

Auftraggeber: Stadt Asperg
Bürgermeisteramt
Marktplatz 1
71679 Asperg

Stadtklimaanalyse für die Stadt Asperg

Projekt-Nr.: 19-11-07-S

Umfang: 109 Seiten

Datum: 23.05.2022

Bearbeiter: Dr. Markus Hasel, Diplom-Meteorologe
Dr. Tobias Gronemeier, M.Sc. Meteorologie
Dr. Christine Ketterer, M.Sc. in Climate Sciences
Dr. Rainer Röckle, Diplom-Meteorologe

iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG
Hauptstraße 54
70839 Gerlingen

Tel.: 07156 / 4389 16

Fax: 07156 / 5026 18

E-Mail: hasel@ima-umwelt.de

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	14
1.1	Gunstfaktoren	15
1.2	Belastungen	15
2	Einführung und Aufgabenstellung	16
3	Bestandsbeschreibung	19
3.1	Örtliche Verhältnisse	19
3.2	Strömungsverhältnisse	23
4	Vorgehensweise	26
5	Datengrundlage und Methoden	28
5.1	Daten	28
5.1.1	Topografie	28
5.1.2	Nutzungsstruktur	28
5.1.3	Messdaten und Klimadaten	29
5.2	Methoden	30
5.2.1	Mesoskalige Simulation mit FITNAH	30
5.2.2	Mikroskalige Simulation mit PALM-4U	31
5.2.3	Human-Biometeorologie	32
5.3	Bestehende Gutachten	34
6	Ergebnisse der Simulationen	36
6.1	Kaltluftströmung	36
6.1.1	Entstehung von Kaltluftabflüssen	36
6.1.2	Zeitlicher Verlauf von Kaltluftabflüssen	37
6.1.3	Häufigkeit von Kaltluftabflüssen	37
6.1.4	Ergebnisse der Modellierung	38
6.2	Thermische und Human-biometeorologische Verhältnisse	43
6.2.1	Urbane Wärmeinsel	45
6.3	Stadtgrün und Klimavielfalt	46
6.4	Empfindlichkeit	53
6.5	Betroffenheit	55
7	Klimaanalysekarte	58
8	Planungshinweiskarte	59
9	Ausblick Klimawandel	62
9.1	Klimatische Einordnung des Stadtgebiet Asperg	62
9.2	Beobachteter Klimawandel	63
9.3	Klimaprojektion	63
9.4	Erwartete Entwicklung der mittleren Temperatur	66
9.5	Niederschlag	67
9.6	Klimatologische Kenntage als Klima-Indikatoren	70
9.6.1	Sommertage, heiße Tage und tropische Nächte	71
9.6.2	Frosttage	72
9.6.3	Hageltage	73

9.7 Zusammenfassung der Auswirkungen des Klimawandels	77
9.8 Die „Quader-Methode“ zur Klimaprojektion.....	78
9.9 Ergebnisse der Quader-Methode.....	80
10 Handlungsstrategien für die Stadtplanung	85
10.1 Maßnahmen zur Verbesserung und Erhaltung der Durchlüftung	85
10.2 Maßnahmen zur Reduktion der thermischen Belastung.....	86
11 Literatur	89
A1 Daten und Methodik	92
A1.1 Aufbereitung der Eingangsdaten für FITNAH.....	92
A1.2 Methodik.....	92
A1.2.1 Das prognostische Modell FITNAH	92
A1.2.2 Berechnung der Empfindlichkeit.....	93
A1.2.3 Berechnung der Betroffenheit.....	93
A1.2.4 Identifikation der belüftungsrelevanten Strömungssysteme	95
A2 Beschreibung der Klimatope	98

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Langjähriges Mittel der Anzahl an Sommertagen in Deutschland für den Klimazeitraum 1971 – 2000 (Quelle: DWD Climate Center (CDC) 2020).	17
Abbildung 2-2: Verteilung der Sommertage auf der Landfläche von Deutschland für den Klimazeitraum 1971 – 2000. Das Kreuz gibt die mittlere Häufigkeit im Bereich Asperg an (Quelle: DWD Climate Center (CDC) 2020).	17
Abbildung 3-1: Räumliche Einordnung des Untersuchungsgebiets (Stadtgebiet Asperg, rot umrahmt) und der weiteren Umgebung (Kartengrundlage: onmaps.de ©GeoBasis-DE/BKG/ZSHH/LGB/HH/GeoSN/GDI-Th/NRW/LVermGeoRP dl-de/by-2-2; GDI Bayern CC BY 3.0 DE 2021/2022).	19
Abbildung 3-2: Topographie des Untersuchungsgebiets (Stadtgebiet Asperg, rot umrahmt).	20
Abbildung 3-3: Verteilung der Landnutzung im Stadtgebiet (Quelle: Statistisches Landesamt 2020).	21
Abbildung 3-4: Erhebungen (Dreiecke), Stadtteile (blau) und Orte im Stadtgebiet Asperg.	22
Abbildung 3-5: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen an den Messstellen der LUBW in Markgröningen, Bietigheim-Bissingen und Ludwigsburg.	23
Abbildung 3-6: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen der modellierten Daten der LUBW im Raum Asperg.	24
Abbildung 3-7: Häufigkeitsverteilung der Ausbreitungsklassen (links) und der Windrichtung (rechts) bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeitsklassen, modellierte Daten für Asperg.	25
Abbildung 4-1: Vorgehensweise für die Stadtklimaanalyse Asperg.	27
Abbildung 5-1: Aktuelle Landnutzung von Asperg und seiner Umgebung auf Basis der in Tabelle 5-2 aufgeführten Datensätze.	29
Abbildung 5-2: Fließdiagramm zur Veranschaulichung der Berechnung thermischer Indizes.	32
Abbildung 5-3: Ausschnitt aus den Planungshinweisen des Klimaatlas der Region Stuttgart (Baumüller et al. (2008)), ergänzt um Luftleitbahnen der Klimaanalysekarte für Asperg.	34
Abbildung 5-4: Ausschnitt aus der Karte zu Kaltluft-Volumenströmen des Klimaatlas der Region Stuttgart (Baumüller et al. (2008)).	35
Abbildung 6-1: Bodennahe Belüftung in den peripheren Bereichen (links) und Herabmischen der Luft aus dem Überdachniveau in den Straßenraum (rechts).	38
Abbildung 6-2: Bodennahe Durchlüftung (6 m ü. Grund) in Asperg durch Kaltluftabflüsse. Abendsituation (22 Uhr). Die Pfeile zeigen an, in welche Richtung der Wind weht.	40
Abbildung 6-3: Durchlüftung im Dachniveau (28 m ü. Grund). Abendsituation (22 Uhr). Die Pfeile zeigen an, in welche Richtung der Wind weht.	41
Abbildung 6-4: Bodennahe Durchlüftung (5 m ü. Grund) in Asperg durch Kaltluftabflüsse in der zweiten Nachthälfte (4 Uhr). Die Pfeile zeigen an, in welche Richtung der Wind weht.	42
Abbildung 6-5: Durchlüftung im Dachniveau (28 m ü. Grund) in der zweiten Nachthälfte (4 Uhr). Die Pfeile zeigen an, in welche Richtung der Wind weht.	43
Abbildung 6-6: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET, in °C) zur Mittagszeit (2 m ü. Grund).	45
Abbildung 6-7: Nächtliche Urbane Wärmeinsel (Überwärmung in K) in Asperg.	46
Abbildung 6-8: Versorgung der Siedlungsräumen mit multifunktionalen Parkanlagen hinsichtlich ihrer Erreichbarkeit.	52
Abbildung 6-9: Einwohnerdichte pro 50 m x 50 m-Fläche.	53
Abbildung 6-10: Vor Hitzestress schützenswerte Einrichtungen, wie z.B. Seniorenheime, Krankenhäuser, Kindertagesstätten.	54
Abbildung 6-11: Thermische Belastung. Eingangsgrößen für die Berechnung der thermischen Belastung sind die urbane Wärmeinsel, PET und die Klimavielfalt.	56
Abbildung 6-12: Thermische Betroffenheit (Vulnerabilität). Eingangsgrößen für die Berechnung der thermischen Betroffenheit sind die Empfindlichkeit, urbane Wärmeinsel, PET und die Klimavielfalt.	57

Abbildung 7-1: Klimaanalysekarte für Asperg. Dargestellt sind die Klimatope, die Kaltluftströmung im bodennahen Bereich um 22 Uhr und die potentiellen Luftleitbahnen.....	59
Abbildung 8-1: Planungshinweiskarte für Asperg.	61
Abbildung 9-1: Beobachteter Klimawandel. Differenz der mittleren Lufttemperatur in Baden-Württemberg zum langjährigen Mittel in der Klimanormalperiode 1971-2000 (Mitteltemperatur 8,4°C) von 1880 bis heute (Daten: Deutscher Wetterdienst (2021)).	63
Abbildung 9-2: Vergleich des anthropogenen Strahlungsantriebs, welcher den verschiedenen RCP-Szenarien (5. IPCC Bericht, IPCC (2013)) zugrunde liegt.....	65
Abbildung 9-3: Lufttemperatur 1971 - 2100 für die Szenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 (Daten: EURO-CORDEX).....	66
Abbildung 9-4: Änderung der Lufttemperatur (Median) bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000.....	67
Abbildung 9-5: Mittlere monatliche Niederschlagsverteilung in mm von 1991 – 2020 an der DWD Messstation Stuttgart-Schnarrenberg.	68
Abbildung 9-6: Prozentuale Änderung des Niederschlags bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000. Die Fehlerbalken stellen den Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil dar. Der Median (50. Perzentil) wird als Zahl angegeben.	68
Abbildung 9-7: Saisonale Niederschlagsänderung in % für den Zeitraum 2031 – 2060 (oben) und den Zeitraum 2071 – 2100 (unten) gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000. Die Fehlerbalken stellen den Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil dar. Der Median (50. Perzentil) wird als Zahl angegeben.	69
Abbildung 9-8: Änderung des Starkniederschlags im Winter (oben) und Sommer (unten) im Zeitraum 2071 – 2100 im Vergleich zum aktuellen Klima (1971 – 2000) bei Betrachtung des RCP 8.5. Starkniederschlag wird definiert als 95. Perzentil der Intensität aller Regenereignisse (Quelle: Europäisches Umweltamt 2020).	70
Abbildung 9-9: Änderung der Anzahl an Sommertagen (Median) bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000.	72
Abbildung 9-10: Mittlere Anzahl an Hageltagen pro Monat für die Klimanormalperiode 1981 – 2010. Als Datengrundlage wurden die oberen 10 Stationen ohne Inselstationen verwendet (Quelle Deutscher Wetterdienst).	74
Abbildung 9-11: Mittlere jährliche Anzahl an Hagelereignissen (links) und der Trend pro Dekade in den 37 Jahren von 1979 – 2015 (rechts) (Quelle: Münchner Rückversicherung 2019)	74
Abbildung 9-12: Verschiedene Hagelgrößen und Schadenbilder (Quelle: Münchner Rückversicherung 2019).	75
Abbildung 9-13: Schadenaufwand und Schadensatz in der landwirtschaftlichen Hagelversicherung (Quelle: UBA https://www.umweltbundesamt.de/lw-i-4-das-indikator#textpart-1).....	76
Abbildung 9-14: Lage des Stadtgebiets Asperg (blau) im Modellgitter der regionalen Klimamodelle (rot).78	
Abbildung 9-15: Skizze des Quaders (rot) zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der linearen Interpolation. Die Quadereckpunkte (rote Punkte) werden durch Simulationen bei der entsprechenden Lufttemperatur, relativen Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit bestimmt. Ein terminbezogener Zielwert (blauer Punkt) wird durch eine lineare gewichtete Interpolation berechnet, wobei die Jahreszeitreihe der Regionalen Klimamodelle als Eingangsdaten dienen.	80
Abbildung 9-16: Mittlere Anzahl der jährlichen Sommertage im Zeitraum 1971-2000.....	81
Abbildung 9-17: Prognostizierte mittlere Anzahl der Sommertage im Zeitraum 2031-2060 unter Verwendung der Szenarien RCP 4.5 (oben) und RCP 8.5 (unten).	82
Abbildung 9-18: Prognostizierte mittlere Anzahl der Sommertage im Zeitraum 2071-2100 unter Verwendung der Szenarien RCP 4.5 (oben) und RCP 8.5 (unten).	83
Abbildung 9-19: Mittlere Anzahl der jährlichen heißen Tage im Zeitraum 1971-2000 (oben) bzw. 2071-2100 unter Verwendung des Szenarios RCP 8.5 (unten).	84
Abbildung 10-1: Empfehlungen zur Bebauung von Hanglagen aus der Städtebaulichen Klimafibel: Einhaltung eines möglichst großen Abstands von Waldrändern (oben links), Unterschreitung der Gebäudehöhe bezüglich der Höhe bestehender Hindernisse (oben rechts), bevorzugt	

punktförmige Bebauung (unten links) und Ausrichtung der Gebäude längs der Richtung von Hangabwinden unter Berücksichtigung anderer dominierender Windrichtungen (Baumüller, Hoffmann und Reuter, 1990).	86
Abbildung 10-2: Einfluss der Fassadenbegrünung auf das Mikroklima. Erhöhte Lebensdauer der Fassade durch reduzierte Sonneneinstrahlung/UV-Belastung und Schlagregenschutz der Außenwand (© Nicole Pfoser, Dettmar, Pfoser & Sieber (2016)).	87
Abbildung A1-11-1: Skizze zur Veranschaulichung der Abgrenzung der relevanten Strömungssysteme (REKLIBO (2009)).....	96
Abbildung A1-11-2: Bewertung der Kaltluftströmung (bK) durch Vorwärtstrajektorien.	97

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Beschreibung der Messstationen der LUBW.....	24
Tabelle 5-1:	Räumliche Daten für die Klimaanalyse Asperg.	28
Tabelle 5-2:	Räumliche Daten für die Stadtklimaanalyse Asperg. Das Datenformat shp bedeutet, dass georeferenzierte vektorielle Daten zur Verfügung standen.	29
Tabelle 5-3:	Messdaten und weitere klimatologische Daten.	30
Tabelle 5-4:	Bewertungsskala von PET zur Quantifizierung der thermischen Verhältnisse und des Physiologischen Stresses bei Kälte- und Hitzebelastung (Matzarakis & Mayer (1997)).....	33
Tabelle 9-1:	Indikatoren für Asperg und ausgewählte Orte in Deutschland in den Jahren 1971 – 2000. Datengrundlage: Messdaten des DWDs Climate Data Center (CDC). Eistag: $T_{\max} < 0 \text{ °C}$, Frosttag: $T_{\min} < 0 \text{ °C}$, Sommertag: $T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$, Heißer Tag: $T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$	63
Tabelle 9-2:	Beschreibung der „Representative Concentration Pathways“, die in der Stadtklimaanalyse Asperg betrachtet werden.....	64
Tabelle 9-3:	Anzahl von Sommertagen und heißen Tagen an ausgewählten Stationen in Deutschland im Zeitraum 1971-2000 (Daten: DWD).....	71
Tabelle 9-4:	Häufigkeit der Tage mit Hagel für den Zeitraum: 1981 – 2010. Inseln: kursiv, Berggipfel: GROSSBUCHSTABEN (Quelle: Deutscher Wetterdienst ⁵).....	73
Tabelle 9-5:	Prognostizierte Veränderung meteorologischer Größen im Laufe des 21. Jahrhunderts. ...	77
Tabelle 10-1:	Wirkungskatalog von Begrünungsmaßnahmen hinsichtlich des Klimaschutzes und der Klimaanpassung.	88
Tabelle A1-1:	Nutzungskategorien der Klimamodellierung.....	92
Tabelle A1-2:	Bewertung der Einwohnerdichte je 50 m x 50 m (Bewertung A1, siehe Abschnitt A1.2.4)..	93
Tabelle A1-3:	Bewertung B1 der Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) angelehnt an Matzarakis & Mayer (1997).....	94
Tabelle A1-4:	Bewertung der Klimavielfalt B2 – Entfernung zu einer Grünfläche mit mindestens 5.000 m ² . Die Klassen wurden nach den gängigen Literaturwerten eingeteilt (z.B. Mayer (1989); Richter, Grunewald & Meinel (2016); Schumacher, Lehmann & Behnisch (2016)).	94
Tabelle A1-5:	Wärmebelastung tagsüber ermittelt aus PET und der Klimavielfalt.	94
Tabelle A1-6:	Bewertung B3 der nächtlichen urbanen Wärmeinsel (UHI - abendliche Lufttemperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland in K).....	95
Tabelle A1-7:	Ermittlung der thermischen Belastung ermittelt aus der Wärmebelastung tagsüber und nachts.....	95
Tabelle A1-8:	Ermittlung der Betroffenheit ermittelt aus den Wertstufen der Tabelle „Empfindlichkeit der Bevölkerung“ und der Tabelle „Thermische Belastung“.	95

Glossar

Advektion	Horizontales Heranführen von Luftmassen.														
Aerotop	Aerotope bezeichnen räumliche Einheiten mit gleichartigen lufthygienischen Verhältnissen														
Atmosphärische Gegenstrahlung	Der Anteil der langwelligigen Strahlung, der aus der Atmosphäre in Richtung der Erde gerichtet ist.														
Ausbreitungsklassen	Die Ausbreitungsklasse nach Klug-Manier charakterisiert die thermische Schichtung der unteren Atmosphäre. Die thermische Schichtung bestimmt neben der Bodenrauigkeit die atmosphärische Turbulenz, die ein Maß für das "Verdünnungsvermögen" der Atmosphäre ist.														
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Klasse</th> <th>Beschreibung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>I</td> <td>sehr stabile atmosphärische Schichtung, ausgeprägte Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre</td> </tr> <tr> <td>II</td> <td>stabile atmosphärische Schichtung, Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre</td> </tr> <tr> <td>III₁</td> <td>stabile bis neutrale atmosphärische Schichtung, zumeist windiges Wetter</td> </tr> <tr> <td>III₂</td> <td>leicht labile atmosphärische Schichtung</td> </tr> <tr> <td>IV</td> <td>mäßig labile atmosphärische Schichtung</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>sehr labile atmosphärische Schichtung, hohe Sonneneinstrahlung, starke vertikale Durchmischung der Atmosphäre</td> </tr> </tbody> </table>	Klasse	Beschreibung	I	sehr stabile atmosphärische Schichtung, ausgeprägte Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre	II	stabile atmosphärische Schichtung, Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre	III ₁	stabile bis neutrale atmosphärische Schichtung, zumeist windiges Wetter	III ₂	leicht labile atmosphärische Schichtung	IV	mäßig labile atmosphärische Schichtung	V	sehr labile atmosphärische Schichtung, hohe Sonneneinstrahlung, starke vertikale Durchmischung der Atmosphäre
Klasse	Beschreibung														
I	sehr stabile atmosphärische Schichtung, ausgeprägte Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre														
II	stabile atmosphärische Schichtung, Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre														
III ₁	stabile bis neutrale atmosphärische Schichtung, zumeist windiges Wetter														
III ₂	leicht labile atmosphärische Schichtung														
IV	mäßig labile atmosphärische Schichtung														
V	sehr labile atmosphärische Schichtung, hohe Sonneneinstrahlung, starke vertikale Durchmischung der Atmosphäre														
Autochthone Wetterlagen	Austauscharme Strahlungswetterlagen (Hochdruckgebiet), welche die Ausprägung lokalklimatischer Besonderheiten im Mikro- und Mesoklima erlauben.														
Belastungsraum	→ Wirkungsraum, der bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastet ist														
Bergwind	Talabwind nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (1997): Nachts kühlt sich die Luft in Tälern stärker ab als über der Ebene. Die vergleichsweise schwere Kaltluft fließt zunächst die Hänge hinunter (Hangabwind), sammelt sich in den Geländeeinschnitten und Tälern und fließt schließlich als Bergwind talabwärts. Der Bergwind beginnt 2 bis 3 Stunden nach Sonnenuntergang und hält bis kurz nach Sonnenaufgang an.														
Bowen-Verhältnis	Verhältnis zwischen fühlbarer und latenter Wärme. Das Bowen-Verhältnis kann im innerstädtischen Bereich den Wert 2:1 annehmen, während es im Umland 1:2 beträgt (Häckel (2005)).														
Eistage	Klimatologische Kenngröße: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen das Maximum der Lufttemperatur < 0 °C beträgt, d.h. es herrscht durchgehend Frost.														
Frischluff	Herantransportierte Luft, die geringer durch Luftschadstoffe belastet ist als die vorhandene Luft.														
Frosttage	Klimatologische Kenngröße: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen das Minimum der Lufttemperatur < 0 °C beträgt.														
Geostrophischer Wind	Wind, der außerhalb der Reibung der Erdoberfläche weht und sich mit dem Luftdruckgradient und der Coriolis-Kraft (eine Scheinkraft hervorgerufen durch die Erdrotation) im Gleichgewicht befindet.														
Globalstrahlung	Summe der direkten und der diffusen Sonnenstrahlung, welche auf eine horizontale Fläche auf der Erde trifft.														

Gunstrraum	Ein Gunstrraum ist ein Gebiet, das thermisch und lufthygienisch vergleichsweise unbelastet ist.
Hangwind	Hangabwind/Hangaufwind sind Teil der Berg-/Talwindzirkulation. Sie setzen schon kurz nach Beginn der abendlichen Abkühlung bzw. nach Einsetzen der Sonneneinstrahlung am Morgen ein. Nach einigen Stunden Verzögerung treten Ausgleichsströmung zwischen Tal und Vorland als → Bergwind (nachts) bzw. → Talwind (tags) ein.
Heiße Tage	Klimatologische Kenngröße: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen das Maximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C beträgt.
Human-Biometeorologie	Teilgebiet der Meteorologie, das sich mit der Wirkung des Klimas, der Luftschadstoffe und der Strahlung auf den Menschen beschäftigt.
Kaltluftbahn	→ Leitbahn der Luft, entlang welcher Luftmassen mit geringerer bzw. ohne Wärmebelastung relativ zur Luftmasse innerhalb der → urban canopy layer in die Stadt hineintransportiert werden. Die lufthygienische Qualität der hertransportierten Luft wird nicht berücksichtigt.
Kaltluft	Unter lokaler Kaltluft versteht man bodennahe Luft, die kälter als die ihrer Umgebung ist. Kaltluft wird entweder vor Ort auf Grund des Energieumsatzes an der Erdoberfläche gebildet oder durch kleinräumige Zirkulation transportiert. Kaltluftentstehung und -abfluss hängen von meteorologischen Verhältnissen, der Flächennutzung sowie von der Geländeform und -exposition ab (Schirmer & Buschner (1987)).
Kaltluftabfluss	Unter Kaltluftabfluss versteht man den orographisch bedingten nächtlichen Abfluss von örtlich gebildeter → Kaltluft. Dabei wird genügend Gefälle vorausgesetzt. Dies trifft insbesondere an unbewaldeten und unbebauten Hängen auf.
Kaltlufteinzugsgebiet	Das Kaltlufteinzugsgebiet umfasst nur diejenigen Kaltluftproduktionsgebiete, in denen → Kaltluft gebildet wird, die für einen bestimmten Standort oder eine Siedlung (→ Wirkungsraum) von Bedeutung sind. (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003))
Kaltluftentstehung/ Kaltluftbildung (Kaltluftproduktion)	Bei windschwachen Strahlungswetterlagen infolge nächtlicher Ausstrahlung örtlich entstehende Kaltluft. Die durch Ausstrahlung abkühlende Erdoberfläche kühlt ihrerseits die darüber liegende bodennahe Luftschicht ab. Es bildet sich bodennahe Kaltluft. Die Kaltluftbildung ist abhängig von den physikalischen (z.B. Wärmeleitung) und topographischen (z.B. Bewuchs, Bebauung, Geländeform) Eigenschaften der Erdoberfläche.
Kaltluftproduktionsrate	Bei wolkenarmen und windschwachen Wetterlagen führt die nächtliche Ausstrahlung der Erdoberfläche zur → Kaltluftbildung. Die Angabe der Stärke der Kaltluftbildung erfolgt über das pro Sekunde abgekühlte Luftvolumen pro Grundfläche. Alternativ verwenden Kaltluftabflussmodelle auch eine Kälteproduktionsrate (Energieflussdichte) an der Oberfläche in Watt pro Quadratmeter.
Klimatop	Fläche mit einer einheitlichen geländeklimatischen Eigenschaft werden in der Landschaftsökologie sowie in der Stadtklimatologie als Klimatop bezeichnet (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015)).
Konvektion	Vertikaler Luftaustausch; Aufsteigen erwärmter Luftmassen bei gleichzeitigem Absinken kälterer Luft in der Umgebung.
Latenter Wärmefluss	Umsetzung der Einstrahlung in die Verdunstung von Wasser, ohne eine Änderung der Lufttemperatur zu bewirken.

(Luft-) Leitbahn	Parallel zur Windrichtung ausgerichtete Fläche von geringer → Rauigkeit, d.h. frei von flächiger Bebauung und hoher, dichter Vegetation.
Lufttemperatur	Physikalisch betrachtet ist die Lufttemperatur ein Maß für den Wärmezustand eines Luftvolumens. Dieser wird bestimmt durch die mittlere kinetische Energie der ungeordneten Molekularbewegung in der Luft. Je größer die mittlere Geschwindigkeit aller Moleküle in einem Luftvolumen ist, umso höher ist auch seine Lufttemperatur.
Mesoklima	Das Mesoklima (z.B. Stadt-, Gelände- und Regionalklima) erstreckt sich subregional bis lokal innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht und schließt Städte, Berge und Täler ein. Es wird von Relief, Klima, Oberflächenbedeckung und menschlichen Aktivitäten geprägt (Weischet & Endlicher (2018)).
Mikroklima	Atmosphärische Prozesse der bodennahen Luftschicht mit einer horizontalen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis einigen hundert Metern. Der atmosphärische Zustand in diesem Bereich wird von den Eigenschaften der Oberfläche maßgebend geprägt, ist aber dennoch in das Großklima eingebettet. Die mikroklimatischen Phänomene sind bei → autochthonen Wetterlagen am stärksten ausgeprägt.
Morbidität	Häufigkeit der Erkrankungen innerhalb der Bevölkerung.
Mortalität	Sterblichkeit, Sterberate der Bevölkerung.
Neutrale (Indifferente) Schichtung	Eine neutrale oder indifferente Schichtung liegt vor, wenn ein Luftpaket bei Vertikalbewegungen stets die gleiche Temperatur wie die Umgebungsluft aufweist.
Planetare Grenzschicht	Als planetarische Grenzschicht wird die Schicht bezeichnet, die vom Erdboden bis zu einer Obergrenze von ca. 500 - 2000 m der Atmosphäre reicht, wobei die Höhe der Schicht von der Rauigkeit des Untergrundes, der vertikalen Temperaturschichtung und der Windgeschwindigkeit abhängt. Der Mittelwert der Höhe beträgt ca. 1000 m. In der planetarischen Grenzschicht findet ein Großteil des turbulenten vertikalen Austauschs von Wärme (Energie) und Wasserdampf zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre statt.
Perzentil	Ein Perzentil ist ein Wert auf einer Skala von Null bis Hundert, der den Prozentsatz an Datensatzwerten angibt, der gleich oder niedriger als er selbst ist. Das Perzentil wird oft genutzt, um die Extremwerte einer Verteilung abzuschätzen. So kann z.B. das 90. (10.) Perzentil verwendet werden, um die Schwelle für die oberen (unteren) Extremwerte zu bezeichnen
PET	Physiological Equivalent Temperature. Ein Index zur Beschreibung des thermischen Empfindens in Abhängigkeit von der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit sowie der Strahlungsflüsse unter Berücksichtigung der menschlichen Energiebilanz.
Rauigkeit	Ein Maß für die Rauigkeit ist der z_0 -Wert, der in Meter angegeben wird. Er beschreibt die Wirkung von Vegetation und Bebauung auf die bodennahe Strömungsreduktion.
Sensibler Wärmefluss	Umsetzung der Einstrahlung in einen fühlbaren thermischen Wärmefluss, welcher sich in einer Änderung der Lufttemperatur äußert.
Sommertage	Klimatologische Kenngröße: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen das Maximum der Lufttemperatur ≥ 25 °C beträgt.
Strahlungsantrieb	Maß für die Energiebilanz der Erde durch die von außen einwirkende Strahlung.

Strahlungsbilanz	Die Strahlungsbilanz ist die Differenz aus der Einstrahlung und Ausstrahlung auf eine Oberfläche. Die Strahlungsbilanz der Erdoberfläche wird dabei hauptsächlich von der solaren, kurzwelligen Einstrahlung und der terrestrischen, langwelligen Ausstrahlung bestimmt.
Strahlungstemperatur	Die mittlere Strahlungstemperatur ist die Temperatur der auf den Wärmehaushalt des Menschen (bzw. den Messpunkt) einwirkenden Wärmestrahlung aller Umschließungsflächen in Abhängigkeit von deren Emissionsvermögen.
SRTM-Daten	Digitales Geländemodell, welches bei der STS-099 Shuttle Radar Topography Mission im Februar 2000 aufgezeichnet wurde.
Strömungssystem	Stabil ausgebildete Kaltluftabflüsse und Flurwinde in der zweiten Nachthälfte.
Synthetische Winddaten	Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken, welche auf Basis von Reanalyse-Daten mit einem prognostischen nicht-hydrostatischen Strömungsmodell berechnet wurden. Die Daten beziehen sich meist auf eine Anemometerhöhe von 10 m über Grund.
Urban boundary layer	Bezeichnung für den Teil der bodennahen Luftschicht, der durch städtisch bebaute Gebiete beeinflusst wird.
Urban canopy layer	Luftschicht zwischen dem Boden und der mittleren Höhe der Gebäude und Bäume, in welcher mikroskalige Prozesse, wie Mehrfachreflexion oder Turbulenz, dominieren.
Urbane Wärmeinsel	Siedlungsraum, der vor allem abends und nachts während → autochthoner Wetterlagen eine höhere Lufttemperatur aufweist als die ländliche Umgebung.
Ventilationsbahn	Luftleitbahn mit unterschiedlichem thermischem und lufthygienischem Niveau, auf der bei Schwachwindlagen lufthygienisch belastete oder unbelastete Luftmassen mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften in die Stadt transportiert werden. Die thermische oder lufthygienische Belastung der Luft spielt hier keine Rolle. Die Funktion wird ausschließlich durch den geringen Strömungswiderstand erfüllt (Mayer & Matzarakis (1992)).
Volumenstromdichte	Die Kaltluft-Volumenstromdichte ist ein Maß für die Menge der abfließenden → Kaltluft. Sie wird angegeben in Kubikmeter pro Sekunde und Querschnitt der Breite 1 Meter über die gesamte betrachtete Luftschichtmächtigkeit.
Wahre Ortszeit	Die auf den Sonnenstand bezogene Zeit. Die Sonne steht um 12:00 Uhr wahrer Ortszeit im Zenit.
Wärmebelastung	Wärmebelastung liegt vor, wenn der menschliche Organismus Probleme bekommt, die Kerntemperatur von 37 °C zu halten. Die Wärmebelastung wird anhand von Wärmehaushaltsmodellen des Menschen ermittelt. Dabei gehen neben physiologischen Größen die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Strahlungsströme und die Windgeschwindigkeit ein. Besondere Belastungssituationen ergeben sich insbesondere bei einer längeren Dauer der Wärmebelastung, z.B. in Hitzeperioden.
Warme Hangzone	Geländebereich an Hängen, der sich zwischen kalter Hochfläche und Talsohle befindet und oberhalb eines ausstrahlungsbedingten Kaltluftsammelebiets (in Mulden, Becken, Tälern) liegt. Die warme Hangzone ist bioklimatisch begünstigt.
Wirkungsraum	Raum, in den die Kaltluft oder Frischluft eindringt. Ist der Wirkungsraum bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastet wird er auch als → Belastungsraum oder belasteter Wirkungsraum bezeichnet.

1 Zusammenfassung

Die Stadt Asperg möchte mit stadtplanerischen Mitteln die jetzige und zukünftige Hitzebelastung im Stadtgebiet und damit die Gesundheit der dort lebenden Bevölkerung positiv beeinflussen. Grundlage hierfür soll ein lokalklimatologisches Gutachten sein.

Das Stadtgebiet von Asperg liegt in einer der wärmsten Regionen Deutschlands. Die höhere Anzahl an Sommertagen führt vor allem in den Sommermonaten häufig zu Hitzebelastungen. Im Rahmen des Klimawandels werden Tage mit Hitzestress weiter zunehmen. Ziel ist es, sowohl die Bereiche mit hoher Belastung zu lokalisieren wie auch die Faktoren und Raumschaften zu ermitteln, die für eine Entlastung sorgen.

In der Stadtklimaanalyse Asperg werden die räumlichen Wirkungszusammenhänge zwischen den thermisch belasteten Räumen (Wirkungsraum) und den ihnen zugeordneten Ausgleichsräumen analysiert. Dabei wird ein heißer Tag betrachtet, der in der Regel bei wolkenarmen und windschwachen Wetterlagen auftreten kann. Bei diesen Wetterlagen prägen sich die lokaltypischen klimatischen Eigenheiten am stärksten aus.

Für planerische Fragestellungen im Rahmen der Flächennutzungsplanung bis hin zur Ergreifung von Klimaanpassungsmaßnahmen ist die Kenntnis der räumlichen Struktur und Intensität sowohl der Belastungen wie auch der Entlastungen erforderlich. Um diese zu bewerten, wird die Betroffenheit der Bevölkerung herangezogen. Diese ergibt sich aus der Intensität der Belastung bzw. Entlastung und der Empfindlichkeit der betrachteten Fläche. Die Empfindlichkeit wird über die Bevölkerungsdichte und die Lage klimasensibler Nutzungen, wie Krankenhäuser, Pflegeheime oder Kindertagesstätten ermittelt.

Die Belastungssituation der Wirkungsräume setzt sich aus der thermischen und der hier nicht untersuchten der lufthygienischen Belastung zusammen. Die thermische Belastung wird für die Tag- und die Nachtsituation untersucht. Zur Quantifizierung der Wirkung der thermischen Bedingungen auf den Menschen werden human-biometeorologische Methoden herangezogen.

Die wesentlichen Faktoren für eine Entlastung stellen die Durchlüftung und innerstädtische Grünflächen dar. Für die Durchlüftung sind insbesondere nächtliche Kaltluftabflüsse maßgebend, die Frischluft herantransportieren und die tagsüber entstandenen thermischen und lufthygienischen Belastungen verringern. Die Bedeutung wird jedem klar, der in einer Hitzeperiode in den Nachtstunden Schlaf sucht. Wird die Wohnung und das Schlafzimmer bei geöffneten Fenstern gut belüftet, stellen sich verträglichere Verhältnisse ein, als wenn keinerlei Luftbewegung vorhanden ist.

Innerstädtische Grünanlagen haben verschiedene positive lokalklimatische Effekte. Sie stellen an heißen Tagen sowohl Ausgleichs- wie auch Aufenthaltsbereiche dar. Die Qualität dieser Bereiche wird geprägt von schattenwerfendem Baumbestand, der Größe der Grünfläche und der fußläufigen Erreichbarkeit.

Um diese Aspekte des Stadtklimas zu erfassen und aufzuarbeiten, wurden mittels umfangreicher Modellsimulationen die Gunstfaktoren und die thermischen und lufthygienischen Belastungen ermittelt.

Auf der Basis dieser Informationen wurden eine Klimaanalysekarte und eine Planungshinweiskarte erarbeitet. Die flächendeckenden Klimainformationen des vorliegenden Gutachtens stellen für die Stadt Asperg die Grundlage für die Einordnung planerischer Maßnahmen aus klimatischer Sicht

dar. Sie dienen neben der Flächennutzungsplanung auch zur Lokalisierung von Klimaanpassungsmaßnahmen.

1.1 Gunstfaktoren

Die nächtliche Belüftung bei austauscharmen wolkenarmen Wetterlagen, sogenannten autochthonen Wetterlagen, erfolgt im Raum Asperg vor allem durch den Zustrom von Kaltluft von außerhalb des Stadtgebiets. Diese südwestliche, also vorwiegend Richtung Nordost orientierte Strömung kann vor allem durch die Freiflächen im Südwesten des Stadtgebiets auch bodennah wirksam werden und zur Durchlüftung und Abkühlung vor allem im Bereich Lange Äcker und Bürgergarten beitragen. Bodennah führt die teils dichte Bebauung zu einer Reduktion der Durchlüftung, so dass nicht überall gute Austauschverhältnisse vorhanden sind.

Abendliche Hangabwinde sorgen für eine Kaltluftzufuhr in die Randbereiche des Gebiets Weinberg. Der Hohenasperg als markante Erhebung im Stadtgebiet beeinflusst auch die Strömung. Seine Bremswirkung und der damit reduzierte Austausch betreffen aber nur dünn besiedelte Bereiche.

Größere Park- und Grünflächen, aber auch Waldgebiete stellen für die Bevölkerung wichtige Freizeit- und Naherholungsbereiche dar. Darüber hinaus dienen sie als klimatische Ausgleichsräume und haben somit eine wichtige klimatische Funktion innerhalb der Stadt inne. Im Stadtgebiet Aspergs ist die Anzahl solcher öffentlichen Flächen begrenzt, größere Waldgebiete sind von den meisten Siedlungsgebieten relativ weit entfernt. Allerdings werden Versorgungsdefizite (fehlende öffentliche Grün- und Parkanlagen) häufig durch private Gärten kompensiert. Mit Blick auf den Klimawandel sind der Erhalt und die Weiterentwicklung der Funktionalität innerstädtischer Grünflächen auch in Zukunft wichtige Aspekte.

1.2 Belastungen

Neben der durch die großräumige Lage vorgegebenen thermischen Belastung steigern aber auch ein erhöhter Anteil versiegelter Flächen sowie ein Mangel an klimatisch relevanten Grün-, Frei- und Wasserflächen innerhalb der städtischen Bebauung die Wärmebelastung. Sichtbar wird dies z.B. an der urbanen Wärmeinsel, welche die Überwärmung des Siedlungsbereiches gegenüber dem Umland beschreibt. Sie ist in von der Innenstadt bis in den Bereich des südlichen Weinbergs besonders ausgeprägt.

Die Bewertung dieser thermischen Belastung für die Bevölkerung erfolgte auf der Basis der Betroffenheit, d.h. abhängig von der Einwohnerdichte und dem Vorhandensein klimasensibler Nutzungen, wie Pflegeheime, Krankenhäuser oder Kindertagesstätten. Hohe bis sehr hohe thermische Betroffenheit in Siedlungsgebieten findet man in einem Gürtel südwestlich der Innenstadt bis nach Osten im Bereich Grafenbühl. Die Stadtrandbereiche, teilweise in Hanglage sind durch die geringere Bebauungsdichte, den höheren Grünanteil und die gute Durchlüftung überwiegend merklich weniger betroffen. Dies verdeutlicht die Bedeutung der Gunstfaktoren wie der Kaltluftströmungen für die Aufenthaltsqualität in den Wohnquartieren, die bei einer mit dem Klimawandel einherschreitenden zunehmenden Erwärmung noch weiter zunehmen wird.

2 Einführung und Aufgabenstellung

Durch den Klimawandel und den damit verbundenen Auswirkungen auf Menschen und Umwelt ist neben dem globalen Klima auch das lokale Klima weiter in den Fokus gerückt. Die Zielsetzungen der Sicherung gesunder Wohn- und Arbeitsverhältnisse erfordert die Berücksichtigung der klimatischen Belange bei zahlreichen planerischen Fragestellungen. Dies fängt bei der Flächennutzungsplanung an, wo es beispielsweise um die Erhaltung der Kalt- und Frischluftzufuhr geht, und endet bei kleinräumigen Planungen im Bereich der Bauleitplanung oder lokalen Klimaanpassungsmaßnahmen. In jedem Fall ist die Kenntnis der räumlichen Struktur und Intensität sowohl der Belastungen wie auch der Entlastungen erforderlich, um mit der Planung richtig reagieren zu können.

Die Stadtklimaanalyse stellt deshalb eine wichtige Grundlage für planerische Entscheidungen dar. Sie basiert auf umfangreichen Modellierungen der thermischen und lufthygienischen Belastungen und der entlastenden Momente durch Kaltluftabflüsse und städtische Klimavielfalt.

Modelliert wurden die stadtweiten Kaltluftströmungen, die thermischen Bedingungen und das Human-Bioklima. Daraus ergibt sich die Datengrundlage für Klimaanalyse- und Planungshinweiskarten.

Um relevante Strömungssysteme und die zugrunde liegenden Kaltluftentstehungsgebiete und Luftleitbahnen zu identifizieren, müssen die räumlichen Wirkungszusammenhänge zwischen den thermisch belasteten Räumen (Wirkungsraum) und den ihnen zugeordneten Ausgleichsräumen ermittelt werden.

In die Modellierungen fließen das Höhenmodell, die Realnutzung, die Baukörper und vieles mehr ein. Zudem werden auch die Effekte des prognostizierten Klimawandels behandelt.

Die Wärmebelastung der Wirkungsräume setzt sich aus der thermischen Belastung und der Empfindlichkeit der Bevölkerung zusammen. Die thermische Belastung wird für die Tag- und Nachtsituation untersucht. Zur Quantifizierung der Wirkung der thermischen Bedingungen auf den Menschen werden human-biometeorologische Methoden herangezogen. Mit Hilfe der auf der menschlichen Energiebilanz basierenden thermischen Indizes wie der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) kann unter Berücksichtigung der Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und der Strahlungsflüsse die Wärmebelastung flächendeckend quantifiziert werden.

Für die Bewertung des lokalen Klimas gibt es keine Grenz- oder Richtwerte. Der Grad der positiven und negativen Wirkungen ergibt sich aus der Zusammenschau von Intensität und Betroffenheit. Letztere wird durch die Bevölkerungsdichte ausgedrückt.

Zur Charakterisierung der Wärmebelastung kann die Zahl der Sommertage, d.h. Tage mit Tageshöchsttemperatur ≥ 25 °C herangezogen werden. Exemplarisch sind in Abbildung 2-1 die langjährigen Mittel¹ 1971 – 2000 der Sommertage in Deutschland dargestellt. Die Stadt Asperg gehört mit einem langjährigen Wert von 43 Sommertagen zu den wärmsten 10 % der Regionen in Deutschland (Abbildung 2-2).

¹ Die Weltorganisation für Meteorologie hat diese auf 30-jährige Zeiträume festgelegt.

