ökonomischen Effekte

Für folgende Klimaanpassungsmaßnahmen im B14-Raum wurden die regional-ökonomischen Effekte untersucht: Begrünung von geeigneten Dachflächen, Entsiegelung und Begrünung öffentlicher und gewerblicher Freiflächen sowie Anpflanzung von Bäumen im Straßenbereich. Die Umsetzungsumfänge dieser Grünmaßnahmen im Untersuchungsgebiet wurden entsprechend der in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Planungsvariante I definiert.¹ Mit der Umsetzung fallen zum einen einmalige Investitionskosten an und zum anderen jährliche Pflegekosten der Grünflächen und der Straßenbäume. Die Pflegekosten werden dabei nur in der Höhe der zusätzlichen Grünflächen bzw.

¹ Da sich die Planungsvarianten im Detail im Laufe der mikroklimatischen Modellierung noch leicht verändert haben, stimmen sie mit den hier angenommenen Umfängen nicht exakt überein. Die Abweichungen sind jedoch minimal (z. B. +73 Bäume in der finalen Planungsvariante I, hier + 70), sodass die hier generierten Ergebnisse die regional-ökonomischen Effekte der Planungsvariante I angemessen abbilden.



Straßenbäume berücksichtigt. Die angesetzten Umsetzungsumfänge sowie Kosten sind in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Umsetzungsumfänge der Klimaanpassungsmaßnahmen im Untersuchungsgebiete NeckarPark und damit verbundene Investitions- und Pflegekosten (netto in Euro2022). Quelle: eigene Berechnungen IÖW.

Grünmaßnahmen	Umsetzungsumfang	Jährliche Investitionskosten	Jährliche Pflegekosten
Straßenbäume	70 Stk.	42.800€	3.000€
Gründächer	11.284 m ²	108.400€	16.900€
Freiflächen	8.203 m ²	18.500€	4.000€

Bei den mit der Umsetzung der Grünmaßnahmen und der Grünflächenpflege betrauten Akteuren lösen die hochgerechneten Investitions- und Pflegekosten Umsätze in gleicher Höhe aus. Diese wirtschaftlichen Tätigkeiten wiederum generieren Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte in der Region, sofern diese Akteure in der Region ansässig sind. Die einzelnen Bestandteile der Wertschöpfung summieren sich dabei über alle Grünmaßnahmen hinweg auf ca. 97.000€ auf (Abbildung 73). Dabei entfällt der größere Teil auf Beschäftigteneinkommen, die mit den berechneten ca. 2,1 Vollzeitarbeitsplätzen verbunden sind. Einen ebenfalls hohen Anteil nehmen die Unternehmensgewinne ein, die mit den Aktivitäten generiert werden. Auf Beschäftigteneinkommen und Unternehmensgewinne werden zudem Steuern gezahlt, die zum Teil in die kommunalen Haushalte der Region fließen. Beim hier unterstellten Umfang der Grünmaßnahmen können die Kommunen mit zusätzlichen jährlichen Steuereinnahmen in Höhe von ca. 5.200€ rechnen.

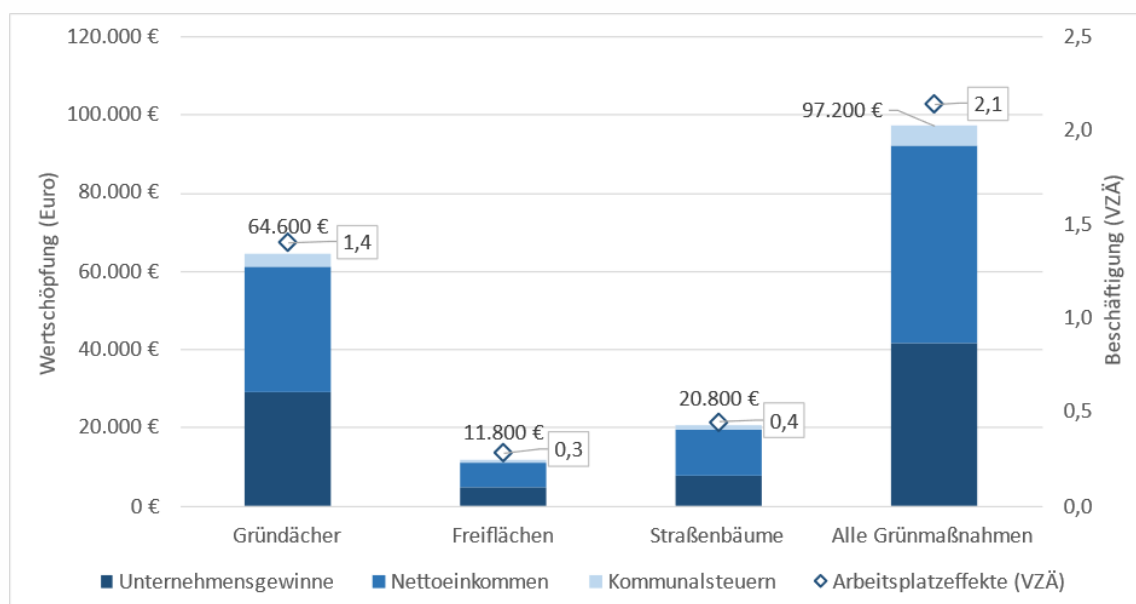


Abbildung 73: Wertschöpfungseffekte der Grünmaßnahmen im Untersuchungsgebiet B14-Raum, nach Wertschöpfungsbestandteilen und Grünmaßnahmen (in Euro2022). Quelle: eigene Berechnungen IÖW.

Die Verteilung der ermittelten Wertschöpfung auf die beteiligten Wirtschaftszweige macht deutlich, dass der größte Teil bei den Garten- und Landschaftsbauunternehmen mit ca. 47.000€ anfällt, welche



die Grünmaßnahmen direkt umsetzen (Abbildung 74). Dazu gehören aber auch weitere Wirtschaftszweige, wie bspw. die Bauwirtschaft (ca. 17.600 €) oder Architektur- und Ingenieurbüros (ca. 6.800 €), welche vorgelagerte Planungstätigkeiten übernehmen. Unter „sonstige Wirtschaftszweige“ (ca. 16.300 €) sind sämtliche Branchen gefasst, die als Zulieferer mit den anderen aufgeführten Wirtschaftszweigen verflochten sind.

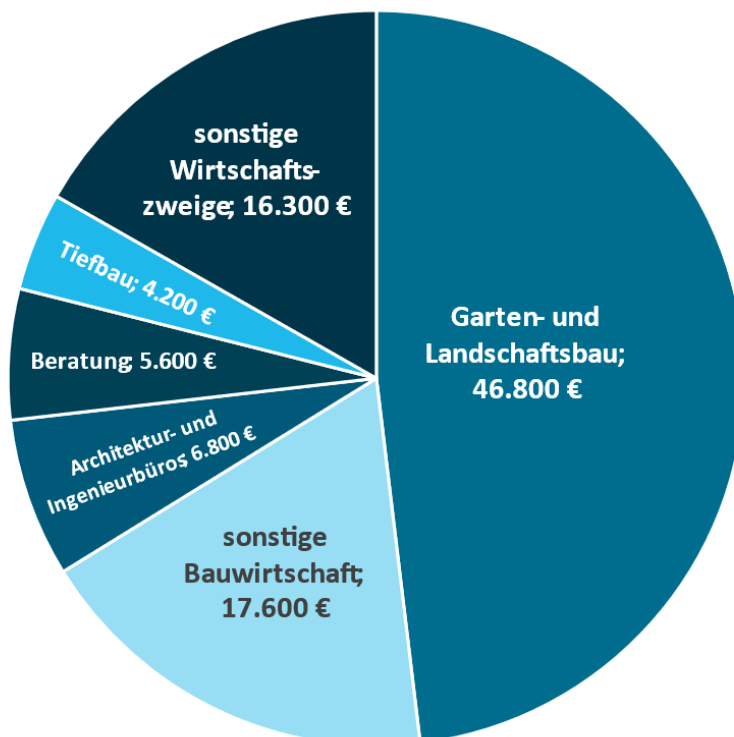


Abbildung 74: Verteilung der Wertschöpfungseffekte auf die regionalen Wirtschaftszweige über alle Maßnahmen im B14-Raum, Quelle: eigene Berechnungen IÖW.

Kapitel 4

Der Klimaatlas als Online-Informations- und Beratungssystem





4. Der Klimaatlas als Online- Informations- und Beratungssystem

Um den Belang der Klimaanpassung nachhaltig und transparent in formelle und informelle Planungsprozesse einbringen zu können, braucht es fundierte und belastbare Grundlagen. Mit den im Rahmen von ISAP entwickelten wissenschaftlichen Produkten sind Entscheidungsträger:innen sowie Planungspraktiker:innen zu den Klimawandelfolgen informiert, in der Lage Räume mit Handlungserfordernis im kommunalen wie auch regionalen Kontext identifizieren zu können und darauf aufbauend Entscheidungen hinsichtlich räumlich zu priorisierender Entwicklungsbereiche definieren und über die umzusetzenden Maßnahmen entsprechend ihrer intendierten Wirkung entscheiden zu können. Diese Grundlagen befähigen die relevanten Akteur:innen den Belang in Planungs- und Abwägungsprozessen berücksichtigen und somit konkret zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels beitragen zu können. Zur Erhöhung der Reichweite der entwickelten Produkte wurde gemeinsam mit den Projektpartner:innen ein digitales Tool konzipiert und umgesetzt. Vorbild dafür war der seit 1992 etablierte stadt-regionale Klimaatlas der Region Stuttgart bzw. des ehemaligen Nachbarschaftsverbands Stuttgart. Im Folgenden wird dieses Tool hinsichtlich seiner Konzeption und Umsetzung beschrieben. Im Rahmen des ISAP-Projekts erfuhr der etablierte regionale Klimaatlas ein Update, wurde weiterentwickelt sowie um neue Produkte erweitert und für künftige Nutzer:innen im Rahmen eines dafür vorgesehenen digitalen Tools aufbereitet.

4.1 Vorstellung des Online-Tools

Zuständigkeit: Arbeitspaket 5 – VRS, indblik.io, IREUS, LHS, KIT, IÖW, Difu, P-AG, Lohmeyer

Das Online-Informations- und Beratungstool zur stadt-regionalen Klimaanpassung (Klimaatlas) setzt sich aus den verschiedenen wissenschaftlichen Produkten, welche im Rahmen des Projekts ISAP erarbeitet wurden, zusammen. Seitens der kommunalen und regionalen Planungspraxis wurden im Rahmen des ersten Arbeitspakets in ISAP, Bedarfe und Anforderungen identifiziert und definiert, welche den Charakter des Tools sowie die Ausgestaltung einzelner wissenschaftlicher Produkte determinieren (siehe Kapitel 4.2). Diese Einbringung der Bedarfe und Anforderungen seitens der künftigen Nutzer:innen wurde im Rahmen des Projekts als iterativer Prozess verstanden. Je nach Fortschritt im Erstellungsprozess des jeweiligen wissenschaftlichen Produkts fand ein Abgleich mit den Bedarfen und Anforderungen statt, bzw. eine Nachjustierung und Verfeinerung der Nutzer:innenbedarfe und -anforderungen. Ergänzend hierzu diente das erprobte Instrument des regionalen Klimaatlas aus 1992 und 2008 teilweise als rahmengebende Struktur für die Entwicklung zweier Teilbereiche des Tools (Säule 1 und 3). Zweck des Klimaatlas ist es, die für eine fehlerfreie Abwägung klimatischer und lufthygienischer Belange benötigten Grundlagenmaterialien bereitzustellen und für die Planungen des Verbandes bzw. der Städte und Gemeinden in der Region Stuttgart aufzubereiten. Die Produkte aus ISAP bieten ein breites Spektrum an Elementen und Funktionen, welche auf eine Verbesserung dieser Materialien im Hinblick auf räumliche Entscheidungsprozesse hinwirken. Der Charakter der in das Tool zu integrierenden Elemente reicht von kartografischen Darstellungen auf regionaler Ebene sowie räumlichen Untersuchungen bis hin zu weiterführender Information zur Klimaanpassung und deren Einordnung in Planungsprozesse. Die Konzeption des Tools ist somit eng gekoppelt an die jeweilige Ausgestaltung der wissenschaftlichen Produkte. Diese Ausgestaltung ist Teil des wissenschaftlichen Erstellungsprozesses, daher wurde der Prozess zur Entwicklung des künftigen Online-Informations- und Beratungstools als iterativer Prozess eines kontinuierlichen Nachjustierens und -besserns um weitere Elemente und Funktionen verstanden. Der gesamte Prozess wurde dabei in enger Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Praxis vollzogen.



Das Konzept des Online-Tools basiert auf drei Säulen, über welche die im Rahmen des Projekts erarbeiteten Klimainformationen zur Verfügung gestellt werden. Diese umfassen:

- Säule 1: Regionale Klimainformation - kartografische Informationen auf regionaler Ebene
- Säule 2: Klimaangepasste Raumentwicklung - beispielhafte Wirksamkeiten ausgewählter Klimaanpassungsmaßnahmen
- Säule 3: Wissensbibliothek - textliche Erläuterungen und weiterführende Untersuchungen und Analysen

Das verbindende Element dieser drei Säulen stellt das Navigationskonzept dar, welches in weiterer Folge neben diesen drei Säulen näher erläutert werden.

4.1.1 Säule 1: Regionale Klimainformation

Ziel des Projekts ISAP war es unter anderem, auf eine Verbesserung der Planungs- und Entscheidungsgrundlagen hinsichtlich der stadt-regionalen Klimaanpassung hinzuwirken. Hierzu wurden die Forschungsergebnisse in Form von kartografischen Informationen auf regionaler Ebene aufbereitet. Diese können für die kommunale Planungspraxis in den 179 Kommunen in der Region genutzt werden, aber auch den Planungsprozessen der regionalen Planungspraxis zugrunde gelegt werden. In der kommunalen Planungspraxis können die entwickelten Planungsgrundlagen dabei auf Maßstabsebene der Flächennutzungsplanung angewendet werden. Als Vorbild hinsichtlich der Struktur der Datenbereitstellung und des Konzepts zur 1. Säule diente der etablierte Regionale Klimaatlas (seit 2008 regionsweit verfügbar). Dieser erfuhr im Rahmen des Forschungsprojekts ein qualitatives Update, eine weitreichende Weiterentwicklung und quantitative Erweiterung. Eine Auswahl, der ins Tool zu integrierenden Karten wurde im Projektverlauf unter Beteiligung der Projektpartner sowie gemeinsam mit gezielt am Prozess beteiligten künftigen Nutzer:innen getroffen.

Die 1. Säule umfasst drei thematische Bereiche:

Der Teilbereich Klimawandel in der Region Stuttgart stellt den Nutzer:innen Grundlageninformationen zum beobachteten und projizierten Klimawandel in der Region zur Verfügung. Vorgestellt werden Ergebnisse zu 15 ausgewählten Klimakenngrößen im Bereich Temperatur und Niederschlag. Die Daten liegen in einem 2,8 km Raster bzw. 100 m Raster vor. Ziel dieses Teilbereichs ist es die Nutzer:innen über den Klimawandel zu informieren und zu sensibilisieren. Über einen automatisch eingestellten Split-Screen wird der Beobachtungszeitraum mit dem 2-Grad-Szenario gleichzeitig dargestellt. Nutzer:innen haben so die Möglichkeit die räumlichen Darstellungen direkt und variabel miteinander vergleichen zu können.

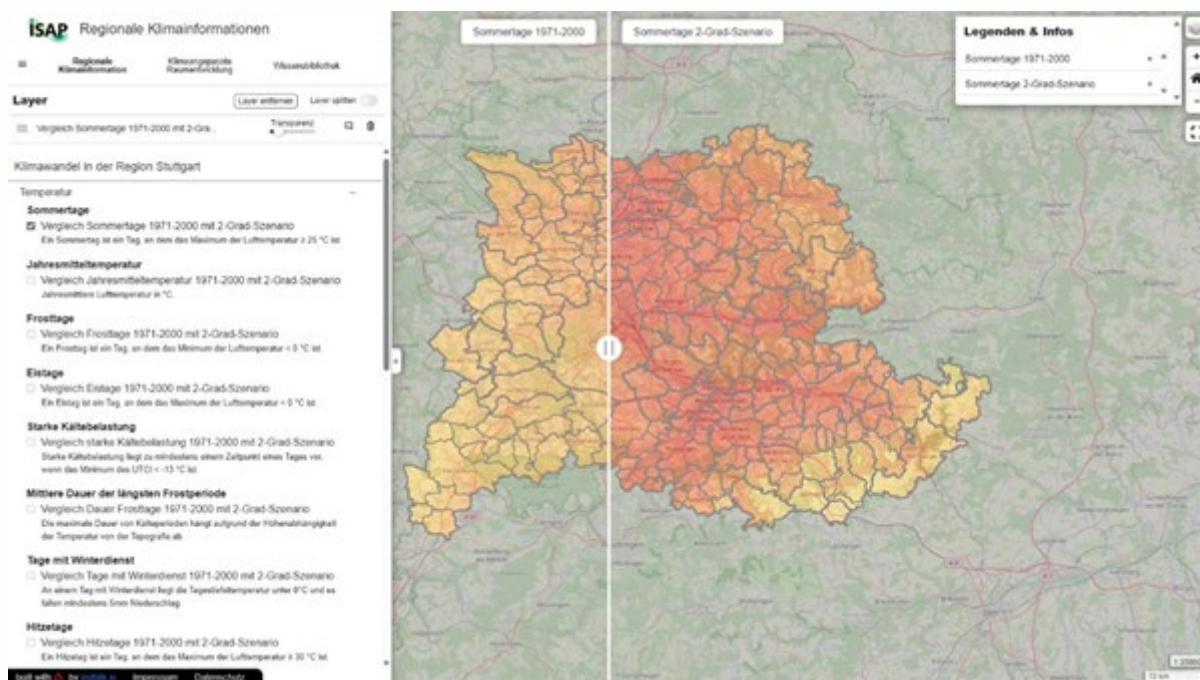


Abbildung 75: Säule 1, Vergleich Darstellung Sommertage im Beobachtungszeitraum und GWL2.

Erste textliche Erläuterungen zu den jeweils ausgewählten Klimakenngrößen finden sich in den entsprechenden Textboxen „Legenden & Infos“, welche im rechten Teil des Tools aufrufbar sind. Zu den vertiefenden Erläuterungen und statistischen Auswertungen der jeweiligen Klimakenngrößen gelangt man über den hier befindlichen Link zum entsprechenden Wissensbibliothekeintrag.

Klima, Luft sowie Starkregen sind als wichtige Belange der räumlichen Planung im Rahmen der Abwägung Bestandteil der Regionalplanung, der Bauleitplanung, von Umweltverträglichkeitsprüfungen und Standortuntersuchungen. Für eine sachgerechte Berücksichtigung dieser Belange werden flächenbezogene Informationen benötigt. Im Teilbereich Planungsgrundlagen für die Region Stuttgart können jene Kartenwerke abgerufen, die in den Planungsprozess eingestellt werden. Dieser Teilbereich umfasst kartografische Informationen zur Kaltluft in der Region, zur Klimaanalyse sowie Planungshinweise und zu den regionalen Starkregengefahren.

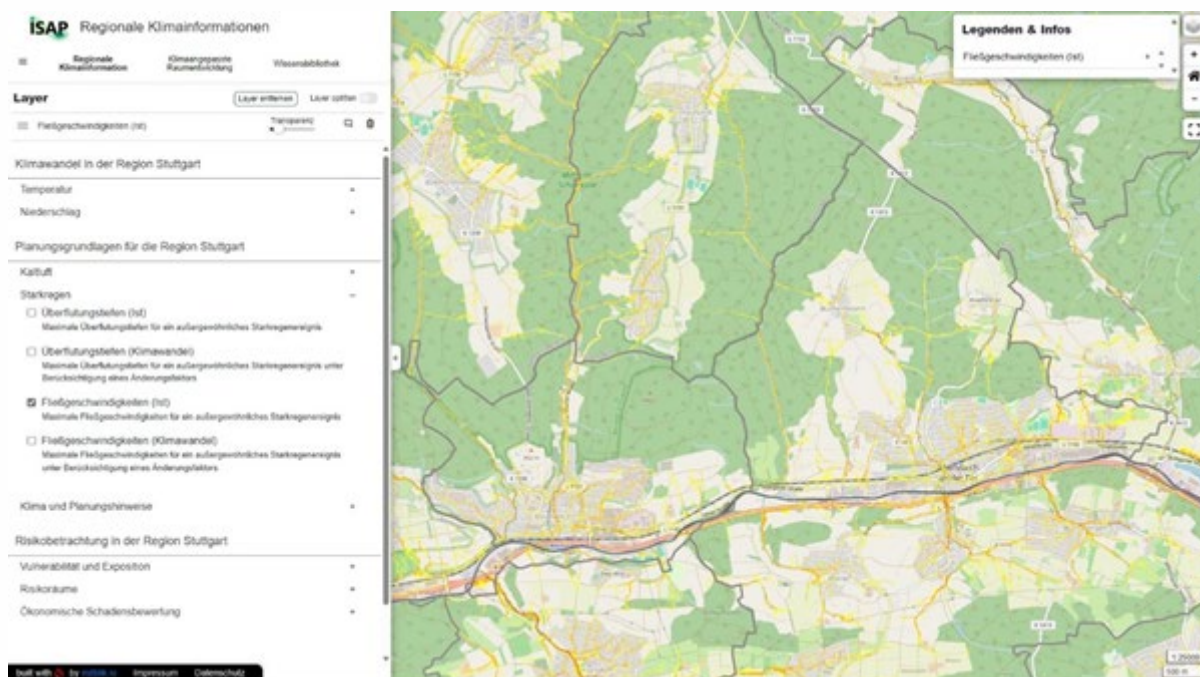


Abbildung 76: Säule 1, Darstellung der Fließgeschwindigkeiten.

Erste textliche Erläuterungen zu den jeweils ausgewählten Layern finden sich in den gleichermaßen in den entsprechenden Textboxen „Legenden & Infos“, welche im rechten Teil des Tools aufrufbar sind. Für die Klimaanalysekarte, die Planungshinweiskarte sowie die Starkregengefahrenkarten wurden im Rahmen des Projekts umfangreiche Lesehilfen entwickelt, welche ebenfalls in der Wissensbibliothek aufgerufen werden können. Die Lesehilfen enthalten insbesondere Informationen zur Methodik der komplexen Kartenwerke.

