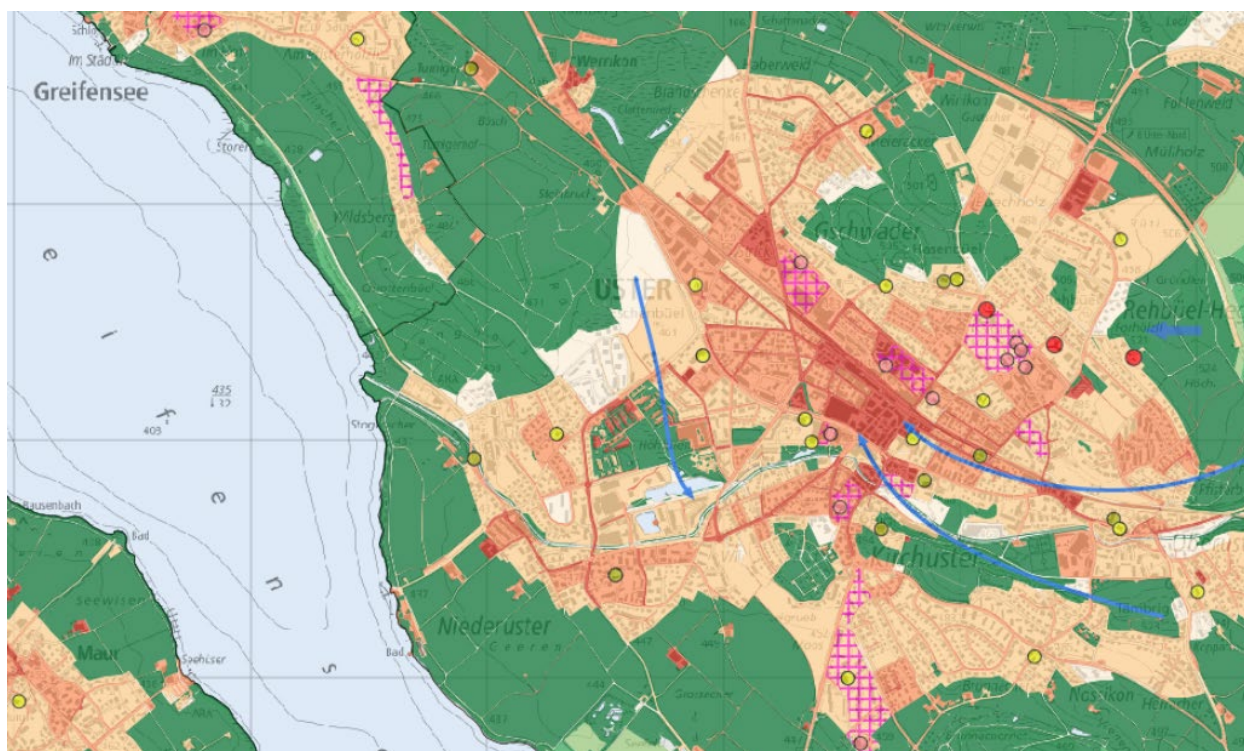




Aktualisierung und Fortschreibung der Stadtklimaanalyse für den Kanton Zürich



erstellt von:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover

Juni 2025





Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	5
Glossar	6
1. Hintergrund und Anlass	9
2. Fachliche Grundlagen	10
2.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit	10
2.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse.....	14
2.3 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik.....	17
3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess	22
4. Klima und Klimawandel im Kanton Zürich.....	25
4.1 Aktuelles Klima an der Wetterstation Zürich/Kloten	25
4.2 Beobachteter Klimawandel an der Wetterstation Zürich/Kloten	26
4.3 Klimawandelszenario	28
4.4 Autochthone Wetterlagen	33
5. Analysemethoden	34
5.1 Numerische Modellierung	34
5.1.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D.....	34
5.1.2 Szenarienentwicklung.....	39
5.1.3 Aufbereitung der Modelleingangsdaten	41
5.1.4 Rahmen- und Randbedingungen	45
5.1.5 Modellausgabegrößen	47
5.1.6 Qualitätssicherung.....	49
5.1.7 Unsicherheiten und Herausforderungen	50
6. Analyseergebnisse	53
6.1 Numerische Modellierungen Klimaökologie	53
6.1.1 Nachtsituation	53
6.1.1.1 Nächtliches Temperaturfeld	53
6.1.1.2 Kaltluftströmungsfeld in der Nacht.....	55
6.1.2 Tagsituation	60
6.1.2.1 Wärmebelastung am Tag (PET).....	60
7. Klimaanalysekarte als Zwischenprodukt	63



7.1	Klimaanalysekarten.....	63
8.	Kartenprodukte für Bewertung und Planung.....	67
8.1	Grundlagen	67
8.2	Geometrische Basis	68
8.3	Bewertungskarten	69
8.3.1	Wirkraum.....	69
8.3.2	Ausgleichsraum.....	70
8.3.3	Ergebnisse Bewertungskarten von Ist-Zustand und Zukunftsszenario.....	74
8.3.3.1	Nachtsituation	74
8.3.3.2	Tagsituation	77
8.4	Planungshinweiskarte	79
8.4.1	Stadtklimatische Handlungspriorität im Wirkraum.....	80
8.4.2	Stadtklimatische BEDEUTUNG im Ausgleichsraum	82
8.5	Massnahmenkatalog.....	84
	Quellenverzeichnis.....	101

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH VDI 3787, BL.4 (2020))	10
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD 2018)	11
ABBILDUNG 3: NÄCHTLICHE INNENRAUMTEMPERATUR (22:00 – 06:00 UHR) IN 500 AUGSBURGER SCHLAFZIMMERN IN DEN SOMMERMONATEN 2019 (BECKMANN, S., HIETE, M. UND BECK, C. 2021)	12
ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANTHOLZ UND SETT 2019)	13
ABBILDUNG 5: SCHÄTZUNG DER ANZAHL TODESFÄLLE, DIE STATISTISCH AUF DIE HITZEBELASTUNG IN DER SCHWEIZ ZWISCHEN MAI UND SEPTEMBER ZURÜCKZUFÜHREN SIND (SWISSTPH IM AUFTRAG DES BAFU UND BAG).....	14
ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: THE COMET PROGRAM 2017 (OBEN), MVI 2012 (MITTE), DWD 2023B (UNTEN)).....	15
ABBILDUNG 7: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER KLIMAANALYSEKARTE GEMÄSS VDI 3787 BL.1 (VDI 2015)	18
ABBILDUNG 8: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER PLANUNGSHINWEISKARTE GEMÄSS VDI 3787 BL.1 (VDI 2015).....	19
ABBILDUNG 9: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLNUG 2022A, 18)	20
ABBILDUNG 10: DIE DREI BEARBEITUNGSSSTUFEN DER STADTKLIMAANALYSE	22
ABBILDUNG 11: KLIMADIAGRAMM STATION ZÜRICH/KLOTEN, NORMPERIODE 1991-2020 (QUELLE: METEOSCHWEIZ 2025A).....	25
ABBILDUNG 12: ENTWICKLUNG DER SOMMERLICHEN TEMPERATUR FÜR DIE NORDSCHWEIZ UNTER 1000 M AB 1864 BIS HEUTE IM VERGLEICH ZUR PERIODE 1961-1990 (QUELLE: METEOSCHWEIZ 2025B).....	27
ABBILDUNG 13: ENTWICKLUNG DER SOMMERLICHEN NIEDERSCHLAGSSUMMEN FÜR DAS ÖSTLICHE MITTELLAND VON 1901 BIS 2024 IM VERGLEICH ZUR PERIODE 1961-1990 (QUELLE: METEOSCHWEIZ 2025C)	27
ABBILDUNG 14: ANTHROPOGENER STRAHLUNGSANTRIEB DER VERSCHIEDENEN RCP-KLIMASZENARIEN, DIE SCHWARZE LINIE REPRÄSENTIERT MESSWERTE (IPCC 2013).....	29
ABBILDUNG 15: GEMESSENE UND PROJIZIERTE ABWEICHUNG DER SOMMERLICHEN LUFTTEMPERATUREN VON DER NORMPERIODE 1981-2010 IM KANTON ZÜRICH (NCCS 2018).....	29
ABBILDUNG 16: GEMESSENE UND PROJIZIERTE ABWEICHUNG DER SOMMERLICHEN LUFTTEMPERATUREN VON DER NORMPERIODE 1981-2010 (QUELLE: METEOSCHWEIZ 2025D).	32
ABBILDUNG 17: LANGJÄHRIGE MITTLERE MONATLICHE ANZAHL AN WINDSCHWACHEN STRAHLUNGSNÄCHTEN IN ZÜRICH (83 PRO JAHR) FÜR DEN ZEITRAUM 2010 - 2023, BASIEREND AUF DER STATION ZÜRICH-FLUNTERN (DWD 2022)	33
ABBILDUNG 18: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITANH-3D	37
ABBILDUNG 19: IDEALISIRTER TAGESGANG DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR SOWIE DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR VON BZW. ÜBER ASPHALT SOWIE VON BZW. ÜBER EINEM FEUCHTEN UND EINEM TROCKENEN GRASBEWACHSENEN BODEN WÄHREND EINES HOCHSOMMERLICHEN STRAHLUNGSTAGES.....	38
ABBILDUNG 20. DER SZENARIOTRICHTER (QUELLE: WWW.BUSINESS-WISSEN.DE).....	40
ABBILDUNG 21: DIGITALES GELÄNDEMOMENT IM UNTERSUCHUNGSRAUM.....	42
ABBILDUNG 22: MODELLEINGANGSDATEN „NUTZUNGSKLASSEN“	43
ABBILDUNG 23: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROSS 1992).....	45
ABBILDUNG 24: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR (04:00 UHR) IM STATUS QUO (OBEN) UND IM ZUKUNFTSSZENARIO (UNTEN)	54



ABBILDUNG 25: BODENNAHE WINDGESCHWINDIGKEIT IM STATUS QUO (OBEN) UND ZUKUNFTSSZENARIO (UNTEN).....	57
ABBILDUNG 26: PRINZIPISSKIZZE KALTLUFTVOLUMENSTROM	58
ABBILDUNG 27: KALTLUFTVOLUMENSTROM IM STATUS QUO (OBEN) UND ZUKUNFTSSZENARIO (UNTEN)	59
ABBILDUNG 28: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTE TEMPERATUR (PET)) IM STATUS QUO (OBEN) UND ZUKUNFTSSZENARIO (UNTEN).....	61
ABBILDUNG 29: KLIMAANALYSEKARTE IM STATUS QUO (OBEN) UND ZUKUNFTSSZENARIO (UNTEN)	66
ABBILDUNG 30: PRINZIPISSKIZZE: LINKS DAS AUSGANGSRASTER (BEISPIEL) UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE	68
ABBILDUNG 31: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 2008).....	69
ABBILDUNG 32: BEWERTUNGSSCHEMA FÜR DIE BEDEUTUNG VON GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHTSITUATION.	72
ABBILDUNG 33: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM STATUS QUO (OBEN) UND ZUKUNFTSSZENARIO (UNTEN).....	75
ABBILDUNG 34: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM STATUS QUO (OBEN) UND ZUKUNFTSSZENARIO (UNTEN).....	78
ABBILDUNG 35: PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA IN EINEM AUSSCHNITT DER STADT ZÜRICH	79
ABBILDUNG 36: PROZENTUALE VERTEILUNG DER HANDLUNGSPRIORITÄTEN IM KANTON ZÜRICH	81



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN.	21
TABELLE 9: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE SITUATION IM WIRKRAUM NACH TAGESZEIT UND STRUKTURTYP	70
TABELLE 10: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG IM AUSGLEICHSPAUM NACH SZENARIO, TAGESZEIT UND STRUKTURTYP	73
TABELLE 11: METHODISCHE HERLEITUNG GESAMTBELASTUNG DES SIEDLUNGSRAUMS AUS TAG- UND NACHTBELASTUNG	80
TABELLE 12: METHODISCHE HERLEITUNG DER PHK-HANDLUNGSPRIORITÄT AUS DEN BELASTUNG IM STATUS QUO UND DEM ZUKUNFTSSZENARIO	80
TABELLE 13: ALLGEMEINE STADTKLIMATISCHE PLANUNGSHINWEISE ZU DEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN IM WIRKRAUM.....	81
TABELLE 14: METHODISCHE HERLEITUNG DES STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES AUSGLEICHSPAUMS	82
TABELLE 15: ALLGEMEINE STADTKLIMATISCHE PLANUNGSHINWEISE ZUM SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSPAUM	83
TABELLE 16: EMPFEHLUNGEN ALLGEMEINER STADTKLIMATISCH WIRKSAMER MASSNAHMEN FÜR DEN KANTON ZÜRICH.....	87

Glossar

Albedo: Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung). Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtmenge. Die Albedo ist abhängig von der Beschaffenheit der bestrahlten Fläche sowie vom Spektralbereich der eintreffenden Strahlung.

Allochthone Wetterlage: Durch grossräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, die die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert. Die allochthone Wetterlage ist das Gegenstück zur → *autochthonen Wetterlage*.

Ausgleichsraum: Grüngestaltete, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → *Wirkraum* angrenzt oder mit diesem über → *Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Wärmebelastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.

Austauscharme Wetterlage: → *Autochthone Wetterlage*

Autochthone Wetterlage: Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Masse durch die Luftmasse geprägt, sodass sich lokale Klimate wie das Stadtklima bzw. lokale Windsysteme wie z.B. Berg- und Talwinde am stärksten ausprägen können. In den Nachtstunden sind autochthone Wetterlagen durch stabile Temperaturschichtungen der bodennahen Luft gekennzeichnet. Damit wird eine vertikale Durchmischung unterbunden und eine ggf. überlagernde Höhenströmung hat keinen Einfluss mehr auf das bodennahe Strömungsfeld, das entsprechend sensibel auf Hindernisse reagiert. Tagsüber sind die Verhältnisse weniger stabil.

Bewertungskarten: Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungsflächen im Stadtgebiet (→ *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als → *Ausgleichsräume* in getrennten Karten für die Tag- und die Nachtsituation inklusive der Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

Bioklima: Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (= atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf den Menschen (Humanbioklima).

Flurwind: Thermisch bedingte, relativ schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Flurwinde strömen vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in Richtung der Überwärmungsbereiche (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum).

Grünfläche: Als „Grünfläche“ werden in dieser Arbeit unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung diejenigen Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal ca. 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Forsten und Wälder.

GRZ: Die Grundflächenzahl (GRZ) bezeichnet die maximal zulässige Gebäudegrundfläche pro Grundstücksfläche und wird als Dezimalzahl bis höchstens 1 (= vollständig überbaute Grundstücksfläche) angegeben.



IPCC: Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) bezeichnet den zwischenstaatlichen Sachverständigenrat für Klimaänderungen („Weltklimarat“). Dieses wissenschaftliche Gremium sammelt und bewertet aktuelle Informationen der weltweiten Klimaforschung und präsentiert regelmässige Stellungnahmen und Einschätzungen zu den Folgen des Klimawandels auf Umwelt, Gesellschaft, Wirtschaft sowie Lösungsansätze und Strategien als Reaktion. Unter der Federführung des IPCC wurden etwa die RCP-Szenarien entwickelt (→ *RCP-Szenarien*).

Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgrösse des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).

Kaltlufteinwirkungsbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung. Gekennzeichnet sind Siedlungsflächen (Wohn- und Gewerbeflächen), die von einem überdurchschnittlich hohen → *Kaltluftvolumenstrom* durchflossen werden oder bodennahe Windgeschwindigkeiten von mindestens 0,1 m/s aufweisen.

Kaltluftleitbahnen: Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkräume*) miteinander und sind mit ihren hohen → *Kaltluftvolumenströmen* elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Sie sind in ihrer Breite räumlich begrenzt, mindestens jedoch 50 m breit (Mayer et al. 1994) und zum belasteten Siedlungsraum ausgerichtet.

Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fliessgeschwindigkeit der → *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit m^3/s). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an → *Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer → *Kaltluftleitbahn* fliesst. Der in dieser Arbeit modellierte Kaltluftvolumenstrom bezieht sich auf einen 1 m breiten Querschnitt und repräsentiert damit streng genommen eine Kaltluftvolumenstromdichte (Einheit $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$). Zur Vereinfachung wurde in diesem Bericht jedoch auch für die Kaltluftvolumenstromdichte der Begriff „Kaltluftvolumenstrom“ verwendet. Anders als das → *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom auch Fliessbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

Klimaanalysekarte: Analytische Darstellung der Klimaauswirkungen und Effekte in der Nacht sowie am Tag im Stadtgebiet und dem näheren Umland (Kaltluftprozessgeschehen, Überwärmung der Siedlungsgebiete).

PET (Physiological Equivalent Temperature / Physiologisch äquivalente Temperatur): Humanbioklimatischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung des Menschen, der Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombiniert und aus einem Wärmehaushaltsmodell abgeleitet wird.

Planungshinweiskarte: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den vier → *Bewertungskarten* in einer einzigen Karte. Im Ergebnis stellt die Planungshinweiskarte eine aus stadtklimatischer Sicht wichtige fachliche Grundlage für die räumliche Planung dar.

RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathway): Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die RCP-Szenarien lösen im fünften Sachstandsbericht des „Weltklimarats“ der Vereinten Nationen (IPCC) die bis dahin genutzten, auf sozio-ökonomischen Faktoren beruhenden SRES-Szenarien ab. Die Zahl in der Bezeichnung RCP 2.6 („Klimaschutz-Szenario“), RCP 4.5 bzw.



RCP 8.5 („Weiter wie bisher-Szenario“) gibt den zusätzlichen Strahlungsantrieb in W/m^2 bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Stand Mitte des 19. Jahrhunderts an.

Städtische Wärmeinsel (Urban Heat Island): Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland aufgrund des anthropogenen Einflusses (u.a. hoher Versiegelungs- und geringer Vegetationsgrad, Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalt) ein modifiziertes Klima auf, das im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen führt. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet.

Strahlungsantrieb (engl. "radiative forcing"): Die Änderung der Nettostrahlung (Differenz aus Ein- und Ausstrahlung in der Einheit W/m^2) an der Oberseite der Atmosphäre aufgrund der Änderungen eines Klimawandeltreibers (z.B. Änderung der CO_2 -Konzentration oder der von der Sonne abgegebenen Energie).

Strahlungswetterlage → *Autochthone Wetterlage*

Strömungsfeld: Für den Analysezeitpunkt 04:00 Uhr morgens simulierte flächendeckende Angabe zur Geschwindigkeit und Richtung der Winde in 2 m über Grund während einer → *autochthonen Wetterlage*.

Wirkraum: Bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum (Wohn- und Gewerbeflächen), in dem eine bioklimatische Belastung auftreten kann.

z-Transformation: Umrechnung zur Standardisierung einer Variablen, sodass der arithmetische Mittelwert der transformierten Variable den Wert Null und ihre Standardabweichung den Wert Eins annimmt. Dies wird erreicht, indem von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und anschliessend durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, die in Vielfachen der Standardabweichung vorliegen. Die Form der Verteilung bleibt dabei unverändert.



1. Hintergrund und Anlass

Die im vorliegenden Bericht dokumentierte „Aktualisierung und Fortschreibung der Stadtklimaanalyse Kanton Zürich“ stellt die Fortschreibung der vorangegangenen gesamtstädtischen Klimaanalyse von GEO-NET Umweltconsulting GmbH (2018) nach heutigem Stand der Technik dar. Die Notwendigkeit einer Aktualisierung rührt vor allem daher, dass die letztmalige Analyse bereits 7 Jahre zurückliegt. Hierbei ergeben sich fachliche, planerische und politische Gründe.

Mit numerischen Stadtklimamodellen stehen heute entsprechende Instrumente zur Verfügung, die einen hohen Detaillierungsgrad bei der Identifizierung von Belastungsräumen ermöglichen. Die Modelle sind dabei in der Lage, die meteorologisch-physikalischen Zusammenhänge zwischen Wärmeinseleffekt in den besiedelten Wirkungsräumen und (planerisch beeinflussbaren) kühlenden Kaltluftabflüssen und Flurwinden aus dem Ausgleichsraum für bestimmte thermisch belastende Wetterlagen umfassend abzubilden. Zudem ist es mit solchen Modellen möglich, szenarienbasierte Ansätze (z.B. zur summarischen Wirkung von Stadtentwicklungsvorhaben und/oder Anpassungsmassnahmen) zu untersuchen und zu bewerten.

Die Klimafolgenanpassung (hier die Hitzevorsorge und die Bedeutung von Kaltluft) ist in den letzten Jahren noch weiter in den Fokus von Politik, Planung und Stadtgesellschaft gerückt. In letzterem wurden Handlungserfordernisse herausgearbeitet, welche es ermöglichen den Klimawandelfolgen frühzeitig entgegenzuwirken. Die Klimaanalyse stellt in diesem Zusammenhang einen wichtigen Baustein zur weiteren Umsetzung von entsprechenden Konzepten dar.

Aus diesen Rahmenbedingungen wurde für die vorliegende Klimaanalyse das übergeordnete Ziel einer Detaillierung und Konkretisierung der vorangegangenen Analysen hinsichtlich klimaanpassungsrelevanter Aspekte wie Hitze, Starkregen und thermischer Komfort abgeleitet. In der Umsetzung bedeutet dies eine computermodellgestützte analytische Fokussierung auf den städtischen Kaltlufthaushalt und die kleinräumige sommerliche thermische Belastungssituation der Stadtbevölkerung sowohl am Tag als auch in der Nacht. Primäres Anwendungsfeld der Analyseergebnisse und insbesondere der Planungshinweiskarte soll weiterhin die vorbereitende und verbindliche Bauleitplanung sein. Zudem sollen sie eine fundierte Grundlage für in Planungsprozessen erforderliche kleinräumige Klimamodellierungen darstellen.

2. Fachliche Grundlagen

Zur zielgerichteten Anwendung der Stadtklimaanalyse und Ihrer Produkte ist – seinem Wesen als Fachgutachten entsprechend – ein breites fachliches Grundlagenwissen notwendig. Das Themenspektrum reicht dabei von den Zusammenhängen zwischen dem Thermischen Komfort und der Menschlichen Gesundheit (Kap. 2.1) im Kontext des lokalen Klimawandels (Kap. 4) über stadtklimatisch relevante meteorologisch-physikalische Prozesse im urbanen Umfeld (Kap. 2.2) bis hin zu planungs- und umweltrechtlichen Aspekten. Zum besseren Verständnis werden im Folgenden zentrale Punkte dieses Spektrums überblicksartig skizziert. Die entsprechenden Quellenhinweise regen bei Bedarf zum Weiterlesen an und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2.1 THERMISCHER KOMFORT UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT

Die bodennahe atmosphärische Umgebung besitzt vielfältige Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen. Diese lassen sich unter folgenden Oberpunkten subsummieren:

- Wohlbefinden
- Leistungsfähigkeit
- Morbidität (Krankheitsrate) und Mortalität (Sterberate)

Den Parametern Windgeschwindigkeit, Luft- bzw. Strahlungstemperatur sowie Luftfeuchtigkeit kommen dabei eine zentrale Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang gilt, dass sowohl ein „zu hoch“ als auch ein „zu niedrig“ in den Ausprägungen der jeweiligen Werte zu negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit führen kann. Mit Blick auf den thermischen Komfort gilt dabei beispielsweise eine Kombination aus hohen Lufttemperaturen und niedrigen Windgeschwindigkeiten als gesundheitlich belastend (Abbildung 1).

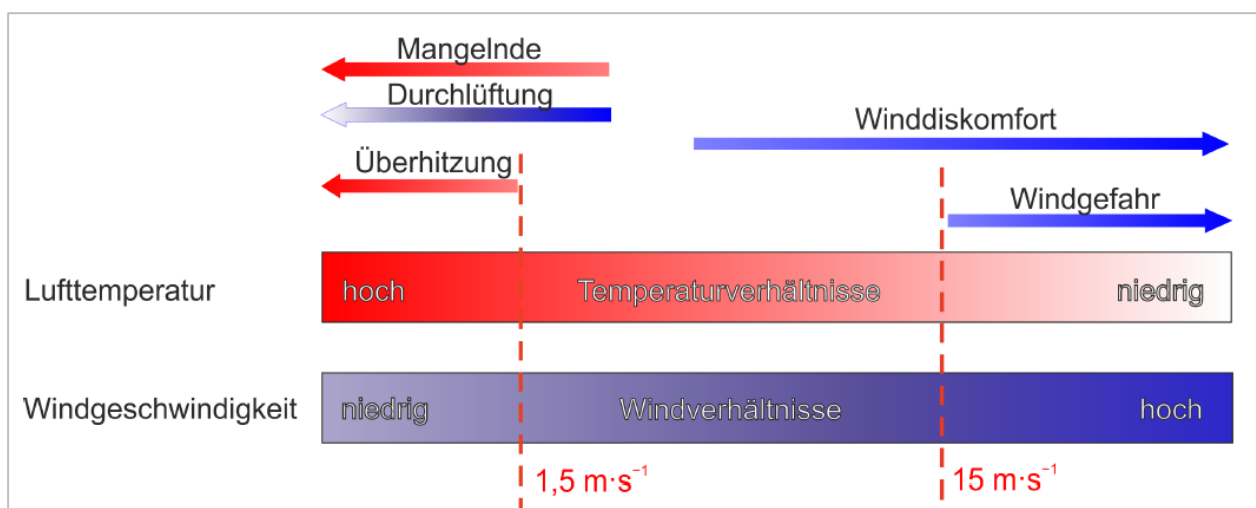


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 3787, Bl.4 (2020))

Als quantitativ arbeitende Fachdisziplin haben sich in der Stadt- und Regionalklimatologie in den letzten Jahrzehnten verschiedene humanbiometeorologische Kenngrössen durchgesetzt, mit deren Hilfe sich die Auswirkungen dieser Belastungen auf das menschliche Wohlbefinden ermitteln lassen. Im deutschsprachigen Raum ist insbesondere die „Physiologisch Äquivalente Temperatur“ (PET) zu nennen (Höppe und Mayer 1987). International gebräuchlich ist darüber hinaus der „Universal Thermal Comfort Index“ (UTCI: Jendritzky 2007). In der Vergangenheit kam zudem auch der heute eher nicht mehr gebräuchliche Index „Predicted Mean Vote“ (PMV) zum Einsatz (Fanger 1972). Allen Ansätzen ist gemein, dass sie neben den meteorologischen Einflussgrössen auch die Wärmebilanz des Menschen in die Berechnung mit einfließen lassen (Abbildung 2). Auf diese Weise können letztlich physiologische Belastungsstufen abgeleitet werden, die beispielsweise beim PET von einer extremen Kältebelastung bis zu einer extremen Wärmebelastung reichen. Da die Indizes hohen Anforderungen an die zugrundeliegenden Mess- bzw. Modelldaten stellen und diese nicht überall vorliegen, besitzen nach wie vor auch relativ einfache Auswerteroutinen wie die Auftrittshäufigkeit bestimmter Kenntage wie *Hitzetage* (mit $T_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$) oder *Tropennächte* (mit $T_{\min} \geq 20^\circ$) eine hohe Praxisrelevanz (DWD 2020). Sie kommen insbesondere dann zum Einsatz, wenn für grössere Räume (z.B. Staaten, Flächenbundesländer) auf der Basis von Zeitreihenanalysen eine Ersteinschätzung zur räumlichen Differenzierung von thermischen Belastungen vorgenommen werden sollen.

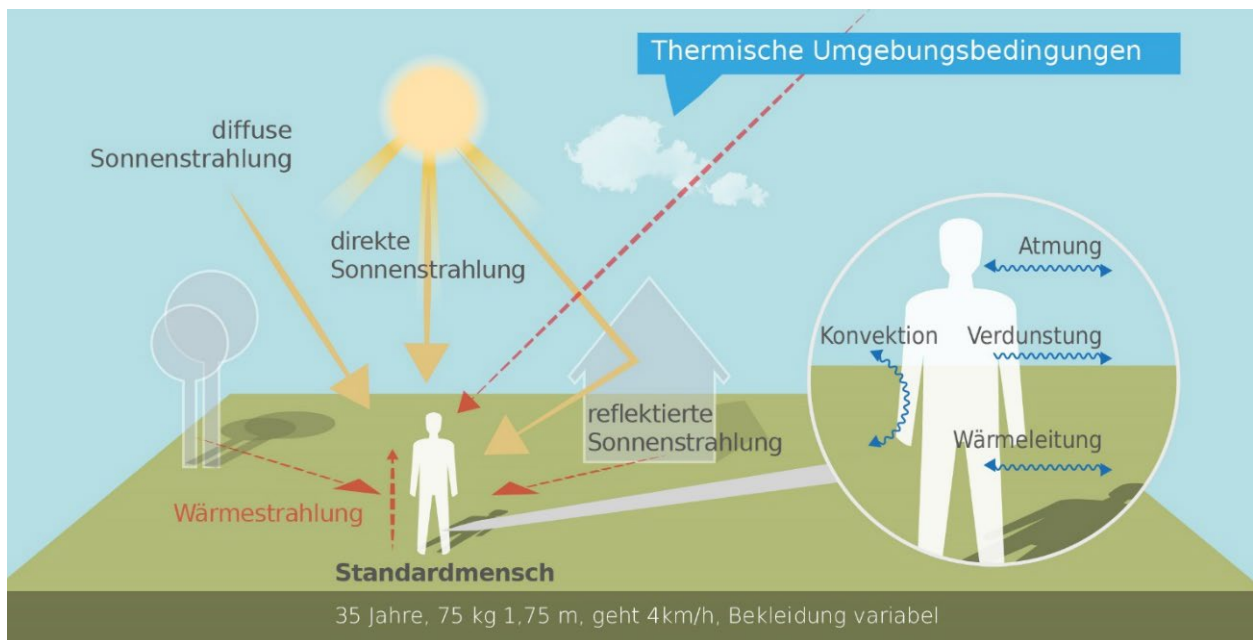


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2018)

Sowohl die PET als auch der UTCI sind für die Verwendung im Freien und unter Einstrahlungsbedingungen (also für die Tagsituation) optimiert. In Innenräumen – in denen sich Menschen in den Industrieländern zu ca. 90 % der Zeit zum Wohnen und Arbeiten aufhalten – wird in aller Regel auf die Raumtemperatur als massgebliche Grösse Bezug genommen: „Die Wechselwirkung zwischen dem Aussenklima und dem Innenraumklima erfolgt heute aufgrund der hohen Wärmedämmung üblicher Wohngebäude fast ausschliesslich über den Luftwechsel, wobei die Lufttemperatur der Aussenluft die entscheidende Grösse ist“ (VDI 2008a, 24). Die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV, Bundesregierung 2004) fordert daher für Arbeitsräume gesundheitlich zuträgliche Raumtemperaturen von maximal 26°C in Arbeits- und Sozialräumen. Hintergrund ist die in §4 ArbStättV definierte Verpflichtung des Arbeitsgebers, eine Gefährdung für Leben und Gesundheit seiner Angestellten möglichst zu vermeiden bzw. verbleibende Gefährdungen gering zu halten. Übersteigt die Raumtemperatur diesen Wert, muss der Arbeitgeber geeignete Schutzmassnahmen ergreifen.

(z.B. Flexibilisierung der Arbeitszeiten, Klimatisierung, Reduzierung innerer Wärmequellen wie Elektrogeräte). Ein direkter Rechtsanspruch auf z.B. klimatisierte Räume oder "Hitzefrei" lässt sich für Beschäftigte aus der Verordnung jedoch nicht ableiten.

Während in Arbeitsstätten hohe Temperaturen am Tage zu Belastungen führen, stellen in privaten Wohnräumen insbesondere hohe Nachttemperaturen eine grosse Herausforderung dar: *„Durch erholsamen Schlaf, der nur bei günstigen thermischen Bedingungen erreicht wird, kann sich der Organismus von thermischen Belastungen des Tages regenerieren. Ungünstige Klimabedingungen während der Nachtstunden können dagegen zu einer Akkumulation von Belastungen führen. Dabei sind in der Regel zu warme Bedingungen als ungünstig anzusehen.“* (VDI 2008a, 23). Das Umweltbundesamt empfiehlt für einen entsprechend erholsamen Schlaf eine Schlafzimmertemperatur in der Spannweite von 17-20 °C (UBA 2005). Dass die Einhaltung dieser Wertespanne in den weitgehend nicht-klimatisierten Wohngebäuden in Deutschland über die Sommermonate schwierig bis unmöglich ist, dürfte der Alltagserfahrung vieler Bürgerinnen entsprechen. Den empirischen Beleg hierfür liefert eine wissenschaftliche Studie, in der Stundenwerte der Temperaturen in 500 über das Augsburger Stadtgebiet verteilten Schlafzimmern während der Sommermonate 2019 gemessen und ausgewertet wurden (Abbildung 3). Die Ergebnisse veranschaulichen, dass, unabhängig von der räumlichen Lage im Stadtgebiet, nur an einzelnen Standorten und an einzelnen Tagen die vom Umweltbundesamt empfohlenen Komfortwerte von 20 °C unterschritten wurden. Tatsächlich schwankten die Mittelwerte auch nachts um 25 °C (bei Maximalwerten von nahe oder sogar über 30 °C; Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021).