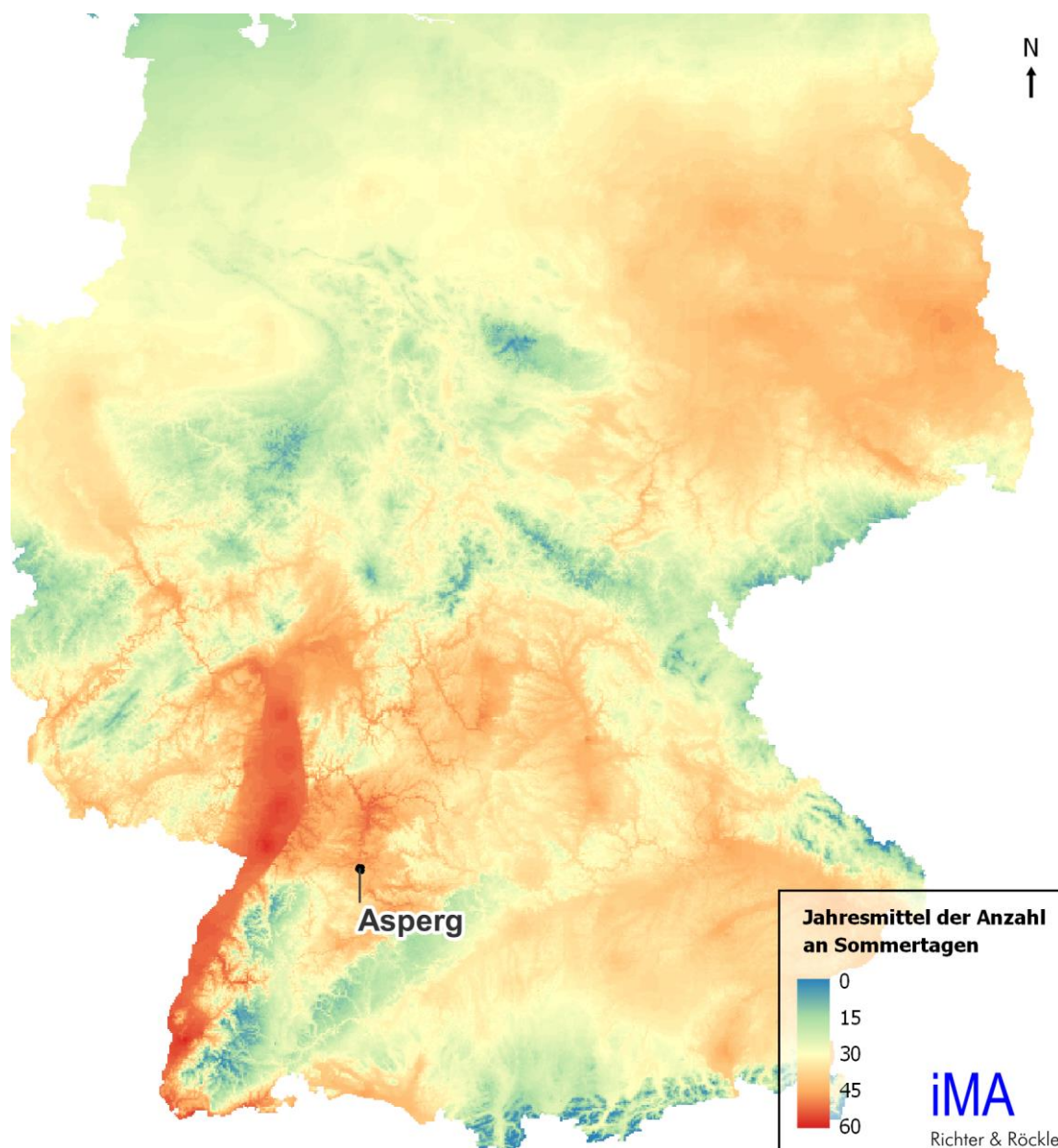


Abbildung 2-1: Langjähriges Mittel der Anzahl an Sommertagen in Deutschland für den Klimazeitraum 1971 – 2000 (Quelle: DWD Climate Center (CDC) 2020).

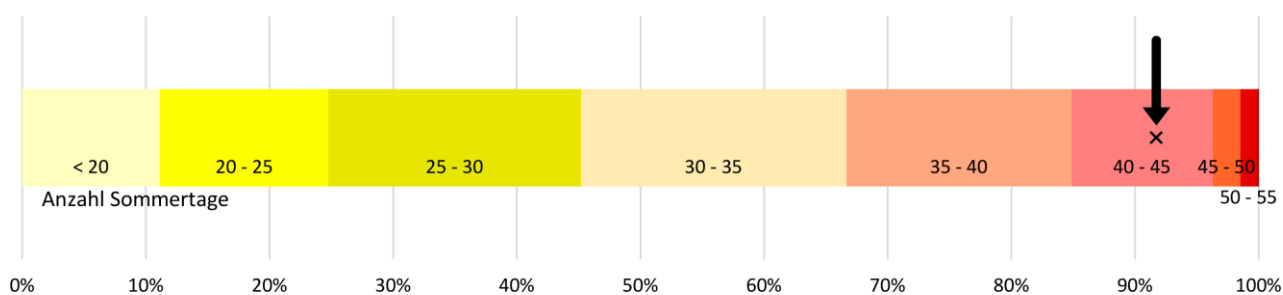


Abbildung 2-2: Verteilung der Sommertage auf der Landfläche von Deutschland für den Klimazeitraum 1971 – 2000. Das Kreuz gibt die mittlere Häufigkeit im Bereich Asperg an (Quelle: DWD Climate Center (CDC) 2020).

Durch den anthropogenen Klimawandel wird im 21. Jahrhundert ein Anstieg der mittleren Lufttemperatur, der Dauer, Intensität und Häufigkeit von Hitzewellen und der Anzahl an heißen Tagen erwartet (Christidis, Jones & Stott (2015); Schär et al. (2004)). Die Vulnerabilität* der europäischen und somit auch deutschen Bevölkerung wurde bereits bei der Hitzewelle 2003 offensichtlich, als die Hitze-bedingte Mortalität* europaweit mit mehreren zehntausend Fällen beziffert wurde (Robine et al. (2008)). Dabei traf es weniger junge gesunde Menschen, Menschen mit einem guten sozialen Status oder die Landbevölkerung, sondern Kleinkinder, alte und vorbelastete Menschen oder Menschen mit niederem Sozialstatus, die in Städten leben (Basu (2009)). Des Weiteren entsteht durch das verringerte Leistungsvermögen ein volkswirtschaftlicher Schaden (Zander et al. (2015)).

In Städten kühlt die Luft weitaus weniger ab als im ländlich geprägten Umland. Dieses Phänomen wird als urbane Wärmeinsel* bezeichnet und verstärkt den Hitzestress und damit die thermische Belastung in Städten. Die Ausprägung der thermischen und lufthygienischen Belastungen hängt jedoch von einer Vielzahl von Faktoren ab. Dazu zählen die geographische Lage, die Höhenlage, das Relief, Bebauungsdichten und -höhen, die Verteilung von versiegelten und durchgrüntem Flächen usw.

Eine Abkühlung bzw. Entlastung für die städtische Bevölkerung in Hitzeperioden kann durch Kaltluftabflüsse* und Flurwinde* herbeigeführt werden. Diese tragen in der Nacht wesentlich zur thermischen Regeneration von Menschen und Umwelt bei. Die Zufuhr von – möglichst unbelasteter – Kaltluft in die urbanen Siedlungsräume ist daher von hohem Stellenwert für die Gesundheit und die Lebensqualität der Stadtbevölkerung. Daneben sind innerstädtische Grünflächen von Bedeutung. Diese sind für eine ausreichende Klimavielfalt, d.h. die Verfügbarkeit unterschiedlicher Mikroklimata statt einer homogenen Situation, erforderlich.

3 Bestandsbeschreibung

3.1 Örtliche Verhältnisse

Das Stadtgebiet von Asperg erstreckt sich über eine Fläche von rund 5,8 km².

Das Stadtgebiet Asperg liegt im Strohgäu und ist damit Teil des Neckarbeckens (Abbildung 3-1).

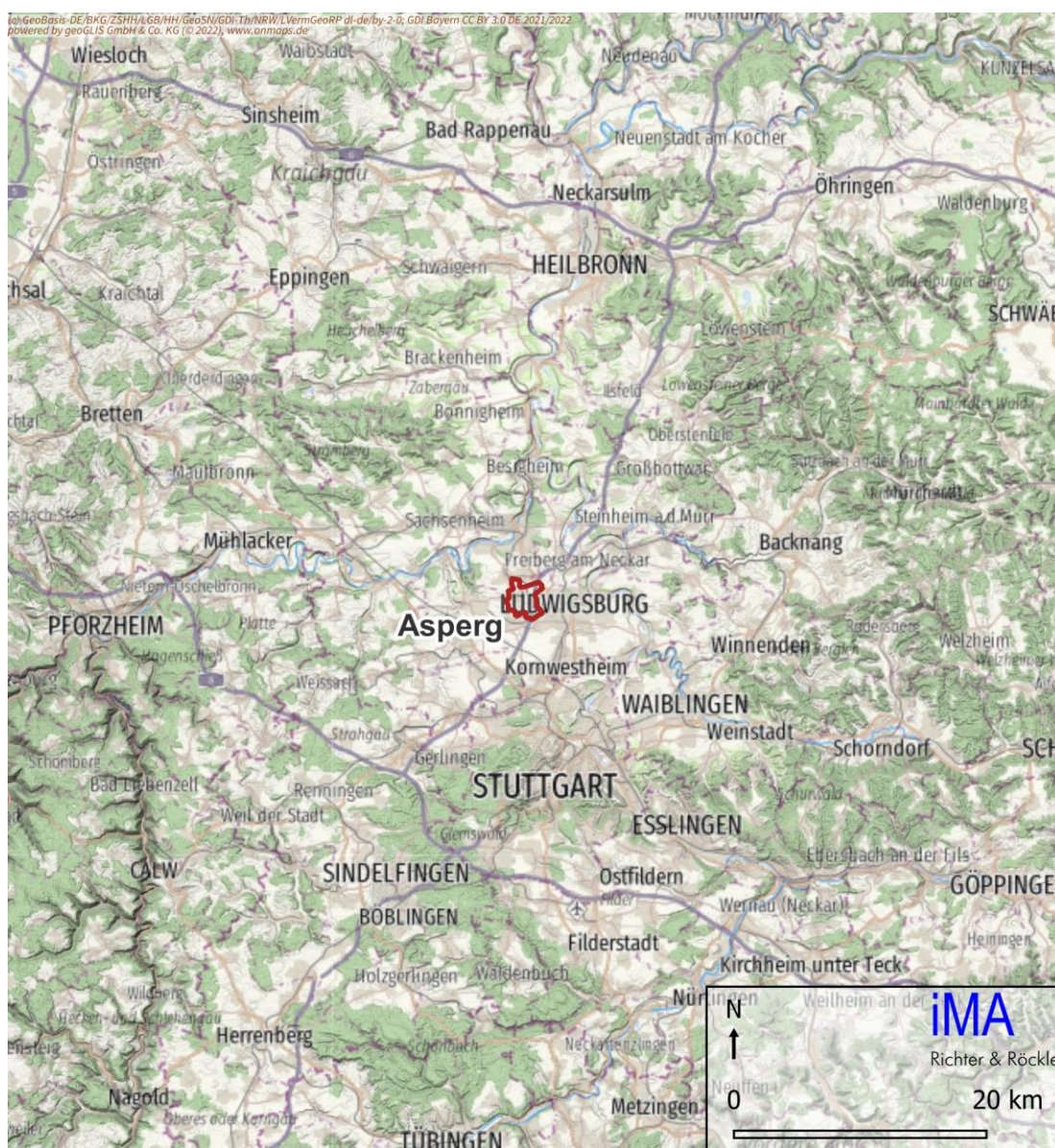


Abbildung 3-1: Räumliche Einordnung des Untersuchungsgebiets (Stadtgebiet Asperg, rot umrahmt) und der weiteren Umgebung (Kartengrundlage: onmaps.de ©GeoBasis-DE/BKG/ZSHH/LGB/HH/GeoSN/GDI-Th/NRW/LVermGeoRP dl-de/by-2-2; GDI Bayern CC BY 3.0 DE 2021/2022).

Großräumig fällt das Gelände Richtung Nordosten ab. Die Höhenlagen reichen vom tiefsten Punkt im nordöstlichen Stadtgebiet mit etwa 240 m bis auf über 350 m über Normalhöhennull (NHN) am Hohenasperg als markanteste Erhebung (Abbildung 3-2). Auf dem rund 5,8 km²-großen Stadtgebiet leben 13.769 Einwohner (Stand 2021).

Die größte Nord-Süd-Ausdehnung des Stadtgebiet Asperg beträgt ca. 3,3 km, die größte Ost-West-Ausdehnung ca. 3 km. Die Kernstadt Asperg liegt südlich des Hohenasperg etwa westlich des geographischen Zentrums des Stadtgebiets in etwa 270 m ü. NHN.

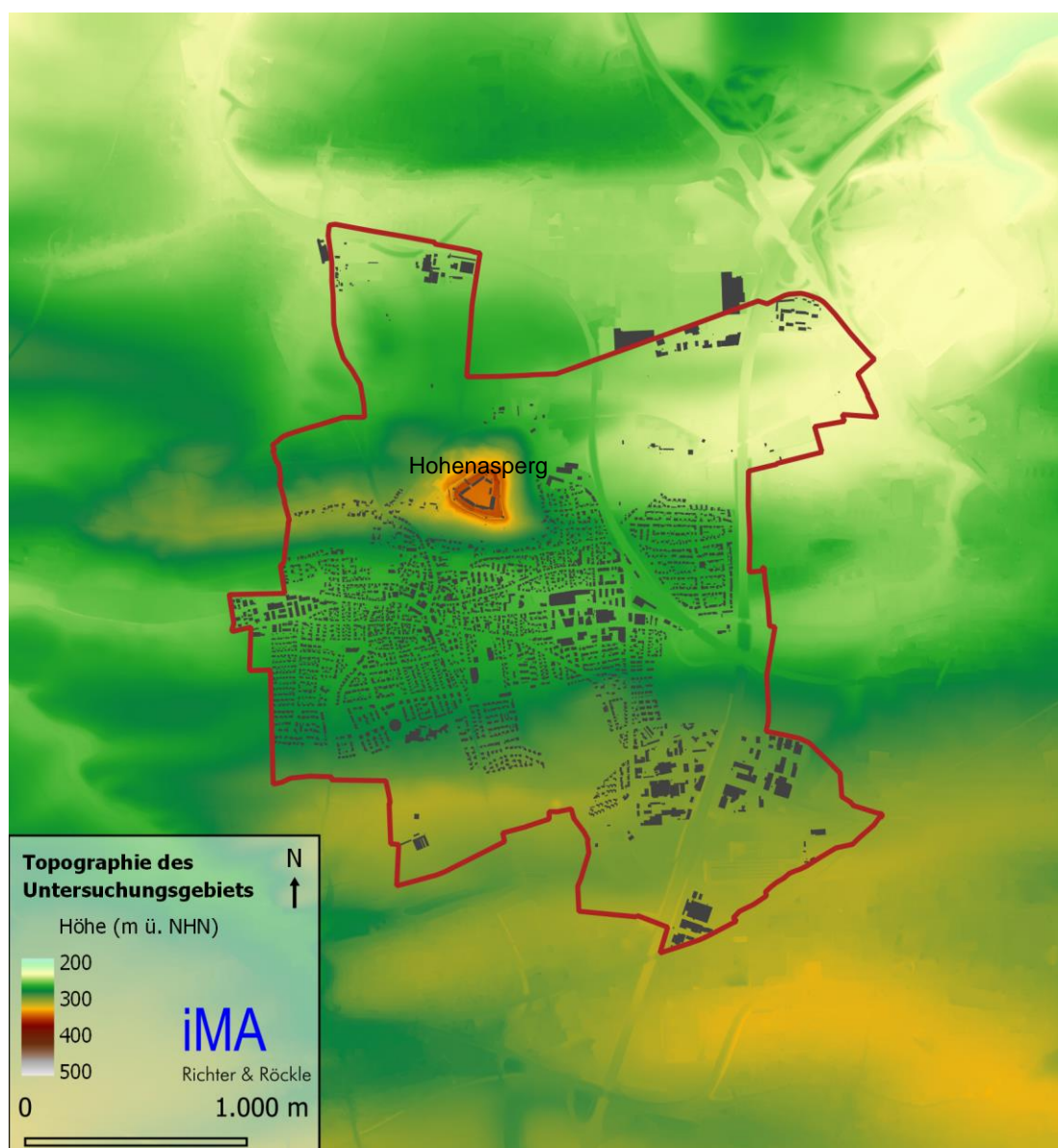


Abbildung 3-2: Topographie des Untersuchungsgebiets (Stadtgebiet Asperg, rot umrahmt).

Das Strohgäu wird landwirtschaftlich genutzt, im Stadtgebiet Asperg ist der Anteil von Siedlungs- und Verkehrsflächen in der Summe aber höher als der Anteil an Wiesen-, Wald- und Ackerflächen (Abbildung 3-3).

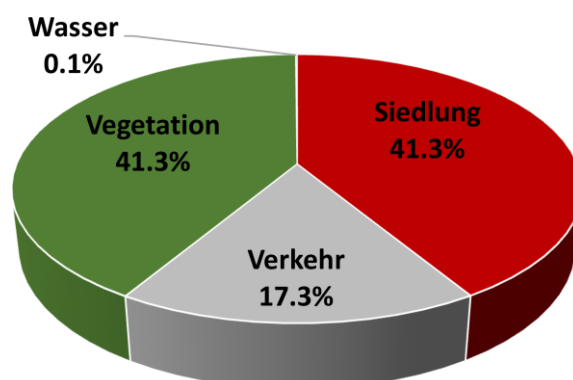


Abbildung 3-3: Verteilung der Landnutzung im Stadtgebiet (Quelle: Statistisches Landesamt 2020).

Die Wohngebiete ziehen sich von West nach Ost in der Mitte des Stadtgebiets (Abbildung 3-4). Ausgedehnte Gewerbeflächen finden sich im Osten und Südosten sowie an der nördlichen Gemarkungsgrenze. Markante Verkehrsinfrastruktur findet sich in der Bahnlinie, die vom Nordrand des Stadtgebiets nach Osten verläuft, sowie in der Trasse der Autobahn A81, die von Nord nach Süd im östlichen Teil liegt. Landwirtschaftliche Flächen finden sich vorwiegend im südlichen und nördlichen Stadtgebiet. Der Anteil der zusammenhängenden Waldflächen ist relativ gering, sie finden sich an den Nordhängen des Hohenaspergs und im Südosten des Stadtgebiets. Auch der Anteil der Wasserflächen ist sehr gering.

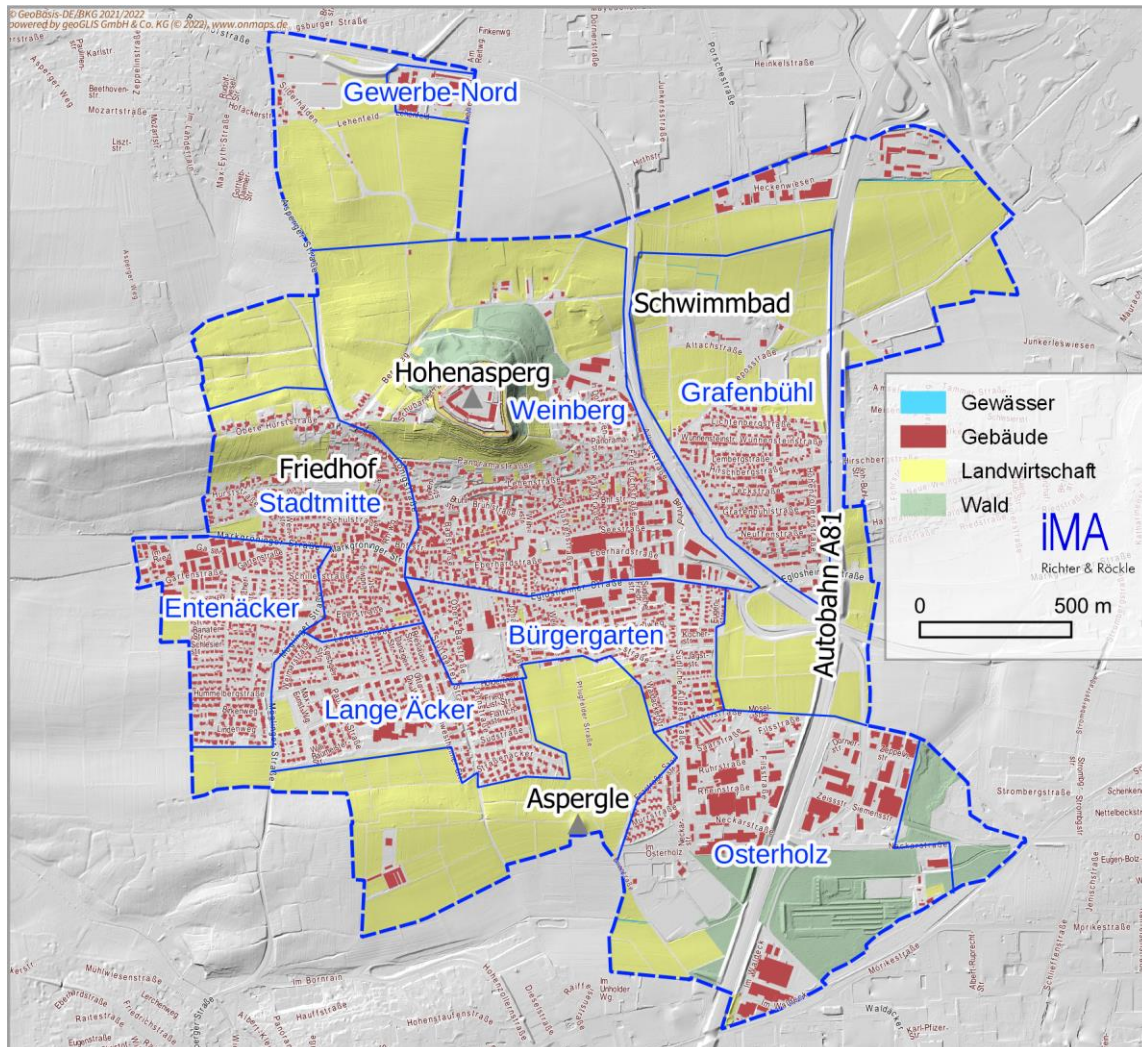


Abbildung 3-4: Erhebungen (Dreiecke), Stadtteile (blau) und Orte im Stadtgebiet Asperg.

3.2 Strömungsverhältnisse

Eine Luftströmung wird gekennzeichnet durch die Windrichtung (Himmelsrichtung, aus der der Wind weht) und die Windgeschwindigkeit. Den Antrieb für Luftströmungen stellen horizontale Druckunterschiede dar. In großer Höhe ist diese Strömung nahezu ungestört. Durch die Reibung wird die Strömung zum Boden hin abgebremst und durch das Geländere relief kanalisiert und/oder umgelenkt.

Abbildung 3-5 zeigt Messungen der Windverhältnisse im Raum Asperg (Tabelle 3-1). Durch die relativ geringen Höhenunterschiede im Strohgäu unterscheiden sich die Windrichtungsverteilung der drei Messstationen nur moderat. Großräumig zeigen sich zwei Maxima mit den vorherrschenden Windrichtungen West und Ost bis Südost.

Kartenansicht

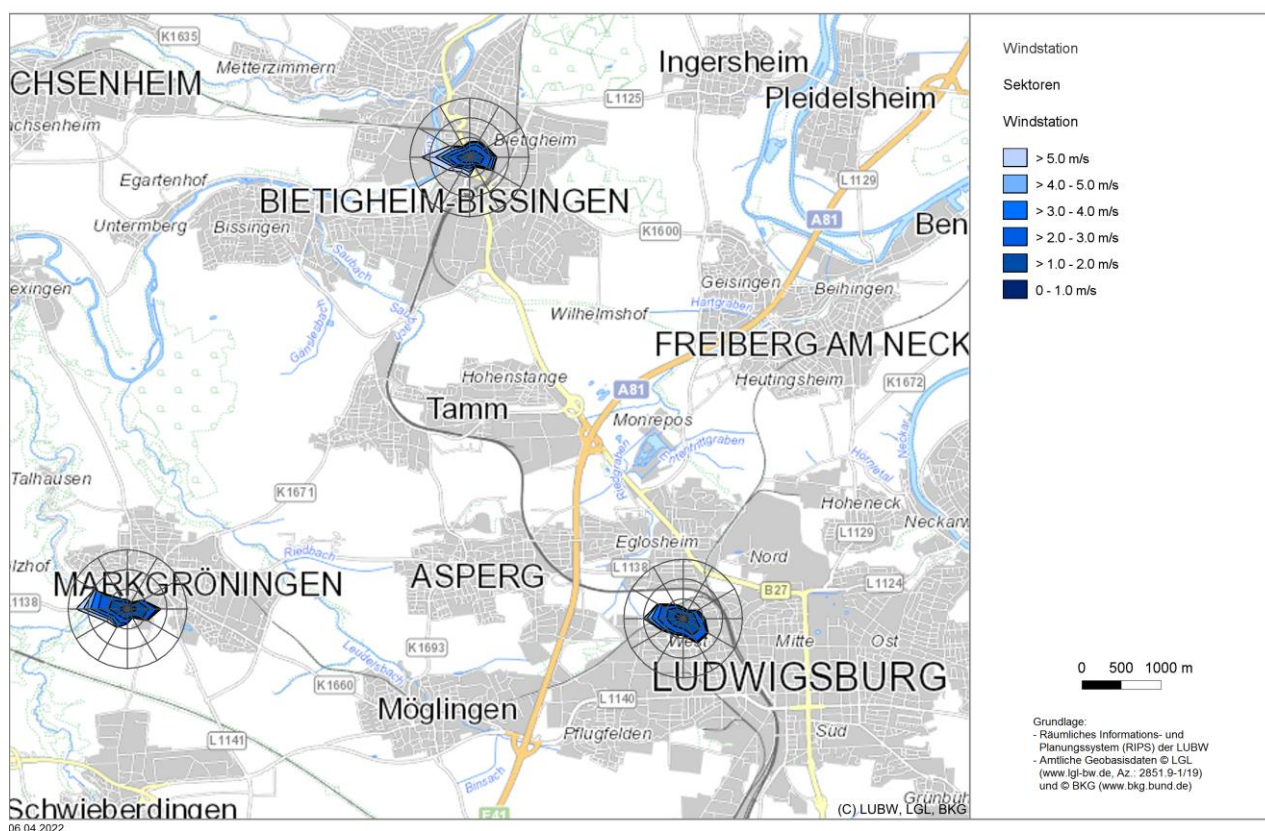


Abbildung 3-5: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen an den Messstellen der LUBW in Markgröningen, Bietigheim-Bissingen und Ludwigsburg.

Tabelle 3-1: Beschreibung der Messstationen der LUBW.

	Markgröningen	Bietigheim-Bissingen	Ludwigsburg
Lage Ostwert	505652	509971	512670
Lage Nordwert	5416392	5422100	5416272
Höhe ü. NHN	270 m	230 m	300 m
Messzeitraum	06.03.1986 – 21.10.1987	02.04.1987 – 19.05.1988	01.01.1997 – 31.12.2006
mittlere Windgeschwindigkeit	2,2 m/s	3,0 m/s	2,0 m/s

Zusätzlich zu Messdaten sind für das Bundesland Baden-Württemberg Winddaten in einer Rasterweite von 500 m verfügbar (LUBW (2021), Abbildung 3-6). Auch diese Daten weisen ein Maximum aus westlichen Richtungen auf sowie sekundär aus Südosten bis Süden. Als mittlere Windgeschwindigkeit werden 2,4 m/s ausgegeben, was im Wertebereich der Messungen liegt.

Kartenansicht

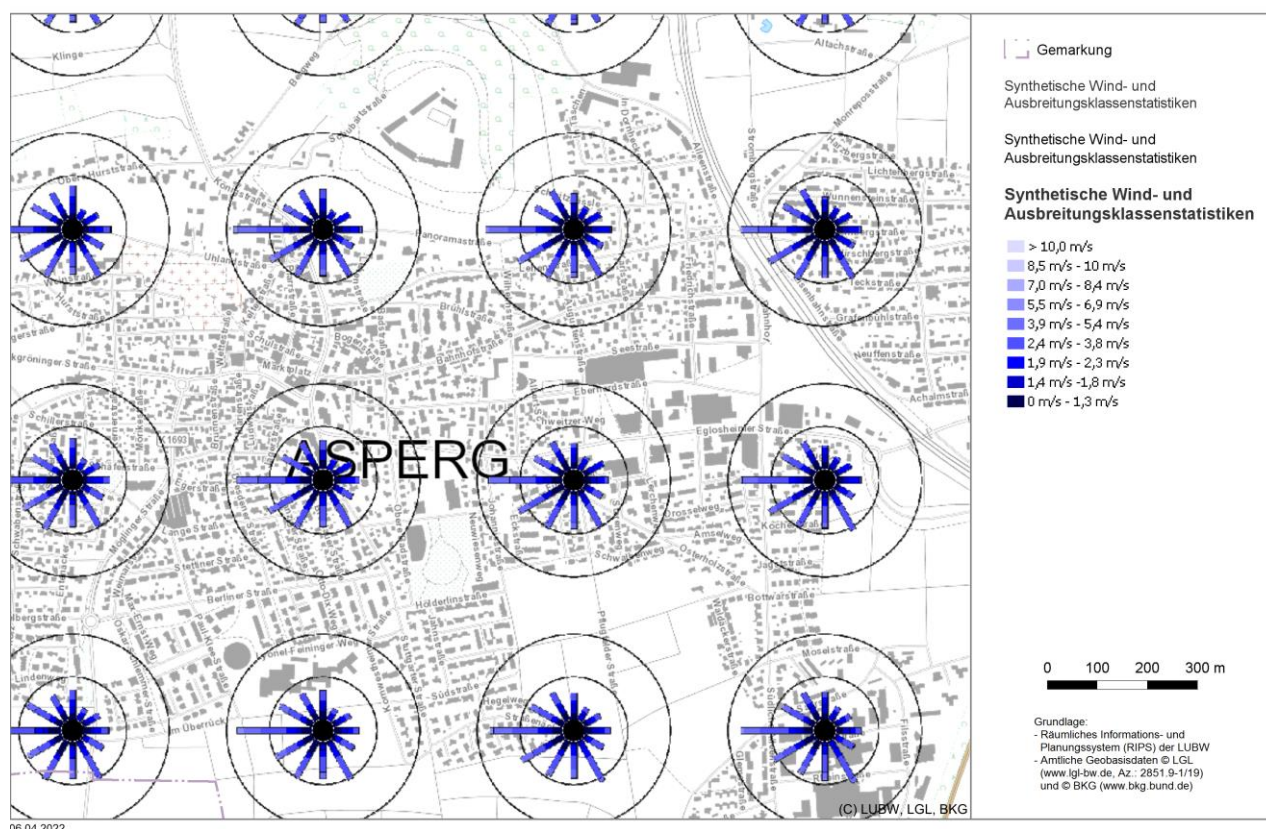


Abbildung 3-6: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen der modellierten Daten der LUBW im Raum Asperg.

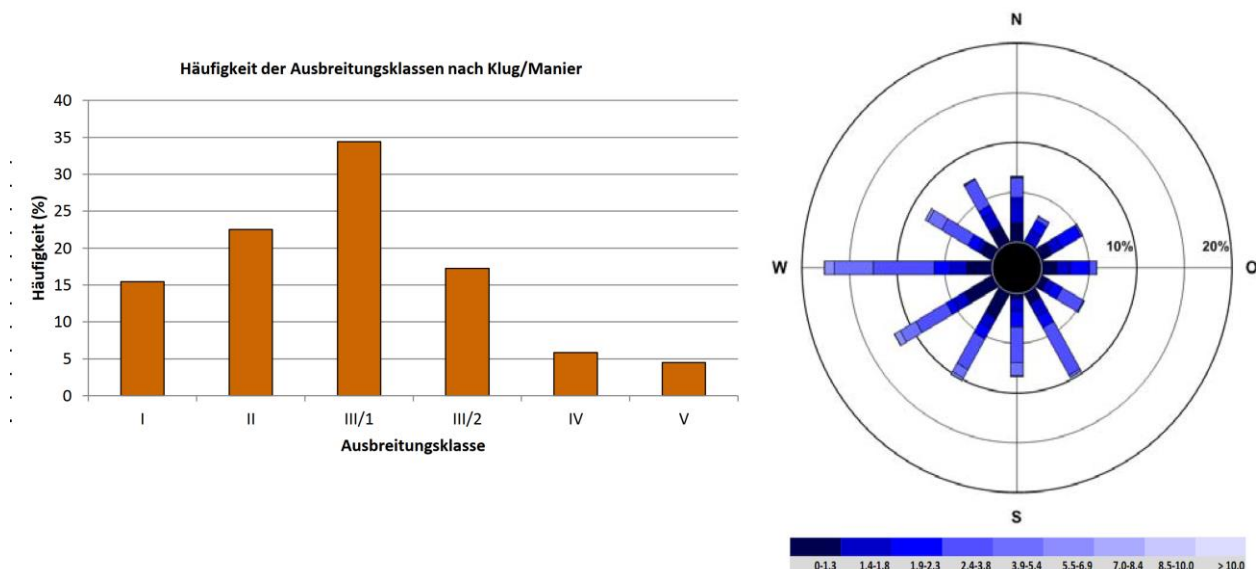


Abbildung 3-7: Häufigkeitsverteilung der Ausbreitungsklassen (links) und der Windrichtung (rechts) bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeitsklassen, modellierte Daten für Asperg.

Die Stabilität der Atmosphäre wird über Ausbreitungsklassen beschrieben. Ihre Häufigkeitsverteilung ist in Abbildung 3-7 dargestellt. Die stabilen Ausbreitungsklassen (I + II) sind mit einer Häufigkeit von etwa 38 % vertreten. Am häufigsten herrscht eine neutrale Schichtung vor (Ausbreitungsklassen III/1 + III/2, etwa 52 %). Labile atmosphärische Verhältnisse (IV + V) kommen mit rund 10 % am seltensten vor. Nachts bei windschwachen Wetterlagen (dunkelblaue Färbung der Windrose, i.A. verknüpft mit Ausbreitungsklassen I und II) ist eine südwestliche Windrichtung am häufigsten.

4 Vorgehensweise

Für die Stadtklimaanalyse Asperg sind umfangreiche Modellierungen und Analysen durchgeführt worden. In Abbildung 4-1 ist die Vorgehensweise in einem Flussdiagramm skizziert. Es verdeutlicht übersichtlich den Weg von den Datengrundlagen über die Simulationen hin zur Bewertung von Ausgleichs- und Wirkungsräumen.

Meteorologische Phänomene erstrecken sich über mehrere Skalen. Bei Stadtklimaanalysen spielen die Mesoskala mit einer Ausdehnung von mehreren Kilometern und die Mikroskala, bei der Einzelhindernisse (Gebäude, Bäume, ...) explizit aufgelöst werden, die wesentliche Rolle.

Um die Strömungsverhältnisse der Mesoskala – insbesondere Kaltluftabflüsse – zu modellieren, müssen großräumige Gelände- und Nutzungsstrukturen berücksichtigt werden, so dass die wesentlichen Kaltlufteinzugsbereiche erfasst werden. Das Relief ist für die Strömungslenkung und den Antrieb der Strömung wichtig. Die Nutzung bestimmt u.a. die Erwärmung der Oberflächen und der Luft in den Tagstunden bzw. die Abkühlung und damit die Kaltluftproduktion in den Nachtstunden. Die Rauigkeit des Geländes bestimmt das bodennahe Fließverhalten.

Zur Bestimmung kleinräumiger stark variierender Größen der Mikroskala wie z.B. der Physiologischen Äquivalenten Temperatur (PET) bedarf es der Berücksichtigung der Einzelhindernisse. Nur dann kann berechnet werden, ob ein Aufenthaltspunkt verschattet oder besonnt wird, was sich stark auf das menschliche Temperaturempfinden auswirkt.

Die Eingangsdaten für die Modellrechnungen werden auf Basis der aufbereiteten Datengrundlagen durchgeführt. Die Modellergebnisse werden hinsichtlich der Gunstfaktoren (z.B. Kaltluftabflüsse) und der Ungunstfaktoren (Belastungen) ausgewertet. Aus den Ungunstfaktoren und der Empfindlichkeit der Bevölkerung (Bevölkerungsdichte) ergeben sich die Betroffenheiten. Aus der Zusammenschau der Gunstfaktoren und ihrer Intensität sowie der Betroffenheit werden die relevanten Ausgleichsflächen ermittelt. Die Klimaanalyse- und Planungshinweiskarte entsprechen einer Zusammenstellung sämtlicher Simulationsergebnisse und sind folglich das finale Resultat der Klimaanalyse.

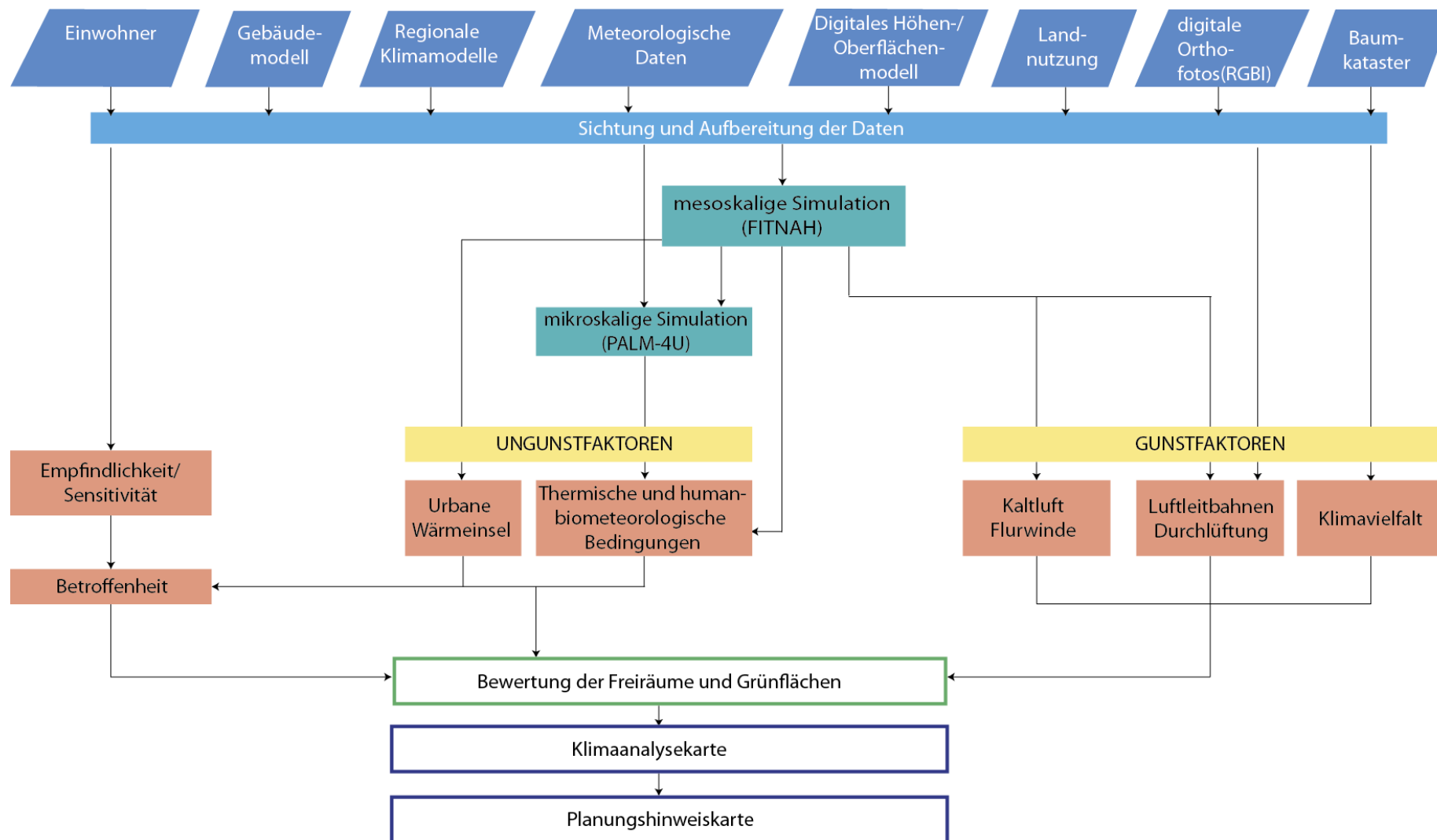


Abbildung 4-1: Vorgehensweise für die Stadtklimaanalyse Asperg.

5 Datengrundlage und Methoden

Räumliche Daten, wie das Gelände- und Gebäudemodell sowie die Landnutzung, werden für die Simulation meteorologischer Größen mit den Modellen FITNAH und PALM-4U benötigt. Aus den Modellergebnissen lassen sich Gunst- und Ungunstfaktoren berechnen. Dabei werden Kaltluftabflüsse, Luftleitbahnen und Klimavielfalt als Gunstfaktoren und Luftqualität, Urbane Wärmeinsel und thermische sowie human-biometeorologische Bedingungen als Ungunstfaktoren berücksichtigt. Darüber hinaus wird die Betroffenheit aus Ungunstfaktoren und Empfindlichkeit analysiert (s. Anhang A1.2.3), sodass letztlich die Auswertung und Bewertung in Form von Klimaanalyse- und Planungshinweiskarten erfolgen kann.

Eine Übersicht der verwendeten Daten und Methoden ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung der Methodik befindet sich im Anhang A1.

5.1 Daten

5.1.1 Topografie

Für die meso- und mikroskaligen Simulationen wird ein digitales Geländemodell (vgl. Abbildung 3-2) benötigt, welches auch die weiträumige Umgebung von Asperg beinhaltet.

Dazu wurde das Geländemodell der Stadt Asperg in das Höhenmodell SRTM in einer Auflösung von etwa 30 m x 30 m (1 Bogensekunde) integriert (siehe Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Räumliche Daten für die Klimaanalyse Asperg.

Daten	Auflösung	Bereitgestellt durch
Digitales Geländemodell (DGM)	1 m	Stadt Asperg
SRTM	~30m	STS-99 Shuttle Radar Topography Mission

5.1.2 Nutzungsstruktur

Landnutzung und Oberflächenbeschaffenheit spielen für die Ausbildung von Mikroklimaten und damit auch für die Klimamodellierung eine elementare Rolle. Abhängig von der Beschaffenheit der Erdoberfläche wird die Energie der einfallenden lang- und kurzwelligigen Strahlung verschieden umgesetzt. Die klimarelevante Oberflächenbeschaffenheit nimmt bei Flächen mit ähnlichen Landnutzungsstrukturen gleiche Werte an.

Zur Definition von Landnutzungsstrukturen aus klimatischer Sicht (siehe Tabelle A1-1) wurden die vorhandenen Landnutzungsdaten aus dem Flächennutzungsplan (Abbildung 5-1) und weiteren Landnutzungsdaten (siehe Tabelle 5-2) eingeordnet. Die der Stadtklimaanalyse zugrundeliegenden Datensätze wurden dem Auftragnehmer im Sommer 2021 übergeben. Änderungen der Flächennutzung und/oder Gebäude, die sich damals in Planung oder im Bau befanden, waren noch nicht vollständig in diese Datensätzen integriert.