Der dritte und letzte Teilbereich der 1. Säule, Risikobetrachtung in der Region Stuttgart umfasst Kartenwerke zur Vulnerabilität und Exposition, zu Risikoräumen in der Region sowie zu den ökonomischen Schadensbewertungen. Diese komplexen, aggregierten Analysen liefern Nutzer:innen zusätzliche Informationsgrundlagen und Einschätzungen hinsichtlich der aus klimatischer und sozio-ökonomischer Sicht vulnerablen Bereiche in der Region. Darauf aufbauend kann die Planung und Umsetzung bestimmter Maßnahmen durch die Verwaltung und Entscheidungsträger:innen räumlich priorisiert werden.

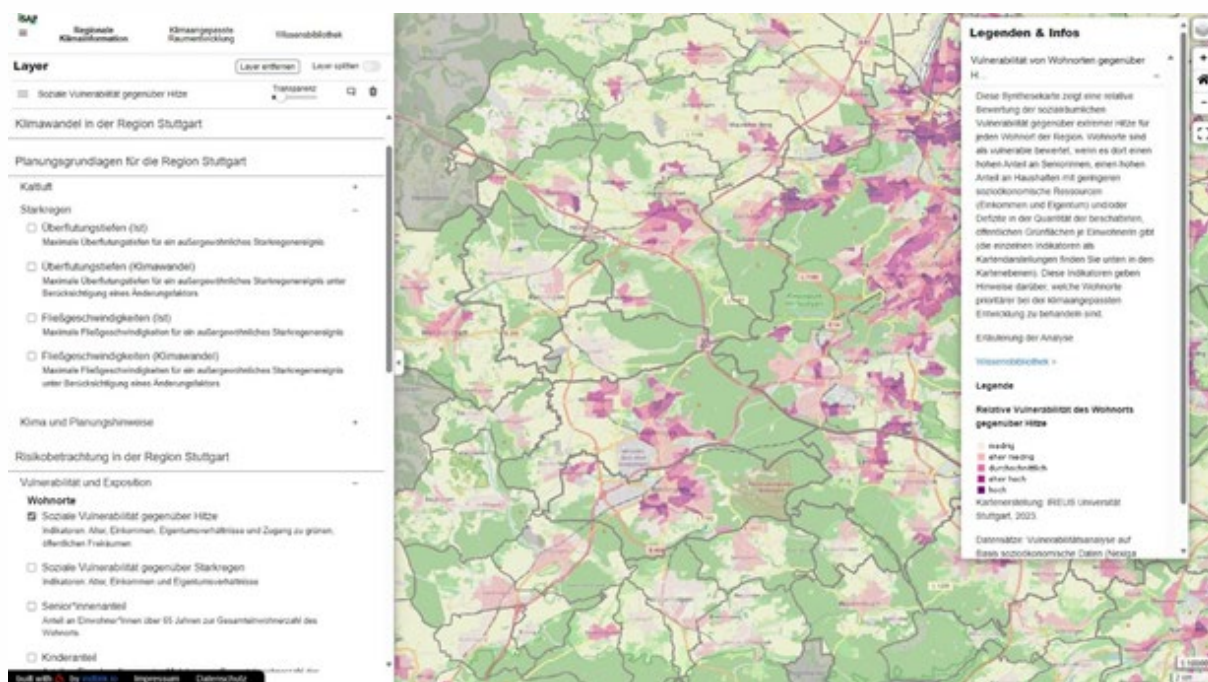


Abbildung 77: Säule 1, Soziale Vulnerabilität gegenüber Hitze.

Auch für diesen Bereich können erste textliche Erläuterungen in der Textbox abgerufen werden. Die Verlinkung zu einer ausführlichen Lesehilfe, die Informationen zu den Zielen der Analyse, zur Methodik wie auch den Datengrundlagen enthält, erfolgt ebenso hierüber.

4.1.2 Säule 2: Klimaangepasste Raumentwicklung

Eine klimaangepasste Raumentwicklung umzusetzen, impliziert die Realisierung von räumlichen Anpassungsmaßnahmen. Ohne diese kann kein realer Beitrag zur Anpassung an den Klimawandel geleistet werden. Trotz des multifunktionalen Charakters und Potentials von Anpassungsmaßnahmen müssen diese in erster Linie hinsichtlich ihrer physikalischen Wirksamkeit ihren Zweck erfüllen. D. h. einen konkreten Beitrag bspw. zur Reduzierung der Hitzebelastung leisten oder im Falle eines Starkregenereignisses für eine schadlose Ableitung des Regenwassers sorgen. Um die Ausgestaltung dieser Maßnahmen einerseits nachhaltig planen und andererseits deren Umsetzung in politischen Gremien diskutieren und vorbereiten zu können, helfen Simulationen in Modellen mittels welcher die Wirkung der Maßnahmen nachgewiesen und transparent dargestellt werden kann.

Weiter gilt es an Schnittstellen zwischen den einzelnen Ebenen im Planungssystem Übersetzungsleistung zu verrichten. Wie können die Planungsgrundlagen auf regionaler Ebene in den kommunalen Planungen angewandt werden? Welche Daten und Methoden sind für eine Maßnahmenplanung relevant und wie kann deren Ausgestaltung so wirksam wie möglich angelegt werden? Säule 1 im ISAP-Tool liefert die Grundlagen für Planungs- und Abwägungsentscheidungen auf regionaler Ebene. Darauf aufbauend werden verbindliche regionalplanerische Ausweisungen vorgenommen. Bis zur Ebene der Flächennutzungsplanung können diese jedoch auch direkt für kommunale Planungsfragen genutzt werden.

Im Rahmen des Projekts wurden in verschiedenen Arbeitspaketen vertiefende Untersuchungen in ausgewählten Räumen vorgenommen. Diese ausgewählten Räume bilden verschiedene planerische Maßstabsebenen für die Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen ab. Dargestellt werden die möglichen Anwendungsbereiche der Planungsgrundlagen auf interkommunaler wie auch kommunaler



Ebene, entwickelt im Rahmen von ISAP. Auf interkommunaler Ebene wurden im Bereich der Neckartalachse zwischen Stuttgart und Esslingen/ Neckar Maßnahmen zur Starkregenvorsorge näher untersucht (siehe Kapitel 3.1). Auf Bebauungsplanebene wurden weitere Maßnahmen zur Hitzevorsorge einer vertiefenden Untersuchung unterzogen (siehe Kapitel 3.2).

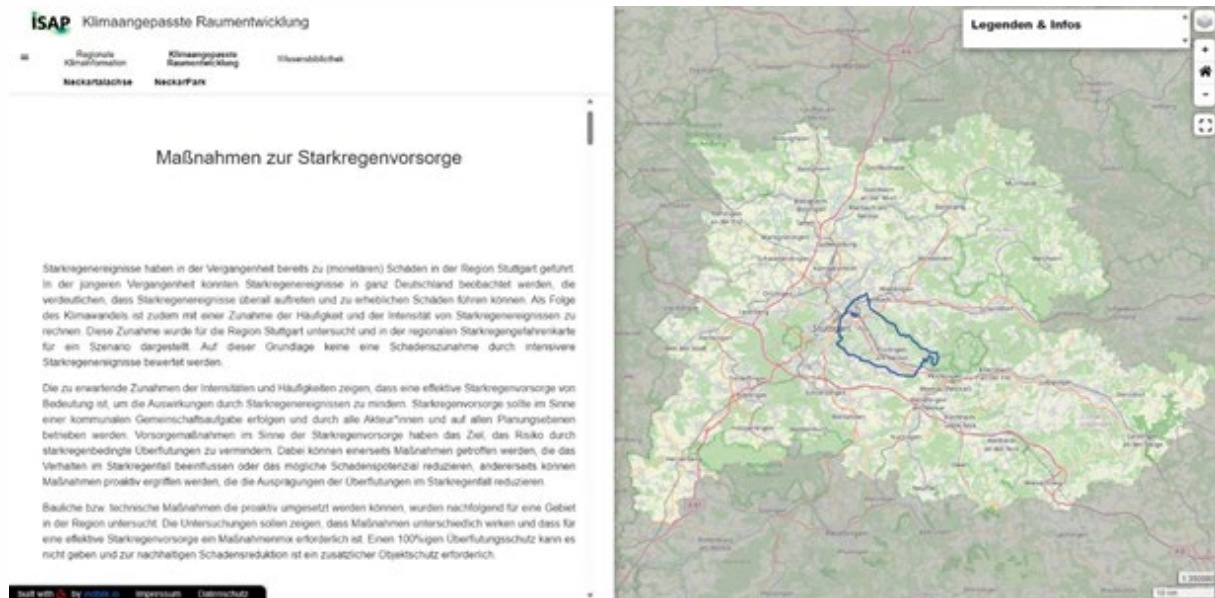


Abbildung 78: Säule 2, Maßnahmen zur Starkregenvorsorge.

Das Konzept dieses Teilbereichs des Online- Informations- und Beratungssystems sieht vor, die Nutzer:innen einerseits umfassend, aber doch spielerisch und anwendungsbezogen über die Maßnahmenausgestaltung und -wirkung im jeweiligen Raum zu informieren. Inspiration bei der Umsetzung bot dabei der sog. Scrolltellingansatz, eine Erzählform, bei der Inhalte den Nutzer:innen in einem Scrollformat frei zugänglich sind. Die Nutzer:innen haben so die Möglichkeit sich die dargestellten Inhalte flexibel in ihrem eigenen Tempo aneignen zu können. Neben einer textlichen Einführung in den jeweiligen thematischen Bereich der Klimaanpassung (Starkregen- oder Hitzevorsorge), wird das Untersuchungsgebiet zunächst dargestellt und näher beschrieben. Denn die Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen hängt in höchstem Maße von den jeweiligen räumlichen Ausgangsbedingungen, d. h. topografie, Landnutzung etc., ab. Im nächsten Schritt wird die Methodik zur entwickelten Maßnahmensimulation, welche auf Basis der regionalen Planungsgrundlagen durchgeführt wurde, erläutert. Ziel ist es hierbei die Methodik transparent zu kommunizieren, sodass eine Übertragbarkeit der Berechnung der Maßnahmen auf weitere Räume in der Region gegeben ist. Das Tool wie auch die den Berechnungen zugrundeliegenden Daten stehen allen Interessierten zur Verfügung. Die Ergebnisse der Maßnahmenberechnungen liegen als textliche Erläuterungen wie auch in Kartenform vor.



Abbildung 79: Säule 2, Maßnahmen zur Starkregenvorsorge.

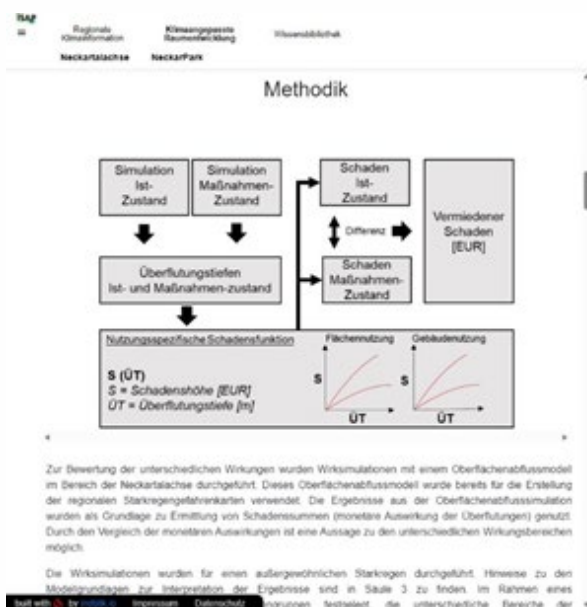


Abbildung 80: Säule 2, Maßnahmen zur Starkregenvorsorge.



4.1.3 Säule 3: Wissensbibliothek

Zur erfolgreichen Integration der Klimaanpassung in räumliche Planungsprozesse sowie der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen bedarf es neben den Planungsgrundlagen in Kartenform (siehe Kapitel 4.1.1) sowie den Wirksamkeitsanalysen zu Anpassungsmaßnahmen (siehe Kapitel 4.1.2) weiterführender Informationen zur Sondierung des Themas und Wissensverdichtung. Ziel ist es, den Nutzer:innen, insbesondere planenden Akteur:innen sowie Entscheidungsträger:innen hinsichtlich der Anwendung und Handhabung der erarbeiteten Entscheidungsgrundlagen umfassendes Wissen zur Verfügung zu stellen. Nachdem erste textliche Erläuterungen in Säule 1 und 2 dem jeweiligen wissenschaftlichen Produkt beiliegend den Nutzer:innen zur Verfügung stehen, werden im Rahmen der Wissensbibliothek (Säule 3) des Online-Tools vertiefende Informationen zu den in Säule 1 und 2 aufgetragenen Inhalten bereitgestellt.

Die Beiträge in der Wissensbibliothek reichen von Erläuterungen zu zentralen Begriffen und zu bereits etablierten sowie im Rahmen des Projekts entwickelten Methodiken zur Erstellung von Planungsgrundlagen über Verwendungshinweise und Handreichungen wichtiger Daten, Simulationsmodelle und den Planungsgrundlagen sowie weiteren Informationen zu relevanten Strategien und Dokumenten. Das Material kann sowohl zur Sensibilisierung von Entscheidungsträger:innen als auch zur fachlichen Begründung von Planungsentscheidungen für planende Akteur:innen, welche die in den Gremien zu treffenden Entscheidungen vorbereiten, herangezogen werden. Des Weiteren wurden durch die Projektpartner:innen vertiefende wissenschaftliche Untersuchungen und Analysen vorgenommen. Die entsprechenden Ergebnisse finden sich in textlicher Form, unterstützt durch statistische Auswertungen und Grafiken in der Wissensbibliothek wieder.



Abbildung 81: Säule 3, Erläuterungen zur Klimakenngröße der Sommertage.

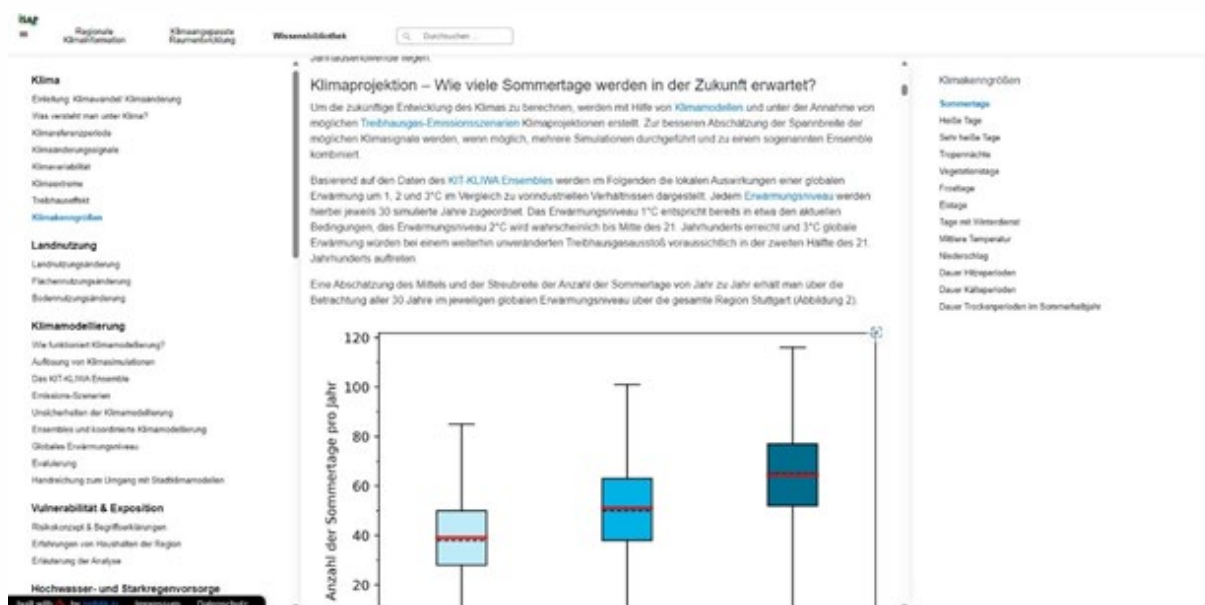


Abbildung 82: Säule 3, Erläuterungen zur Klimakenngröße der Sommertage.

4.1.4 Navigationskonzept

Ziel des Entwicklungsprozesses war es, die Navigation im Tool möglichst widerspruchsfrei und damit nutzer:innenfreundlich zu gestalten. Das Konzept des Tools sieht eine Clusterung der im Rahmen des Projekts erarbeiteten wissenschaftlichen Produkte ihrem Charakter entsprechend vor und stellt diese gesondert voneinander über die 3 Säulen dar. Funktional sind die 3 Säulen über Verlinkungen (etwa in den Textboxen) miteinander verbunden. Die Bedienung des Tools wird durch die Unterstützung einer grafisch klaren und ansprechenden Gestaltung vereinfacht und soll einen möglichst selbsterklärenden und intuitiven Umgang mit den Inhalten ermöglichen.

Zur Einführung in die Inhalte und Funktionen werden die künftigen Nutzer:innen mittels eines Navigationskonzeptes durch das Online- Informations- und Beratungssystem geführt. Vorgestellt werden das Hauptmenü inklusive seiner Inhalte, die Kartengrundfunktionen (Transparenz, Zoomstufen, wechseln der Hintergrundkarte etc.) und Textboxen in Säule 1, die Bediensystematik des Scollytellings in Säule 2 sowie die Menüführung in der Wissensbibliothek als Säule 3. Die Ansprache muss dabei gleichzeitig sowohl auf „versierte“ Nutzer:innen von Klimainformationsplattformen, wie auch auf interessierte Laien abzielen. Wichtigste Anforderungen war daher ein sachliches, verständliches Erklären komplexer Sachverhalte, mit dem Ziel von Beginn an Unklarheiten zu vermeiden.



4.2 Nutzerbedarfe und Anforderungsergebnisse

Zuständigkeit: Arbeitspaket 1 & 6 – VRS, LHS, Difu, IREUS; KIT, indblik.io

Hinsichtlich der künftigen Nutzer:innen des Tools wird zwischen 2 Gruppen unterschieden:

- Der „Unmittelbare Nutzer:innenkreis“ ist aufgrund seiner gesetzlich festgeschriebenen Kompetenzen und Verantwortlichkeiten mit dem Thema Klimaanpassung in unterschiedlicher Form betraut. Hierzu zählen die politischen und administrativen Akteur:innen aus den Kommunen und die Region sowie Planungsbüros und Fachverbände, übergeordnete Institutionen als auch Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden, die tlw. aus der Perspektive der Fachplanung fungieren.
- Der „Erweiterte Nutzer:innenkreis“ umfasst Nutzer:innen ohne solche gesetzlich festgeschriebenen Kompetenzen und repräsentiert die Zivilgesellschaft sowie interessierte Öffentlichkeit. Hierzu zählen Vereine, NGO, Verbände und Bildungseinrichtungen sowie die breite Bürger:innenschaft und Unternehmen.

Die Nutzer:innen unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer Kompetenzen und Verantwortlichkeiten, sondern auch hinsichtlich ihrer Fachkenntnisse und Ausstattung mit Ressourcen, technischer, finanzieller und personeller Natur. Insbesondere bei Kommunen muss berücksichtigt werden, dass aufgrund deren struktureller Unterschiede eine Differenzierung hinsichtlich Ausstattung mit Fachkenntnissen und Ressourcen erfolgen muss.

4.2.1 Die erhobenen Bedarfe und Anforderungen – methodisches Vorgehen

Hinsichtlich der Bedarfe und Anforderungen an die Inhalte und technische Ausgestaltung des entwickelten Online- Beratungs- und Informationstool wurden sowohl inhaltliche wie auch technische Bedarfe, Anforderungen und konkrete Erfordernisse formuliert (siehe unten). Bedarfe und Anforderungen werden (trotz der inhaltlichen und technischen Unterschiede) im Projekt synonym verwendet. Die Begriffe werden aus Sicht der künftigen Nutzer:innen formuliert, um die Integration der Klimaanpassung in den Planungsprozess gewährleisten zu können. Erfordernisse werden auf Basis der jeweiligen Bedarfe und Anforderungen mit direktem Bezug zum entwickelnden Tool formuliert.

Zudem wird zwischen Bedarfen und Anforderungen inhaltlicher, sowie jenen technischer Natur unterschieden. Die Abgrenzung zwischen „inhaltlich“ und „technisch“, ergibt sich vor allem bei letztgenanntem über den Bezug zu technischen Funktionalitäten und Funktionen des künftigen Tools.

Zur Annäherung an die Bedarfe und Anforderungen seitens künftiger Nutzer:innen des Online-Beratungs- und Informationstools wurden auf Basis einer Literaturrecherche und Dokumentenanalyse zunächst Herausforderungen hinsichtlich der Integration, bzw. Schritte einer idealtypischen Integration der Anpassung an den Klimawandel in die Planung, formuliert. Diese Schritte der Integration der Anpassung an den Klimawandel in Planungsprozesse wurden als Überbegriff formuliert, anschließend wurden dahingehend Annahmen und dahinterliegende Ziele sowie Bedarfe, bzw. Anforderungen seitens der Planung zur Gewährleistung der Integration und schließlich dementsprechend Erfordernisse für das künftige Tool formuliert. Diese formulierten Bedarfe, Anforderungen und Erfordernisse können sowohl inhaltlicher als auch technischer Natur sein.

4.2.2 Bedarfe und Anforderungen künftiger Nutzer:innen – Ergebnisse aus der Literaturrecherche

Die Schritte zur Integration der Klimaanpassung in Planungsprozesse wurden in Anlehnung an bestehende Leitfäden und Handlungsempfehlungen formuliert und durch die für das Arbeitspaket



verantwortlichen Projektpartner:innen mit ihrem Wissen und den Erfahrungen aus der Planungspraxis ergänzt.

Wahrnehmung und Betroffenheit

Annahmen:

Angenommen wird, dass aktives Klimahandeln die Wahrnehmung der Veränderung von Klimaelementen voraussetzt, bzw. bei Wahrnehmung klimatologischer Veränderungen und deren Folgen sowie Betroffenheit von Extremereignissen entsprechend gute Voraussetzungen für klimasensibles Denken herrschen. Der Klimawandel kann daher in seinen unterschiedlichen Ausprägungen auf lokaler, bzw. regionaler Ebene wahrgenommen, verstanden und beschrieben werden.

Ziele:

Als Ziel kann daher formuliert werden, dass die Veränderung von Klimaelementen (Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte, Wind, Niederschlag, Bewölkung, Sicht, Sonnenscheindauer, Strahlung) wahrgenommen, verstanden und beschrieben wird. Dies begünstigt klimasensibles Denken und bildet das erste Ziel in der schrittweisen Integration der Klimaanpassung in die Planung.