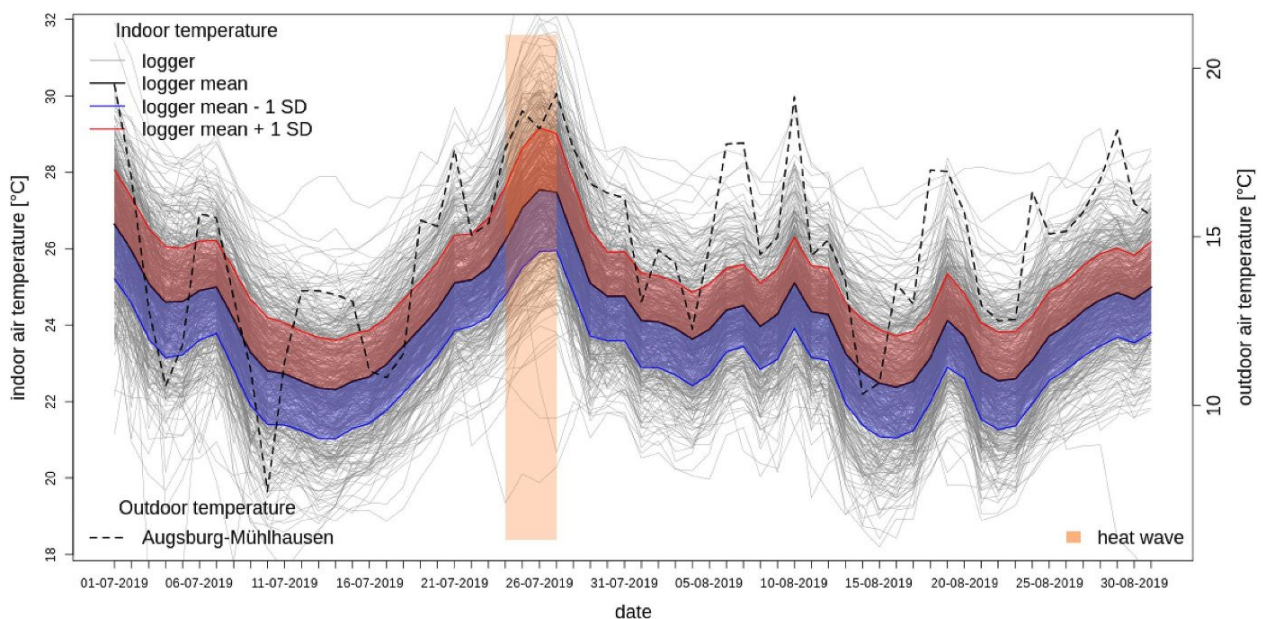


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)

Ausserhalb thermischer Komfortbereiche sinkt die Leistungsfähigkeit des Menschen ab (z.B. am Arbeitsplatz oder in der Schule und Hochschule). Das Ausmass der Abnahme ist sehr individuell, kann aber an einigen Beispielen verdeutlicht werden. So nimmt die Leistungsfähigkeit bei moderater körperlicher Arbeit ab einem bestimmten Schwellenwert (z.B. bei 30 °C in Kombination mit 50 % Luftfeuchtigkeit) pro Grad Celsius Temperaturanstieg etwa um 15 % ab (ISO 1989). Andere Quellen gehen für Zeiten hoher Hitzebelastung in Mitteleuropa von einem Rückgang der Produktivität um 3 bis 12 % aus (Urban & Steining 2015). In einer amerikanischen Studie, die die kognitiven Fähigkeiten junger Erwachsener in Wohnumfeldern mit

und ohne Klimaanlage vergleicht, wurden signifikant bessere Werte im Bereich von 10-15 % für die Reaktionszeiten und die Gedächtnisleistungen in der klimatisierten Umgebung gefunden (Laurent et al. 2018).

Die humanbiometeorologische Umgebung beeinflusst nicht nur das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit des Menschen, sondern wirkt sich unmittelbar auf die Morbidität und Mortalität der Bevölkerung aus. Als besonders vulnerabel gelten in diesem Zusammenhang Säuglinge und Kleinkinder bis etwa 6 Jahren (aufgrund einer noch nicht vollständig ausgeprägten Fähigkeit zur Thermoregulation) sowie ältere Menschen ab 65 Jahren bzw. vor allem über 80 Jahren (aufgrund einer verminderten Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems). Santholz und Sett (2019) kommen auf Basis einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Bundesstadt Bonn zu dem Schluss, dass verschiedene sozio-ökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte Seniorinnenangaben, bei Hitze vergleichsweise häufiger an Herz-Kreislauf-Problemen zu leiden, haben Studierende überdurchschnittlich häufig Konzentrationsprobleme und Kopfschmerzen genannt und Single-/Pärchen-Haushalte gaben an, hauptsächlich mit Schlafproblemen konfrontiert zu sein. Familien mit kleinen Kindern hingegen erwähnten seltener gesundheitliche Probleme (Abbildung 4).

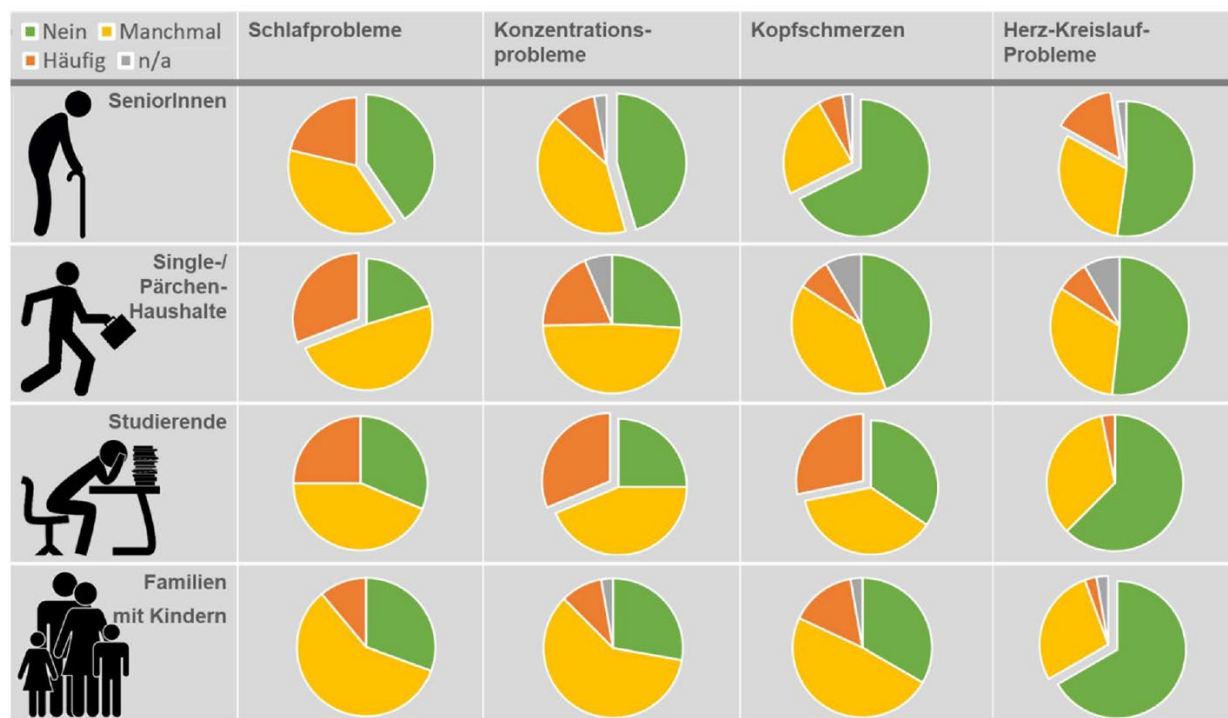


Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Santholz und Sett 2019)

Im Rahmen der Anpassungsstrategie an den Klimawandel des Bundes werden die hitzebedingten Todesfälle jährlich auf nationaler und kantonaler Ebene ermittelt (Ragetti et al. 2024).

Der Impact-Indikator «Hitzebedingte Todesfälle»¹ schätzt die Anzahl Todesfälle, die statistisch auf die Hitzebelastung in der Schweiz zwischen Mai und September zurückzuführen sind. Mit dem Indikator können die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesundheit langfristig überwacht und der Bedarf an Anpassungsmassnahmen abgeleitet werden.

Die grösste Anzahl hitzebedingter Todesfälle in der Zeitperiode 1980-2023 (Abbildung 5) werden für den bisher wärmsten Sommer (2003) geschätzt. Im Rekordsommer 2003 werden insgesamt 1'402 Todesfälle

¹ Indikator Klima – [Hitzebedingte Todesfälle](#), BAFU

(95% Konfidenzintervall (KI): 1'157-1'658) der Hitze zugeschrieben. Dies entspricht einem Anteil an der Gesamtsterblichkeit zwischen Mai und September von 5.6%.

Im Jahr 2023 wurden 542 Todesfälle aufgrund von Hitze registriert, wobei fast alle Betroffenen über 75 Jahre alt waren. Die besondere Gefährdung älterer Menschen bezüglich Hitze unterstreicht die Notwendigkeit von gezielten Schutzmassnahmen für diese Altersgruppe.

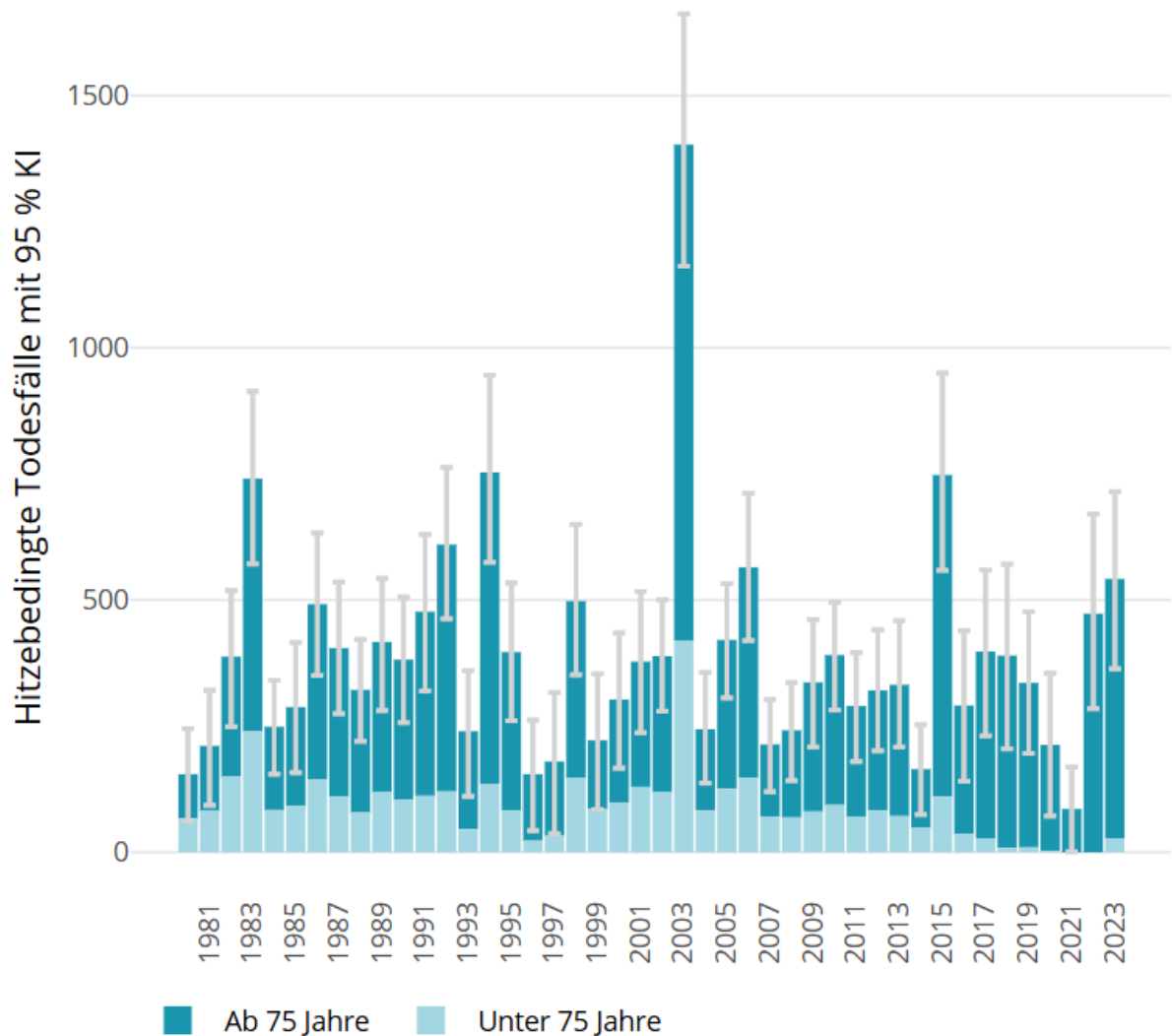


Abbildung 5: Schätzung der Anzahl Todesfälle, die statistisch auf die Hitzebelastung in der Schweiz zwischen Mai und September zurückzuführen sind (SwissTPH im Auftrag des BAFU und BAG)

2.2 WÄRMEINSELEFFEXT UND KALTLUFTPROZESSE

Eine wichtige Grundlage für einen erholsamen Schlaf in den Sommermonaten ist eine gute Durchlüftung des Stadtkörpers. So kann in den Nachtstunden durch das Heranführen kühlerer Luft aus dem Umland oder aus innerstädtischen Grün-/Freiflächen das Temperaturniveau der in der Stadt lagernden wärmeren Luftmassen lokal gesenkt werden. Entscheidend ist dabei, dass die kältere Aussenluft auch ins Gebäudeinnere gelangen kann, sodass dem nächtlichen Luftaustausch („natürliche Ventilation“) zwischen Gebäude und Umgebungsluft eine Schlüsselrolle zukommt (vgl. Gross 2021). Auch die VDI 3787, Blatt 5 (12/2003) benennt die Umgebungsluft als die zentrale Auswertungsgrösse, um die Kaltluftwirkung in der Nacht zu erfassen.

Als Prämisse für die vorliegende Analyse werden die relevanten Kaltluftprozesse und Zusammenhänge im Folgenden überblicksartig als Beitrag zu einem Grundverständnis beleuchtet. Wie Abbildung 6 zeigt, sind insbesondere Berg-/Talwindssysteme, flächenhafte Kaltluftabflüsse an Hängen sowie durch den Wärmeinseleffekt induzierte Flurwindssysteme zu nennen. Allen Prozessen ist gemein, dass sie vermehrt während windschwacher Strahlungswetterlagen mit nächtlicher Bodeninversion auftreten. Bei einer Inversion kehrt sich der normalerweise mit der Höhe abnehmenden Temperaturverlauf um. Der Boden und damit auch die darüber liegende bodennahe Luftschicht kühlen sich durch Ausstrahlung stärker ab, sodass die bodennahe Schicht kälter ist als die darüber liegende Luftschicht. Die obere Begrenzung dieser Bodeninversionsschicht liegt dabei in der Höhe über Grund, in der sich die Abkühlung des Erdbodens nicht mehr auswirkt (vgl. DWD 2023a). Inversionen können durch grossräumige Advektion von Warmluft, durch Absinkvorgänge in der Höhe sowie durch Abkühlung der unteren Luftschichten entstehen. Eine Inversion stellt damit eine Sperrschicht dar, die einen Austausch zwischen tief liegenden und höher liegenden Luftschichten verhindert (sie wirken in der Atmosphäre stabilisierend). In den Sommermonaten gehen mit ihnen häufiger thermische und ggf. auch lufthygienische Belastungen einher.



Abbildung 6: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: The COMET Program 2017 (oben), MVI 2012 (Mitte), DWD 2023b (unten))

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgrösse stärker ausgeprägt sind (Oke et al. 2017). Gründe



hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenübersteht. Die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion durch die Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss) spielen ebenfalls eine Rolle. Im Vergleich zum weitgehend natürlichen oder naturnahen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet. Diese führt zu einem kleinräumigen, sehr fragilen System aus konvektivem Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper und bodennahen Ausgleichsströmungen aus dem Umland in das Stadtgebiet hinein („Flurwindsystem“). Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht. Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und eine Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts kann dagegen kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen und innerstädtischen Grünflächen in die überwärmten Quartiere strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse.

Während Flurwindssysteme in aller Regel mit geringen Kaltluftdynamiken von $< 1 \text{ m/s}$ und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10er-) Metern verbunden sind, können orographisch bedingte Kaltluftabflüsse von Hängen und insbesondere Berg-Talwindssystemen hang- bzw. talabwärts gerichtete Windgeschwindigkeiten von deutlich $> 2 \text{ m/s}$ sowie Kaltluftmächtigkeiten von z.T. über 100 m hervorrufen. Bei beiden Systemen handelt es sich um tagesperiodisch lokale Windsysteme und damit um eine typische Erscheinung für Gebirgsklimata (siehe Abbildung 6 oben). Der tagsüber aufwärts gerichtete Tal-/Hangwind wird angetrieben durch die infolge der Sonneneinstrahlung gegenüber der freien Atmosphäre stärkere Erwärmung der Hänge. Der Motor des vom späten Abend bis zum Morgen abwärts wehenden Berg-/Hangwinds ist die gegenüber dem Tal stärkere Ausstrahlung und Abkühlung der Luft über den Hochflächen und Hängen. Beim Berg-/Talwindssystem kann zusätzlich ein Zusammenfließen und eine talabwärts gerichtete Kanalisierung erfolgen, sodass hier bei optimalen Bedingungen gegenüber den reinen Hangwinden noch grössere Kaltluftvolumina möglich sind.

Alle geschilderten Prozesse bzw. Klimafunktionen können durch planerische Entscheidungen sowohl unterstützt als auch gestört oder sogar zerstört werden. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003). Kaltluftproduktionsraten, Kaltluftmächtigkeiten und Kaltluftvolumenströme, die der Ableitung des oben beschriebenen Kaltluftsystems zugrunde liegen, sind relative Grössen, die demnach auch in einer klimawandelbedingt wärmeren Atmosphäre der Zukunft unverändert bestehen bleiben (wenn sie nicht durch Flächennutzungsänderungen wie z.B. grossflächige Gewerbegebiete oder Siedlungserweiterungen modifiziert werden). Selbiges gilt in der Konsequenz für die aus den Grössen abgeleiteten zentralen Elemente wie Kaltluftleitbahnen, wobei die Kaltluft im Klimawandel tendenziell wärmer als gegenwärtig ist und damit weniger zur Reduktion der nächtlichen Wärmebelastungen beiträgt. Es wird die Aufgabe der gesamten Fachdisziplin sein, diesem Umstand durch die Entwicklung neuer Auswerteverfahren Rechnung zu tragen. Bis entsprechende neue Verfahren etabliert sind, entspricht es dem Stand der Technik, die Auswirkungen des Klimawandels vor allem an den thermischen Kenngrössen wie der Lufttemperatur und/oder humanbioklimatischen Indizes wie der PET festzumachen.

2.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK

Die in den vorherigen Kapiteln geschilderten Zusammenhänge und Prozesse zum Thermischen Komfort und Kaltlufthaushalt werden als Grundlage für regional-/stadtplanerische Abwägungs- bzw. Entscheidungsprozesse in raumspezifischen Analysen untersucht. Die Analysen sind im Grundsatz seit den frühen 1990er Jahren Stand der Technik. Die zugrunde liegenden Methoden und Instrumente unterlagen seither allerdings einer stetigen Fortentwicklung, die durch die Aktivitäten zur Klimafolgenanpassung insbesondere seit den 2010er Jahren stark an Dynamik und Qualität gewonnen hat. Anders als beispielsweise beim lufthygienischen Wirkungskomplex oder der Lärmbelastung gibt es für die thermische Belastung bisher noch keine normative Regelung zu Richt- oder gar Grenzwerten. Als Konsequenz daraus ist die Definition, welches Belastungs-/Schutzniveau in der betrachteten Kommune erreicht oder vermieden werden soll, das Ergebnis eines planerisch-politischen Abwägungsprozesses, der durch fachgutachterliche Entscheidungsgrundlagen unterstützt wird.

Die etablierten Instrumente für entsprechende Grundlagenuntersuchungen stellen Stadtklimaanalysen sowie ggf. Detailgutachten für kleinräumigere Planungsprozesse (z.B. verbindliche Bebauungsplanung, Stadt-sanierung, Grünflächenentwicklung) dar. Mindestanforderungen an die zu verwendenden Methoden und zu erstellenden Produkte werden in umweltmeteorologischen VDI-Richtlinien vordefiniert. Von Bedeutung sind insbesondere folgende Richtlinien:

- VDI 3785 Blatt 1 (2008): Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima
- VDI 3787 Blatt 1 (2015): Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen
- VDI 3787 Blatt 2 (2022): Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas
- VDI 3787 Blatt 5 (2003): Lokale Kaltluft
- VDI 3787 Blatt 8 (2020): Stadtentwicklung im Klimawandel
- VDI 3787 Blatt 9 (2004): Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen

Aktuell befinden sich einige zentrale Richtlinien in Fortschreibung (z.B. VDI 3787, Bl.5; Veröffentlichung für 02/2024 angekündigt) bzw. in Zusammenlegung (VDI 3871, Bl.1 und Bl.2 und Bl.9 mit VDI 3785, Bl.1). Folglich befindet sich der Stand der Technik in einem stetigen Wandel. Tendenziell ist zudem zu beobachten, dass teilweise mehrere Jahre vergehen, bis neue methodische Paradigmen und technische Möglichkeiten in die Richtlinien Einzug gehalten haben. Insofern werden die Richtlinien nicht selten von der Dynamik der täglichen Praxis überholt und definieren daher eher einen Mindeststandard und weniger eine im Detail einzuhaltende absolute Norm.

Klimaanalysekarte und Planungshinweiskarte

Gemäss VDI 3787 Bl. 1 entsteht als erstes wichtiges Zwischenprodukt einer Stadtklimaanalyse die Klimaanalysekarte (KAK). Sie hat die Aufgabe, „...die räumlichen Klimaeigenschaften wie thermische, dynamische sowie lufthygienische Verhältnisse einer Bezugsfläche darzustellen, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topografie einstellen“ (VDI 2015, 4). Die Klimaanalysekarte synthetisiert demnach die wesentlichen Analyseergebnisse für die Nachtsituation in einer Karte und präzisiert bzw. pointiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten zu den Themenfeldern Überwärmung, Kaltluftentstehung und Kaltluftfluss (Abbildung 7).


















Klimaeigenschaft	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck	Klimaeigenschaft	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck
Klimatope			Luftaustausch		
Gewässer-, Seenklima		0/127/255 dunkelblau	Luftleitbahn, unbelastet		43/75/155 blau
Freilandklima		190/232/255 hellblau	Luftleitbahn, klimatisch und/oder lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Waldklima		115/178/115 dunkelgrün	Kaltluftabfluss, unbelastet		43/75/155 blau
Klima innerstädtischer Grünflächen		174/241/176 hellgrün	Kaltluftabfluss, lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Vorstadtklima		255/255/225 hellgelb	Talabwind, unbelastet		18/79/158 blau
Stadttrandklima		254/220/0 hellorange	Talabwind, klimatisch und/ oder lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Stadtklima		255/165/0 orange	Hindernis für den Kalt- luftabfluss (Barriere)		34/74/126 blau
Innenstadtklima		255/127/127 hellrot	Kaltlufteinzugsgebiet		43/75/155 hellblau
Gewerbe-, Industrieklima		210/210/210 hellgrau			

Abbildung 7: Auswahl möglicher Legendenpunkte einer Klimaanalysekarte gemäss VDI 3787 Bl.1 (VDI 2015)

Des Weiteren heisst es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt [oder Region, Anm. der Redaktion]“ (VDI 2015, 13). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht eine wesentliche Charaktereigenschaft der Klimaanalysekarte. Sie gehört demnach bewertungstheoretisch der Sachebene an. Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten allein noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmass von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen.

Dies erfolgt im Rahmen der Erstellung einer Planungshinweiskarte (PHK) als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse. Gemäss der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 handelt es sich bei der Planungshinweiskarte um eine „Informelle Hinweiskarte, die eine integrierende Bewertung der in der Klimaanalysekarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange enthält.“ (VDI 2015, 5). Der Begriff der Planungsrelevanz wird in der Richtlinie noch weiter konkretisiert als: „Bewertung von (Einzel-)Flächen hinsichtlich ihrer Klimafunktionen, aus der Massnahmen zum Schutz oder zur Verbesserung des Klimas abgeleitet werden. Planungsrelevant sind dabei alle thermischen und lufthygienischen Phänomene, die als teil- oder kleinräumige Besonderheiten oder Ausprägungen signifikant abweichen [...] und die Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden von Menschen haben.“ (VDI 2015, 5-6). Kerngegenstand der Planungshinweiskarte ist also die klimaökologische Bewertung von Flächen im Hinblick auf die Menschliche Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse (Abbildung 8). Seit der letzten Überarbeitung der Richtlinie sollen bei der Bewertung auch die Themen Klimawandel und Umweltgerechtigkeit Berücksichtigung finden. Auf weitergehende methodische Hinweise verzichtet die Richtlinie jedoch. Somit erfolgt die Erstellung der Planungshinweiskarte auch weiterhin im Spannungsfeld zwischen fachgutachterlichen Empfehlungen, planerischen Zielsetzungen und politischer Willensbildung.










Planungshinweise	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck
Grün- und Freiflächen		
Ausgleichsraum hoher Bedeutung		115/178/115 dunkelgrün
Ausgleichsraum mittlerer Bedeutung		174/241/176 grün
Ausgleichsraum geringer Bedeutung		211/255/190 hellgrün
Siedlungsflächen		
Bebautes Gebiet mit geringer Belastung und geringer klimarelevanter Funktion		255/255/225 gelb
Bebautes Gebiet mit klimarelevanter Funktion		246/197/103 orange
Bebautes Gebiet mit bedeutender klimarelevanter Funktion		255/127/127 rot
Bebautes Gebiet mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen		138/43/226 violett
Raumspezifische Hinweise		
Begrünung im Stadt- und in Wohngebieten		15/95/44 dunkelgrün
Hauptverkehrsstraße mit Potenzial für hohe bis extreme Schadstoffbelastungen, DTV > 10 000		255/0/0 rot

Abbildung 8: Auswahl möglicher Legendenpunkte einer Planungshinweiskarte gemäss VDI 3787 Bl.1 (VDI 2015)

Insbesondere bei der Neuentwicklung von Stadtquartieren und Gebäuden treten weitere Normen neben die VDI-Richtlinien, die es im Einzelfall bei etwaigen Detailbegutachtungen zu berücksichtigen gilt. Hierzu zählen beispielsweise Zertifizierungsverfahren wie das DGNB-System², das für Quartiere, Gebäude und Innenräume u.a. den „Thermischen Komfort“, das „Stadtklima – Mesoklima“ oder das „Mikroklima“ als zu wertende Kriterien definiert. Für die Bewertung werden eigene Methodenvorgaben gemacht, die z.T. deutlich (und notwendigerweise) über die Inhalte der VDI-Richtlinien hinausgehen.

Untersuchungsansätze einer Stadtklimaanalyse

Stadtklimaanalysen können dem Stand der Technik nach auf verschiedenen methodischen Analyseverfahren basieren. Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) unterscheidet in einer aktuellen Veröffentlichung die Methoden der „Abschätzung“, des „Klimatopansatzes“ (bisweilen auch 2D- GIS-Modellierung benannt) sowie der „(numerischen) Stadtklimamodellierung“ (Abbildung 9). In der Praxis existieren auch Mischformen, wie z.B. Kombinationen aus dem Klimatopansatz (der anders als in der Übersicht des HLNUG dargestellt keine relevanten Rückschlüsse zur Kaltluftsituation zulässt) und einfachen Modellanwendungen zum Kaltlufthaushalt (um dieser Herausforderung zu begegnen).

² Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (Online: <https://www.dgnb-system.de>)



	M1 Abschätzung nach Versiegelung	M2 Klimatope nach VDI	M3 Stadtklimamodellierung
Was kann die Klimaanalyse-methode leisten?	<ul style="list-style-type: none"> • Qualitative Einschätzung der Verteilung der Wärmebelastung im Gebiet • Qualitative Einteilung von Belastungs- und Ausgleichsräumen 	<ul style="list-style-type: none"> • Klimateigenschaften der Flächen • Qualitative Einschätzung der Flächen als Belastungs- bzw. Ausgleichsräume • Ableitung relevanter Informationen zur Kaltluft 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantitative Ergebnisse (Temperatur, Anzahl Kenntage, Volumenstrom Kaltluft etc.) • Kaltluftentstehung und -abfluss
Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Kleine und mittlere Kommunen • Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/Siedlungsstrukturen • Kommunen, die einen ersten Überblick zur Belastungssituation bekommen möchten. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kommunen aller Größenklassen mit eher einfachem Relief / geringen Höhenunterschieden • Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/Siedlungsstrukturen • Kommunen, die einen vertieften Überblick zur Belastungssituation inklusive Kaltluft bekommen möchten. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlere/große Kommunen mit komplexen Herausforderungen durch den Klimawandel • Kommunen, die für städtebauliche Entwicklungen bzw. für ein Klimaanpassungskonzept konkrete Angaben zu Temperatur und Kaltluft benötigen.
Erforderliche Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Versiegelungsgrad, z. B. über Luftbildanalyse oder andere • Bebauungsstruktur/-typ • Flächennutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Informationen zur tatsächlichen Flächennutzung (z. B. ATKIS, CORINE, Realnutzungskartierung) • Informationen zum Relief und zur Oberflächenstruktur (z. B. digitales Höhenmodell) • Fachkarten hinsichtlich Versiegelung oder Baudichte/-höhe und Bebauungsart 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhendaten, z. B. Digitales Geländemodell, Rasterdaten der Geländehöhe • Nutzungsdaten, z. B. ATKIS, Biotop-/Vegetationskartierung, Realnutzungskartierung • Fachkarten zur Versiegelung, Baudichte/-höhe, Bebauungsart, Rasterdaten zur Bebauungsstruktur • Messdaten zu physikalischen Größen z. B. Wind, Temperatur
Welche Informationen liefert die Klimaanalyse-methode?	<ul style="list-style-type: none"> • Einstufung der thermischen Belastung im Siedlungsbereich 	<ul style="list-style-type: none"> • Klimatope • Klimaanalysekarte 	<ul style="list-style-type: none"> • Zahlreiche Datensätze mit Aussagen zu Temperatur, Kenntage (Gegenwart und Zukunft), Analyse zur Kaltluft • Je nach Aufbereitung entsprechende Karten

Abbildung 9: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (HLNUG 2022a, 18)

Darüber hinaus stellen die in der Übersicht nicht genannten Messkampagnen (Messfahrten, Vertikalsondierungen, stationäre Messungen) weiterhin eine wichtige methodische Grundlage für Stadtklimaanalysen dar – zumeist in Ergänzung (bzw. zur Validierung) der anderen Methoden, bisweilen aber auch als rein messbasierte Stadtklimaanalysen. Perspektivisch werden zudem auf Künstlicher Intelligenz (KI) basierende Lösungen das Methodenset ergänzen, indem Sie von Ergebnissen der übrigen Methoden lernen und diese mit deutlich geringerem Aufwand auf andere Untersuchungsräume übertragen.