Tabelle 5-2: Räumliche Daten für die Stadtklimaanalyse Asperg. Das Datenformat shp bedeutet, dass georeferenzierte vektorielle Daten zur Verfügung standen.

Daten	Auflösung/ Datenformat	Bereitgestellt durch
DOP (Digitales Orthofoto (RGB))	0,2 m x 0,2 m	Befliegung Mai 2020
ALKIS	shp	Stadt Asperg (zur Verfügung gestellt: Juli 2021)
Bebauungspläne und Städtebauliche Satzungen	dxg	
Einwohner pro Gebäude	Liste	
Baumkataster	shp	

Anschließend wurde der Anteil jeder Landnutzung pro Rechengitterzelle berechnet. Aus den anteiligen FITNAH-Landnutzungsklassen wurde jeder Rechenzelle der vorherrschende Baumtyp, die Bewuchs- und Gebäudehöhe und der prozentuale Anteil der übergeordneten Landnutzungskategorien zugeordnet.

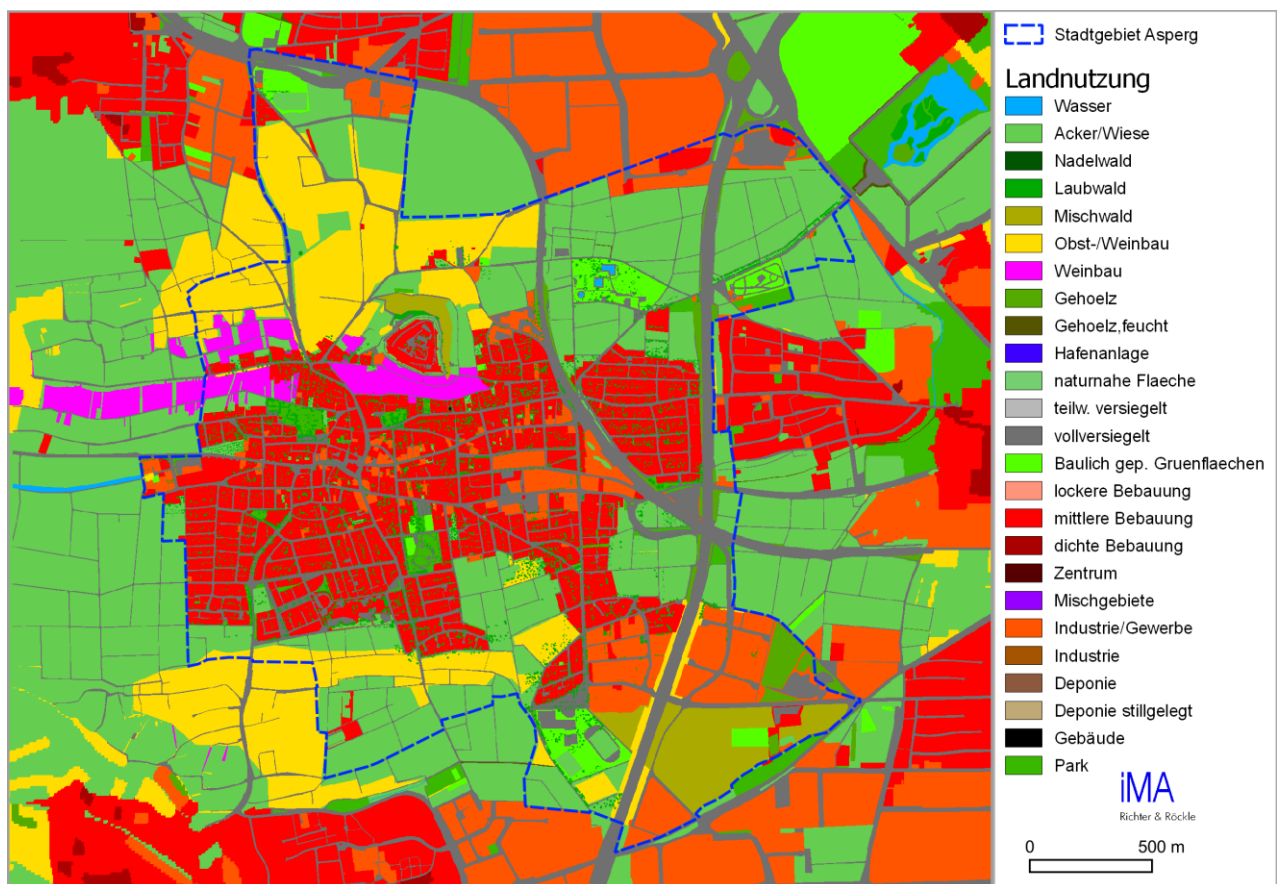


Abbildung 5-1: Aktuelle Landnutzung von Asperg und seiner Umgebung auf Basis der in Tabelle 5-2 aufgeführten Datensätze.

5.1.3 Messdaten und Klimadaten

Zur klimatischen Einordnung der Stadt Asperg, Analyse der Indikatoren und Validierung der Simulationsergebnisse wurden folgende Daten und Quellen herangezogen:

Tabelle 5-3: Messdaten und weitere klimatologische Daten.

Daten	Auflösung	Bereitgestellt durch
Karten des DWDs	1 km x 1 km	https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/
Messdaten des DWDs		https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/
EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment - European Domain)	Tagesdaten	www.euro-cordex.net/

Zur Beurteilung der Klimawirkung und möglicher Anpassungsstrategien werden Daten eines Multi-Modell-Multi-Szenario-Ensembles von Regionalen Klimamodellen auch im Hinblick auf ihre Robustheit und dazugehörigen Unsicherheiten analysiert (siehe auch Kapitel 9).

Für die Klimaanalyse Asperg wurden die Ergebnisse der 16 Regionalen Klimamodelle aus dem EURO-CORDEX-Projekt (www.euro-cordex.net, Jacob et al. 2014) mit dem Stand Januar 2020 ausgewertet. Diese stehen für den europäischen Raum in einer Auflösung von u.a. 9 km x 13,5 km zur Verfügung.

Um die Spannbreite möglicher klimawandelbedingter Auswirkungen aufzeigen zu können, werden die Emissionsszenarien RCP 8.5 und RCP 4.5 (vgl. Kapitel 9.8) für die Zeiträume 2031-2060 (Mitte des 21. Jhd.) und 2071-2100 (Ende des 21. Jhd.) analysiert. Mit RCP 8.5 wurde das „Worst-Case-Szenario“ abgedeckt und mit RCP 4.5 das niedrigere der beiden mittleren Szenarien. Das Szenario RCP 2.6 dient als Grundlage für die Modellrechnungen, welche eine Erwärmung der Mitteltemperatur von unter 2 K projizieren. Dem Szenario entsprechend müssten die Treibhausgasemissionen bereits ab 2020 abnehmen, was angesichts der bisherigen klimapolitischen Entscheidungen als wenig realistisch einzuschätzen ist.

5.2 Methoden

5.2.1 Mesoskalige Simulation mit FITNAH

Die mesoskaligen Simulationen der meteorologischen Größen (z.B. Lufttemperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit) wurden mit dem Modell FITNAH angefertigt. Die räumliche Auflösung des FITNAH-Rechengebietes für die Stadtklimaanalyse Asperg beträgt horizontal 50 m x 50 m. Eine Beschreibung des Modells kann dem Anhang A1.2.1 entnommen werden.

Für die FITNAH-Simulation wurde von einer autochthonen Wetterlage ausgegangen. Die Luftdruckverteilung weist kaum Druckunterschiede auf (wie es z.B. im Kern von Hochdruckgebieten typischerweise der Fall ist) und es gibt keine übergeordnete bzw. überregionale Strömung. Lokalklimatische Besonderheiten im Untersuchungsgebiet können sich unter diesen Bedingungen am besten ausbilden.

Die meteorologischen Bedingungen für den Anfangszustand sind:

- Lufttemperatur bodennah im Mittel 30°C,
- relative Feuchte 20 %,
- kein übergeordneter geostrophischer Wind,
- wolkenloser Himmel.

Die Ergebnisse der Simulation repräsentieren damit typische hochsommerliche Verhältnisse.

Um Einflüsse von Höhenzügen und kalte Luftrelevanten Geländeformationen zu berücksichtigen, wurde zuerst ein Simulationsgebiet mit einer Größe von 72 km x 60 km gerechnet und darin ein weiteres mit 10 km x 10 km mit einer Auflösung von 20 m x 20 m eingebettet. Damit können die typische übergeordnete Strömung berücksichtigt werden.

Das Modell rechnet kontinuierlich in die Zeit mit einer feinen zeitlichen Auflösung im Sekundenbereich. Aus dem berechneten Tagesgang werden zwei repräsentative Zeiträume ausgewertet:

- Beginn der Kaltluftabflüsse in den Abendstunden. Hier dominieren die lokalen, hangfolgenden Kaltluftabflüsse (2 Stunden nach Sonnenuntergang, 22:00 Uhr wahre Ortszeit)
- Voll ausgebildete, quasistationäre, Kaltluftströmungssysteme im weiteren Verlauf der Nacht (8 Stunden nach Sonnenuntergang, 4:00 Uhr wahre Ortszeit)

Als Ergebnis liefert FITNAH flächendeckend die Strömungsverhältnisse (Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Volumenstromdichte), die Lufttemperatur sowie alle meteorologischen Größen zur Berechnung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET).

5.2.2 Mikroskalige Simulation mit PALM-4U

Das mikroskalige Stadtklimamodell PALM-4U ist Teil des PALM Modellsystems, das von der Universität Hannover entwickelt wurde (Maronga et al. (2020)). PALM wird bereits seit über 20 Jahren erfolgreich in der Forschung angewendet und stetig dem aktuellen Wissensstand angepasst. In den letzten Jahren wurde das Modell bereits mehrfach erfolgreich evaluiert (Gehrke, Sühling & Maronga (2021); Gronemeier et al. (2021); Resler et al. (2021)).

PALM ist in der Lage turbulente atmosphärische Strömungen mit einer hohen räumlichen Auflösung (<10 m) zu simulieren. Atmosphärische Turbulenz wird explizit aufgelöst und ermöglicht eine hohe Genauigkeit bei der Simulation der Wind-, Temperatur- und Feuchteverteilung. In der gewählten Auflösung von 4 m ist neben der guten Wiedergabe der baulichen Strukturen im Untersuchungsgebiet auch die detailgetreue Berücksichtigung der Vegetation möglich.

Die Landnutzung wird über verschiedene Bodenmodelle in der Simulation berücksichtigt. Dabei wird zwischen versiegelten Oberflächen, mit Vegetation bedeckten Oberflächen, Wasseroberflächen oder Gebäudestrukturen unterschieden. Je nach Klassifizierung werden entsprechende Parameter für die Beschaffenheit der Oberfläche angesetzt (Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Bodenfeuchte, usw.).

Durch die direkte Berücksichtigung von Konvektion und Turbulenz wird die an Oberflächen durch zum Beispiel Sonneneinstrahlung entstehende Wärme im Modellgebiet weitertransportiert und sorgt für eine realistische Temperaturverteilung.

Die Vegetation wird mit Hilfe eines Vegetationsmodells detailgetreu berücksichtigt. Einzelne Bäume und Sträucher werden, sofern es die Gitterweite zulässt, explizit als Strömungshindernis berücksichtigt. Der Einfluss der Vegetation auf die thermischen Verhältnisse (Temperatur- und Feuchteverteilung) wird ebenfalls dargestellt.

Der hohe Detailgrad im Modell PALM-4U ergibt sich aus der hohen Auflösung, die es erlaubt sowohl kleine Strukturen wie einzelne Bäume bis hin zu ganzen Stadtgebieten zu betrachten. Durch die Interaktion zwischen mikroskaligen (z.B. Umströmung einzelner Gebäude) und makroskaligen Prozessen (z.B. städtische Wärmeinsel) können die Verhältnisse realitätsnah abgebildet werden.

Wie bereits für die FITNAH-Simulationen wird auch für die PALM-4U Simulation eine wolkenarme windschwache Situation berücksichtigt. Das Modellgebiet umfasst eine Fläche von etwa 3,6 km x 3,6 km und deckt das gesamte Stadtgebiet ab.

Durch die geringe räumliche Ausdehnung der mikroskaligen Simulation können großskalige Einflussfaktoren wie Gebirgszüge oder große Talflächen nicht direkt in der Simulation berücksichtigt werden. Um die Auswirkungen dieser Faktoren auf die meteorologischen Größen Wind, Temperatur und Feuchte dennoch in der mikroskaligen Simulation mit einzubeziehen, kann das mikroskalige Modell PALM-4U mit größerskaligen Modellen gekoppelt („genestet“) werden. Dazu werden die Ergebnisse der größerskaligen Simulation (hier: FITNAH) an den Rändern des mikroskaligen Modellgebiets extrahiert und damit das Modell PALM-4U an seinen Modellgebietsrändern angetrieben. Für den Antrieb werden die Daten für Wind-, Temperatur- und Feuchteverteilung an den jeweiligen Gebietsgrenzen verwendet. Die Daten gehen sowohl räumlich als auch zeitlich variabel in die mikroskalige Simulation ein. Dies erlaubt, dass beide Simulationen, trotz unabhängiger Berechnung (sog. „Offline-Nesting“; die Modelle werden nacheinander statt zeitgleich betrieben), die gleiche Situation betrachten und die Ergebnisse beider Modelle konsistent sind.

5.2.3 Human-Biometeorologie

Thermische Indizes, wie die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET, Mayer & Höppe (1987)), berücksichtigen den integralen Effekt der meteorologischen Größen Lufttemperatur (T_a), Luftfeuchte (VP), Windgeschwindigkeit (v) sowie der Strahlungsflüsse (T_{mrt}) auf die menschliche Energiebilanz (siehe Abbildung 5-2). Die physiologischen Parameter Aktivität, Kleidung sowie weitere physische Faktoren werden dabei konstant gehalten.

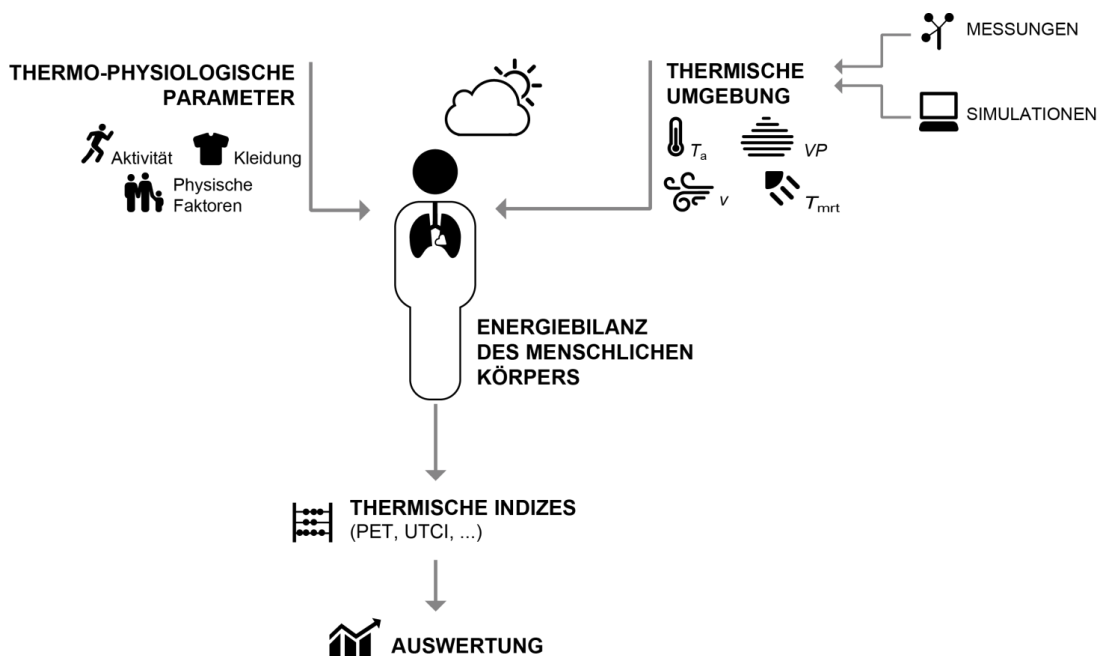


Abbildung 5-2: Fließdiagramm zur Veranschaulichung der Berechnung thermischer Indizes.

Zur Klassifizierung von Hitze- und Kältstress sowie zur Differenzierung des thermischen Komforts für den mitteleuropäischen Raum wurde in der vorliegenden Arbeit die PET-Bewertungsskala nach Matzarakis & Mayer (1997) verwendet (Tabelle 5-4).

Die Physiologisch Äquivalente Temperatur ist konform mit der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (2015) und eignet sich aufgrund ihrer Definition besonders für die (Stadt-)Planung, wird aber auch im Bereich der Kurort-Zertifizierung (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 10 (2010)) und im Bereich Tourismus angewandt.

Tabelle 5-4: Bewertungsskala von PET zur Quantifizierung der thermischen Verhältnisse und des Physiologischen Stresses bei Kälte- und Hitzebelastung (Matzarakis & Mayer (1997)).

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

5.3 Bestehende Gutachten

Der Klimaatlas der Region Stuttgart (Baumüller et al. (2008)) umfasst auch den Bereich Asperg. Innerhalb dieses Projektes wurden verschiedene Klimaaspekte wie die Kaltluftströmung, Bioklima und die Lufttemperatur untersucht und die Ergebnisse in einer Planungshinweiskarte zusammengetragen (Abbildung 5-4).

Dem Siedlungsraum von Asperg wird dabei eine „klimarelevante“ bis „bedeutende klimarelevante“ Funktion zugeschrieben. Den Freiflächen wird überwiegend eine „bedeutende Klimaaktivität“ zugesprochen. Bei vorherrschender autochthoner Wetterlage werden großräumig südwestliche Kaltluftströmungen ausgewiesen. Als Luftleitbahn wird auf der Gemarkung nur ein Bereich im Nordwesten ausgewiesen.

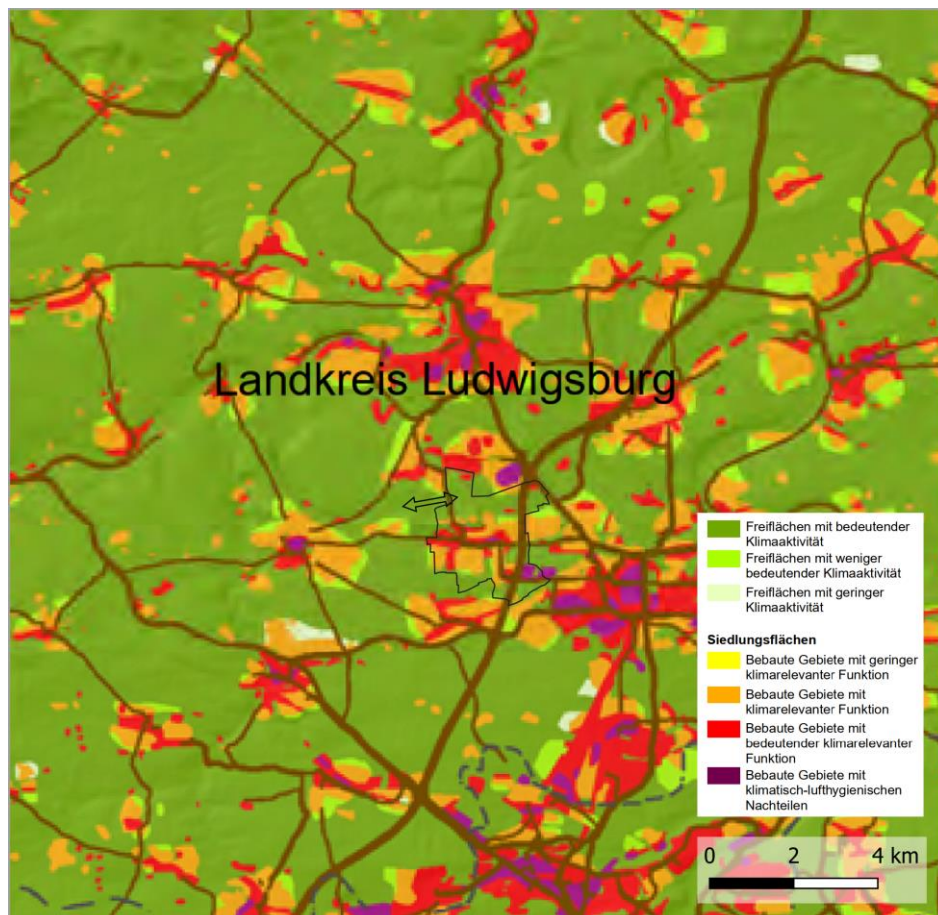


Abbildung 5-3: Ausschnitt aus den Planungshinweisen des Klimaatlas der Region Stuttgart (Baumüller et al. (2008)), ergänzt um Luftleitbahnen der Klimaanalysekarte für Asperg.

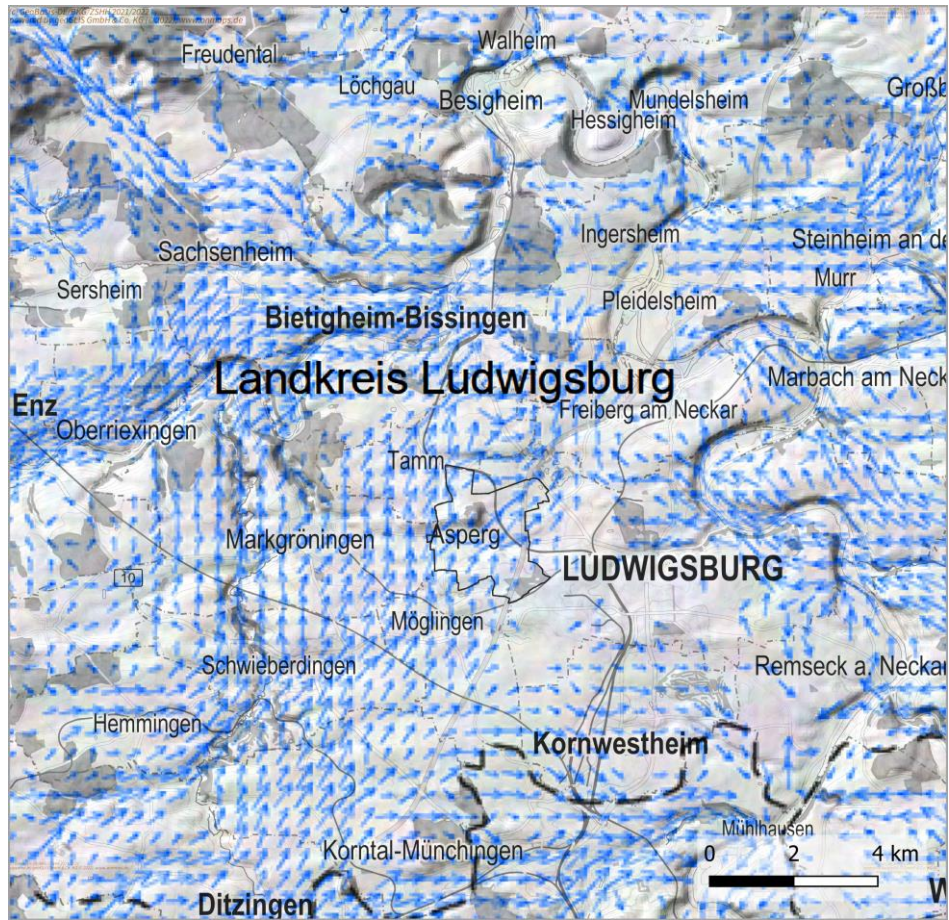


Abbildung 5-4: Ausschnitt aus der Karte zu Kaltluft-Volumenströmen des Klimaatlas der Region Stuttgart (Baumüller et al. (2008)).

6 Ergebnisse der Simulationen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der untersuchten Faktoren beschrieben. Diese sind im Flussdiagramm (Abbildung 4-1) durch rote Kästen markiert.

6.1 Kaltluftströmung

Bei Tiefdruckwetterlagen (bewölkt, windig, regnerisch) herrschen in der Regel gute Austauschbedingungen. Die lokalen Strömungsverhältnisse werden im Wesentlichen durch die Orographie geprägt. In Tallagen treten z.B. Kanalisierungen der Strömung auf. Lufttemperaturunterschiede sind bei diesen Wetterlagen zwischen bebauten und unbebauten Flächen vergleichsweise gering.

Hochdruckwetterlagen können dagegen mit geringen übergeordneten Windgeschwindigkeiten und geringer Bewölkung verbunden sein. Bei diesen sogenannten autochthonen Wetterlagen stellt sich meist ein ausgeprägter Tagesgang der Lufttemperatur ein. Aufgrund des geringen großräumigen Luftaustausches beeinflussen die lokalen topographischen Verhältnisse (sowohl das Geländere relief als auch die Realnutzung) signifikant die lokale Strömung.

In reliefiertem oder gegliedertem Gelände bilden sich unter autochthonen Bedingungen tagesperiodische Windsysteme aus. In den Tagstunden sind dies tal- und hangaufwärtsgerichtete, meist böige Winde, in den Nachtstunden dagegen eher turbulenzarme Kaltluftabflüsse. In Ebenen sind insbesondere nachts nur geringe Strömungsgeschwindigkeiten vorhanden. Die nächtliche Inversion unterdrückt zusätzlich den Luftaustausch. Deshalb zählen Kaltluftabflüsse in gegliedertem Gelände zu den klimatischen Gunstfaktoren einer Region.

Durch die Lage Aspergs im Neckarbecken befinden sich in Asperg nur geringe Höhenunterschiede in der unmittelbaren Umgebung. Der Asperg und die Höhenunterschiede im südlichen Teil des Stadtgebiets können in den Abendstunden Kaltluftabflüsse erzeugen und so zu der Belüftung der Siedlungsgebiete beitragen. Kaltluftabflüsse transportieren in den Abend- und Nachtstunden kühlere und meist frischere Luft in die Siedlungsbereiche, wodurch thermische und lufthygienische Belastungen spürbar reduziert werden.

Deshalb ist zur Wahrung gesunder Wohn- und Arbeitsverhältnisse der Erhalt und die Verbesserung dieser Strömungssysteme relevant.

6.1.1 Entstehung von Kaltluftabflüssen

In klaren windschwachen Nächten ist die Energieabgabe der Boden- und Pflanzenoberflächen aufgrund der Wärmeausstrahlung größer als die atmosphärische Gegenstrahlung. Dieser Energieverlust verursacht eine Abkühlung der Boden- und Pflanzenoberfläche, so dass die Bodentemperatur niedriger als die Lufttemperatur ist. Der kühlere Boden kühlt daraufhin die bodennahen Luftschichten ab und es entsteht eine bodennahe Kaltluftschicht. Diese ist umso ausgeprägter, je negativer die Strahlungsbilanz, je geringer die Wärmezufuhr aus tieferen Bodenschichten an die Oberfläche und je schwächer der Luftaustausch mit der darüber liegenden Atmosphäre ist.

In ebenem Gelände bleibt die bodennahe Kaltluft an Ort und Stelle liegen. In geneigtem Gelände setzt sie sich infolge von horizontalen Dichteunterschieden (kalte Luft besitzt eine höhere Dichte als warme Luft) hangabwärts in Bewegung. Die Geschwindigkeit der Luftmassen ist letztlich von der Hangneigung und dem Dichteunterschied abhängig. Die Reibungskraft bremst die abfließende

Luft. Die beschriebenen Vorgänge sind in der Regel zeitlich nicht konstant, d.h. es kommt zu „pulserenden“ Kaltluftabflüssen.

In Geländeeinschnitten fließen die Hangabwinde zusammen und es kann ein mehr oder weniger mächtiger Bergwind (Talabwind) entstehen. Die vertikale Mächtigkeit des Bergwinds und die Geschwindigkeit hängen im Wesentlichen von der Fläche des Einzugsgebiets, der Kaltluftproduktionsrate, dem Talgefälle und den Rauigkeiten, d.h. den Strömungshindernissen und der Bodenbeschaffenheit, im Talbereich ab. Die Fließrichtung wird durch die Geländeform bestimmt. Talwärts führende Einsenkungen des Geländes wie z.B. Seitentäler, Schluchten und Rinnen beeinflussen einen Kaltluftabfluss.

In tiefer gelegenen konkaven Geländeformen wie z.B. in Tälern, Talkesseln, Schluchten und Mulden kann sich die Kaltluft sammeln und es kann sich ein Kaltluftsee ausbilden. In dieser stagnierenden Kaltluft können sich intensive Inversionen ausbilden, die den vertikalen Luftaustausch deutlich reduzieren.

Die Kaltluftentstehung und der Kaltluftabfluss hängen somit von folgenden Faktoren ab:

- meteorologische Verhältnisse
- Flächennutzung
- Geländeform und -exposition.

6.1.2 Zeitlicher Verlauf von Kaltluftabflüssen

Hangabwinde setzen ein, wenn sich der Erdboden eines Hanges deutlich abkühlt. Dies ist, abhängig von der Exposition des Hanges, in den Nachmittags- und Abendstunden der Fall. An nicht-besonnten Hängen setzen die Hangabwinde bereits vor Sonnenuntergang ein. Sie dauern die Nacht über an, sofern sie nicht von einem stärkeren Bergwind überlagert werden. Wenn der Hang am Morgen wieder besonnt wird, endet der Hangabwind.

Bergwinde setzen gegenüber den Hangabwinden später ein. Sie beginnen meist erst nach Sonnenuntergang. In den Morgenstunden dauern sie länger an.

6.1.3 Häufigkeit von Kaltluftabflüssen

Kaltluftabflüsse treten bei windschwachen und gleichzeitig wolkenarmen Wetterlagen auf, da in diesen Fällen gute Ausstrahlungsbedingungen vorliegen und die bodennah gebildete Kaltluftschicht nicht durch Turbulenz zerstört wird. Dies entspricht der Ausbreitungsklasse I, die in Asperg in 15 % der Jahresstunden vorkommt (siehe Abbildung 3-7) bzw., da diese Klasse nur während der Nachtstunden auftritt, in etwa 30 % der Nachtstunden. Auch bei Ausbreitungsklasse II, die in 23 % der Jahresstunden auftritt, können noch Kaltluftabflüsse auftreten, die aber stärker von den übergeordneten Windrichtungen beeinflusst werden.

Das Maximum von Kaltluftabflüssen wird im Spätsommer/Frühherbst beobachtet, da dann die größten Tagesgänge der Lufttemperatur erfolgen. In den Wintermonaten ist die Wahrscheinlichkeit, auch aufgrund der stabilen Nebellagen, am geringsten.

Die vertikale Mächtigkeit der Kaltluftabflüsse ist abhängig vom Weg, den die Kaltluft nimmt. Liegen entlang der Zugbahn der Kaltluft mehrere Kaltluftproduktionsflächen, können sich schnell große Kaltluflhöhen ergeben.

Trifft die Kaltluft auf Bebauung, dringt diese bodennah in die Bebauungsschicht ein (vgl. Abbildung 6-1, links). Der größere Teil der Kaltluft überströmt jedoch die Bebauung und wird durch die gebäudeinduzierte Turbulenz in die Bebauung herabgemischt (vgl. Abbildung 6-1, rechts). Für die innerstädtische Belüftung ist deshalb die Überdachströmung die relevante Größe.

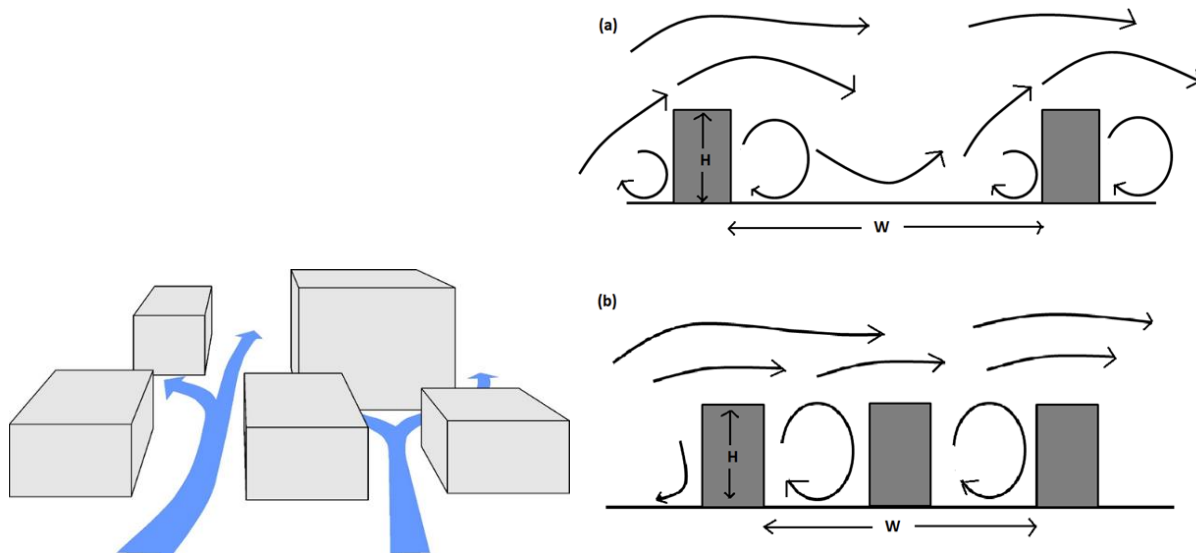


Abbildung 6-1: Bodennahe Belüftung in den peripheren Bereichen (links) und Herabmischen der Luft aus dem Überdachniveau in den Straßenraum (rechts).

6.1.4 Ergebnisse der Modellierung

Die Volumenströme im Überdachniveau (28 m ü. Grund) sind für die erste Nachthälfte (22 Uhr) in Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3 und für die zweite Nachthälfte (4:00 Uhr) in Abbildung 6-5 dargestellt. Aus Übersichtlichkeitsgründen sind vorrangig die Pfeile bei hoher Volumenstromdichte gezeigt (Algorithmus zur Pfeildarstellung siehe REKLIBO (2009)).

Eindeutig ist die im Stadtgebiet während einer autochthonen Wetterlage vorherrschende südwestliche Grundströmung. Sie entsteht durch die Geographie der großräumigen Umgebung, die von den südwestlich gelegenen Randhöhen des Schwarzwalds über das Heckengäu und das Stadtgebiet hinaus weiter nach Norden in das Neckarbecken hin abfällt. Ausgeprägte Volumenströme treten hierbei besonders über den Freiflächen im südlichen und nordwestlichen Stadtgebiet auf. Die grundsätzlich höheren Windgeschwindigkeiten im Dachniveau sind auf die geringere Bremswirkung durch Hindernisse zurückzuführen. Die Bebauung führt zu einer deutlichen Reduzierung der Strömung, sichtbar z.B. im Bereich der Stadtmitte. Großen Einfluss hat auch die Orographie, was am Hohenasperg sichtbar wird. Der solitäre Zeugenberg stellt ein markantes Strömungshindernis dar. Die südwestliche Strömung teilt sich und umströmt die Barriere und wird dabei lokal Richtung Norden bzw. Osten umgelenkt und beschleunigt. Auf der abgewandten Seite des Berges ist dagegen eine starke Abnahme der Strömung vorhanden.

Für die Stadt Asperg bodennah bedeutsame Kaltluft ist stark mit der übergeordneten Strömung verknüpft. Auf dem Stadtgebiet selbst ist nur ein relativ geringer Anteil an Freiflächen vorhanden, die potenziell Kaltluft bilden können. Die Freiflächen im Süden ermöglichen aber der aus Südwest anströmenden Kaltluft zu den südlichen Siedlungsrändern vor- und stellenweise in die Bebauung

einzufringen. Besonders deutlich ist dies südlich des Bereichs Bürgergarten sichtbar. Im nordwestlichen Stadtgebiet kann Kaltluft über den Bereich des Friedhofs bodennah bis in die Stadtmitte gelangen. Hangabwinde, von denen die Bebauung im Bereich Weinberg profitiert, bilden sich an den Südhängen des Hohenaspergs. In Waldgebieten wie im Osterholz wird die bodennahe Strömung eher gebremst. Auf den Freiflächen im nördlichen Stadtgebiet und den Nordhängen des Aspergs existieren ebenfalls Kaltluftströmungen. Die Wohnbebauung profitiert – mit Ausnahme der vereinzelt ausgesiedelten landwirtschaftlichen Betriebe dort – aber nicht von dieser Strömung, da sie vorwiegend auf Richtungen zwischen Nord und Osten und damit weg von der Bebauung gerichtet ist.

Bis in die Morgenstunden (4:00 Uhr) schwächen sich die Volumenströme und Strömungsgeschwindigkeiten ab, da sich die Temperaturunterschiede im Verlauf der Nacht angleichen und damit der Antrieb nachlässt. Durch die fortlaufende Abkühlung der Luft im Verlauf der Nacht wächst die Mächtigkeit der Kaltluftschicht sukzessive an. Die grundlegende Struktur der Strömung im Stadtgebiet bleibt weitgehend gleich.

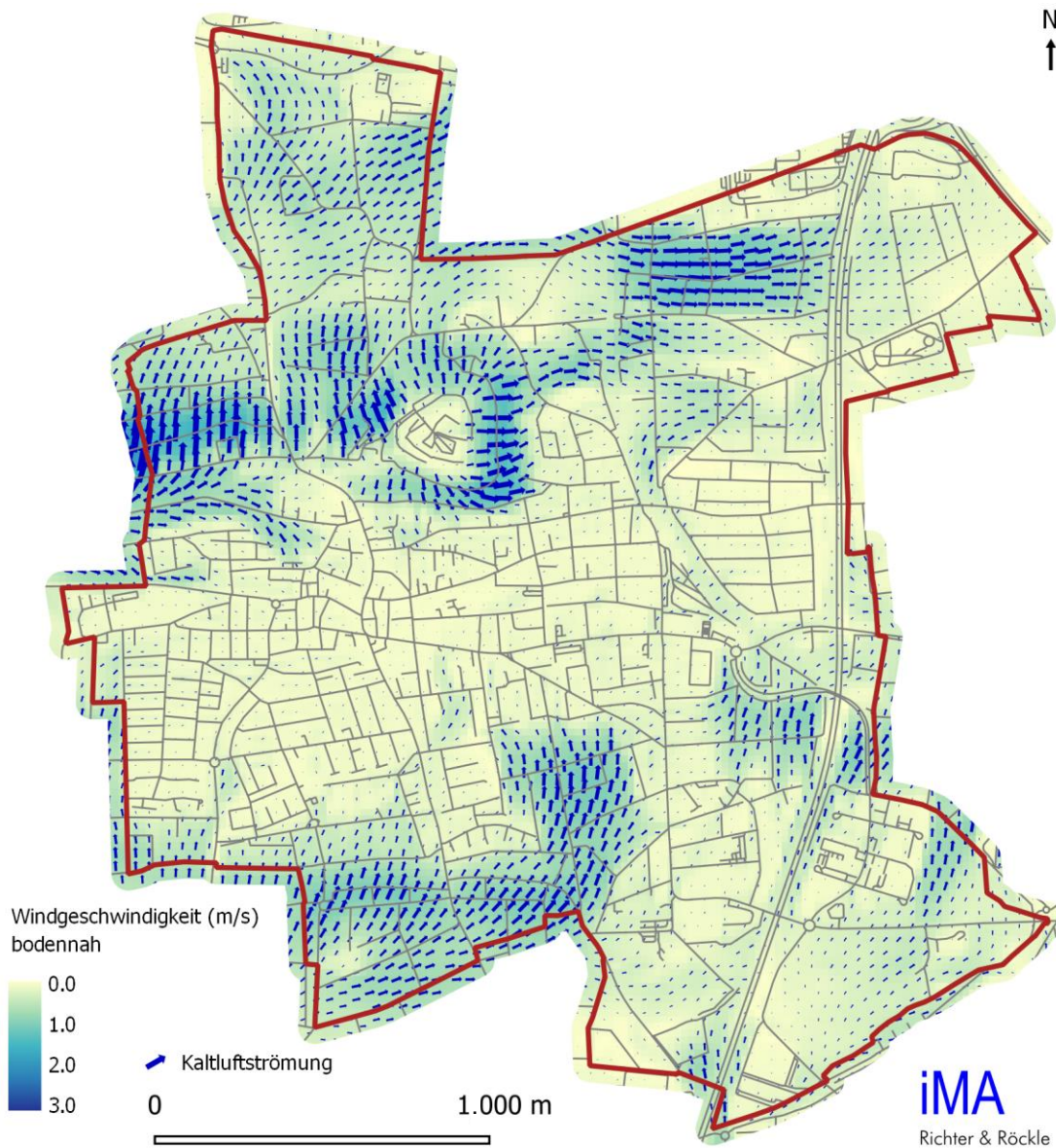


Abbildung 6-2: Bodennahe Durchlüftung (6 m ü. Grund) in Asperg durch Kaltluftabflüsse. Abendsituation (22 Uhr). Die Pfeile zeigen an, in welche Richtung der Wind weht.

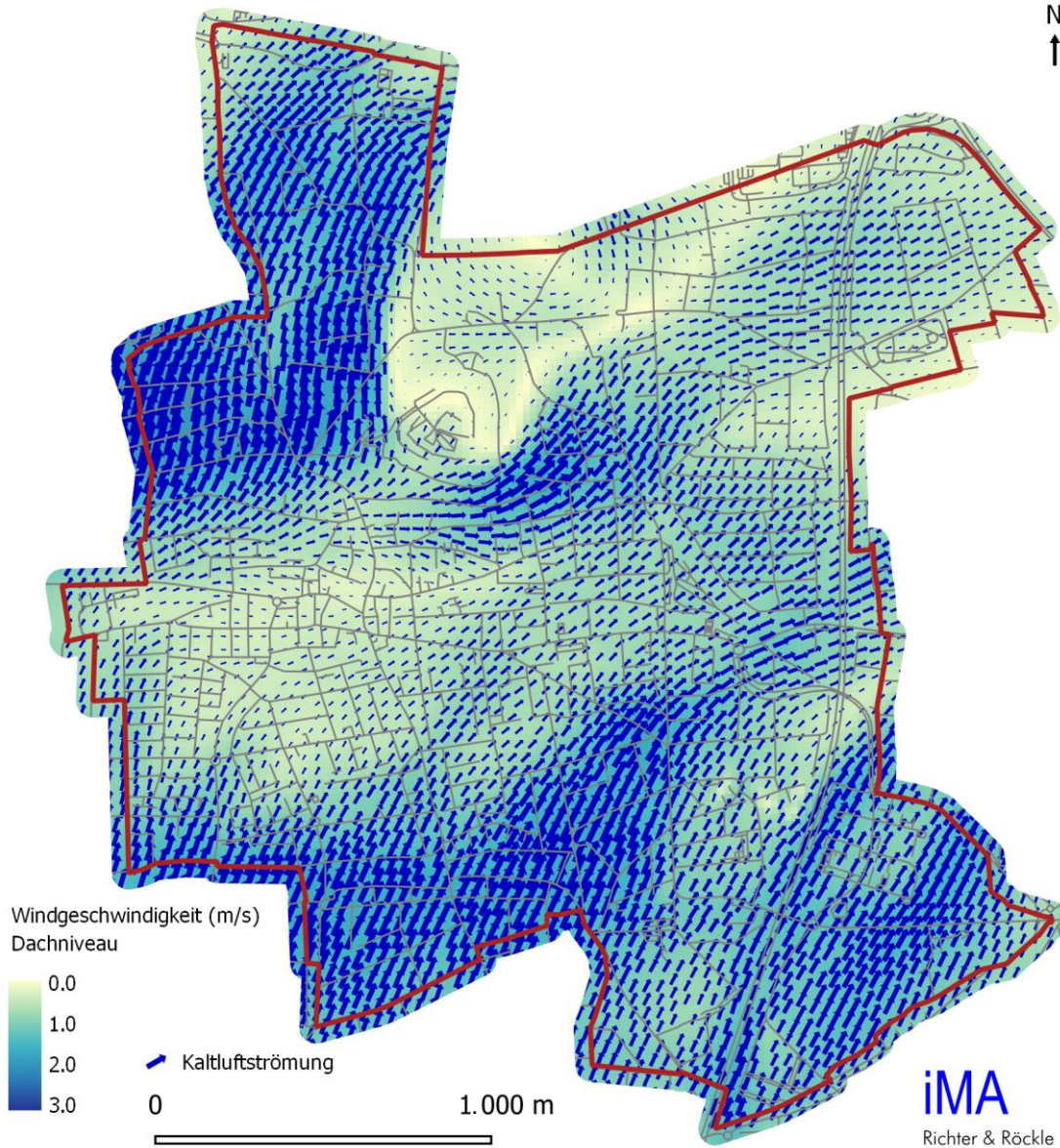


Abbildung 6-3: Durchlüftung im Dachniveau (28 m ü. Grund). Abendsituation (22 Uhr). Die Pfeile zeigen an, in welche Richtung der Wind weht.