Bedarfe:

Um die Veränderung von Klimaelementen wahrnehmen, verstehen und beschreiben zu können, muss Wissen um den Klimawandel im Allgemeinen und von vergangenen sowie möglichen lokalen Klimaereignissen und -folgen insbesondere seitens der Planungspraktiker:innen vorhanden sein. Eine Bestandsaufnahme der Klimawandelfolgen auf dem Gebiet der Kommune ist dabei hilfreich. In weiterer Folge sollten kritische Infrastrukturen verortet und spezifische kommunale Vulnerabilitäten erhoben werden. Dies begünstigt das Erkennen prioritärer Handlungserfordernisse. Mit dem erlangte Wissenszugewinn können kommunale Planungspraktiker:innen ein besonderes Augenmerk auf bestimmte räumliche und fachliche Teilbereiche in ihrer Kommune zu legen.

Erfordernisse für das Tool:

Das Tool soll regionale Klimaereignisse und Klimawandelfolgen sowie mögliche zukünftige auf kommunaler Ebene aufzeigen und greifbar machen. Der Fokus soll dabei auf der grafischen Aufbereitung und Darstellung von entsprechenden Klimaereignissen und Klimawandelfolgen liegen. Diese Informationen sollen idealerweise mit Bildern, Zahlen, (bspw. in Form von Diagrammen) und Daten zu Extremereignissen angereichert werden. Deutschlandweite wie auch regionale Ereignisse können hier als Beispiele dienlich sein.

Zusammenfassend:

- Grafischen Aufbereitung und Darstellung von entsprechenden Klimaereignisse und Klimawandelfolgen
- Bilder, Zahlen, Diagramme und Daten zu Extremereignissen

Fachliche Grundlagen zum Klimawandel in der Region

Annahmen:

Fachliche Grundlagen zu regionalen und lokalen klimatischen Gegebenheiten sowie daraus möglicherweise folgenden Gefahren und Risiken für die Gegenwart und Zukunft erlauben es den Kommunen Handlungsbedarfe und -räume zu erkennen. Sie sind die wesentliche Grundlage für die Integration der Klimaanpassung, in Form von Strategien und Maßnahmen, in die Planungspraxis auf kommunaler Ebene. Im Wesentlichen wird hier angenommen, dass sich die jeweilige Kommune auf Basis von Daten zur klimatischen Ist-Situation sowie zu Prognosen und darauf aufbauenden



Gefahren- und Risikoanalysen ermächtigt fühlt, diese Belange zu verstehen und sie in künftigen räumlichen Entwicklungen und Planungen berücksichtigen zu können.

Ziele:

Ziel ist es hierbei Entscheidungsgrundlagen, für künftige Entwicklung der Kommune vorzulegen. Diese zu lesen und interpretieren zu können, einen Bezug zur Planungspraxis herstellen und für deren Integration in planerische Abwägungsprozesse sorgen zu können. Des Weiteren sollen auf Basis dieser Grundlagen Handlungsräume und -erfordernisse auf kommunaler Gemarkung erkannt werden können.

Bedarfe:

Fachliche Grundlagen und Analysen, z.B.: Karten, müssen verständlich und transparent aufbereitet sein. Des Weiteren müssen die technische Anwendbarkeit und die Integration in kommunale Systeme, entsprechend ihrer verfügbaren technischen Ressourcen (z. B.: Ausstattung mit Hard- und Software), gewährleistet werden.

Erfordernisse für das Tool:

Die produzierten Karten müssen einer verständlichen und klaren Aufbereitung folgen. Das Tool soll sachliches Erklären von entsprechenden Karten gewährleisten und wenig Interpretationsspielraum lassen. Klimatologische Komplexitäten sollen übersetzt werden und Informationsschichten voneinander getrennt, bzw. in transparenter Überlagerung dargestellt werden, um die Nachvollziehbarkeit z.B. von Hinweiskarten zu gewährleisten. Die technische Ausstattung in Kommunen ist, beispielsweise hinsichtlich Datenformaten, zu berücksichtigen.

Zusammenfassend:

- verständliche und klare Aufbereitung der Karten
- Übersetzung und Erläuterung klimatologischer Komplexitäten
- Darstellung kartografischer Informationsschichten in transparenter Überlagerung
- Berücksichtigung der technischen Ausstattung der Kommunen

Klärung kommunaler Kompetenzen und Handlungsfelder

Annahmen:

Die Themenkomplexe des Klimawandels müssen mit den kommunalen Strukturen und Abteilungen in Bezug gebracht werden. Es bestehen große strukturelle Unterschiede in den Kommunen der Region Stuttgart. Personelle und finanzielle Ressourcen, sowie Wissen ist abhängig von der jeweiligen Gemeindegröße und deren Verwaltungsapparat. Insbesondere in kleinen und mittleren Gemeinden sind Zuständigkeiten bezüglich der Klimathemen nicht klar geregelt und es fehlt an wissenschaftlichem oder technischem Personal. Insbesondere für die Planung und Umsetzung von Maßnahmen müssen notwendige kommunale Handlungsfelder klar benannt werden.

Ziele:

Ziel ist es in diesem Schritt, die Zuständigkeiten in den kommunalen Verwaltungen für die Themen Klimaanpassung zu klären. Darüber hinaus sind kommunale Handlungsfelder zu benennen.

Bedarfe:

Zur Benennung der kommunalen Handlungsfelder im Kontext Klimaanpassung sollen diese dargelegt und zugeordnet werden. Dies könnte in Form einer beispielhaften Definition (entsprechend eines Verwaltungsapparats einer bestimmten Kommunegröße), von verantwortlichen Abteilungen und eine Zuordnung zu verwaltungsinternen Kompetenzen vorzunehmen.



Erfordernisse für das Tool:

Entsprechend der Kommunengrößen sind die jeweiligen strukturelle Herausforderungen der Kommunen in der Region Stuttgart zu benennen. Das Thema Klimaanpassung ist im Rahmen der Darlegung von kommunalen Handlungsfeldern zu verorten. Weitere Information, welche im künftigen Online-Tool in die Wissensbibliothek zu integrieren sind, müssen zugeschnitten sein auf kommunale Realitäten, bzw. jene berücksichtigen und Unterstützungsleistung im Umgang mit dem Thema Klimaanpassung geben.

Zusammenfassend:

- Berücksichtigung der strukturellen Gegebenheiten in den Kommunen im Umgang mit dem Thema Klimaanpassung
- Darstellung kommunaler Handlungsfelder in der Klimaanpassung
- Verortung des Themas in Planungsprozessen

Konkretisierung von Handlungsmöglichkeiten durch Wissensverdichtung und -management im Bereich Klimaanpassung

Annahmen:

Verdichtetes Wissen, seitens der Planungspraktiker:innen, in dem Themenbereich Klimaanpassung begünstigen die kommunalen Handlungsmöglichkeiten. Dies eröffnet neue Handlungsräume und stärkt die Handlungsfähigkeit der Verwaltung. Des Weiteren können Synergien und Themenkomplexe in der räumlichen Entwicklung klar benannt und bearbeitet werden. Somit herrschen günstige Voraussetzungen für die Etablierung klimasensiblen Handelns im Verwaltungsapparat.

Ziele:

Ziel ist es über eine entsprechende Wissensgrundlage bezüglich Klimaanpassung und Klimaschutz zu verfügen, welche die Handlungsfähigkeit der Planungspraktiker:innen stärkt.

Bedarfe:

Aufgezeigt werden sollen die Unterschiede und Synergien, z.B.: hinsichtlich der Ausgestaltung von Maßnahmen, zwischen der Anpassung an den Klimawandel und dem Klimaschutz. Die in den Kommunen vorhandenen und verfügbaren Grundlagen und Informationen sollen hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit und ihrem Bekanntheitsgrad einer Prüfung unterzogen werden, ggf. müssen Ablageorte in kommunalen Informationssystemen geprüft werden. Verdichtetes Wissen um Klimaanpassung erlaubt es den Planungspraktiker:innen im Vorfeld von Planungsprozessen einen möglichen Handlungsrahmen zu setzen.

Erfordernisse für das Tool:

Weiterführende Informationen zu dem Themenbereichen Klimaanpassung und Klimaschutz sollen in eine Wissensdatenbank, bzw. -bibliothek integriert werden und den Planungspraktiker:innen hierüber zur Verfügung gestellt werden. Hierbei sollen auch Themenkomplexe und Synergien zu anderen relevanten Themen der Planungspraxis aufgezeigt werden.

Zusammenfassend:

- Weiterführende Informationen zum Thema Klimaanpassung und Klimaschutz
- Darstellung von Themenkomplexen und Synergien

Planerische Prozesse Strategien und Instrumente

Annahmen:

Zur Einbettung des Themas Klimaanpassung in kommunale Entwicklungsstrategien und Planungsprozesse müssen konkrete Bezüge zu den kommunalen Planungsinstrumenten und den



Phasen im Planungsprozess hergestellt werden. Dies betrifft sowohl informelle als auch formelle Planungsinstrumente. Die hier zu erfolgende Integration und Berücksichtigung gilt als vorbereitende Planung zur Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen. Eine frühzeitige Einbindung der Bevölkerung erhöht die Akzeptanz von kommunalen Anpassungsmaßnahmen.

Ziele:

Ziel ist die Einordnung des Themas Klimaanpassung in den jeweiligen Phasen informeller und formeller Planungsprozesse.

Bedarfe:

Wissen um gesetzliche Vorgaben sowie Möglichkeiten der Integration des Themas Klimaanpassung in Planungsprozesse bildet den zentralen Bedarf in diesem Schritt. Des Weiteren sollen eine differenzierte Herangehensweise entsprechend planerischer Maßstabsebenen und Instrumente sowie Möglichkeiten zur Beteiligung der Bevölkerung dargelegt werden.

Erfordernisse für das Tool:

Beispielhaftes Aufzeigen der Integration des Themas Klimaanpassung in formelle Planungsprozesse sowie kommunale Entwicklungsstrategien. Wissen um den Bezug zu Planungsinstrumenten (informell und formell). Darstellung beispielhafter Anpassungsstrategien sowie Möglichkeiten um die Anwendung dieses Wissens in Partizipationsschritten.

Zusammenfassend:

- Darstellung der Maßstabsebene räumlicher Planung
- Beispielhaftes Aufzeigen der Integration des Thema Klimaanpassung in Planungsprozesse
- Darstellung beispielhafter Anpassungsstrategien und deren Prozess zur Erstellung

Regionale und Interkommunale Vernetzung

Annahmen:

Abhängig von den jeweiligen Klimawandelfolgen, bzw. der strategischen Ausrichtung und Zielsetzungen im Planungsprozess können jene auf kommunaler oder auch auf interkommunaler Ebene bearbeitet werden. Klimaanpassung ist zwar häufig an lokale Bedingungen geknüpft, hat jedoch in der Regel auch überörtliche Bezüge. Deshalb ist eine über den lokalen Kontext hinausgehende überörtliche und regionale Betrachtungsweise im Rahmen von Wissensaustausch und -vermittlung immer gewinnbringend. In einigen Bereichen, wie z.B. Risikovorsorge bei Hochwasser ist eine interkommunale Betrachtung sogar unerlässlich.

Ziele:

Ziel ist es, Wissensgewinn und erhöhte Handlungsfähigkeit hinsichtlich des Umgangs mit Klimawandelfolgen durch interkommunalen und regionalen Austausch und interkommunale Partnerschaften sowie Kooperationen zu erlangen.

Bedarfe:

Zentral ist hier das Aufzeigen von regionalen und interkommunalen Möglichkeiten um Vernetzung, Austausch, Diskussion und Partnerschaften.

Erfordernisse für das Tool:

Die Darlegung der von Gemarkungsgrenzen unabhängiger klimatischer Phänomene bei gleichzeitiger kommunaler Relevanz und die Vorteile von Partnerschaften und Kooperationen zum Austausch und der Diskussion soll im Rahmen des Tools gestützt durch gute Beispiele aus der Praxis erfolgen.

Zusammenfassend:

- Interkommunalen Wirkung bei klimatologischen Phänomenen aufzeigen



- Partnerschaften und Kooperationen über kommunal-administrative Grenzen hinaus bewerben

Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen

Annahmen:

Die Kommunen sind ermächtigt entsprechende Maßnahmen zur Bewältigung der Klimaanpassung zu planen und umzusetzen. Je nach Gefahren- und Risikolage sind die Kommunen befähigt, die entsprechenden Maßnahmen, kurz-, mittel, oder langfristig umsetzbar, auf Basis ihrer vorhandenen finanziellen, personellen und technischen Ressourcen zu planen und in weiterer Folge umzusetzen. Barrieren, Konflikte und Synergien werden frühzeitig erkannt und im Umsetzungsprozess berücksichtigt.

Ziele:

Ziel ist es Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel entsprechend der kommunalen Ressourcen und strategischen Ausrichtungen zu planen und umzusetzen.

Bedarfe:

Als zentraler Bedarf kann das Wissen um die Wirkung von Umsetzungsmaßnahmen, Beispielen aus der Praxis sowie Empfehlungen zur priorisierten Umsetzung von Maßnahmen gesehen werden. Des Weiteren ist der Bezug zu Planungsinstrumenten herzustellen.

Erfordernisse für das Tool:

Wesentliches Erfordernis für die Entwicklung des Tools ist das Aufführen von beispielhaften Anpassungsmaßnahmen und deren Wirkung innerhalb unterschiedlicher Zeiträume (kurz-, mittel- und langfristig) sowie die beispielhafte Darstellung von örtlichen und überörtlichen Planungsprozessen zur Verortung der jeweiligen Anpassungsmaßnahmen.

Zusammenfassend:

- Aufführen von beispielhaften Anpassungsmaßnahmen und deren Wirkung innerhalb unterschiedlicher Zeiträume

4.2.3 Bedarfe und Anforderungen künftiger Nutzer:innen – Konkretisierung durch Akteursbeteiligung

Zur Konkretisierung der Nutzer:innenbedarfe und -anforderungen wurden seitens der Landeshauptstadt Stuttgart (Abteilung Stadtklimatologie) – nachfolgend LHS genannt - drei Workshops im März 2021 mit Teilnehmer:innen aus unterschiedlichen Abteilungen der kommunalen Verwaltung der Stadt Stuttgart abgehalten. Seitens des Verbands Region Stuttgart (Abteilung Regionalplanung) – nachfolgend VRS genannt- wurde im Mai 2021 ein Workshop mit kommunalen Planungspraktiker:innen aus fünf Kommunen in der Region durchgeführt, unterstützt durch das Deutsche Institut für Urbanistik – nachfolgend Difu genannt. Die Teilnehmer:innen der vier Workshops gelten als potentielle künftige Nutzer:innen des Online-Informationstools.

Die Ergebnisse der insgesamt vier abgehaltenen Workshops wurden zusammengetragen und werden im folgenden Unterkapitel näher erläutert. Die Formulierung der Nutzer:innenbedarfe und -anforderungen basiert in ihren Grundzügen auf den Ergebnissen der Literatur- und Dokumentenanalyse. Im Wesentlichen fand über die abgehaltenen Workshops nicht nur eine Konkretisierung dieser recherchierten Bedarfe und Anforderungen statt, sondern auch eine Überprüfung der formulierten Annahmen und darauf basierenden Erfordernissen für das künftige Tool. Diese wurden infolgedessen insbesondere durch die Praxispartner im ISAP-Projekt, die Abteilung Klimatologie der LHS und die Planungsabteilung des VRS, kritisch reflektiert und ergänzt.



Workshops zu Anpassungsbedarfen und Nutzeranforderungen der LHS

LHS leitete das Arbeitspaket 6 „Test-Anwendungen in Fallbeispielen“, welches neben mikroskaligen Klimasimulationen für ausgewählte Gebiete die Entwicklung des Online-Informations- und Beratungssystems auf der kommunalen Ebene vorantreiben soll. Des Weiteren wirkte die LHS bei dem Arbeitspaket „Bedarfe und Nutzer:inneninteressen“ als Praxispartner mit und ist mit der Organisation von verwaltungsinternen Workshops betraut.

Die Teilnehmer:innen der drei durch die LHS veranstalteten Workshops sind in Ihrer täglichen Praxis mit Belangen der Kommunalplanung und -entwicklung auf unterschiedlichen planerischen Maßstabsebenen und aus unterschiedlichen fachlichen Blickwinkeln sowie Funktionen innerhalb des jeweiligen Verwaltungsapparats betraut. Der Teilnehmerkreis der Workshops der umfasste Kolleg:innen aus den Bereichen Stadtplanung und -entwicklung, Umweltschutz und Stadtgrün sowie Hoch- und Tiefbau mit Städtentwässerung, zwei Vertreter:innen aus externen Institutionen. Diese wurden gezielt eingeladen, da sie mit den klimawandelbedingten Auswirkungen und den sich daraus ergebenden Anpassungserfordernisse in ihrer Arbeit konfrontiert sind. Zentraler Bestandteil der Workshops war jeweils eine Diskussionsrunde, die sich auf die Themen der Handlungsfähigkeit, der Daten bzw. der Datenqualität und konkreter Anpassungsmaßnahmen konzentriert hat.

Die Ergebnisse der Diskussionsrunde zeigen, dass bei den Teilnehmer:innen durchgängig eine Sensibilisierung und ein entsprechendes Interesse/Engagement für die Thematik des Erfordernisses der Anpassung an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels vorhanden ist. Die Teilnehmer:innen fühlen sich insgesamt gut informiert. Bei dem Austausch wird aber ebenso deutlich, dass die konkrete Handlungsfähigkeit und Argumentationsmöglichkeiten, bspw. innerhalb von Verfahren der räumlichen Planung, oftmals erst durch Rückgriff auf die vorhandene Fachabteilung bzw. in enger Zusammenarbeit generiert werden. Die derzeit im Klimaatlas zur Verfügung gestellten Informationen reichen nicht aus bzw. können nicht ausreichend interpretiert werden, um auch ohne weitere Beratung bspw. die Ableitung einer angemessenen planerischen Reaktion zu ermöglichen.

Die Anforderungen an die Aufbereitung der Daten und Informationen sind vielfältig und umfassen hochauflösende Klimakarten, Windtrajektorien, quantifizierte Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen, interaktive Auswertungen der Kaltluftabflüsse, umfassende Darstellungen zu Starkregenereignissen und deren Auswirkungen sowie Informationen zu Trockenstress, Verdunstungsraten, Bildung des Grundwassers, Optimierung der Verdunstungskühlung, Schutzmaßnahmen. Es wurde betont, dass die Informationen verständlich und anschaulich sein müssen. Bei der Frage der geeigneten zeitlichen Horizonte der Prognosen, wurden die eigenen Planungshorizonte genannt, die je nach Planungsebene und Fachthema einen zeitlichen Horizont von 10 bis stufenweise geschichtet 100 Jahren abdecken. Gerade aus den Bereichen der klimaneutralen und wassersensiblen Stadtentwicklung werden den Zukunftsprognosen aber eine sehr hohe Bedeutung zugeschrieben. Die Diskussion der Klimaanpassungsmaßnahmen fokussiert lediglich auf gängige Maßnahmen wie Dach- und Fassadenbegrünungen. Zusammenfassend lassen sich die ermittelten Bedarfe und Anforderungen in drei Kategorien gliedern:

- Verständlichkeit der Inhalte
- Darstellung und Aufbereitung der Inhalte
- Wissensverdichtung und Synergien

Die Erläuterung der erhobenen Nutzer:innenbedarfe erfolgt weiter unten in diesem Kapitel. Über ein kontinuierliches Praxis-Controlling soll die spätere Anwendbarkeit für Planungspraktiker:innen sichergestellt sein. In der Erprobungsphase vor Projektabschluss wurde von den kommunalen Expert:innen ein Feedback aus Praxissicht zur Anwendbarkeit des Tools eingeholt. Um die Implementierung in das Verwaltungshandeln zu bekräftigen, wurde daher seitens der LHS unterstützt



durch das Deutsche Institut für Urbanistik im Juli 2023 ein weiterer Fach- und Praxisworkshop mit Planer:innen der Landeshauptstadt Stuttgart durchgeführt. Ziel des Workshops war es den Planer:innen den aktuellen Entwicklungsstand des ISAP-Tools vorzustellen und anhand dessen mit den Teilnehmenden die Passfähigkeit, den Anwendernutzen und die Zielerreichung des Tools zu diskutieren und zu bewerten. Zunächst wurde eine Online-Testversion mit Inhalten zu den drei Säulen präsentiert, gefolgt von der Vorstellung der Simulationsergebnisse für das Fokusgebiet NeckarPark. Seitens der Landeshauptstadt Stuttgart soll darüber auch eine kritische Reflektion des Mehrwertes quantitativer Informationsinstrumente für die Klimaanpassung im Vergleich zu den bisher vielfach qualitativen Ansätzen erfolgen. Die Teilnehmer:innen hatten u.a. die Möglichkeit das ISAP-Tool anhand von Leitfragen zu bewerten, wie „Sind Nutzerbedarfe erfüllt?“, „Ist die Anwendbarkeit gegeben?“ oder „Welche Weiterentwicklung hat zu erfolgen?“

Dabei hat sich gezeigt, dass die Modellierungen der Wirkung von Klimaanpassungsmaßnahmen (Säule 2) als Referenzbeispiele dienen und in der vorliegenden Form der Ableitung konkreter Handlungskompetenzen ermöglichen können. Die Wissensbibliothek (Säule 3) wurde als kompakt und übersichtlich wahrgenommen. Die Teilnehmer:innen gaben an, eine detailliertere Auflösung der Karten für die Planung auf Quartiersebene sowie interaktive Elemente zu Kaltluftabflüsse und Starkregen (Säule 1) zu benötigen. In Bezug auf die Anwendbarkeit im Arbeitsalltag wurde festgestellt, dass das ISAP-Tool in verschiedenen Prozessen integriert werden kann, darunter die Stadtentwicklungsplanung, die städtebauliche Rahmenplanung und die Quartiersentwicklung. Eine kontinuierliche Aktualisierung der Daten und Karten wurde als unabdingbar angesehen.

Insgesamt wird die Schwierigkeit gesehen, komplexe stadtklimatische Belange und auch Anpassungserfordernisse selbstständig gegenüber weiteren bestehenden und berechtigten Interessen zu vertreten. Gerade hier wird auf kommunaler Ebene der Bedarf einer veränderten Zusammenarbeit gesehen, die nicht nur Anforderungen adressiert, sondern auch die bestmöglichen Synergien zwischen den einzelnen Fachaspekten und –erfordernissen darlegt. Als Problem wird hierbei u.a. identifiziert, dass überwiegend ein koordinierender Auftrag fehlt bzw. dieser ggf. nur auf einer konzeptionellen, übergeordneten Ebene vorhanden ist, letztendlich doch jeder in seinem Aufgabenbereich verbleibt.