Wie aus der Zusammenstellung bzw. dem zugehörigen Leitfaden der HLNUG hervorgeht, weisen alle Analysemethoden individuelle Stärken und Schwächen auf, wobei die Numerische Stadtklimamodellierung (M3) als qualitativ hochwertigste Methode gilt. Numerische Modellierungen weisen gegenüber anderen Analysenverfahren den grossen Vorteil auf, dass sie umweltmeteorologisch relevante Grössen wie Wind- und Temperaturfelder flächenhaft und unter Berücksichtigung der zentralen physikalischen, atmosphärischen Prozesse wissenschaftlich fundiert ermitteln können. Aus diesen Ergebnissen können im sogenannten postprocessing stadtklimatisch relevante Kenngrössen in ihrer quantitativen Ausprägung abgeleitet werden (z.B. Kaltluftparameter, humanbioklimatische Indizes). Numerische Modelle bieten darüber hinaus den Vorteil, Planungsvarianten und Massnahmen in ihrer Wirkung quantitativ analysieren und auf diese Weise einen validen Beitrag zur klimaökologischen Optimierung von (raum-)planerischen Abwägungs- und Entscheidungsprozessen auf allen Massstabsebenen leisten zu können.

Übersicht stadtklimatischer Modelle

Auf dem deutschsprachigen Markt und in der internationalen Wissenschaft werden verschiedene numerische Modelle im Rahmen von Stadtklimaanalysen genutzt (Tabelle 1). Grundsätzlich unterscheiden sich die aufgezählten Modelle in vielen Eigenschaften, welche letzten Endes auch den Zweck des beabsichtigten Anwendungsgebiets dienen. Jedem Modell ist dabei ein Anwendungsfall zugeordnet, zu welchem das jeweilige Modell im operationellen Einsatz geeignet ist. Grundlegend unterscheiden sich die aufgeführten Modelle in der Art und Weise, wie naturgetreu sie die Atmosphäre abbilden. Dies lässt sich grob in die folgenden Kategorien einteilen:



1. Modelle, die die Atmosphäre zur Reduktion des rechnerischen Aufwandes über annähernde Gleichungen modellieren oder stark vereinfachte Annahmen zur Reduktion des zu rechnenden Modellgebiets treffen.
2. Modelle, die zwar die physikalischen Grundgleichungen zur Beschreibung des atmosphärischen Zustands (Bewegungsgleichungen, erster Hauptsatz der Thermodynamik, Kontinuitätsgleichung und die Zustandsgleichung für ideale Gase) lösen, dabei aber die atmosphärische Turbulenz vollständig parametrisieren (RANS-Modelle).
3. Modelle, die auch die atmosphärische Turbulenz bis zu einer sog. „Subgridskala“ auflösen und so nur einen Teil der Turbulenz parametrisieren, welcher per se durch die gewählte Auflösung der Modellrechnung parametrisiert eingeht (LES-Modelle).

Dabei steigt über 1. zu 3. der Grad der naturgetreuen Modellierung und gleichzeitig die Komplexität der Nutzung und der Rechenaufwand. Modelle der Kategorie 3 werden derzeit hauptsächlich im wissenschaftlichen Kontext verwendet, da für ihre Verwendung aufgrund des hohen Rechenaufwandes ein Zugang zu einem Hochleistungsrechner benötigt wird.

Tabelle 1: Auswahl an numerischen Modellen für den Einsatz im Rahmen von Stadtklimaanalysen.

Modell	Kategorie	Mögliche horizontale Auflösung für grossräumige Anwendungen	Ausgabegrößen
FITNAH-3D	2	5 m – 1.000 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
KALM	1	20 m – 200 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
KLAM_21	1	20 m – 50 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
MUKLIMO_3	2	20 m – 100 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
PALM-4U	3	1 m – 50 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder

Eine gute Möglichkeit, den Rechenaufwand der Modellierung so gering wie möglich zu halten ist das sogenannte Nesting. Dabei wird, je nach Umsetzungsart, im Modell entweder ein Kerngebiet im Untersuchungsbereich feiner aufgelöst als die Umgebung (Online-Nesting) oder ein kleinräumiges Untersuchungsgebiet mit den Ergebnissen einer übergeordneten Modellierung angetrieben (Offline-Nesting). Beide Methoden sparen Rechenzeit dadurch ein, dass das Kerngebiet des Interesses ausreichend hochaufgelöst modelliert, aber auch kleingehalten werden kann und dennoch die beeinflussenden Prozesse aus dem Umfeld auf das Kerngebiet einwirken. Der Begriff Online-Nesting rührt daher, dass die Berechnung des Kerngebiets und des direkt anschliessenden, gröber aufgelöstem umgebenden Gebiets direkt in einem Modelllauf durchgerechnet wird. Beim Offline-Nesting muss hingegen die übergeordnete, grobskaligere Modellierung vor dem hochaufgelösten Bereich gerechnet werden.

3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess

Die Erstellung der Stadtklimaanalyse gliederte sich in einen dreistufigen Bearbeitungsprozess aus 1. Analyse, 2. Synthese und 3. Planerische Bewertung (Abbildung 10). Die Bearbeitungszeit lag zwischen März 2024 und April 2025. Bei den Arbeitsschritten in der Analyse- und Synthesephase handelt es sich um weitgehend standardisierte gutachterliche Tätigkeiten auf der Sachebene. Kernelement sind szenarienbasierte, numerische Stadtklimamodellierungen zu den Themenkomplexen Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt sowie Luftqualität sowie Auswertungen von frei verfügbaren Klimadaten. Zentrale Zwischenprodukte sind kartographische Darstellungen ausgewählter Modellergebnisse sowie insbesondere die Klimaanalysekarten. Auftretende methodische Herausforderungen (z.B. im Zusammenhang mit Eingangs-/Basisdaten) wurden in enger Abstimmung mit der Auftraggeberin, insbesondere dem Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Baudirektion Kanton Zürich sowie den Gemeinden des Kantons, wie auch extern zum Thema Klimawandelszenario mit dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) gelöst.

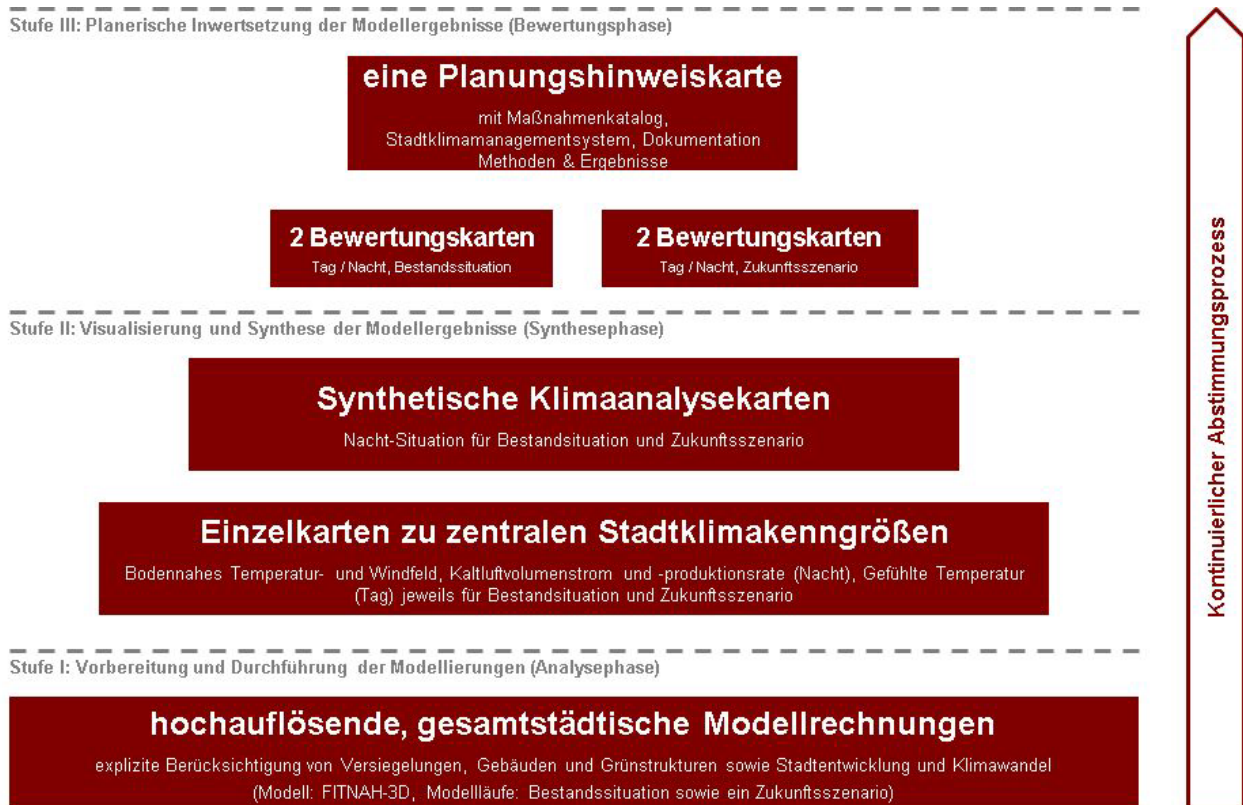


Abbildung 10: die drei Bearbeitungsstufen der Stadtklimaanalyse

In der Phase der planerischen Bewertung rückten neben gutachterlichen Tätigkeiten gleichberechtigt auch diskursorientierte Ansätze ins Zentrum der Projektbearbeitung. Erfahrungsgemäss besteht die grösste Herausforderung bei der Erstellung der Planungshinweiskarte als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse in ihrem wertenden und empfehlenden Charakter, denn sie „[...] umfasst Empfehlungen, Vorschriften oder Werturteile. Wertaussagen beschreiben die Umwelt wie sie aus Sicht des Betrachters sein soll. Ziele gehören zur Wertebene der Planung“ (Gaede & Härtling 2010, 32). Im stadt- und umweltplanerischen Kontext ebenso wie beim Klimaschutz und der Klimaanpassung sind Bewertungen nur im Kontext eines möglichst vollständig operationalisierten Zielsystems sowie auf der Basis von transparenten, reproduzierbaren und



akzeptierten Bewertungsmassstäben und -verfahren zulässig (Fürst und Scholles 2008). Ohne diese Prämissen hängen Bewertungen sprichwörtlich in der Luft, weil ihnen die Anknüpfungspunkte fehlen. Die in diesem systemischen Ansatz so zentralen Umweltqualitätsziele basieren dabei bestenfalls auf rechtlichen Normen (Gesetzen, Verordnungen, Richtlinien). Für rechtlich nicht normierte Bereiche müssen auf wissenschaftlichen Erkenntnissen aufbauende politische bzw. planerische Abwägungs-/Entscheidungsprozesse die Rechtsnormen anlassbezogen ersetzen.

Für die beiden zentralen stadtklimatischen Wirkungskomplexe des thermischen Komforts und der Luftqualität ergeben sich in diesem Zusammenhang diametral unterschiedliche Ausgangsbedingungen. So existieren für die Lufthygiene spätestens seit der Luftqualitätsrichtlinie (Richtlinie 2008/50/EG; EU 2008) Ziele in Form von Grenz- oder Richtwerten. Die Vorgaben dieser EU-Richtlinie wurden in Deutschland im Rahmen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) in nationales Recht umgesetzt und in der 39. Verordnung zur Durchführung des BImSchG, der Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen (39. BImSchV, Bundesregierung 2010), konkretisiert. Dieser Umstand macht die vorzunehmenden Bewertungen im Sinne einer Nominalskala „Grenzwert überschritten – Massnahmen notwendig“ bzw. „Grenzwert unterschritten – keine Massnahmen notwendig“ eindeutig und abschliessend.

Ein rechtlich vergleichbares Äquivalent zum BImSchG mit seinen konkretisierenden Verordnungen und technischen Anleitungen inklusive den aus ihnen ableitbaren Rechtsfolgen existiert für den thermischen Wirkungskomplex nicht. Auch entsprechende Gesetzesinitiativen sind gegenwärtig nicht ergriffen oder geplant. Allenfalls übergeordnete Leitbilder wie der Schutz der menschlichen Gesundheit nach Art. 2 GG oder das Gebot der gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse gemäss § 34 Abs. 1 Satz 2 BauGB haben als grundsätzliche Begründungszusammenhänge eine gewisse Relevanz. Für den konkreten Einzelfall helfen sie aber aufgrund ihrer nicht oder nur unzureichend vorhandenen Operationalisierung nicht abschliessend weiter. Folglich muss die Operationalisierung auf regionaler und kommunaler Ebene in individuellen politisch-planerischen Abwägungs-/Zielfindungsprozessen unter Berücksichtigung fachlicher Expertisen immer wieder aufs Neue erfolgen.

Aus diesen Prämissen wurde für das vorliegende Projekt ein Legitimierungsprozess abgeleitet, der im Wesentlichen auf einem Gegenstromprinzip zwischen gutachterlichen Vorschlägen auf Basis wissenschaftlich fundierter Erkenntnisse und Verfahren einerseits und deren Modifizierung gemäss den Ansprüchen und Wertmassstäben der projektbegleitenden Arbeitsgruppe (PAG) andererseits basiert. Die auf diese Weise entstandene Planungshinweiskarte ist damit das Ergebnis eines konsensorientierten Abstimmungs- und Aushandlungsprozesses, der die fehlenden normativen Regelungen weitgehend ersetzt und damit eine entsprechende Akzeptanz und Praxisanwendung erwarten lässt. Die Inhalte und Darstellungen weichen dabei notwendigerweise in einzelnen Punkten von den Vorschlägen in der VDI-Richtlinie ab, ohne sich dabei von den dort definierten Grundgedanken zu lösen.



Folgende Institutionen waren regelmässiges Mitglied der PAG:

- Baudirektion Kanton Zürich; Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
- Baudirektion Kanton Zürich; Amt für Raumentwicklung
- Stadt Zürich; Umwelt- und Gesundheitsschutz, Raum und Umwelt
- Stadt Zürich; Amt für Städtebau
- Stadt Winterthur; Departement Bau und Mobilität, Amt für Städtebau, Raumentwicklung
- Stadt Wädenswil; Planen und Bauen
- Stadt Uster, Bau, Stadtraum und Natur

Insgesamt fanden drei Sitzungen der PAG zu folgenden Themenschwerpunkten statt:

- PAG 1 (Einführung und Zentrale Produkte der Stadtklimaanalyse) am 21.06.2024
- PAG 2 (Vorstellung & Diskussion Bewertungskarten zur PHK) am 23.09.2024
- PAG 3 (Vorstellung & Diskussion Planungshinweiskarte) am 18.12.2024

4. Klima und Klimawandel im Kanton Zürich

Für die stadt- bzw. siedlungsklimatische Analyse des Kantons Zürich benötigt das verwendete Modell FIT-NAH meteorologische Eingangsdaten, die als modellexterner Antrieb fungieren. Idealerweise werden hierfür Messdaten verwendet, die an Tagen mit autochthoner Wetterlage (strahlungsreiche, windschwache Hochdruckwetterlage) erhoben wurden, um die maximale human-biometeorologische Belastung bestmöglich abbilden zu können. Die Darstellung der Klimaparameter an dieser Stelle beruht auf den bei MeteoSchweiz vorhandenen Grafiken und Auswertungen in den Sommermonaten. Sie beziehen sich, sofern nicht anderweitig angegeben, auf den Standort der MeteoSchweiz Station Zürich/Kloten (KLO).

Das Klima charakterisiert den langjährigen Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bzw. Gebiet und wird durch die statistischen Gesamteigenschaften über einen genügend langen Zeitraum repräsentiert (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten, etc.). Im Allgemeinen werden Zeiträume von 30 Jahren zugrunde gelegt. In der Schweiz gilt für die Beschreibung des Klimas jeweils die aktuelle Klimaperiode, momentan die Periode 1991-2020 und beinhaltet damit auch schon den bereits beobachteten Klimawandel, der sich seit Mitte der 1980er Jahre bemerkbar macht.

4.1 AKTUELLES KLIMA AN DER WETTERSTATION ZÜRICH/KLOTEN

Der Kanton Zürich ist dem mitteleuropäischen Kontinentalklima zuzuordnen und ist innerhalb der Schweiz in der Grossregion Mittelland lokalisiert. Die Abbildung 11 zeigt ein Klimadiagramm für die Station Zürich/Kloten für die Normperiode 1991 – 2020, die im folgenden Abschnitt exemplarisch für die Sommermonate kurz beschrieben wird.

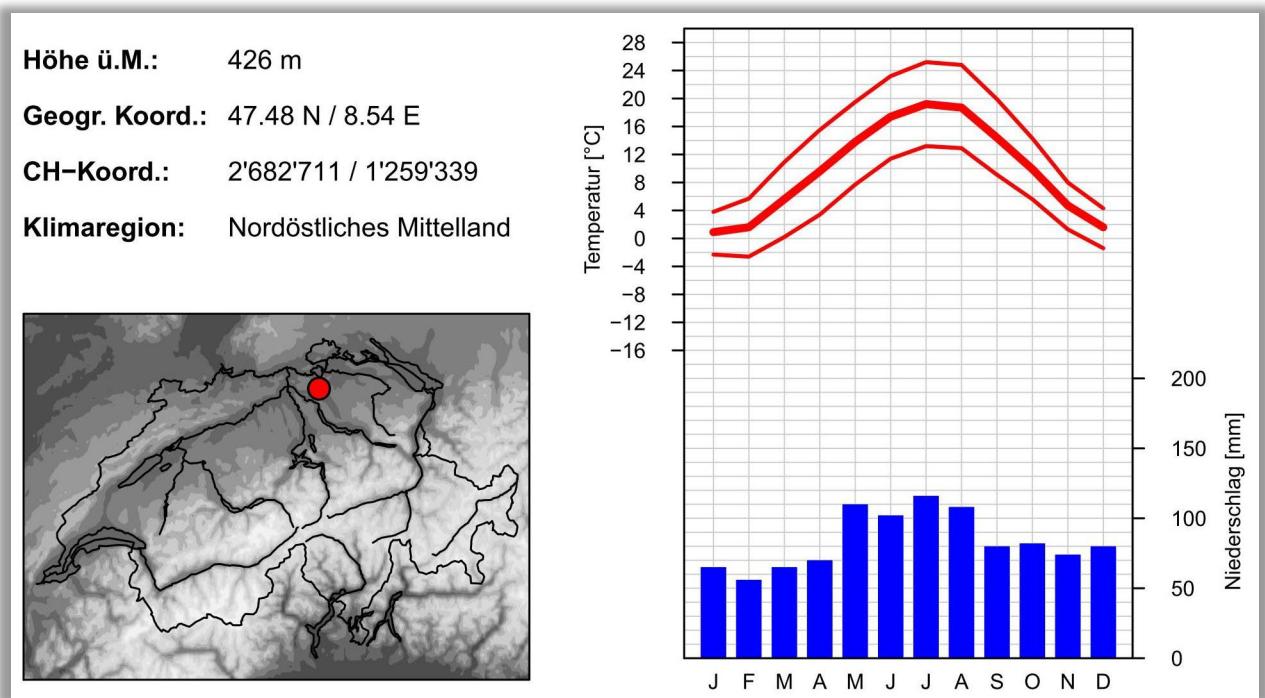


Abbildung 11: Klimadiagramm Station Zürich/Kloten, Normperiode 1991-2020 (Quelle: MeteoSchweiz 2025a)



Für die Sommermonate Juni, Juli und August ist zu sehen, dass die Temperaturen im Monatsmittel knapp unter 20° C verbleiben (dicke rote Linie im Diagramm). Die Maximaltemperaturkurve (obere rote Kurve) reicht in den Sommermonaten JJA hingegen weit über 20°C, im Juli sind es sogar 25,2°C. Im Juni sind 11,7 Tage, im Juli 16,4 Tage und im August 14,9 Tage als Sommertage (Maximaltemperatur am Tag > 25 °C) im Mittel gemessen worden. Hitzetage (Maximaltemperatur am Tag > 30 °C) gab es in der Anzahl weniger: für Juni 2,5; für Juli ca. 5 und für den August 4,3 Tage. Tropennächte sind an der Station Zürich/Kloten für die Normperiode nicht ausgewiesen. Der Juli ist der heisseste Monat des Sommers. Die mittlere Temperatur gibt für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar positive Werte über 0 °C an. Die Minimumtemperatur (untere rote Kurve) zeigt jedoch noch geringe Minusgrade von -1,4 °C für den Dezember und -2,3 im Januar. Den Temperaturen gegenüber steht in der Abbildung 11 der Niederschlag. Die monatlichen Niederschlagssummen sind in den Sommermonaten mit jeweils über 100mm als Monatssumme am höchsten, wobei die maximale Niederschlagssumme im Juli mit 112 mm am höchsten ist. Somit gehen die über das Jahr betrachtet höchsten monatlichen Niederschlagssummen mit den wärmsten Monaten einher. Ob dieser Niederschlag für die Versorgung der Vegetation ausreichend ist, gibt die Grafik nicht wieder.

4.2 BEOBACHTETER KLIMAWANDEL AN DER WETTERSTATION ZÜRICH/KLOTEN

Die Zunahme der Schweizer Mitteltemperatur seit 1864 bis heute beträgt rund 2,9 °C. Das ist im Vergleich zur Zunahme der mittleren globalen Temperatur im gleichen Zeitraum von 1,3 °C deutlich mehr und ist hauptsächlich in der zentralen kontinentalen Lage der Schweiz begründet. Wird der Blick in die Zukunft gewandt, so ermitteln die Klimaszenarien CH2018 eine Temperaturzunahme für die Schweiz von +4,3 °C (RCP 8.5) bis 2085 gegenüber der Normperiode 1981-2010, was jedoch mit konsequentem Klimaschutz (RCP 2.6) auf +1,2 °C für die Schweiz begrenzt werden kann. Dem Schweizer Mittelland wird eine hohe Zunahme der Temperatur aufgrund des Klimawandels vorhergesagt. In der Abbildung 12 ist die Entwicklung der Sommertemperaturen für die Monate Juni, Juli und August seit dem Jahr 1864 im Vergleich zur Klimaperiode 1961 – 1990 aufgetragen, um die Trends der Entwicklung nachzuvollziehen. Es ist gut zu erkennen, dass es einen signifikanten positiven Trend der Sommertemperaturen (schwarze Linie) gibt. Die Sommer ab 2015 weichen deutlich von der Normperiode 1961 – 1990 mit bis über +3 °C ab. Der Sommer 2003 ist derjenige mit der höchsten positiven Abweichung zur Normperiode von fast +5 °C. Somit wurden die fünf wärmsten Sommer seit Messbeginn nach der Jahrtausendwende verzeichnet. Für den Sommer 2024 wird eine positive Abweichung von 3,1 °C festgestellt. Diese Grafik verdeutlicht, dass der Klimawandel bereits jetzt stattfindet und in den Messreihen beobachtet werden kann. Seit den 1980er Jahren steigen die Temperaturen deutlich an und bleiben auch auf hohem Niveau.

Abbildung 13 zeigt die langjährige Entwicklung der sommerlichen Niederschlagssummen im Vergleich zur Normperiode 1961 – 1990 für das östliche Mittelland. Hier ist kein signifikanter Trend zu sehen und die Werte schwanken positiv als auch negativ um den Durchschnitt der Klimaperiode 1961 – 1990 bzw. zeigen in den letzten 15 Jahren eine leichte Abnahme.

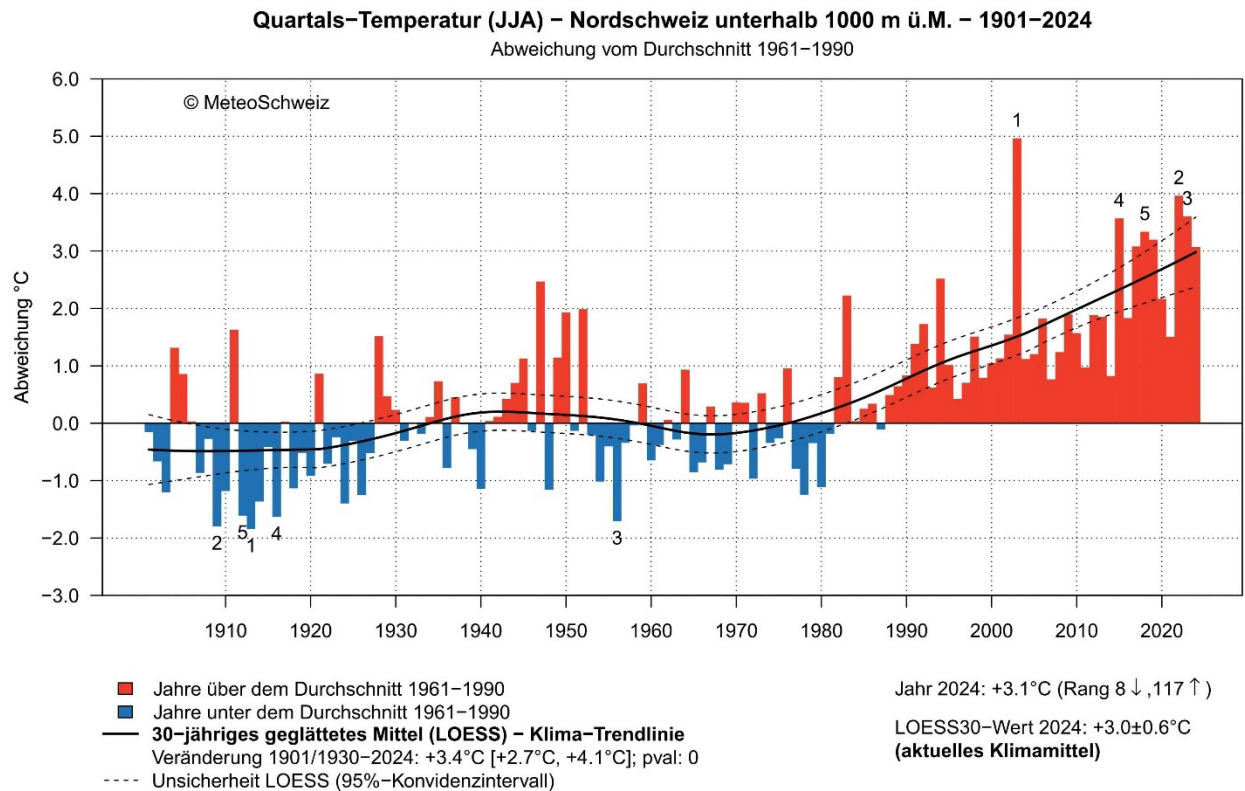


Abbildung 12: Entwicklung der sommerlichen Temperatur für die Nordschweiz unter 1000 m ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961–1990 (Quelle: Meteoschweiz 2025b)

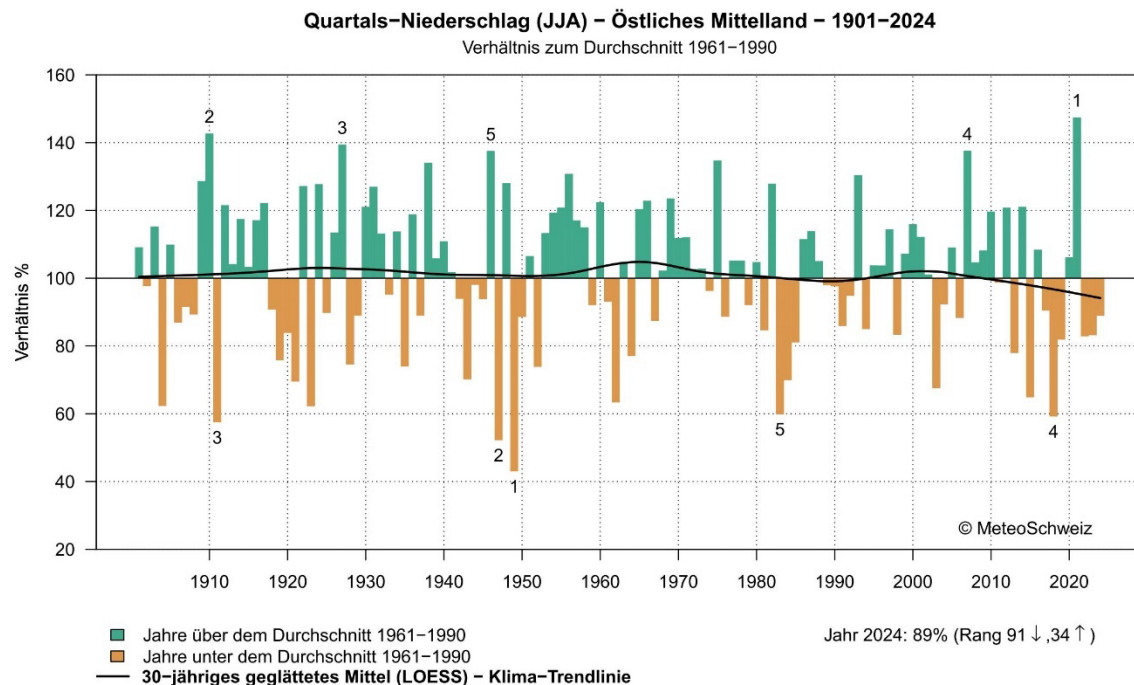


Abbildung 13: Entwicklung der sommerlichen Niederschlagssummen für das östliche Mittelland von 1901 bis 2024 im Vergleich zur Periode 1961–1990 (Quelle: Meteoschweiz 2025c)



4.3 KLIMAWANDELSZENARIO

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO₂-Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die CO₂-Emissionen zukünftig entwickeln, werden diese in Klimamodellen in Form von Emissionsszenarien mit unterschiedlicher CO₂-Entwicklung über die Zeit berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen. Für Europa standen zum Bearbeitungsstand des Projekts drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5 (RCP = Representative Concentration Pathways). Die Zahl in der Bezeichnung der Szenarien benennt den mittleren anthropogenen Strahlungsantrieb in W/m², der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (Moss et al. 2010):

- Das Szenario RCP 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. 3 Watt pro Quadratmeter (W/m²). Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf 2,6 W/m² ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das 2 °C-Ziel nicht überschreiten, sodass das RCP 2.6 oft auch als „Klimaschutzszenario“ bezeichnet wird. Nach der aktuellen Entwicklung nähern wir uns inzwischen global immer mehr dieser anvisierten Grenze, sodass das Ziel wahrscheinlich nur noch mit einer besonderen Anstrengung der Weltgemeinschaft zu erreichen ist (IPCC 2022).
- RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach bis ca. 2075 nur noch geringfügig steigt und in der Folge stagniert.
- Das Szenario RCP 8.5 weist hingegen den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und einen Anstieg der globalen Mitteltemperatur um ca. 4,8°C gegenüber dem Zeitraum 1985-2005 bewirken würde. Das Szenario RCP 8.5 wird auch als „Weiter wie bisher Szenario“ bezeichnet, da es eben den Weg darstellt, auf dem wir uns ohne Umsetzung von mehr Klimaschutzmassnahmen als bisher, befinden. Diese Situation liegt dem für den Kanton Zürich modellierten Zukunftsszenario zugrunde.
- Konkret wird in der vorliegenden Studie das sog. „medium estimate“ aus den Schweizer CH2018 Klimaszenarien für RCP8.5 herangezogen (CH2018). Da in der vorliegenden Untersuchung der Fokus auf der Sommersituation liegt, wird als Klimasignal die Veränderung der Sommertemperatur gegenüber der Periode 1981-2010 in Höhe von +2,5 °C³ verwendet. Eine Einordnung im Hinblick auf die anstehende Aktualisierung der Schweizer Klimaszenarien von CH2018 zu CH2025 wird im Folgenden gegeben.

Wie bereits die Ergebnisse des Global Carbon Projektes⁴ proklamierten, befanden und befinden wir uns, gemessen an den globalen CO₂-Emissionen, aktuell noch immer auf dem „Pfad“ des RCP 8.5-Szenarios (Schwalm et al. 2020). Zwar werden immer wieder Zweifel in der Wissenschaft geäussert, ob das Szenario noch immer als das „weiter wie bisher Szenario“ zu nennen ist, aber dennoch entsprechen die aktuellen globalen CO₂-Emissionen am ehesten dem RCP 8.5 und somit bietet dieses Szenario auch aktuell noch die beste Prognose für zukünftige Emissionen und beschreibt unter dem Vorsorgeaspekt am besten die Klimawandelfolgen, die ohne effektive weltweite Klimaschutzanstrengungen zu erwarten sind. Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO₂-Ausstosses würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen. Die in der Abbildung 14 aufgeführten RCP-Kurven stammen aus dem fünften Sachstandsbericht (AR5) des IPCC aus dem Jahr 2013/14 (IPCC 2013).