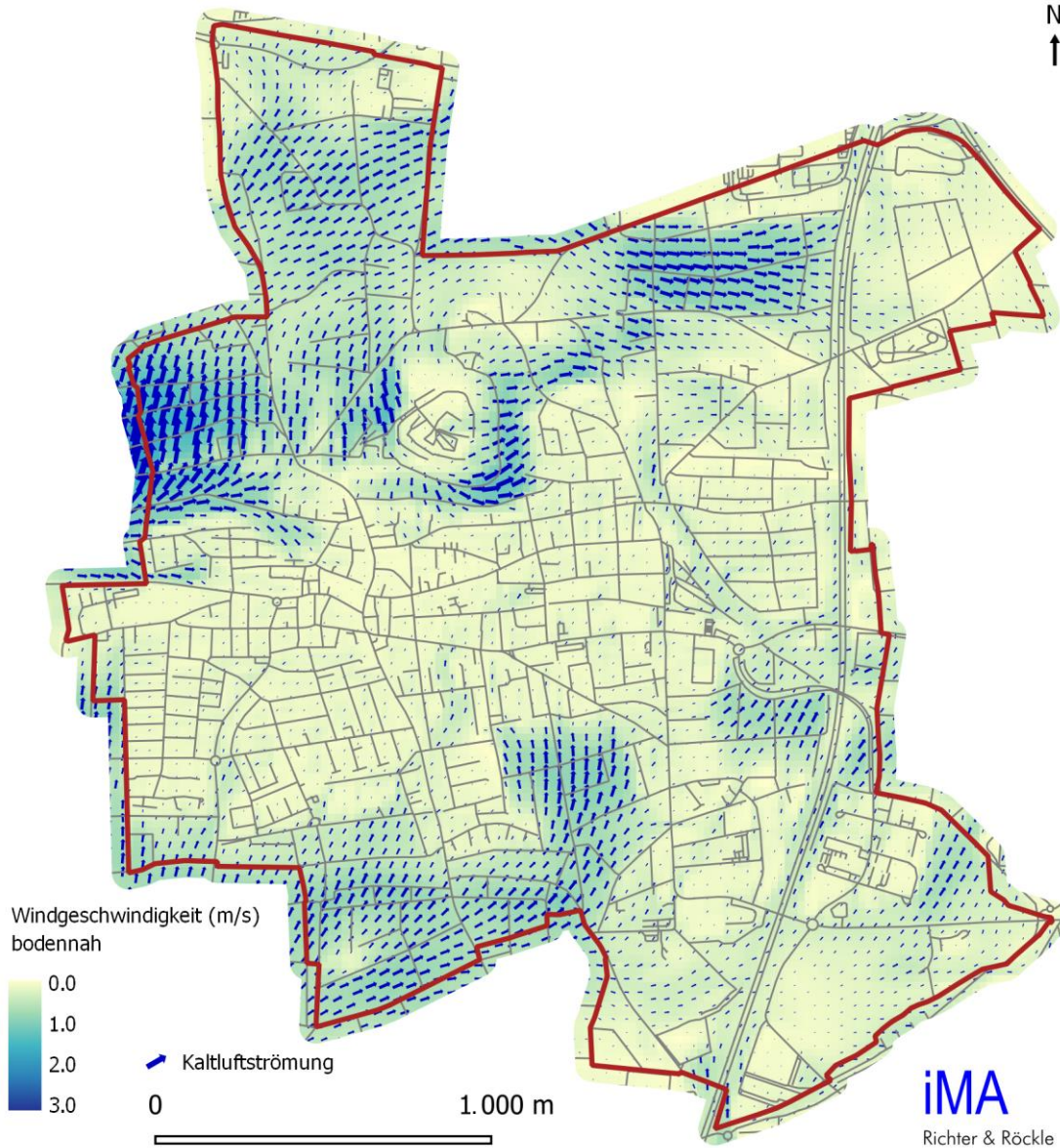


Abbildung 6-4: Bodennahe Durchlüftung (5 m ü. Grund) in Asperg durch Kaltluftabflüsse in der zweiten Nachthälfte (4 Uhr). Die Pfeile zeigen an, in welche Richtung der Wind weht.

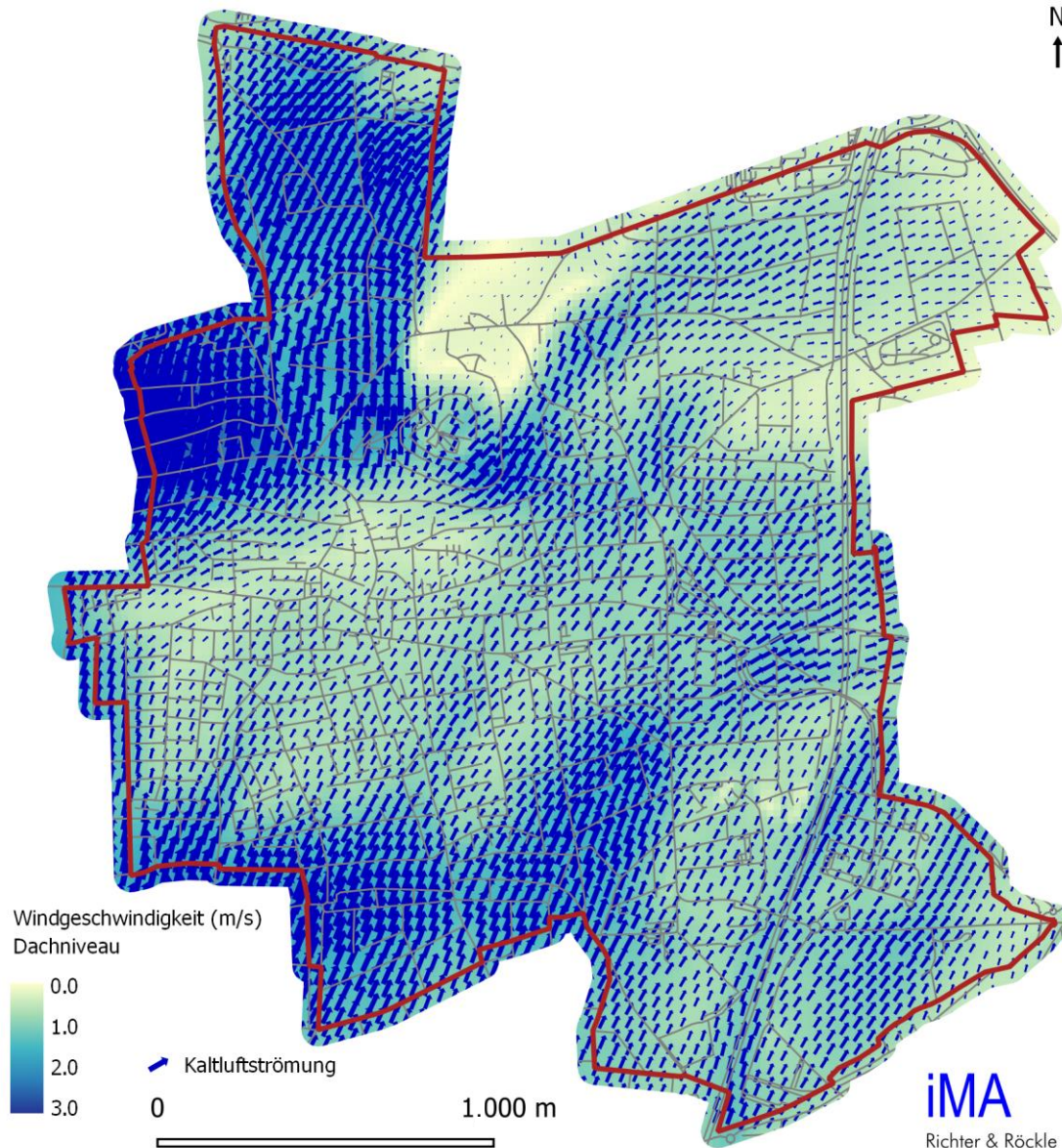


Abbildung 6-5: Durchlüftung im Dachniveau (28 m ü. Grund) in der zweiten Nachthälfte (4 Uhr). Die Pfeile zeigen an, in welche Richtung der Wind weht.

6.2 Thermische und Human-biometeorologische Verhältnisse

Für die Bewertung der human-biometeorologischen Verhältnisse ist die Betrachtung der Lufttemperatur nur bedingt geeignet, da neben der Temperatur auch die Luftfeuchte und die Windgeschwindigkeit einen erheblichen Einfluss auf das Befinden haben. Als Indikator für die thermische Belastung wird daher die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) betrachtet (siehe Kapitel 5.2.3). In Abbildung 6-6 ist die PET zur Mittagszeit an einem heißen Sommertag dargestellt. Die thermische Belastung ist stark von der Sonneneinstrahlung abhängig. Besonnte Bereiche wie beispielsweise die Freiflächen nördlich und südlich von Asperg weisen eine deutlich höhere thermische Belastung auf als die verschatteten Waldgebiete im Osterholz oder am Asperg. Daher spielen schattenspendende Hindernisse wie Gebäude und Bäume eine wesentliche Rolle.

In durch Bäumen abgeschatteten Bereichen beträgt die PET weniger als 30 °C, so dass hier zwar „warme“ Bedingungen jedoch ohne starken Hitzestress vorzufinden sind (Bewertungsmaßstab siehe Tabelle 5-4). Ebenso sind Gebiete mit hohem Grünflächenanteil weniger stark Hitze-belastet. Hier wird die Einstrahlung der Sonne in Verdunstungsenergie umgewandelt und die Oberflächen heizen sich im Vergleich zu versiegelten Flächen weniger stark auf.

Besonders hohe Werte der PET treten im Zentrum von Asperg auf, wo die asphaltierten Flächen nicht durch Bäume oder Gebäude abgeschattet werden. Beispiele dafür sind die Markgröninger Straße, der Bereich um den Marktplatz oder der neu überplante Bereich zwischen Gartenstraße und Markgröninger Straße im Westen des Stadtgebiets. Relativ geringe PET und somit nur warme Verhältnisse weisen die Parkanlagen im Stadtgebiet auf wie beispielsweise der Friedhof an der Kellerstraße, der Spielplatz Lehenstraße oder der Spielplatz an der Stadthalle. Gebiete mit dichtem privatem Baumbestand wie im östlichen Teil von Asperg nördlich und südlich der Hirschbergstraße oder auch nördlich der Lehenstraße sind weniger stark mit Hitze belastet als Bereiche, in denen ein geringerer Baumbestand vorherrscht oder überwiegend junge kleine Bäume stehen wie in der Wohnsiedlung entlang der Schwabenstraße.

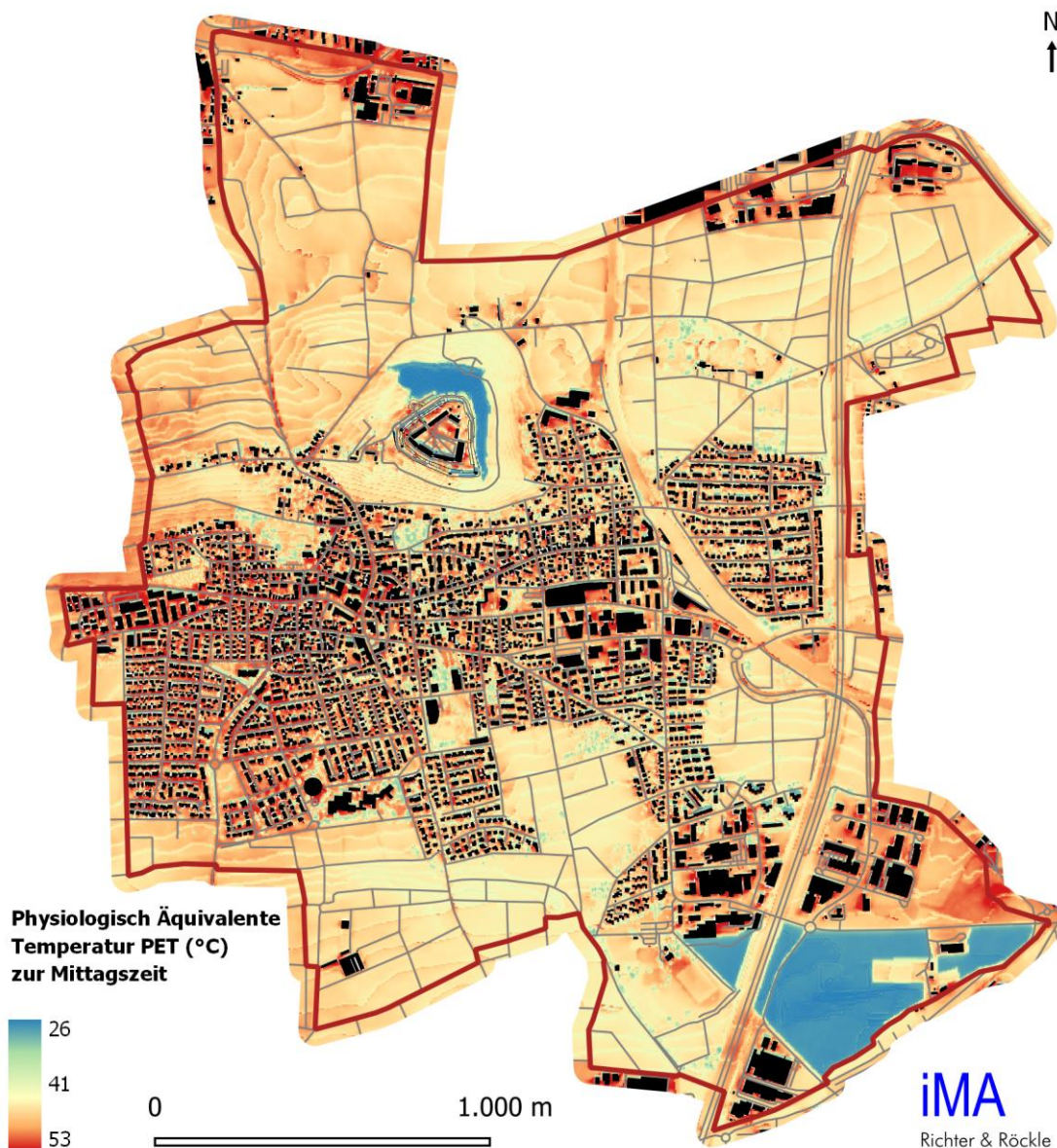


Abbildung 6-6: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET, in °C) zur Mittagszeit (2 m ü. Grund).

6.2.1 Urbane Wärmeinsel

Als urbane Wärmeinsel (UHI) wird die Überwärmung des Siedlungsbereiches gegenüber dem Umland bezeichnet. Sie ist nachts stärker ausgeprägt als am Tag. Ursachen sind u.a. die unterschiedliche Strahlungsumsetzung zwischen Umland und Stadt, die Wärmespeicherung der Baukörper und versiegelten Flächen und die anthropogene Abwärme (Heizung, Kühlung, Kfz-Verkehr, Produktionsverfahren, ...).

Zur Berechnung der urbanen Wärmeinsel wurde eine Simulation angefertigt, in welcher die versiegelten und bebauten Flächen im Stadtgebiet zu 50% in Wald und Feld umwandelt wurden. Die Differenz der bodennahen Lufttemperatur zwischen dem Bestand und dieser Simulation wird als urbane Wärmeinsel ausgewiesen.

Abbildung 6-7 zeigt die räumliche Ausdehnung der urbanen Wärmeinsel in Asperg und den angrenzenden Stadtteilen. Die urbane Wärmeinsel in Asperg ist in den am dichtesten bebauten Siedlungsbereichen am stärksten ausgeprägt und zieht sich als Band von West nach Ost in der Mitte des Stadtgebiets. In der Ortsrandlage ist die Überwärmung deutlich geringer. Die südöstlich gelegenen Gewerbeflächen im Bereich Osterholz profitieren von der höheren Lage und der damit ausgeprägteren übergeordneten Kaltluftzufuhr und zeigen daher einen geringeren Wärmeinseleffekt.

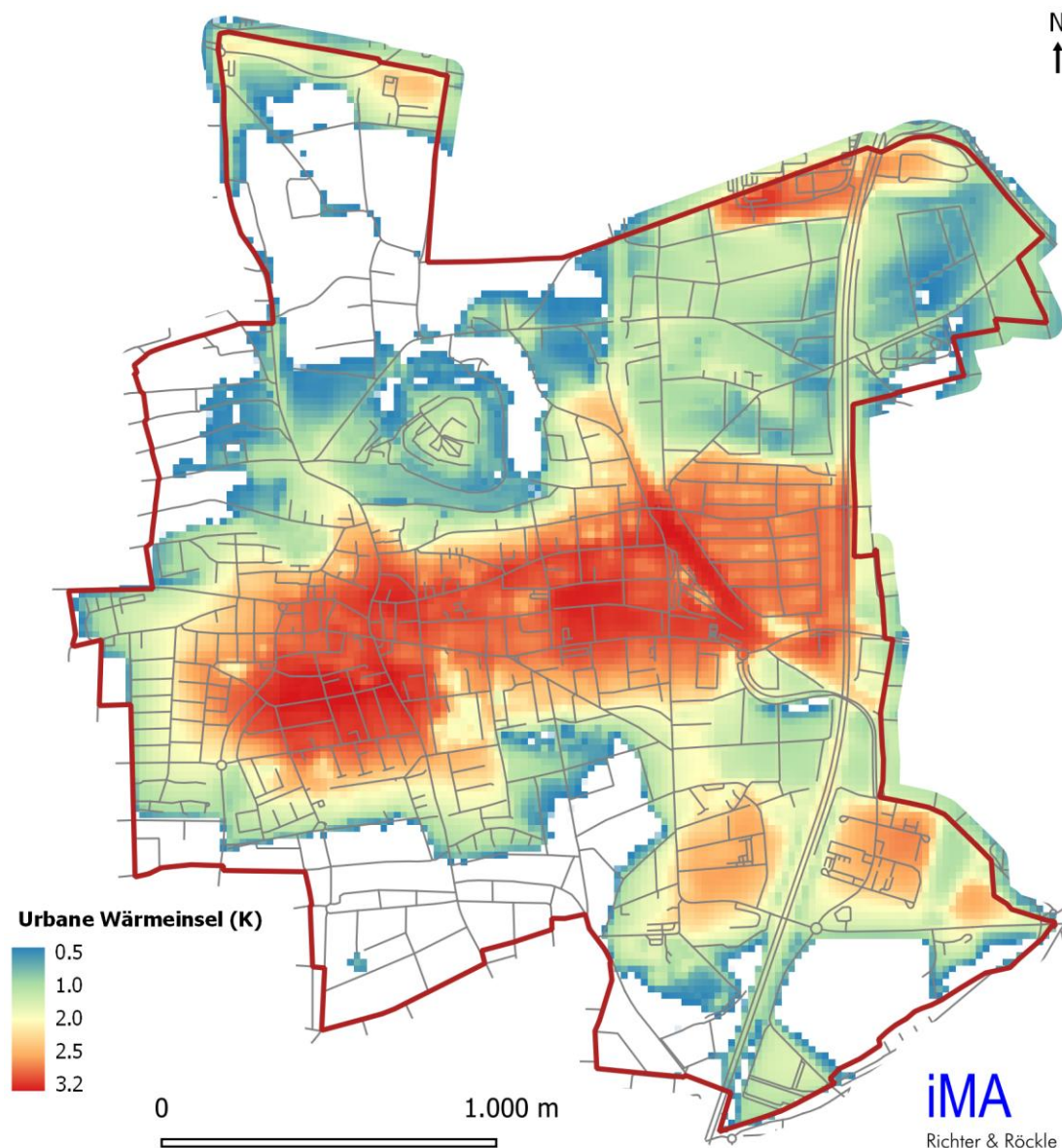


Abbildung 6-7: Nächtliche Urbane Wärmeinsel (Überwärmung in K) in Asperg.

6.3 Stadtgrün und Klimavielfalt

Alle Formen des städtischen Grüns, von Parkanlagen über Kleingärten, Friedhöfen, Straßengrün oder Fassaden- und Dachbegrünung, bis hin zu Privatgärten oder landwirtschaftlichen Flächen

werden als „städtisches Grün“ bezeichnet (BMUB (2015), S. 50). Grüne Infrastruktur erfüllt viele Funktionen, sie dient

- als klimatische Ausgleichsfläche insbesondere auch während der Hitzeperioden
- der Erholung und Freizeitgestaltung,
- dem Regenwasserrückhalt,
- der Verbesserung des Stadtklimas (Klimavielfalt),
- der Filterung von Luftschadstoffen,
- als Lebensraum für Tiere und Pflanzen,
- dem seelischen Wohlbefinden,
- der sozialen Interaktion,
- der Attraktivität einer Stadt.

Gleichzeitig wird die grüne Infrastruktur auch selbst vom Stadtklima und dem Klimawandel beeinflusst, etwa durch Trocken- und Hitzestress, verlängerter Vegetationsperiode und damit auch erhöhtem Spätfrostisiko. Dadurch entstehen zunehmend Schäden durch Trockenstress, Pilzkrankheiten und Schädlinge.

Wärmebelastung im Freien tritt insbesondere tagsüber in den Mittags- und Nachmittagsstunden von Mai bis Oktober auf. Um die Wärme- und Hitzebelastung zu verringern, können die Stadtbewohner tagsüber beschattete und begrünte Plätze aufsuchen. Auf Grünflächen mit einer Größe größer als 0,5 ha kann sich an heißen Sommertagen ein eigenes Kleinklima ausbilden. Ihr Erholungswert und ihre Aufenthaltsqualität können einen Beitrag zur Entlastung an heißen Sommertagen bewirken. In Abbildung 6-8 ist der Bestand an größeren öffentlich zugänglichen Grün- und Freiflächen mit Erholungswert und Aufenthaltsqualität an heißen Sommertagen abgebildet.

Die in Asperg anzutreffenden Flächen mit Stadtgrün lassen sich wie folgt gliedern:

Multifunktionale Parkanlagen

Beispiel: Spielplatz Lehenstraße

Die großen multifunktionalen Parkanlagen in Asperg ab einer Fläche von ca. 5.000 m² bieten große innerstädtische Erholungsräume für Anwohner. Sie sind von stadtweiter Bedeutung und für die Erholung und Regeneration in Hitzeperioden besonders wichtig. In Abhängigkeit der Gestaltung und Beschaffenheit der Flächen wirken sie aufgrund ihrer Größe klimatisch günstig auf die angrenzenden Siedlungsbereiche. Als offene Grünflächen übernehmen sie auch die Funktion von Kaltluftentstehungsgebieten.



Kleine Park- und Grünanlagen, Spazierwege

Beispiel: Park an der Stadthalle

Kleinere Parks mit weniger als 5.000 m² Fläche oder nur geringer Breite haben meist keine oder nur geringe klimatische Wirkung auf die angrenzenden Siedlungsbereiche, wenn sie nicht an den Außenbereich anschließen. Diese können dennoch für die angrenzenden Anwohner eine wichtige Rolle für die Erholung im Stadtteil, insbesondere in Hitzeperioden, spielen.



Verkehrsbegleitgrün

Beispiel: Kreisverkehr Möglinger Straße

Unter das Verkehrsbegleitgrün fallen das klassische Straßenbegleitgrün, Wegraine, Bahndämme und -böschungen. Aufgrund ihrer unmittelbaren Nähe zu Verkehrsachsen sind sie für die Erholung kaum nutzbar, außer an Fuß- und Radwegen. Verkehrsbegleitgrün reduziert die durch die Verkehrswege verursachte thermische Belastung, dient der Filterung und Versickerung von Oberflächenwasser und stellt als linienhafte Grünstruktur oft wichtige Elemente im Grünverbund dar.



Friedhöfe

Beispiel: Städtischer Friedhof

Friedhöfe sind Orte der Stille und Erinnerung. Sie sind aber auch Orte der Begegnung, der naturnahen, ruhigen Erholung und der Biodiversität. Sie sollten als Potenzialräume betrachtet und behutsam entwickelt werden.



Außenanlagen an öffentlichen Gebäuden

Beispiel: Friedrich-List Gymnasium

Grün- und Freiflächen an öffentlichen Gebäuden, vor allem an Schulen und Kindergärten bzw. Kindertagesstätten können innerstädtische Freiräume darstellen. Mit alten Baumbeständen können sie stadtklimatisch und ökologisch von hoher Bedeutung sein. Eine stadtklimatische Wirksamkeit dieser Flächen ist dann gegeben.



Freibäder und Badeplätze

Beispiel: Städtisches Freibad

Die Nachfrage nach Freibädern wird mit dem fortschreitenden Klimawandel zunehmen

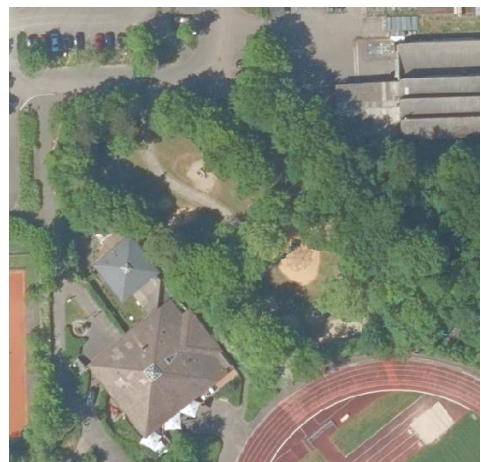


Spielplätze

Beispiel: Spielplatz im Osterholz

Für Familien sind Kinderspielplätze besonders wichtige städtische Freiflächen, welche klimatische, ökologische und erholungsrelevante Funktionen übernehmen können. Ausreichend verschattete Aufenthaltsbereiche und Spielzonen sind wichtig.

Anmerkung: Spielplätze wurden nicht in ihrer Gesamtheit analysiert.



Sportflächen

Beispiel: Osterholz

Sportplätze stellen zweckgebundene Grünflächen dar, welche sich tagsüber stark aufheizen und nachts aber auch ausreichend abkühlen. Deshalb sind sie für die Erholung in Hitzeperioden nur eingeschränkt nutzbar.



Kleingartenanlagen

Gartenkleinanlagen können der Öffentlichkeit als Naherholungsgrünflächen dienen, auch indem z.B. Gemeinschaftsgärten ermöglicht werden.

Streuobstwiesen

Streuobstwiesen bestehen aus einzelnstehenden hochstämmigen Obstbäumen (Oberrnutzung) und Weide oder Wiese (Unternutzung), welche ein- bis dreimal pro Jahr gemäht wird. Generell wird auf den Einsatz von Dünger und Pestizide verzichtet, wodurch ein großer Artenreichtum an Pflanzen, aber auch Insekten auf den Streuobstwiesen entsteht. Streuobstwiesen befinden sich meistens in Privatbesitz und dienen nur in Ausnahmefällen als öffentlich zugängliche Grünfläche. Spazier- und Sitzmöglichkeiten in schattigen Bereichen entlang von siedlungsnahen Feldwegen werden in Asperg von der Bevölkerung gerne in Anspruch genommen (z.B. südliches Stadtgebiet).

Private Grün- und Freiflächen

Durch eine natur- und artenfreundliche Gestaltung privater Grünflächen kann jeder einen Beitrag zur Reduktion der thermischen Belastung des unmittelbaren Wohnumfeldes leisten und die natürliche Lebensgrundlage stärken. Besonders alte Baumbestände sind sowohl auf öffentlichen als auch auf privaten Grundstücken unter Schutz zu stellen. Schottergärten sind kontraproduktiv. Sie heizen sich wie versiegelte Flächen tagsüber stark auf und geben die Wärme abends wieder an die Umgebung ab, tragen somit zu einer höheren nächtlichen Lufttemperatur (UHI) bei.

Grünflächen sowie Naherholungsgebiete müssen für die Menschen gut erreichbar sein. Dies hängt von der Distanz zum Wohnort sowie dazwischen liegenden Barrieren ab. Strukturen mit Barriere Wirkung sowie die Versorgung von Parkanlagen und Naherholungsgebiete, die in einem Umkreis von 250 m und 500 m um die jeweiligen Flächen liegen, sind in der grafischen Darstellung der Analyse in Abbildung 6-8 dargestellt.

Für die vorab beschriebenen multifunktionalen Parkanlage und Naherholungsgebiete wurden daher die Abstände in Luftlinie berechnet. Eine Entfernung vom Siedlungsbereich zu diesen Flächen

von weniger als 250 m (das entspricht bis 5 min Fußweg) wird als „sehr gute Klimavielfalt“ und von weniger als 500 m (bis 10 min Fußweg) als „Klimavielfalt vorhanden“ gewertet (vgl. Mayer (1989); Richter, Grunewald & Meinel (2016); Schumacher, Lehmann & Behnisch (2016)). Die Ergebnisse liefern ein gutes Bild über die Versorgung mit Grünflächen auf gesamtstädtischer Ebene.

In Ortsrandlage mit geringer Einwohnerdichte und vornehmlich Einfamilienhäusern mit zugehörigen privaten Gärten ist eine gute Klimavielfalt von geringerer Bedeutung als in dicht besiedelten und stark versiegelten Bereichen wie beispielsweise in der Innenstadt. Dementsprechend werden Versorgungsdefizite (fehlende öffentliche Grün- und Parkanlagen) häufig durch private Gärten kompensiert.

Neben privaten Gartenanlagen bilden auch Wälder und („begehbare“) Streuobstwiesen auf dem Stadtgebiet mit ihren Spazierwegen und Sitzmöglichkeiten Naherholungsgebiete für die Bürger. Besonders die Streuobstwiesen im Norden und Süden von Asperg könnten potenziell als Naherholungsgebiete dienen. Die sich überwiegend in privater Hand befindlichen Streuobstwiesen werden jedoch bei der Klimavielfaltsanalyse nicht berücksichtigt, da ihre Begehrbarkeit häufig eingeschränkt ist.

In der Stadt Asperg können 83 % der Einwohner innerhalb 500 m Luftlinie öffentliche Parkanlagen erreichen oder haben aufgrund privater Gartenflächen keinen Bedarf an öffentlichem Stadtgrün. 59 % der Einwohner erreichen öffentliches Grün innerhalb von 250 m Luftlinie oder haben ausreichend private Grünflächen. Das größte Defizit an verfügbaren Grünflächen besteht im Westen der Stadt südwestlich der Bahnlinie. Aufgrund der hier besonders ausgeprägten Wärmebelastung sind die positiven Beiträge von Grünflächen besonders wichtig. Außerdem weisen der östliche Teil Aspergs nördlich und südlich der Hirschbergstraße sowie im Südwesten der Bereich um die Straße Im Sonderholz und an der Oskar-Schlemmer-Straße ebenfalls zum Teil zusätzlichen Bedarf an Grünanlagen auf.



**Erreichbarkeit von
öffentlich zugänglichen
Grün- und Freiflächen
mit Erholungswert und
Aufenthaltsqualität an
heißen Sommertagen**

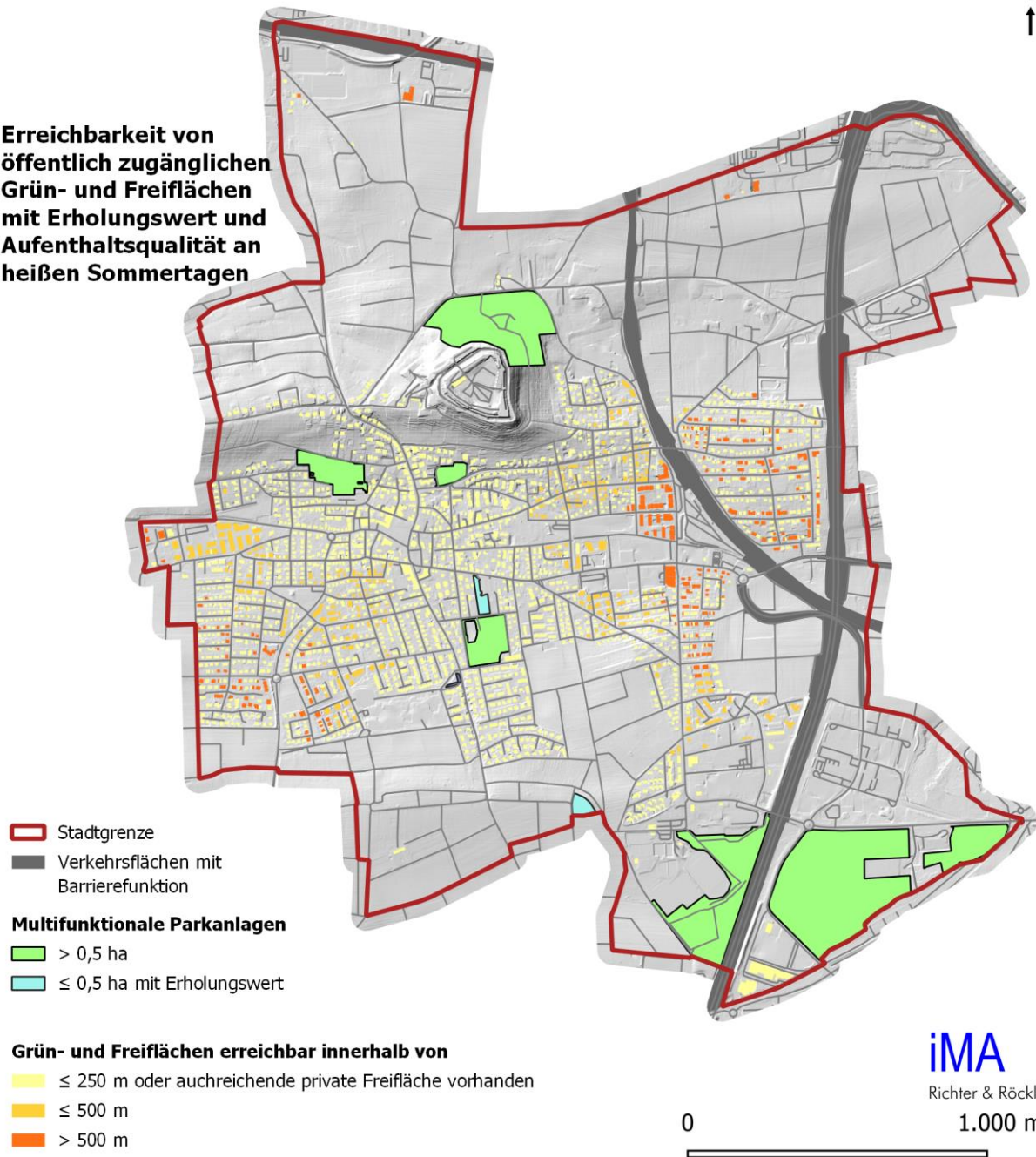


Abbildung 6-8: Versorgung der Siedlungsräumen mit multifunktionalen Parkanlagen hinsichtlich ihrer Erreichbarkeit.

6.4 Empfindlichkeit

Zur Ermittlung der Empfindlichkeit der Siedlungsbereiche wird die Einwohnerdichte für die Flächen von 50 m x 50 m berechnet. Bereiche mit hoher Einwohnerdichte sind empfindlicher gegenüber Nutzungsänderungen; sie weisen somit eine hohe Empfindlichkeit auf.

In Abbildung 6-9 ist die Einwohnerdichte von Asperg zu sehen. Die höchste Einwohnerdichte tritt entlang der Saarstraße im Südosten der Stadt auf. Vereinzelt treten weitere hohe Werte zwischen Friedrichstraße und Alleestraße, entlang der Südlichen Alleestraße, sowie an der Gartenstraße im westlichen Teil von Asperg auf.

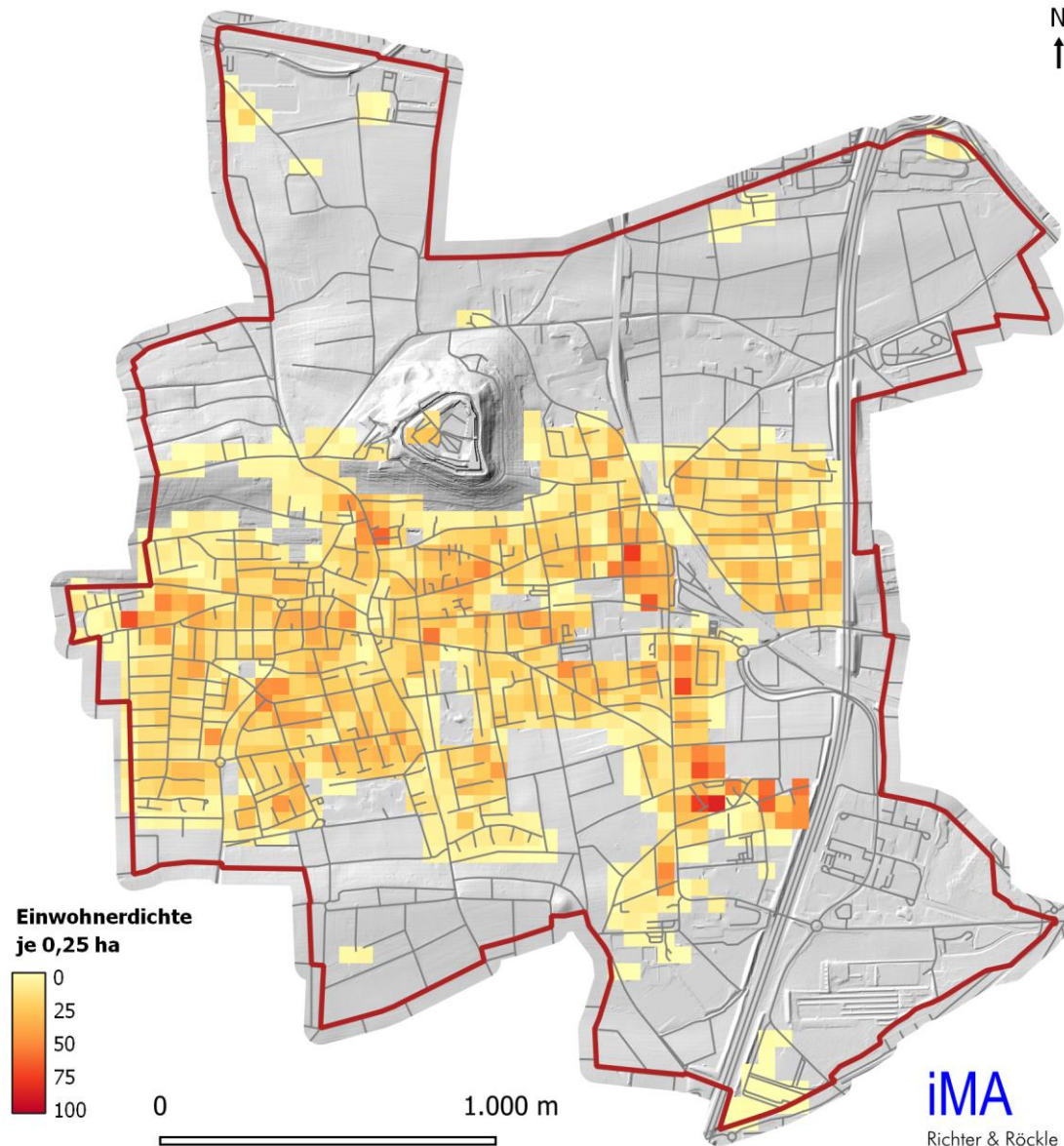


Abbildung 6-9: Einwohnerdichte pro 50 m x 50 m-Fläche.



Schützenswerte Einrichtungen

- ★ Kindertagesstätte
- ⊕ Krankenhaus
- ◆ Senioren-/Pflegeheim

N
↑
0

iMA
Richter & Röckle
1.000 m



Abbildung 6-10: Vor Hitzestress schützenswerte Einrichtungen, wie z.B. Seniorenheime, Krankenhäuser, Kindertagesstätten.

Besonders junge, alte oder kranke Personen reagieren empfindlich auf Hitzestress und weisen dementsprechend hohe Mortalitäts- und Morbiditätsraten während Hitzewellen auf (Grize et al. (2005); Robine et al. (2008)). In Abbildung 6-10 sind Einrichtungen eingetragen, welche besonders schützenswert in Bezug auf Hitzestress sind. Während Seniorenheime sich auch in der Einwohnerdichte niederschlagen, müssen Krankenhäuser und Kindertagesstätten gesondert berücksichtigt werden. An den Standorten dieser schützenswerten Einrichtungen tritt somit eine sehr hohe Empfindlichkeit auf.

6.5 Betroffenheit

Die Betroffenheit ergibt sich aus der Überlagerung der Empfindlichkeit (Abbildung 6-9) mit der thermischen Belastung (Abbildung 6-11). Sie ist in Abbildung 6-12 dargestellt. Die Berechnung der thermischen Betroffenheit wird im Anhang A1.2.3 (Seite 93) detailliert beschrieben.

Die thermische Belastung (Abbildung 6-11) wird auf Grundlage der human-biometeorologischen Belastung tagsüber, der Intensität der nächtlichen urbanen Wärmeinsel und der Klimavielfalt bewertet. Die thermische Belastung ist im östlichen Stadtgebiet am höchsten. An den Stadträndern ist die thermische Belastung als mittel bis gering einzustufen. Die Frei- und Waldflächen, welche Asperg umgeben, weisen meist eine geringe thermische Belastung auf.