Workshops zu Anpassungsbedarfen und Nutzeranforderungen des VRS

Der VRS leitete das Arbeitspaket 1 „Bedarfe und Nutzer:inneninteressen“ und das Arbeitspaket 5 „Online-Informations- und Beratungssystem“. Beide Arbeitspakete sind eng miteinander verbunden, da das Formulieren von Bedarfen und Anforderungen seitens potentieller Nutzer:innen für die Ausgestaltung des künftigen Online-Informations- und Beratungstool sowie dessen Funktionen und Elemente als maßgeblich betrachtet werden kann. Im Rahmen des Arbeitspakets „Bedarfe und Nutzer:inneninteressen“ wirken des Weiteren die LHS als weiterer Praxispartner im Projekt ISAP mit, sowie das Difu hinsichtlich der Organisation und Gestaltung der Workshops.

Ziel des im Mai veranstalteten Workshops war die Konkretisierung von Bedarfen und Anforderungen an das zu entwickelnde Tool unter Beteiligung von Akteur:innen aus der kommunalen Planungspraxis in der Region. Das Programm des Workshops gliederte sich in drei Teile: Impulsvorträge, Statements seitens der Gäste aus den Kommunen zu den Themen nachhaltige Entwicklung und Klimaanpassung und einer Diskussionsrunde. Gestartet wurde mit vier Impulsvorträgen zu den Themen Klimaanpassung in der Region Stuttgart, Klimaanpassung aus Sicht der Stadtklimatologie, Integrierte Klimaanpassung in Kommunen und Ziele und Herausforderungen im Projekt ISAP. Diese Impulsvorträge wurden durch Referent:innen aus dem ISAP Konsortium vorgetragen. Danach waren die Gäste aus den Kommunen der Region dazu aufgefordert worden aus ihrer kommunalen Planungspraxis hinsichtlich nachhaltiger Stadtentwicklung und Klimaanpassung zu berichten. Hierzu wurden Statements mit unterschiedlichen thematischen Schwerpunkten vorgetragen, verschiedene



Ansätze zum Umgang mit den Themenkomplexen erläutert und erste Problemlagen dargestellt. Nachfolgend wurden im Rahmen einer Diskussionsrunde die Bedarfe und Anforderungen an das zu entwickelnde Tool in ISAP erörtert. Am Beispiel des bestehenden Klimaatlas der VRS und der LHS wurden insbesondere dessen Weiterentwicklungsbedarf diskutiert. Die Teilnehmer:innen aus fünf Kommunen der Region sind in Ihrer täglichen Praxis mit Belangen der Stadtplanung und -entwicklung auf unterschiedlichen Maßstabsebenen und aus unterschiedlichen fachlichen Blickwinkeln sowie Funktionen innerhalb des jeweiligen Verwaltungsapparats betraut.

Folgende Fachabteilungen in Kommunen aus der Region wurden zum Workshop eingeladen:

- Stadt Esslingen am Neckar: Stadtplanungsamt - Sachgebiet Nachhaltigkeit und Klimaschutz
- Stadt Ludwigsburg: Stabsstelle Klima, Energie und Europa und Fachbereich Stadtplanung und Vermessung
- Stadt Leinfelden-Echterdingen: Stadtplanungsamt
- Stadt Kirchheim unter Teck: Stadtplanungsamt – Sachgebiet Flächennutzung
- Stadt Waiblingen: Stadtplanungsamt

Folgende Fragen wurde im Rahmen der Diskussion nachgegangen:

- Nutzungsreichweite des Klimaatlas: In welcher Form wird der Klimaatlas im Rahmen der kommunalen Planungspraxis in Ihrer Kommune aktuell genutzt (formelle und informelle Planungsprozesse und -instrumente)?
- Bewertung der Inhalte des Klimaatlas nach ihrer Verständlichkeit und Aufbereitung: Inhaltliche Verständlichkeit: Sind die inhaltlichen Aussagen im Klimaatlas für Sie verständlich aufbereitet? Bedarf es Ihrer Erfahrung nach, ergänzender Erklärungen oder Lesehilfen zu bestimmten Karteninhalten?
- Darstellung der Inhalte: Lassen sich die Kernaussagen des Klimaatlas für Ihre Kommune einfach ablesen? Wie kann die Vermittlung dieser verbessert werden (z. B.: gestalterisch)? Wie müssen Aussagen aufbereitet sein, damit sie Berücksichtigung im Abwägungsprozess in informellen oder formellen Planungsprozessen finden können?
- Interaktive Zusatzmodule: Könnten interaktive Elemente im Online-Tool (z. B. zu Fließgeschwindigkeiten oder Kaltluftströmungen) hilfreich für eine Vermittlung von Aussagen sein?
- Technische Aspekte: Wie müssen Ausgabedaten technisch aufbereitet sein damit diese auch in Ihrer Kommune genutzt werden können?

Die oben genannten Fragen wurden in unterschiedlicher Intensität diskutiert. Angereichert wurde die Diskussion mit Beispielen aus der Planungspraxis zur Veranschaulichung der jeweiligen Fragestellung.

Die Ergebnisse des Workshops wurden gemeinsam mit den Workshops der LHS verarbeitet. Daraus abgeleitet wurden die Nutzer:innenbedarfe- und -anforderungen. Diese wurden nach Kategorien geclustert. In weiterer Folge werden diese dargestellt.

Konkretisierung der Nutzer:innenbedarfe und -anforderungen - Ergebnisse der Workshops

Die in weiterer Folge formulierten Nutzer:innenbedarfe und Anforderungen basieren auf den Ergebnissen der Literatur- und Dokumentenanalyse und der im Rahmen der Workshops erhobenen bzw. konkretisierten Bedarfe und Anforderungen. Die Bedarfe und Anforderungen gliedern sich dabei wie erwähnt in drei Kategorien: Verständlichkeit der Inhalte, Darstellung der Inhalte und Wissensverdichtung und Synergien. Inhalte, werden zusammenfassend als jene in das Tool zu integrierenden wissenschaftlichen Produkte verstanden, welche im Rahmen des ISAP-Projekts durch



die Projektpartner entwickelt werden. Die formulierten Bedarfe und Anforderungen seitens der Nutzer:innen sind primär inhaltlicher Natur und begründen ein konkretes Erfordernis für das Tool. Abhängig vom jeweiligen Bedarf, bzw. der Anforderung stellt bildet dieses Erfordernis einen technischen oder inhaltlichen Anspruch an die Entwicklung des Online-Informations- und Beratungstools.

Verständlichkeit der Inhalte

Klare Sprache und einfache Kommunikation der Inhalte

Die im Tool zur Verfügung gestellten Informationen zur stadtreionalen Klimaanpassung müssen verständlich aufbereitet sein. Dies muss über eine auch für Laien verständliche Sprache sichergestellt werden. Das Tool hat die Aufgabe eine Übersetzungsleistung von klimatologischen Belangen und Sachlagen zu erbringen und diese entsprechend zu kommunizieren. In weiterer Folge ist der planerische Bezug zu diesen klimatologischen Belangen herzustellen.

Erfordernis für das Tool:

- Verständliche Sprache wählen
- Begriffe in einem Glossar erklären
- Nutzeroberflächenkonzept mit erklärenden Elementen ergänzen

Sicherstellung der Nachvollziehbarkeit von Aussagen + Transparenz in Karten

Die Nachvollziehbarkeit von klimatologischen Aussagen, insbesondere die in Karten aggregierte Information, muss sichergestellt sein. Durch das Verschneiden verschiedener Informationsschichten gehen einzelne Informationen verloren. Die Aussagen von bestimmten Karten sind somit für Planungspraktiker:innen nicht mehr nachvollziehbar, bzw. können insb. von Laien nicht vollständig erfasst, sinngemäß verstanden und nachvollzogen werden. Dem kann z.B. dadurch begegnet werden, dass eine transparente Überlagerung wesentlicher Aussagen in Form von Karten zugeschaltet werden könnte. Dies stützt die Verständlichkeit und erleichtert die Kommunikation klimatologischer Sachlagen verwaltungsintern sowie im Gemeinderat.

Erfordernis für das Tool:

- Transparente Überlagerbarkeit von Teilinhalten einzelner aggregierter Karten sicherstellen bzw. ein Disaggregieren einzelner Inhalte
- Nutzeroberflächenkonzept mit erklärenden Elementen ergänzen

Übersetzung von klimatologischen Aussagen in planerische Aussagen

Die Planungshinweise im aktuellen Klimaatlas können sinngemäß nicht ausreichend erfasst und verstanden werden. Konkret ist eine Übersetzungsleistung für die Planungspraxis, insbesondere für den Bereich der Stadt- und Landschaftsplanung zu erbringen. So sollen klimatologische Aussagen mit der möglichen baulich-räumlichen Entwicklung in Bezug gebracht werden.

Erfordernis für das Tool:

- Ergänzende Beschreibung und Lesehilfe für die Planungshinweise

Aufzeigen und Integration von Beispielen zum besseren Verständnis von Maßnahmen und deren möglicher Wirkungen

Im Rahmen einer Strategieentwicklung zur Anpassung an den Klimawandel kann eine Formulierung von Zielen nicht ohne eine anschauliche Skizzierung von Maßnahmen und deren Wirkung erfolgen. Des Weiteren können Planungspraktiker:innen durch eine beispielhafte Darstellung von Maßnahmenwirkungen im künftigen Tool sensibilisiert und ihre Handlungsfähigkeit gestärkt werden.



Erfordernis für das Tool:

- Integration von Beispielen zu Maßnahmenwirkungen

Darstellung der Inhalte

Hohe Sichtbarkeit wesentlicher Aussagen und Handlungserfordernisse

Das Tool soll gewährleisten, dass wesentliche klimatologische Aussagen für das jeweilige Gebiet klar ersichtlich sind. Problemlagen und Herausforderungen für den entsprechenden Siedlungskörper etwa sollen für Laien aufgrund von Hinweisen und Farbgebung, insbesondere in Karten leicht erkennbar sein. Handlungserfordernisse sollen nachvollziehbar dargelegt werden.

Erfordernis für das Tool:

- Hinweise und entsprechend farbliche Gestaltung bei Gebieten mit Handlungserfordernissen

Priorisierung von Handlungserfordernissen

Das Tool soll beispielhafte Priorisierungen von Maßnahmen zur Bewältigung der Klimaanpassung liefern. Dabei sind beispielhaft die jeweiligen örtlichen Gegebenheiten, Gefahren- und Risikolagen darzustellen und dementsprechend unter Berücksichtigung der jeweiligen Maßnahmenwirkung Priorisierungen aufzuzeigen.

Erfordernis für das Tool:

- Erklärende Anlagen zur Priorisierung der Umsetzung von Maßnahmen. Aussagen aus dem Bereich der ökonomischen Kosten-Nutzen-Analyse, welche im Rahmen des ISAP-Projekts vorgenommen wird, können dabei unterstützend wirken

Multifunktionale Potentiale von Flächen sowie Synergieeffekte von Maßnahmen darstellen

Im Sinne der Klimaanpassung gilt es die multifunktionalen Potentiale von bebauten, sowie unbebauten Flächen hervorzuheben und zum Zweck einer erhöhten Maßnahmenakzeptanz zu betonen. Des Weiteren sollen Synergieeffekte von Maßnahmen ersichtlich werden. Diese Nutzer:innenanforderung ist entsprechend grafisch umzusetzen, vertiefende Ausführungen sind in die im Tool integrierte Wissensbibliothek mit aufzunehmen.

Erfordernis für das Tool:

- Kenntlichmachung von multifunktionalen Potentialen sowie Synergieeffekten von Maßnahmen über grafische Darstellung und Verweise zur Wissensbibliothek
- Grafische Darstellung von multifunktionalen Potentialen von Flächen

Kommunale Handlungsfähigkeit stärken

Die im Tool verwendeten Werkzeuge sollen sensibilisierende Wirkung hinsichtlich der Integration der Klimaanpassung in die Planungspraxis haben. Auf die strukturellen Gegebenheiten der Kommunen ist hierbei entsprechend Rücksicht zu nehmen. Generelle Informationen zu wissenschaftlichen Erkenntnissen zum Thema Klimawandel und weiterführende Informationen zu den Themenkomplexen Klimaschutz und -anpassung soll den Kommunen über das Tool zur Verfügung gestellt werden.

Erfordernis für das Tool:

- Integration grundlegender sowie weiterführender Information in die Wissensbibliothek
- Praxisbeispiele zur Verdeutlichung



Wissensverdichtung und Synergien

Umgang mit Zukunftsprognosen in Planungsprozessen

Räumliche Planungen in Kommunen weisen unterschiedliche Zeithorizonte hinsichtlich ihrer Realisierung auf. Bei der Entwicklung von Strategien und Maßnahmen in Städten und Gemeinden sind die Zeithorizonte je nach Handlungsfeld und Tätigkeitsbereich abzuschätzen und mit Zukunftsprognosen hinsichtlich des Klimawandels in der Region abzustimmen. Dies betrifft Planungen aller Maßstabsebenen.

Erfordernis für das Tool:

- Beispielhafte Darstellung der Integration von klimatologischen Zukunftsprognosen in räumliche Planungsprozesse
- Argumentationshilfen in Bezug auf Umgang mit Unsicherheiten

Synergieeffekte aufzeigen

Kommunen sind in ihrer Planungspraxis mit verschiedenen Herausforderungen konfrontiert. Maßnahmen zur Klimaanpassung begünstigen nicht nur die Anpassung einer Kommunen an die Folgen des Klimawandels, sondern können bspw. auch einen Beitrag zur Erhöhung der städtischen Biodiversität oder der menschlichen Gesundheit und des Wohlbefindens erwirken. Multifunktional genutzte Flächen können etwa sowohl als Retentionsräume als auch als Naherholungsflächen genutzt werden. Die Umsetzung multifunktionaler Flächen kommt somit nicht nur dem Schutzgut Klima zugute.

Erfordernis für das Tool:

- Darstellung der Synergieeffekte von Maßnahmen und deren Wirkungen in der Wissensbibliothek
- Hervorhebung des No-regret-Ansatzes, insbesondere auch in Bezug auf NBS (nature based solutions).

Themenkomplexe darstellen

Die Themenkomplexe Klimaanpassung und Klimaschutz schließen sich nicht aus, sondern sollten zusammengedacht werden. Eine entsprechende Betrachtung eröffnet den Kommunen einen erweiterten Handlungsspielraum und lässt sie im Rahmen von kommunalen Strategien abwägen und zeitlich priorisieren.

Erfordernis für das Tool:

- Darstellung der Themenkomplexe in der Wissensbibliothek des Tools
- Integration von beispielhaften Maßnahmen in der Wissensbibliothek des Tools

Bezug zu planerischem (formellem + informellem) Instrumentarium herstellen – Verortung im Planungsprozess

Eine breite Umsetzung von Maßnahmen zur Klimaanpassung kann über eine verstärkte Integration in planerische Prozesse vorgenommen werden. Der Belang Klima ist sowohl für das formelle wie auch informelle Instrumentarium der Planungspraxis mitzudenken und zu berücksichtigen.

Erfordernis für das Tool:

- Darstellung der beispielhaften Verortung in der Wissensbibliothek des Tools
- Deutlich machen im Rahmen der Darstellung von Fokusgebieten in unterschiedlichen Maßstabsebenen



Anpassungskonzepte und -strategien

Planerische Strategiepapiere erlauben eine Zusammenschau von Zukunftsbildern, Zielen und Maßnahmen. Im Rahmen eines Prozesses zur Erstellung von Strategiepapieren können relevante Akteure aus der kommunalen Verwaltung, wie auch Externe beteiligt werden. Das beispielhafte Aufzeigen eines solchen Prozesses zur Erstellung einer Klimaanpassungsstrategie soll die Kommunen bei einer etwaigen Konzeption unterstützen. Dabei können Themenkomplexe, Synergieeffekte aber auch Zielkonflikte zwischen Klimaanpassung und weiteren Themenbereichen räumlicher Entwicklungsplanung behandelt werden.

Erfordernis für das Tool:

- Beispielhafter Weg zur Erstellung einer interkommunalen/kommunalen Klimaanpassungsstrategie

Information zu Fördermittel + -akquise

Der Umsetzung von Maßnahmen zur Klimaanpassung sollten begrenzte finanzielle Mittel einer Kommune nicht im Weg stehen. Das Tool soll einen ersten Überblick über bestehende Fördermittel bieten. Hier ist auch ein starker Bezug zum Themenfeld Synergieeffekte gegeben.

Erfordernis für das Tool:

- Entsprechende Verweise und Links zu Programmen im Tool

4.3 Tool-Design – Entwicklung

Zuständigkeit: Arbeitspaket 5 & 7 – VRS, indblik.io, Difu, IREUS

Im nachfolgenden wird die Entwicklung des Tooldesign sowohl in gestalterischer Art als auch in technischer Art beschrieben (siehe Kapitel 4.3.1, 4.3.2) Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Tool-Evaluation dargelegt (siehe Kapitel 4.3.3).

4.3.1 Entwicklungsprozess der Toolgestaltung

Das Design des Tools entstand in einem iterativen Prozess und in engem Austausch zunächst vor allem mit dem VRS und später auch mit den Projektpartner:innen. Zu Beginn des konzeptionellen Gestaltungsprozesses des Tools standen die Nutzerbedarfe der Ziel-Nutzer:innen, welche in Kapitel 4.2 beschrieben werden. Auf Basis dieser Nutzerbedarfe und auf der anderen Seite der Datenprodukte, die die Projektpartner:innen für das Tool bereitstellen konnten, entstand ein erstes, grobes Konzept des Tools. Um einen Überblick zu verschaffen, welche Datenprodukte von den Projektpartner:innen geliefert werden würden, in welchem Datenformat (z. B. Karte, Tabelle, Text, Scrollytelling) und für welche Themenbereiche, entwarf indblik.io gemeinsam mit dem VRS einen Fragebogen. Abbildung 83 fasst die Themenfelder und Datenprodukte, welche die einzelnen Projektpartner:innen an das Tool liefern wollten, zusammen. Abbildung 84 zeigt die geplanten Datenformate der Produkte für die einzelnen Themenbereiche im Tool. Diese haben sich im Laufe des Projekts weiterentwickelt. Z.B. wurden die ökonomische Bewertung und die Simulationen der Maßnahmenwirkungen in einem Scrollytelling für zwei Fokusräume in der Region Stuttgart dargestellt.

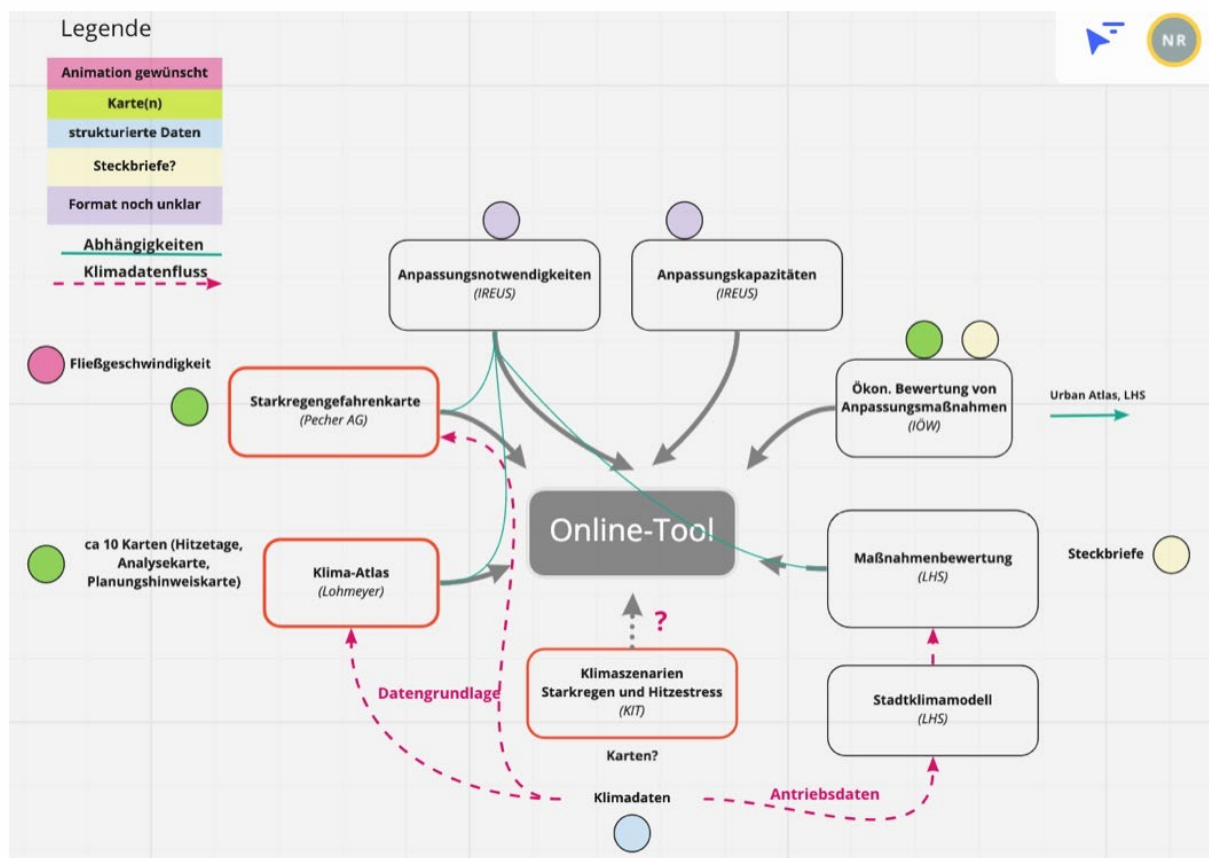


Abbildung 83: Online-Tool-Konzeption.