³ Quelle: CH2018 Szenario RCP8.5/2060/medium estimate/summer/canton Zurich

⁴ www.globalcarbonproject.org

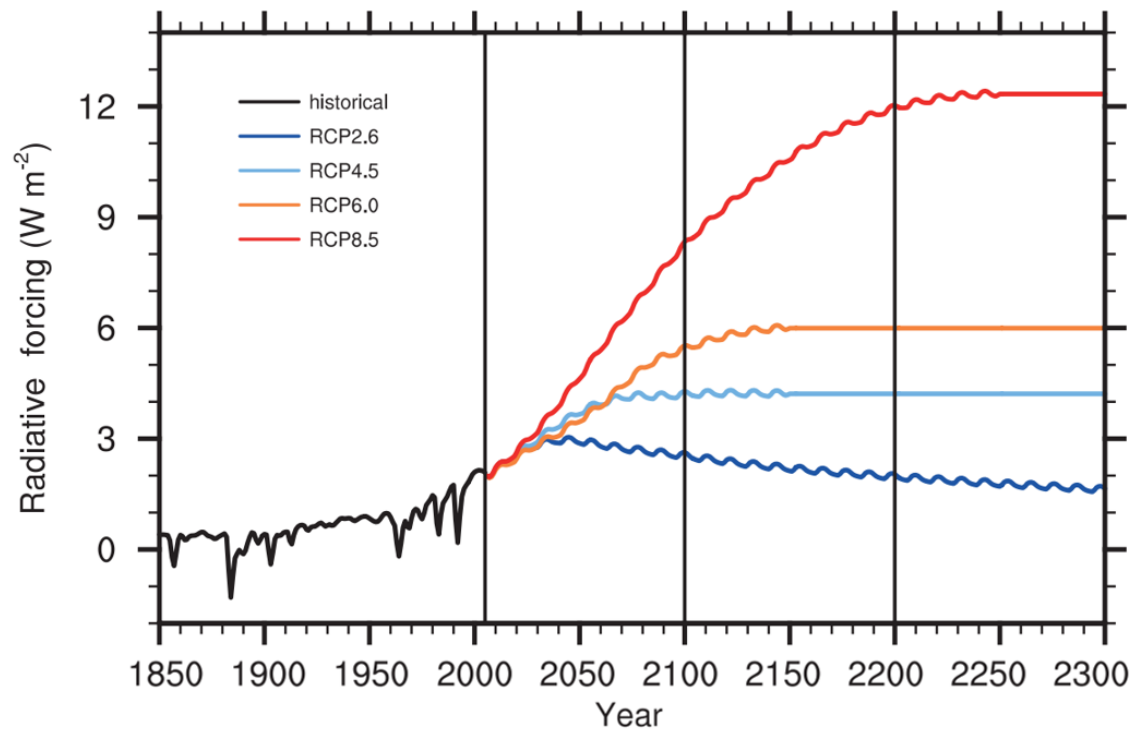


Abbildung 14: Anthropogener Strahlungsantrieb der verschiedenen RCP-Klimaszenarien, die schwarze Linie repräsentiert Messwerte (IPCC 2013).

Die Abb. 15 zeigt die Abweichung der gemessenen mittleren sommerlichen Lufttemperaturen von der Normperiode 1981-2010 für den Kanton Zürich sowie die Projektion für die RCP- Szenarien 2.6 und 8.5. Für den Kanton Zürich lässt sich eine deutliche Zunahme der Temperatur ab den 80er Jahren beobachten. Im weiteren Verlauf der Messungen festigt sich seit dem Jahr 2000 der Trend stetig steigender Temperaturen. Dieser entwickelt sich je nach betrachtetem RCP-Szenario in unterschiedliche Richtungen. Während sowohl im Szenario RCP 2.6 als auch für RCP 8.5 bis etwa 2040 ein ähnlich ausgeprägter Anstieg zu erwarten ist, steigen die Temperaturen im Szenario RCP 8.5 ab dann weiter an. Hier wird zum Ende des Jahrhunderts eine Erwärmung gegenüber der Normperiode 1981-2010 in einer Grössenordnung von 5 °C projiziert. Im „Klimaschutz-Szenario“ RCP 2.6 hingegen ist der Anstieg mit 1 °C wesentlich niedriger.

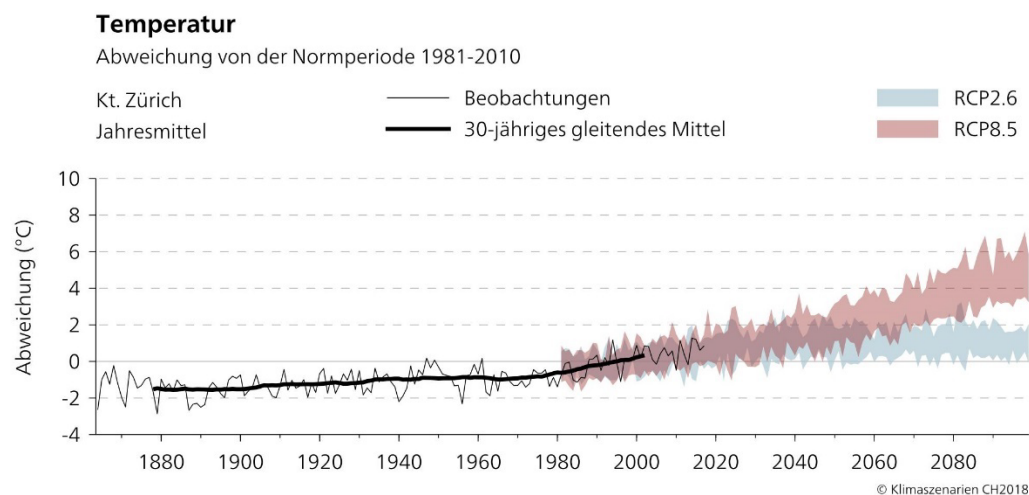


Abbildung 15: Gemessene und projizierte Abweichung der sommerlichen Lufttemperaturen von der Normperiode 1981-2010 im Kanton Zürich (NCCS 2018).

Die Klimaszenarien CH2018 als Grundlage für das Zukunftsszenario

Die CH2018-Klimaszenarien stellen die derzeit gültigen nationalen Referenzszenarien für die Schweiz dar. Sie umfassen eine breite Palette an Produkten und Datensätzen, die den künftig erwarteten Klimawandel in der Schweiz beschreiben und messbar machen (www.klimaszenarien.ch). Die Datengrundlage bilden 68 regionale Klimasimulationen der EURO-CORDEX-Initiative (<https://www.euro-cordex.net/>), die mittels statistischer Verfahren korrigiert und auf eine hohe räumliche Auflösung bzw. auf Stationsniveau skaliert wurden. Die Szenarien decken grundsätzlich den Zeitraum bis zum Jahr 2099 ab und stehen für drei verschiedene Treibhausgasemissionspfade zur Verfügung (RCP 2.6, 4.5 und 8.5). Für das Klimawandelszenario wird das sogenannte „medium estimate“ des RCP 8.5, 2060 für die Sommersituation und das Gebiet des Kantons Zürich⁵ verwendet.

Im Rahmen des laufenden Projekts *Klima CH2025* arbeiten MeteoSchweiz und die ETH Zürich jedoch an einer aktualisierten Version der Szenarien, deren Veröffentlichung für den 4. November 2025 vorgesehen ist. *Klima CH2025* orientiert sich weitgehend an der Methodik von CH2018 und basiert weiterhin auf den regionalen Klimasimulationen der EURO-CORDEX-Initiative. Allerdings bestehen gegenüber CH2018 die folgenden Unterschiede:

Im Rahmen der Aktualisierung der Klimaszenarien wird das zugrundeliegende Ensemble regionaler Klimasimulationen aus der EURO-CORDEX-Initiative erweitert und künftig ausschliesslich aus Modellen des hochauflösenden EUR-11-Ensembles mit einer Gitterauflösung von 12 km bestehen. Im Unterschied zu den CH2018-Szenarien, die auch weniger fein aufgelöste EUR-44-Simulationen (ca. 50 km) beinhalten, ermöglicht diese Fokussierung eine genauere Abbildung regionaler Klimadetails. Ergänzend werden neue wissenschaftliche Erkenntnisse aus dem sechsten Sachstandsbericht des IPCC (AR6) sowie aus dem aktuellen globalen Klimamodell-Ensemble CMIP6 berücksichtigt.

Die Referenzperiode, die sowohl zur Kalibrierung der statistischen Nachbearbeitung als auch als Basis für die Berechnung der Klimaveränderungssignale dient, wird von 1981–2010 auf den Zeitraum 1991–2020 aktualisiert. Diese Anpassung trägt auch dem Umstand Rechnung, dass die bisherigen EURO-CORDEX-Simulationen die in den letzten Jahrzehnten beobachtete Erwärmung im Alpenraum tendenziell unterschätzt haben.

Eine zentrale methodische Neuerung ist die Erweiterung der zeitlichen Darstellung: Neben der gewohnten Projektion bis zum Jahr 2099 wird nun zusätzlich eine Analyse entlang sogenannter Global Warming Levels (GWL) eingeführt. Dabei wird die Klimaveränderung nicht mehr nur in Bezug auf ein bestimmtes Kalenderjahr, sondern relativ zum Erreichen bestimmter globaler Erwärmungsschwellen (z. B. +1.5°C, +2°C, +3°C gegenüber vorindustriell) dargestellt. Diese GWL-basierte Perspektive wird ergänzt durch Informationen, wann diese Erwärmungsniveaus voraussichtlich erreicht werden – in Abhängigkeit vom jeweils gewählten Treibhausgasszenario.

Auch in der statistischen Nachbearbeitung der Klimamodelldaten erfolgen Weiterentwicklungen: Neben der gewohnten Herunterskalierung auf die Stationsskala wird die Gitterauflösung von bisher 2 km auf 1 km verfeinert, was eine realitätsnähere Abbildung topografischer Strukturen erlaubt. Zudem werden die Gitter- und Stationsprodukte nicht nur für das geografische Gebiet der Schweiz bereitgestellt, sondern teilweise auch für die sogenannte hydrologische Schweiz – einschliesslich grenzüberschreitender Einzugsgebiete in Italien, Österreich, Deutschland und Frankreich.

⁵ Quelle: [CH2018](#) Szenario RCP8.5/2060/medium estimate/summer/canton Zurich



Insgesamt werden die methodischen und modelltechnischen Anpassungen im Rahmen von Klima CH2025 voraussichtlich keine grundlegenden Änderungen an den zentralen Aussagen der CH2018-Klimaszenarien zur Folge haben. Diese Kernaussagen behalten aller Wahrscheinlichkeit nach auch mit der Veröffentlichung der neuen Szenarien ihre Gültigkeit.

Es ist jedoch mit geringfügigen quantitativen Anpassungen zu rechnen: Insbesondere dürften die für ein gegebenes Treibhausgasszenario projizierten Temperaturänderungen sowie die daraus abgeleiteten klimatischen Folgrößen leicht nach oben korrigiert werden. Gleichzeitig wird das extreme Emissionsszenario RCP8.5 inzwischen als weniger wahrscheinlich eingeschätzt. Diese gegenläufigen Effekte wirken sich kompensierend aus, wodurch Aussagen auf Basis von CH2018 grundsätzlich weiterhin als robust gelten können. Die endgültige Quantifizierung dieser Effekte wird mit der Veröffentlichung der Klima CH2025-Produkte im November 2025 erfolgen. Klima CH2025 wird somit methodische Verbesserungen und aktualisierte Grundlagen bringen, ohne die Kernaussagen der CH2018-Szenarien grundlegend zu verändern.

Weitere Entwicklung meteorologischer Kenntage

Die Abbildung 16 zu den Sommertagen und Hitzetagen im Kanton Zürich verdeutlicht die kontinuierliche Zunahme der meteorologischen Kenntage Sommer- und Hitzetage bis in die zweite Hälfte des Jahrhunderts. Sommertage sind Tage, an denen die maximale Tagestemperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$ ist, Hitzetage sind Tage, an denen die Maximaltemperatur am Tag 30°C übersteigt. Die Graphiken zeigen die Entwicklung für das RCP-Szenario 2.6 mit Klimaschutzmassnahmen (links) und das pessimistische RCP-Szenario 8.5 ohne Massnahmen (rechts). Das dargestellte RCP-Szenario 4.5 (Mitte) nimmt eine vermittelnde Stellung ein.

Bei den Sommertagen zeigt sich für das Szenario RCP 2.6 eine Zunahme von ca. 45 Tagen im Jahr 1995 auf etwa 58 Tagen im Bezugsjahr 2035. Dieser Wert steigt bis 2060 auf 59,6 an und bleibt bis zum Betrachtungsjahr 2085 unter der Annahme wirksamer globaler Massnahmen zum Klimaschutz annähernd stabil. Im Szenario 4.5 beträgt die Anzahl der Sommertage für 2035 59,5 und steigt bis 2060 auf durchschnittlich 67,3 Tage/Jahr an. Für den Zeithorizont 2085 wird ein weiterer Anstieg auf 70,5 Sommertage/Jahr prognostiziert. Für das Szenario RCP 8.5 ist hingegen eine kontinuierliche Zunahme zu verzeichnen, welche für das Jahr 2085 insgesamt 98 Hitzetage ausweist.

Die für die Sommertage beschriebene Charakteristik für das Szenario RCP 2.6 zeigt sich in ähnlicher Weise auch für die Hitzetage, wobei - ausgehend von 7,8 Tagen im Jahr 1995 - das Maximum mit 14,7 Tage/Jahr ab 2060 nicht mehr markant ansteigt. Im Betrachtungsjahr 2035 ist die Anzahl der Hitzetage mit 15,8 im Szenario RCP 4.5 bzw. 15,0 im Szenario RCP 8.5 noch ähnlich ausgeprägt. Bis zum Jahr 2060 nimmt die Zahl der Hitzetage im Szenario RCP 4.5 auf 20,2 zu, im Szenario RCP 8.5 beträgt sie bereits knapp 25,1.

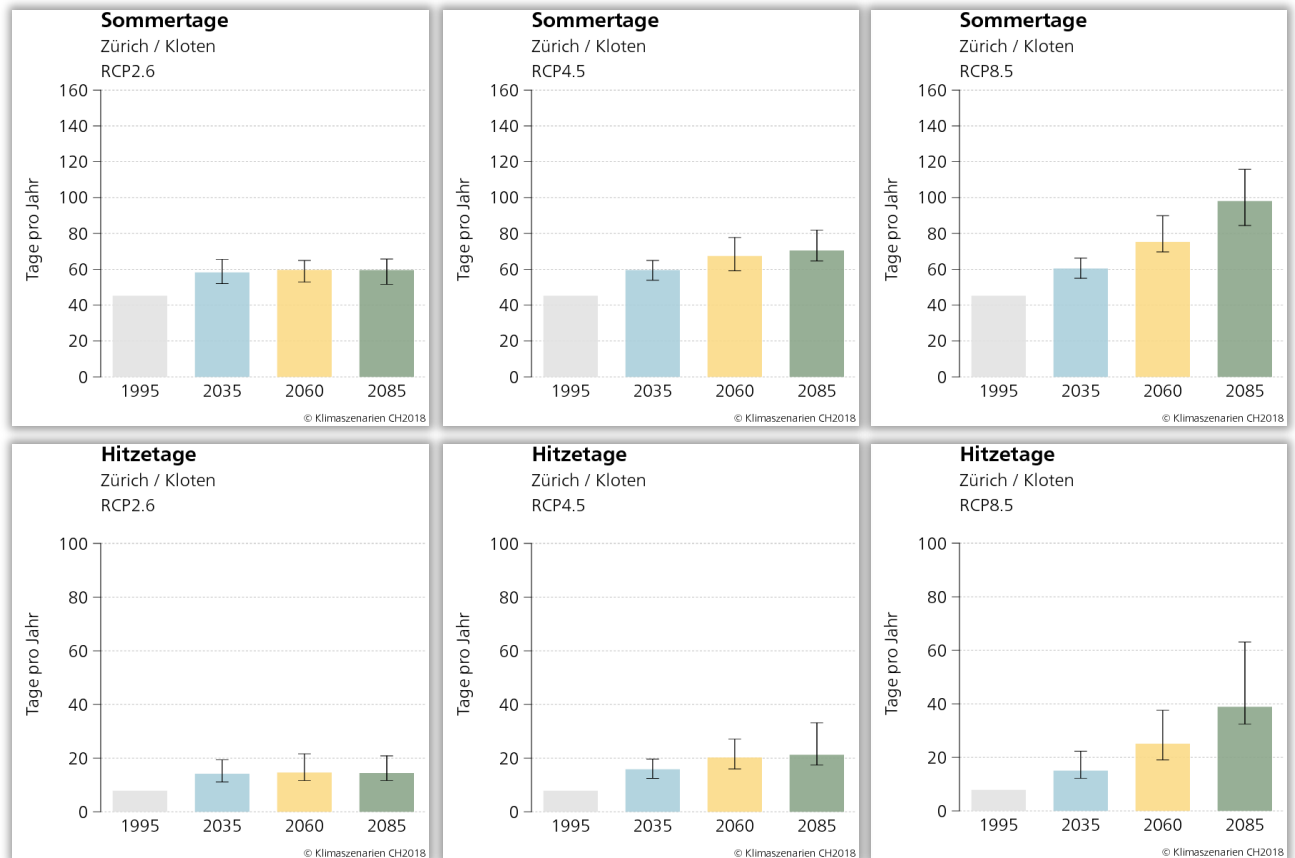


Abbildung 16: Gemessene und projizierte Abweichung der sommerlichen Lufttemperaturen von der Normperiode 1981-2010 (Quelle: Meteoschweiz 2025d).

Bis 2085 steigt im Szenario RCP 4.5 die Anzahl an Hitzetagen moderat auf etwa 21,2 an, während für das Szenario RCP 8.5 nunmehr 38,8 Hitzetage angenommen werden. Verglichen mit dem Ausgangswert von 1995 stellt dies eine Verfünfachung dar.



4.4 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN

Die Modellrechnungen innerhalb der vorliegenden Stadtklimaanalyse legen einen autochthonen Sommertag (wolkenloser Himmel, nur sehr schwach überlagernder Wind) als meteorologische Rahmenbedingung zugrunde. Verbunden mit dieser autochthonen Wetterlage ist das Auftreten einer windschwachen Strahlungsnacht, in der die nächtliche Ausstrahlung aufgrund der fehlenden Bewölkung deutliche Temperaturunterschiede im Kantonsgebiet erzeugt.

An der Station Zürich-Fluntern traten im langjährigen Mittel von 2010 - 2023 rund 35 windschwache Strahlungsnächte pro Jahr auf, wobei saisonale Unterschiede mit einer höheren Anzahl im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind (Abbildung 17). In den drei Sommermonaten Juni, Juli und August wurden im jährlichen Mittel knapp 18 windschwache Strahlungsnächte beobachtet, was einem Anteil von 19 % aller Sommernächte entspricht – etwa jede fünfte Sommernacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen.

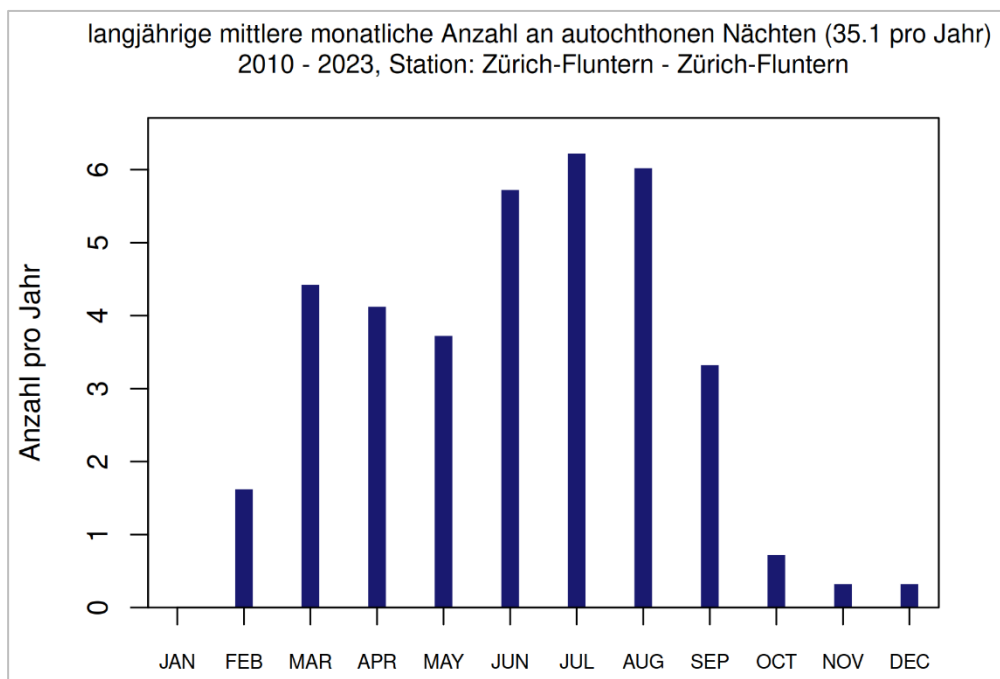


Abbildung 17: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten in Zürich (83 pro Jahr) für den Zeitraum 2010 - 2023, basierend auf der Station Zürich-Fluntern (DWD 2022)

5. Analysemethoden

5.1 NUMERISCHE MODELLIERUNG

5.1.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

Die Produkte der vorliegenden Stadtklimaanalysen basieren auf numerischen Modellsimulationen. Eingesetzt wurde das etablierte hochaufgelöste Stadtklimamodell FITNAH-3D. Die Grundgleichungen von FITNAH sind in der Literatur beschrieben (Gross 1992). Seit der Veröffentlichung zum Basismodell in den 1990er Jahren wurde FITNAH in einer Kooperation zwischen Prof. Günter Gross und der GEO-NET Umweltconsulting GmbH fortlaufend durch neue Funktionen, Module und Auswerteroutinen weiterentwickelt (u.a. Gross 2002, Gross et al. 2002, Gross 2012a, Gross 2012b, Gross 2013, Gross 2017).

Das Grundgerüst des dreidimensionalen Modells FITNAH besteht aus den Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und innerer Energie sowie Bilanzgleichungen für Feuchtekomponenten und Luftbeimengungen. Die verschiedenen turbulenten Flüsse werden mit Hilfe empirischer Ansätze mit den berechenbaren mittleren Grössen verknüpft. Der dabei auftretende turbulente Diffusionskoeffizient wird aus der turbulenten kinetischen Energie berechnet, für die eine zusätzliche Gleichung gelöst wird.

Die Erwärmungs- und Abkühlungsraten in der Atmosphäre aufgrund der Divergenz der langwelligen Strahlungsflüsse werden über ein Verfahren berechnet, bei dem die Emissivität des Wasserdampfes in der Luft berücksichtigt wird. Bei detaillierten Simulationen im realen Gelände müssen neben der Orographie insbesondere der Einfluss von Wäldern und urbanen Strukturen auf die Verteilung der meteorologischen Grössen realitätsnah berücksichtigt werden. Hierzu sind in FITNAH besondere Parametrisierungen vorgesehen.

Ein Wald oder Baumbestand findet über bestandsspezifische Grössen wie Baumhöhe oder Bestandsdichte Eingang in das Modell. Damit gelingt es u.a., die Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im Kronenbereich und die starke nächtliche Abkühlung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit verfügbaren Beobachtungen zu simulieren. Unter Berücksichtigung der stadtspezifischen Grössen Gebäudehöhe, Versiegelungs- sowie Überbauungsgrad und anthropogene Abwärme kann die typische Ausbildung der städtischen Wärmeinsel bei verringerter mittlerer Strömung simuliert werden (vgl. Gross 1987).

Das gesamte Gleichungssystem einschliesslich der Parametrisierungen wird in ein dem Gelände folgendes Koordinatensystem transformiert. Damit gelingt es insbesondere, die Randbedingungen der verschiedenen meteorologischen Grössen am unteren Rand, dem Erdboden, problemspezifisch zu formulieren. Die Berechnung der Erdoberflächentemperatur erfolgt über eine Energiestrom-Bilanz, bei der fühlbarer und latenter Wärmestrom, der Bodenwärmestrom, kurz- und langwellige Strahlungskomponenten sowie der anthropogene Wärmestrom Berücksichtigung finden.

Die Lösung der physikalischen Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Gitter. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. FITNAH-3D erfüllt die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl.7 (VDI 2017) definierten Standards für mesoskalige Windfeldmodelle im Zusammenhang mit dynamisch und thermisch bedingten Strömungsfeldern.

Die Anwendungsbereiche von FITNAH reichen von teilstädtischen Analysen zu den klimaökologischen Auswirkungen von Stadtentwicklungsvorhaben über gesamstädtische und regionale/kantonale Klimaanalysen



bis hin zu sehr grossräumigen Anwendungen für ganze Bundesländer oder Staaten. Die horizontale Auflösung in einem regelmässigen Gitter reicht dabei von 5 m bis 200 m. Die vertikale Gitterweite ist nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Grössen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 40 und 70 m über Grund (ü. Gr.). Nach oben hin wird der Abstand immer grösser und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü. Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Relief und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Modellanwendungen mit FITNAH 3D benötigen spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Informationen in der jeweils gewählten Auflösung vorliegen:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung
- Strukturtherhöhe

Grundsätzlich gilt dabei, dass je höher die horizontale räumliche Auflösung ist, desto mehr Details der Erdoberfläche können im Modell berücksichtigt werden und desto hochwertiger sind die Modellergebnisse. Den limitierenden Faktor stellt dabei nicht die Grösse des zu untersuchenden Modellgebietes, sondern einzig die Rechenzeit dar. Die Wahl der „richtigen“ Modellauflösung muss also stets über eine Abwägung zwischen der zu erfüllenden Analyseaufgabe, den bereitgestellten zeitlichen und sonstigen Ressourcen sowie den zur Verfügung stehenden Eingangsdaten erfolgen.

Für die Analysen im vorliegenden Projekt wurde eine horizontale Modellauflösung von 5 m gewählt, das entspricht für das gewählte Modellgebiet und angrenzendes Umland rd. 122,9 Mio. Rasterzellen. Entsprechend grosse Gebäude- und Grünstrukturen werden dabei explizit aufgelöst. Es handelt sich demzufolge um einen Modellansatz am Übergangsbereich von der Meso- zur Mikroskala. Mit dieser Auflösung lassen sich alle für gesamtstädtische und quartiersbezogene Fragestellungen relevanten Aussagen ableiten.

Mit Blick auf die benötigten Eingangsdaten besteht bei der gewählten hohen Auflösung erfahrungsgemäss die grösste Herausforderung in der Erzeugung des Landnutzungsrasters und der Zuweisung einer individuellen Höheninformation. Das Raster sollte die reale Hauptnutzung innerhalb einer 100 m² grossen Rasterzelle hinreichend gut abbilden. Im Modell können dabei die in Tabelle 2 aufgelisteten Realnutzungsklassen unterschieden werden. Für Bäume besteht die Besonderheit, dass ihnen zusätzlich noch ein Attribut für den Untergrund, auf dem sie stehen, zugewiesen wird. Auf diese Weise können beispielsweise die Wirkungen von Parkbäumen über Rasenflächen von Effekten unterschieden werden, die sich unter Alleen im Strassenraum ergeben. Jede Nutzungsklasse ist im Modell mit diversen Eigenschaften (u.a. Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit) verbunden, auf deren Basis die notwendigen physikalischen Gleichungen gelöst werden.

Tabelle 2: in FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 5 m.

Nutzungsklasse	Beschreibung	Strukturhöhe [m]
20	Gebäude	individuell
22	unbebaut versiegelt	0
14	Gewässer	0
7	Gleis	0
15	Rebflächen	0,5
9	niedrige Vegetation	0,5
24	Baum über Versiegelung	individuell
25	Baum über Rasen	individuell
23	niedrige Vegetation auf naturfernem Boden*	0,5
26	Baum über niedriger Vegetation auf naturfernem Boden	individuell
28	Sandboden	0

* naturferne Böden sind anthropogen stark überprägte, aber unbebaute städtische Oberflächen

Abbildung 18 zeigt zur Schaffung eines grundsätzlichen Modellverständnisses typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ausgewählter Nutzungsklassen während hochsommerlicher Strahlungswetterlagen, die in klimaökologischen Analysen dem Stand der Technik entsprechend regelmässig als meteorologische Randbedingung verwendet werden. Die drei ausgewählten Nutzungsklassen – niedrige Vegetation, unbebaut versiegelt und Baum über niedriger Vegetation – zeigen grundsätzliche ähnliche Kurvenverläufe mit Minima in den (frühen) Nachtstunden sowie Maxima um den Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (modelliert wurde hier der 21.06.). Die höchsten Oberflächentemperaturen treten im Tagesgang durchgängig an unbebaut versiegelten Oberflächen auf. Sie haben die grösste Wärmespeicherkapazität der ausgewählten Strukturen. Die geringsten Oberflächentemperaturen in der Nacht werden für die niedrige Vegetation um 04:00 morgens – also kurz vor Sonnenaufgang – modelliert. Hier zeigt sich die Wirkung einer ungehinderten nächtlichen Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel. Tagsüber zeigen sich die niedrigsten Temperaturen an den Bodenoberflächen unter dem Baum. Die relative Temperaturabsenkung ist insbesondere auf die verschattende Wirkung des Baumes sowie die Verdunstungskühlung zurückzuführen. Nachts reduziert die Baumkrone allerdings die Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Oberfläche, sodass die Temperatur mehrere Kelvin (K) über denen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige Kelvin (K) unter der unbebaut versiegelten Oberfläche liegt. Diese idealtypischen Muster werden im gesamtstädtischen Kontext durch komplexe lokalklimatische Effekte (nachbarschaftliche Wirkungen, horizontale und vertikale Strömungsprozesse) überprägt und können sich somit im konkreten räumlichen Fall auch (komplett) anders darstellen. Dennoch sind die skizzierten Phänomene grundlegend für das Verständnis des Modells und seiner Ergebnisse.