In den meisten Stadtteilen sind Bereiche mit mittlerer bis hoher Betroffenheit vorhanden. Der Schwerpunkt liegt meist im Kerngebiet der jeweiligen Siedlungsgebiete, welche die höchste Einwohnerdichte und geringste Durchlüftung aufweisen. Dies ist im Bereich rund um den Bahnhof der Fall. Stadtrandbereiche sind durch die geringere Bebauungsdichte und oft bessere Frischluftversorgung durch das Umland überwiegend deutlich weniger betroffen. Typisch hierfür ist z.B. der Bereich der Südlichen Alleenstraße.

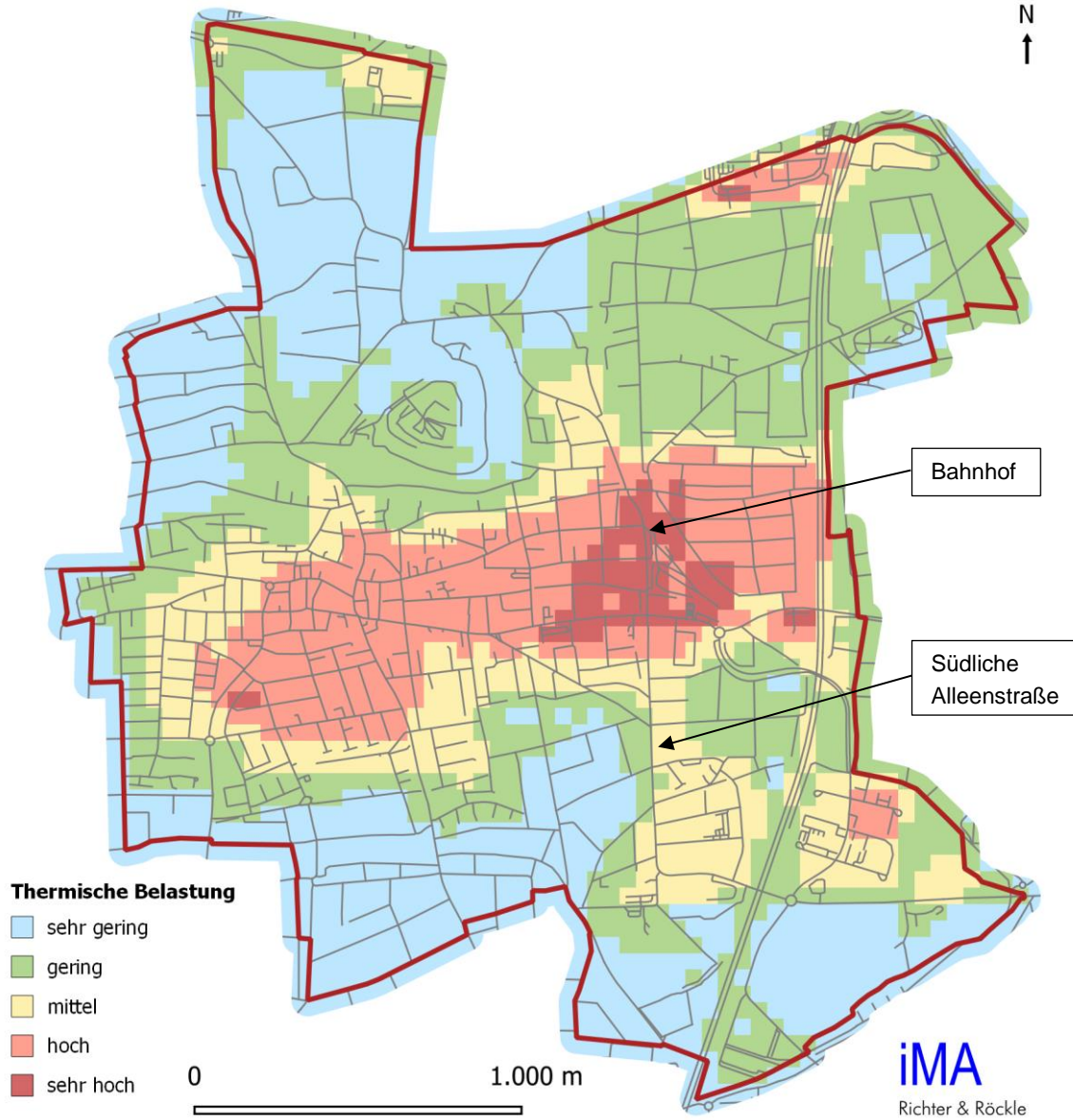


Abbildung 6-11: Thermische Belastung. Eingangsgrößen für die Berechnung der thermischen Belastung sind die urbane Wärmeinsel, PET und die Klimavielfalt.

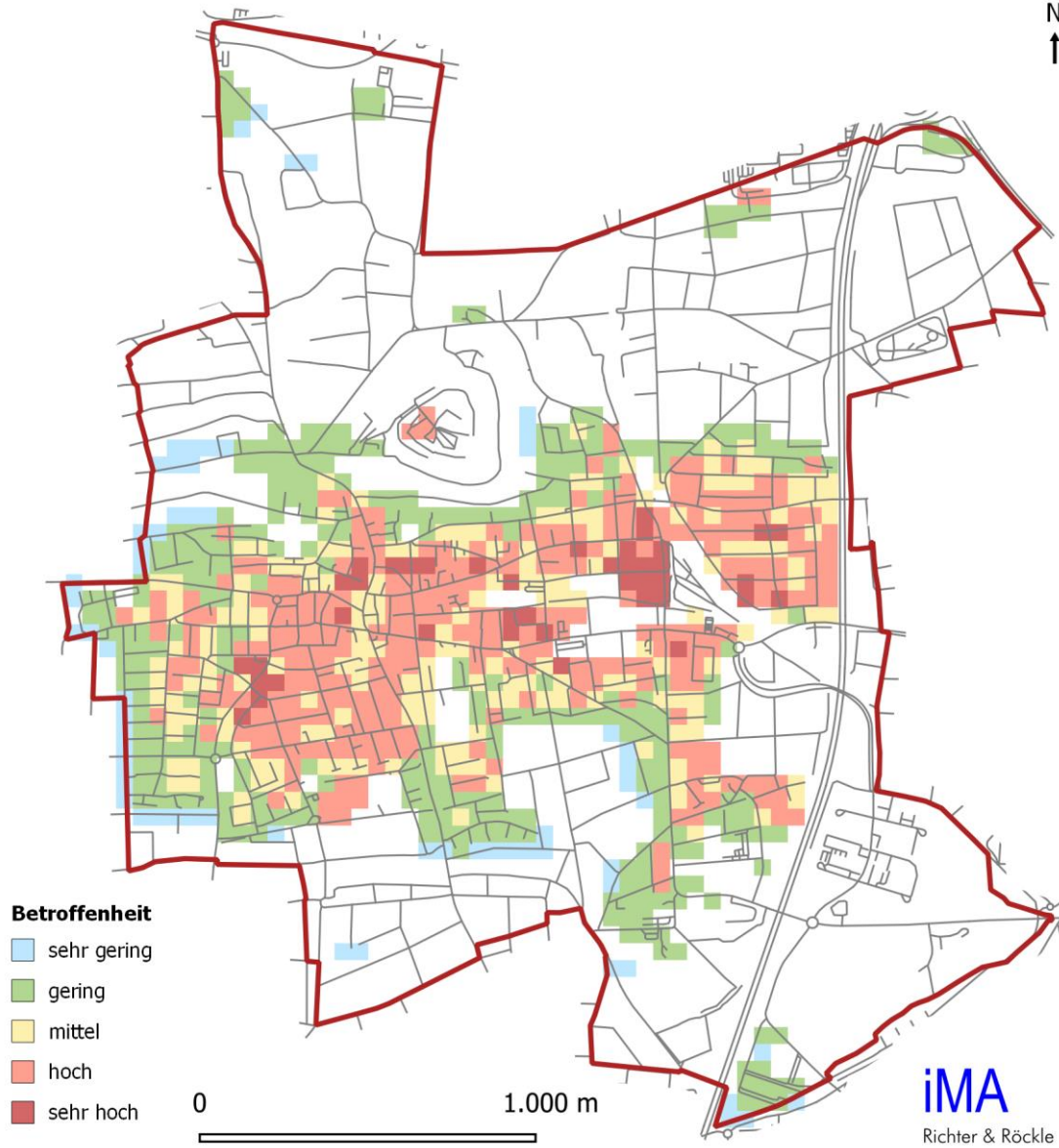


Abbildung 6-12: Thermische Betroffenheit (Vulnerabilität). Eingangsgrößen für die Berechnung der thermischen Betroffenheit sind die Empfindlichkeit, urbane Wärmeinsel, PET und die Klimavielfalt.

7 Klimaanalysekarte

Die Klimaanalysekarte (Abbildung 7-1), auch Klimatopkarte genannt, zeigt eine flächendeckende, detaillierte Darstellung der thermischen und dynamischen Verhältnisse des klimatischen Ist-Zustandes. Dabei gibt sie in erster Linie die Verhältnisse während autochthoner Wetterlagen, also windschwacher, austauscharmer Hochdruckwetterlagen wieder. Die gezeigten Luftleitbahnen wurden auf Grundlage der langjährigen Windverhältnisse ermittelt und beziehen somit alle auftretenden Wetterlagen mit ein.

Die Kartenerstellung basiert auf der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015), in der vorgeschlagen wird, klimarelevante Flächen, sogenannte Klimatope, auszuweisen. **Klimatope** bezeichnen räumliche Einheiten mit ähnlichen mikroklimatischen Strukturen. Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Modellierungen bilden neben der Realnutzung die Grundlage für die Klimatopkarte. Da Vorgänge in der unteren Atmosphäre betrachtet werden, sind die Übergänge zwischen den Klimatopen eigentlich fließend, d.h. die Abgrenzungen in der Klimatopkarte sind nicht als „scharfe“ Grenzen, sondern eher als „Grenzsäume“ zu sehen.

Die in Abbildung 7-1 gezeigte Strömung bezieht sich auf das Überdachniveau in der zweiten Nachthälfte. Die Beschreibung der Klimatope und ihrer klimatischen Eigenschaften ist in Anhang A2 aufgelistet.

Kaltluftstau (hellblaue Linien) kann an Siedlungsändern oder riegelbildenden Vegetationsstrukturen auftreten. Durch den durch die Barriere bewirkten Aufstau von Kaltluft kann sich ein Kaltluftsee ausprägen, dessen vertikale Mächtigkeit durch die Hindernishöhe begrenzt wird. Das Frostrisiko ist in diesem Bereich erhöht, da sich die Luft in Stagnationsbereichen stärker abkühlen kann als in Fließbereichen. Die Kaltluftstaubereiche wurden unter Berücksichtigung der bodennahen Strömung und Lufttemperatur ausgewiesen.

**Klimaanalysekarte
Asperg**
Entwurf - 04.04.2022

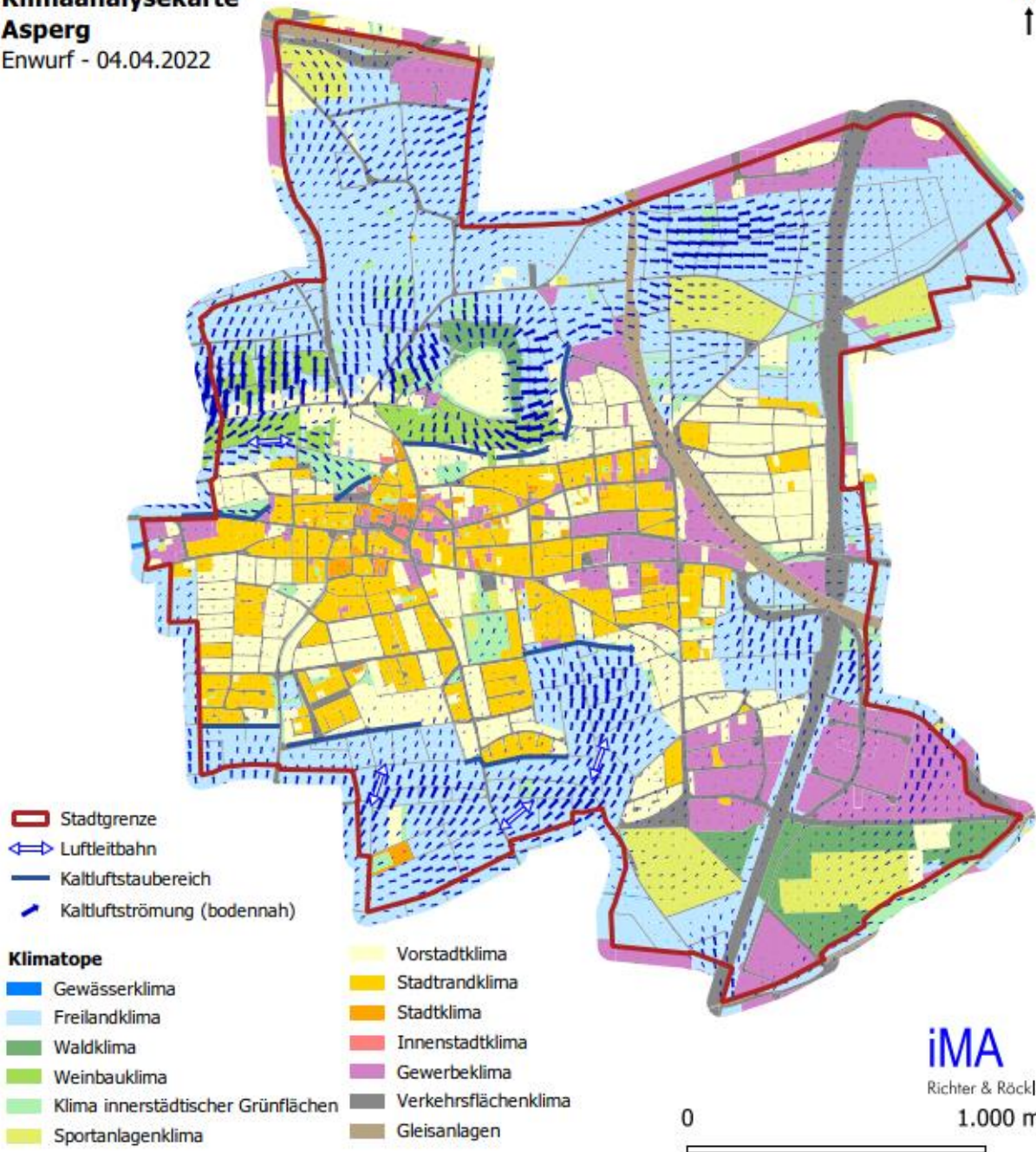


Abbildung 7-1: Klimaanalysekarte für Asperg. Dargestellt sind die Klimatope, die Kaltluftströmung im bodennahen Bereich um 22 Uhr und die potentiellen Luftleitbahnen.

8 Planungshinweiskarte

Während die Klimatopkarte eine weitgehend wertfreie Darstellung der klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse repräsentiert, werden auf der Planungshinweiskarte zum einen die Freiflächen hinsichtlich ihrer klimatischen Ausgleichsfunktion und zum anderen die Siedlungsflächen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber einer Siedlungsverdichtung oder -erweiterung klassifiziert.

In Abbildung 8-1 werden die Siedlungsflächen im Hinblick auf die thermische Betroffenheit (Vulnerabilität) unter Berücksichtigung der thermischen Belastung und der Empfindlichkeit bewertet. Die Siedlungsbereiche sind je nach **thermischer Betroffenheit** eingefärbt. Je dunkler die Farbe, desto höher ist dort die Belastung. In den stark belasteten Bereichen ist es von Vorteil, die Wärmebelastung nicht weiter zu erhöhen und stattdessen Minderungsmaßnahmen anzustreben. Dies kann in Form von Ausgleichsflächen erfolgen, die stärker begrünt werden. Aber auch eine Verringerung des Anteils der versiegelten Fläche z.B. durch Fassaden- und Dachbegrünung, Bäume sowie Pocket-Parks verringern die Wärmebelastung. Nachverdichtungen in diesen Bereichen sind zwar möglich, es empfiehlt sich aber, sie durch Schaffung von Ausgleichsflächen zu kompensieren.

Die **Grünflächen** sind nach aufsteigender Relevanz für die nächtliche Durchlüftung von gelb über grün nach blau eingefärbt. Je blauer die Fläche, desto wichtiger ist diese für den Kaltluftzustrom. Um ihre Funktion zu erhalten, sollten diese Flächen von geschlossener Bebauung freigehalten werden. Einzelne Gebäude führen meist zu keinen wesentlichen Veränderungen der Strömungsverhältnisse, wenn sie die Höhe der angrenzenden oder umliegenden Bebauung nicht übersteigen.

Die **innerörtlichen klimarelevanten Grünflächen** sind grün eingefärbt. Sie haben eine hohe Bedeutung als Erholungsflächen (Klimavielfalt) bzw. Ausgleichsflächen für die Nachbarschaft.

In Bereichen mit geringer Rauigkeit (z.B. Wiesen, Ackerland) sind die möglichen bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten höher als in rauem Gelände (z.B. Siedlung, Wald). Hindernisse machen die Strömung turbulenter und schwächen damit den mittleren Luftstrom. Potenziell sind folglich Wasserflächen und Acker- und Grünflächen mit niedriger Vegetation und damit geringer Rauigkeit gute Luftleitbahnen. Aber auch breite langgestreckte Gleisanlagen oder breitere geradlinige Ausfallstraßen können Luftleitbahnen darstellen.

Wenn eine Luftleitbahn dazu dient thermisch oder lufthygienisch belastete Gebiete bodennah zu belüften, wird von einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn gesprochen. Nach Mayer, Beckröge & Matzarakis (1994) sollen stadtklimarelevante Luftleitbahnen mindestens 1 km lang und 50 m breit und weitgehend hindernisfrei sein. Die Bedeutung der Luftleitbahnen hängt von den vorherrschenden Windrichtungen und der Durchlüftungsfunktion in thermisch belasteten Siedlungsbereichen ab. Luftleitbahnen beschreiben Flächen, über die Kaltluftströmungen bodennah entlastend wirksam werden. Aber auch Kaltluftströmungen, die sich im Überdachniveau fortsetzen und in weiter stadteinwärts liegende Bereiche reichen tragen zur Entlastung bei.

Für die Durchlüftung von Asperg während autochthoner Wetterlagen ist aufgrund der südwestlichen Grundströmung vor allem Flächen relevant, die sich vorgelagert der Wohnbebauung der Bereiche Lange Äcker und Bürgergarten im Südwesten befinden. Diese Freiflächen mit relativ geringer Rauigkeit sind auch selbst Kaltluftproduktionsgebiete, was zu einer – wenn auch aufgrund der eingeschränkten Größe begrenzten – Intensivierung der belüftungsrelevanten Strömung führt.

Nordwestlich, auf den Hangflächen südlich der Oberen Hurststraße, kann die Strömung Richtung Osten vordringen und über den Bereich des Friedhofs die angrenzenden Siedlungsflächen der Innenstadt belüften.

Hangabwinde sind im Bereich der südlichen Flanke des Hohenaspergs von Bedeutung und können bodennah im Bereich Weinberg in den Siedlungsbereich vordringen.

**Planungshinweiskarte
Asperg**

Entwurf - 04.04.2022

- Stadtgebiet_Aasperg
- Straßen
- ↔ Luftleitbahn
- Kaltluftstaubereich
- ↘ Kaltluftströmung (bodennah)

Obere
Hurststraße

- Gleisanlagen
 - Verkehrsflächen
 - Stadtgebiet ohne Bewertung
 - Multifunktionale Parkanlagen mit hohem Erholungspotential
-
- ↑ Thermische Betroffenheit von steigender Relevanz: lokale Wärmebelastung reduzieren
 - ↑ Grünflächen von steigender Relevanz für die Durchlüftung: Sicherung von Kaltluftentstehungsgebieten und von Luftleitbahnen

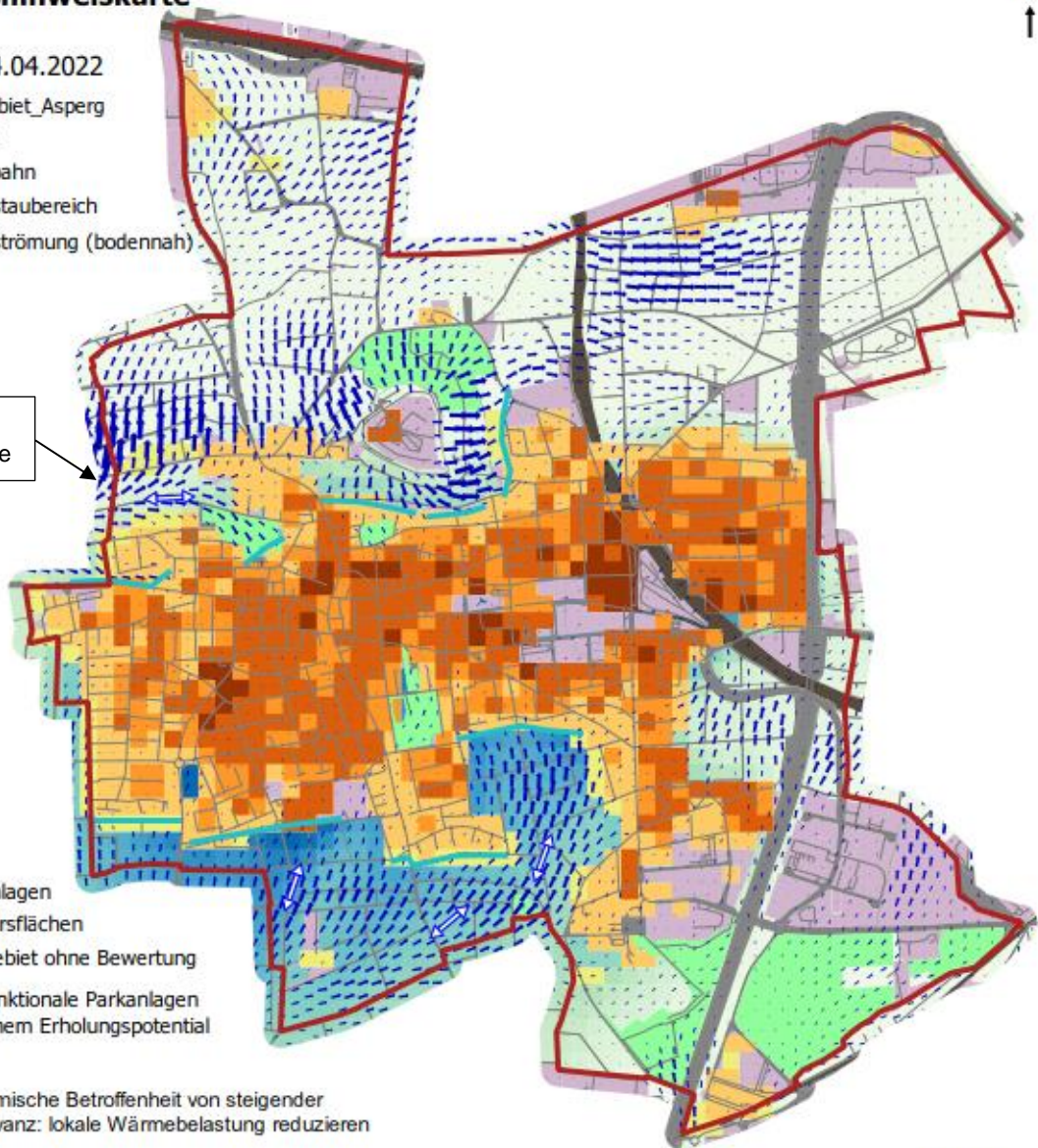


Abbildung 8-1: Planungshinweiskarte für Asperg.

9 Ausblick Klimawandel

9.1 Klimatische Einordnung des Stadtgebiet Asperg

Global gesehen lässt sich Asperg dem Klima der gemäßigten Breiten zuordnen, das ganzjährig Niederschläge und milde Temperaturen zur Folge hat.

Das Klima eines Ortes wird durch die Angabe statistischer Kennzahlen der Klimaelemente beschrieben, welche üblicherweise über einen 30-jährigen Zeitraum (die sog. „Klimanormalperiode“) erfasst werden. Für eine klimatisch feinere Einordnung werden Indikatoren gewählt, wie sie in Tabelle 9-1 für die Klimanormalperiode 1971 – 2000 aufgeführt sind. Generell spielen die Höhenlage, die geografische Lage und lokale Nutzungsstrukturen eine große Rolle für die thermischen Indikatoren.

Die erhobenen Daten beruhen auf verschiedenen Stationsmessungen und räumlichen Analysen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). In Asperg selbst ist keine langjährige Messstation des DWD vorhanden. Für die Auswertung werden daher Daten umliegender Stationen sowie räumliche Analysen verwendet.

In Tabelle 9-1 sind verschiedene Klimaindikatoren für Asperg und ausgewählte Orte in Deutschland aufgeführt. Laut den Daten des DWD treten in Asperg 14 →Eistage und 70 →Frosttage im Bezugszeitraum (1971 – 2000) auf. An der etwa 10 km südwestlich gelegenen Messstation Stuttgart-Schnarrenberg werden etwa 16 Eistage und 69 Frosttage beobachtet. Zum Vergleich, in Freudenstadt im Schwarzwald (auf 797 m ü. NHN) sind es 36 Eis- und 110 Frosttage. Im städtisch geprägten Frankfurt am Main werden ähnlich viele Eis- und Frosttage beobachtet wie in Asperg (13 bzw. 72 Tage).

Die Wärmebelastung wird charakterisiert über →Sommertage und →Heiße Tage. Mit 43 Sommertagen* und 8 heißen Tagen in der Klimanormalperiode 1971 – 2000 liegt Asperg im mittleren Bereich der Wärmebelastung der aufgeführten Städte. Es ist weniger wärmebelastet als beispielsweise Freiburg mit 49 Sommertagen und 10 heißen Tagen oder Heilbronn (51 Sommertage, 12 heiße Tage). Geringere Wärmebelastungen finden sich im Norden Deutschlands (z.B. Hamburg mit 20 Sommertagen und 3 heißen Tagen) oder in der Höhe des Schwarzwaldes (z.B. Freudenstadt mit 15 Sommertagen und einem heißen Tagen).

Die Sonnenscheindauer in Asperg wird vom DWD mit 1.629 Stunden im Jahr (Bezugszeitraum 1971 – 2000) angegeben. Die Sonnenscheindauer liegt damit niedriger als in Freiburg (1.768 h/a), höher als Hamburg (1.585 h/a) und ist vergleichbar mit Frankfurt a.M. (1.614 h/a).

Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge von 741 mm/a in Asperg im Zeitraum 1971 – 2000 ist vergleichbar mit dem deutschlandweiten Mittelwert von 789 mm/a (Zeitraum 1961 – 1990).

Tabelle 9-1: Indikatoren für Asperg und ausgewählte Orte in Deutschland in den Jahren 1971 – 2000.
 Datengrundlage: Messdaten des DWDs Climate Data Center (CDC).
 Eistag: $T_{max} < 0\text{ °C}$, Frosttag: $T_{min} < 0\text{ °C}$, Sommertag: $T_{max} \geq 25\text{ °C}$, Heißer Tag:
 $T_{max} \geq 30\text{ °C}$

Ort/Messstation	Stations- höhe (m)	Frost- tage (d)	Eis- tage (d)	Som- mer- tage (d)	Heiße Tage (d)	Nieder- schlag (mm)	Lufttem- peratur (°C)	Sonnen- schein- dauer (h)
1971 – 2000								
Hamburg-Fuhlsbüttel	11	70	16	23	4	–	9,0	1.585
Frankfurt/Main	100	72	13	46	11	621	10,2	1.614
Heilbronn	167	64	12	51	12	747	10,2	–
Asperg	270*	70	14	43	8	741	9,8	1.629
Stuttgart-Schnarrenberg	314	69	16	40	7	–	9,9	–
Freudenstadt	797	110	36	15	1	1.681	6,9	1.667
Freiburg	236	51	12	54	13	930	11,1	1.748
Feldberg	1.490	157	78	0	0	1.753	3,6	1.643

*Bereich Innenstadt

9.2 Beobachteter Klimawandel

Das Klima unterliegt ständigen Schwankungen und Veränderungen, da die Witterungsabläufe während einzelner Jahre sehr unterschiedlich sein können. Zusätzlich zu den natürlichen Klimaschwankungen tragen anthropogene Einflüsse zu Klimaveränderungen bei. So ist seit etwa Mitte des 20. Jahrhunderts eine Zunahme der globalen Lufttemperatur zu beobachten, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Folge der anthropogen bedingten Freisetzung von Treibhausgasen ist. Diese Zunahme der Lufttemperatur ist auch in Baden-Württemberg zu beobachten (Abbildung 9-1).

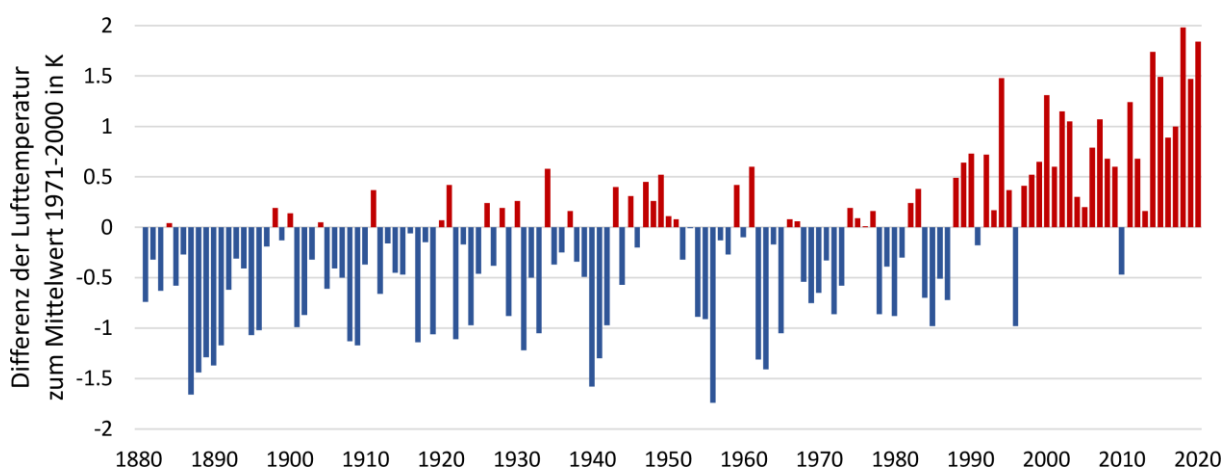


Abbildung 9-1: Beobachteter Klimawandel. Differenz der mittleren Lufttemperatur in Baden-Württemberg zum langjährigen Mittel in der Klimanormalperiode 1971-2000 (Mitteltemperatur 8,4°C) von 1880 bis heute (Daten: Deutscher Wetterdienst (2021)).

9.3 Klimaprojektion

Eine wichtige Grundlage zur Projektion des Klimas spielt die Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen in der Atmosphäre, deren mögliche Entwicklung in so genannten Konzentrations-

Pfaden (englisch „Representative Concentration Pathways“, RCPs aus dem 5. IPCC Bericht, 2013) klassifiziert werden. Bei den RCP Szenarien bilden die Treibhausgaskonzentration und der Strahlungsantrieb den Ausgangspunkt. Der Strahlungsantrieb ist ein Maß für die Änderung der Energiebilanz der Erde durch Änderung der Wirkung der Strahlung aus dem Weltraum und wird in W/m^2 gemessen.

Die RCP Szenarien wurden repräsentativ für verschiedenste Kombinationen möglicher zukünftiger wirtschaftlicher, technologischer, demographischer, politischer und institutioneller Entwicklung gewählt. In Moss et al. (2008) und van Vuuren et al. (2011) werden die RCPs und ihre Entwicklung im Rahmen des 5. IPCC-Berichtes (IPCC (2013)) ausführlich beschrieben.

Vom IPCC wurden vier Konzentrationspfade für den 5. Sachstandsbericht ausgewählt: RCP 2.6 (niedriger Strahlungsantrieb), RCP 4.5 (mittlerer Strahlungsantrieb), RCP 6.0 (hoher Strahlungsantrieb) und RCP 8.5 (sehr hoher Strahlungsantrieb). Mit RCP 8.5 wird ein kontinuierlicher Anstieg der Treibhausgasemissionen beschrieben, der zum Ende des 21. Jahrhunderts einen Strahlungsantrieb von $8,5 W/m^2$ erreicht. RCP 2.6 beinhaltet sehr ambitionierte Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Er führt zum Strahlungsantrieb von etwa $3 W/m^2$ um 2040 und geht zum Ende des 21. Jahrhunderts auf einen Wert von $2,6 W/m^2$ zurück. Die beiden anderen RCPs bewegen sich im mittleren, dazwischenliegenden Bereich. Für die Stadtklimaanalyse Asperg wurden RCP 8.5 und RCP 2.6 (Tabelle 9-2) gewählt, um eine große Spanne an möglichen zukünftigen Entwicklungen abzudecken.

Tabelle 9-2: Beschreibung der „Representative Concentration Pathways“, die in der Stadtklimaanalyse Asperg betrachtet werden.

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

In Abbildung 9-2 ist der anthropogene Anteil des Strahlungsantriebs für verschiedene RCP-Szenarien dargestellt. Für den Zeitraum 1860 bis 2005 entspricht der Verlauf der Treibhausgas-Konzentrationen den beobachteten Werten. Für den Zeitraum 2006 bis 2100 entsprechen die RCPs verschiedenen *möglichen* Treibhausgas-Konzentrations-Pfaden in der Zukunft.

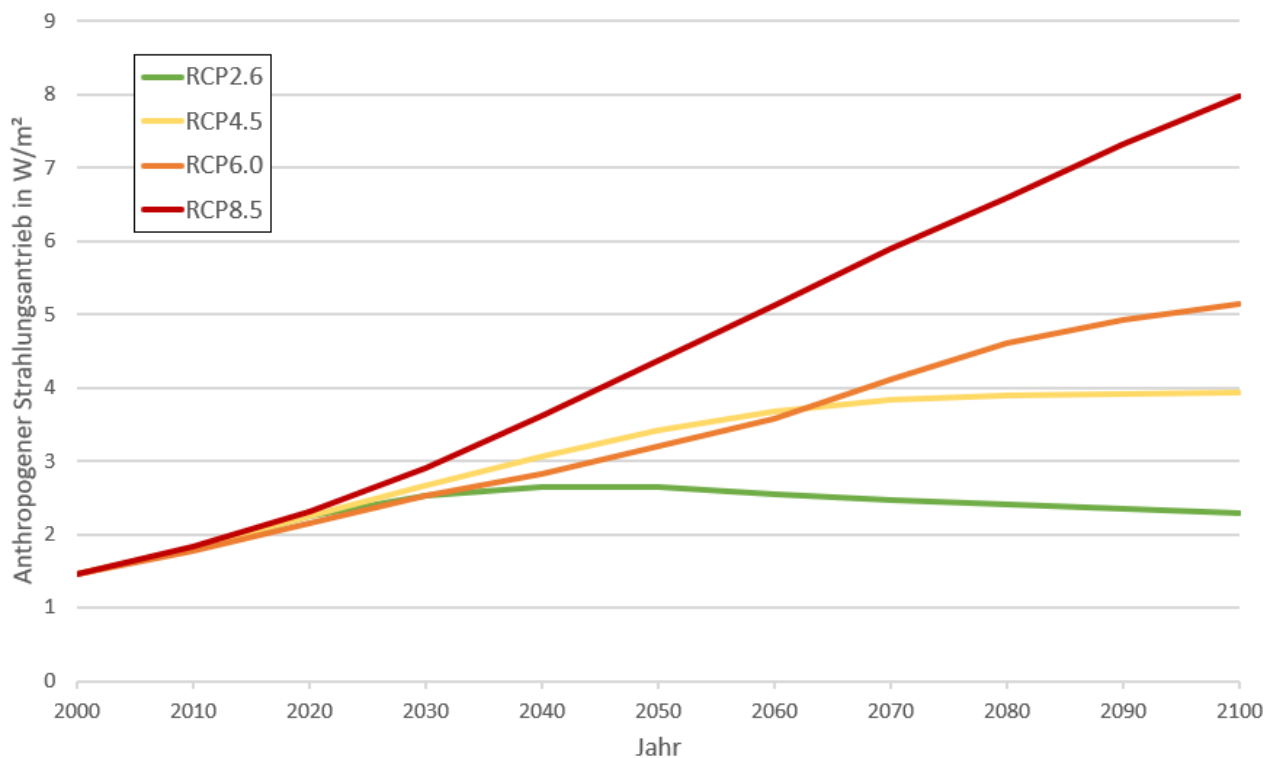


Abbildung 9-2: Vergleich des anthropogenen Strahlungsantriebs, welcher den verschiedenen RCP-Szenarien (5. IPCC Bericht, IPCC (2013)) zugrunde liegt.

Die verschiedenen RCP Szenarien werden in globalen Klimamodellen berücksichtigt, welche die weltweite Änderung des Klimas berechnen. Regionale Klimamodelle verfeinern diese Ergebnisse für einzelne Regionen, um genauere Aussagen über die Veränderung der mittleren Zustände, aber auch extremer Wetterereignisse zu treffen. Dazu werden regionale Klimamodelle mit globalen Zirkulationsmodellen angetrieben und über statistische oder dynamische Downscaling-Verfahren regionalisiert. In regionalen Klimamodellen wird komplexe Topographie, Landnutzungsarten sowie der Kontrast zwischen Ozean und Land besser repräsentiert (Wang et al. (2004)). Statistische Regionalmodelle berechnen bestehende Zusammenhänge zwischen der Synoptik und dem lokalen Wetter und wenden diese auf die globale Simulation an. Dynamische Klimamodelle werden fortlaufend durch globale Klimamodelle angetrieben und simulieren die chemischen und physikalischen Prozesse.

Heutige Klimamodelle erlauben keine konkreten, zeitlich eindeutig zuordenbare regionale Vorhersagen. Die Ergebnisse erlauben aber statistische Aussagen über die wahrscheinliche Klimaentwicklung. Um die statistische Sicherheit zu erhöhen, bündeln Ensemblemodelle die Ergebnisse verschiedener regionaler Klimamodelle für jeweils ein Szenario und für eine Region (z.B. Europa). Betrachtet wird dabei der statistische Median aller Ergebnisse der einzelnen Modelle. Damit ermöglichen sie somit eine Abschätzung der Unsicherheiten in den Klimamodellen und deren Parametrisierungen, den Emissionsszenarien und der natürlichen Klimavariabilität (Hewitt (2004); Murphy et al. (2004)).

Für die Region Europa stehen Ergebnisse der Ensemblemodelle des EURO-CORDEX- (www.euro-cordex.net) und des damit verknüpften ReKliEs-De-Projektes (<https://reklies.hlnug.de/home/>) zur Verfügung. Aus diesen Daten lassen sich die prognostizierten Klimaparameter für das Stadtgebiet von Asperg entnehmen.

9.4 Erwartete Entwicklung der mittleren Temperatur

Die hier betrachtete Lufttemperatur ist die Temperatur der bodennahen Atmosphäre. Deren Messung soll nicht von Sonnenstrahlung oder anderen Wärmeströmen beeinflusst werden. Sie ist ein Parameter bei der Bestimmung der Wärmebelastung.

Die Zeitreihe der Lufttemperatur in Abbildung 9-3 verdeutlicht die erwartete Entwicklung in der Region Asperg. Dargestellt ist der Median der zugrunde gelegten Modellläufe der in Kap. 9.6.1 aufgeführten Ensemble in Abhängigkeit der zugrunde gelegten Szenarien. Der farblich hervorgehobene Unsicherheitsbereich, definiert als Wertebereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil, verdeutlicht, dass sowohl innerhalb eines Szenarios als auch zwischen den Szenarien eine Spanne von über 6 K existiert. Während im RCP2.6 im Mittel kaum weitere Änderungen auftreten, wird für das RCP8.5 bis zum Ende des Jahrhunderts eine deutliche Zunahme der mittleren Temperatur prognostiziert.

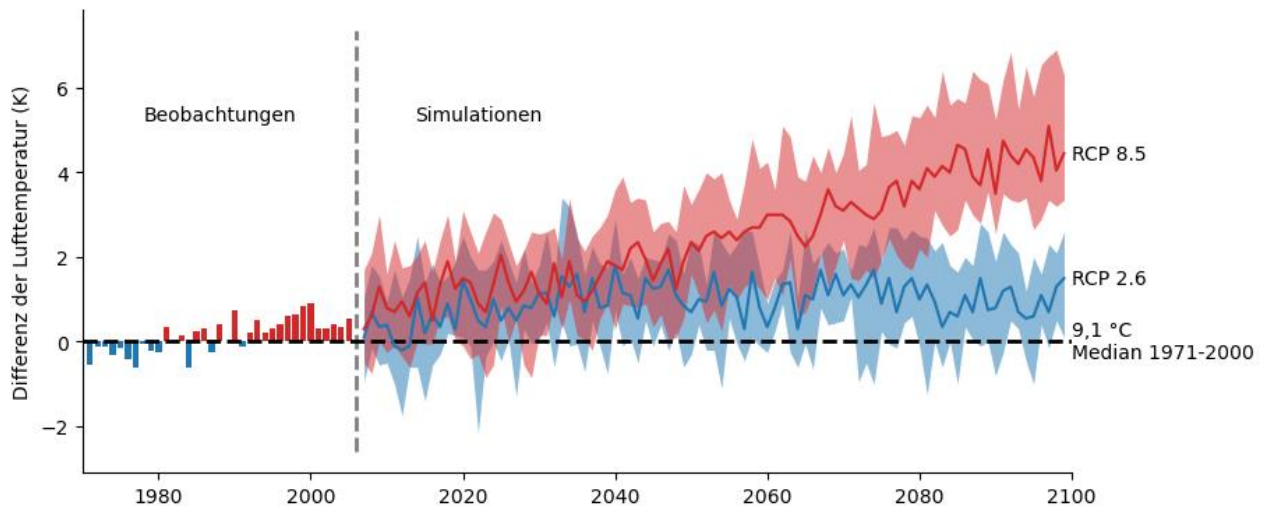


Abbildung 9-3: Lufttemperatur 1971 - 2100 für die Szenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 (Daten: EURO-CORDEX).

Um die Klimavariabilität zu berücksichtigen, werden zur statistischen Auswertung nicht einzelne Jahre, sondern Klimanormalperioden betrachtet, die einen 30-jährigen Zeitraum umfassen. In Abbildung 9-4 ist für die betrachteten Szenarien die berechnete Zunahme der Lufttemperatur für die Klimanormalperioden 2031 – 2060 und 2071 – 2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 – 2000 in der Region Asperg dargestellt. Die beiden zukünftigen Klimanormalperioden verdeutlichen somit die Entwicklung bis zur Mitte bzw. Ende des 21. Jahrhunderts.