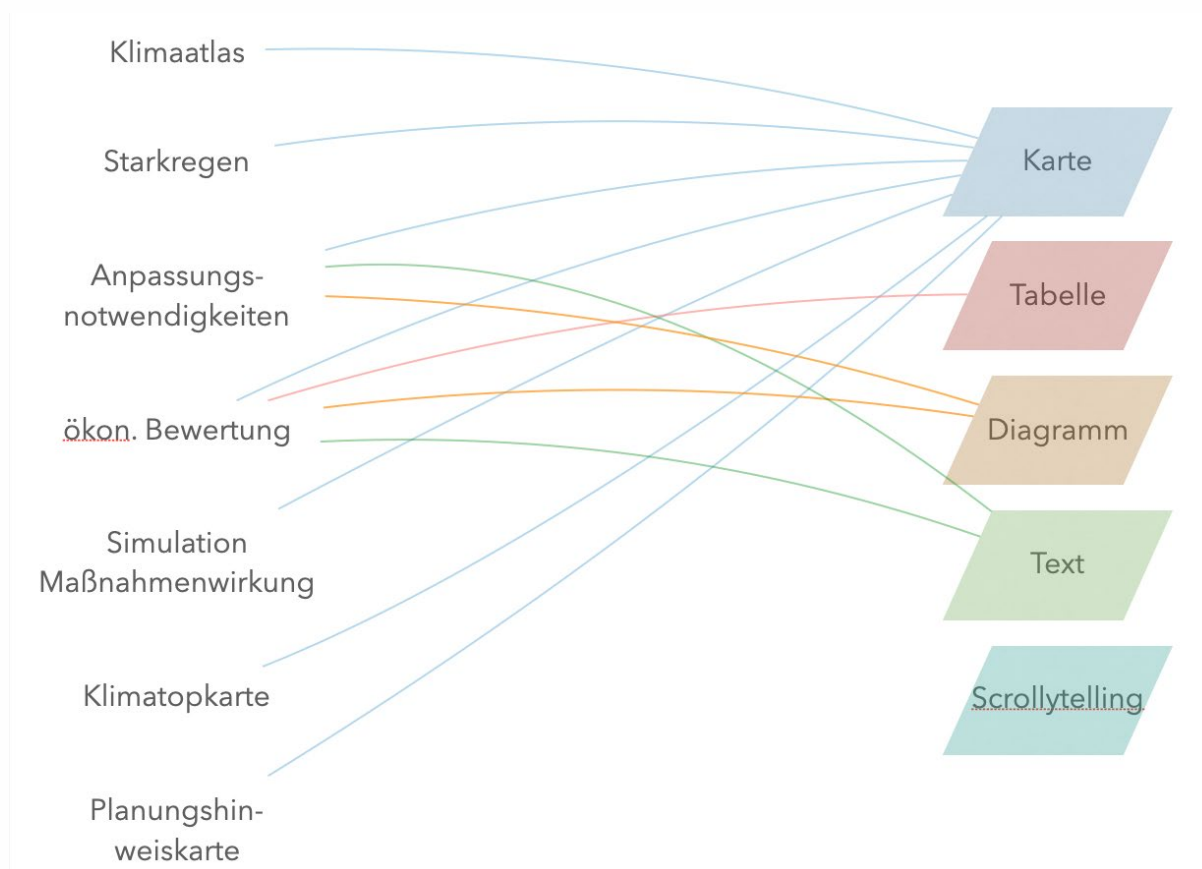


Abbildung 84: Übersicht der Themenfelder (links) und ihrer geplanten Darstellungsform (rechts) im Tool.

4.3.2 Technische Konzeption und Umsetzung

Nachfolgend wird der technische Aufbau des Tools skizziert und welche technischen Komponenten das Tool umfasst. Für das Tool wurde nur Open-Source anstelle von kommerzieller Software verwendet. Die einzige kommerzielle Komponente ist die Cloud, auf der das Tool gehostet wird. Grundsätzlich läuft das Tool in einer Cloud-Infrastruktur und ist in die Webseite des Verband Region Stuttgart eingebettet. Erreichbar (nach aktuellem Stand mit Login) ist das Tool über <https://klimaatlas.region-stuttgart.org/>. Gehostet wird das Tool durch indblik.io.

Die Cloud, auf der das Tool aufgebaut ist, ist die AWS (Amazon Web Services) Cloud. Die folgende Abbildung 85 verbildlicht die technischen Komponenten des Tools und ihre Zusammenhänge auf der AWS Cloud. Die einzelnen Komponenten, ihre Funktionen und ihr Zusammenspiel werden in den folgenden Absätzen beschrieben.

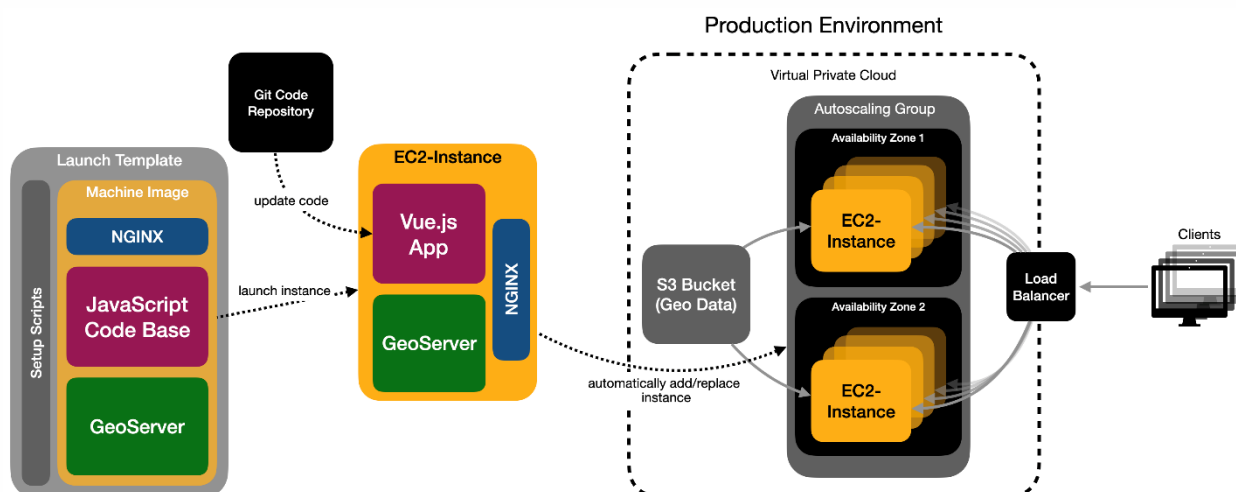


Abbildung 85: Technischer Aufbau des Tools in der AWS Cloud.

Bevor die einzelnen Komponenten beschrieben werden, werden die grundsätzlichen technischen Schichten des Tools erläutert. In jeder Schicht fallen mitunter andere Technologien an.

Die oberste Schicht ist das Frontend. Das ist die Schicht, die die Nutzer:innen letztendlich sehen. Dies setzt sich aus der sogenannten Benutzeroberfläche (User Interface) und dem Toolerlebnis (User Experience) zusammen. Das Frontend wird maßgeblich durch die Nutzer:innenanforderungen an das Tool beeinflusst. Für die Programmierung des Frontends wird das JavaScript-basierte Framework vue.js (<https://vuejs.org/>) genutzt. Eine Schicht darunter liegt das sogenannte Backend. Dieses besteht einerseits aus der Verarbeitungslogik und der Datenhaltung, also wie die Daten angelegt werden und wie diese verarbeitet werden. Die Geodaten werden in einem S3 bucket auf der AWS Cloud gelagert und werden über den Geoserver verarbeitet und zur Verfügung gestellt. Alle nicht-Geodaten, z.B. Textdaten in Markdown-Format, liegen auf der EC2-Instanz und werden direkt vom Frontend (vue.js) verarbeitet. Die Datenformate der wissenschaftlichen Produkte hatte dabei maßgeblich Einfluss auf die Wahl der Backend-Technologien. Die unterste Schicht, die technische Infrastruktur, ist die Umgebung auf der Frontend und Backend laufen. In unserem Fall ist das eine EC2-Instanz auf der AWS Cloud.

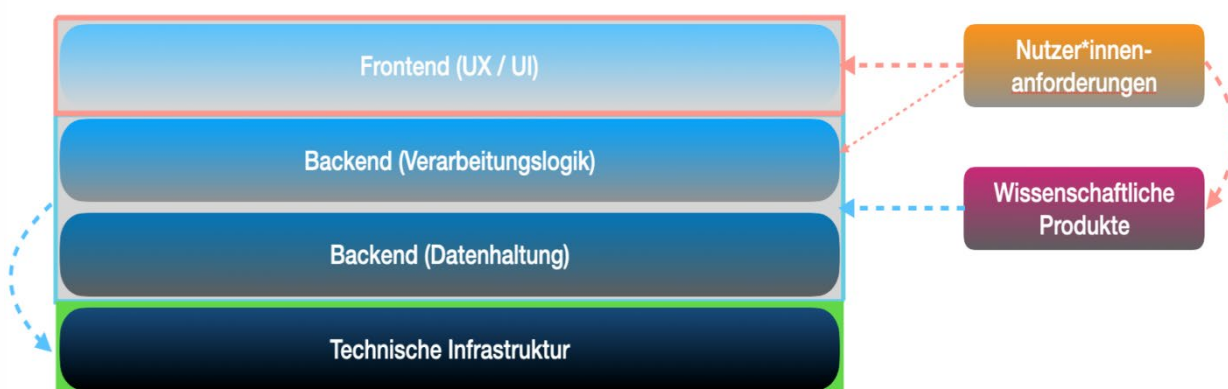


Abbildung 86: Technische Schichten.



Wie bereits angedeutet, läuft das Tool auf einer EC2-Instanz (gelb hinterlegt in Abbildung 85) auf der AWS Cloud. Zu dem Tool gehört das Frontend (in vue.js geschrieben), der Geoserver und ein NGINX Server, der das Tool dem Internet bereitstellt. Geoserver und NGINX-Server gehören zum Backend. Der Geoserver hat die Funktion die Kartenlayer (Vektor- oder Rasterdaten) der App als gekachelte Bilder (png-Format) zur Verfügung zu stellen. Das ist leichtgewichtiger und schneller als die kompletten Karten abzurufen. Die Geodaten, die der Geoserver sich holt und kachelt, liegen in einem S3-Bucket, das ist ein Datenspeicher, auf der AWS Cloud. Der Quell-Code, mit dem das Tool entwickelt wird, liegt in einem Github Repository. Github ist eine Open-Source Plattform für Code-Entwicklung, die sowohl Versionskontrolle als auch Kollaboration ermöglicht. Wenn der Quell-Code des Tools von einem/einer Entwickler:in aktualisiert wird, registriert die EC2-Instanz diese Änderungen und baut das Tool neu auf. Von der EC2-Instanz wird außerdem eine Kopie erstellt, ein sogenanntes Machine Image. Dies dient als Backup und dazu, eine neue, identische EC2-Instanz aufsetzen zu können. Eine EC2-Instanz hat eine definierte Speichergröße und Rechenleistung. Je mehr Nutzer:innen gleichzeitig auf das Tool zugreifen, bzw. je mehr Prozesse auf der EC2-Instanz laufen (z. B. Erstellung von gekachelten Kartenlayern), desto eher kommt die EC2-Instanz an ihre Grenze. Kurz bevor diese Grenze erreicht ist, wird in diesem technischen Setup eine neue EC2-Instanz aufgebaut. Diese EC2-Instanzen bilden dann eine logische Gruppierung, welche als Auto-Scaling-Group definiert wird. Bei Bedarf baut die Auto-Scaling-Group weitere Instanzen auf oder ab. Der sogenannte Load-Balancer verteilt den eingehenden Datenverkehr dann auf die Anzahl an laufenden EC2-Instanzen in der Auto-Scaling-Group. Die Server, auf denen die AWS-Cloud in unserem Setup läuft, stehen in der Frankfurt Region. Dadurch wird gewährleistet, dass das Tool DSGVO (die Datenschutz-Grundverordnung) konform ist.



4.3.3 Evaluation des Tools

Zusammen mit LHS hat das Difu im Juli 2023 einen Workshop mit Planer:innen der Stadt Stuttgart durchgeführt. Die Umwidmung der ursprünglich geplanten Einzelgespräche mit ausgewählten Kommunen hat auf Anregung und in Abstimmung mit LHS stattgefunden. Im Rahmen dieses Workshops wurden der aktuelle Entwicklungsstand des ISAP-Tools sowie die Simulationsergebnisse für das Fokusgebiet NeckarPark vorgestellt. Anschließend bewerteten die Teilnehmenden das Tool hinsichtlich ihrer eigenen Nutzerbedarfe und Anwendbarkeit. Darauf basierend wurden Anpassungsbedarfe und Verbesserungsvorschläge gesammelt, die für die Weiterentwicklung des Tools genutzt werden sollten (M6). Weitere Informationen sind im gemeinsamen Bericht mit LHS zu diesem Workshop enthalten.

Um trotz der späteren Entwicklung einer Testversion des ISAP-Online-Tools als geplant die Erprobung und Evaluierung des Tools noch innerhalb der Projektlaufzeit zu ermöglichen, wurden die gemäß Antrag geplanten zwei (2) Evaluierungsworkshops sowie der (1) Erfahrungsaustausch in eine fragebogengestützte Online-Evaluierung inklusive Briefing der Teilnehmenden aus der Region und einer anschließenden Auswertung umgewidmet.

Diese Online-Evaluierung hat ermöglicht, dass die orts- und zeitungebundene Evaluierung des ISAP-Tools durch verschiedene Akteure in der Region noch vor dem Laufzeitende der ersten Phase des Projektes (31.10.2023) durchgeführt werden konnte. Zudem hatten die Testpersonen so die Gelegenheit, sich intensiver und im eigenen Tempo mit dem Tool zu beschäftigen, als dies in den Workshops möglich gewesen wäre. Dadurch konnte ein fundiertes und detailliertes Feedback der Testpersonen eingeholt werden, welches in die Weiterentwicklung des Tools einfließt.

Insgesamt haben 13 Testpersonen aus unterschiedlichen kommunalen Fachbereichen an der 14-tägigen Erprobungs- und Evaluierungsphase teilgenommen, die durch die aktive Unterstützung der Verbundpartner vor Ort für eine Mitarbeit gewonnen werden konnten. Sie kamen aus den Städten Stuttgart und Heidelberg (außerhalb der Region Stuttgart) sowie aus den Landkreisen Böblingen, Esslingen, Göppingen und Ludwigsburg. Somit waren bis auf den Rems-Murr-Kreis alle regionszugehörigen Kreise und kreisfreien Städte an der Evaluierung beteiligt. In der Erprobungs- und Evaluierungsphase wurden die Testpersonen gebeten, das Tool in den Kategorien „Navigation“, „Regionale Klimainformationen“, „Klimaangepasste Raumentwicklung“, „Wissensbibliothek“ und „Anwendbarkeit“ zu bewerten und dabei sowohl Multiplechoice-Fragen, Ja/Nein-Fragen als auch Freitext-Fragen zu bearbeiten. Die Abbildung 87 zeigt ein Beispiel der Auswertung einer Frage aus der Kategorie „Regionale Klimainformationen“. Das Ergebnis der Auswertung dieser Frage wurde bereits bei der Weiterentwicklung des Tools umgesetzt. Deshalb sind in Säule 1 des ISAP-Tools bspw. nun keine Layer mehr voraktiviert.



In der Säule 1 sind im oberen Teil der linken Menüleiste drei Layer vorausgewählt und zwar "Soziale Vulnerabilität gegenüber Hitze", "Klimaanalyse" und "Maximale Niederschlagstiefe".

Welche drei Layer würden Sie dort gerne voraktiviert angezeigt bekommen?

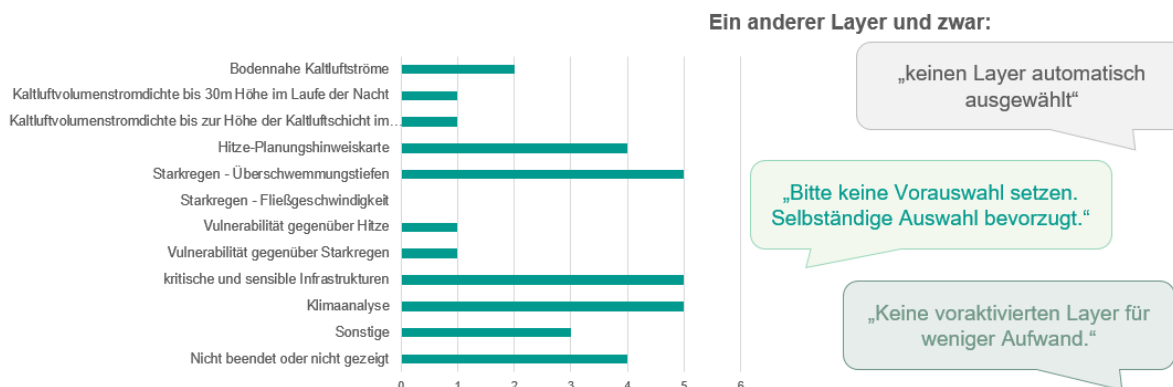


Abbildung 87: Auswertung einer Frage der Kategorie "Regionale Klimainformationen".

Andere Rückmeldungen wie die zur Wissensbibliothek in Abbildung 88 werden derzeit (Anfang Phase 2) vom Tool-Redaktionsteam aufgegriffen, um eine bessere Verständlichkeit zu erzielen.

Wie bewerten Sie die Verständlichkeit der Texte in der Wissensbibliothek?

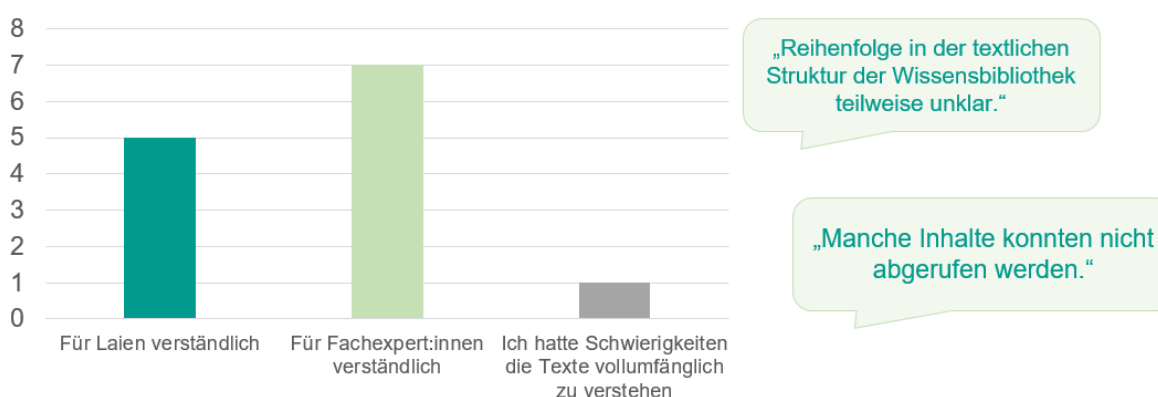


Abbildung 88: Bewertung der Verständlichkeit der Wissensbibliothek.

Zusammenfassend sieht die Mehrheit der Testpersonen für sich einen Mehrwert des Tools, zum einen durch die Integration in eigene Arbeitsprozesse (Abbildung 89) und zum anderen als sinnvolle Ergänzung zu bestehenden Anwendungen (Abbildung 90).



Können Sie das Tool in Ihre Arbeitsprozesse integrieren?

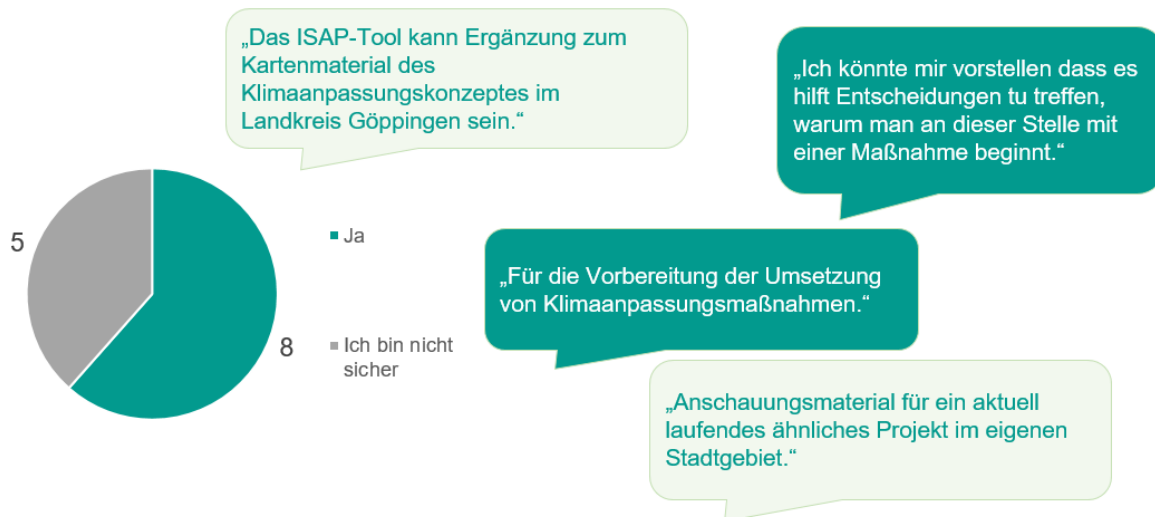


Abbildung 89: Integrationsfähigkeit des Tools in Arbeitsprozesse der Testnutzer:innen.

Welche in Ihrer Kommune/ Ihrer Institution vorhandenen Informationen, Instrumenten, Anwendungen und Programme kann das Tool ergänzen?



Abbildung 90: ISAP-Tool als Ergänzung zu bestehenden Anwendungen.

Kapitel 5

Dissemination





5. Dissemination

Die Zielsetzung, regionale Akteure und Kommunen zum Klimahandeln zu motivieren, verlangte einen kontinuierlichen und projektbegleitenden Austausch. Der erfolgte Austausch zur Vermittlung des ISAP-Mehrwerts mit anderen Regionen und Kommunen in Deutschland sowie mit der Planungsregion Northern Virginia wird in den nachfolgenden Kapiteln dargelegt.