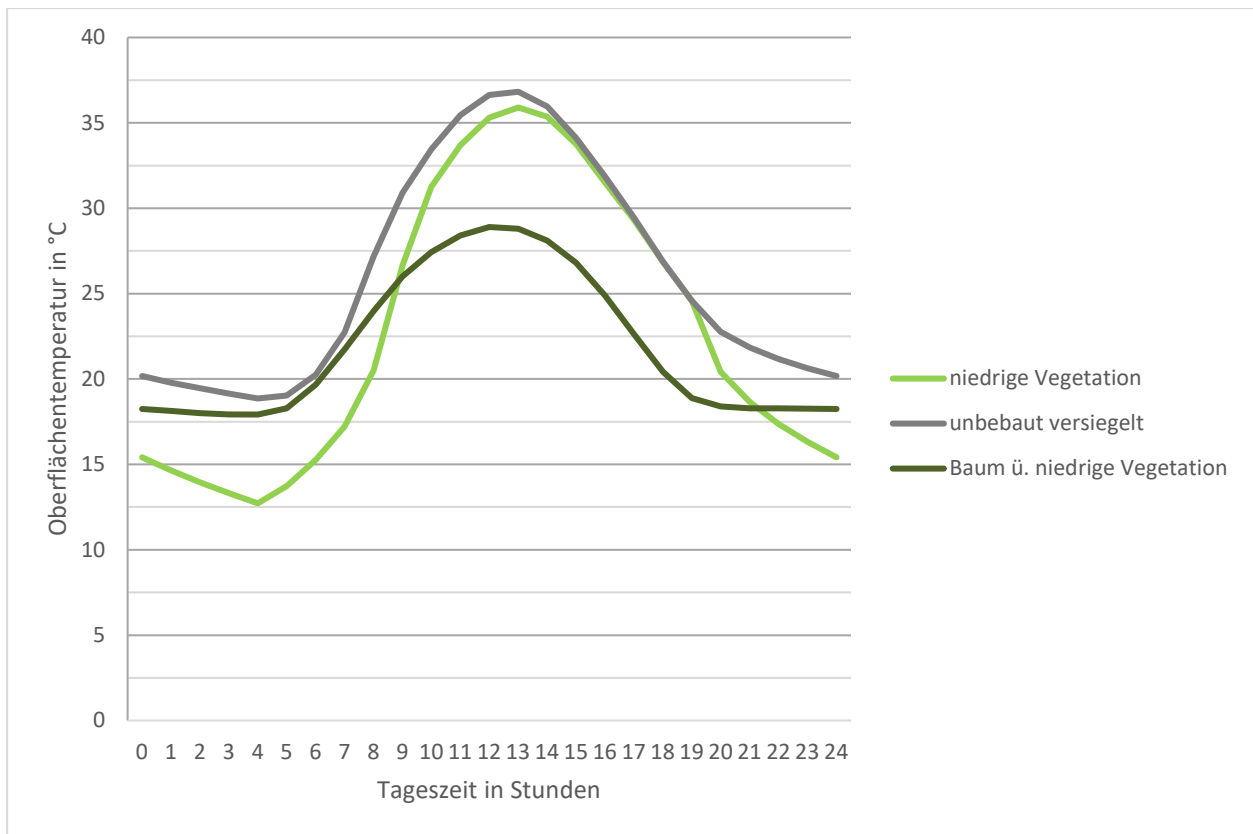


Abbildung 18: Typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen für ausgewählte Nutzungsklassen von FITANH-3D

Im Hinblick auf die stadtklimatischen Auswirkungen von verschiedenen Bodenfeuchten ist im Modell zu beachten, dass sich dies in der Realität über längere Zeiträume einstellen, also ähnlich wie grössere Wasserkörper deutlicher träger auf Änderungen der meteorologischen Bedingungen reagieren als die Lufttemperatur. In Trockenzeiten sinkt die Bodenfeuchte je nach Ausgangsniveau also erst im Verlauf mehrerer Tage oder Wochen unter den Welkepunkt des Stadtgrüns ab, während sich spürbare Änderungen der Lufttemperatur innerhalb von Stunden ergeben. Daraus folgt, dass die Bodenfeuchte in einem modellierten Tagesgang nicht explizit berechnet werden kann, sondern vorgegeben werden muss. Standardmässig liegt die Bodenfeuchte deutlich über dem Welkepunkt. Es wird also eine Situation vorgegeben, in der die Stadtvegetation weitgehend optimal verdunsten kann. Dies führt tagsüber dazu, dass die kurzweilige Einstrahlung zu einem Teil nicht in fühlbare Wärme (vereinfacht ausgedrückt also in eine Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur) umgewandelt wird, sondern für die Verdunstung aufgewendet wird und sich damit als latenter Energiefluss nicht temperaturerhöhend auswirkt. Wie Abbildung 19 am Beispiel eines idealisierten Tagesganges u.a. der bodennahen Lufttemperatur zeigt, führt diese Verdunstungskühlung tagsüber über einem mit Rasen bewachsenen Boden zu einer Reduktion von 1-2 K gegenüber einem ausgetrockneten Boden (Bodenfeuchte unter dem Welkepunkt) mit demselben Bewuchs. Nach Sonnenuntergang dreht sich dieser Effekt in deutlich abgeschwächter Form allmählich um. Der feuchte Boden verfügt gegenüber seinem trockenen Pendant über eine höhere Wärmespeicherkapazität und ist nachts folglich geringfügig (ca. 0,5 K) wärmer. Die Abbildung verdeutlicht aber auch, dass die Unterschiede zwischen einem trockenem und einem feuchten Boden mit demselben Bewuchs bei Weitem nicht so gross sind, wie die Unterschiede der beiden Bodenfeuchtevarianten zu asphaltierten Flächen. Hier ergeben sich im Maximum Abweichung von 6-7 K, wobei die Kurve im gesamten Tagesgang über denen der rasenbewachsenen Flächen bleibt. In der Realität hat also eine Entsiegelung eine deutlich stärkere Wirkung auf die thermische Komponente als eine Erhöhung der Bodenfeuchte (z.B. durch Bewässerung). Die skizzierten Zusammenhänge und Prozesse

spielen im Modell insbesondere für niedrige Vegetation und offenen Boden eine bedeutsame Rolle. Für Bäume bzw. Baumgruppen sind die Effekte der Verdunstungskühlung insbesondere im bodennahen Temperaturfeld deutlich geringer. Hier führen vorrangig Verschattungseffekte bzw. eine Reduktion der kurzwelligen Einstrahlung zu geringeren gefühlten Temperaturen im Vergleich zu nicht verschatteten Räumen.

Ähnlich wie für die Bodenfeuchte gilt für das vertikale Stadtgrün, dass deren Vitalität sich über längere Zeiträume entwickelt und die klimatisch-meteorologischen Aspekte lediglich einen Teil des Gesamtwirkungskomplexes darstellen. Insofern muss im Modell – zumeist im Rahmen von Szenarien-Betrachtungen oder Sensitivitätsstudien – vorgegeben werden, was mit dem Bestandsgrün im Falle einer Trockenperiode bzw. einer sich klimawandelbedingt verstärkenden Sommertrockenheit passieren soll.

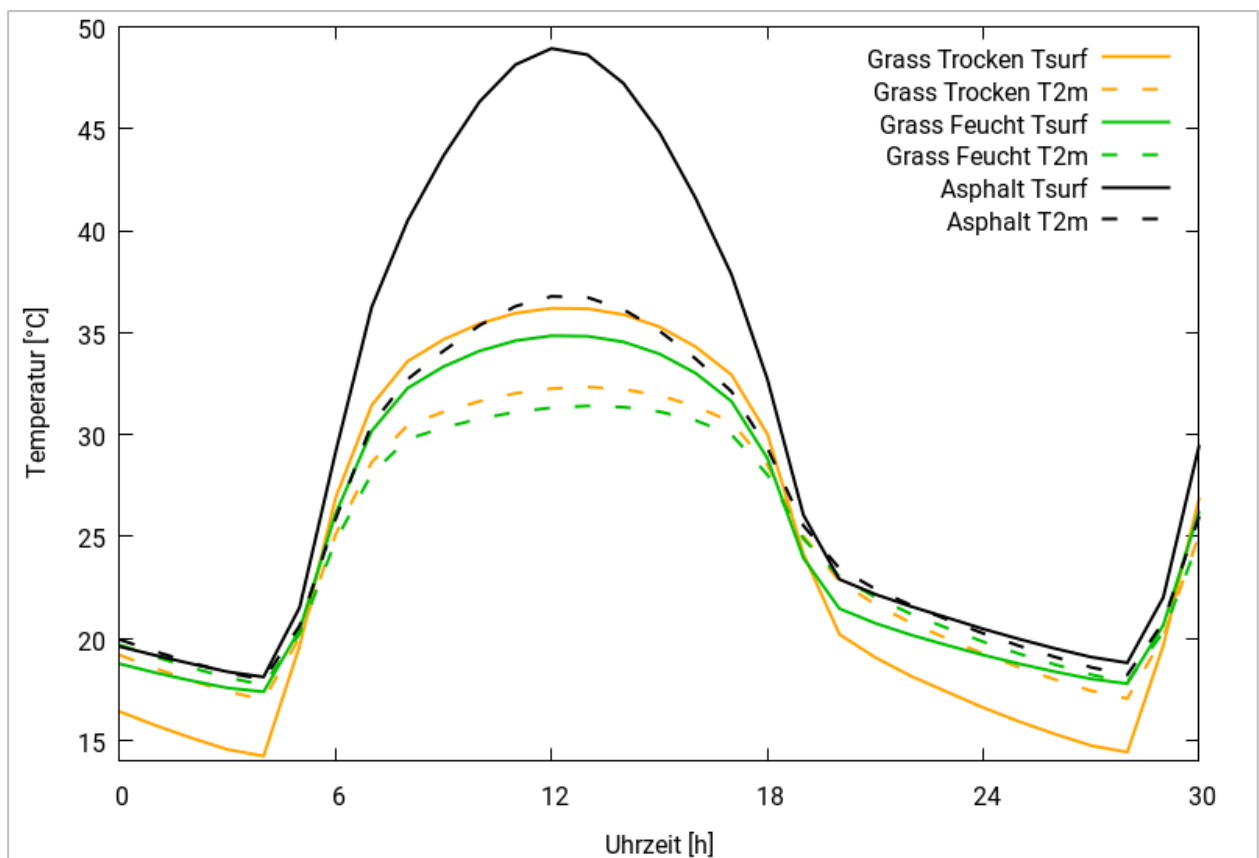


Abbildung 19: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur sowie der bodennahen Lufttemperatur von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages

5.1.2 SZENARIENENTWICKLUNG

Das Grundgerüst des analytischen Vorgehens im Projekt bildet die Delta-Methode. Die Delta-Methode ist ein von GEO-NET entwickeltes ebenenunabhängiges Methodenpaket zur szenarienbasierten Berücksichtigung der Zukunftsperspektive in modellgestützten stadt- und regionalklimatischen Analysen mit den numerischen Modellen FITNAH-3D und ASMUS_green. Einsatzbereich ist die Unterstützung formeller und informeller raumkonkreter Planungs- und Entscheidungsprozesse zur Klimafolgenanpassung im Handlungsfeld urbane Hitzevorsorge / urbaner Kaltlufthaushalt auf Landes-/Regionalebene sowie auf gesamt- und teilstädtischer Ebene.

Im analytischen Kern basiert die Delta-Methode auf einem Vergleich zwischen der gegenwärtigen stadt-/regionalklimatischen Referenzsituation (vor allem Belastungsschwerpunkte im Wirkraum, Bedeutung des Kaltluftprozessgeschehens im Ausgleichsraum) und einem individuellen Set an Vergleichsszenarien der zukünftigen Situation. Über diesen Analyseansatz hinaus ist auch die planerische Inwertsetzung der Erkenntnisse z.B. im Rahmen einer Planungshinweiskarte (vgl. LfU Bayern 2020 oder Stadt Bielefeld 2019) oder eines Masterplans Stadtklimawandel (vgl. Stadt Karlsruhe 2015, Stadt Freiburg 2018 oder Stadt Zürich 2020) erweiterter Bestandteil des Methodenpaketes.

Neben eigenentwickelten – und ggf. projektindividuellen – Analyse- und Auswerteroutinen werden im Rahmen der Delta-Methode auch bereits in der Planungspraxis/-theorie bzw. der Umweltmeteorologie etablierte Methoden eingesetzt. Hierzu gehören diskursorientierte Ansätze wie die Szenariotechnik (vgl. Fürst und Scholles 2008) ebenso wie mathematisch-statistische Bewertungsverfahren (z.B. die Z-Transformation), die in verschiedenen umweltmeteorologischen Richtlinien beschrieben sind (z.B. VDI 2008, VDI 2015).

Ausgangspunkt der Delta-Methode ist stets die Szenarienentwicklung mithilfe der Szenariotechnik. Ziel ist, mögliche Entwicklungen in der näheren und/oder fernen Zukunft zu projizieren, zu analysieren und zusammenhängend darzustellen. Beschrieben werden dabei alternative zukünftige Situationen. Szenarien beschreiben hypothetische Folgen von Ereignissen, um auf kausale Prozesse und Entscheidungsmomente in der Zukunft aufmerksam zu machen, ohne dabei davon auszugehen, dass diese Szenarien tatsächlich real werden. Eine Hauptfunktion von Szenarien ist auf Alternativen und Varianten von Entwicklungen aufmerksam zu machen, um gegensteuern zu können (Abbildung 26, Wilms 2006; Kosow und Gassner 2008). Es gibt unterschiedliche Ansätze der Szenarienentwicklung, im Projekt kommt die vorausschauende (forecasting) Szenariomethodik zum Tragen.

Die Entwicklung dieser Szenarien stellt – insbesondere mit Blick auf die räumliche Komponente – eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Die Komplexität der Grundgesamtheit aller denkbaren Szenarien potenziert sich bei der notwendigen Zusammenführung der Einzelfaktoren Klimawandel – Stadtentwicklung – Anpassungsmassnahmen in einem Szenariotrichter mit vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten (siehe Abbildung 26). In der angewandten Klimafolgenanpassung – und insbesondere beim Einsatz von sog. Wirkmodellen – hat sich zur Reduktion dieser enormen Herausforderung die Fokussierung auf die Analyse von Extremszenarien etabliert. Dabei wird nicht die Gesamtheit aller denkbaren Zukünfte betrachtet, sondern eine Auswahl vorgenommen. Es werden die Szenarien gewählt, die den Analysezielen entsprechend Aussagen liefern. Dies sind oftmals besonders herausfordernde oder eine grosse Bandbreite aufweisende Szenarien, um mögliche Entwicklungspfade aufzuzeigen.

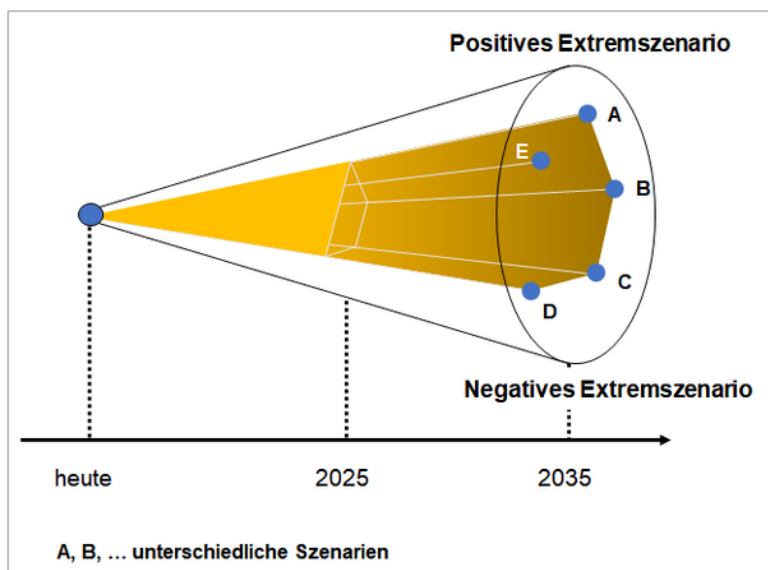


Abbildung 20. Der Szenariotrichter (Quelle: www.business-wissen.de)

Neben dem aktuellen Stadtklima wurde mittels der Modellrechnungen das zukünftige Klima im Kanton Zürich für ein Zukunftsszenario simuliert (Tabelle 3).

Tabelle 3: Modell-Szenarien und ihre zentralen Merkmale.

Szenario	Zentrale Merkmale
Status quo (Referenz / Bestand)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gegenwärtige Siedlungsstruktur im Kanton Zürich (Stand 2023) ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung⁶: 22,97 °C ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 60 %
Zukunftsszenario Starker Klimawandel	<ul style="list-style-type: none"> ■ Flächenkulisse analog zum Status quo ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 25,47 °C ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 60 %

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich auch in den Erdboden fort, woraus höhere Bodentemperaturen resultieren. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Diese beiden Effekte wurden bei den Modellrechnungen zum einen durch die Vorgabe einer erhöhten Bodentemperatur in 1 m Tiefe von 2/3 des Delta-Wertes berücksichtigt (+ 1,67 °C). Der Wärmeeintrag in Wasserkörpern kann aufgrund der guten Durchmischung über ein grösseres Volumen verteilt werden, sodass die mittlere Temperatur langsamer einer allgemeinen Erwärmung der Atmosphäre folgt (vgl. IPCC 2013). Dieser Effekt wurde bei den Modellrechnungen durch die Anpassung der Wassertemperatur mit einer Erhöhung von 1/2 des Delta-Wertes berücksichtigt (+ 1,25 °C).

⁶ Lufttemperatur und Bodenfeuchte zum Start der Modellierung entsprechen den Standard-Werten, die bei stadtklimatischen Modellierungen mit FITNAH-3D angenommen werden.



5.1.3 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

Ein numerisches Modell wie FITNAH-3D benötigt spezifische Eingangsdaten, um die Nutzungsstruktur und die Topographie abbilden zu können. Für das Gebiet des Kantons Zürich sowie des näheren Umlandes wurden folgende Geodaten verarbeitet.

- Geländehöhe
 - Digitales Terrainmodell (DTM) 2021 bis 2022
- Landnutzung
 - Amtliche Vermessung - Datenmodell MOpublic (Stand 2023)
 - Quartieranalyse (Stand 2022)
 - RGBI-Luftbilder⁷ (Stand 2020)
- Strukturböhe
 - Digitales Oberflächenmodell (DOM) - 2021 / 2022
 - Normalisiertes Digitales Oberflächenmodell Vegetation (nDOM Veg) - 2021 / 2022

Untersuchungsgebiet und Geländehöhe

Das Kantonsgebiet erstreckt sich bei einer maximalen Ausdehnung von ca. 48 km in Ost-West- und etwa 60 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von ca. 1729 km². Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von ca. 3.073 km² auf (ca. 49,8 km x 61,6 km), damit die im benachbarten Umland gelegenen Höhen- und Landnutzungsunterschiede mit Einfluss auf die stadtklimatischen Prozesse berücksichtigt werden können.

Die Geländehöhe des Modellgebiets wird in einem digitalen Geländemodell (DGM) dargestellt, das von der ursprünglichen 0,25 m-Auflösung in die für die Modellierung notwendige 5 m-Rasterauflösung überführt wurde. Die im Kanton Zürich auftretenden Geländehöhen umfassen eine Wertespanne von knapp 1000 m, woraus sich deutliche Höhenunterschiede im Modellgebiet ergeben (Abb. 21). Während die niedrigen Höhen von weniger als 400 m. ü. M. im nördlichen Kanton lokalisiert sind, treten Höhen von mehr als 1000 m. ü. M. im südöstlichen Kantonsgebiet auf. Die Topographie nimmt Einfluss auf die nächtlichen Kaltluftströmungen, da über den Hangbereichen Kaltluftabflüsse auftreten. Diese können je nach den örtlichen Gegebenheiten das klimatische Geschehen im Kantonsgebiet beeinflussen und zur Durchlüftung der Siedlungsflächen beitragen.

⁷ Red Green Blue Intensity (RGBI) – Farbige Orthofotos mit der Kanalbelegung (Rot, Grün, Blau und Nahes Infrarot)

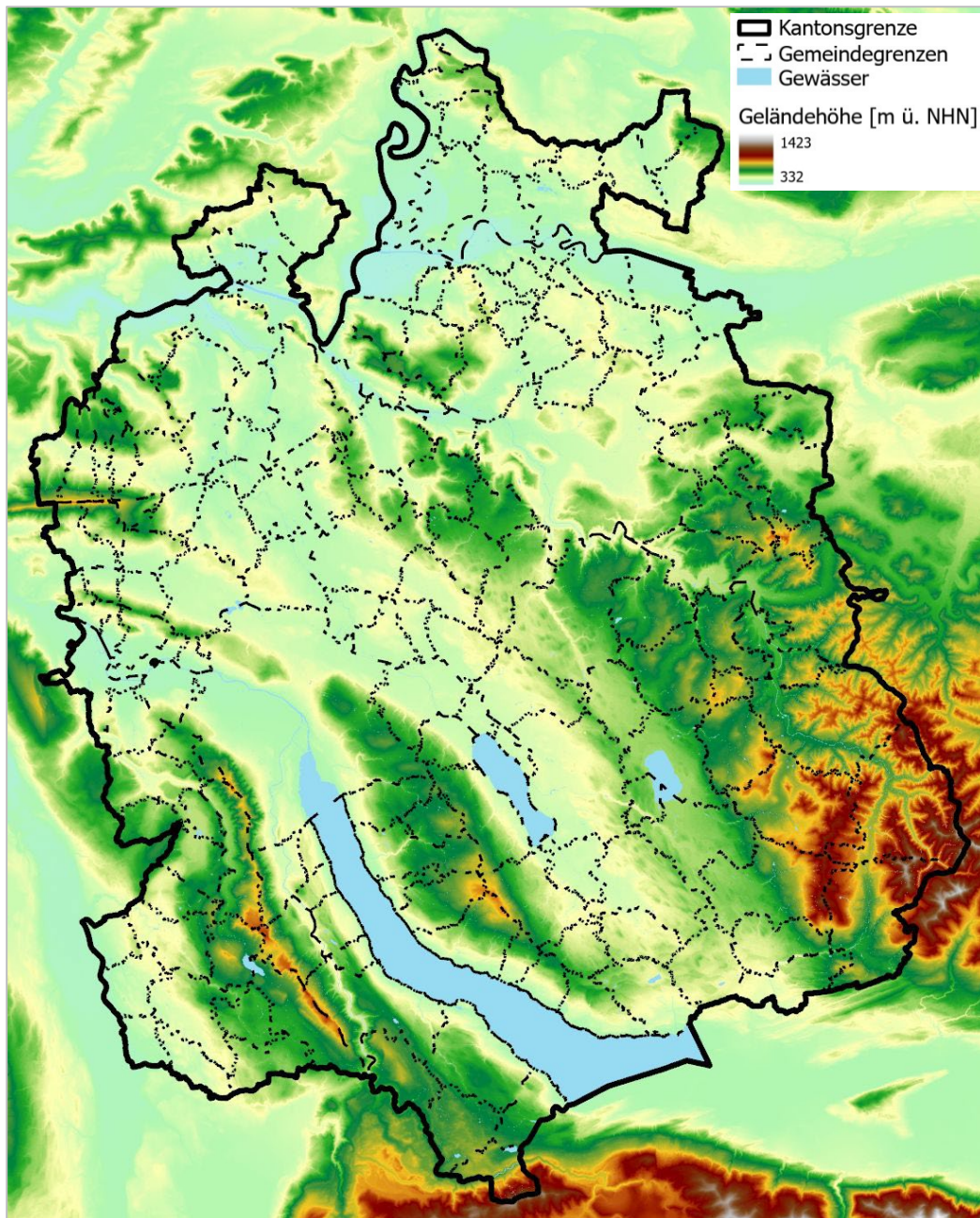


Abbildung 21: Digitales Geländemodell im Untersuchungsraum

Landnutzung

Die Oberflächenstruktur wird über verschiedene Landnutzungsklassen definiert, die, wie bereits beschrieben, jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen. Abbildung 29 zeigt exemplarisch die Situation in der Stadtmitte von Zürich. Mit der vorliegenden Rasterzellenbreite von 5 m ist es möglich, einzelne Gebäude und Bäume in der Landnutzungsklassifizierung aufzulösen. Dies ist insofern relevant, als dass im Vergleich zur Analyse 2018 nun auch die klimatische Wirkung des Siedlungsgrüns realitätsnah berücksichtigt wird.

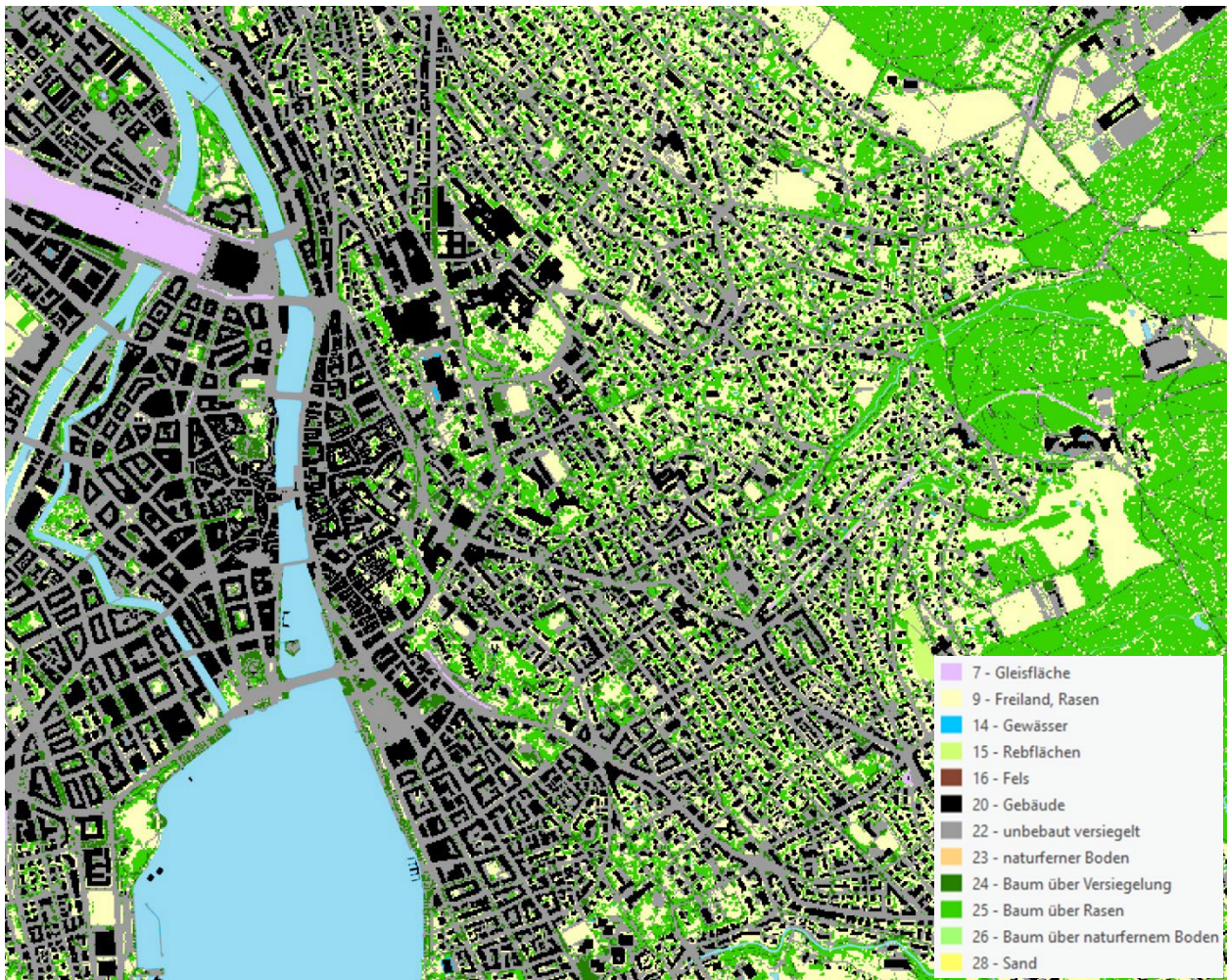


Abbildung 22: Modelleingangsdaten „Nutzungsklassen“

Durch die Verwendung eines eigenen Datensatzes zur Vegetationshöhe konnten Bäume automatisiert von vegetationslosen Flächen getrennt und somit in Kombination mit der Strukturhöhe Baumstandorte identifiziert werden. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass auch Bäume im privaten Bestand erfasst werden, die i.d.R. kein Bestandteil öffentlicher Baumkataster sind. Dabei können einzelne kleinkronige Bäume bis zu einem Kronendurchmesser von 2,5 m separat im Raster ausgewiesen werden.

Basisgeometrie als Grundlage der Bewertungs- und Planungshinweiskarten

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Maschenweite von 5 m zu erzeugen. Aus diesen punkthaften Repräsentationen der Eingangsdaten ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten Modellergebnisse in Form flächenhaft berechneter Klimaparameter wie der Lufttemperatur.

Qualifizierende Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnliche Flächeneinheiten erfolgen. Diese sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Da die Flächeneinheiten der Bodenbedeckung AV zu kleinteilig für eine kantonale Darstellung sind, wurden diese auf Grundlage der Quartieranalyse aggregiert. Diese Flächenkulisse wird als „Basisgeometrie“ in den Bewertungskarten bzw. der Planungshinweiskarte für die Flächenbewertung herangezogen. Um die Ausprägung der Klimaparameter auf planungsrelevante und massstabsgerechte Einheiten zu übertragen, wurden den Einzelflächen der Basisgeometrie die relevanten Klimaparameter wie z.B.



Lufttemperatur zugeordnet. Dafür wurden alle Rasterzellen, die von einer bestimmten Fläche überdeckt werden, mit Hilfe zonaler Analysen zusammengefasst und statistisch ausgewertet. Auf diese Weise erhält jede Fläche den Mittelwert der für eine Bewertung relevanten Klimaparameter, welcher die flächenspezifische Werteausprägung repräsentiert. So führt beispielsweise die hohe Oberflächenversiegelung einer Gewerbebebauung in den Nachtstunden zu einem höheren Flächenmittelwert der Lufttemperatur als eine stark durchgrünte Wohnbebauung am Ortsrand.

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (Kap.6), zum anderen als planungsrelevante und massstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (Verwendung z.B. in der Planungshinweiskarte in Kap. 8).

5.1.4 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN

Sämtlichen Modellrechnungen liegt dem Stand der Technik entsprechend ein sog. autochthoner Sommertag als meteorologische Rahmenbedingung zugrunde. Typischerweise führt ein autochthoner Sommertag aufgrund der hohen Einstrahlung und des geringen grossräumig (allochthon) bedingten Luftaustauschs zu Situationen, die im Jahresverlauf in Teilbereichen der Stadt die höchsten thermischen Belastungen mit sich bringen. Auch wenn es sich dabei um eine besondere meteorologische Situation handelt, tritt eine solche Wetterlage im Kanton Zürich jeden Sommer mehrfach auf (s. Kap. 4.3). Modelliert wurde ein Tagesgang mit Start um 21:00 bis um 14:00 des Folgetages zum Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (21. Juni). Die Wetterlage wird durch einen wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen (typisch, lokalen) Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten besonders gut ausprägen. Charakteristisch für solch eine sommerliche (Hochdruck-) Wetterlage sind die in Kapitel 2.2 beschriebenen Prozesse rund um den Wärmeinseleffekt und die Kaltluftdynamik.

In Abbildung 23 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage typischen tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z.B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen deutlich geringer ist (Wärmeinseleffekt). Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

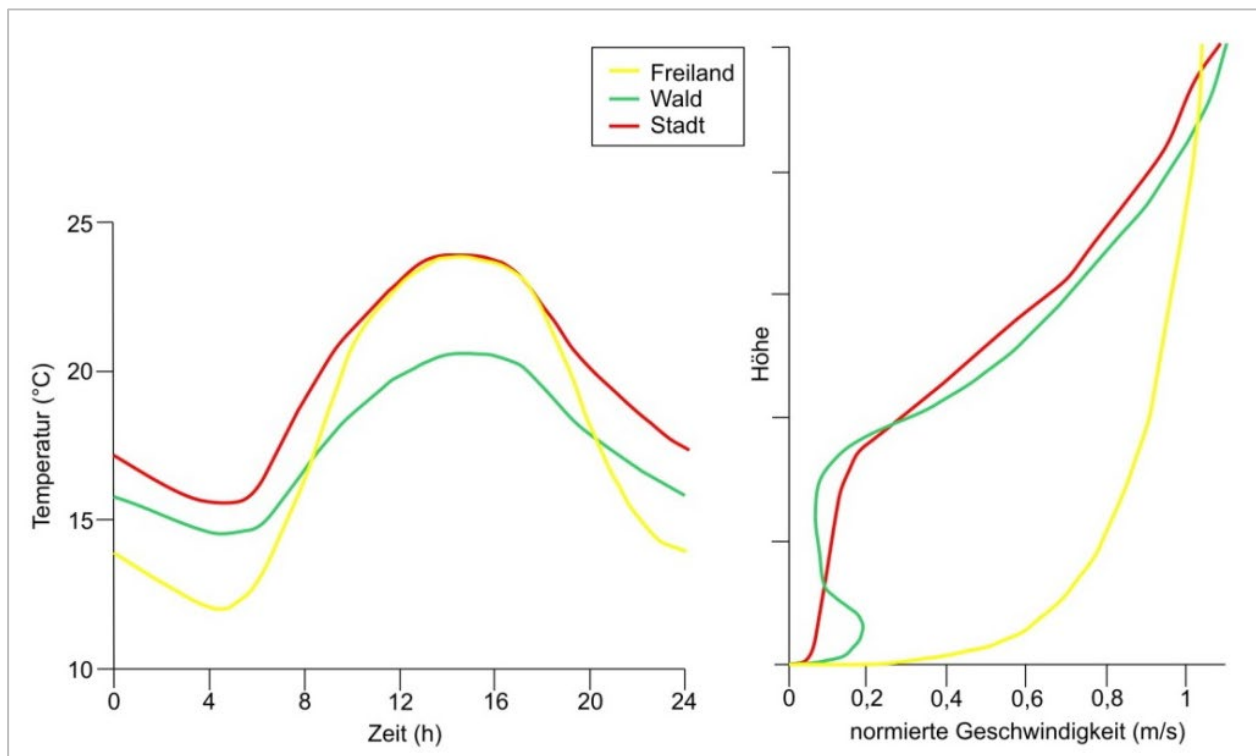


Abbildung 23: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Gross 1992)

Die Berücksichtigung der in Kapitel 4.4 beschriebenen Ausprägungen des regionalen Klimawandels in den Modellläufen für die Zukunftsszenarien erfolgte über eine Variation der Ausgangsbedingungen. Die Auf-



prägung des Temperatursignals für das Klimawandelszenario erfolgte auf Basis des in der Literatur als „surrogate-climate-change“ beschriebenen Ansatzes (Schär et al. 1996). Demnach wurde das Zukunftsszenario mit einem entsprechenden Delta von +2,5 K (Ensemble zum RCP 8.5; Szenario „starker Klimawandel“) versehen. Das Delta wird dabei auf das Ausgangsprofil der Lufttemperatur auf allen Höhengniveaus addiert (Abbildung 32). Das 1D-Vertikalprofil zum Start der numerischen Simulation um 21 Uhr ist stabil geschichtet. Die absolute Temperatur nimmt mit 0,65 K/100m mit der Höhe ab. Die Windgeschwindigkeit in allen Höhen beträgt 0 m/s. Zum Simulationsstart beträgt die Temperatur am Boden 22,97 °C bzw. 25,47 °C.