In beiden Szenarien tritt eine Temperaturerhöhung auf. Diese äußert sich bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts bei RCP 2.6 in einer Zunahme um 1,1 K, bei RCP 8.5 in einer Zunahme um 1,9 K. Zum Ende des 21. Jahrhunderts fällt die Spanne zwischen den Szenarien deutlich größer aus: Zunahmen von 1,0 K (RCP 2.6) und 4,0 K (RCP 8.5). Da bei Szenario RCP 2.6 davon ausgegangen wird, sofortige Maßnahmen zur Emissionsminderung zu ergreifen, stagniert die Änderung der Lufttemperatur bei 1,0 K bis Ende des 21. Jahrhunderts. Im RCP8.5 führt eine weitere Zunahme der Treibhausgasemissionen auch zu einer weiter deutlich zunehmenden Temperatur.

Der Unsicherheitsbereich, definiert als Wertebereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil, verdeutlicht, dass innerhalb des Ensembles eines Szenarios eine Spanne von mehreren Kelvin existiert.

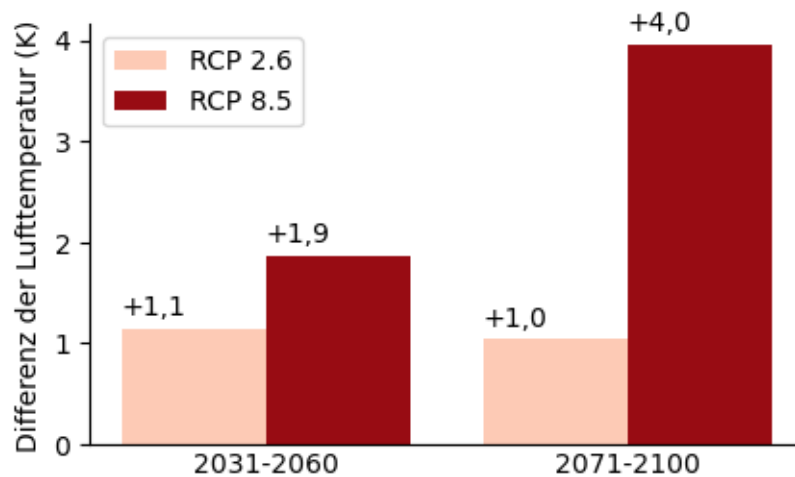


Abbildung 9-4: Änderung der Lufttemperatur (Median) bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000.

Welches der Szenarien die zukünftige Entwicklung am besten wiedergibt, lässt sich noch nicht vorhersagen. Bereits heute lässt sich jedoch festhalten, dass das RCP2.6-Szenario als wenig realistisch einzuschätzen ist. Hierbei müssten die Treibhausgasemissionen so weit abnehmen, dass der Strahlungsantrieb einen Wert von 490 ppm CO₂-Äquivalenten nicht übersteigt.

9.5 Niederschlag

Niederschlag ist das in flüssiger oder fester Form aus Wolken auf die Erde fallendes Wasser.

In Asperg selbst sind keine langjährigen Niederschlagsmessungen verfügbar. Zur Einordnung ist die monatliche Niederschlagsverteilung an der DWD-Messstation am Schnarrenberg in Stuttgart gezeigt (Abbildung 9-5). Durch die räumliche Nähe ist diese Station vergleichbar mit der Niederschlagssituation in Asperg.

Der meiste Niederschlag fällt in den Monaten Mai bis August mit im Durchschnitt über 70 mm im Monat. Im Frühjahr liegt die Niederschlagsmenge zwischen 32 mm und 41 mm, im Herbst und Dezember bei etwa 50 mm.

Für das 21. Jahrhundert wird eine geringe Zunahme des Jahresniederschlags erwartet (Abbildung 9-6). Allerdings weist die Niederschlagsmenge eine sehr hohe Variabilität auf, wodurch die Prognose sehr unsicher ist. Auch wenn im Mittel eine Zunahme des Niederschlags prognostiziert wird, zeigen die Unsicherheiten auf, dass die Tendenz nicht eindeutig ist. Besonders deutlich wird dies für die Prognose für das Ende des 21. Jahrhunderts. Dort wird zwar im Mittel eine Zunahme von 3 % bzw. 7 % prognostiziert, die Unsicherheit reicht aber von 14 % Zunahme bis hin zu einer Abnahme von 3 %.

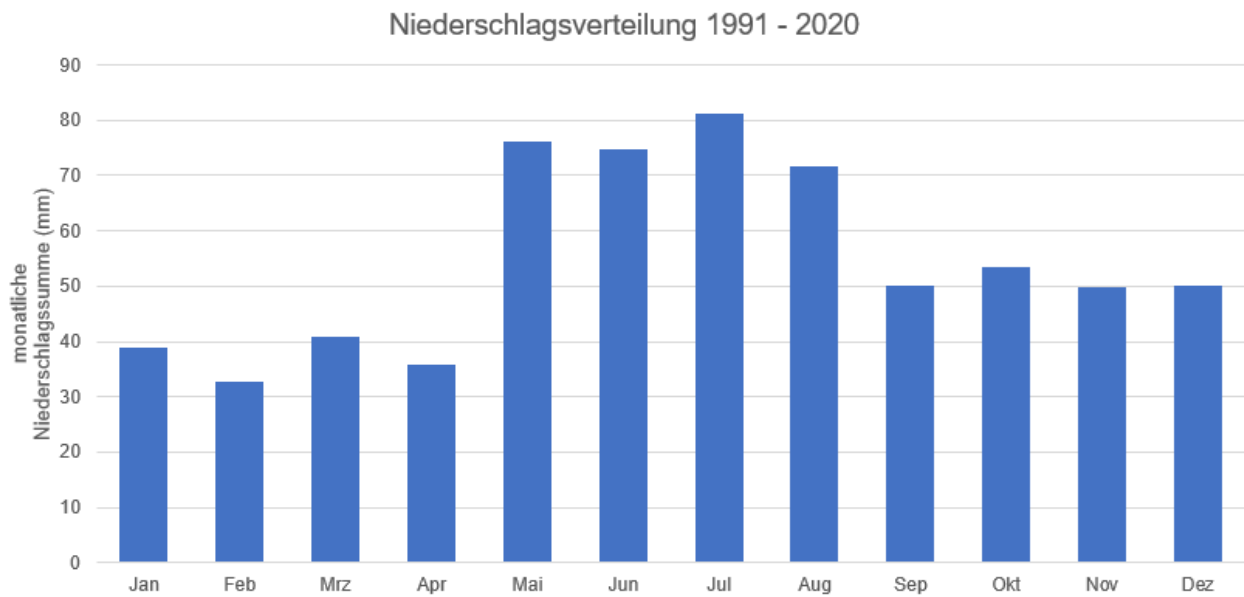


Abbildung 9-5: Mittlere monatliche Niederschlagsverteilung in mm von 1991 – 2020 an der DWD Messstation Stuttgart-Schnarrenberg.

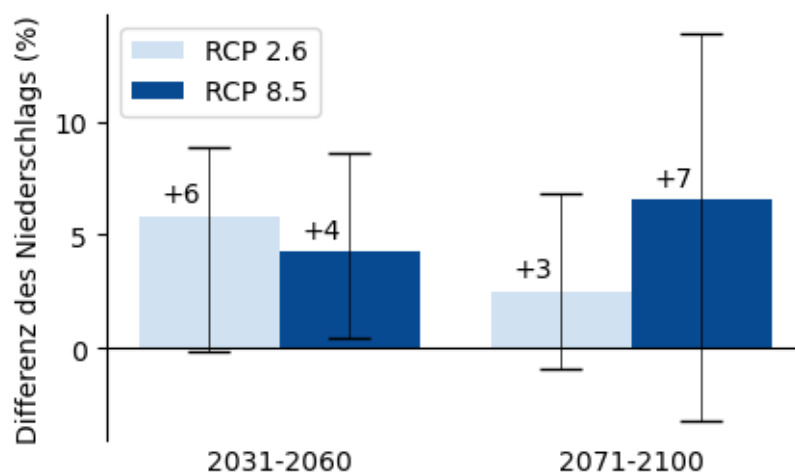


Abbildung 9-6: Prozentuale Änderung des Niederschlags bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000. Die Fehlerbalken stellen den Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil dar. Der Median (50. Perzentil) wird als Zahl angegeben.

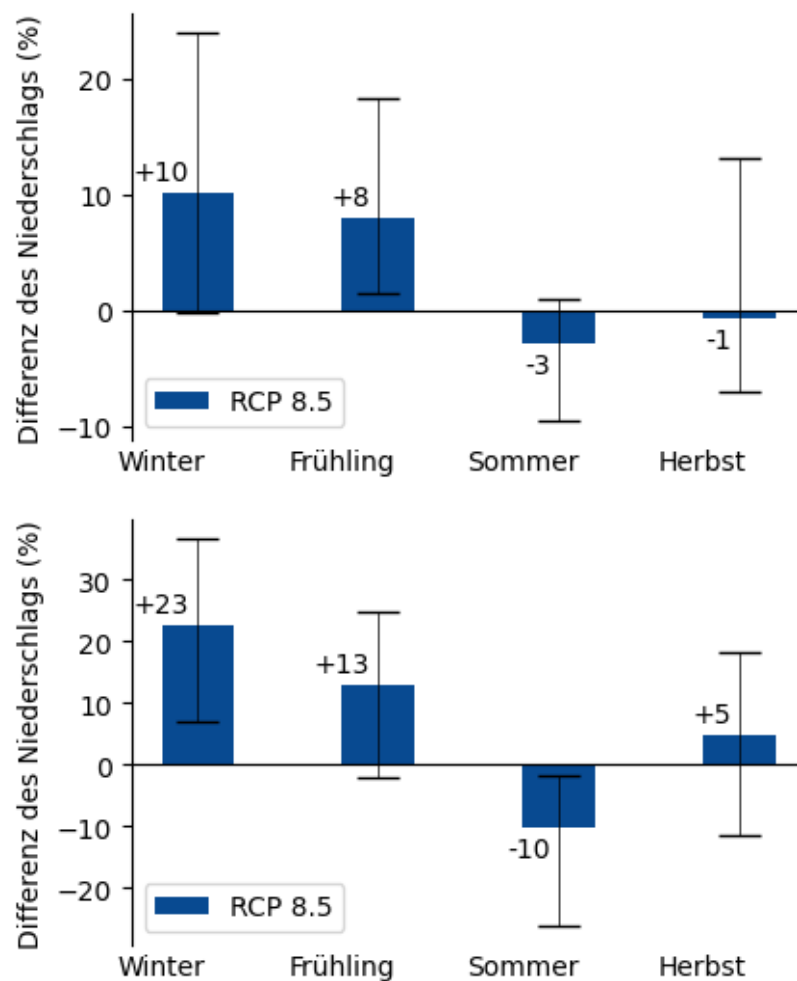


Abbildung 9-7: Saisonale Niederschlagsänderung in % für den Zeitraum 2031 – 2060 (oben) und den Zeitraum 2071 – 2100 (unten) gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000. Die Fehlerbalken stellen den Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil dar. Der Median (50. Perzentil) wird als Zahl angegeben.

Diese Zunahme des Jahresniederschlags wird besonders in den Winter- und Frühjahrsmonaten erwartet (Abbildung 9-7). Hingegen zeigen die sommerlichen Niederschläge eine Abnahme um bis zu 3 % zur Mitte des 21. Jahrhunderts und bis zu 10 % bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Insbesondere für den Herbst kann die Tendenz (Zu- oder Abnahme) nicht eindeutig vorhergesagt werden.

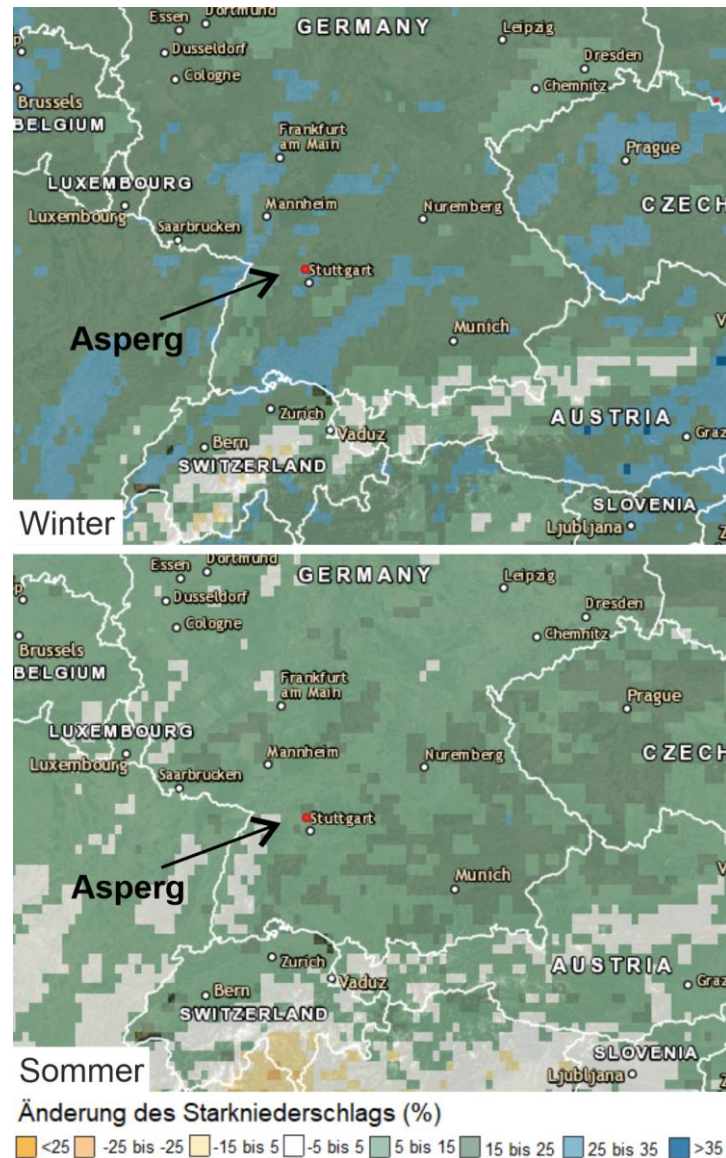


Abbildung 9-8: Änderung des Starkniederschlags im Winter (oben) und Sommer (unten) im Zeitraum 2071 – 2100 im Vergleich zum aktuellen Klima (1971 – 2000) bei Betrachtung des RCP 8.5. Starkniederschlag wird definiert als 95. Perzentil der Intensität aller Regenereignisse (Quelle: Europäisches Umweltamt 2020²).

Neben der Gesamtregenmenge ist auch die Entwicklung von Starkniederschlagsereignissen (z.B. kräftige Gewitter) von Bedeutung. Die Analyse zeigt, dass im Sommerhalbjahr mit einem Anstieg der Häufigkeit von 5 % bis 25 % zu rechnen ist (Abbildung 9-8). Im Winter reicht die Änderung der Zunahme von 15 % bis 35 %. Dies bedeutet, dass die Niederschlagsmenge im Sommer im Mittel abnehmen wird und gleichzeitig der Niederschlag häufiger in Starkniederschlagsereignissen abregnet wird.

9.6 Klimatologische Kenntage als Klima-Indikatoren

Die Entwicklung der Mittelwerte z.B. der Lufttemperatur sind nur bedingt geeignet, um die zukünftigen Bedingungen für den Menschen und die Umwelt zu bewerten. Belastend sind vor allem die

² <https://experience.arcgis.com/experience/5f6596de6c4445a58aec956532b9813d>

Häufigkeit von Extremen der Klimaparameter. Um solche Belastungen einzuschätzen, sind sogenannte klimatologische Kenntage besonders gut geeignet. Sie sind definiert als Überschreitungshäufigkeiten von bestimmten Schwellenwerten. Nachfolgend werden die Änderungen verschiedener klimatologischer Kenntage behandelt. Die hier untersuchten Kenntage beziehen sich bis auf die Hageltage direkt auf Asperg. Hagelereignisse treten sehr lokal und selten auf und werden nur an wenigen Stationen gemessen (s. Kapitel 9.6.3). Die EURO-CORDEX Klimamodelldaten weisen keine Daten zu Hagelereignissen aus, wodurch es nicht möglich ist belastbare Aussagen zu diesem Thema zu treffen.

9.6.1 Sommertage, heiße Tage und tropische Nächte

Die Anzahl an Sommertagen und die Anzahl an heißen Tagen werden als Gütekriterium für den Sommer herangezogen³. Eine Zunahme ihrer Anzahl bedeutet somit wärmere Sommer, eine Abnahme entsprechend kühlere Sommer. Eine Auswahl an Messwerten ist in Tabelle 9-3 aufgeführt. Dabei zeigen sich zum einen regionale Unterschiede. Während z.B. die mittlere Anzahl an heißen Tagen im Jahr 2021 deutschlandweit 4,6 Tage (UBA (2022)) betrug, liegt die Anzahl in Süddeutschland, vor allem in der Oberrheinebene, deutlich höher als im Norden Deutschlands. Zum anderen variiert die Anzahl der Kenntage auch innerhalb eines Stadtgebiets, wie an den beiden Stationen in Stuttgart ersichtlich wird.

Tabelle 9-3: Anzahl von Sommertagen und heißen Tagen an ausgewählten Stationen in Deutschland im Zeitraum 1971-2000 (Daten: DWD).

Ort/Messstation	Sommertage	Heiße Tage
Einheit	d	d
Karlsruhe	58,9	16,3
Freiburg	54,2	12,6
Frankfurt/Main	46,1	10,7
Konstanz	45,5	7,1
Pforzheim	42,6	7,0
Stuttgart (Schnarrenberg)	39,7	6,6
Stuttgart (Flughafen)	36,3	4,9
Hamburg-Fuhlsbüttel	23,4	3,7

³www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html

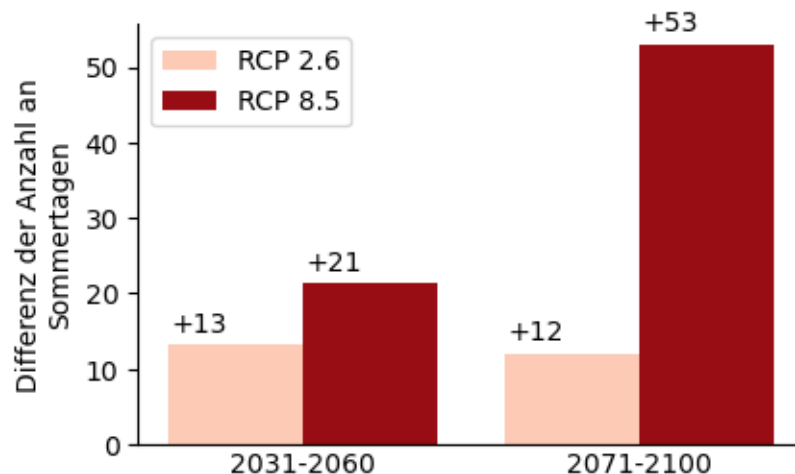


Abbildung 9-9: Änderung der Anzahl an Sommertagen (Median) bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000.

Bis Mitte des 21. Jahrhunderts wird prognostiziert, dass die Anzahl der Sommertage um etwa 13 Tage (RCP 2.6) bzw. 21 Tage (RCP 8.5) ansteigen (Abbildung 9-9). Im Vergleich zur Periode 1971 – 2000 entspricht das einer Zunahme von 30 % 49 %. Bis 2100 wird im Szenario RCP 2.6 ein Anstieg von lediglich 12 Tagen erwartet. Im Vergleich dazu steigt die Anzahl der Sommertage im Szenario RCP 8.5 um 53 Tage (+123 %) auf insgesamt 96 Tage pro Jahr. Zu beachten ist bei diesen Zahlen die große Unsicherheit, welche durch die Variabilität in der Temperaturzunahme bedingt ist (vgl. Abbildung 9-3). Daher können diese Zahlen auch geringer oder noch höher ausfallen.

Eine ähnliche Tendenz wie für die Anzahl an Sommertagen ergibt sich auch für die heißen Tage. Während im Szenario RCP 2.6 die Anzahl der heißen Tage um 4 bis 6 Tage ansteigt, ist im Szenario RCP 8.5 mit einer Zunahme von 12 Tagen bis Mitte des 21. Jahrhunderts bzw. von 32 Tagen auf dann 40 Tage pro Jahr bis 2100 zu rechnen.

Über die zukünftige Anzahl an Tropennächten kann aufgrund ihres seltenen Vorkommens aus statistischer Sicht keine aussagekräftige Tendenz abgeleitet werden. Mit einer Erhöhung der Lufttemperatur werden diese jedoch wie die heißen Tage ebenfalls häufiger auftreten.

9.6.2 Frosttage

Die Anzahl an Frosttagen wird tendenziell abnehmen. Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts wird sich deren Anzahl um 19 Tage (RCP 2.6) bzw. 29 Tage (RCP 8.5) verringern. Bis zum Ende des Jahrhunderts sinkt die Anzahl um bis zu 50 Tage (RCP 8.5) im Vergleich zum Zeitraum 1971 – 2000 auf dann lediglich 20 Frosttage jährlich.

In der Landwirtschaft (speziell im Weinbau) sind insbesondere Spätfröste im April und Mai von Bedeutung, da diese zu Erfrierungen im Austriebs- und Blühstadium führen. Obwohl ein Rückgang der Frosthäufigkeit die Frostschäden reduzieren könnte, führen die milden Winter häufig schon zu einem verfrühten Austrieb der Pflanzen, so dass die kritische phänologische Phase in Monate mit erhöhter Frostrate fällt.

9.6.3 Hageltage

Hagel ist insbesondere für die Landwirtschaft von größerer Bedeutung, da Hagelschäden zu wirtschaftlichem Schaden durch Ertragsverluste führen können. Es ist jedoch schwierig, eine ortsspezifische Aussage über die Häufigkeit von Hageltagen⁴ zu treffen, da diese räumlich sehr variabel sind und lediglich auf Beobachtungen beruhen. Allerdings gilt in Gebirgsregionen und Südwestdeutschland, wo Gewitter im deutschen Vergleich häufiger auftreten, eine höhere Hagelwahrscheinlichkeit. Denn Hagel tritt meist in Verbindung mit Gewittern auf.⁵

Vom DWD wurden die Hagelbeobachtungen von 10 Stationen für eine Statistik der mittleren jährlichen Anzahl an Hageltagen in Tabelle 9-4 zusammengetragen. Im Mittel gibt es in deutschen Orten 1 bis 2 Hageltage pro Jahr. Während die Küstengebiete und Inseln etwas unterhalb dieses Mittels liegen (z.B. Helgoland 0,7 Hageltage), kommen in gebirgigen Regionen und Südwestdeutschland bis zu 5 Hageltage wie am Feldberg vor.

Tabelle 9-4: Häufigkeit der Tage mit Hagel für den Zeitraum: 1981 – 2010. Inseln: kursiv, Berggipfel: GROSSBUCHSTABEN (Quelle: Deutscher Wetterdienst⁶).

Stationen	Höhe über NN (m)	Mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Hagel
Hamburg-Fuhlsbüttel	11	1,3
Potsdam	81	1,5
Köln-Bonn	92	1,5
Frankfurt-Flughafen	100	1,1
Stuttgart-Echterdingen	371	2,3
München-Flughafen	446	1,5
<i>Helgoland</i>	4	0,7
<i>Kap Arkona</i>	42	0,9
BROCKEN	1.134	2,0
WASSERKUPPE	921	2,0
FELDBERG (Schwarzwald)	1.490	4,6
ZUGSPITZE	2.964	3,8

Für Asperg ist als Ort in Südwestdeutschland mit einer Hagelwahrscheinlichkeit von ca. 2 Hageltagen pro Jahr auszugehen, wobei eine jahreszeitliche Variabilität zu berücksichtigen ist (vgl. Abbildung 9-10). Daher treten mit höherer Wahrscheinlichkeit Hagelereignisse in den Sommermonaten auf, wenn die Wahrscheinlichkeit für Gewitter und die Luftfeuchtigkeit hoch sind.

Eine Analyse der Münchner Rückversicherung geht von 0,5 bis 0,75 Tagen mit Hagel im Bereich des Neckarbeckens aus (Abbildung 9-11)⁶.

⁴ Tage, an denen Hagel unabhängig von der Größe auftritt

⁵ https://www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/hagel/hagel_node.html

⁶ Diese Zahlen basieren auf einer Studie von Räder et al (2018). Die geringere Anzahl an Hageltagen ist unter anderem auf die Verwendung von Reanalysedaten mit einer räumlichen Auflösung von 0,75° und einer zeitlichen Auflösung von 6 Stunden zurückzuführen. Diese Auflösungen sind relativ grob im Vergleich zur räumlichen und zeitlichen Skala eines Gewitter- und Hagelereignisses.

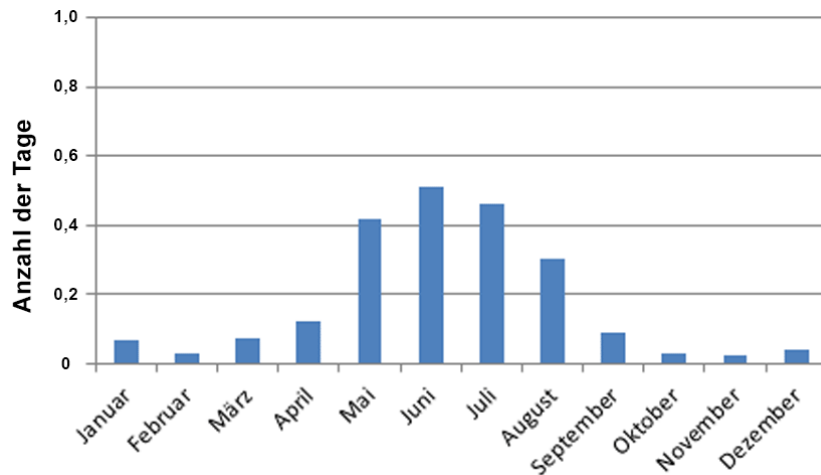


Abbildung 9-10: Mittlere Anzahl an Hageltagen pro Monat für die Klimanormalperiode 1981 – 2010. Als Datengrundlage wurden die oberen 10 Stationen ohne Inselstationen verwendet (Quelle Deutscher Wetterdienst⁷).

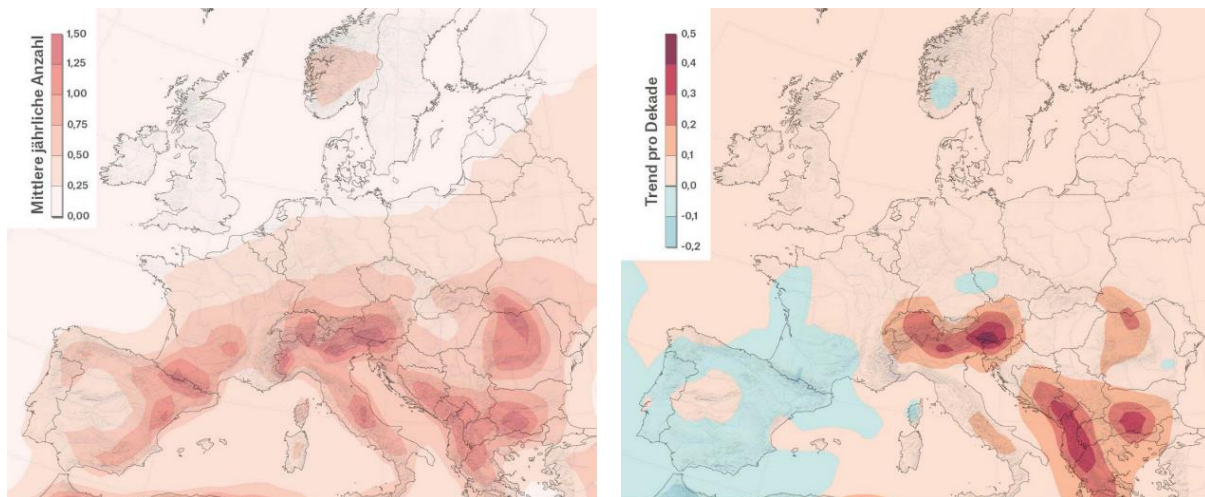


Abbildung 9-11: Mittlere jährliche Anzahl an Hagelereignissen (links) und der Trend pro Dekade in den 37 Jahren von 1979 – 2015 (rechts) (Quelle: Münchner Rückversicherung 2019⁸)

Auswirkungen des Klimawandels

Aufgrund höherer Temperaturen erwärmen sich Gewässer stärker, wodurch die Verdunstung zunimmt. Gleichzeitig nimmt aufgrund einer wärmeren Lufttemperatur der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre zu. Dadurch wird bei Wolkenbildung und der Kondensation des Wasserdampfes lokal mehr Energie freigesetzt. Kunz et al. (2009) fanden heraus, dass die jährliche Anzahl an Gewittern in Baden-Württemberg zwischen 1974 bis 2003 im Mittel nicht angestiegen ist, sehr wohl aber der Hagelschaden und die Tage mit Hagel in den letzten drei Dekaden. Auch das Hagelpotenzial, abgeleitet aus Stabilitätsmaßen und Großwetterlagen, ist in Baden-Württemberg angestiegen (Brasseur et al. 2017). Die Münchner Rückversicherung weist einen Trend von etwa +0,1 Hageltagen pro Jahr für das Neckarbecken aus (Abbildung 9-11). Im 21. Jahrhundert könnte die Anzahl an Hageltagen in Asperg weiter zunehmen (Brasseur, Jacob & Schuck-Zöllner (2017)).

⁷ https://www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/hagel/hagel_node.html

⁸ www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/climate-change/hail.html

Schäden

Die normalisierten **Schäden** aufgrund von schweren Gewittern in Europa sind signifikant gestiegen. Dies liegt nicht nur an der zunehmenden Zahl an Hagelereignissen in Südwestdeutschland (vgl. Abbildung 9-11). Es gibt Hinweise auf eine höhere **Schadenanfälligkeit** moderner Gebäude in Zentraleuropa. In der Schweiz, wo die Baustandards ähnlich wie in Deutschland sind, lag der Anteil beschädigter Gebäude bei neueren Baujahren systematisch höher als bei älteren: Bei Hagelschlägen im Kanton Aargau erlitten etwa 8 % der Gebäude aus den 1940er Jahren Schäden, bei Gebäuden mit Baujahr ab 2000 waren es 15 %. Moderne Häuserfassaden sind bei schweren Hagelereignissen besonders schadenanfällig, da Hagelkörner häufig durch den Wind schräg auftreffen. So kann Hagel bei modernen Wärmedämmsystemen den oft dünnen Oberputz abschlagen und so das Gebäude durch Nässe beschädigen. Aufwändige Fassaden moderner Geschäftsgebäude sowie Solaranlagen können ebenfalls abhängig von der Hagelgröße zu erheblichen Einzelschäden führen. Abbildung 9-12 zeigt beispielhaft typische Schadensbilder in Abhängigkeit zur Hagelgröße.

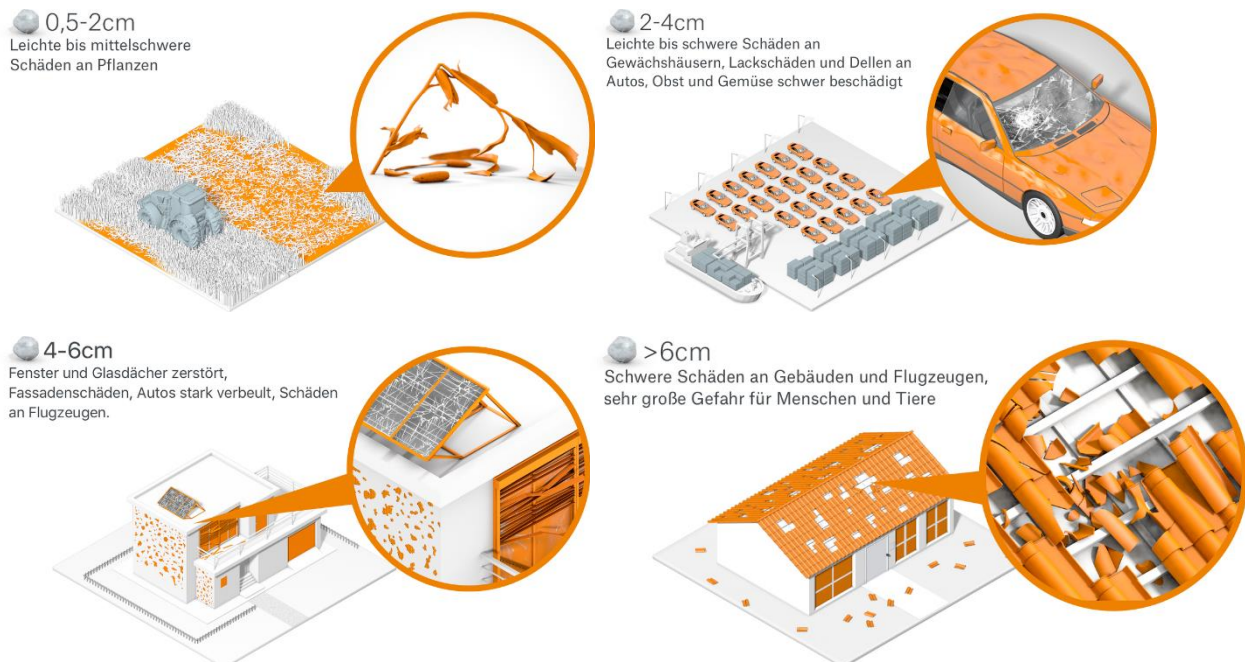
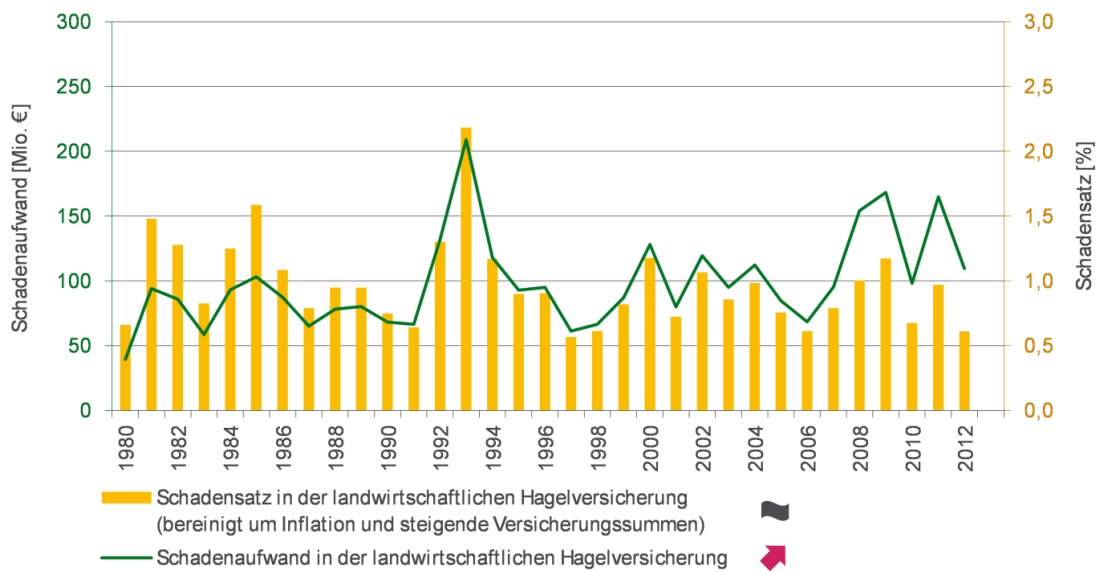


Abbildung 9-12: Verschiedene Hagelgrößen und Schadenbilder (Quelle: Münchner Rückversicherung 2019).

In der Landwirtschaft entstehen durch Hagelereignisse direkte und indirekte Schäden. Neben dem Ernteausfall sind dies der Verlust der Marktpräsenz in einem Hageljahr, die mangelnde Auslastung vorhandener betrieblicher Infrastruktur oder auch ein erhöhter Ernte- und Sortieraufwand.

In Abbildung 9-13 sind Schadenaufwand und Schadensatz in der landwirtschaftlichen Hagelversicherung abgebildet. Der Schadensatz erlaubt keine direkten Rückschlüsse auf die Anzahl und Schwere von Hagelereignissen. Es ist jedoch auch kein eindeutiger Trend zu erkennen.



Datenquelle: Institut für Agribusiness (Technische Ziffern Hagel)

Abbildung 9-13: Schadenaufwand und Schadensatz in der landwirtschaftlichen Hagelversicherung (Quelle: UBA <https://www.umweltbundesamt.de/lw-i-4-das-indikator#textpart-1>)

9.7 Zusammenfassung der Auswirkungen des Klimawandels

Die zuvor im Detail beschriebenen Auswirkungen des Klimawandels auf die verschiedenen meteorologischen Größen sind in Tabelle 9-5 nochmals zusammenfassend aufgeführt. Es sei an dieser Stelle auch auf die Auswertung des Umweltbundesamts verwiesen⁹, die auch eine Auflistung verschiedener Betroffenheiten enthält.

Tabelle 9-5: Prognostizierte Veränderung meteorologischer Größen im Laufe des 21. Jahrhunderts.

Meteorologische Größe	Erwartete Änderung im 21. Jahrhundert																		
Lufttemperatur	Basierend auf EURO-CORDEX Daten: +1,1 K bis +1,9 K (Mitte des Jhd.) +1,0 K bis +4,0 K (Ende des Jhd.)																		
Niederschlag	Basierend auf EURO-CORDEX-Daten: +4 % bis +6 % (Mitte des Jhd.) +3 % bis +7 % (Ende des Jhd.) Innerhalb dieser Trends muss die jahreszeitliche Variabilität berücksichtigt werden. Hierbei ist von einer Zunahme im Winter und Frühling und einer Abnahme im Sommer auszugehen. Gleichzeitig wird eine Zunahme an Starkregenereignissen erwartet. Saisonale Variabilität: <table border="1" data-bbox="549 974 1268 1216"> <thead> <tr> <th>Saison</th> <th>Mitte 21. Jhd.</th> <th>Ende 21. Jhd.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Winter</td> <td>+10 %</td> <td>+23 %</td> </tr> <tr> <td>Frühling</td> <td>+8 %</td> <td>+13 %</td> </tr> <tr> <td>Sommer</td> <td>-3 %</td> <td>-10 %</td> </tr> <tr> <td>Herbst</td> <td colspan="2">keine eindeutige Tendenz</td> </tr> </tbody> </table>	Saison	Mitte 21. Jhd.	Ende 21. Jhd.	Winter	+10 %	+23 %	Frühling	+8 %	+13 %	Sommer	-3 %	-10 %	Herbst	keine eindeutige Tendenz				
Saison	Mitte 21. Jhd.	Ende 21. Jhd.																	
Winter	+10 %	+23 %																	
Frühling	+8 %	+13 %																	
Sommer	-3 %	-10 %																	
Herbst	keine eindeutige Tendenz																		
Kenntage	Basierend auf EORO-CORDEX-Daten und Daten der Münchner Rückversicherung (Hageltage): <table border="1" data-bbox="549 1312 1272 1601"> <thead> <tr> <th>Kenntag</th> <th>Mitte 21. Jhd.</th> <th>Ende 21. Jhd.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sommertage</td> <td>+13 bis +21</td> <td>+12 bis +53</td> </tr> <tr> <td>Heiße Tage</td> <td>+4 bis +12</td> <td>+6 bis +32</td> </tr> <tr> <td>Tropennächte</td> <td colspan="2">Zunahme</td> </tr> <tr> <td>Frosttage</td> <td>-19 bis -29</td> <td>-18 bis -50</td> </tr> <tr> <td>Hageltage</td> <td>etwa +0,1 Tag</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>	Kenntag	Mitte 21. Jhd.	Ende 21. Jhd.	Sommertage	+13 bis +21	+12 bis +53	Heiße Tage	+4 bis +12	+6 bis +32	Tropennächte	Zunahme		Frosttage	-19 bis -29	-18 bis -50	Hageltage	etwa +0,1 Tag	-
Kenntag	Mitte 21. Jhd.	Ende 21. Jhd.																	
Sommertage	+13 bis +21	+12 bis +53																	
Heiße Tage	+4 bis +12	+6 bis +32																	
Tropennächte	Zunahme																		
Frosttage	-19 bis -29	-18 bis -50																	
Hageltage	etwa +0,1 Tag	-																	
Starkregen-Ereignisse	Basierend auf EURO-CORDEX-Daten: steigende Tendenz (Winter: 15 % – 35 %; Sommer: 5 % – 25 %)																		
Trockenheit	Sommerlicher Rückgang von Niederschlägen																		
Starkwind	Zunahme ¹⁰																		

⁹ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/klimalotse/uebersicht-betroffenheiten>

¹⁰ Für Starkwind liegen keine belastbaren Prognosen vor. Quelle: Umweltbundesamt. Projekt-Nr. 24309; 2015, „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vulnerabilitaet-deutschlands-gegenueber-dem-klimawandel>

9.8 Die „Quader-Methode“ zur Klimaprojektion

Regionale Klimamodelle lösen die mit dem Klima zusammenhängenden Prozesse wesentlich höher auf als globale Modelle. Aber auch dieser Modelltypus kann nicht beliebig verfeinert werden. Die für die Stadtklimaanalyse Asperg ausgewerteten Ergebnisse des DWD-Referenz-Ensembles v2018, bestehend aus 19 Regionalen Klimamodellen aus den EURO-CORDEX- (www.euro-cordex.net) und ReKliEs-De-Projekten (<https://reklies.hlnug.de/home/>), stehen in der Region Asperg auf Rasterflächen von ca. 9 km x 14 km Ausdehnung zur Verfügung. Das Stadtgebiet wird nur von einer Rasterflächen erfasst (Abbildung 9-14).