5.1 Austausch zur Verbreitung der Projektergebnisse in Deutschland

Zuständigkeit: Arbeitspaket 7 – Difu, IREUS, VRS, P-AG, LHS

Zur Verbreitung der Projektergebnisse auf nationaler Ebene wurden folgenden Aktivitäten durchgeführt (Auswahl):

Präsentation der ISAP- Ergebnisse auf externen Veranstaltungen

- DKN-Konferenz des German Sustainability Science Summit am 08. & 09.07.2021, Posterpräsentation zu: An integrative spatial approach to developing adaptation strategies for the growing polycentric region of Stuttgart, Online
- BMBF – Vernetzungstreffen zu #Digital mit Hitze umgehen am 16.06.2021, Vortragspräsentation zu Neue digitale Werkzeuge für Kommunen - die Fördermaßnahme RegIKlim, Online
- RegIKlim meets KlimAdapt-Netzwerk: Praxisnahe Klimadienste für Kommunen am 23.11.2022, Teilnahme und Vortragspräsentation von ISAP-Vertreter:innen zum ISAP-Tool
- 6. Dortmunder Konferenz 02/2023 am 13.03.2023, Vortragspräsentation zur Ermittlung von gesellschaftlichen & räumlichen Anpassungsbedarfen für die klimaresiliente Entwicklung der Region Stuttgart, Dortmund
- EGU 2023 am 24.04.2023, Posterpräsentation zu Indicators of Vulnerability for Spatial Planning: Extreme Heat and Rainfall in the Region of Stuttgart, Wien
- 12. Kommunalen Erfahrungsaustausch „Regenwassermanagement in der Praxis“ am 27.04.2023, mehrere Vortragspräsentationen zu ISAP-Ergebnissen u.a. zu den hochaufgelösten Klimasimulationen, zur regionalen Starkregengefahrenkarte, zur Hitze- und Starkregenvorsorge in der Region Stuttgart, etc., Gelsenkirchen
- Klima-Aktionstag Stuttgart am 24.06.2023, Vortragspräsentation zu Regionale Klimarisiken – Optionen und Grenzen der Anpassung auf stadt-regionaler Ebene, Stuttgart
- Online-Wissenstransfer-Veranstaltung („Spotlight“) des Zentrum KlimaAnpassung (ZKA) zum Thema „Regionale Informationen zum Klimahandeln (RegIKlim) am 23.08.2023, neben der Organisation und Durchführung mit Impulsen für die kommunale Klimaanpassung mit Prof. Dr. Matthias Mauder von der RegIKlim-Modellregion KlimaKonform und Corinna Schmidt von der Modellregion ISAP als Referent:innen; 54 Teilnehmer:innen aus ganz Deutschland

Weitere Öffentlichkeitsarbeit

- Verfassen des „Projekt im Fokus“- und weiteren Kurzbeiträgen zu ISAP im RegIKlim-Newsletter
- Erstellung und Pflege der projekteigenen Website ISAP, <https://www.project.uni-stuttgart.de/isap/>
- Initiierung und Mitwirkung an der Organisation einer Ausgabe der Fachzeitschrift RaumPlanung mit dem Schwerpunkt „RegIKlim“ (gemeinsam mit WIRKSAM AG 4) sowie Entwicklung eines Beitrags zum ISAP-Online-Tool mit einer vorgesehenen Veröffentlichung in 2024



- Verbreitung der Projektergebnisse im Nachgang zur ersten Phase über die Newsletter der kommunalen Spitzenverbände, von UBA-KomPass, des Zentrum KlimaAnpassung und des Difu

Fachlicher Austausch mit weiteren (Forschungs)-Projekten

- Fachliche Austausche mit den Verbundpartnern des BMBF-Projekts, ProPolis‘ zu Nutzerbedarfen und -anforderungen an digitale Tools und die Durchführung von Aktivitäten zur Erprobung von Tools und Evaluation der Testergebnisse
- Fachliche Austausche mit den Verbundpartnern des BMBF-Projekts ‚NUKLEUS‘ aus der RegIKlim-Förderphase zu Klimasimulationen und den Klimaensembeln
- Fachliche Austausche mit den Verbundpartnern des BMBF-Projekts ‚KARE‘ aus der RegIKlim-Förderphase bei der Entwicklung des Fragebogens für die durchgeführten Haushaltsbefragungen in Kirchheim Unter Teck und Stuttgart
- Fachliche Austausche mit den Verbundpartnern des EU-Projekts ‚urbisphere‘ zu methodischen Ansätzen zur Erfassung der Vulnerabilität und Exposition und zur Auswertung von Befragungsergebnissen
- Fachliche Austausche mit der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) und dem Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg (MLW) zu methodischen Ansätzen zur Erfassung der Vulnerabilität, Exposition und kritischen Infrastrukturen

ISAP – Veranstaltungen

- ISAP – Fachworkshops mit Teilnehmer:innen aus unterschiedlichen Abteilungen der kommunalen Verwaltung der Stadt Stuttgart und mit kommunalen Planungspraktiker:innen aus Kommunen der Region Stuttgart im Frühjahr 2021 zur Erhebung der Nutzerbedarfe und -anforderungen für das Online-Informations- und Beratungssystem (siehe Kapitel 4.2.3)
- ISAP – mehrtägiger Fachworkshop vom 06.03.2023 bis zum 08.03.2023 in Northern Virginia zu „Cross-National Research to Support Local and Regional Climate Resilient Planning in Stuttgart and Northern Virginia“ mit dem IREUS, dem VRS, der George-Mason-University (GMU) und der Northern Virginia Regional Commission (NRVC) (siehe Kapitel 5.3)
- ISAP – Siedlungsplaner:innenworkshop am 29.06.2023 in Stuttgart „Vulnerabilitätskarten im Plausibilitätscheck“ zur Validierung der Karten durch die Praxis
- ISAP – Fachworkshop mit Planer:innen der Stadt Stuttgart im Juli 2023 in Stuttgart zur Evaluierung des ISAP-Tools und seiner Inhalte (siehe Kapitel 4.3.3)
- ISAP – Briefingveranstaltung für kommunale Vertreter:innen in der Region am 28.09.2023 online „Erprobung des Online-Informations- und Beratungstool von ISAP“ zur Erprobungs- und Evaluierungsphase des ISAP-Tools (siehe Kapitel 4.3.3)
- ISAP – Abschlussveranstaltung am 23.10.2023 in Stuttgart „Auf dem Weg zur klimaangepassten Region Stuttgart – der neue Regionale Klimaatlas als Informations- und Beratungssystems“ als Informations- und Vernetzungsveranstaltung in Stuttgart (siehe Kapitel 5.4)



5.2 Austausch mit dem Querschnittsprojekt WIRKsam

Zuständigkeit: IREUS, Difu, KIT, IÖW, VRS, LHS

Die ISAP-Verbundpartnerschaft nahm aktiv an den Vernetzungs- und Austauschmöglichkeiten, die im Rahmen des Querschnittsprojekts WIRKsam (Wissenschaftliche Koordination zur Entwicklung eines regionalen Klimakatasters) organisiert wurden, teil. Die zentralen Austauschformate werden nachfolgend aufgelistet:

In der **Arbeitsgruppe 1 – Koordinator:innentreffen** gab es einen regelmäßigen Austausch zur Vernetzung in der RegIKlim-Phase 1 zu u.a. folgenden Themen: Statuskonferenzen, Antragsentwicklung für die RegIKlim-Phase 2, das Klimaanpassungsgesetz, etc. An den dargelegten Terminen wurde das ISAP-Team durch Jörn Birkmann als Verbundkoordinator oder durch die IREUS-Projektbearbeiter:innen Joanna McMillan, Britta Weisser und Franziska Götsche vertreten.

In der **Arbeitsgruppe 2 – integrierte Bewertung auf regionaler und lokaler Ebene** wurden verschiedene Ansätze zur integrierten Bewertung von Maßnahmen auf unterschiedlichen Planungsebenen diskutiert. Im Rahmen der angesetzten Arbeitsgruppenterminen haben primär die ISAP-Vertreter:innen Jesko Hirschfeld, Tobias Möllney, Tarin Karzai, Katharina Püffel durch vorbereitete Inputs, durch Erfahrungswissen aus der Forschungsperspektive und durch die Mitdiskussion an Lösungsansätzen zur Bewertung von Klimaanpassungsmaßnahmen am Leitfaden indirekt mitgewirkt. Das Ergebnis mündete in dem folgenden Leitfaden:

- Dalitz, L., Schauser, I. & von Streit, A. (2023). Klimaanpassungsmaßnahmen bewerten – Herausforderungen und Lösungsansätze aus der Praxis. Leitfaden aus der Fördermaßnahme Regionale Informationen zum Klimahandeln (RegIKlim) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Online verfügbar unter: https://www.regiklim.de/SharedDocs/Downloads/DE/Dokumente/AG2_Leitfaden.pdf?__blob=publicationFile&v=1

In der **Arbeitsgruppe 3 – regionale Anpassungskapazitäten und Anpassungsnotwendigkeiten** wurden verschiedene Ansätze zur Erfassung und Bewertung von regionalen Anpassungskapazitäten diskutiert. Im Rahmen der angesetzten Arbeitsgruppenterminen haben die ISAP-Vertreter:innen Joanna McMillan, Britta Weisser und Franziska Götsche durch vorbereitete Inputs, durch Erfahrungswissen aus der Forschungsperspektive und durch die Mitdiskussion an der Indikatorenbildung zur Erfassung von Anpassungskapazitäten an den Arbeitsgruppenergebnissen mitgewirkt. Das Ergebnis mündete in dem folgenden Leitfaden:

- Laranjeira, K., Karrasch, L., Schoppe, A., von Streit, A., Schubert, A., **McMillan, J., Götsche, F.**, Zorn, A., Schäfer, S., Brandenstein, F., Kölling, A., Hildmann, C., Dalitz, L. & Harrs, J.-A. (2023). Erfassung und Bewertung von Anpassungskapazität. Ansätze aus der RegIKlim Forschung. Leitfaden aus der Fördermaßnahme Regionale Informationen zum Klimahandeln (RegIKlim) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Online verfügbar unter: https://www.regiklim.de/SharedDocs/Downloads/DE/Dokumente/AG3_Leitfaden.pdf?__blob=publicationFile&v=1

In der **Arbeitsgruppe 4 – Übertragbarkeit und Transfer** wurde primär die Skalierbarkeit und das Transferpotential der sich in der Entwicklung befindenden Klimadienste der sechs Modellregionen erhoben. Im Rahmen der zehn angesetzten Arbeitsgruppenterminen haben die ISAP-Vertreter:innen Silke Drautz, Rayk Rinke, Katharina Luig, Jens Hasse, Corinna Schmidt, Britta Weisser und Franziska Götsche durch vorbereitete Inputs, durch Erfahrungswissen aus der Praxis- und



Forschungsperspektive und durch die Teilnahme an der durchgeführten Befragung bei der Erarbeitung der Inhalte indirekt mitgewirkt. Das Ergebnis mündete in dem folgenden Leitfaden:

- Harrs, J.-A., Dalitz, L., Laranjeira, K., & Huck, A. (2023). Konzept zur operativen Verstetigung und Skalierung von Klimadiensten. Praktische Erfahrungen aus der Fördermaßnahme RegIKlim. Leitfaden aus der Fördermaßnahme Regionale Informationen zum Klimahandeln (RegIKlim) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Online verfügbar unter: https://www.regiklim.de/SharedDocs/Downloads/DE/Dokumente/AG4_Leitfaden.pdf?__blob=publicationFile&v=1

In der **Arbeitsgruppe 5 - Transdisziplinäre Prozesse** galt die Identifizierung von Anforderungen an transdisziplinäre Projekte in der regionalen Klimaanpassung als Schwerpunktfeld. Diese entwickelten Anforderungen wurden auf Basis der Erfahrungen aus RegIKlim systematisiert. Hierzu haben die ISAP-Vertreter:innen, Britta Weisser und Franziska Götsche, an der Entwicklung der Anforderungskriterien zu den unterschiedlichen Projektphasen mitgewirkt und sich mit den anderen Modellregionen im Rahmen der zehn angesetzten Arbeitsgruppenterminen ausgetauscht. Das Ergebnis mündete in dem folgenden Leitfaden:

- Meilinger, V., Huck, A. & Harrs, J.-A. (2023). Transdisziplinäre Forschung in der regionalen Klimaanpassung. Erfahrungen aus der Fördermaßnahme RegIKlim. Leitfaden aus der Fördermaßnahme Regionale Informationen zum Klimahandeln (RegIKlim) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Online verfügbar unter: https://www.regiklim.de/SharedDocs/Downloads/DE/Dokumente/AG5_Leitfaden.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Zusätzlich gab es RegIKlim-Vernetzungstreffen, an denen die ISAP-Verbundpartnerschaft aktiv u.a. auch durch Kurzpräsentationen, Poster- & Toolpräsentationen auf dem Markt der Möglichkeiten, Teilnahme an der Podiumsdiskussion etc. teilgenommen hat. Zu diesen zählen folgende Konferenzen:

- Teilnahme an der Auftaktveranstaltung 2021 der BMBF - Fördermaßnahme RegIKlim am 22. & 23. März 2021, online
- Teilnahme an der 2. Statuskonferenz 2022 der BMBF - Fördermaßnahme RegIKlim am 11. & 12. Mai 2022 in Halle
- Teilnahme an der 3. Statuskonferenz 2023 der BMBF - Fördermaßnahme RegIKlim am 19. & 20. September 2023 in Berlin



5.3 Vernetzung mit der Planungsregion Northern-Virginia-USA

Zuständigkeit: Arbeitspaket 7 – IREUS, Difu, VRS

Da Fragen der Identifikation, Bewertung und Umsetzung von Anpassungsstrategien und Maßnahmen im Rahmen der Regionalplanung sowie der Stadtplanung auch von hohem internationalem Interesse sind, realisierte das ISAP-Projekt einen Austausch mit der Planungsregion Northern Virginia in den USA. Die Planungsregion Northern Virginia hat eine langjährige Kooperation mit dem Verband der Region Stuttgart zu diesen Fragen, sodass auch während der ersten ISAP-Phase Vernetzungsaktivitäten mit den US-Kolleg:innen erfolgte. Als zentrales Ereignis ist hier der mehrtägige Workshop zu „Cross-National Research to Support Local and Regional Climate Resilient Planning in Stuttgart and Northern Virginia in 6-8 März 2023“ in den USA zu nennen. Neben den Vertreter:innen des Virginia Climate Center (VCC) an der George Mason University (GMU), der Northern Virginia Regional Commission (NVRC), der Universität Stuttgart und der Verband Region Stuttgart (VRS) nahmen auch weitere Wissenschaftler:innen, Politikexpert:innen und Praktiker:innen aus dem Commonwealth of Virginia an dem genannten Workshop teil.

Der Workshop zielte darauf ab, zukünftige Kooperationsthemen zu identifizieren, die den länderübergreifenden Austausch von Daten, Informationen, Modellen, Strategien auf lokaler Ebene fördern, um eine für beide Seiten nachhaltige und klimaresiliente Planung zu unterstützen. Der dreitägige Workshop gliederte sich in Präsentations-, Workshops- und Exkursionstag. Am ersten Tag gab es innovative Impulse von Wissenschaftler:innen und Praktiker:innen zu unterschiedlichen Ansätzen zum Umgang mit Hochwasser, Starkregen und Hitze, zur Erfassung von Verwundbarkeiten und kritischen Infrastrukturen und zu Strategien im Klimaschutz und erneuerbaren Energien in den Regionen Stuttgart und Northern-Virginia. Am nächsten Tag folgte das intensive Arbeiten in Kleingruppen, die sich auf die vier Schwerpunktthemen konzentrierten, mit dem Ziel, potentielle gemeinsame Forschungs- und Projektmöglichkeiten zu ermitteln. Zuletzt fanden Exkursionen zu Best-Practice-Projekte, wie z.B. das Renaturierungsprojekt am Four Mila Run, statt.

Zu den zentralen Kernergebnissen des Workshops zählen u.a.:

- erste Systematisierung wichtiger Fragestellungen zur Klimaresilienz in der Planung, die sich für einen weiterführenden internationalen Vergleich eignen
- Identifizierung eines weiteren notwendigen Austauschs zu methodischen Ansätzen, die Verwundbarkeiten und Risiken gegenüber Hitzestress, Starkregen und Hochwasser erfassen
- Identifizierung eines weiteren Forschungs- und Austauschbedarfs zur Wirkung von unterschiedlichen Maßnahmen in den Regionen, da es sich zeigte, dass unterschiedliche Maßnahmenstrategien angewendet werden
- Betonung der Wichtigkeit des Themas Zugang zu qualitativ hochwertigen Grünflächen und Kühlungsmöglichkeiten, insbesondere für besonders verwundbare Gruppen, bei beiden Regionen
- Vergleichsstudie zwischen den informellen Strategien zur Klimaanpassung „KlimaBB“ und „Fairfax resilient plan“
- Identifizierung des Mehrwerts- und Nutzungspotentials solch eines Planungstools auch für die Region Northern Virginia
- Entwicklung von Follow-ups sowie der Zuordnung von Verantwortlichkeiten
- Fortführung des Austauschs durch Quartalsmeetings
- Fortführung des Austauschs auch in Form von intensiven mehrtägigen Workshops in Präsenz im Rahmen des Nachfolgeprojekts ISAP2



Abbildung 91: Gruppenfoto vom 2. Tag des Workshops zu “Cross-National Research to Support Local and Regional Climate Resilient Planning in Stuttgart and Northern Virginia in 6-8 März 2023”

5.4 Abschlusskonferenz am 23.10.2023

Zuständigkeit: Arbeitspaket 7 – IREUS, VRS, LHS, KIT, IÖW, Difu, P-AG, Lohmeyer, inblik.io

Am 23. Oktober 2023 fand die Abschlusskonferenz zum ISAP1- Projekt von 12:30 Uhr bis 18:15 Uhr im Haus der Wirtschaft in Stuttgart statt. Unter dem Veranstaltungstitel „Auf dem Weg zur klimaangepassten Region Stuttgart - der neue regionale Klimaatlas als Informations- und Beratungssystem“ wurden die Ergebnisse des Projekts im Rahmen von vier Fokusrunden vorgestellt. Im Nachgang zu jeder Fokusrunde hatten die insgesamt 103 Teilnehmer:innen die Möglichkeit, im Rahmen von Fragen- und Antwortrunden die vorgestellten Ergebnisse zu diskutieren. In simplifizierter Form ist nachfolgend das Veranstaltungsprogramm zu finden.

Tabelle 20: Veranstaltungsprogramm (in vereinfachter Form) der ISAP-Abschlusskonferenz

12:30	Begrüßung
12:50	Das ISAP-Projekt im Überblick
13:00	Fokus 1: Der Klimawandel in der Region Stuttgart – spürbar, sichtbar, modellierbar • Impulsvortrag „Siedlungsentwicklung, Mobilität, Freiraumschutz & Co.: Nachhaltige Regionalentwicklung unter den Bedingungen des Klimawandels“ • Impulsvortrag „Weiterentwicklung des Klimaatlas mit besonderem Fokus auf die Planungsgrundlagen für die Region Stuttgart“ • Impulsvortrag „Regionale Starkregengefahrenkarten – hydraulischer Modellierungsansatz und Ergebnisse“



	• Impulsvortrag „Starkregen und Hitzewellen im Wandel: Erkenntnisse aus hochaufgelösten Klimaprojektionen für die Region“ Q&A zu Klima in der Planung
14:30	Kaffeepause
15:00	Fokus 2: Strategien zum Anpassungshandeln – messbar, effektiv und integrativ • Impulsvortrag „Regionale Klimarisiken – Erfassung von Exposition und Verwundbarkeit der Region als Ansatz der Klimaanpassung“ • Impulsvortrag „Lokales Handeln wirkt – Modellierung von Maßnahmeneffekten am NeckarPark“ • Impulsvortrag „Begrünungsmaßnahmen sind Mehrwert – Wirkungen der integrierten Ökosystemleistungen am NeckarPark“ Q&A zu Risiko, Anpassungshandeln, Maßnahmenwirkungen
16:15	Kaffeepause
16:45	Fokus 3: Online-Informations- und Beratungssysteme – vom Anpassungswissen zum Anpassungshandeln • Impulsvortrag „Live-Vorführung des Online-ISAP-Tools für die Planung im Umgang mit dem Klimawandel und Ausblick auf die Anwendung im Planverfahren“ • Impulsvortrag „Das ISAP-Tool im Test – erste Ergebnisse der Befragung von Pilotnutzer:innen,“ • Impulsvortrag „Begrünungsmaßnahmen sind Mehrwert – Wirkungen der integrierten Ökosystemleistungen am NeckarPark“ Podiumsdiskussion zu Online-Tools für die Klimaanpassung: Anforderungen und Nutzen für die Kommunal- und Regionalplanung
18:00	Fazit und Ausblick in die FuE-Phase II

Zusammenfassend zeigte sich ein eindeutiger Bedarf aus der Sicht der kommunalen und regionalen Vertreter:innen an dem neuen regionalen Klimaatlas als Informations- und Beratungssystem. U.a. wurde deutlich, dass ein zentrales Nutzungspotential der Toolinhalte insbesondere für informelle Planungsinstrumente, wie z.B. einem Rahmenplan oder einem Klimaanpassungskonzept, erachtet wird. Auch scheint es nach der ersten Einschätzung des Fachpublikums für eine erste Suchraumkulisse für die Identifizierung von Handlungsräumen aus der Anpassungsperspektive als geeignet. Als Optimierungsvorschlag wurde u.a. benannt, in dem ISAP-Tool auch eine Downloadoption zu integrieren oder die Einbettung von städtischen GIS-Systemen zu ermöglichen. Zusätzlich kann als Erfolg festgehalten werden, dass zahlreiche der Teilnehmer:innen auch Interesse bekundet haben, bei der zweiten Förderphase in Form von Workshops, Veranstaltungen oder Befragungen aktiv mitzuwirken. Im Kern unterstützte die Abschlussveranstaltung demnach die Verbreitung des Tools und seiner Inhalte und stärkte die Vernetzung von ISAP innerhalb und außerhalb der Region Stuttgart.

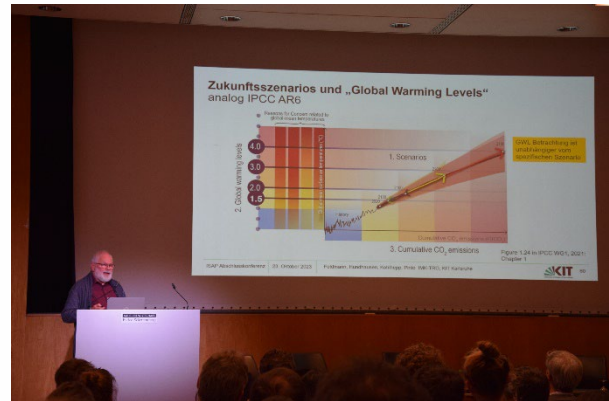


Abbildung 92: Impressionen der ISAP-Abschlusskonferenz.

Kapitel 6

Fazit und Ausblick





6. Fazit und Ausblick

Im Rahmen des ISAP-Projekts konnten demnach vielfältige und innovative Ergebnisse zu stadt-regionalen Anpassungsstrategien an Extremereignisse, wie Hitze und Starkregen, für die Modellregion Stuttgart entwickelt werden. Das Kernprodukt des Verbundprojekts stellt das digitale Informations- und Beratungssystem zur Klimaanpassung für die Kommunal- und Regionalplanung sowie der Kommunal- und Regionalentwicklung als neuer Klimaatlas für die Region Stuttgart dar. Dieser stellt u.a. Analysen und Maßnahmen zur Reduzierung von Hitze- und Starkregenrisiken bereit und es werden neue Formen der Kommunikation durch die anwenderfreundliche Aufbereitung und öffentliche Zugänglichkeit differenzierter Wissensarten (Grundlage, Anwendung, etc.) ermöglicht. Zudem bietet dieser Schritt der Digitalisierung von Klimainformationen Impulse zur Beschleunigung von Planungsprozessen und unterstützt die systematische Etablierung von Klimahandeln als selbstverständlichen und integrativen Teil der räumlichen Planung.