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich auch in den Erdboden, woraus höhere Erdbodentemperaturen resultieren. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Diese beiden Effekte wurden bei den Modellrechnungen zum einen durch die Vorgabe einer erhöhten Bodentemperatur in 1 m Tiefe von 2/3 des Deltas berücksichtigt. Der Wärmeeintrag in Wasserkörpern kann aufgrund der guten Durchmischung über ein grösseres Volumen verteilt werden, sodass die mittlere Temperatur langsamer einer allgemeinen Erwärmung der Atmosphäre folgt (vgl. IPCC 2014). Dieser Effekt wurde bei den Modellrechnungen durch die Anpassung der Wassertemperatur mit einer Erhöhung von 1/2 des Deltas berücksichtigt.

5.1.5 MODELLAUSGABEGRÖSSEN

FITNAH gibt für den Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physikalisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten und für stündliche – bei Bedarf auch für noch kürzere - Zeitschnitte aus (Tabelle 4). Insgesamt ergibt sich somit eine deutlich vierstellige Anzahl an Variablendimensionen als Ausgangspunkt für die aufgabenstellungsorientierte Weiterverarbeitung dieses Datensatzes mit einem Umfang von mehreren hundert Gigabyte (GB). Zu den wesentlichsten Parametern zählen Strömungsparameter (U/V/W Komponenten des Windes) sowie die die bodennahe Lufttemperatur beeinflussende Größen wie der fühlbare und latente Wärmestrom.

Tabelle 4: von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt berechnete Parameter

Parameter und Einheit	Einheit	Dimensionalität
U-Komponente des Windes	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
V-Komponente des Windes	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
W-Komponente des Windes [m/s]	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Potentielle Lufttemperatur	[K]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Diffusionskoeffizient Momentum	[m ² /s ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Turbulente kinetische Energie	[m ² /s ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Wärmestrom der Oberflächen	[W/s ²]	Stündlich, zweidimensional für die Oberflächen
Luftdruck	[N/m ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Spezifische Feuchte	[kg/kg]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten

Um die der Analyse zugrunde liegenden Fragestellungen bearbeiten zu können, hat sich in der gesamten Fachdisziplin eine gutachterliche Verdichtung und Weiterverarbeitung der vom Modell berechneten Parameter etabliert. In diesem sog. post-processing Schritt werden aus den o.g. Modellausgabegrößen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und Fachgutachtern gleichermassen verstanden und interpretiert werden. Dieses Vorgehen stellt den bestmöglichen Kompromiss zwischen aussagekräftigen, qualitativ hochwertigen und dennoch allgemeinverständlichen Ergebnissen dar.

Für die FITNAH Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set aus zwölf abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteneiveaus und Auswertezeitpunkte entwickelt, von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (Tabelle 5). In der Maximalvariante – die vor allem im Zusammenhang mit umfassenden Stadtklimaanalysen zum Tragen kommt - handelt es sich dabei insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatische Indizes. Be-



züglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was dem Aufenthaltbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte und der Kaltluftmächtigkeit existieren hier zwei Ausnahmen, bei denen bis zu einer spezifischen Höhe integriert (das Integral/das Volumen berechnet) wird. Die Auswertezeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 morgens des modellierten Tagesganges als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung. Die Vorwärtstrajektorien (die Vorhersage zur Ausbreitungsrichtung der Luftströmung) werden in einer Zeitspanne von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang ausgewertet.

Tabelle 5: Abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt

Parameter und Einheit	Einheit	Höheniveau	Zeitliche Dimension	Im Projekt ausgewertet
Windgeschwindigkeit	[m/s]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Windrichtung [als geographische Rotation]	°	2 m ü.Gr.	04:00 Uhr	ja
Vorwärtstrajektorien im Ausgleichsraum	[m]	10 m ü.Gr.	21:00 bis 04:00 Uhr	nein
Absolute Lufttemperatur	[°C]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Absolute Lufttemperatur	[°C]	2 m ü. Gr.	14:00 Uhr	ja
Kaltluftvolumenstromdichte	m ³ /(s*m)	Integral bis 50 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Physiologisch Äquivalente Temperatur	[°C]	1,1 m ü. Gr.	14:00 Uhr	ja



5.1.6 QUALITÄTSSICHERUNG

Die Qualitätssicherung stellt den abschliessenden Arbeitsschritt der Modellierung im engeren Sinne dar. Sie ist Bestandteil des zertifizierten Qualitätsmanagements nach DIN EN ISO 9001:2015, das bei GEO-NET für komplexere Modellanwendungen vorgesehen ist. In diesem Arbeitsschritt unterzieht das bearbeitende Projektteam die Modellergebnisse einem teilformalisierten Plausibilitäts-Check. Hierbei werden die Modellergebnisse zum einen anhand von ausgewählten Teilgebieten im Rahmen einer Teamsitzung fachlich diskutiert sowie ggf. geostatistischen ad hoc Analysen unterzogen bzw. mit vergleichbaren Ergebnissen aus anderen Projekten in Beziehung gesetzt. Die Teilgebiete sind so gewählt, dass sie alle im Rahmen vorheriger Arbeitsschritte identifizierten Besonderheiten sowie alle Abweichungen vom bisherigen Modellstandard abdecken. Die Modellergebnisse gelten dann als qualitätsgesichert, wenn das Projektteam durch einstimmiges Votum deren hinreichende Qualität erklärt. Werden signifikante Auffälligkeiten festgestellt, sind diese in einem ggf. iterativen Prozess kostenneutral für den Auftraggeber zu bereinigen.

Im vorliegenden Fall erfolgte die Qualitätssicherung getrennt nach den zwei Modellläufen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Demnach durchliefen beide Modellläufe erfolgreich die Qualitätssicherung.

Tabelle 6: Ergebnisse der Qualitätssicherung

Modellauf	Ergebnis der Qualitätssicherung
Bestandsfall „Status Quo“	Qualitätssicherung erfolgreich
Zukunfts-Szenario „Starker Klimawandel“	Qualitätssicherung erfolgreich

5.1.7 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN

Die numerische Stadtklimamodellierung ist anderen analytischen Ansätze der Fachdisziplin (Messungen, klimatopbasierte GIS-Analysen) aufgrund ihres physikalischen, flächendeckenden und das Kaltluftprozessgeschehen berücksichtigenden Outputs überlegen. Dennoch sind Modellanwendungen mit Unsicherheiten verbunden, auf die im Sinne eines umfassenden, auf Transparenz und Akzeptanz ausgerichteten Analyseansatzes hingewiesen werden muss. Die Unsicherheiten lassen sich unter den folgenden Überschriften einordnen:

- Unsicherheiten im Modell („interne Unsicherheiten“)
- Unsicherheiten in den Eingangsdaten („externe Unsicherheiten“)

Zunächst einmal sind Modelle per Definition unvollständige Abbilder der Wirklichkeit (Stachowiak 1973). Sie erheben damit keinen Anspruch, das zu modellierende System allumfassend abzubilden, sondern wollen dieses lediglich hinreichend gut repräsentieren. Den Massstab zur Gütebeurteilung bildet dabei das anvisierte Einsatzgebiet des Modells. Dieser Ansatz gilt für (Stadt-)Klimamodelle aufgrund der Komplexität der in physikalischen Gleichungen abzubildenden (Stadt-)Atmosphäre in besonderem Masse. Folglich ist auch das hier eingesetzte Modell FITNAH-3D nicht mit der Ambition verknüpft, restlos alle ablaufenden Prozesse bis ins letzte Detail abbilden zu wollen, sondern lediglich die, die zur Erfüllung der speziellen Aufgabe notwendig sind. FITNAH erfüllt dabei die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl. 7 (VDI 2017) definierten Standards zur Windfeldmodellierung. Allerdings existieren auch Prozesse, deren Abbildung gemäss VDI-Richtlinien nicht zu gewährleisten sind, aus denen sich aber dennoch gewisse Unsicherheiten ergeben können. So wird FITNAH-3D dem Stand der Technik entsprechend beispielsweise im sog. RANS-Modus (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) betrieben, bei den Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende sog. LES-Modus (Large Eddy Simulation), der aber im Zusammenhang mit Stadtklimaanwendungen noch Gegenstand von F&E⁸-Vorhaben ist.

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus auch das sog. „Modellrauschen“. Es beschreibt, in welchem Ausmass die Ergebnisse zwischen mehreren Modellläufen mit demselben Antrieb bzw. denselben Randbedingungen über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen variieren. Dieser Punkt ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die entsprechende Analyse auch Szenarienrechnungen enthält – also z.B. die Auswirkungen des zukünftig zu erwartenden Klimawandels, von Stadtentwicklungsszenarien und/oder Massnahmenszenarien abzubilden hat. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei +/- 0,1 - 0,2 K pro Rasterzelle und Zeitschnitt. Das ist eine sehr geringe Unsicherheit, die sich bei der geostatistischen Aggregation auf grössere Flächeneinheiten noch einmal verringert. Analog gilt dies auch für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltlufthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt der Wert bei +/- 1 – 2 % bezogen auf eine Fläche der Basisgeometrie, bei der Kaltluftproduktionsrate besteht aufgrund ihres primär empirisch hergeleiteten Wertes keine Unsicherheit. Insgesamt zeigt sich, dass zwar modellinterne Unsicherheiten bestehen, diese aber spätestens auf der Ebene der flächenhaft aggregierten Werte in der Basisgeometrie zu vernachlässigen sind.

Insbesondere kleinräumig stellen die zur Verfügung stehenden bzw. mit vertretbarem Aufwand erzeugbaren Modelleingangsdaten die relevantere Unsicherheitsquelle dar. Die Unsicherheiten können sich dabei ergeben aus

⁸ Forschung und Entwicklung



- der Art ihrer Weiterverarbeitung zur Verwendbarkeit im Rahmen der Analyse
- der Aktualität der Daten (bzw. ihrer Obsoleszenz),
- ihrer Genauigkeit (bzw. Ungenauigkeit) bzw. ihres Informationsgehaltes

Im vorliegenden Projekt wurden zunächst sämtliche Eingangsdaten in der Analyse in ein regelmässiges Raster überführt, bei dem ein Gitterpunkt die Hauptnutzung auf einer Fläche von 25 m² repräsentiert. Zwar liegen die Unsicherheiten dieses Gebäude und Grünstrukturen auflösenden Ansatzes deutlich unterhalb von mesoskaligen Ansätzen mit parametrisierten Landnutzungsklassen, dennoch werden sehr kleinteilige Strukturen auch in dieser hohen Auflösung noch unterschätzt. Städte haben besonders kleinteilige Strukturen, sodass oftmals gleich mehrere verschiedene Nutzungsstrukturen in ein und derselben Rasterzelle liegen. In den Eingangsdaten und damit auch im Modell wird jedoch nur die Nutzung berücksichtigt, die den grössten Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt. So können z.B. besonders kleinkronige Einzelbäume in einem 5 m-Gitter nicht erfasst werden, was sich insbesondere auf die PET am Tag auswirkt. Es kann demnach vorkommen, dass eine Strasse mit kleinkronigen Einzelbäumen nicht oder zumindest nicht durchgängig als Allee erkannt wird. Die betroffenen Teilräume sind in der Regel aber sehr klein mit sehr lokalen Effekten, sodass in der gesamtstädtischen Perspektive bzw. in den grundsätzlichen Schlussfolgerungen keine relevanten Auswirkungen zu erwarten sind. Dennoch empfiehlt sich im konkreten Anwendungs-/Zweifelsfall immer auch ein kritischer ortskundiger Blick auf die zugrunde liegenden Eingangsdaten.

Die bedeutsamste Unsicherheitsquelle ist die Informationstiefe der zur Verfügung stehenden Daten. Dies bezieht sich zum einen auf die Gebäude. Auf Basis der für dieses Projekt zur Verfügung stehenden Daten sind die in der Amtlichen Vermessung enthaltenen Gebäude in der vorliegenden Analyse abgebildet – also mit ihrer exakten Lage im Raum und ihrer gemittelten Dachhöhe. Damit sind flächendeckend alle Informationen vorhanden, um die Gebäude im Modell als Strömungshindernis definieren zu können. Auch bzgl. ihres Wärmeemissionsgrades können Gebäude hinreichend gut im Modell abgebildet werden. Allerdings bestehen hier Unsicherheiten, die sich aus fehlenden (gesamtstädtischen) Informationen zu z.B. Baumaterialien, Oberflächenalbedo und Fensteranteilen ergeben. Der Wärmeemissionsgrad der Gebäude kann gegenwärtig somit im Modell ausschliesslich über das Bauvolumen abgebildet werden.

Vergleichbares gilt auch für flächendeckende, kleinräumige Informationen zu Bodeneigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit oder der Bodenfeuchte. Diese könnten aus einer flächendeckenden Stadtbodenkartierung abgeleitet werden und mit ihren speziellen Eigenschaften im Modell berücksichtigt werden. Ein städtischer Geodatenatz ist aber nicht verfügbar, sodass diese Informationen in einer gesamtstädtischen Analyse nicht mit vertretbarem Aufwand verwendet werden können. Folglich wird im Modell mit einem einheitlichen Bodenprofil gearbeitet, dessen Oberflächeneigenschaften über die flächendeckend vorliegende Zusatzinformation „naturferner Boden“ über das Nutzungsraster modifiziert wird.

Studien deuten darauf hin, dass diese und andere Unsicherheiten in den Modelleingangsdaten im kleinräumigen Einzelfall zu einem Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 K und in den Nachtstunden von 1,1 K führen kann, was wiederum auch zu kleinräumigen Auswirkungen auf thermisch bedingte Strömungen führen kann (Gross 2014). Es sei noch einmal betont, dass diese Unsicherheiten nicht im Modell begründet liegen – in dem diese Informationen grundsätzlich verarbeitet werden könnten – sondern in nicht oder nicht flächendeckend zur Verfügung stehenden (Geo-)Basisinformationen. Angesichts der rasanten Entwicklung in der Fernerkundung und der Datenstandards (z.B. im Bereich des BIM - Building Information Modeling) ist damit zu rechnen, dass entsprechende Informationen mittelfristig (+/- 10 Jahre) für die gesamtstädtische Ebene bereitstehen und dann auch modelltechnisch abgebildet werden können.



Auch für andere Unsicherheitsquellen muss zwischen der Referenzsituation und dem Zukunftsszenario differenziert werden. So gilt bzgl. der Aktualität der Daten zum Beispiel: Je aktueller die Daten, desto geringer sind die Unsicherheiten. Kapitel 5.1.3 legt die jeweils verwendeten Datenquellen und –erhebungszeitpunkte detailliert offen. Mit Blick auf die Referenzsituation muss attestiert werden, dass deren Veröffentlichung zum Zeitpunkt der hier beschriebenen Analysetätigkeit bereits ca. 2 Jahre in der Vergangenheit lag.

Darüber hinaus existiert keine gross- oder kleinräumige Prognose über die Entwicklung von Versiegelungen oder das Absterben, Neupflanzen oder Wachstum von Bäumen für die Zukunft, die hätten Berücksichtigung finden können. Diese Unsicherheiten im Bestand (also der bereits gebauten Stadt) können nicht vollumfänglich aufgelöst werden. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang das Bemühen, stets die besten zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren Daten zu verwenden, was im Projekt erfolgt ist. Diese Ausführungen lassen sich grundsätzlich auch auf die Berücksichtigung der zukünftigen Stadtentwicklung übertragen. Die Szenarien enthalten zwar abgestimmte Annahmen darüber, wo in den nächsten 10-30 Jahren Entwicklungen stattfinden könnten und zumindest für einen Teil der Flächen liegen auch Informationen zu Art und Mass der baulichen Nutzung vor. Ob diese aber tatsächlich (in der geplanten bzw. im Modell angenommenen Weise) umgesetzt werden, ist mal mehr und mal weniger unsicher. Selbiges gilt in vermutlich deutlich ausgeprägterem Masse (hoffentlich) auch für die im Zukunftsszenario immanente Annahme, dass keine (weiteren) Anpassungsmassnahmen im Bestand umgesetzt werden. Die skizzierten Umstände sind der Arbeit mit Szenarien jedoch immanent, die per Definition ja die Entscheidung unter Unsicherheit nicht vollends auflösen, sondern diese „nur“ evidenzbasiert unterstützen wollen. Hier muss also mit – gut hergeleiteten und vor allem auch gut abgestimmten – Annahmen gearbeitet werden, was im Projekt über den intensiven Kommunikationsprozess sichergestellt wurde.

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass numerische Modellrechnungen – ebenso wie alle anderen Analysemethoden in der Umweltanalytik im Allgemeinen und der angewandten Stadtklimatologie im Speziellen – mit gewissen Unsicherheiten verbunden sind. Es ist aber auch deutlich geworden, dass diese Unsicherheiten allenfalls kleinräumig relevant sind und folglich auf die zentralen Ergebnisse der vorliegenden Analyse einen zu vernachlässigenden Einfluss haben dürften. Nichtsdestotrotz wird es die Aufgabe des gesamten Fachgebiets der kommenden Jahre sein, die bestehenden Unsicherheiten weiter zu reduzieren und die Modellergebnisse auf einem sehr hohen Niveau noch weiter zu verbessern.

6. Analyseergebnisse

6.1 NUMERISCHE MODELLIERUNGEN KLIMAÖKOLOGIE

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) für den Status quo und das Zukunftsszenario beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 5 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (Kap. 4.3). Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms gelten sie für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation. Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet.

6.1.1 NACHTSITUATION

6.1.1.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

Die Ermittlung der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur ermöglicht es, überwärmte städtische Bereiche zu identifizieren (sogenannte städtische Wärmeinseln) und die räumliche Wirksamkeit von Kaltluftströmungen abzuschätzen. Die aufgeführten Absolutwerte der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine sommerliche Strahlungswetterlage zu verstehen. Die relativen Unterschiede innerhalb der Stadt bzw. zwischen verschiedenen Landnutzungen gelten dagegen weitgehend auch während anderer Wetterlagen.

In Abhängigkeit der Landnutzung bzw. Boden- und Oberflächeneigenschaften sowie beeinflusst durch die Lage und Höhe des Standorts kühlen Flächen in den Abend- und Nachtstunden unterschiedlich stark ab. So reicht die bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Status quo von ca. 9 °C über siedlungsfernen Freiflächen in höheren Lagen bis über 19,5 °C in stark versiegelten Bereichen und umfasst im Kanton Zürich damit eine Spannweite von mehr als 10 °C. Die mittlere Temperatur im Kanton Zürich liegt um 04 Uhr morgens unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen gegenwärtig bei 15,9 °C. Unter Berücksichtigung des Klimawandelsignals steigt diese im Zukunftsszenario auf 18,4 °C an.

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potenziellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen, Aussagen zum Auftreten thermisch und/oder orographisch induzierter Ausgleichsströmungen zu treffen und die räumliche Ausprägung sowie Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen. Innerhalb der bebauten Gebiete ist die Temperaturverteilung räumlich differenziert, da Areale mit Einzelhausbebauung, Zentrumsbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen. Im Rahmen der durchgeführten Klimamodellierung weisen gegenwärtig vor allem die Zürcher Kernstadt, das Stadtteilzentrum von Oerlikon und in geringerem Masse auch Winterthur die hohen Temperaturen von 19,5 °C bis 20,0 °C auf (Orange), was mit dem hohen Bauvolumen und einer hohen Oberflächenversiegelung einher geht. Ähnliche Lufttemperaturen sind lokal auch in den grösseren Gewerbeflächen anzutreffen. Die höchsten Werte von mehr als 22 °C sind über den grösseren Seen zu beobachten. Hier erwärmt der Wasserkörper die darüber lagernde Luftschicht. Da hier die Lufttemperaturen im Sommer tagsüber niedriger und nachts höher als in der Umgebung sind, wirken Gewässer auf bebaute Flächen am Tage klimatisch ausgleichend, während sie in der Nacht deren Abkühlung verringern. Abbildung 24 zeigt das nächtliche Temperaturfeld für den Status quo (oben) und das Zukunftsszenario (unten) im Bereich Innenstadt Zürich/ Zürichberg. Dabei zeichnen sich die Altstadt sowie der Stadtteil Werd als Wärmeinseln ab. Die bodennahe Lufttemperatur beträgt über dem Paradeplatz im Status quo 19,7 °C und steigt unter dem Einfluss des Klimawandels auf 22,2 °C an (A).

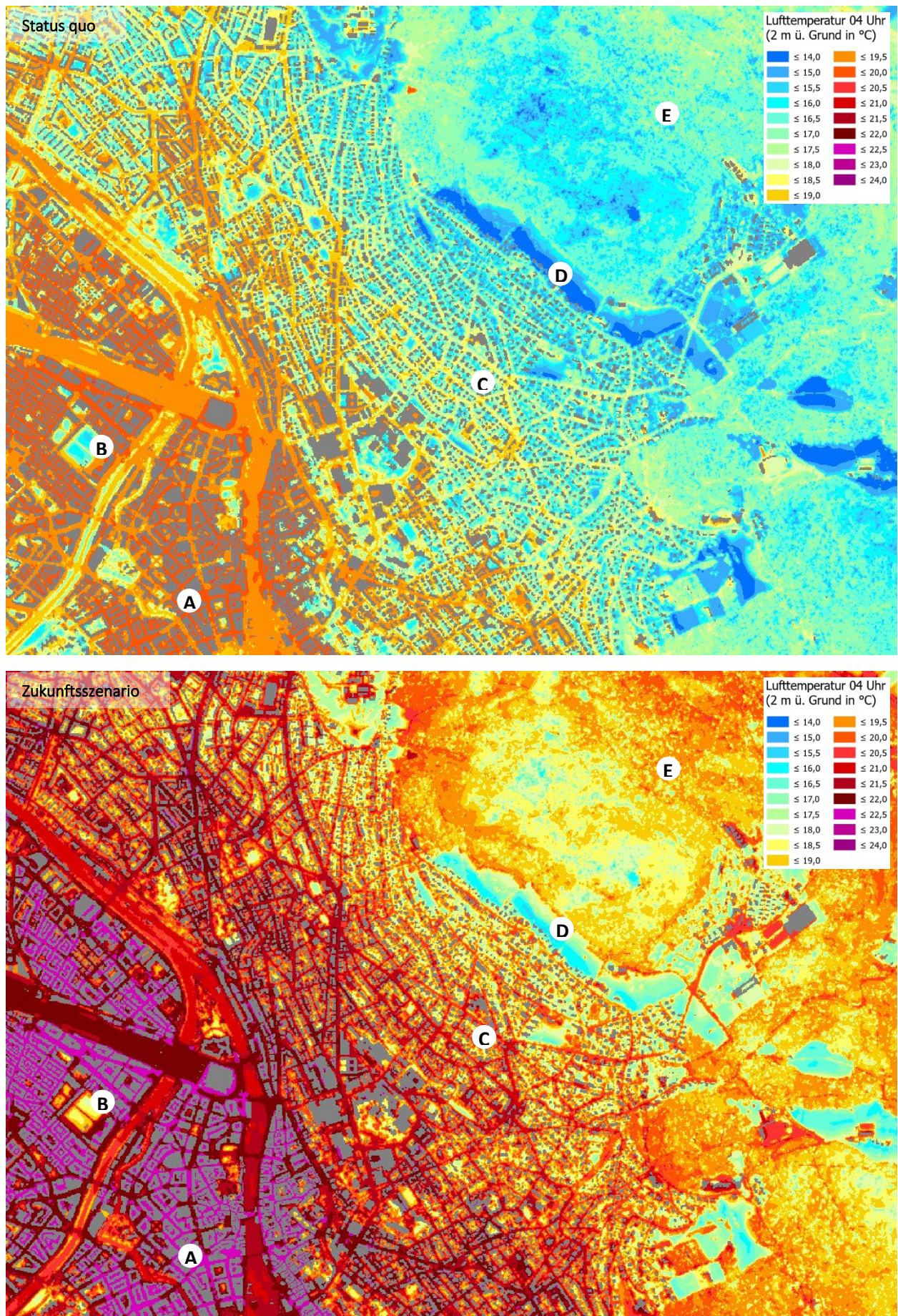


Abbildung 24: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur (04:00 Uhr) im Status quo (oben) und im Zukunftsszenario (unten)

In den Nachtstunden bleibt das Temperaturniveau vor allem in den breiteren Strassenräume erhöht. Das Kasernenareal (B) weist hingegen durch die Rasenfläche eine deutlich niedrigere Lufttemperatur auf. Diese beträgt gegenwärtig ca. 15,4 °C und steigt im Zukunftsszenario auf etwa 18,8 °C an. In Richtung auf den Zürichberg geht die Überwärmung deutlich zurück, was auf die durchgrünte Siedlungstypologie und das Einwirken der Kaltluftabflüsse zurückzuführen ist. So beträgt die Lufttemperatur der Hangbebauung in Höhe der Kraftstrasse ausserhalb des Strassenraums weniger als 17 °C (C). Im Klimawandelszenario werden hier allerdings mehr als 19 °C vorliegen, so dass hier perspektivisch auch von einer nächtlichen Belastungssituation ausgegangen werden kann. Die landwirtschaftlich genutzte Fläche nördlich der Susenbergstrasse weist sowohl jetzt als auch zukünftig eine niedrige Lufttemperatur auf (D). Diese beträgt zurzeit etwa 13,3 °C und wird im Klimawandelszenario auf knapp 16 °C ansteigen. Damit bleibt sie auch weiterhin deutlich kühler als die angrenzende Bebauung. Generell begünstigt ein hoher Rasenanteil die Abkühlung in den Nachtstunden, wenngleich am Tage durch die intensivere Sonneneinstrahlung die Aufenthaltsqualität geringer ist als in den mit Bäumen bestandenen Grünräumen. Innerhalb der Baumbestände und Waldflächen ist die Lufttemperatur mit etwa 16,0 °C bis 17,5 °C im Status quo höher, da das Kronendach die Abkühlung der Bodenoberfläche reduziert und zu einem „Bestandsklima“ innerhalb der Waldfläche führt (E). Unter dem Einfluss des Klimawandels ist hier mit einem Anstieg der nächtlichen Lufttemperatur auf bis zu 20 °C zu rechnen. Tabelle 7 fasst die Temperaturen der beschriebenen Nutzungen zusammen.

Tabelle 7: Übersicht der nächtlichen Lufttemperatur zwischen den Szenarien und Nutzungen

Standort	Status Quo	Zukunftsszenario
Paradeplatz (A)	19,72 °C	22,22 °C
Kaserneareal (B)	15,36 °C	17,84 °C
Wohnbebauung Kraftstrasse (C)	16,86 °C	19,32 °C
Freifläche Susenbergstrasse (D)	13,34 °C	15,82 °C
Waldareal Zürichberg (E)	16,79 °C	19,27 °C

Im Klimawandelszenario zeigt sich eine flächendeckende Erwärmung des Kantonsgebietes. Die relativen Unterschiede der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur zwischen den Nutzungsstrukturen bleiben auch im Zukunftsszenario auf einem vergleichbaren Niveau erhalten. Allerdings wird der Anteil an Siedlungsflächen mit einem belastenden Temperaturniveau perspektivisch zunehmen. Dies betrifft Areale, welche derzeit noch ein bioklimatisches günstiges Temperaturniveau aufweisen. Begrünte innerstädtische Flächenanteile sowie die Siedlungstypologien mit hohem Grünanteil stellen dagegen weiterhin die günstigsten Strukturen im Siedlungsraum dar (gleichwohl auch diese eine Erwärmung erfahren). Zudem kühlen die siedlungsferne Freiflächen kühlen auch fortwährend am stärksten aus.

6.1.1.2 KALTUFTSTRÖMUNGSFELD IN DER NACHT

Die bodennahe Temperaturverteilung bedingt horizontale Luftdruckunterschiede, die wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Ausgangspunkt dieses Prozesses sind die nächtlichen Temperaturunterschiede, die sich zwischen Siedlungsräumen und vegetationsgeprägten Freiflächen einstellen.

An den geeigneten Flächen setzt sich abgekühlte und damit schwerere Luft in Richtung zur tiefsten Stelle des Geländes in Bewegung. So entstehen an den Hängen die nächtlichen Kaltluftabflüsse (u.a. Mosimann et al. 1999). Die Windgeschwindigkeit dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch das Temperaturdefizit zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt.

Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Kaltlufthaushaltes, wobei sich vor allem die Luftaustauschprozesse am Stadtrand erst in der zweiten Nachthälfte vollständig ausgebildet haben. Daher wird im Folgenden auf die Ergebnisse zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens eingegangen. Das sich zum nächtlichen Analysezeitpunkt ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld stellt Abb. 25 in zwei Ebenen dar. Die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren abgebildet, wobei die Pfeile der Karte für eine übersichtlichere Darstellung auf eine 50 m x 50m Auflösung aggregiert wurden. Die unterlegten Rasterzellen stellen zudem die Windgeschwindigkeit flächenhaft in Farbstufung dar. Die Werte beziehen sich auf eine Analysehöhe von 2 m über Grund. Abgebildet sind alle Zellen des ursprünglichen 5 m Rasters, für die aufgrund einer modellierten Mindestwindgeschwindigkeit von $> 0,1$ m/s und unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.

Die in Abb. 25 für das 2 m-Niveau im Bereich östliche Altstadt/Fluntern beispielhaft wiedergegebenen Strömungsgeschwindigkeiten reichen von vollkommener Windstille bis zu Maximalwerten von 1,4 m/s. Die höchsten Werte von mehr als 3 m/s sind im südöstlichen Modellierungsgebiet anzutreffen und stehen im Zusammenhang mit starken Hangneigungen. Die im Bereich des Zürichbergs gebildete Kaltluft strömt aufgrund ihrer gegenüber der umgebenden Luftmasse höheren Dichte hangabwärts. Über den an den Wald angrenzenden und durch Rasen geprägten Flächenanteilen kann die Kaltluft bodennah beschleunigt werden, was zu vergleichsweise hohen Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 1,0 m/s führt (Dunkelblau).

Dahingehend zeichnet sich die Wiesenfläche südlich des Friedhofs Fluntern ab (A). Die Kaltluft wirkt flächenhaft als Hangabwind in die Bebauung ein, wobei die Strömungsgeschwindigkeit durch die Baukörper abgebremst wird. Über den unbebauten Flächenanteilen wie südlich Forsterstrasse (B) oder nördlich Gloriastrasse (C) kann sich der Kaltluftabfluss wieder intensivieren. Die Freiflächen wirken quasi als „Trittssteine“ für die Kaltluftströmung und unterstützen die Durchlüftung des Siedlungsraums. Gleichzeitig treten auch unbebaute Flächenanteile innerhalb der Siedlungsfläche sowie Strassenraum als Durchlüftungszonen mit erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten hervor (D). Diese Strukturen sind besonders wirksam, wenn sie linear ausgeprägt sind und so den Kaltluftstrom unterstützen. Auch die Parkanlage des Universitätsspitals nimmt am Luftaustausch teil, wobei hier bodennah eine vom Park ausgehende eigene Kaltluftströmung zu beobachten ist (E). Hangaufwärts bremsen hingegen die Gebäude des Spitals bzw. der vorgelagerten Bebauung den Hangabwind stark ab. Im Übergang zur Altstadt im Bereich Hirschengraben zeigt sich die Bedeutung des Gebäudeabstands für die Durchlüftung (F). Hier kann die hangabwärts fliessende Kaltluft im Bereich der Zentralbibliothek über die Mühlegasse in die östliche Altstadt eindringen und dort zur thermischen Entlastung beitragen. Dies wäre bei einer geschlossenen Randbebauung entlang Hirschengraben nicht möglich.