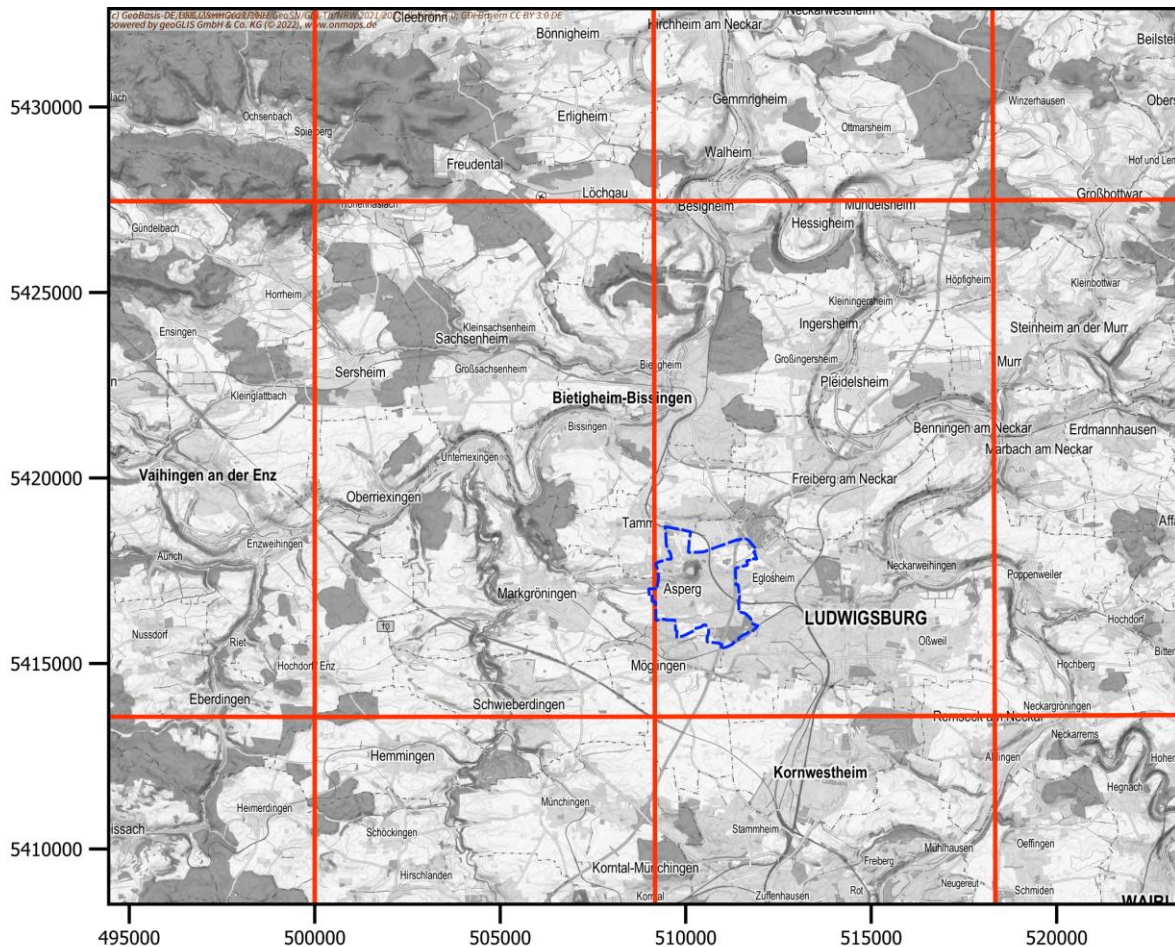


Abbildung 9-14: Lage des Stadtgebiets Asperg (blau) im Modellgitter der regionalen Klimamodelle (rot).

Die im vorigen Abschnitt aufgeführten Auswertungen, die aus diesen Informationen abgeleitet wurden, geben daher für das Stadtgebiet nur eine äußerst grobe Übersicht über die zu erwartenden zukünftigen Verhältnisse.

Tatsächlich unterscheidet sich die Entwicklung aber je nach lokaler Landbedeckung - bewaldete Gebiete erfahren andere Temperaturverläufe als innerstädtische Bereiche oder aufgelockerte Ortsrandlagen.

Die kleinräumige Simulation mehrerer Jahrzehnte für ein Gebiet wie Asperg ist aufgrund des extremen Rechenaufwands - selbst mit den derzeit leistungsfähigsten Computern - nicht durchführbar. Die so genannte „Quadermethode“ des Deutschen Wetterdienstes stellt ein

Verfahren dar, das die Anforderungen an die Klimasimulationen technisch handhabbar werden lässt, und trotzdem in hoher Auflösung z.B. die zukünftige Wärmebelastung ermitteln kann (Früh et al. (2011)).

Die Klima-Daten werden dabei genutzt, um die möglichen Extremwerte der meteorologischen Größen Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit während der zukünftigen Dekaden zu ermitteln. Das Auftreten wärmebelastender Wetterlagen wird von diesen drei Klimaelementen wesentlich bestimmt. Für die hier zu untersuchende mögliche Zunahme der Tageshitze muss nicht der gesamte Wertebereich dieser Parameter untersucht werden.

Unterhalb einer für die Zielregion berechneten Temperatur T_{\min} von 15°C wird es mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht zu Situationen mit Hitzestress kommen. Umgekehrt werden ab einer gewissen mittleren Temperatur T_{\max} die statistischen Schwellenwerte (z.B. Heißer Tag) flächendeckend überschritten. Analog können die Wertebereiche der Windgeschwindigkeit (FF) und relativen Feuchte (Rf) eingeschränkt werden. Die Minima und Maxima dieser drei Klimaparameter beschreiben einen dreidimensionalen Ereignisraum (= Quader, Abbildung 9-15). Zusätzlich wurden die auftretenden Windrichtungen in Ost- und Westwinde differenziert.

Für jeden der 8 Eckpunkte eines Quaders wurden hochauflösende FITNAH-Läufe mit horizontalen Maschenweiten von 25 m durchgeführt. Dadurch wird die lokale Landnutzung und deren Einfluss auf die meteorologischen Größen hoch differenziert berücksichtigt.

Anschließend wird die Zeitreihe der Klima-Daten herangezogen und für jeden Zeitpunkt zunächst die Lage der Situation im 3D-Ereignisraum festgestellt. Von diesem Punkt im Ereignisraum ergeben sich durch die Abstände zu den 8 Eckpunkten des Quaders Wichtungsfaktoren.

Nun wird für jede Rasterfläche im hochauflösenden FITNAH-Gitter der für den betrachteten Zeitpunkt gültige Wert durch Interpolation mit den zuvor gewonnenen Wichtungsfaktoren aus den FITNAH-Simulationsergebnissen berechnet.

Wenn man dies nacheinander für die gesamte Zeitreihe der Klima-Daten durchführt, entsteht an allen FITNAH-Rasterflächen jeweils eine synchrone Zeitreihe der Temperatur. Mit dieser Quader-Methode entsteht also ein Datensatz, mit dessen Hilfe man die mittlere jährliche Anzahl klimatischer Kenntage, z.B. die Anzahl an Sommertagen, unter zukünftig geänderten Klimabedingungen und vor allem im hochauflösenden Gitter mit Berücksichtigung der lokalen Landnutzungsverhältnisse berechnen kann.

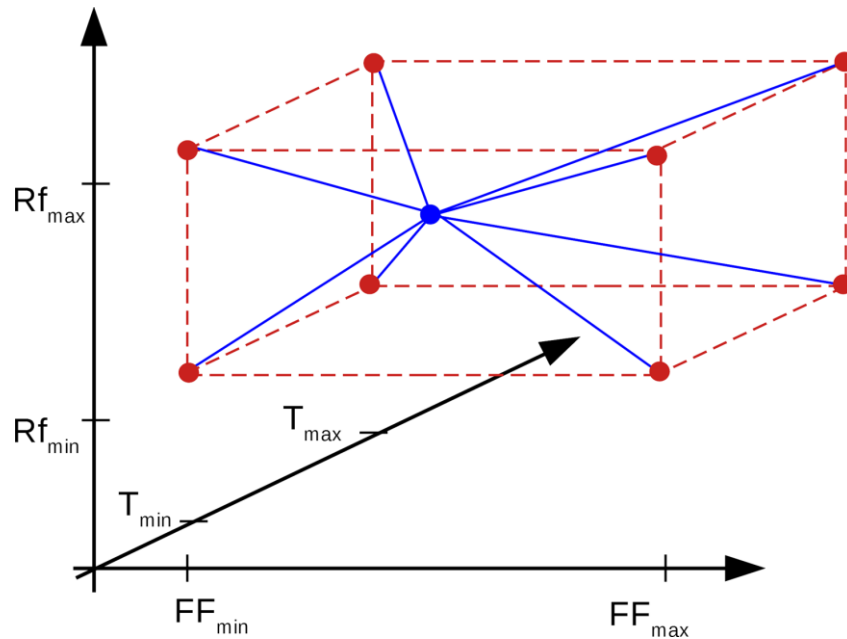


Abbildung 9-15: Skizze des Quaders (rot) zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der linearen Interpolation. Die Quadereckpunkte (rote Punkte) werden durch Simulationen bei der entsprechenden Lufttemperatur, relativen Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit bestimmt. Ein terminbezogener Zielwert (blauer Punkt) wird durch eine lineare gewichtete Interpolation berechnet, wobei die Jahreszeitreihe der Regionalen Klimamodelle als Eingangsdaten dienen.

Um die Spannweite möglicher klimawandelbedingter Auswirkungen aufzeigen zu können, werden die Emissionsszenarien RCP8.5 und RCP4.5 (vgl. Kapitel 9.3) für die Zeiträume 2031-2060 (Mitte des 21. Jhd.) und 2071-2100 (Ende des 21. Jhd.) analysiert. Mit RCP 8.5 wurde das „Worst-Case-Szenario“ abgedeckt und mit RCP 4.5 das kühlere der beiden mittleren Szenarien.

9.9 Ergebnisse der Quader-Methode

Die Anzahl der Sommertage (Höchstwert $\geq 25^{\circ}\text{C}$) wurde für das Stadtgebiet von Asperg mit der in Kap. 9.6.1 beschriebenen Quadermethode im hochauflösenden FITNAH-Rechengitter bestimmt und ist für die historische Klimanormalperiode 1971–2000 in Abbildung 9-16 dargestellt. Als Mittelwert im Bereich Asperg werden 43 Sommertage berechnet (Tabelle 9-1). Ausgehend von diesem Mittelwert werden die Unterschiede in der Anzahl der Sommertage im Stadtgebiet durch die lokale Landnutzung und die Höhenlage bestimmt. Die Waldgebiete im Osterholz und am Hohenasperg zeigen folglich die geringste Häufigkeit. Auch die meist landwirtschaftlich genutzten Freiflächen im südlichen und nördlichen Stadtgebiet liegen die Werte deutlich niedriger als im bebauten Stadtgebiet.

Durch den Klimawandel wird erwartet, dass die Anzahl der Sommertage in der Klimanormalperiode 2031-2060 zur Mitte des Jahrhunderts im räumlichen Mittel über das Stadtgebiet um bis zu 21 Tage (Abbildung 9-9, Median RCP8.5) ansteigt.

Diese Zunahme führt in dieser Periode im Bereich der westlichen Stadtteile zu etwa 65 bis 70 Sommertagen (RCP4.5) bzw. 70 bis 75 Sommertagen (RCP8.5) (Abbildung 9-17). In dicht bebau-

ten Bereichen wie der Innenstadt und ausgedehnten Industrie- und Gewerbeflächen liegt die Anzahl der Sommertage etwas höher. Beide Szenarien unterscheiden sich bis zur Mitte des Jahrhunderts also nur moderat.

Zum Ende des Jahrhunderts wird für das Szenario RCP 8.5 ein deutlicher Anstieg der Temperaturen und damit der Anzahl der Sommertage prognostiziert. Im Bereich Asperg wird ein mittlerer Anstieg der Anzahl der Sommertage in der Klimanormalperiode 2071-2100 gegenüber 1971-2000 um 53 Tage (RCP8.5, Abbildung 9-9) prognostiziert. Im Gegensatz zur Mitte des Jahrhunderts unterscheiden sich beide Szenarien in ihren Prognosen deutlich. Da die Temperaturzunahme im Szenario RCP4.5 abgebremsst wird, steigt die Anzahl der Sommertage nur noch moderat auf etwa 75 bis 80 Sommertage im Bereich der Innenstadt (Abbildung 9-18). Die weitere Zunahme der Temperatur im Szenario RCP8.5 führt dagegen zu einer korrespondierenden deutlichen Zunahme der Anzahl der Sommertage. Schon im Bereich der Stadtränder werden bis über 100 Sommertage berechnet. In der Innenstadt steigt die Zahl bis auf über 105 Tage. An rund 30 % der Tage eines Jahres wären dann Höchsttemperaturen über 25°C zu erwarten.

Ein ähnliches Bild zeigt der Indikator der heißen Tage. In der Klimanormalperiode 1971-2000 liegt die Anzahl der heißen Tage bei bis zu 13 Tagen in der Innenstadt (Abbildung 9-19). Im Szenario RCP8.5 steigt die mittlere Anzahl bis zur Mitte des Jahrhunderts bereits bis auf etwa 28 Tage und bis Ende des Jahrhunderts weiter auf über 50 Tage. Dies entspricht einer Dauer von über 1,5 Monaten pro Jahr, in denen Höchsttemperaturen über 30°C auftreten. Zum Vergleich: an der DWD-Station Stuttgart-Schnarrenberg wurden im Jahr 2003 93 Sommertage und 28 heiße Tage registriert. Die Hitzebelastung der Bevölkerung wird in diesem Szenario bis Ende des Jahrhunderts deutlich ansteigen.

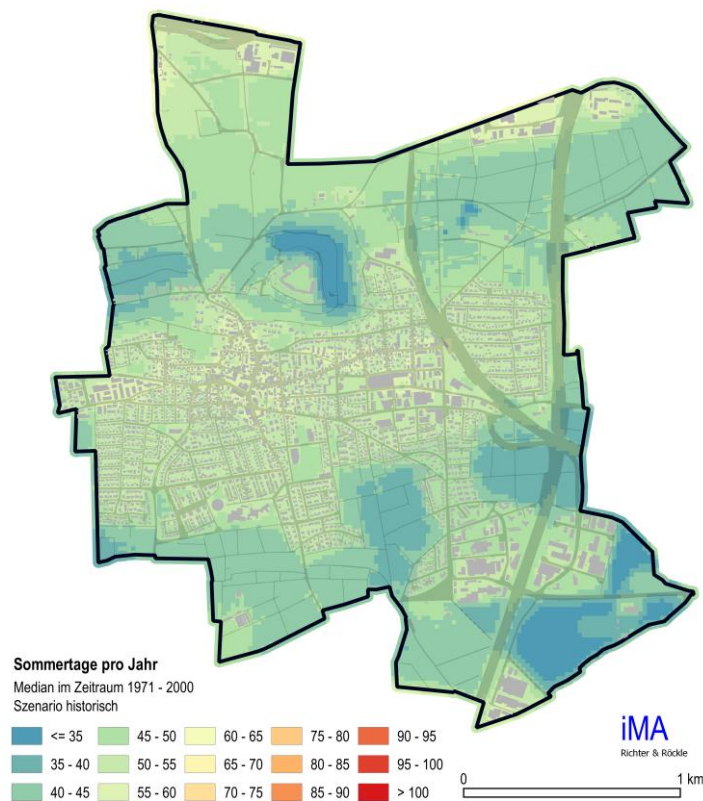


Abbildung 9-16: Mittlere Anzahl der jährlichen Sommertage im Zeitraum 1971-2000.

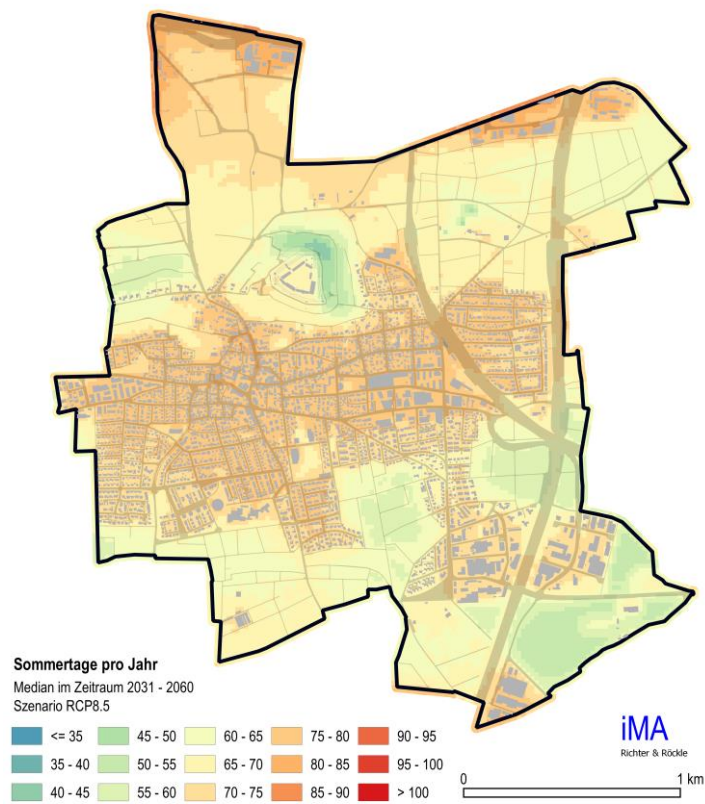
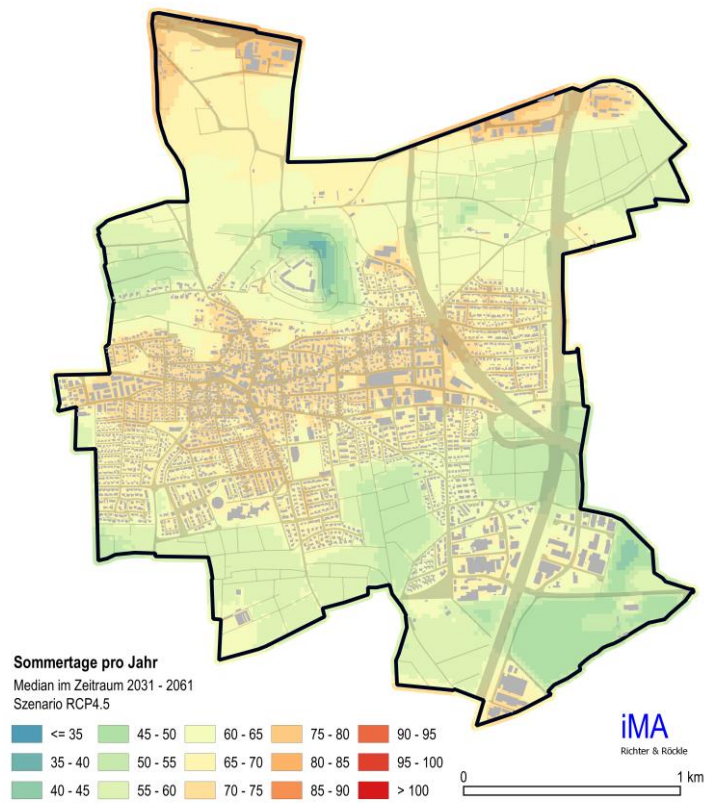


Abbildung 9-17: Prognostizierte mittlere Anzahl der Sommertage im Zeitraum 2031-2060 unter Verwendung der Szenarien RCP 4.5 (oben) und RCP 8.5 (unten).

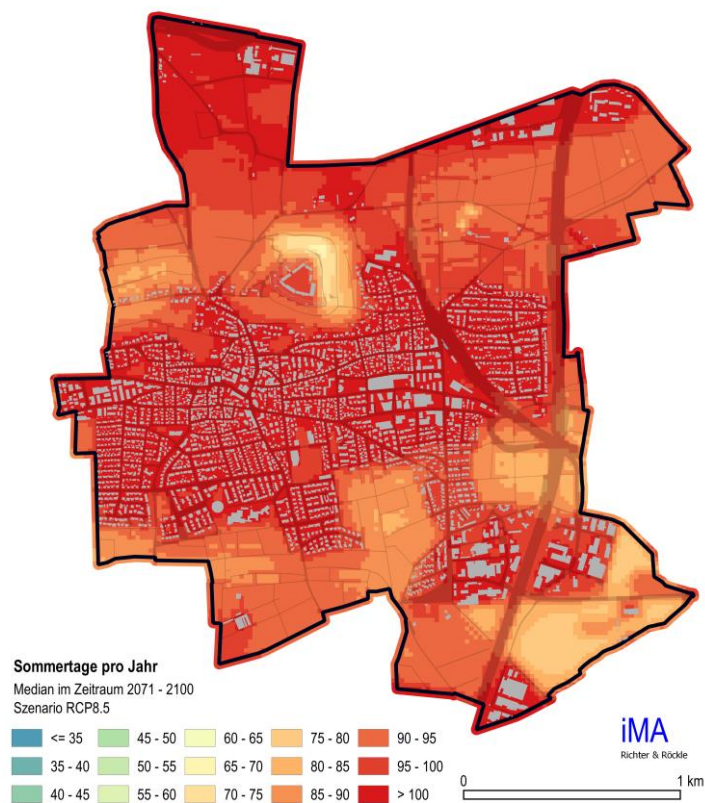
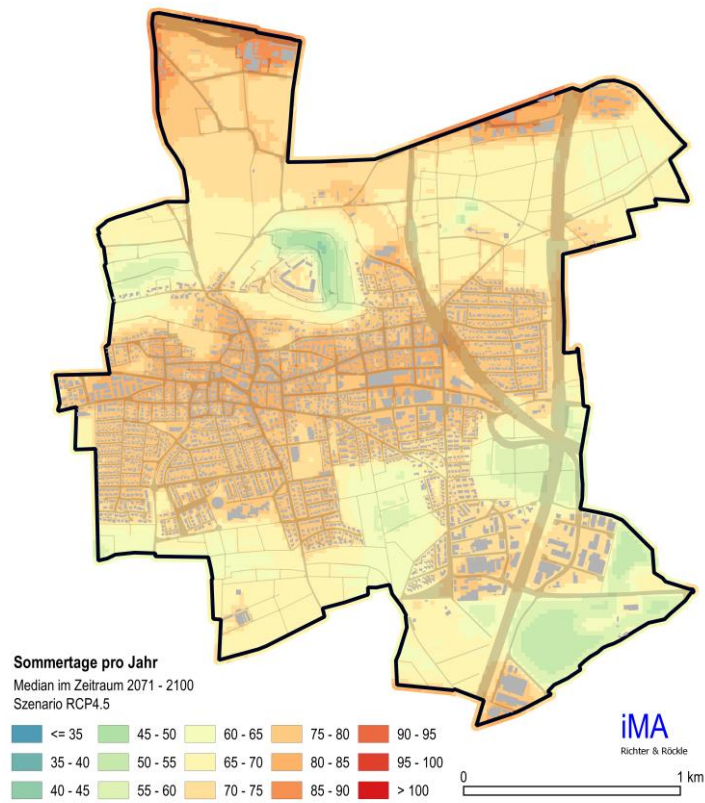


Abbildung 9-18: Prognostizierte mittlere Anzahl der Sommertage im Zeitraum 2071-2100 unter Verwendung der Szenarien RCP 4.5 (oben) und RCP 8.5 (unten).

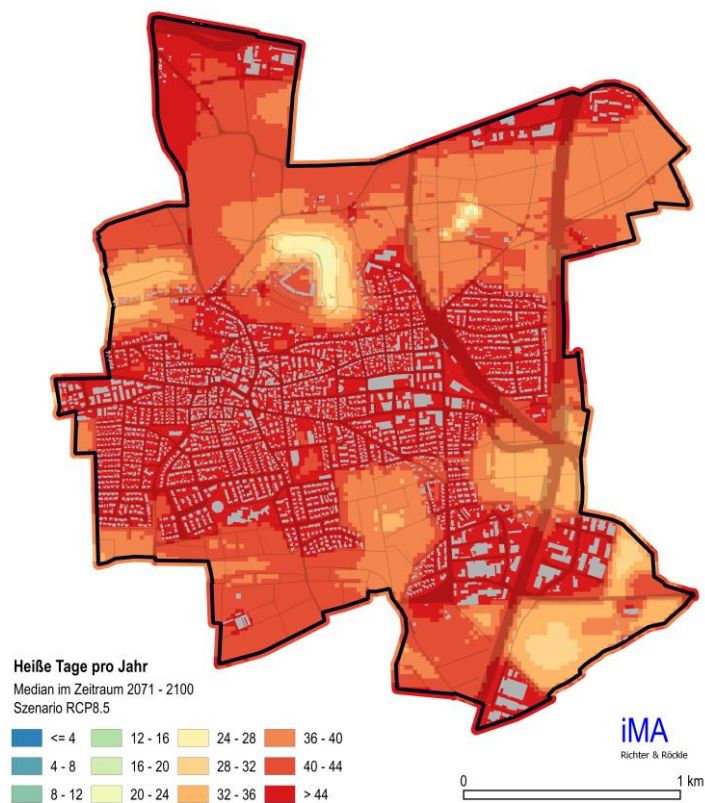
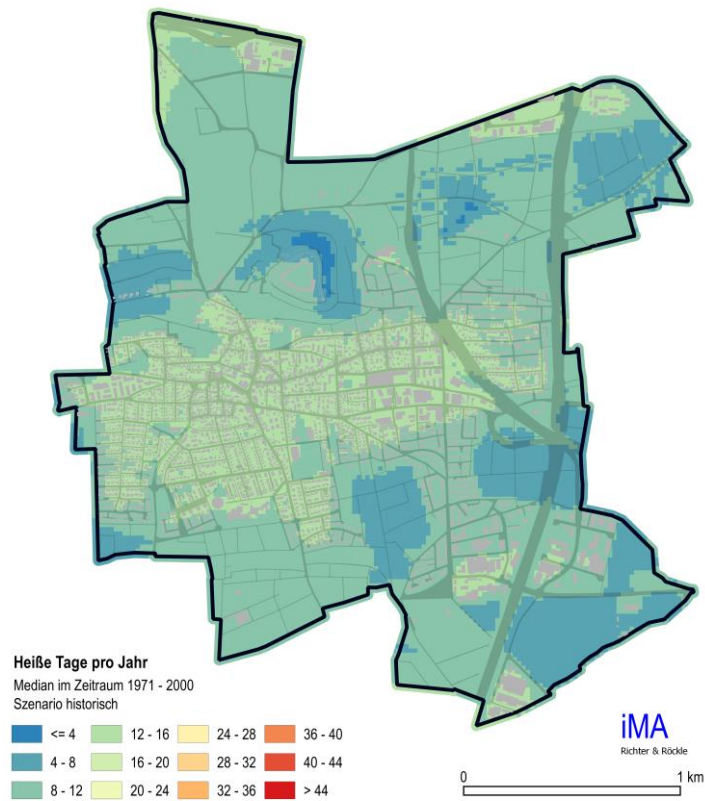


Abbildung 9-19: Mittlere Anzahl der jährlichen heißen Tage im Zeitraum 1971-2000 (oben) bzw. 2071-2100 unter Verwendung des Szenarios RCP 8.5 (unten).

10 Handlungsstrategien für die Stadtplanung

Dieses Kapitel stellt Handlungsstrategien für die klimarelevanten Aspekte der Durchlüftung, der thermischen und der lufthygienischen Belastung zusammen. Die Strategien bzw. Empfehlungen beruhen auf den Modellergebnissen, der wissenschaftlichen Literatur, aber auch auf den Inhalten der Städtebaulichen Klimafibel (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg & Amt für Umweltschutz Stuttgart (2012)) oder der Regionalen Klimaanalyse der Region Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO (2009)).

Da es für lokalklimatische Größen keine Grenzwerte gibt und auch die Ziele (z.B. Wahrung gesunder Wohn- und Arbeitsverhältnisse, BauGB §34 Absatz 1 oder §136 Absatz 2 Punkt 1) nicht konkret formuliert sind, können Maßnahmen nicht zwingend gefordert werden. Vielmehr gilt ein Minimierungsgebot, d.h. unerwünschte Auswirkungen sind unter Beachtung anderer Anforderungen weitgehend zu reduzieren.

Bei den Handlungsstrategien handelt es sich um voneinander unabhängige Optionen. Diese können für unterschiedliche Zielsetzungen zueinander in Konflikt stehen. Zum Beispiel kann eine Begrünung des Straßenraumes mit Bäumen human-bioklimatisch positiv sein, da Wege im Schatten zurückgelegt werden können. Jedoch reduzieren Bäume den Luftaustausch im Straßenraum wodurch die Luftbelastung erhöht wird. Im Einzelfall ist daher die Wahl der Maßnahmen zu prüfen und abzuwägen welche Ziele die größere Priorität haben.

10.1 Maßnahmen zur Verbesserung und Erhaltung der Durchlüftung

Eine ausreichende Durchlüftung vermeidet oder reduziert die Akkumulation von thermischen und lufthygienischen Belastungen. Dies ist insbesondere bei austauscharmen Wetterlagen (z.B. autochthonen Wetterlagen) relevant. Zum einen sind hier Kaltluftproduktionsflächen und Geländeneigungen, zum anderen möglichst hindernisarme Fließwege zu belasteten Bereichen erforderlich. Um das bodennahe Eindringen von Kaltluft in Siedlungsbereiche zu ermöglichen, sind Luftleitbahnen in Fließrichtung der Kaltluft hilfreich.

Folgende Punkte tragen zum Erhalt des Luftaustauschs bei oder verbessern diesen (vgl. hierzu auch Abbildung 10-1):

- Freihalten von Kaltluftproduktionsflächen und Luftleitbahnen von geschlossener Bebauung oder riegelbildenden Hindernissen,
- Schaffung von Grünzügen innerhalb der Siedlungskörper als Belüftungsschneisen und Luftleitbahnen,
- Begrenzung von Gebäudehöhen, um das Überdachniveau niedrig zu halten,
- Bau von strömungsdurchlässigen Siedlungsbereichen mit Luftleitbahnen,
- Offene Gestaltung von Siedlungsrändern für eine möglichst hohe Eindringtiefe,
- Ausrichtung von Straßenzügen längs zur vorherrschenden, für den Luftaustausch relevanten Windrichtung.

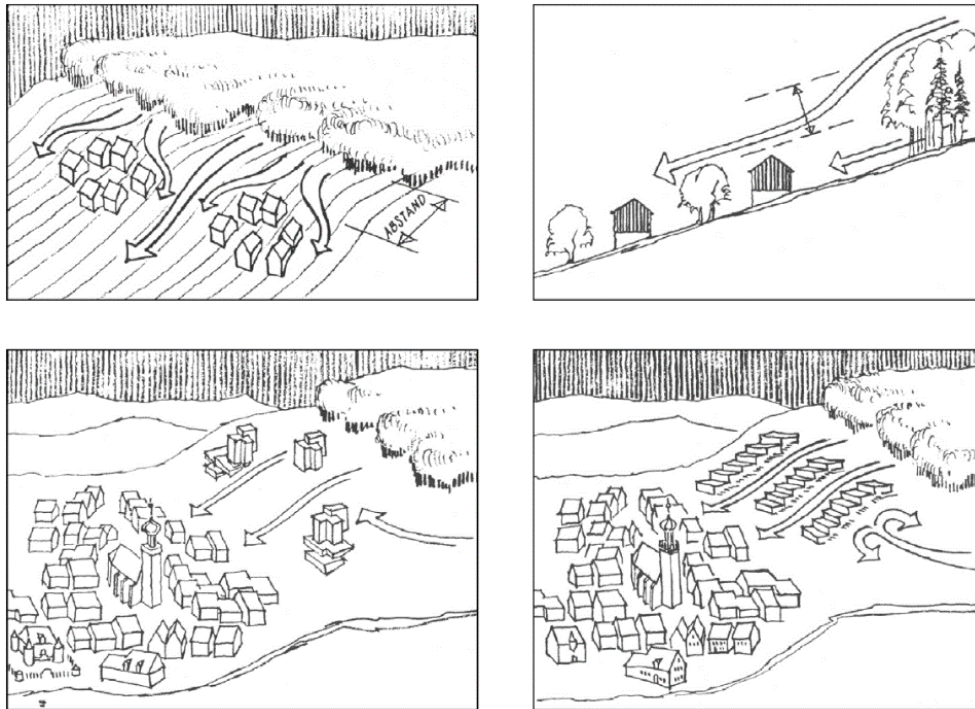


Abbildung 10-1: Empfehlungen zur Bebauung von Hanglagen aus der Städtebaulichen Klimafibel: Einhaltung eines möglichst großen Abstands von Waldrändern (oben links), Unterschreitung der Gebäudehöhe bezüglich der Höhe bestehender Hindernisse (oben rechts), bevorzugt punktförmige Bebauung (unten links) und Ausrichtung der Gebäude längs der Richtung von Hangabwinden unter Berücksichtigung anderer dominierender Windrichtungen (Baumüller, Hoffmann und Reuter, 1990).

10.2 Maßnahmen zur Reduktion der thermischen Belastung

Für die Reduktion von thermischen Belastungen sollte vorrangig die Erhaltung und Gewinnung von Vegetationsflächen betrachtet werden. Die in Kapitel 10.1 aufgeführten Handlungsstrategien zur Erhaltung bzw. Verbesserung der Durchlüftung können sich darüber hinaus ebenso positiv auswirken (z.B. durch Kalt- und Frischluftzufuhr und Abtransport der Wärme). Eine höhere Windgeschwindigkeit hingegen kann die thermische Belastung des Menschen sowohl reduzieren (erhöhte Schweißverdunstung bei Hitzestress) als auch erhöhen (Auskühlung bei Kältestress).

Die hier betrachteten Handlungsstrategien beziehen sich hauptsächlich auf sommerliche Wärmebelastung. Hinsichtlich winterlichen Kältestresses sind weitere Maßnahmen der REKLISO-Untersuchung zu entnehmen.

Je nach Durchlüftungssituation des Siedlungsgebiets sollten folgende Handlungsstrategien zum Erhalt oder der Verbesserung der Wärmebelastung berücksichtigt werden:

- Vermeidung oder Minimierung von versiegelten Flächen (z.B. mittels Grünflächen, permeabler Asphalt, Graspittersteine, Kfz-Stellflächen unter die Erde verlegen, Brunnen),
- Vermeidung von Stein- und Schotterflächen in den Vorgärten und sonstigen privaten Grünflächen,
- Verschattung versiegelter Bereiche (insbesondere von Kfz-Stellflächen),
- Förderung kleiner auch privater Grünflächen,

- Ausreichend innerstädtische Grünflächen mit Baumbestand größer 0,5 ha, um die Klimavielfalt zu erhalten oder zu fördern,
- Innenhof- oder Straßenraumbepflanzungen,
- Dachbegrünung und Dächer mit heller Farbe, die die Sonnenstrahlung reflektieren („cool Roofs“) zur Reduktion der Temperatur im Dachniveau; konkurrieren evtl. mit Klimaschutzmaßnahmen, wie z.B. Solarzellen, wobei eine bessere Dämmung auch durch Dachbegrünung ebenfalls zum Klimaschutz beiträgt,
- Kombination von extensiver Dachbegrünung und Solarzellen,
- Fassadenbegrünungen (Verschattung der Wand, geringere Reflektion der Sonnenstrahlung, geringere Schallreflexion (siehe Abbildung 10-2),
- Neubauten nach aktuellen GEG¹¹-Standards oder besser (Reduktion der Abwärme, besseres Abkühlverhalten in den Nachtstunden als Bestand),
- Erhaltung von Kaltluftproduktions- und Kaltlufttransportgebieten,
- Vermeidung der Ansiedlung von Abwärmeproduzenten (insbesondere entlang von Luftleitbahnen).

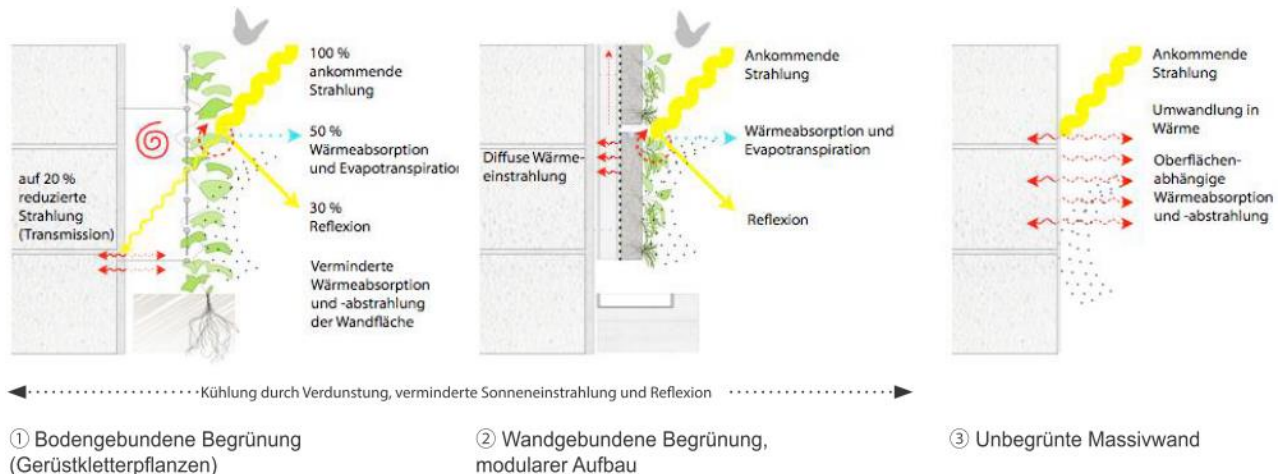


Abbildung 10-2: Einfluss der Fassadenbegrünung auf das Mikroklima. Erhöhte Lebensdauer der Fassade durch reduzierte Sonneneinstrahlung/UV-Belastung und Schlagregenschutz der Außenwand (© Nicole Pfoser, Dettmar, Pfoser & Sieber (2016)).

Die Wirkung einer einzelnen Anpassungsmaßnahme führt vorerst nur lokal zu einer Verbesserung des Klimas. Erst das Zusammenwirken von mehreren Maßnahmen bewirkt einen Rückgang der städtischen Wärmeinsel. Besonders effizient sind Abschattungsmaßnahmen sowie unversiegelte Flächen, die eine Umsetzung der eingehenden Sonnenenergie in Verdunstungswärme (latenter Wärmestrom) anstatt einer Erhöhung der Temperatur (fühlbarer Wärmestrom) bewirken.

Nicht zu unterschätzen sind die psychologischen Wirkungen innerstädtischer Grünbereiche, die evtl. lokalklimatisch kaum Bedeutung haben, aber die Aufenthaltsqualität positiv beeinflussen. Auch siedlungsnahen Grünflächen können die Klimavielfalt erhöhen und haben einen positiven psychologischen Einfluss. Die Aufenthaltsqualität solcher Grünflächen kann z.B. durch entsprechende Sitzgelegenheiten in Schattenbereichen erhöht werden. Siedlungsnahen Feldwege können durch die

¹¹ Gebäudeenergieeinsparungsgesetz. Hat die EnEV im November 2020 abgelöst.

Erhöhung des Anteils von Straßenbegleitgrün (Pflanzung von schattenspendenden Bäumen) ebenfalls in Flächen mit Aufenthaltsqualität umgewandelt werden.

Klimaschutz- und Adaptationsmaßnahmen können sowohl konkurrieren (Solaranlage vs. Dachbegrünung) als sich auch ergänzen. In Tabelle 10-1 wird diese sich ergänzende Wirkung am Beispiel von städtischen Begrünungsmaßnahmen dargestellt.

Tabelle 10-1: Wirkungskatalog von Begrünungsmaßnahmen hinsichtlich des Klimaschutzes und der Klimaanpassung.

Wirkungen bezüglich Klimaschutz	Wirkungen bezüglich Klimaanpassung	Sonstige Wirkungen
<ol style="list-style-type: none"> 1. Sauerstoffproduktion 2. Kohlenstoffspeicherung 3. Verbesserung der CO₂-Bilanz <ul style="list-style-type: none"> - durch Photosynthese - durch Reduktion des Heizwärme- und Kühlbedarfs - durch Lebensdauererlängerung von Materialien durch Abschattung materialschädigender UV-Strahlung 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Stadtbegrünung 2. Grünflächen mit geringer Rauigkeit dienen als Luftleitbahnen und tragen zur besseren Durchlüftung bei 3. Reduktion des Energiebedarfs (Klimaanlage und Heizbedarf) 4. Erhöhte Verdunstung = verringerte Aufheizung der künstlichen Materialien sowie geringer Anstieg der Lufttemperatur 5. Kühlung durch Verschattung 6. Verringerung der urbanen Wärmeinsel 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verringerte Schallreflexion 2. Attraktiverer Lebensraum 3. Verringerung der Luftbelastung durch verbesserte Durchlüftung und Reduktion des Energiebedarfs

Freiburg, den 23.05.2022



Dr. Markus Hasel
Stellv. fachlich Verantwortlicher Klima
Diplom-Meteorologe



Dr. Tobias Gronemeier
Modellentwickler Palm, Sachverständiger
M. Sc. Meteorologie



Dr. Rainer Röckle
Geschäftsleitung
Diplom-Meteorologe



Dr. Christine Ketterer
Fachlich Verantwortliche Klima
M.Sc. in Climate Sciences

Dieser Bericht wurde nach den Anforderungen unseres Qualitätsmanagementsystems nach DIN 17025 erstellt. Er darf ohne die Genehmigung der iMA Richter & Röckle GmbH und Co. KG weder ganz noch in Teilen weitergegeben oder vervielfältigt werden.

11 Literatur

- Basu, R.** (2009): High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environmental Health* (8)1: 40.
- Baumüller, J., U. Reuter, U. Hoffmann & H. Esswein** (2008): 26 Klimaatlas Region Stuttgart. Verband Region Stuttgart, Stuttgart.
- BMUB** (2015): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Grün in der Stadt – Für eine lebenswerte Zukunft | Grünbuch Stadtgrün. : 100.
- Brasseur, G., D. Jacob & S. Schuck-Zöller eds.** (2017): Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer Spektrum, Berlin.
- Christidis, N., G.S. Jones & P.A. Stott** (2015): Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave, *Nature Publishing Group. Nature Climate Change* (5)1: 46–50.
- Dettmar, J., N. Pfoser & S. Sieber** (2016): Gutachten Fassadenbegrünung. TU Darmstadt, 100S.
- Deutscher Wetterdienst** (2021): Climate Data Services.
- Früh, B., P. Becker, T. Deutschländer, J.-D. Hessel, M. Kossmann, I. Mieskes, J. Namyslo, M. Roos, U. Sievers, T. Steigerwald, H. Turau & U. Wienert** (2011): Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* (50)1: 167–184.
- Gehrke, K.F., M. Sühling & B. Maronga** (2021): Modeling of land–surface interactions in the PALM model system 6.0: land surface model description, first evaluation, and sensitivity to model parameters. *Geoscientific Model Development* (14)8: 5307–5329.
- Grize, L., A. Huss, O. Thommen, C. Schindler & C. Braun-Fahrländer** (2005): Heat wave 2003 and mortality in Switzerland. *Swiss Medical Weekly* (135)13–14: 200–205.
- Gronemeier, T., K. Surm, F. Harms, B. Leidl, B. Maronga & S. Raasch** (2021): Evaluation of the dynamic core of the PALM model system 6.0 in a neutrally stratified urban environment: comparison between LES and wind-tunnel experiments. *Geoscientific Model Development* (14)6: 3317–3333.
- Häckel, H.** (2005): *Meteorologie*. Ulmer, Stuttgart (Hohenheim).
- Hewitt, C.D.** (2004): Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts. *Eos, Transactions American Geophysical Union* (85)52: 566.
- IPCC ed.** (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN (Hrsg.)** (1988): *Stadtklima und Luftreinhaltung - Ein wissenschaftliches Handbuch für die Praxis in der Umweltplanung*.
- LUBW** (2021): Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Synthetische Windstatistiken.
- Maronga, B., S. Banzhaf, C. Burmeister, T. Esch, R. Forkel, D. Fröhlich, V. Fuka, K.F. Gehrke, J. Gelečić, S. Giersch, T. Gronemeier, G. Groß, W. Heldens, A. Hellsten, F. Hoffmann, A. Inagaki, E. Kadasch, F. Kanani-Sühling, K. Ketelsen, B.A. Khan, C. Knigge, H. Knoop, P. Krč, M. Kurppa, H. Maamari, A. Matzarakis, M. Mauder, M. Pallasch, D. Pavlik, J. Pfafferott, J. Resler, S. Rissmann, E. Russo, M. Salim, M. Schrempf, J. Schwenkel, G. Seckmeyer, S. Schubert, M. Sühling, R. von Tils, L. Vollmer, S. Ward, B. Witha, H. Wurps, J. Zeidler & S. Raasch** (2020): Overview of the PALM model system 6.0. *Geoscientific Model Development* (13)3: 1335–1372.