Aussagekräftige Informationen durch Methodik- und Forschungsinnovationen

Die im Online-Tool implementierten regionalen Klimainformationen zu Anpassungsnotwendigkeiten sind durch methodische Innovationen entstanden und wurden anwendungsorientiert aufbereitet. Das in ISAP fertig gestellte Klimaensemble mit sehr hoch aufgelösten Simulationen auf der Kilometer-Skala bietet eine innovative Basis für die Untersuchung von regionalen Klimarisiken sowie Extremereignissen und für die nachfolgende Wirkmodellierung (Starkregengefahrenkarten, Klimaanalysen). Aus ihnen konnten neue Erkenntnisse zu Hitzewellen und Starkniederschlagsereignissen, wie etwa der Ahr/Erft Flut im Juli 2021, im Klimawandel abgeleitet werden. Mit Hilfe der validierten Eingangsdaten für die weiterführenden Gefahrenanalysen wurde eine regionale Starkregengefahrenkarte mit einer Auflösung von 1x1m entwickelt, die eine einheitliche Planungs- und Informationsgrundlage für die Starkregenvorsorge darstellt. Da ein angepasster Modellierungsansatz verwendet wurde, profitieren dabei nicht nur Kommunen, die aktuell noch keine Starkregengefahrenkarte besitzen, sondern auch Kommunen die schon eigene Starkregengefahrenkarten nutzen. In der Karte werden sowohl die maximalen Überflutungstiefen als auch die Fließgeschwindigkeiten für zwei Szenarien dargestellt. Zur Ermittlung hitzebedingter Hotspots und bedeutsamer Kaltluftbahnen und -gebiete wurden stadt-regionale Klimaanalysen entwickelt. Für die Abbildung möglichst differenzierter Informationen und klimatischer Qualitäten in den kleineren und mittleren Kommunen wurden hierfür die Klimatopkategorien erweitert. Gebiete mit besonderem klimatischem Handlungsbedarf sind u.a. in Stuttgart und in den angrenzenden Gemeinden im erweiterten Agglomerationsraum der Stadt Stuttgart, aber auch im Verdichtungsraum entlang der Neckartalachse lokalisiert. Beim Hinzuziehen der umfangreichen und kleinräumigen Planwerke zur regionalen Vulnerabilität und Exposition zeigt sich beispielhaft in der Neckartal-Achse, dass in den Hotspots zu Starkregen und Hitze auch sensible und kritische Infrastrukturen, wie Krankenhäuser oder Kindergärten, verortet sind, die aufgrund ihrer Nutzergruppen besonders schutzwürdig und im Zuge der Implementierung von Klimaanpassungsmaßnahmen prioritär zu behandeln sind. Bei der Betrachtung weiterer Indikatoren zur Vulnerabilität, wie dem Alter oder der finanziellen Anpassungskapazität, differenzieren sich die regionalen räumlichen Muster deutlich. Die Gebiete mit einem hohen Anteil an Senior:innen liegen primär in den äußeren Rändern von Gemeinden, während die Gebiete mit einem hohen Anteil an fehlender sozio-ökonomischer Anpassungskapazität eher in dichten, urbanen Stadtkerngebieten liegen.

In der Raumachse Neckartal wurden des Weiteren Maßnahmen szenarien hinsichtlich ihrer Wirkungen auf potentielle Starkregenereignisse simuliert und deren Einfluss auf die Reduktion von Schadenspotentialen ermittelt. Für zwei Fokusgebiete innerhalb des Stadtgebietes von Stuttgart wurden mit Hilfe der hochauflösenden, stadtklimatischen Wirkmodelle ENVI-met sowie PALM-4U Simulationen hinsichtlich der Wärmebelastung für Menschen während einer Hitzeperiode



durchgeführt. In verschiedenen Szenarien wurden dabei insbesondere die human-biometeorologischen Wirkungen ausgewählter Klimaanpassungsmaßnahmen dargelegt. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass begrünte Freiflächen / Parks, Baumpflanzungen in Straßenschluchten sowie Maßnahmen zur Bauwerksbegrünung gut geeignet sind, die Wärmebelastung des Menschen zu reduzieren bzw. den thermischen Komfort zu erhöhen. Auch eine positive Beeinflussung der nächtlichen Lufttemperatur ist im Einzelfall gegeben. Für eine Grünflächenmaßnahme konnte bspw. eine Verbesserung des thermischen Komforts von bis zu 10 Kelvin auf Basis der physiologischen Äquivalenttemperatur (PET) aufgezeigt werden. Zudem konnte durch die integrative Bewertung dieser Anpassungsszenarien weiterer Mehrwert anhand der ökologischen und kulturellen Ökosystemleistungen ermittelt werden. Im Sinn dieser Methode erbringen in Summe bspw. die gesamten Begrünungsmaßnahmen im NeckarPark vielfältige Ökosystemleistungen, die sich auf einen Wert von über einer halben Million Euro im Jahr beziffern lassen. Dieser integrierte Ansatz bietet den Mehrwert, den Anwender:innen die Vielschichtigkeit von Klimaanpassungsmaßnahmen und ihrer Wirkungen näher zu bringen.

Stärkung von interkommunaler und Mehrebenen-Zusammenarbeit

Die Auseinandersetzung mit den stadt-regionalen hitze- und starkregenbedingten Hotspots zeigte erneut eindrücklich, dass ein Dialog zwischen den Kommunen zu dem Umgang mit solchen Hotspots unabdingbar ist. Der Erfahrungsaustausch unter Kommunen ist nicht nur wichtig um neue innovative Impulse und Perspektiven für die eigenen kommunale Anpassungsstrategien zu entwickeln, sondern auch da Kaltluftbahnen aber auch Starkregenabflüsse nicht an Gemarkungsgrenzen enden. Eine interkommunale Zusammenarbeit wird folglich auch mit Blick auf stadt-regionale Maßnahmen immer bedeutsamer. Bspw. erscheint eine Zusammenarbeit zwischen Esslingen und Stuttgart aufgrund der topographischen Gegebenheiten und den daraus sich ergebenden Starkregenabflüssen, insbesondere dann wenn die Starkregenabflüsse S-Bahn-Schienen, S-Bahn-Stationen oder weitere überregionale Infrastrukturen trifft, sinnvoll, obschon die Logik des Planungs-Verwaltungsaufbaus hier eher eine fachliche Trennung bei der Maßnahmenplanung vorsehen würde.

Gerade dann wenn z.B. Infrastrukturen auch bedeutsame Verkehrswege umfassen, dann ist es nicht nur eine Klimaanpassungsfrage für die Kommunen und die Regionen sondern auch in Teilen für das Land, sodass auch ein Zusammenarbeit über die vertikalen Planungsebenen essentiell ist. Diese Dimensionen der interkommunalen und Mehrebenen-Zusammenarbeit und deren Nutzen für die Umsetzung von Klimaanpassungsvorsorge wird in dem im Juli 2024 in Kraft tretenden Klimaanpassungsgesetz leicht unterschätzt.

In Szenarien denken – Spannbreiten aufspannen

Letzte Ereignisse in Deutschland und Europa zeigten sehr eindrücklich, dass Anpassungsnotwendigkeiten in unterschiedlichsten Sektorenfeldern, wie Verkehr, Wohnen, Grünplanung, etc. bestehen. Im Bereich der Frühwarnung vor solchen Extremereignissen war nach der Ahrtalkatastrophe der Bedarf an potentiellen Szenarien immer größer.

Herausfordernd ist hierbei, zum einen den Anpassungsdruck zu erklären, aber auf der anderen Seite auch die Spannbreite möglicher Risiken aufzuzeigen. Hitzewellen und auch Starkregenereignisse werden sich hinsichtlich ihrer Intensität und Häufigkeiten angesichts des Klimawandels weiterhin verändern. Aber auch unsere Städte und Regionen erfahren weitere Veränderungsprozesse, wie z.B. Alterung, Armut, Wanderung oder Urbanisierung. Bei immer länger andauernden Hitzewellen wird das Problem der Abkühlung immer größer und auch beim Thema Starkregen müssen Städte und Regionen sich und ihre Anpassungsstrategien fraglos beurteilen, wie gut sie auf solche Ereignisse vorbereitet sind. Denn zu beklagende Todesopfer in der Lebenshilfe Sinzig bei der Ahrtalkatastrophe 2021 oder beim Starkregenereignis in Schwäbisch Gmünd 2016 zeigten sehr wirkungsvoll, dass



Klimaanpassung nicht allein nur die Lebensqualität sichert, sondern auch zur Reduzierung von Lebensgefahr, bspw. durch die Standortwahl bei schutzwürdigen sensiblen Infrastrukturen, bedeutsam ist.

ISAP geht weiter

Die systematische Verwendung der bereitgestellten Klima-, Verwundbarkeits-, und Anpassungsinformationen in formelle und informelle Planungsinstrumente ist jedoch in vielen Aspekten noch nicht hinreichend geklärt. Das Nachfolgeprojekt ISAP2 setzt deshalb den Fokus auf die bedarfsorientierte Weiterentwicklung und Implementierung des Tools und seiner Inhalte in unterschiedlichen planerischen Anwendungsfällen zur Gewährleistung der Praxistauglichkeit.

In solchen Dialogprozessen zur Verknüpfung der entwickelten Anpassungsinformationen mit planerischen Prozessen und Instrumenten ist dann zu klären, wie Städte und Regionen mit den Ergebnissen, z.B. einer Starkregengefahrenkarte, umgehen und welche Maßnahmen für die identifizierten Bluespots geeignet sind? Zudem rücken auch Fragen zur Rolle von Siedlungs- und Landschaftsveränderungen für die regionale Klimaanpassung sowie von kritischen und sensiblen Infrastrukturen in den Vordergrund und welche Rolle diese in der strategischen Planung im Sinne einer Minderung von Klimarisiken einnehmen können. Durch die immer dichter werdende Bauweise erhalten stadt-regionale Grünflächen eine höhere Bedeutung, sodass man bei der Entwicklung solcher neuen Bauflächen nicht nur Angaben zur Dichte, sondern auch zur Quantität und Qualität von Freiraum, wie z.B. dem verschatteten Mindestanteil, liefern müsste, damit auch während einer Hitzewelle zukünftig das Wohnen dort lebenswert ist.

Der letzte IPCC-Bericht zeigte eindrücklich, dass bisherige Bestrebungen eine klimaresiliente Entwicklung nur bedingt vorangebracht haben (IPCC, 2022). In der Deutschen Anpassungsstrategie wird als langfristiges Ziel die Reduktion der Verwundbarkeit von natürlichen, sozialen und wirtschaftlichen Systemen und die Stärkung der Anpassungsfähigkeit benannt (DAD, 2008). Die gesetzliche Verankerung des Klimaschutzes und der Klimaanpassung in das Baugesetzbuch verstärkt zusätzlich den Klimaanpassungsbelang bei der Planung. Dies gewinnt vor dem Hintergrund der dort definierten Anforderungen an gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse zusätzlich an Bedeutung. Im Klimaschutz gibt es ganz konkrete Zielformulierungen, wie z.B. im Pariser Klimaabkommen oder im Klimaschutzgesetz des Bundes. Doch wie viel Klimaanpassung ist genug? Bei solch einer Zielsetzungsdiskussion geht es weit mehr als über die Bezifferung von neuen Stadtbäumen. Wo liegt das Schutzniveau? Wie viele sensible Infrastrukturen darf das nächste Extremereignis treffen? Solch ein Diskurs basiert auf aussagekräftige Grundlagen zum Klimawandel, es handelt es sich bei dem Anpassungszielsdiskurs aber auch um ein Aushandlungsprozess mit den weiteren eventuell auch konkurrierenden Themenfeldern.

In Ergebnis zeigt sich im ISAP-Projekt, dass die Reduzierung von Klimarisiken einer kontinuierlichen Planung und Umsetzung von Anpassungsstrategien bedarf – die Umsetzung darf sich dabei nicht nur auf lokale Einzelplanungen beschränken, sondern es braucht auch stadt-regionale Lösungen. Das entwickelte Online-Informations- und Beratungssystem und seine Inhalte bieten hierzu Lösungsansätze für eine klimaangepasste Planung, die mit dem ISAP2-Projekt noch geschärft, weiterentwickelt und erprobt werden.

Kapitel 7

Ergänzungen zum Inhalt





7. Ergänzungen zum Inhalt

Im Nachfolgenden werden die Ergänzungen zum Inhalt aufgeführt. Diese Gliederung und die Inhalte des nachfolgenden Teilbereichs orientiert sich an den Vorgaben gemäß des Zuwendungsbescheids, den allgemeinen Nebenbestimmungen für Zuwendungen zur Projektförderung sowie der Anlage 2 zu Nr.4.1 NABF.

7.1 die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Kostenrahmen wurde entsprechend des Förderantrags eingehalten. Im ISAP-Projekt war der wesentliche Teil der Kosten durch Personalausgaben entstanden. Eine differenziertere Darstellung der Kostenverteilung wird in den jeweiligen Verwendungsnachweisen der einzelnen Verbundpartner aufgezeigt.

7.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Verbundprojekt ISAP sowie die dafür aufgewendeten Ressourcen waren erforderlich und angemessen, da sie für die Einreichung der im Projektantrag formulierten Ziele notwendig waren und auch vorher in der Kostenplanung detailliert begründet wurden. Der Kostenrahmen wurde entsprechend des Förderantrags eingehalten. Insgesamt konnte der Großteil der angestrebten Zielsetzungen und Ergebnisse umgesetzt werden.

Das Kernergebnis der ISAP1-Phase stellt demnach das ISAP-Tool als Planungs- und Informationstool für planerische Fragen der Klimaanpassung dar, welches konzeptionell, technisch und inhaltlich in der Verbundpartnerschaft erarbeitet wurde und in welche die Ergebnisse der Teilvorhaben mündeten. Dieses entwickelte Online-Informations- und Beratungssystem setzt durch die Digitalisierung von Klimainformationen Impulse zur Beschleunigung von Planungsprozessen und ermöglicht eine systematische Etablierung von Klimahandeln als selbstverständlichen und integrativen Teil der räumlichen Planung.

7.3 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Folgenden wird der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse, im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans dargelegt.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Der ISAP-Verbund strebt keine gewinnorientierte Verwertung der Ergebnisse des Projekts im **wirtschaftlichen Sinne** an, zumal der Zielmarkt für ISAP primär im öffentlichen Bereich, insbesondere im Bereich der Anpassung auf regionaler und kommunaler Ebene, zu sehen ist. Die langfristige Nutzung der Erkenntnisse im öffentlich zugänglichen Online-Informations-Beratungssystem wird zukünftig den Klimaanpassungsbelang in der Planung unterstützend stärken.

Wissenschaftliche Erfolgsaussichten

Die **wissenschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten** werden als positiv und vielfältig beurteilt. Die Ergebnisse umfassen eine Reihe an innovativen methodischen und konzeptionellen Ansätzen, wie z.B. das Klimaensemble mit sehr hoch aufgelösten Simulationen auf der Kilometer-Skala, die kleinräumige regionale Starkregengefahrenkarte, Planwerke zur Vulnerabilität und Exposition, etc. Die wissenschaftlichen Erfolgsaussichten wurden durch die an den universitären Einrichtungen bestehende Infrastruktur zur Wissensverbreitung und Aufbereitung gestärkt. Bei der Vorstellung von Projektergebnissen auf nationalen und internationalen Fachkonferenzen und -workshops (EGU 2023, kommunaler Starkregenaustauschen 2023, ISAP-Abschlussveranstaltung 2023, Stadt-Land-Zukunft-Konferenz 2024, etc.) konnten bereits während der Projektlaufzeit breites Interesse für das entwickelte stadt-regionale Online-Informations- und Beratungssystem aber auch zu den Methodeninnovationen zur Bewertung von integrierten Maßnahmenwirkungen, etc. generiert



werden. Auch die Kooperationen mit der George-Mason-University und der Planungsregion Northern Virginia werden, gestärkt durch den intensiven Arbeitsworkshop im März 2023, fortlaufend weitergeführt. Im Rahmen des Workshops wurden erste wichtige Fragestellungen systematisiert, die besonders erfolgsversprechend für den internationalen Vergleich erscheinen. Dazu zählen u.a. der Vergleich von Methoden zur Erfassung von Verwundbarkeiten und Risiken gegenüber Hitzestress und Starkregen. Aber auch die Betrachtung von kritischen Infrastrukturen sowie der Zugänglichkeit von qualitativ hochwertigen Grün- und Kühlungsmöglichkeiten, insbesondere für verwundbare Gruppen, wurden als bedeutungsvolle Kernthemen für beide Regionen identifiziert. Diese internationale Zusammenarbeit wird im Nachfolgeprojekt ISAP2 weiter intensiviert.

Für die Verbreitung der Ergebnisse wurde zudem in nationalen und internationalen Fachzeitschriften publiziert (siehe Kapitel 7.5). Die wissenschaftlichen Erkenntnisse wurden und werden zu dem bereits in Abschlussarbeiten und Lehrveranstaltungen, u.a. „Klimaanpassungsmaßnahmen im Außen- und Innenraum“, „GIS- und modellgestützte Analyse- und Bewertungsmethoden“ und „GIS in Environmental and Regional Planning“ verwendet. Auch zukünftig werden die Erkenntnisse in die Lehre eingebunden.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit:

Im Rahmen der ISAP1-Phase zeigte sich, dass die systematische Verwendung der bereitgestellten Klima-, Verwundbarkeits-, und Anpassungsinformationen in formelle und informelle Planungsinstrumente in vielen Aspekten noch nicht hinreichend geklärt. Denn die Interpretation von Klima- und Vulnerabilitätsdaten ist oftmals komplex und es fehlt das entsprechende Fachwissen, solche Daten sachgerecht auszuwerten und entsprechend Hinweise für die Planung zu formulieren. Das Nachfolgeprojekt ISAP2 (11/2023 – 10/2026) setzt deshalb den Fokus auf die bedarfsorientierte Weiterentwicklung und Implementierung des Tools in unterschiedlichen planerischen Anwendungsfällen zur Gewährleistung der Praxistauglichkeit. Zudem soll stärker die Übersetzungsleistung von Analysen zu Empfehlungen für stadt-regionale Anpassungsstrategien fokussiert werden. Darüber hinaus rücken in der zweiten Phase aus der Forschungsperspektive auch Fragen zur Rolle von Siedlungs- und Landschaftsveränderungen für die regionale Klimaanpassung sowie von kritischen und sensiblen Infrastrukturen in den Vordergrund und welche Rolle diese in der strategischen Planung im Sinne einer Minderung von Klimarisiken einnehmen können.

Zudem wurden bereits während der ersten Phase Überlegungen zur Verstetigung des Online-Tools durch den Verband Region Stuttgart mitgedacht (bspw. durch die verwendete Klimaatlas-URL). Die konkrete Übergabe des Hostings und die Frage der Wartung sowie der Aktualisierung werden im Nachfolgeprojekt ISAP2 weiterverfolgt.

7.4 Bekannt gewordene Fortschritte von Dritter Seite

Bisher bestehen keine Erkenntnisse über Ergebnisse anderer Projekte, die die erzielten Ergebnisse des ISAP-Projekts (Phase 1) disqualifizieren würden. Während der Projektlaufzeit wurden u.a. Online-Tools zu Klimaanpassungsfragen veröffentlicht, so z.B. der Klimaatlas NRW oder auch die entwickelten Online-Tools der anderen Modellregionen im Rahmen der RegiKlim-Förderphase. Vielfach fokussieren solche Tools jedoch ausschließlich die Bereitstellung von Klimadaten, das ISAP-Tool stellt jedoch als ein ganzheitliches Anpassungstool regionale Klima- und Vulnerabilitätsinformationen, Informationen zu Maßnahmen und deren Wirksamkeit und eine Wissensbibliothek bereit. Gerade der in der Recherche, in persönlichen Gesprächen und im Austausch mit externen Akteuren (u.a. Abschlussveranstaltung) deutlich gewordene weitere Forschungsbedarf, insbesondere zur systematischen Verwendung der bereitgestellten Klima-, Verwundbarkeits-, und Anpassungsinformationen des Online-Tools in formelle und informelle Planungsinstrumente, unterstreicht die Relevanz u.a. auch des Nachfolgeprojekts ISAP2.



ISAP2 setzt deshalb den Fokus auf die bedarfsorientierte Weiterentwicklung und Implementierung des Tools in unterschiedlichen planerischen Anwendungsfällen zur Gewährleistung der Praxistauglichkeit. Zudem rücken in der zweiten Phase auch Fragen zur Rolle von Siedlungs- und Landschaftsveränderungen für die regionale Klimaanpassung sowie von kritischen und sensiblen Infrastrukturen in den Vordergrund und welche Rolle diese in der strategischen Planung im Sinne einer Minderung von Klimarisiken einnehmen können.

7.5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

(1) Wissenschaftliche Veröffentlichungen:

Hundhausen, M., Feldmann, H., Kohlhepp, R., and Pinto, J.G. (2023a). Climate change signals of extreme precipitation return levels for Germany in a transient convection-permitting simulation ensemble. in review in International Journal of Climatology.

Hundhausen, M., Feldmann, H., Laube N., and Pinto, J.G. (2023b). Future heat extremes and impacts in a convection-permitting climate ensemble over germany. Natural Hazards and Earth System Sciences, 23(8):2873–2893.

Hasse, J., Luig, K., Schmidt, C., Kapp, R., Birkmann, J., Götsche, F., McMillan, J. (2024): Mit digitalen Tools zum regionalen Anpassungshandeln. Das neue Online-Informations- und Beratungssystem der Region Stuttgart zum stadt-regionalen Umgang mit Klimarisiken. Raumplanung, Nr. 226, Heft 3/4 2024. (Manuskript eingereicht)

Ludwig, P., Ehmele, F., Franca, M. J., **Mohr, S.**, Caldas-Alvarez, A., Daniell, J. E., Ehret, U., **Feldmann, H., Hundhausen, M.**, Knippertz, P., Küpfer, K., Kunz, M., Mühr, B., **Pinto, J.G.**, Quinting, J., Schäfer, A.M., Seidel, F., Wisotzky, C. (2023). A multi-disciplinary analysis of the exceptional flood event of July 2021 in central Europe–Part 2: Historical context and relation to climate change. Natural Hazards and Earth System Sciences, 23(4), 1287-1311.