Infolge des Klimawandels ergeben sich keine nennenswerten Änderungen des Kaltluftprozessgeschehens, da das Relief als wesentlicher Antrieb unverändert ist und die nächtliche Temperatur flächendeckend in einem ähnlichen Ausmass steigt. Die relativen Temperaturunterschiede zwischen den Nutzungen bleiben erhalten, sodass sich keine neuen temperaturinduzierten Kaltluftströmungen ausbilden.

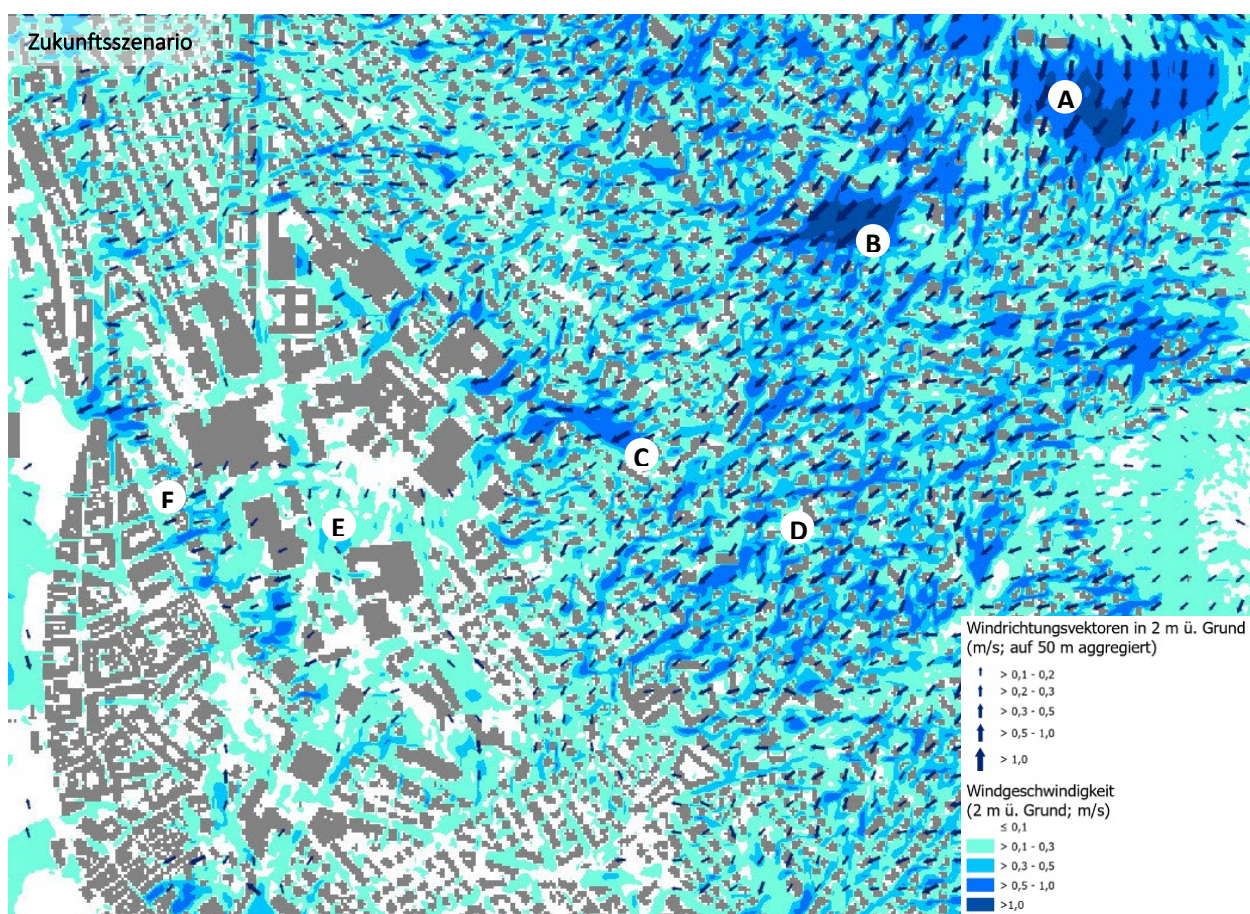
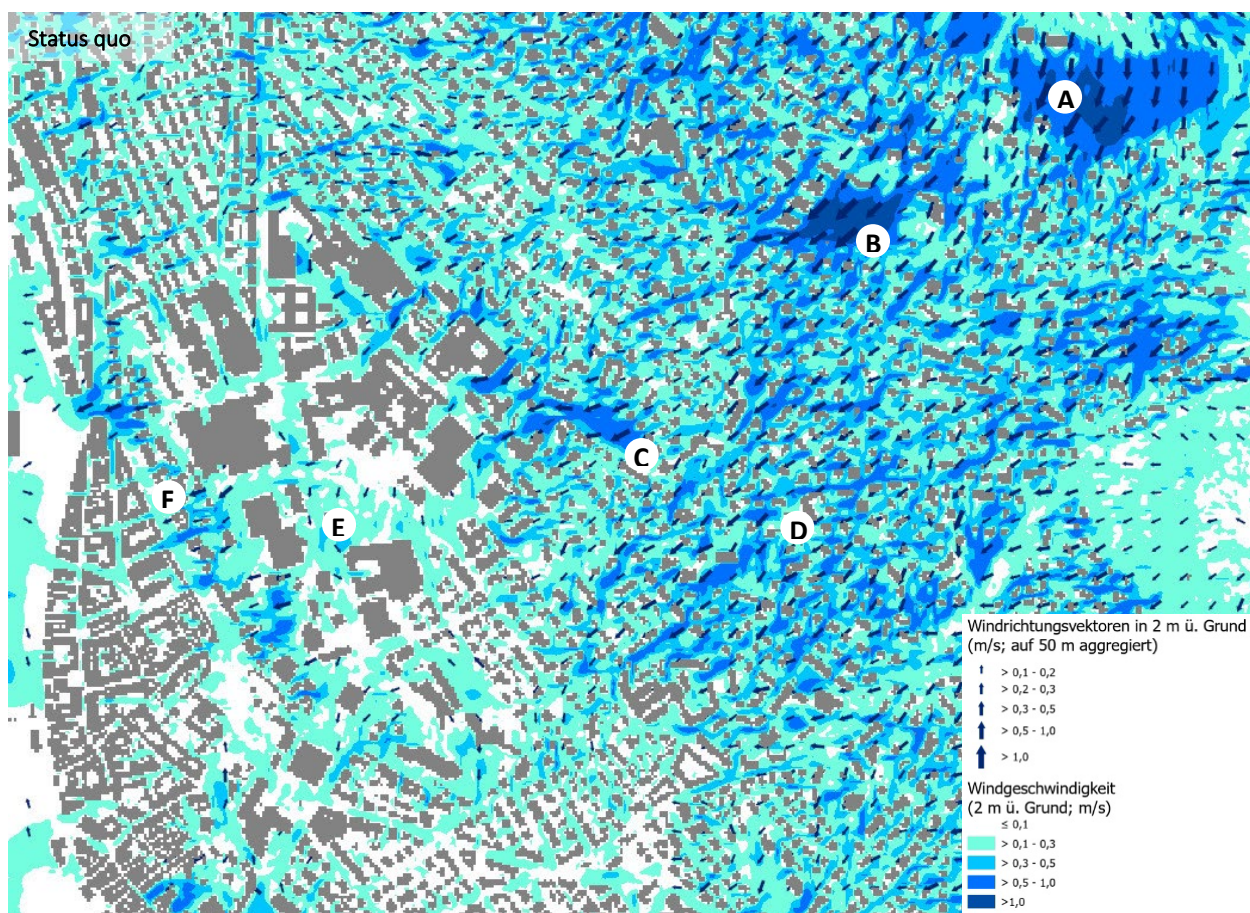
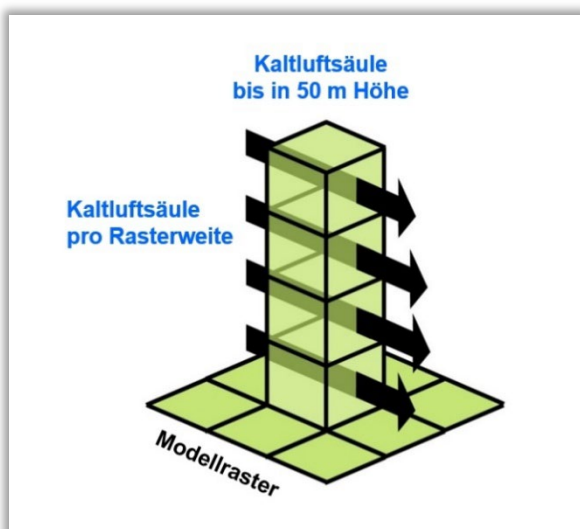


Abbildung 25: Bodennahe Windgeschwindigkeit im Status quo (oben) und Zukunftsszenario (unten)

Wie bereits zum bodennahen Windfeld erläutert, kommt den lokalen thermischen Windsystemen eine besondere Bedeutung beim Abbau von Wärme- und Schadstoffbelastungen grösserer Siedlungsräume zu. Weil die potenzielle Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Quantität (d.h. die Menge des Kaltluftvolumens) mitbestimmt wird, wird zur Bewertung der Grünflächen ein weiterer Klimaparameter herangezogen: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom.

Für die Auswertung wurde der Zeitpunkt 4 Uhr morgens gewählt, da zu diesem Zeitpunkt die Intensität der Kaltluftströme voll ausgeprägt ist. Unter dem Begriff Kaltluftvolumenstrom versteht man, vereinfacht ausgedrückt, das Produkt aus der Fliessgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde über eine Breite von 1 m strömt



Ausgehend vom der gebietstypischen Ausprägung im Untersuchungsraum wird als Schwellenwert für einen klimaökologisch wirksamen Kaltluftstrom ein Wert von mindestens $5 \text{ m}^3/\text{s}$ angenommen, wobei die innenstadtnahen Siedlungsflächen meist einen geringen bis mässigen Volumenstrom aufweisen. Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Grösse, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Der jeweilige Beitrag beschleunigender und bremsender Faktoren zur Dynamik der Strömung wird unter anderem stark von der bisherigen zeitlichen Entwicklung des Abflusses beeinflusst.

Abbildung 26: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

So können sich beispielsweise die Kaltluftströmungen über einer Fläche im Laufe der Nacht dadurch ändern, dass die Fläche zunächst in einem Kaltluftabflussgebiet und später in einem Kaltluftsammelgebiet liegt. Letzteres kann zunächst als Hindernis auf nachfolgende Luftmassen wirken und später in der Nacht von diesen über- oder umströmt werden. Die sich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab. Gebäude, Mauern oder Strassendämme können als Strömungshindernisse wirken und auf der dem Wind zugewandten Seite (Luv) Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von grösseren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es dahinter im Lee zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen.

Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum geht im Wesentlichen mit der des bodennahen Strömungsfeldes einher. Abbildung 27 zeigt den Kaltluftstrom für den Ausschnitt östliche Altstadt/Fluntern. Überdurchschnittlich hohe Werte von mehr als $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ sind sowohl gegenwärtig als auch im Zukunftsszenario östlich des Universitätsspitals zu beobachten. Während die Kaltluft im Kuppenbereich des Zürichbergs entsteht und deren Beschleunigung ihren Anfang nimmt, erreicht die Strömungsgeschwindigkeit und somit auch das transportierte Kaltluftvolumen im unteren Hangbereich sein Maximum. Die von Gebäuden ausgehende Hinderniswirkung sowie das allmählich ansteigende Temperaturniveau schwächen den Kaltluftvolumenstrom in Richtung auf die Altstadt allmählich ab.

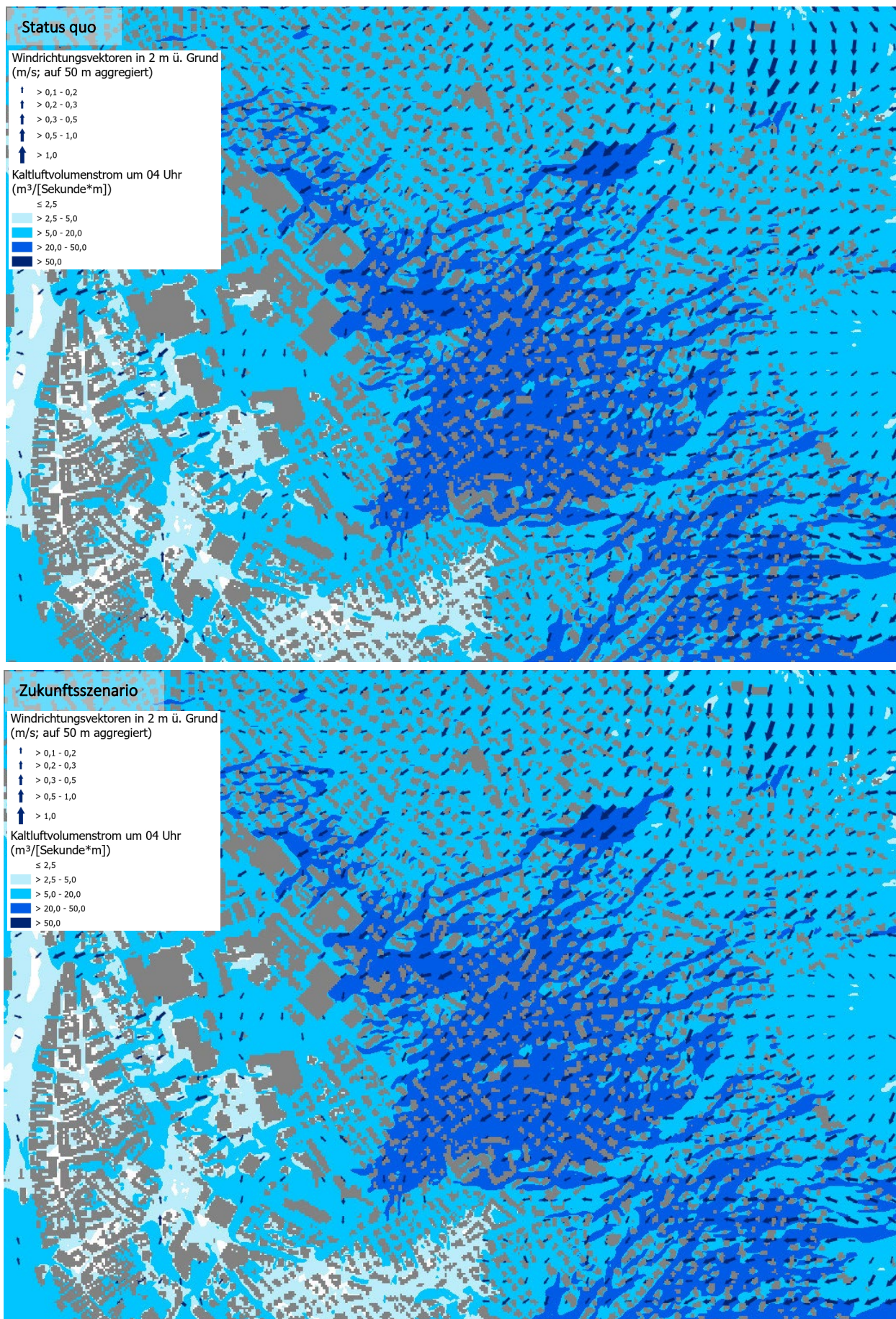


Abbildung 27: Kaltluftvolumenstrom im Status quo (oben) und Zukunftsszenario (unten)

6.1.2 TAGSITUATION

6.1.2.1 WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET)

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrössen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen⁹. Beispiele für solche Kenngrössen sind die PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur), der PMV-Wert (Predicted Mean Vote) und der UTCI (Universal Thermal Climate Index). In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (vgl. Höppe und Mayer 1987). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat dieser den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit auch von Nichtfachleuten besser nachvollzogen werden zu können. Darüber hinaus handelt es sich bei der PET um eine Grösse, die sich in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt hat, sodass sich die Ergebnisse aus Hamburg mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf aussenklimate Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien am Tage sinnvoll einsetzbar. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologischen Belastungsstufen quantifizieren (z.B. Starke Wärmebelastung ab PET 35 °C; Tab. 8; VDI 2004).

Tabelle 8: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2004)

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
4 °C	Sehr kalt	Extreme Kältebelastung
8 °C	Kalt	Starke Kältebelastung
13 °C	Kühl	Mässige Kältebelastung
18 °C	Leicht kühl	Schwäche Kältebelastung
20 °C	Behaglich	Keine Wärmebelastung
23 °C	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
29 °C	Warm	Mässige Wärmebelastung
35 °C	Heiss	Starke Wärmebelastung
41 °C	Sehr heiss	Extreme Wärmebelastung

Zum Zeitpunkt 14 Uhr zeigt sich, dass die auftretende Wärmebelastung am Tage vor allem über die Verschattung beeinflusst wird. Eine mässige Wärmebelastung mit einer PET von 29°C bis 35°C ist insbesondere unter den grösseren Baumbeständen wie dem alten botanischen Garten, der Bäckeranlage sowie dem Lindenhof zu beobachten (Türkis/Grün; Abb. 28). Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt. Auch Gewässer wirkend am Tag kühlend auf ihre Umgebung (bspw. Uferbereiche von Sihl und Limmat).

⁹ Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m² Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky 1990).

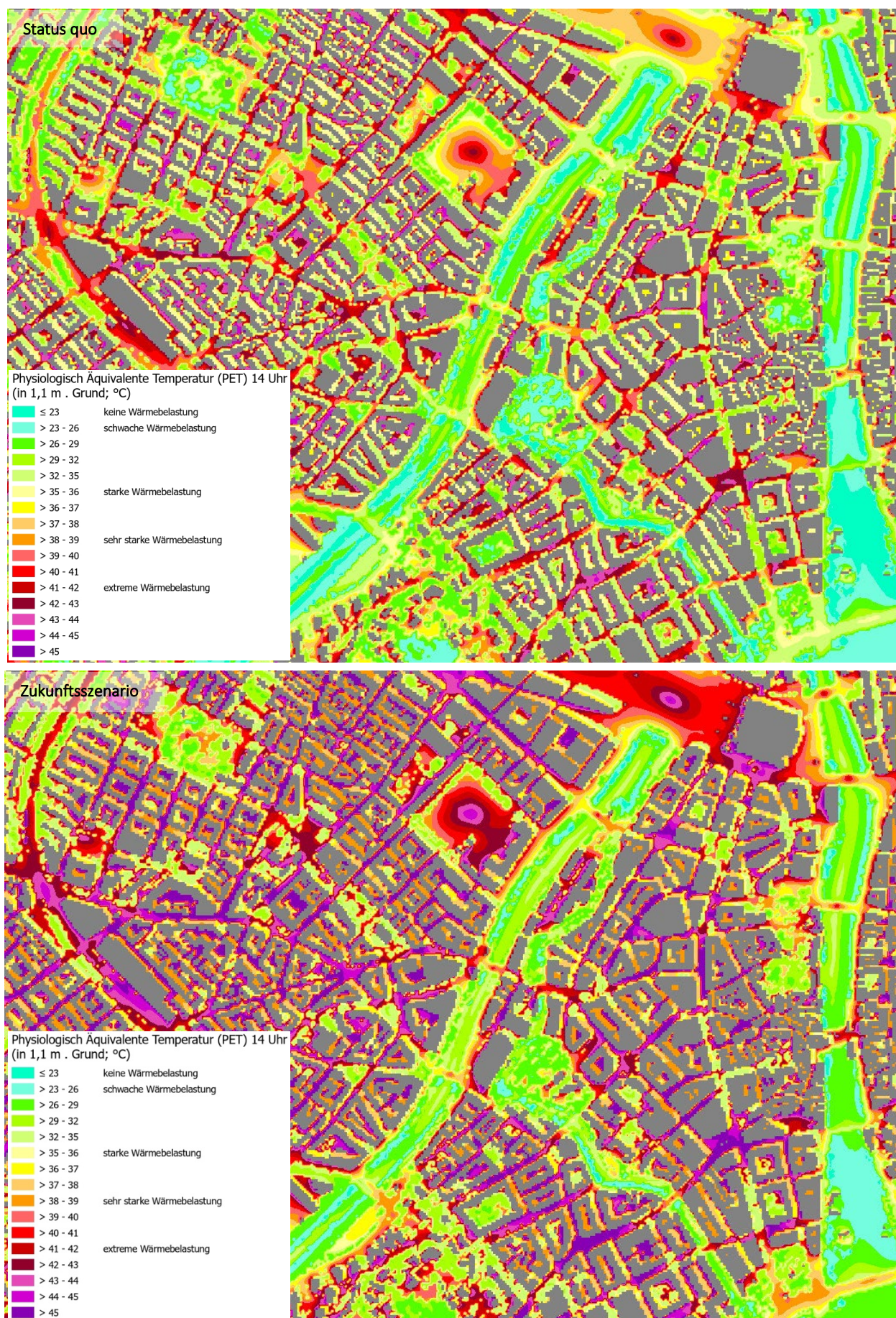


Abbildung 28: Wärmebelastung am Tag (Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET)) im Status quo (oben) und Zukunftsszenario (unten)



Im Siedlungsraum zeigt sich eine heterogene Verteilung der Wärmebelastung. Die ungünstigsten Bedingungen treten über versiegelten Flächen ohne Verschattung auf, wie sie in der Innenstadt, den Gewerbegebieten aber auch im ländlichen Raum zu finden sind. Im dargestellten Ausschnitt der Zürcher Innenstadt treten vor allem der Paradeplatz sowie die grösseren und direkt besonnten Strassenabschnitte mit Werten von mehr als 41 °C und somit einer extremen Wärmebelastung hervor (Dunkelrot/Violett). Eine ähnliche Belastung liegt auch in dem durch Rasen geprägten Kasernenareal vor. Die Abwesenheit von Bäumen führt zwar zu einer guten nächtlichen Abkühlung (vgl. Kap. 6.1.1.1). Am Tage liegt hingegen eine hohe thermische Belastung vor, die in ihren Maximalwerten mit versiegelten Oberflächen vergleichbar ist. Dieser Zusammenhang ist für die Bewertung der Aufenthaltsqualität in den Grün- und Freiflächen in der Bewertungskarte Tag von grosser Bedeutung. So kann ein Grünraum am Tage zwar stark wärmebelastet sein und eine geringe Aufenthaltsqualität aufweisen, gleichzeitig in der Nacht aber als ein bedeutsames Kaltluftquellgebiet mit signifikanter nächtlicher Abkühlung und sehr hoher klimatischer Bedeutung eingestuft werden. Innerhalb des Stadtgebiets stellen mit Bäumen bestandene Grünflächen wie Parks, Friedhöfe oder Grünzüge, sowie begrünte Innenhöfe aufgrund ihrer geringen Wärmebelastung wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar.

Zudem weisen Strassenabschnitte mit Bäumen im Bereich der Verschattung Werte von weniger als 35 °C und somit nur eine mässige Wärmebelastung auf. Je nach Gebäudestellung kann auch der davon ausgehende Schattenwurf zu einer geringen bis mässigen Belastung im angrenzenden Strassenraum führen.

Eine lokal hoch ausgeprägte Wärmebelastung kann auch in den peripheren bzw. ländlichen Siedlungsflächen auftreten (ohne Abbildung hier im Bericht; siehe Detailkarten zu den Modellergebnissen). Die Wohngebiete weisen zwar oft einen hohen Grünanteil auf (und daher in der Nacht überwiegend günstige Bedingungen), können jedoch gerade in den Gärten einen geringen Bestand grosskroniger (und damit schattenspendender) Bäume aufweisen. Somit werden in den Bewertungskarten diese Flächen als Belastungsräume ausgewiesen. Dabei ist zu beachten, dass ein Baum mit sehr kleiner Krone durch das Modell nicht erfasst werden kann (weil er „durch das 5 m-Raster fällt“), mitunter aber ausreichend ist, um den Bewohnenden von Häusern mit Gärten einen verschatteten Aufenthaltsbereich bieten zu können.

Durch den Klimawandel steigt die Wärmebelastung am Tag flächendeckend im Kanton Zürich, sodass einerseits die Aufenthaltsqualität auf Grünflächen sinken kann. Andererseits steigt der Flächenanteil thermisch belasteter Siedlungs- und Verkehrsflächen an. Gleichwohl gibt es noch viele Wälder und Parks mit hohen Aufenthaltsqualitäten sowie Siedlungsflächen mit einer geringen Wärmebelastung, wenn sie einen hohen Baumbestand aufweisen.

7. Klimaanalysekarte als Zwischenprodukt

7.1 KLIMAANALYSEKARTEN

Gemäss der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 hat die Klimaanalysekarte die Aufgabe, „...die räumlichen Klimaeigenschaften wie thermische, dynamische sowie lufthygienische Verhältnisse einer Bezugsfläche darzustellen, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topografie einstellen“ (VDI 2015). Die Klimaanalysekarte synthetisiert demnach die wesentlichen Aussagen der Analyseergebnisse – im vorliegenden Fall die Modellergebnisse – für die Nachtsituation in einer Karte und präzisiert bzw. pointiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten zu den Themenfeldern Überwärmung, Kaltluftentstehung und Kaltluftfluss.

Des Weiteren heisst es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt [oder Region, Anm. der Redaktion]“ (VDI 2015). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht eine wesentliche Charaktereigenschaft der Klimaanalysekarte. Sie gehören demnach bewertungstheoretisch der Sachebene an. Diese beschreibt „[...] Gegebenheiten, statistische Zusammenhänge, Sachverhalte, Prognosen, Naturgesetze. Sachaussagen beschreiben die Umwelt wie sie ist oder war“ (Gaede & Härtling 2010). Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten allein noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmass von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen, um nicht in die Falle eines „Naturalistischen Fehlschlusses“ (Moore 1903) zu tappen. Der „Sprung“ auf die benötigte Wertebene erfolgt im Rahmen der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte in Kap. 8. Auf dieser zwar theoretischen, aber hochgradig praxisrelevanten fachlichen Basis wurden im vorliegenden Projekt folgende Klimaanalysekarten erstellt:

- Klimaanalysekarte für die Bestandssituation (Status Quo)
- Klimaanalysekarte für das Zukunftsszenario „Starker Klimawandel“

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der zwei Klimaanalysekarten wurde eine einheitliche Legende entwickelt (Abbildung 29). Diese gliedert sich in die Elemente Wirkraum, Ausgleichsraum und Kaltluftprozessgeschehen. Im Ausgleichsraum ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich, je höher die Werte, desto dynamischer (oder auch hochwertiger) ist das Kaltluftpaket. Die räumliche Auflösung der Darstellung entspricht mit 5 m der Modellausgabe.

Das Strömungsfeld bzw. die Fliessrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 500 m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert. Kleinräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in grösseren Zufahrtsstrassen im Übergang zwischen Ausgleich- und Wirkraum) werden so aus der Karte nicht ersichtlich. Derartig detaillierte Informationen können aber aus den rasterbasierten Einzelkarten zu den bodennahen Windfeldern in Originalauflösung entnommen werden.

Aus der Abgrenzung von Gunst- und Ungunsträumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges innerhalb des Kantonsgebietes. Im Gegensatz zur Bewertungskarte werden in der Klimaanalysekarte nicht die Flächen der Basisgeometrien als Bezugsgeometrien, sondern die rasterhaft vorliegenden Ergebnisse dargestellt. Damit zeigt sich deutlicher die flächeninterne Heterogenität in den Siedlungsräumen (z.B. durchgrünte Blockinnenhöfe).

Kaltluftlieferung der Grün- und Freiflächen

Für die Kaltluftentstehungsflächen wird der rasterhaft berechnete Kaltluftvolumenstrom (vgl. Kap. 4.4) in einer quantitativen Abstufung dargestellt. Somit wird die räumliche Ausprägung und die Identifikation von Teilflächen mit besonders hohen Werten gut sichtbar.

Windvektoren in 2 m über Grund

Die bodennahe Temperaturverteilung bedingt horizontale Luftdruckunterschiede, die wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Ausgangspunkt dieses Prozesses sind die nächtlichen Temperaturunterschiede, die sich zwischen Siedlungsräumen und vegetationsgeprägten Freiflächen einstellen. An den geneigten Flächen setzt sich abgekühlte und damit schwerere Luft in Richtung zur tiefsten Stelle des Geländes als Kaltluftabfluss in Bewegung. Das sich zum nächtlichen Analysezeitpunkt 4 Uhr ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld wird über eine Pfeilsignatur dargestellt. Die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren abgebildet, wobei die Pfeile der Karte für eine übersichtlichere Darstellung auf 100 m x 100 m Kantenlänge aggregiert worden sind.

Kaltlufteinwirkungsbereich innerhalb der Bebauung

Diese Schraffur kennzeichnet alle Siedlungsflächen, welche sich im „Einwirkungsbereich“ eines klimatisch wirksamen Kaltluftstroms befinden. Zur Abgrenzung werden die Bereiche definiert, die eine bodennahe Windgeschwindigkeit von mehr als 0,1 m/s sowie einen klimatisch wirksamen Kaltluftvolumenstrom von mehr als $2,5 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ aufweisen. Am Ende einer warmen Sommernacht werden bis 4 Uhr ca. 66 % des Siedlungsraums mit Kalt-/Frischlufte versorgt und befinden sich damit im Einwirkungsbereich von Flurwinden und lokalen Kaltluftabflüssen. Die Reichweite einer Kaltluftströmung in die Bebauung vor allem vom Ausmass der Kaltluftdynamik ab. Sie ist bei Flurwinden mit Bezug zu grossräumigen Kaltluftentstehungsgebieten wie dem Stadtpark oder landwirtschaftlichen Nutzflächen am intensivsten. Die Eindringtiefe der Kaltluft beträgt, abhängig von der Bebauungsstruktur, zwischen ca. 100 m und bis zu 700 m. Darüber hinaus spielt auch die Hinderniswirkung des angrenzenden Bebauungstyps eine wesentliche Rolle. In den peripheren und vergleichsweise gering überbauten Siedlungsflächen erfolgt häufig ein flächenhaftes Eindringen von Kaltluft in den Siedlungsraum.

Hangabwinde

Die nächtlichen Windsysteme im Kanton werden durch Flurwinde sowie Hangabwinde geprägt. Dabei handelt es sich um Kaltluftabflüsse über den geneigten Hängen, welche dem Gefälle folgend hangabwärts strömen. Während Flurwinde durch den horizontalen Temperaturunterschied zwischen kühlen Grünflächen und warmer Bebauung ausgelöst werden, bilden sich letztere über Oberflächen mit Hangneigungen von mehr als 1° aus. Da sie für die Durchlüftung der Bebauung eine bedeutsame Funktion haben, werden diese, sofern sie einen Bezug zum Siedlungsraum haben, separat ausgewiesen.

Wärmeinseleffekt im Siedlungsgebiet

Basierend auf den modellierten bodennahen Lufttemperaturen wird der Wärmeinseleffekt über die Absolutwerte repräsentiert. Dargestellt wird dies für alle Rasterzellen (exklusive der Gebäude), welche sich innerhalb einer Siedlungs- oder Verkehrsfläche entsprechend der Basisgeometrien befinden. Der Wärmeinseleffekt stellt die Grundlage für die sich anschliessende Einordnung der Wärmebelastung in der Bewertungskarte Nacht dar (Kap. 8). Ein erholsamer Schlaf ist nur bei günstigen thermischen Bedingungen möglich, weshalb der Belastungssituation in den Nachtstunden eine besondere Bedeutung zukommt. Da die klimatischen Verhältnisse der Wohnungen in der Nacht im Wesentlichen nur durch den Luftwechsel

modifiziert werden können, ist die Temperatur der Aussenluft der entscheidende Faktor bei der Bewertung der thermophysiologischen Belastung. Entsprechend spiegelt die Beurteilung des Bioklimas weniger die thermische Beanspruchung des Menschen im Freien wider als vielmehr die positive Beeinflussbarkeit des nächtlichen Innenraumklimas.