- Matzarakis, A. & H. Mayer** (1997): Heat stress in Greece. *International Journal of Biometeorology* (41)1: 34–39.
- Mayer, H.** (1989): Workshop “Ideales Stadtklima” am 26. Oktober 1988 in München. *DMG Mitteilungen* 3: 52–54.
- Mayer, H., W. Beckröge & A. Matzarakis** (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. *UVP-report* (5): 265–268.
- Mayer, H. & P.R. Höppe** (1987): Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology* (38)1: 43–49.
- Mayer, H. & A. Matzarakis** (1992): Stadtklimarelevante Luftströmungen im Münchner Stadtgebiet: (Forschungsvorhaben STADTLUFT), Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Universität München (Ed).
- Moss, R.H., M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J.A. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, E. Lin, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J.F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O’Neill, R. Pichs, K. Riahi, S. Rose, P.J. Runci, R. Stouffer, D. VanVuuren, J. Weyant, T. Wilbanks, J.P. van Ypersele & M. Zurek** (2008): Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- Murphy, J.M., D.M.H. Sexton, D.N. Barnett, G.S. Jones, M.J. Webb, M. Collins & D.A. Stainforth** (2004): Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature* (430)7001: 768–772.
- REKLIBO** (2009): Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben: Wissenschaftlicher Abschlussbericht Band 3.
- Resler, J., K. Eben, J. Geletič, P. Krč, M. Rosecký, M. Sührling, M. Belda, V. Fuka, T. Halenka, P. Huszár, J. Karlický, N. Benešová, J. Ďoubalová, K. Honzáková, J. Keder, Š. Nápravníková & O. Vlček** (2021): Validation of the PALM model system 6.0 in a real urban environment: a case study in Dejvice, Prague, the Czech Republic. *Geoscientific Model Development* (14)8: 4797–4842.
- Richter, B., K. Grunewald & G. Meinel** (2016): Analyse von Wegedistanzen in Städten zur Verifizierung des Ökosystemleistungsindikators „Erreichbarkeit städtischer Grünflächen“. Wichmann Verlag, DE.
- Robine, J.-M., S.L.K. Cheung, S. Le Roy, H. Van Oyen, C. Griffiths, J.-P. Michel & F.R. Herrmann** (2008): Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies* (331)2: 171–178.
- Schär, C., P.L. Vidale, D. Lüthi, C. Frei, C. Häberli, M.A. Liniger & C. Appenzeller** (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* (427)6972: 332–336.
- Schirmer, H. & W. Buschner** (1987): Meyers kleines Lexikon “Meteorologie.” Meyers Lexikonverlag, Mannheim and Wien and Zürich.
- Schumacher, U., I. Lehmann & M. Behnisch** (2016): Modellansatz zur geotopographischen Analyse von Wohngebieten und urbaner grüner Infrastruktur. Wichmann Verlag, DE.
- UBA** (2022): Indikator: Heiße Tage.
- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1** (1997): Umweltmeteorologie - Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen.
- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1** (2015): Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen.

- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2** (2015): Umweltmeteorologie, Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima.
- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5** (2003): Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft.
- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 10** (2010): Umweltmeteorologie. Human- biometeorologische Anforderungen im Bereich Erholung, Prävention, Heilung und Rehabilitation.
- van Vuuren, D.P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G.C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S.J. Smith & S.K. Rose** (2011): The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* (109)1: 5.
- Wang, Y., L.R. Leung, J.L. McGREGOR, D.-K. Lee, W.-C. Wang, Y. Ding & F. Kimura** (2004): Regional Climate Modeling: Progress, Challenges, and Prospects. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II (82)6: 1599–1628.
- Weischet, W. & W. Endlicher** (2018): Einführung in die allgemeine Klimatologie. Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin Stuttgart.
- Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg & Amt für Umweltschutz Stuttgart** (2012): Städtbauliche Klimafibel. URL: <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/> (May 19, 2022).
- Zander, K.K., W.J.W. Botzen, E. Oppermann, T. Kjellström & S.T. Garnett** (2015): Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia. *Nature Climate Change* (5)7: 647–651.

A1 Daten und Methodik

A1.1 Aufbereitung der Eingangsdaten für FITNAH

Die im Flächennutzungsplan und in den ATKIS-Daten vorhandene Landnutzung wurde in folgende „klimatologische Nutzungskategorien“ überführt:

Tabelle A1-1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung.

Bezeichnung	Beschreibung
Wasser	Still- und Fließgewässer
Freiland	Äcker, Wiesen, Weiden, Gärten, Grünflächen
Wald/Bäume	Nadelbäume und Nadelwald, Laubbäume und Laubwald sowie Mischwald werden unterschieden
Streuobstwiese	Streuobstwiesen, Obstplantagen und Baumschulen
Weinanbau	Weinanbauflächen
Gehölz	Buschartige Gehölzflächen von geringer Höhe
Moor, Sumpf	Moor, Sümpfe, feuchte Grünflächen
Hafenanlage/Schleuse	Hafenanlage/Schleuse
naturnahe Flächen	Teilversiegelte Flächen mit Grün-/Baumanteil, z.B. Campingplätze, Parks
versiegelte Flächen	Parkplätze, Verkehrsflächen etc.
baulich geprägte Grünfläche (< 25 % Bebauung)	Grünfläche mit weniger als 25 % Bebauung
lockere Bebauung (> 25 % Bebauung)	25-50 % Bebauung
mittlere Bebauung (> 50 % Bebauung)	50-75 % Bebauung
dichte Bebauung (> 75 % Bebauung)	75-85 % Bebauung
Zentrum (> 85 % Bebauung)	> 85 % Bebauung
Mischgebiete	Gebiete mit Gewerbe- und Wohnnutzungen
Gewerbe und Industrie	stark versiegelte Flächen mit Gebäuden; Wärmeemission von z.B. Kraftwerken wird berücksichtigt
Deponien, Halden, Tagebau/Bergbau	verdichtete Böden mit geringem Vegetationsbestand.

A1.2 Methodik

A1.2.1 Das prognostische Modell FITNAH

FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat-Sources) ist ein mathematisch-physikalisches Strömungsmodell. Das Modell FITNAH löst die dreidimensionalen Bewegungsgleichungen zur Berechnung der Strömung. Zur Bestimmung der Oberflächentemperatur werden bodenspezifische Parameter (Bodenart, Feuchte usw.) durch ein implementiertes Bodenmodell berücksichtigt. Des Weiteren werden auch Turbulenzparameter, Lufttemperatur und Luftfeuchte berechnet. Das Modell simuliert abhängig vom Sonnenstand die Erwärmung bzw. die nächtliche Abkühlung der bodennahen Luft.

Als so genanntes „nicht-hydrostatisches, prognostisches“ Modell beruht es auf einem voll-dynamischen Strömungskern auf Basis der Gleichungen für alle drei Windkomponenten (Navier-Stokes-Gleichungen für die Komponenten des Windvektors im 3D-Raum, x-, y- und z-Richtung) sowie auf

den Bilanzgleichungen für Temperatur, Feuchte und Turbulenzenergie. Diese (miteinander gekoppelten) Gleichungen werden auf einem numerischen dreidimensionalen Gitter in kleinen Zeitschritten gelöst, so dass sich die vielfältigen nicht-linearen Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Topographiebereichen, vergleichbar der Natur, sukzessive einstellen und der von der Natur erzielte Gleichgewichtszustand zwischen den unterschiedlichen strömungsbeeinflussenden Effekten realistisch berechnet wird.

Die Landnutzungsdaten gehen, differenziert nach Bestands- bzw. Bebauungshöhen und ihren jeweiligen Flächenanteilen an jeder Rechenzelle ein.

Das Modell FITNAH ist vielfach validiert und von zahlreichen Fachbehörden als eines der leistungsfähigsten Instrumente zur Simulation meteorologischer Phänomene im Bereich der Umweltmeteorologie anerkannt.

A1.2.2 Berechnung der Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit der Bevölkerung wird aus der Einwohnerdichte pro 50 m x 50 m unter Berücksichtigung klimasensibler Nutzung (z.B. Krankenhäuser, Sanatorien, Pflegeheime und Kindertagesstätten) berechnet. Die Bewertung der Einwohnerdichte erfolgt relativ durch Berechnung der Perzentile bezogen auf die Gesamtbevölkerung im Stadtgebiet Asperg (Tabelle A1-2). Die Tabelle zeigt beispielsweise, dass 50 % der Bevölkerung auf Flächen wohnen, deren Einwohnerdichte bis 14 Einwohner je 50 m x 50 m beträgt.

Tabelle A1-2: Bewertung der Einwohnerdichte je 50 m x 50 m (Bewertung A1, siehe Abschnitt A1.2.4).

Perzentil	Einwohner / ha	Bewertung
≤ 25.	≤ 6	sehr geringe Empfindlichkeit
> 25. – 50.	> 6 – 14	geringe Empfindlichkeit
> 50. – 75.	> 14 – 25	mittlere Empfindlichkeit
> 75. – 95.	> 25 – 42	hohe Empfindlichkeit
> 95.	> 42	sehr hohe Empfindlichkeit
Klimasensible Nutzung		sehr hohe Empfindlichkeit

A1.2.3 Berechnung der Betroffenheit

A1.2.3.1 Thermische Betroffenheit

Die Betroffenheit der Bevölkerung kann aus der Zusammenschau der Empfindlichkeit mit der thermischen Belastung ermittelt werden.

Die Betroffenheit wird aus der Summe der Bewertung folgender Parameter und meteorologischen Größen berechnet

Empfindlichkeit

A1 – Einwohnerdichte pro Hektar

Bewertung thermische Bedingungen

B1 – Physiologisch Äquivalente Temperatur (Wärmebelastung tagsüber, Tabelle A1-3),

B2 – Klimavielfalt (Berücksichtigung der Entfernung zu thermisch geringer belasteten, öffentlich zugänglichen, klimatisch relevanten Grün- und Wasserflächen innerhalb Ortslagen, Tabelle A1-4),

B3 – Urbane Wärmeinsel (Wärmebelastung nachts, Tabelle A1-6).

Tabelle A1-3: Bewertung B1 der Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) angelehnt an Matzarakis & Mayer (1997).

PET (°C)	Thermische Sensitivität
< 35	warm
> 35 – 41	heiß
> 41	sehr heiß

Tabelle A1-4: Bewertung der Klimavielfalt B2 – Entfernung zu einer Grünfläche mit mindestens 5.000 m². Die Klassen wurden nach den gängigen Literaturwerten eingeteilt (z.B. Mayer (1989); Richter, Grunewald & Meinel (2016); Schumacher, Lehmann & Behnisch (2016)).

Distanz zu einer klimarelevanten Grünfläche	Beschreibung
< 250 m	Sehr gute Klimavielfalt vorhanden
250 m – 500 m	Klimavielfalt vorhanden
> 500 m	Keine Klimavielfalt

Während sich die Physiologisch Äquivalente Temperatur tagsüber – bedingt durch den großen Einfluss der solaren Strahlungsflüsse – stark von der Lufttemperatur unterscheidet, korreliert sie nachts signifikant mit der Lufttemperatur. Die nächtliche Wärmebelastung wurde anhand der Lufttemperatur in Form der urbanen Wärmeinsel bewertet.

Tabelle A1-5: Wärmebelastung tagsüber ermittelt aus PET und der Klimavielfalt.

Wärmebelastung tagsüber					
		PET (°C) um 14:00 Uhr (Parameter B1)			
		<29°C	>29°C - 35°C	>35°C - 41°C	>41°C
Klimavielfalt (Parameter B 2)	sehr gute Klimavielfalt vorhanden	sehr gering	sehr gering	gering	mittel
	Klimavielfalt vorhanden	sehr gering	gering	mittel	hoch
	keine Klimavielfalt vorhanden	sehr gering	mittel	hoch	hoch

Tabelle A1-6: Bewertung B3 der nächtlichen urbanen Wärmeinsel (UHI - abendliche Lufttemperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland in K).

Perzentil	UHI (K)	Bewertung (B3)
≤ 95.	≤ 0,7	keine Überwärmung
>95. – 98.	> 0,7 – 1,9	geringe Überwärmung
>98. – 99.	1,9 – 2,6	mäßige Überwärmung
>99. – 99,5.	2,6 – 2,9	mittlere Überwärmung
> 99,5.	>2,9	starke Überwärmung

Tabelle A1-7: Ermittlung der thermischen Belastung ermittelt aus der Wärmebelastung tagsüber und nachts.

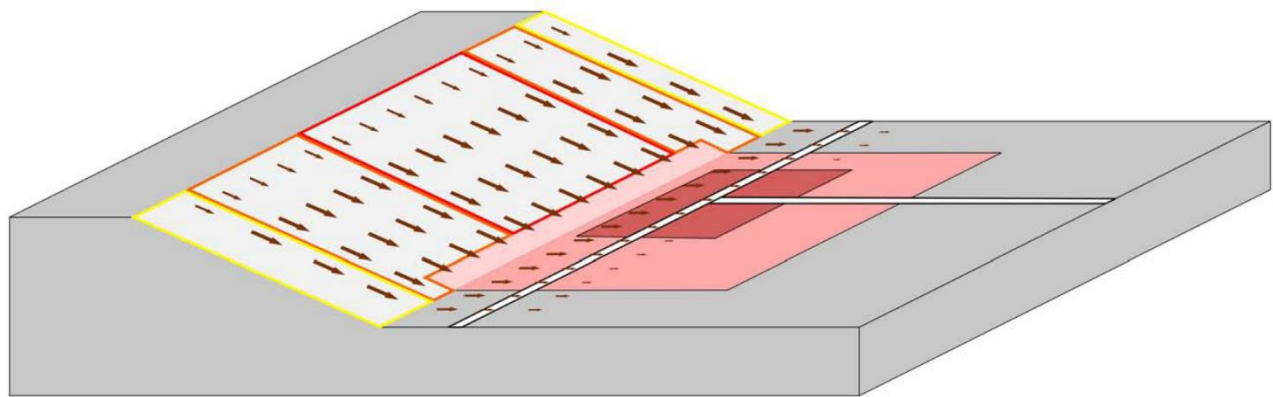
Thermische Belastung					
		Wärmebelastung tagsüber (ermittelt aus PET 14:00 Uhr)			
		sehr gering	gering	mittel	hoch
UHI Lufttemperatur nachts 4:00 Uhr (Parameter B3)	keine Überwärmung	sehr gering	sehr gering	sehr gering	sehr gering
	geringe Überwärmung	sehr gering	sehr gering	gering	gering
	mäßige Überwärmung	gering	gering	mittel	mittel
	mittlere Überwärmung	mittel	mittel	hoch	hoch
	starke Überwärmung	mittel	hoch	hoch	sehr hoch

Tabelle A1-8: Ermittlung der Betroffenheit ermittelt aus den Wertstufen der Tabelle „Empfindlichkeit der Bevölkerung“ und der Tabelle „Thermische Belastung“.

Betroffenheit (bioklimatische Belastung) der Bevölkerung / Siedlungsgebiete						
		Thermische Belastung				
		Wärmebelastung: Tag (PET: 12 Uhr) + Lufttemperatur 04 Uhr				
		sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Empfindlichkeit der Bevölkerung	gering	sehr gering	gering	gering	mittel	hoch
	mittel	gering	gering	mittel	hoch	hoch
	hoch	gering	mittel	hoch	hoch	sehr hoch
	sehr hoch	mittel	hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch

A1.2.4 Identifikation der belüftungsrelevanten Strömungssysteme

Kalt- und Frischluftströmungen, die relevanten Kaltluftproduktionsgebiete und die Luftleitbahnen sind im planerischen Sinne dann von Bedeutung, wenn sie die Belüftung von Siedlungsgebieten bewirken. Je größer die Betroffenheit in diesen Siedlungsgebieten ist, desto wichtiger ist diese ausgleichende Funktion (vgl. Abbildung A1-11-1).



- Siedlung locker bebaut
 Siedlung dicht bebaut
 Hangabwind
 Kaltluftzufuhr erhalten/aufwerten:
 höchste Priorität
 mittlere Priorität
 niedrige Priorität

Abbildung A1-11-1: Skizze zur Veranschaulichung der Abgrenzung der relevanten Strömungssysteme (REKLIBO (2009)).

Oftmals resultieren Ausgleichsströmungen aus mehreren Kaltluftströmungen, die auf ihrem Weg zum Wirkungsraum zusammenfließen oder sich überlagern. Um die Kaltluftströmungen zu detektieren, welche in belasteten Gebieten zu einer Verbesserung der thermischen Situation beitragen, bedarf es eines allgemein gültigen, objektiven Algorithmus, der für das ganze Untersuchungsgebiet angewandt werden kann. Zusätzlich soll der Algorithmus der Tatsache Rechnung tragen, dass i.A. die Bedeutung mit zunehmender Entfernung abnimmt.

Dazu sind zunächst die Strömungssysteme zu ermitteln. Dies erfolgt durch numerische Simulationen mit dem Mesoskalenmodell FITNAH. Auf die FITNAH-Kaltluft-Ergebnisse wird dann ein numerisch-physikalisches Analysemodell angewandt. Mit diesem Modell kann den o.g. Anforderungen entsprochen werden: Die Identifikation und Abgrenzung der komplexen Kaltluftströmungssysteme unter Berücksichtigung der Distanz zum Zielort. Mit diesem Werkzeug ist eine erste Eingrenzung der für einen Wirkungsraum zu betrachtenden Bereiche möglich.

Im zweiten Schritt werden aus jeder Rasterzelle, die sich in den ermittelten Bereichen befinden, Vorwärtstrajektorien in den Kaltluftströmungsfeldern von FITNAH gestartet. Den Windfeldern aus den FITNAH-Simulationen werden mit dem Verlauf der Vorwärtstrajektorien Attribute (wie z.B. die Betroffenheit) zugeordnet. Damit kann auch die thermische und lufthygienische Eigenschaft der Strömung im Vergleich zum Wirkungsraum eingeordnet werden. Mithilfe dieser Methode wird auch die Eindringtiefe in Zusammenhang mit der vorherrschenden Betroffenheit analysiert. Entlang der Trajektorie wird die thermische Betroffenheit addiert, die die Strömung vom jeweiligen Punkt erreicht (siehe Abbildung A1-11-2).

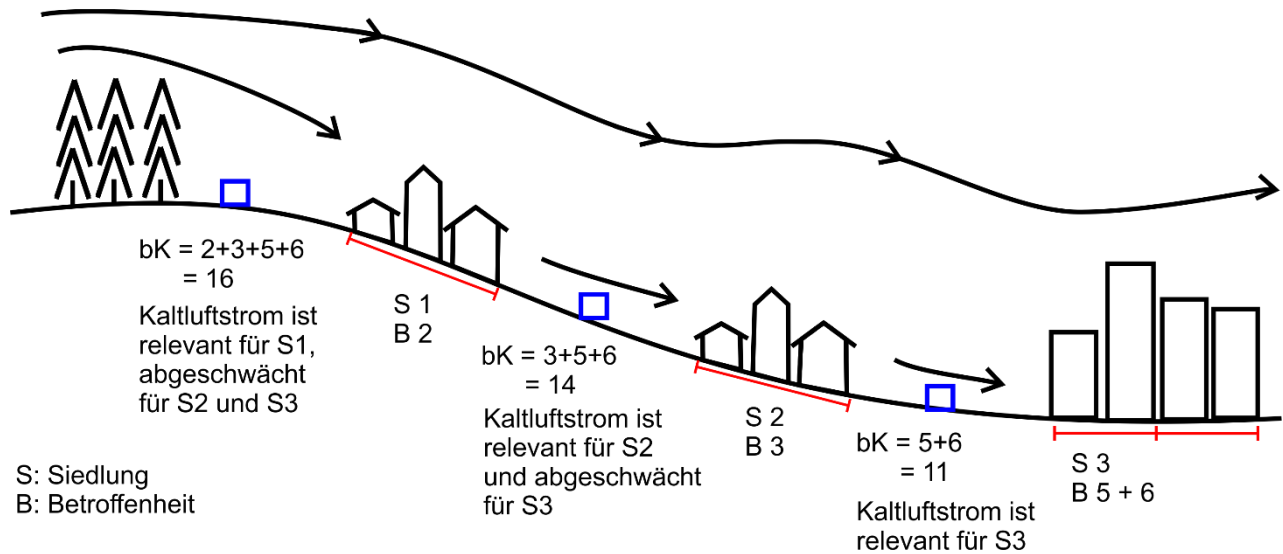


Abbildung A1-11-2: Bewertung der Kaltluftströmung (bK) durch Vorwärtstrajektorien.

Die Berechnung von Vorwärtstrajektorien zur Ermittlung der Bedeutung der Kaltluftströmung bK wird in Abbildung A1-11-2 dargestellt. Die blauen Kästchen markieren die Position eines Windpfeils, der bewertet werden soll. Die Betroffenheit der Siedlungen (S1 bis S3) wurde in der Stadtklimaanalyse Asperg in 50 m x 50 m Rasterzellen ermittelt (rote Begrenzungen unterhalb der Siedlungen, z.B. Betroffenheitswert 2 in Siedlung S1). Die Bewertung richtet sich nach der möglichen Belüftungswirkung der Strömung. Eine Strömung die mehrere oder stärker betroffene (empfindlichere) Siedlungsbereiche belüftet, erhält eine höhere Bewertungszahl. Die im oberen Hangbereich produzierte Kaltluft trägt dann zur Belüftung der nachfolgenden Siedlungsbereiche bei. Die Bewertungszahl ergibt sich als Summe der Betroffenheit der überstrichenen Siedlungen (hier $2 + 3 + 5 + 6$).

A2 Beschreibung der Klimatope

Die folgende Auflistung gibt für die einzelnen Klimatope die Kriterien an, die der Flächennutzungsanalyse zugrunde liegen; zusätzlich werden Angaben zu jeweils relevanten Immissionen gemacht. Außerdem werden Modifikationen einzelner Teilflächen angegeben, die sich aus Variationen der Nutzungen und Strukturen bzw. der lufthygienischen Situation ergeben.

Die Abbildungen sind Beispiele aus Luftbildern des Daten- und Kartendienstes der LUBW.

In der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015) zur Erstellung der Klimatop- bzw. Klimaanalysekarte werden zur Differenzierung der Siedlungsflächen in Vorstadt-, Stadtrand-, Stadt- und Innenstadtklimatop Versiegelungsdaten zur Rate gezogen. Da Informationen über die Versiegelung auf einzelnen Grundstücken für die Stadt Asperg nicht vorlagen, aber die Bebauung bekannt war, wurde die Bebauungsrate der Häuserblöcke berechnet und zur Klassifizierung genutzt. Um ein differenziertes Stadtbild zu erzielen und da die zur Berechnung verwendeten Wohnblöcke private Straßen und Parkplätze nicht einschlossen, wurde die Bebauungsrate niedriger angesetzt als die gegebenen Verdichtungsdaten der VDI-Richtlinie. In den vier relevanten Klimatopen ist unter dem Punkt „Bebauung“ angegeben, welche Bebauungsarten für das jeweilige Klimatop angewendet wurde.

A2.1 Gewässerklima

Wasserflächen wirken ausgleichend auf das lokale Klima. Da Gewässer nur einen geringen Tagesgang der Temperatur aufweisen, sind sie tagsüber kühler als die Umgebung und nachts eher wärmer. Die Wirksamkeit hängt von der Größe des Gewässers ab. So reicht z.B. der Einfluss von Flüssen und Seen weiter in die Nachbarschaft hinein als ein Brunnen auf einem Platz. Trotzdem kann ein Brunnen, wenn auch sehr lokal, die Aufenthaltsqualität an heißen Tagen verbessern.

Beispiele: Asperg verfügt über keine ausgedehnten natürlichen Wasserflächen.

A2.2 Freilandklimatop/Weinbauklimatop

In der Klimaanalysekarte mit „Freilandklima“ bzw. „Weinbauklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: < 10 %

Flächennutzung: Landwirtschaftliche Nutzfläche, Weide- oder Wiesengelände, Brachen.

Bebauung: nur einzelne Gebäude bzw. Straßen

Vegetation: flächendeckende landwirtschaftliche Nutzung bzw. Brachen mit niedriger oder jahreszeitlich bedingt fehlender Vegetation; nur einzelne Baumpflanzungen



Lufthygiene: relativ unbelastet; Quellen: Flächenbehandlung; Luftschadstoffe: Spritzmittel, Staub

b) Anmerkungen

Die meisten Freilandflächen sind nächtliche Kaltluftproduzenten. Die Kaltluft entsteht aufgrund der nächtlichen Ausstrahlung, wodurch eine starke Abkühlung der bodennahen Luftschichten erzielt wird. Je nach der Beschaffenheit des Entstehungsgebietes (Neigung, Lage, Bewuchs) bleibt die kühle Luft auf der Fläche liegen oder fließt – da sie dichter und damit spezifisch schwerer ist als warme Luft – der Schwerkraft folgend ab.

Die Bedeutung der Kaltluft in ihrer Wirkung für den Menschen muss differenziert betrachtet werden. Fließt lufthygienisch unbelastete Kaltluft in ein überwärmtes Stadtgebiet ein, so bringt sie Abkühlung und ersetzt die belastete städtische Luft; sie ist also thermisch und lufthygienisch als günstig zu beurteilen. Sammelt sich die kalte Luft in Mulden, Talauen oder Kaltluftstaubereichen, so ist sie sowohl thermisch als auch lufthygienisch für den Kaltluftstaubereich als ungünstig zu bewerten: es kommt zu erhöhter Frost- und Nebelbildung und durch die stabile Schichtung zur Anreicherung von Luftschadstoffen, sofern Emittenten im Sammelgebiet liegen.

Freiland weist eine geringe Bodenreibung auf, so dass die Windgeschwindigkeiten über diesen Flächen vergleichsweise hoch sind. Dies kann sich positiv auf die Durchlüftung angrenzender Wohngebiete auswirken. Die Flächen können sich allerdings tagsüber auch stark aufheizen und sind an heißen Tagen nicht für den längeren Aufenthalt geeignet. In den Nachtstunden kühlen sie sich hingegen gut ab und bilden in der Regel Kaltluftentstehungsflächen.

Beispiel: Die Freiflächen südlich des Bereichs Bürgergarten.

A2.3 Waldklima

In der Klimaanalysekarte mit „Waldklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Flächennutzung: überwiegend durch Laub- oder Nadelwald bestimmt (90 %).

Bebauung: nur einzelne Gebäude bzw. Straßen

Vegetation: überwiegend hohe, geschlossene Struktur. Das Kronendach der Bäume ist die Hauptumsatzfläche für energetische Prozesse

Lufthygiene: im Allgemeinen unbelastet; Filterwirkung für Stäube. Freisetzung von Pollen, Sporen



b) Anmerkungen

Das Wald-Klimatop zeichnet sich durch stark gedämpfte Tagesgänge der Lufttemperatur und Feuchte aus. Verschattung und Verdunstung sorgen tagsüber für niedrige Oberflächentemperaturen, nachts ist im Bestand die Ausstrahlung reduziert, so dass sich der Stammraum weniger abkühlt als z.B. Freiland. Zudem kommt dem Wald eine Filterwirkung für Luftschadstoffe zu.

Abhängig von der Bestandsdichte ist die Luft im Stammraum wenig mobil. Die Durchlüftung ist deshalb reduziert.

Auch die Kaltluftproduktion eines Waldes hängt von der Bestandsdichte ab. Die Hauptenergieumsatzfläche ist beim Wald nicht der Erdboden, sondern das Kronendach. Die dort durch nächtliche Ausstrahlung abgekühlten Luftmassen sinken in den Stammraum und fließen dort je nach Dichte des Waldes und insbesondere des Unterholzes mehr oder weniger gut ab.

Im Vergleich zu Freiland sind bewaldete Flächen aufgrund ihrer großen Oberfläche zwar gute Kaltluftproduzenten, der Abfluss ist aber deutlich reduziert. Waldflächen am Hang sind aufgrund ihrer Kaltluftproduktion eher positiv zu sehen, Waldflächen im Tal können dagegen als Strömungshindernis wirken.

Beispiel: Waldflächen im Osterholz.

A2.4 Klima innerstädtischer Grünanlagen

In der Klimaanalysekarte mit „Klima innerstädtischer Grünanlagen“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: < 20 %

Flächennutzung: Wiesenflächen und Parks

Bebauung: nur einzelne Gebäude bzw. Straßen

Vegetation: überwiegend hohe, geschlossene Struktur. Das Kronendach der Bäume ist die Hauptumsatzfläche für energetische Prozesse

Lufthygiene: durch städtische Emissionen belastet. Quellen: Hausbrand, Kfz-Verkehr. Luftschadstoffe hauptsächlich NO₂, Feinstäube.



b) Anmerkungen

Diese Flächen sind im Allgemeinen kleiner als Freiland- oder Waldflächen, verhalten sich (abhängig von der Stärke des Bewuchses) aber ähnlich wie diese. Der wesentliche positive Effekt dieser Klimatope ist die Schaffung einer lokalen Klimavielfalt, d.h. die Schaffung öffentlich zugänglicher Freiräume mit angenehmen klimatischen Bedingungen.

Stadtklimatische Ausgleichsfunktionen sind:

- Erhöhung der Klimavielfalt
- Kaltluftproduktion in der Nacht,
- Schattenspende durch Vegetation tagsüber,

- Erhöhung der Luftfeuchtigkeit durch die Verdunstungsleistung der Pflanzen,
- Temperatenausgleich im Sommer,
- bei geringem aerodynamischem Widerstand (also kein dichter Baumbestand) auch Wirkung als Luftleitbahn möglich.

Weitere positive Funktionen können sein:

- Rückhaltung und Versickerung von Regenwasser,
- Lebensraum für Tier- und Pflanzenarten,
- Auflockerung des Stadtbildes,
- Erholungsfunktion,
- Entlastung der Erholungsgebiete im Umfeld der Stadt,
- Soziale Funktion (Kommunikation, Nachbarschaft, ...).

Die Nutzung dieser Flächen kann durch Verkehrswege (Lärm, Luftschadstoffe) oder Barrieren (Zugänglichkeit) beeinträchtigt sein. Die klimatische Wirksamkeit von Freiflächen ist im Wesentlichen von ihrer Größe, den Reliefbedingungen und der Vegetationsstruktur aber auch von der Dichte und Durchlässigkeit der Randbebauung abhängig. Intensität und Reichweite der kühlenden Wirkung von Grünflächen steigen im Allgemeinen mit zunehmender Größe an. Bei Flächengrößen unter 5 ha sind jedoch nur geringe Lufttemperaturdifferenzen zur bebauten Umgebung festzustellen, insbesondere, wenn der Bodenwassergehalt aufgrund geringer Niederschlagsmengen gering und die Verdunstung damit eingeschränkt ist.

Beispiele: Lehenstraße.

A2.5 Sportanlagen-Klimatop

In der Klimaanalysekarte mit „Sportanlagen-Klima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

- Versiegelung: gering
- Flächennutzung: Sportanlagen
- Bebauung: vereinzelte Gebäude, z.B. Sporthallen
- Vegetation: vorwiegend Einzelbäume und Rasenflächen
- Lufthygiene: kaum Quellen auf dem Gebiet selbst



b) Anmerkungen

Freie Bereiche wie Trainingsplätze und Stadien behindern die Strömung nur wenig, bei entsprechender Lage können Sportanlagen daher zu Belüftung beitragen.

Beispiel: Sportanlage Osterholz.

A2.6 Vorstadt-Klimatop

In der Klimaanalysekarte mit „Vorstadtklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: < 30%

Flächennutzung: Wohnbebauung, Garten- und Freilandnutzung.

Bebauung: Einzel- und Doppelhäuser geringer Bauhöhe (1- bis 3-geschossig). (< 30%)

Vegetation: Garten- und Freilandnutzung; Einzelbäume oder Baumgruppen, Strauchvegetation, Wiesen- und Rasenflächen.

Lufthygiene: gering bis mäßig belastet. Quellen: Hausbrand, Kfz-Verkehr, Landwirtschaft. Luftschadstoffe hauptsächlich NO₂, Feinstäube.



b) Anmerkungen

Das Vorstadtklimatop liegt im Übergangsbereich zwischen den Klimatopen der bebauten Flächen und den Klimatopen des Freilandes. Charakteristisch sind lockere Bebauungsstrukturen mit Einzel- und Doppelhäusern von geringer Bauhöhe (ein- bis dreigeschossig) und eine Durchgrünung mit Wiesen, Baum- und Strauchvegetation. Zusammen mit der Lage im Einflussbereich des Umlands mit der Nähe zu kalt- bzw. frischluftliefernden Bereichen herrschen günstige bioklimatische Bedingungen. Die Klimaelemente wie die Temperatur werden leicht gedämpft, die Windgeschwindigkeit ist z.B. ist niedriger als im Freiland, aber höher als in der Stadt.

Beispiele: Schubartstraße.

A2.7 Stadtrand-Klimatop

In der Klimaanalysekarte mit „Stadtrandklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: 30% bis 50%

Flächennutzung: Wohnbebauung, teilweise mit Garten- und Freilandnutzung.

Bebauung: Einzelhäuser, Wohnblocks und Blockbebauung geringer Bauhöhe (3- bis 5-geschossig), z.T. Straßenschluchten. (30% bis 45%)

Vegetation: Garten- und Freilandnutzung; Einzelbäume oder Baumgruppen, Strauchvegetation, Wiesen- und Rasenflächen.

Lufthygiene: schwach bis mäßig belastet. Quellen: Hausbrand, Kfz-Verkehr. Luftschadstoffe hauptsächlich NO₂, Feinstäube. Bei Holzfeuerungen auch Gerüche.



b) Anmerkungen

Das Klimatop ist ebenfalls dem Übergangsbereich zwischen Freilandklima und dem Klima bebauter Flächen zuzuordnen. Es weist bereits eine deutliche Veränderung der Klimaelemente im Vergleich zum Freiland auf. Die lockere Bebauung mit Einzelhäusern und kleineren Wohnblocks (meist nicht höher als 3 Geschosse), der mäßige Versiegelungsgrad und die gute Durchgrünung wirken jedoch einer stärkeren Überwärmung entgegen und unterstützen die bodennahe Durchlüftung.

Die schwache bis mäßige lufthygienische Belastung stammt in erster Linie vom Kfz-Verkehr und vom Hausbrand. Insgesamt besitzt das Siedlungsklima für den Menschen günstige Eigenschaften.

Beispiel: Ein Gebiet, welches in Teilen in die Kategorie des Stadtrands gehört, ist in südwestlich der Innenstadt Aspergs anzufinden.

A2.8 Stadt-Klimatop

In der Klimaanalysekarte mit „Stadtklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: 50% bis 70%

Flächennutzung: Wohnbebauung, Garten- und Freilandnutzung gering.

Bebauung: Wohnbebauung, Wohnblocks und Blockbebauung ca. 2- bis 5-geschossig, z.T. stärkere Bauhöhendifferenzen, Straßenschluchten. (45% bis 55%)

Vegetation: Einzelbäume oder Baumgruppen (vor allem im Straßenraum, z.T. in Innenhöfen), Strauchvegetation, Wiesen- und Rasenflächen.

Lufthygiene: belastet. Quellen: Hausbrand, Kfz-Verkehr. Luftschadstoffe hauptsächlich NO₂, Feinstäube.



b) Anmerkungen

Die Eigenschaften dieses Klimatops liegen zwischen den intensiven innerstädtischen Überwärmungsbereichen und den nur geringfügig überwärmten, locker bebauten Stadtrandbereichen. Die deutlich geringere nächtliche Abkühlung im Vergleich zum Freilandklima findet ihre Ursachen in dem relativ hohen Versiegelungsgrad, den eingeschränkten Be- und Entlüftungsmöglichkeiten und der eher geringen Durchgrünung. Die Bebauung ist meist blockförmig und mehrgeschossig, die Bauhöhe variiert zum Teil stärker und es gibt bereits Straßenschluchten.

Die lufthygienische Situation in diesen Gebieten ist räumlich stark variabel. Hauptemittent ist der Kfz-Verkehr, hinzukommen im Winter Hausbrandemissionen. Insgesamt müssen dem Klimaraum lufthygienisch und klimatisch mäßig bis erheblich (in der Nähe von Hauptverkehrsstraßen) belastende Eigenschaften zugeschrieben werden.

Beispiel: Der Anteil am Klimatop Stadt ist relativ gering. Es findet sich z.B. nördlich der Verwaltungsgebäude in der Innenstadt.

A2.9 Innenstadt-Klimatop

In der Klimaanalysekarte mit „Innenstadtklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: > 70 %

Flächennutzung: Gewerbe mit Wohnnutzung.

Bebauung: Verwaltungs-, Geschäfts- und Wohnbebauung, drei- und mehrgeschossige Baublöcke, z.T. extreme Bauhöhendifferenzen, Straßenschluchten.

Vegetation: Straßenbäume und Straßenbegleitgrün.

Lufthygiene: belastet, an Hauptverkehrsstraßen stark belastet. Quellen: Kfz-Verkehr, Hausbrand. Luftschadstoffe hauptsächlich NO₂, Feinstäube.



b) Anmerkungen

Das Innenstadtklima zeigt die stärksten Veränderungen der Klimaelemente gegenüber dem Freiland: stark erhöhte Temperaturen, sehr geringe nächtliche Abkühlung, geringe relative Feuchte und starke Einschränkung der Durchlüftung bei gleichzeitiger Böigkeit des Windes. Ursachen dafür sind die hochverdichtete Bebauung und der geringe Grünflächenanteil sowie die zentrale Lage innerhalb des Stadtkörpers. Die Bebauung ist überwiegend höhergeschossig (> 3 Geschosse), zum Teil treten extreme Bauhöhenunterschiede auf und es finden sich zahlreiche Straßenschluchten. Hinzu kommt eine erhöhte lufthygienische Belastung, wobei die Hauptemissionsquelle der Kfz-Verkehr ist. Das Innenstadtklima ist insgesamt als belastend für den Menschen einzustufen.

Beispiel: Innenstadtkern von Asperg.

A2.10 Gewerbeklimatop

In der Klimaanalysekarte mit „Industrie-/Gewerbeklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: unterschiedlich, im Allgemeinen > 70 %

Flächennutzung: Industrie und Gewerbe, Halden, Industrie- und Gewerbebrachen, Gleisanlagen.

Bebauung: vor allem Hallen, Verwaltungsbauten und Produktionsanlagen, größere Lagerflächen.

Vegetation: besonders in den Randbereichen (z.B. als Immissionsschutzpflanzungen) auch dichte Baum- und Heckenstrukturen, Wiesen- und Rasenflächen, Einzelbäume, z.T. auch Baum- und Strauchanpflanzungen.

Lufthygiene: Belastung stark von der Nutzung und deren Emissionen abhängig, im Allgemeinen deutliche Belastung. Luftschadstoffe hauptsächlich NO₂, Feinstäube. Je nach Produktionsprozessen auch weitere Luftschadstoffe und Gerüche.



b) Anmerkungen

Dieses Klimatop ist mit dem Innenstadt-Klimatop vergleichbar. Dichte, zum Teil hohe Bebauung und die weitgehende Versiegelung begünstigen den städtischen Wärmeinseleffekt. Anlagenbedingte Emissionen sowie Lieferverkehre können zudem für eine hohe Luftbelastung sorgen. In diesen Gebieten ist jedoch eine höhere Toleranz für thermische und lufthygienische Belastungen vorhanden.

Beispiele: Industrie- und Gewerbe-Klimatope befinden sich vorwiegend im Osterholz und südöstlichen Weinberg.

A2.11 Verkehrsflächen-Klimatop

a) allgemeine Merkmale

- Versiegelung: hoher Versiegelungsgrad
Flächennutzung: Asphaltierte / betonierte Straßen.
Bebauung: keine
Vegetation: keine
Lufthygiene: Luftschadstoffe und Lärmemissionen durch den Verkehr



b) Anmerkungen

Größere Verkehrsflächen können innerorts freiland-ähnliche Eigenschaften aufweisen, wobei sie insbesondere örtlich bedeutsame Belüftungsfunktionen (Luftleitbahn) übernehmen können.

Der Belag führt zu thermisch und hygrisch extremen Verhältnissen. Er erwärmt sich tagsüber stark, kühlt nachts aber auch wieder gut ab, so dass große Tag-/Nachtunterschiede bei der Oberflächentemperatur auftreten.

Beispiel: A81

A2.12 Bahnanlagen-Klimatop

In der Klimaanalysekarte mit „Bahnanlagen-Klima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: geringer Versiegelungsgrad

Flächennutzung: Geschotterte Gleisanlagen.

Bebauung: Einzelgebäude.

Vegetation: vereinzelt Strauchwerk.

Lufthygiene: Lärmemissionen.
Luftschadstoffe hauptsächlich
Feinstäube und NO₂ insb. bei Dieselantrieb.



b) Anmerkungen

Größere Gleisanlagen können innerorts freiland-ähnliche Eigenschaften aufweisen, wobei sie insbesondere örtlich bedeutsame Belüftungsfunktionen (Luftleitbahn) übernehmen können. Der Schotterbelag führt zu thermisch und hygrisch extremen Verhältnissen. Er erwärmt sich tagsüber stark, kühlt nachts aber auch wieder gut ab, so dass große Tag-/Nachtunterschiede bei der Oberflächentemperatur auftreten.

Beispiele: Bahntrasse und Bahnhof in Asperg.

A2.13 Lokale Luftleitbahnen

Hier handelt es sich um kleinräumige Strukturen, die den Luftaustausch innerhalb der Stadt begünstigen. Voraussetzungen sind geringe Bodenrauigkeit, ausreichende Länge und Breite sowie ein möglichst geradliniger Verlauf der Strömungsbahnen. Als Faustregel für die Breite der Bahn wird im Handbuch „Stadtklima und Luftreinhaltung“ (Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN (Hrsg.) (1988)) eine Mindestbreite von der 10fachen Höhe der Randbebauung genannt, andere Quellen fordern eine Mindestbreite von 50 m und eine Mindestlänge in einer Richtung von 1000 m (Mayer, Beckröge & Matzarakis (1994)). Wichtige Merkmale sind außerdem ihre Ausrichtung durch vorhandene Strukturen und der Zusammenhang mit der Windrichtungsverteilung. Als Beispiele wären Grünflächen mit niedrigem Bewuchs, Wasserflächen, mehrgleisige Bahnanlagen und größere Straßenzüge zu nennen.

Die Kanalisierung der Luftströmungen ist in starkem Maße von den jeweiligen Strömungsrichtungen der Wetterlagen abhängig. Während windschwacher Hochdruckwetterlagen dienen die Luftleitbahnen als potenzielle Einströmschneisen für Flurwinde. Die Luftgüte wird dabei nicht unterschieden, d.h. die transportierten Luftmassen können sowohl belastet (z.B. bei Straßen) als auch unbelastet sein (z.B. bei Grünanlagen).