McMillan, J., Birkmann, J., Götsche, F., Kapp, R., Schmidt, C., Weisser, B.; Jamshed, A. (2024): Mapping vulnerability to climate change for spatial planning: A case study of the Stuttgart region. In: NHESS - special issue Strengthening climate-resilient development through adaptation, disaster risk reduction, and reconstruction after extreme events (in Vorbereitung: Manuskripteinreichung April 2024).

Mohr, M., Ehret, M., Kunz, M., Ludwig, P., Caldas-Alvarez, A., Daniell, J.E., Ehmele, F., **Feldmann, H.**, Franca, M.J., Gattke, C., **Hundhausen, M.**, Knippertz, P., Küpfer, K., Mühr, B., **Pinto, J.G.**, Quinting, J., **Schäfer, A.M.**, Scheibel, M., Seidel, F. and Wisotzky, C., 2023: A multi-disciplinary analysis of the exceptional flood event of July 2021 in central Europe – Part 1: Event description and analysis. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 23, 525–551, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-525-2023>.

(2) aus den WIRKSAM-Arbeitsgruppen

Laranjeira, K.; Karrasch, L.; Schoppe, A.; von Streit, A.; Schubert, A.; **McMillan, J.; Götsche, F.**; Zorn, A.; Schäfer, S.; Brandenstein, F.; Kölling, A.; Hildmann, C. (2023): Erfassung und Bewertung von Anpassungskapazität. Erfassung und Bewertung von Anpassungskapazität. (Leitfaden aus der Arbeitsgruppe „Regionale Anpassungskapazitäten und Anpassungsnotwendigkeiten“)

Meilinger, V.; Huck, A.; Harrs, J.; Berkenbrink, C.; Breth, S.; Drexelmeier, S.; Feucht, K.; **Götsche, F.**; Hövel, E.; Kölling, A.; Kruse, J.; Kuhn, T.; Petzoldt, T.; **Weisser, B.**; Wessels, A.; Zorn, A. (2023): Transdisziplinäre Forschung in der regionalen Klimaanpassung. Erfahrungen aus der Fördermaßnahme ReglKlim. (Leitfaden aus der Arbeitsgruppe „Transdisziplinäre Prozesse“)



Harris, J.; Dalitz, L.; Laranjeira, K.; Huck, A. (2023): Konzept zur operativen Verstetigung und Skalierung von Klimadiensten. Erfahrungen aus der Fördermaßnahme RegIKlim. (Leitfaden aus der Arbeitsgruppe „Transferkonzept und – potential, Übertragbarkeit, Anschlussfähigkeit“) – inhaltliche Mitwirkung durch die Arbeitsgruppenaktivitäten

Schmid, C. (2023): Interview zum ISAP-Projekt in der Region Stuttgart. In: Kurzfilm zu regionale Klimainformationen zum Klimahandeln der BMBF-Fördermaßnahmen. Online Verfügbar unter: [Kurzfilm](#)

(3) Auswahl an Pressestatements zu ISAP:

Schunder, J. (31.08.2020): Region wappnet sich gegen Hitze und Starkregen. Der Klimawandel fordert die Kommunen heraus. Jetzt gibt es dazu ein Forschungsprojekt; Stuttgarter Zeitung, Stuttgart.

Sägesser, J. (13.06.2023): Schwarzer Asphalt trotz immer heißerer Sommer?. Stuttgarter Nachrichten, Stuttgart.

Kapitel 8

Literaturverzeichnis





8. Literaturverzeichnis

- ALKIS. (2020). ALKIS®—Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem, Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung, Baden-Württemberg. <https://www.lgl-bw.de/unsere-themen/Geoinformation/AFIS-ALKIS-ATKIS/ALKIS/>.
- Arnberger, A., Alex, B., Eder, R., Ebenberger, M., Wanka, A., Kolland, F., Wallner, P., & Hutter, H.-P. (2017). Elderly resident's uses of and preferences for urban green spaces during heat periods. *Urban Forestry & Urban Greening*, 21, 102–115.
- asp Architekten GmbH/Koeber Landschaftsarchitektur GmbH. (Wettbewerb 2020). 1. Preis Internationaler städtebaulicher Ideenwettbewerb „Neuer Stadtraum B14“. <https://www.asp-architekten.de/portfolio-items/neuer-stadtraum-b-14/>.
- Birkmann, J. (2008). Globaler Umweltwandel, Naturgefahren, Vulnerabilität und Katastrophenresilienz. *Raumforschung und Raumordnung*, 66(1), 5–22.
- Birkmann, J., Sauter, H., Garschagen, M., Fleischhauer, M., Puntub, W., Klose, C., Burkhardt, A., Götsche, F., Laranjeira, K., Müller, J., & Büter, B. (2021). New methods for local vulnerability scenarios to heat stress to inform urban planning—case study City of Ludwigsburg/Germany. *Climatic Change*, 165(1), 37.
- Biswas, S., & Nautiyal, S. (2023). A review of socio-economic vulnerability: The emergence of its theoretical concepts, models and methodologies. *Natural Hazards Research*, 3(3), 563–571.
- Breil, M., Downing, C., Kazmierczak, A., Mäkinen, K., & Romanovska, L. (2018). Social vulnerability to climate change in European cities - state of play in policy and practice. European Topic Centre on Climate Change impacts, Vulnerability and Adaptation (ETC/CCA). https://doi.org/10.25424/CMCC/socvul_europcities.
- Breuste, J., Pauleit, S., Haase, D., & Sauerwein, M. (2016). *Stadtökosysteme: Funktion, Management und Entwicklung*. Springer Spektrum.
- Bröde, P., D. Fiala, K. Błazejczyk, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann, B. Tinz, G. Havenith. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int. J. Biometeorol.* 56, 481–494.
- Bruse, M., Fleer, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling and Software* 13, 373-284. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815298000425>.
- Butsch, C., Beckers, L.-M., Nilson, E., Frassl, M., Brennholt, N., Kwiatkowski, R. & Söder, M. (2023). Health impacts of extreme weather events - Cascading risks in a changing climate. *Journal of Health Monitoring*, 8 (Suppl 4), 33–56.
- Christmann, G., Ibert, O., Kilper, H. & Moss, T. (2012). Vulnerability and resilience from a Socio-spatial perspective: Towards a theoretical framework. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/228575/1/irs-wp45.pdf>.
- CICES. Structure of CICES (Common International Classification of Ecosystem Services). Abgerufen 6. Dezember 2023, von <https://cices.eu/cices-structure/>.
- Coutts, A., Daly, E., Beringer, J. & Tapper, N. (2013). Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Building and Environment*. 70. 226-276. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.021>.



- Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261.
- Die Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAD). Vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen.
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaanpassung/das_gesamt_bf.pdf.
- DKKV (Ed.). (2022). Die Flutkatastrophe im Juli 2021 in Deutschland. Ein Jahr danach: Aufarbeitung und erste Lehren für die Zukunft: Vol. Nr. 62.
- DWA (Hrsg.). (2012). Arbeitsblatt DWA-A 531, Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer DWA, Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.
- DWA (Hrsg.). (2016) Merkblatt DWA-M 119, Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen, DWA, Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. ISBN 978-3-88721-392-3.
- DWA (Hrsg.). (2022). Arbeitsblatt DWA-A 118, Planung und hydraulische Überprüfung von öffentlichen Entwässerungssystemen (Entwurf). DWA, Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.
- DWD. (2022). Deutscher Wetterdienst (DWD): Leistungen—KOSTRA-DWD.
https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/kostra_dwd_rasterwerte.html.
- DWD. Deutscher Wetterdienst (DWD): Stadtklima—Die Städtische Wärmeinsel.
https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadt/pl/projekt_waermeinseln/projekt_waermeinseln_node.html.
- European Commission. Joint Research Centre. (2018). PESETA III: Climate change impacts on labour productivity. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/07911>.
- Fekete, A. (2009). Validation of a social vulnerability index in context to river-floods in Germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 393–403.
- Fekete, A. (2019). Social Vulnerability (Re-)Assessment in Context to Natural Hazards: Review of the Usefulness of the Spatial Indicator Approach and Investigations of Validation Demands. *International Journal of Disaster Risk Science*, 10(2), 220–232.
- Fiala, D., Psikuta, A., Jendritzky, G., Paulke, S., Nelson, D.A., van. Marken Lichtenbelt, W.D & Frijns, A.J. (2010). Physiological modeling for technical, clinical and research applications. *Front. Biosci.* 2, 939–968.
- Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B. & Jendritzky, G. (2012). UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *Int. J. Biometeorol.* 56, 429–441.
- Greiving, S., Kruse, P., Othmer, F., Fleischhauer, M., & Fuchs, M. (2023). Implementation of risk-based approaches in urban land use planning—the example of the city of Erfstadt, Germany. *Sustainability: Science Practice and Policy*, 15(21), 15340.
- Havenith, G., Fiala, D., Błażejczyk, K., Richards, M., Bröde, P., Holmér, I., Rintamaki, H., Benshabat, Y. & Jendritzky, G. (2012): The UTCI-clothing model. *Int. J. Biometeorol.* 56, 461–470.
- Heesen, J., Lorenz, D. F., Nagenborg, M., Wenzel, B., & Voss, M. (2014). Blind Spots on Achilles' Heel: The Limitations of Vulnerability and Resilience Mapping in Research. *International Journal of Disaster Risk Science*, 5(1), 74–85.



- Heinrichs, F.-J., Rickmann, B., Sondergeld, K.-D., & Störrlein, K.-H. (2016). Gebäude- und Grundstücksentwässerung: Planung und Ausführung DIN 1986-100 und DIN EN 12056-4 (6., überarbeitete und erweiterte Auflage). Beuth Verlag GmbH.
- Hoeppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43, 71–75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>.
- Hölzl, S. E., Veskov, M., Scheibner, T., Le, T. T., & Kleinschmit, B. (2021). Vulnerable socioeconomic groups are disproportionately exposed to multiple environmental burdens in Berlin - implications for planning. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 13(2), 334–350.
- HSB (2017). Von Horn, J., Bonnet, C., Jeskulke, M., Hoppe, H., Thielking, K., Gatke, D., Schäfer, K., Koch, M.: Ermittlung von Überflutungsgefahren mit vereinfachten und detaillierten hydrodynamischen Modellen. Praxisleitfaden, erstellt im Rahmen des DBU-Forschungsprojekts „KLAS II“. Lehrgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Hochschule Bremen, Oktober 2017. Download unter: www.klas-bremen.de (01.10.2018).
- Hundhausen, M., Feldmann, H., Kohlhepp, R. & Pinto, J.G. (2023b). Climate change signals of extreme precipitation return levels for Germany in a transient convection-permitting simulation ensemble. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.8393>.
- Hundhausen, M., Feldmann, H., Laube N. & Pinto, J.G. (2023a). Future heat extremes and impacts in a convection-permitting climate ensemble over germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(8):2873–2893.
- Hupfer, P., Kuttler, W., Chmielewski, FM. & Pethe, H. (2005). Stadtklima. In: Hupfer, P., Kuttler, W., Chmielewski, FM. & Pethe, H. (eds). *Witterung und Klima*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-322-96749-7_13.
- IKSR. (2001). Atlas der Überschwemmungsgefährdung und möglichen Schäden bei Extremhochwasser am Rhein. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR). https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/Dokumente_de/Rhein-Atlas/printversion/IKSR_Atlas_II.pdf.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- IPCC. (2018). Annex I: Glossary (Matthews, J.B.R. ed.). In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (Ed.), *Global Warming of 1.5°C*. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.
- Jendritzky, G., Dear, de R. & Havenith, G. (2012). UTCI – Why another thermal index?. *Int. J. Biometeorol.* 56, 421–428.



- Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Weihs, P., Batchvarova, E. & Dear, de R. (2009). Der thermische Klimaindex UTCI. Klimastatusbericht des DWD 96–101.
- Kok, M., Huizinga, H. J., Vrouwenvelder, A. C. W. M., & Barendregt, A. (2005). Standaardmethode2004 Schade en Slachtoffers als gevolg van overstromingen. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. <https://docplayer.nl/8890696-Standaardmethode2004-schade-en-slachtoffers-als-gevolg-van-overstromingen.html>.
- Kowarik, I., Bartz, R. & Brenck, M. (Hrsg.). (2016). Ökosystemleistungen in der Stadt: Gesundheit schützen und Lebensqualität erhöhen. Naturkapital Deutschland - TEEB DE.
- Kuhlicke, C., Madruga de Brito, M., Bartkowski, B., Botzen, W., Doğulu, C., Han, S., Hudson, P., Nuray Karanci, A., Klassert, C. J., Otto, D., Scolobig, A., Moreno Soares, T., & Rufat, S. (2023). Spinning in circles? A systematic review on the role of theory in social vulnerability, resilience and adaptation research. *Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions*, 80, 102672.
- Landeshauptstadt Stuttgart, Statistisches Amt. (2020). Datenkompass Stadtbezirke Stuttgart, Ausgabe 2019/2020.
- Laranjeira, K., Götttsche, F., Birkmann, J., & Garschagen, M. (2021). Heat vulnerability and adaptive capacities: findings of a household survey in Ludwigsburg, BW, Germany. *Climatic Change*, 166(1), 14.
- Leimbach, S., Brendt, T., Ebert, G., Jackisch, N., Zieger, F., & Kramer, S. (2018). Regenwasserbewirtschaftungsanlagen in der Praxis: Betriebssicherheit, Kosten und Unterhaltung. <https://doi.org/10.6094/UNIFR/16551>.
- Li, A., Toll, M., & Bentley, R. (2023). Mapping social vulnerability indicators to understand the health impacts of climate change: a scoping review. *The Lancet. Planetary Health*, 7(11), e925–e937.
- Li, X., Chow, K. H., Zhu, Y., & Lin, Y. (2016). Evaluating the impacts of high-temperature outdoor working environments on construction labor productivity in China: A case study of rebar workers. *Building and Environment*, 95, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.005>.
- Lindley, S., O'Neill, J., Kandeh, J., Lawson, N., Christian, R., & O'Neill, M. (2011). Full Report - Climate change, justice and vulnerability. Joseph Rowntree Foundation, University of Manchester.
- LUBW (2016). Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, <https://pudi.lubw.de>
- LUBW (2020). Anhänge 1a, b und c zum Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, <https://pudi.lubw.de>.
- Ludwig, P., Ehmele, F., Franca, M. J., Mohr, S., Caldas-Alvarez, A., Daniell, J. E., Ehret, U., Feldmann, H., Hundhausen, M., Knippertz, P., Küpfer, K., Kunz, M., Mühr, B., Pinto, J.G., Quinting, J., Schäfer, A.M., Seidel, F. & Wisotzky, C. (2023). A multi-disciplinary analysis of the exceptional flood event of July 2021 in central Europe—Part 2: Historical context and relation to climate change. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(4), 1287-1311.
- Malitz, G. & Ertel, H. (2015). KOSTRA DWD 2010: Starkniederschlagshöhen für Deutschland (bezugszeitraum 1951 bis 2010), Abschlussbericht, Deutscher Wetterdienst.
- Maronga, B., Banzhaf, S., Burmeister, C., Esch, T., Forkel, R., Fröhlich, D., Fuka, V., Gehrke, K. F., Geletič, J., Giersch, S., Gronemeier, T., Groß, G., Heldens, W., Hellsten, A., Hoffmann, F., Inagaki, A., Kadasch, E., Kanani-Sühring, F., Ketelsen, K. & Raasch, S. (2020). Overview of the



- PALM model system 6.0. *Geoscientific Model Development*, 13(3), 1335–1372.
<https://doi.org/10.5194/gmd-13-1335-2020>.
- Maronga, B., Gryschka, M., Heinze, R., Hoffmann, F., Kanani-Sühring, F., Keck, M., Ketelsen, K., Letzel, M. O., Sühring, M. & Raasch, S. (2015). The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives. *Geoscientific Model Development*, 8(8), 2515–2551.
<https://doi.org/10.5194/gmd-8-2515-2015>.
- Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover (IMUK). (2023). PALM Model Documentation.
<https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/doc/tec>.
- Michelozzi, P., Accetta, G., De Sario, M., D'Ippoliti, D., Marino, C., Baccini, M., Biggeri, A., Anderson, H. R., Katsouyanni, K., Ballester, F., Bisanti, L., Cadum, E., Forsberg, B., Forastiere, F., Goodman, P. G., Hojs, A., Kirchmayer, U., Medina, S., Paldy, A. & Perucci, C. A. (2009). High Temperature and Hospitalizations for Cardiovascular and Respiratory Causes in 12 European Cities. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 179(5), 383–389.
<https://doi.org/10.1164/rccm.200802-217OC>.
- Mohr, M., Ehret, M., Kunz, M., Ludwig, P., Caldas-Alvarez, A., Daniell, J.E., Ehmele, F., Feldmann, H., Franca, M.J., Gattke, C., Hundhausen, M., Knippertz, P., Küpfer, K., Mühr, B., Pinto, J.G., Quinting, J., Schäfer, A.M., Scheibel, M., Seidel, F. & Wisotzky, C. (2023). A multi-disciplinary analysis of the exceptional flood event of July 2021 in central Europe – Part 1: Event description and analysis. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 525–551, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-525-2023>.
- Mudersbach, C., Buchholz, O., Hoppe, H. et al. (2023): Integrale Starkregen- und Hochwassergefahrenkarten, Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe ES-2.8, Korrespondenz Abwasser, Abfall, Heft 10, doi:10.3242/kae2023.10.001.
- OpenStreetMap® Mitwirkende. OpenStreetMap Foundation. <https://osmfoundation.org/>
- Prein, A. F., W. Langhans, G. Fossler, A. Ferrone, N. Ban, K. Goergen, M. Keller, M. Tölle, O. Gutjahr, F. Feser, et al. (2015), A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges, *Rev. Geophys.*, 53, 323–361.
doi:10.1002/2014RG000475.
- Razafimaharo, C., Krähenmann, S., Höpp, S., Rauthe, M. & Deutschländer, T. (2020). New high-resolution gridded dataset of daily mean, minimum, and maximum temperature and relative humidity for Central Europe (HYRAS), *Theor. Appl. Climatol.*, 142, 1531–1553,
<https://doi.org/10.1007/s00704-020-03388-w>.
- Reese, S., Markau, H.-J., & Sterr, H. (2003). MERK - Mikroskalige Evaluation der Risiken in überflutungsgefährdeten Küstenniederungen. Forschungs- und Technologiezentrum Westküste und Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein (Hg.). <https://henry.baw.de/items/da764e7a-3db9-46c7-a34a-257ac90690e1>.
- Rufat, S. (2013). Spectroscopy of Urban Vulnerability. *Annals of the Association of American Geographers*. Association of American Geographers, 103(3), 505–525.
- Sandholz, S., Sett, D., Greco, A., Wannewitz, M., & Garschagen, M. (2021). Rethinking urban heat stress: Assessing risk and adaptation options across socioeconomic groups in Bonn, Germany. *Urban Climate*, 37, 100857.



- Schädler, G., Panitz, H.J., Christner, E., Feldmann, H., Karremann, M. & Laube, N. (2018). Regional Climate Simulations with COSMO-CLM: Ensembles, Very High Resolution and Paleoclimate. In: Nagel, W., Kröner, D., Resch, M. (eds) High Performance Computing in Science and Engineering '17. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68394-2_24.
- Schipper, H., Hackenbruch, J., Lentink, H., Nerding, K. U., & Müller, S. (2016). Sensitivitätsbereiche von branchenspezifischen Klimakenngrößen in Baden-Württemberg—die „Sensitivitätsampel“ (KLIMOPASS-Berichte). Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Hrsg.). Karlsruhe: LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.
- Schmitt T. G., Krüger M., Pfister A., Becker M., Mundersbach C., Fuchs L., Hoppe H. & Lakes I. (2018). Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 2018 (65), Nr. 2., S. 113ff. ISSN 1866-0029.
- Scholze, N., Riach, N., & Glaser, R. (2020). Assessing Climate Change in the Trination Upper Rhine Region: How Can We Operationalize Vulnerability Using an Indicator-Based, Meso-Scale Approach? Sustainability: Science Practice and Policy, 12(16), 6323.
- Sørland, S. L., Brogli, R., Pothapakula, P. K., Russo, E., Van de Walle, J., Ahrens, B., Anders, I., Bucchignani, E., Davin, E. L., Demory, M.-E., Dosio, A., Feldmann, H., Früh, B., Geyer, B., Keuler, K., Lee, D., Li, D., van Lipzig, N. P. M., Min, S.-K., Panitz, H.-J., Rockel, B., Schär, C., Steger, C. & Thiery, W. (2021). COSMO-CLM regional climate simulations in the Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) framework: a review, Geosci. Model Dev., 14, 5125–5154, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-5125-2021>.
- Statistik-BW. (2020). Statistisches Landesamt Baden-Württemberg. <https://www.statistik-bw.de/>.
- UBA. (2020). Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten—Kostensätze. Herausgegeben von Astrid Matthey und Björn Büniger. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-umweltkosten>.
- Urban Atlas. (2018). Urban Atlas Land Cover/Land Use 2018 (vector), Europe, 6-yearly, Jul. 2021 (01.03) [Geopackage]. European Environment Agency. <https://doi.org/10.2909/FB4DFFA1-6CEB-4CC0-8372-1ED354C285E6>.
- Verband Region Stuttgart. (2008). Klimaatlas Region Stuttgart. Stuttgart.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI). (2022). Umweltmeteorologie: Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2, 2022.
- von Szombathely, M., Hanf, F. S., Bareis, J., Meier, L., Oßenbrügge, J., & Pohl, T. (2023). An Index-Based Approach to Assess Social Vulnerability for Hamburg, Germany. International Journal of Disaster Risk Science, 14(5), 782–794.
- Weichselgartner, J., & Kelman, I. (2015). Geographies of resilience: Challenges and opportunities of a descriptive concept. Progress in Human Geography, 39(3), 249–267.
- Welle, T., Depietri, Y., Angignard, M., Birkmann, J., Renaud, F., & Greiving, S. (2014). Chapter 5 - Vulnerability Assessment to Heat Waves, Floods, and Earthquakes Using the MOVE Framework: Test Case Cologne, Germany. In J. Birkmann, S. Kienberger, & D. E. Alexander (Eds.), Assessment of Vulnerability to Natural Hazards (pp. 91–124). Elsevier.



Winklmayr, C., Matthies-Wiesler, F., Muthers, S., Buchien, S., Kuch, B., An der Heiden, M., & Mücke, H.-G. (2023). Heat in Germany: Health risks and preventive measures. *Journal of Health Monitoring*, 8(Suppl 4), 3–32.