Damit ergibt sich eine räumliche Untergliederung des Siedlungsraumes in bioklimatisch belastete Bereiche einerseits sowie unbelastete bzw. lediglich gering belastete andererseits. Letztere sind, durch von Kaltluft produzierenden Grünflächen ausgehende Kaltlufteinwirkungsbereiche, nur gering überwärmt und durch eine ausreichende Durchlüftung gekennzeichnet. Dabei ist die bioklimatische Belastung bei einer Einzel- und Reihenhausbauung mit einem vergleichsweise niedrigen Versiegelungsgrad und hohem Grünanteil am geringsten ausgeprägt.

Diesen Gunsträumen stehen Belastungsbereiche mit einer überdurchschnittlichen Wärmebelastung und einem Durchlüfungsdefizit gegenüber. Dies betrifft vor allem die urban geprägten Siedlungsflächen sowie Stadtteilzentren, in denen bioklimatisch weniger günstige bzw. ungünstige Bedingungen vorliegen. Diese resultieren aus dem hohen Überbauungs- und Versiegelungsgrad sowie einer in Teilen unzureichenden Durchlüftung. Dabei treten auch die grösseren Gewerbeflächen mit einer Belastungssituation hervor, da sie oftmals eine ähnlich verdichtete Bebauungsstruktur und hohe Versiegelungsgrade wie eine Zentrumsbebauung aufweisen. Abbildung 29 zeigt in einem Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für den Bereich Zürich Sihlfeld/Altstadt, wobei die Lufttemperatur mit einer Farbabstufung dargestellt ist. Die stärkste Überwärmung mit Lufttemperaturen zwischen 19,5 °C und 20,0 °C ist gegenwärtig in der Altstadt (**A**) sowie den westlich angrenzenden Stadtteilen Werd und Sihlfeld (**B**) anzutreffen (Gelb; obere Abb.). Die Blockrandbebauung südlich Birmensdorferstrasse zeichnet sich hingegen mit niedrigeren Werten von 16 °C bis 17 °C ab, da die Blockinnenflächen eine gute Durchgrünung aufweisen. Der Wärmeinseleffekt in der durch Blockrandtypologien charakterisierten Bebauung kann je nach Versiegelungs- und Überbauungssituation (z.B. Garagenhöfe, Pkw-Stellplätze) ein breites Spektrum an nächtlicher Überwärmung aufweisen. Zudem liegt in den meisten grösseren Strassenräumen eine deutliche Überwärmung mit Temperaturen von mehr als 18 °C vor.

In Richtung auf den Uetliberg nimmt die bauliche Dichte ab, so dass auch das Temperaturniveau zurückgeht und im unbebauten Aussenraum lediglich 15 °C bis 17 °C beträgt (**D**). Der nächtliche Wärmeinseleffekt bzw. die bioklimatische Situation ist hier als günstig bis sehr günstig einzuschätzen. Am Siedlungsrand wirken zudem die vom Uetliberg ausgehenden Kaltluftabflüsse als Hangabwinde in die Bebauung ein (**E**). Durch die vorhandene Hangneigung haben diese einen ausgeprägten Bewegungsimpuls und weisen daher einen überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom auf (Dunkelgrün). Aber auch inselhaft in der Bebauung lokalisierte Grünflächen wie der Friedhof Sihlfeld können, abhängig von ihrer Grösse, einen hohen Kaltluftvolumenstrom aufweisen (**F**). Je nach Lage können diese aber auch mit Hangabwinden in einem Zusammenhang stehen und als grüne „Trittsteine“ die Durchlüftung unterstützen.

Wie die Gegenüberstellung in Abb. 29 zeigt, liegt im Zukunftsszenario unter dem Einfluss des Klimawandels ein um ca. 2,5 °C höheres Temperaturniveau vor. Der Flächenanteil wärmebelasteter Siedlungsräume wird perspektivisch zunehmen. Es zeigt sich, dass durchgrünte und mit Bäumen bestandene Siedlungsräume resilienter auf die Temperaturzunahme reagieren werden als die stärker bebauten und versiegelten Flächenanteile.

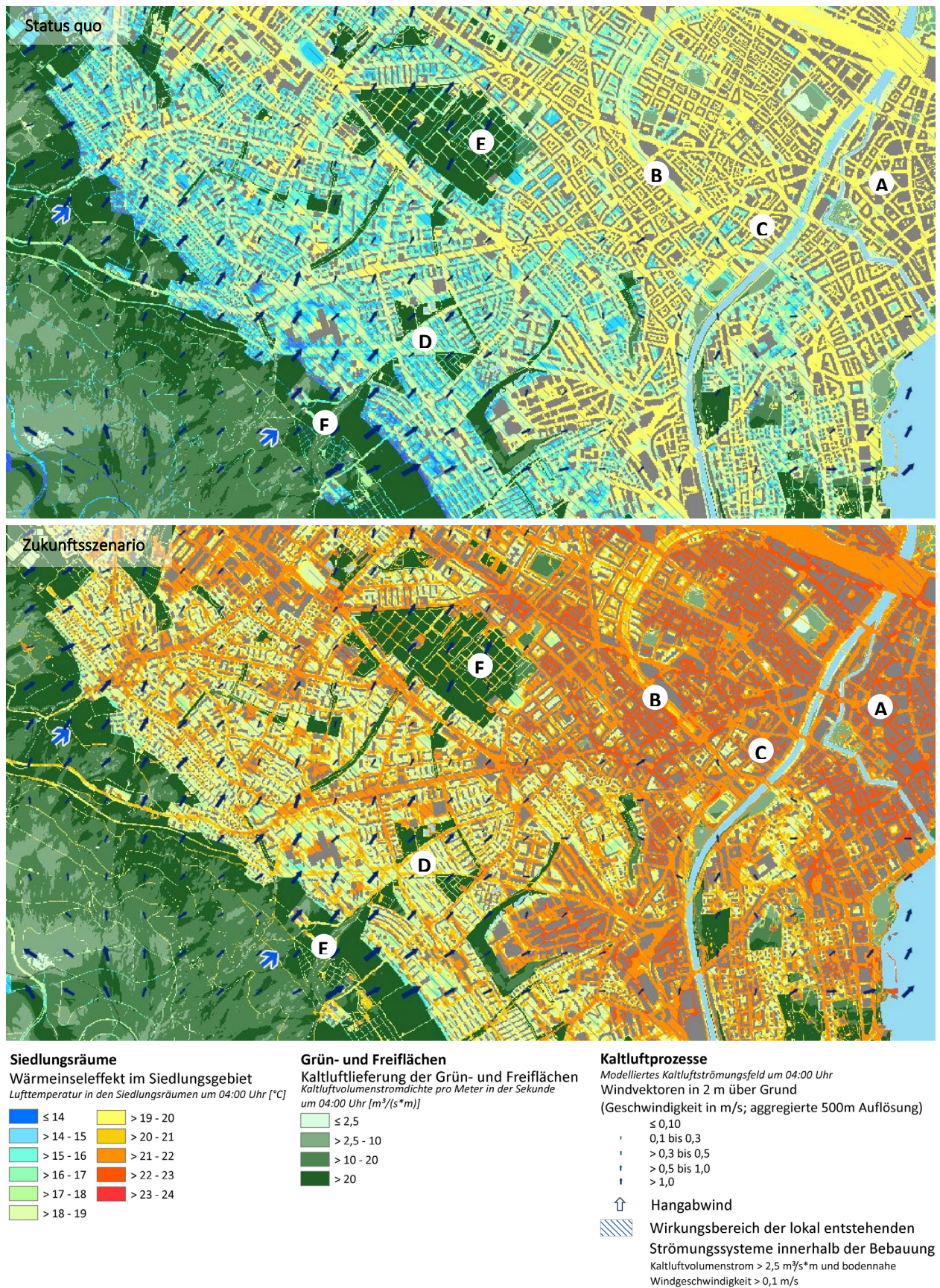


Abbildung 29: Klimaanalysekarte im Status quo (oben) und Zukunftsszenario (unten)

8. Kartenprodukte für Bewertung und Planung

8.1 GRUNDLAGEN

Zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse ist die Planungshinweiskarte (PHK). Gemäss der VDI Richtlinie 3787, Bl. 1 handelt es sich bei der Planungshinweiskarte um eine „Informelle Hinweiskarte, die eine integrierende Bewertung der in der Klimaanalysekarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange enthält“ (VDI 2015,5). Der Begriff der Planungsrelevanz wird in der Richtlinie noch weiter konkretisiert als: „Bewertung von (Einzel-)Flächen hinsichtlich ihrer Klimafunktionen, aus der Massnahmen zum Schutz oder zur Verbesserung des Klimas abgeleitet werden. Planungsrelevant sind dabei alle thermischen und lufthygienischen Phänomene, die als teil- oder kleinräumige Besonderheiten oder Ausprägungen signifikant abweichen [...] und die Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden von Menschen haben“ (VDI 2015,5-6).

Kerngegenstand der Planungshinweiskarte ist also die klimaökologische Bewertung von Flächen im Hinblick auf die menschliche Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse. Gemäss dem in der Richtlinie definierten Stand der Technik ist dabei zwischen Flächen im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen mit ggf. schützenswerten Klimafunktionen) und Flächen im Lastraum (mit potentiellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen, im Folgenden „Wirkraum“ genannt) zu unterscheiden. Die Richtlinie schlägt eine 3-stufige Bewertung im Ausgleichsraum sowie eine 4-stufige Bewertung im Wirkraum vor, gibt qualitative Hinweise zu ihrer Ableitung und schlägt auch RGB-Farbcodes vor. Ferner wird empfohlen, den flächigen Bewertungen punktuell „raumspezifische Hinweise“ zu Begrünungsbedarfen im Stadt- und Strassenraum sowie zu verkehrlich bedingten Schadstoffbelastungspotentialen für Hauptverkehrsstrassen an die Seite zu stellen. Als „erweiterte Aufgaben“ definiert die VDI-Richtlinie seit ihrer letzten Überarbeitung die Berücksichtigung des Klimawandels sowie der Umweltgerechtigkeit. Eine über den Hinweis, dies ggf. über eigenständige Themenkarten zu lösen, hinausgehende Hilfestellung wird jedoch nicht gegeben.

Die Planungshinweiskarte entfaltet – anders als beispielsweise Luftreinhalte- oder Lärmaktionspläne – keinerlei rechtliche Bindungskraft und unterliegt auch keiner Planzeichenverordnung. Daraus folgt zum einen, dass begründet auch von den Vorschlägen in der Richtlinie abgewichen werden kann, solange der Grundgedanke erhalten bleibt. Zum anderen bedeutet dies, dass Inhalte und Hinweise vollumfänglich der Abwägung zugänglich sind, sofern Inhalte nicht gänzlich oder in Teilen in verbindliche Planwerke (z.B. dem Flächennutzungsplan oder insbesondere dem Bebauungsplan) übernommen werden. Es wird jedoch vorausgesetzt, dass bei entsprechender Abwägung die Abweichung auch fundiert begründet werden kann.

Aufgrund der Komplexität der Planungshinweiskarte, die sowohl Informationen zur Tag- und Nachtsituation als auch zur Ist- und Zukunftssituation in einer einzigen Flächenkulisse bereitstellen muss, ist es nötig, gemäss der Produktpyramide (Abbildung 10) vorgelagert sog. Bewertungskarten auszugeben. Die vier Bewertungskarten („Nacht Ist“, „Tag Ist“, „Nacht Zukunft“, „Tag Zukunft“) bauen auf den zugehörigen nächtlichen Klimaanalysekarten bzw. PET-Karten des Tages auf und sind der Planungshinweiskarte hierarchisch untergeordnet. Der Erstellung dieses Kartenwerks liegt ein mit vielen beteiligten Akteuren abgestimmter Ausarbeitungsprozess zugrunde (s. Kapitel 3).

8.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse (vgl. Kap.6.1) erlauben eine detaillierte Darstellung der wichtigsten klimaökologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet. Bewertungen und daraus abgeleitete planerische Aussagen (z.B. zum Grad der thermischen Belastung innerhalb der Wirkräume sowie die hum-anbioklimatische Bedeutung bestimmter Areale im Ausgleichsraum) müssen sich hingegen auf eindeutig im Stadtraum räumliche stadtklimatische Funktions-/Nutzungseinheiten beziehen. Diese sog. „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss

- flächendeckend für das Stadtgebiet vorliegen,
- möglichst aktuell sein und einer möglichst standardisierten Fortschreibung unterliegen,
- eine eindeutige Einteilung zwischen klimaökologischen Ausgleichs- und Wirkräumen erlauben und
- passfähig sowohl für den gesamtstädtischen Massstab als auch für den hochauflösenden Analyse-ansatz sein, also weder zu kleinteilig noch zu grob ausfallen

Ein entsprechender Datensatz existiert auf kommunaler Ebene per se nicht. Mit der für den Kanton Zürich vorliegenden Quartieranalyse existiert aber eine gute Grundlage, die durch eine gutachterliche Tätigkeit entsprechend weiterqualifiziert wurde. Die Modifikation betrifft dabei sowohl die Zusammenfassung von sehr kleinräumigen Strukturen (vorrangig im Aussenbereich bzw. Ausgleichsraum) als auch die Aufteilung grösserer zusammenhängender Flächen in kleinere Funktionseinheiten (vorrangig im Wirkraum) aus der Amtlichen vermessung. Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Erstellung der Klimaanalysekarten (zur Abgrenzung von Ausgleichs- und Wirkungsräumen) sowie der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte (zur Ableitung von Wertstufen) mithilfe eines statistischen, nicht gewichteten Raummittels aus allen die jeweiligen Flächen schneidenden Rasterpunkten übertragen. Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum, zum anderen als planungsrelevante und massstabsge-rechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten. Da alle Teilflächen der Basisgeometrie einen grösseren Flächeninhalt als 25 m² (also die Flächen einer einzelnen Rasterzelle des Modells) aufweisen, treten auf der Rasterebene innerhalb einer Fläche in aller Regel höhere und/oder niedrigere Werte auf, als in der statistischen Generalisierung zu erkennen ist (Abbildung 30).

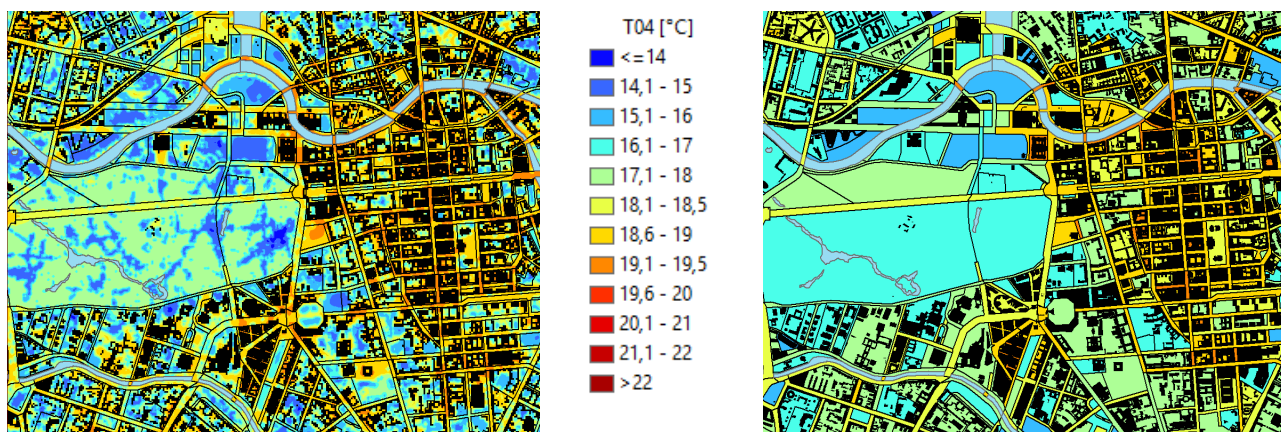


Abbildung 30: Prinzipskizze: links das Ausgangsraster (Beispiel) und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie

8.3 BEWERTUNGSKARTEN

Die Modellergebnisse und die Klimaanalysekarte bilden das Prozessgeschehen in Form absoluter Werte ab – diese gelten jedoch nur für den Zustand einer autochthonen Sommerwetterlage. Die Beurteilung in den Bewertungskarten (und später auch der Planungshinweiskarte „PHK“) beruht dagegen auf relativen Unterschieden der meteorologischen Parameter (dargestellt in Kap. 6.1) zwischen den Flächen, um die Belastungen losgelöst von bestimmten Wetterlagen beschreiben zu können.

Dabei wurden separate Bewertungskarten für die Nacht- und Tagsituation sowie für Ist-Zustand und das Zukunftsszenario erstellt. Die Bewertung der bioklimatischen Belastung im Wirkraum sowie der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsraum erfolgte in Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Bl. 1 bzw. 3787, Bl. 1 (VDI 2008a, VDI 2015). Die Bewertungen beruhen auf den klimaökologischen Funktionen, ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Planungshinweiskarte stellt aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar. Im Folgenden wird die Herleitung der Bewertungsklassen für die beiden Rechenszenarien und Tageszeiten geschildert.

8.3.1 WIRKRAUM

Wertgebend für die Wirkraumklassen sind die PET um 14:00 Uhr für die Tagsituation sowie die bodennahe Lufttemperatur um 04:00 Uhr als starker Indikator für den nächtlichen Schlafkomfort in den Gebäuden (vgl. die Ausführungen in Kap. 5.1.5). Bei den der modifizierten ALKIS-Basisgeometrie mithilfe der oben beschriebenen Methode aufgeprägten Temperaturen handelt es sich zunächst um absolute Werte, die ausschliesslich für den gewählten meteorologischen Antrieb gültig sind. Tatsächlich existieren innerhalb der zu betrachtenden Strahlungswetterlage aber auch deutlich wärmere oder auch kühlere Situationen. Die Flächenbewertung muss nun den Anspruch haben, repräsentativ für die Grundgesamtheit dieser Situationen zu sein, was eine unmittelbare Bewertung auf der Basis der modellierten Absolutwerte – z.B. die Belastungsstufen an der Über- oder Unterschreitung einer Tropennacht festzumachen – fachlich verbietet.

In der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008a) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten (in anderen Fällen auch gemessenen) Werte definiert. Bei dieser sog. z-Transformation wird die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmassstab herangezogen. Mathematisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Die resultierende z-Werte werden gemäss definiertem Standard mithilfe von statistischen Lagemassen (Mittelwert = 0 sowie positive sowie negative Standardabweichungen davon als obere und untere S₁-Schranke) in standardmässig vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 31).

$$z = \frac{\chi - \mu}{\sigma}$$

Dabei ist

- z standardisierter Wert der Variablen x
- χ Ausgangswert der Variablen x
- μ arithmetisches Mittel
- σ Standardabweichung

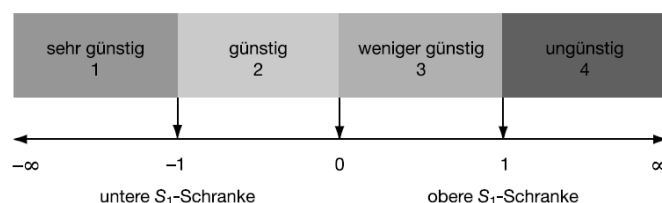


Abbildung 31: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008)

Dem Bewertungsverfahren liegt also ein relativer Ansatz zugrunde, bei dem nicht nach universell gültigen (ggf. rechtlich normierten) Grenzwerten gefragt wird, sondern bei dem das auftretende Wertespektrum konkret für den analysierten Raum den Bewertungsmassstab bildet. Das vorliegend von (hier: thermischen) Belastungen muss dabei als Prämisse zuvor abgeleitet worden sein (vgl. hierzu Kap. 8.4). Andernfalls bestünde die Gefahr, Situationen als ungünstig zu bewerten, die eigentlich unkritisch sind (beispielsweise würde eine analoge Anwendung der Methode in den Wintermonaten oder in kalten Klimaten keine sinnvollen Ergebnisse liefern).

Durch die Abstraktion von konkreten Absolutwerten ist das Bewertungsverfahren passfähig für die Bewertung der thermischen Belastungssituation im Wirkraum. Die Methode ist jedoch optimiert zur vergleichenden Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb einer einzigen zeitlich-räumlichen Dimension. Sollen mehrere z.B. zeitliche Dimensionen miteinander verglichen werden, muss die Methode adaptiert werden. Durch die beiden zu betrachtenden Situationen (Ist-Situation, Zukunftsszenario „Starker Klimawandel“) mit ihren im Niveau voneinander abweichenden Temperaturfeldern ist dies im vorliegenden Fall gegeben. Daher wurden die Statistiken jeweils für die Tag- und Nachtsituation des Ist-Zustandes und des Zukunftsszenarios berechnet, wodurch sich Wertebereiche der z-Transformation für vier verschiedene Bewertungskarten ergaben. Zur Erzeugung dieser Werte wurden jeweils ausschliesslich solche Gitterpunkte verwendet, die innerhalb des Wirkraums lagen – die Werte im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt. Auf dieser Basis können die von der VDI definierten Bewertungsstufen erzeugt und jede Fläche des Wirkraums für alle vier Bewertungskarten mit einer entsprechenden Bewertung versehen werden. Es wurde aus Gründen der Darstellung die ursprünglich 4-stufige in eine 5-stufige Skala von „sehr günstig“ bis „sehr ungünstig“ überführt, ohne dabei die grundsätzliche Systematik aufzulösen (Tabelle 9). Für die statistische Analyse der Belastungen wird eine „mittlere“ Statistik aus Ist-Zustand und Zukunftsszenario berechnet. Diese ist dann Grundlage für die Z-Transformation, so dass für beide Situation dieselbe Statistik angewendet wird. Da die Grün- und Freiflächen den Ausgleichsraum darstellen, wird für diese keine nächtliche Wärmebelastung zugewiesen, sondern die Bedeutung als Ausgleichsraum für den Siedlungsraum (Kap. 8.3.2).

Tabelle 2: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Situation im Wirkraum nach Tageszeit und Strukturtyp

Tageszeit	Bewertungsstufen	Mittlerer z-Wert	Ausgewertete Strukturtypen
Tagsituation Wirkraum	In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1 1 = sehr günstig 2 = günstig 3 = weniger günstig 4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig	PET 14:00 Uhr (IST/Zukunft) z-Wert < -0,75 z-Wert ≥ -0,75 und ≤ -0,25 z-Wert > -0,25 und ≤ 0,25 z-Wert > 0,25 und ≤ 1 z-Wert > 1	Siedlungsfläche Verkehrsfläche
Nachtsituation Wirkraum	In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1 1 = sehr günstig 2 = günstig 3 = weniger günstig 4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig	T 04:00 Uhr (IST/Zukunft) z-Wert < -0,75 z-Wert ≥ -0,75 und ≤ -0,25 z-Wert > -0,25 und ≤ 0,25 z-Wert > 0,25 und ≤ 1 z-Wert > 1	Siedlungsfläche Verkehrsfläche

8.3.2 AUSGLEICHsRAUM

Als Ausgleichsräume werden vegetationsgeprägte, unbebaute Flächen bezeichnet. Diese sind vornehmlich in der Nacht durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft über funktionsfähige Austauschbeziehungen



dazu in der Lage, lufthygienische oder humanbioklimatische Belastungen in Wirkräumen zu vermindern oder abzubauen. Am Tage können sie durch ihre Schattenwirkung als wertvolle Naherholungsräume sowie Rückzugsorte an heißen Tagen dienen. Durch diese unterschiedlichen Kerneigenschaften der Ausgleichsräume zu unterschiedlichen Tageszeiten war es notwendig, die Tag- und Nacht-Situation in einem teilautomatisierten Verfahren getrennt zu bewerten und wie bereits im Wirkraum in fünf Stufen von „sehr geringe“ bis „sehr hohe“ bioklimatische Bedeutung (nachts) bzw. Aufenthaltsqualität (tags) einzuteilen. Sowohl für den Ist-Zustand als auch das Zukunftsszenario wurden hierbei jeweils dieselben Methodiken angewandt.

Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika der Grünflächen im Hinblick auf planungsrelevante Belange bedarf es einer Analyse der vorhandenen Wirkungsraum-Ausgleichsraum-Systeme im Untersuchungsgebiet. Kaltluft, die während einer Strahlungsnacht innerhalb der Freiräume entsteht, kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann. Für die Bewertung der bioklimatischen Bedeutung von grünbestimmten Flächen wird ein teilautomatisierbares Verfahren angewendet, das sich wie folgt skizzieren lässt (vgl. Abb. 32). Die Bewertung ist anthropozentrisch ausgerichtet, d.h. Flächen, die für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion erfüllen bzw. keinen Ausgleichsraum darstellen, wurden gering bewertet. Im Falle zusätzlicher Bebauung im Bereich dieser Flächen kann sich deren Funktion ändern und muss ggf. neu bewertet werden. Die einzelnen Klassen für die bioklimatische Bedeutung von Aussenräumen werden wie folgt bestimmt:

Sehr hohe bioklimatische Bedeutung:

1. Ermittlung von Siedlungsräumen mit *hoher und sehr hoher* nächtlicher Überwärmung (Flächengrösse > 0,5 ha)
2. Ermittlung der an (1) *angrenzenden Grünflächen* (Toleranz = 250 m).
Grünflächen im Umfeld von bioklimatisch ungünstigen Siedlungsräumen kommt grundsätzlich eine sehr hohe Bedeutung zu. Sie sind geeignet, unabhängig von ihrem Kaltluftliefervermögen ausgleichend auf das thermische Sonderklima in ihrem meist dicht bebauten Umfeld zu wirken.
3. Ermittlung von *Bereichen mit besonderer Funktion für den Luftaustausch*
Diese Strukturen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Ausweisung der Leitbahnbereiche erfolgt manuell und orientiert sich an der Ausprägung des autochthonen Strömungsfeldes der FITNAH-Simulation.
4. Allen Grünflächen aus (2) und (3) wird eine **sehr hohe bioklimatische Bedeutung** zugesprochen.

Hohe bioklimatische Bedeutung

5. Ermittlung von Siedlungsräumen mit *mässigem* nächtlichen Wärmeinseleffekt (Flächengrösse > 0,5 ha)
6. Ermittlung der an (5) *angrenzenden Grünflächen* (Toleranz = 100 m).
Wie unter (2) erfolgt die Einstufung auch dieser Flächen unabhängig von der flächeninternen Ausprägung der Klimaparameter
7. Ermittlung der an (2), (3) und (4) direkt *angrenzenden Grünflächen (Umfeldflächen)*.
Bereiche, die zur Ausweisung von „Kaltluftquellgebieten“ der besonders bedeutenden Flächen dienen.
8. Grünflächen aus (6) wird generell eine **hohe bioklimatische Bedeutung** zugesprochen
9. Grünflächen aus (7) und wird eine **hohe bioklimatische Bedeutung** zugesprochen, wenn sie einen hohen Kaltluftvolumenstrom aufweisen

Mittlere bioklimatische Bedeutung

10. Waldflächen wird – wenn sie nicht bereits in eine der vorgenannten Kategorien fallen – pauschal ebenfalls eine **mittlere bioklimatische Bedeutung** zugesprochen.
Wald kommt generell eine von der Stärke des nächtlichen Kaltluftliefervermögens unabhängige bioklimatische Ausgleichsleistung als Frischluftproduzent und Erholungsraum zu.

Freiflächen, die keinem der oben genannten Kriterien entsprechen, wird eine nur **geringe bioklimatische Bedeutung** zugesprochen. Die nach diesem Verfahren ermittelte bioklimatische Bedeutung der Freiräume basiert zum einem auf ihrer Lage in Bezug zu bioklimatisch belasteten Siedlungsstrukturen, zum anderen auf der flächeninternen Ausprägung der Klimaparameter, d.h. im Wesentlichen auf ihrem Kaltluftliefervermögen. Diese Unterscheidung wurde getroffen, weil die flächeninternen Klimaparameter nicht in allen Bereichen gleichermassen aussagekräftig sind. So kann eine Grünfläche trotz relativ geringem Kaltluftliefervermögen in einem ansonsten stark überbauten Umfeld signifikant zur Verminderung der dort auftretenden hohen Belastungen beitragen. Aus diesem Grund wurden Freiräume im direkten Umfeld von Siedlungsbereichen mit nächtlicher Überwärmung und einhergehenden ungünstigen bioklimatischen Verhältnissen generell eine hohe bioklimatische Bedeutung zugesprochen. Somit verfügt eine in ihrer bioklimatischen Bedeutung als „Sehr hoch“ eingestufte Grünfläche über einen direkt zugeordneten, bioklimatisch stark belasteten Wirkungsraum.

Eine als „Hoch“ eingestufte Grünfläche verfügt entweder über einen direkt zugeordneten, bioklimatisch weniger günstigen Wirkungsraum mit mässiger Überwärmung oder weist ein überdurchschnittliches Kaltluftliefervermögen auf und ist gleichzeitig als Ausgleichsraum oder Kaltluftquellgebiet einzustufen.

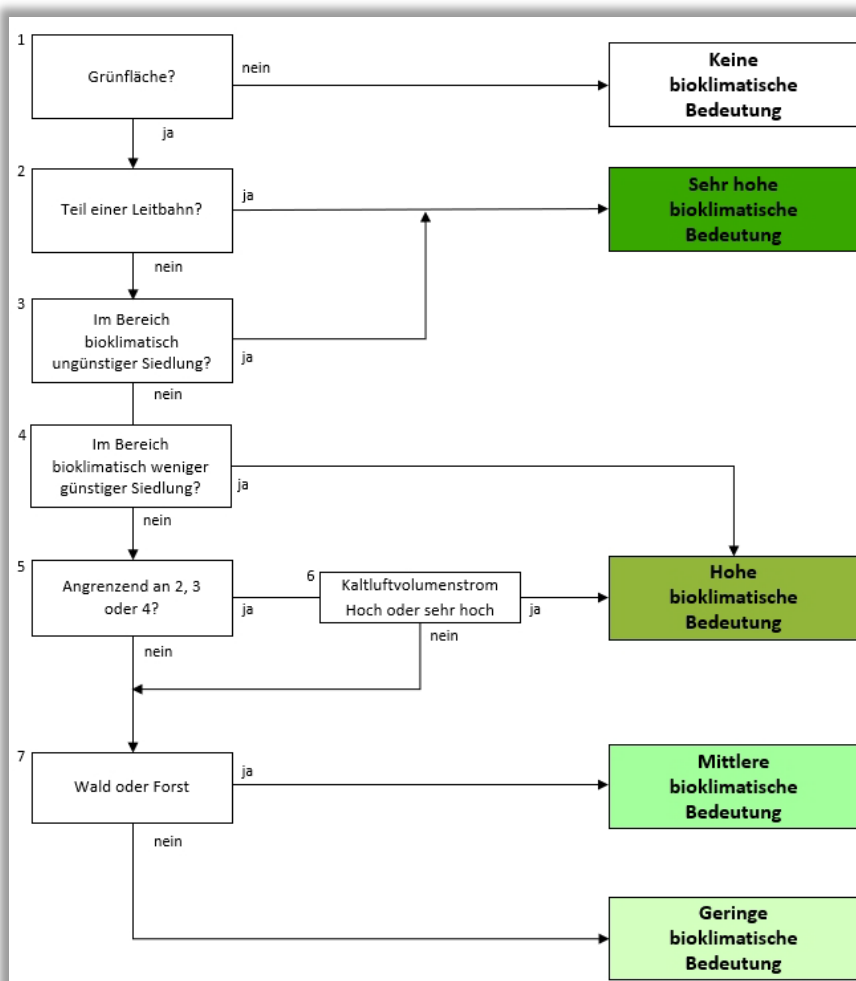


Abbildung 32: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation.



Tabelle 3: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Bedeutung im Ausgleichsraum nach Szenario, Tageszeit und Strukturtyp.

Tageszeit	Bewertungsstufen	Mittlerer z-Wert	Ausgewertete Strukturtypen
Tagsituation Ausgleichsraum	<i>In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1</i> 5= sehr hoch 4= hoch 3= mittel 2= gering 1= sehr gering	PET 14:00 Uhr (IST/Zukunft) z-Wert < -0,75 z-Wert \geq -0,75 und \leq -0,25 z-Wert > -0,25 und \leq 0,25 z-Wert > 0,25 und \leq 1 z-Wert > 1	Grün-/Freiflächen, Wald

8.3.3 ERGEBNISSE BEWERTUNGSKARTEN VON IST-ZUSTAND UND ZUKUNFTSSZENARIO

8.3.3.1 NACHTSITUATION

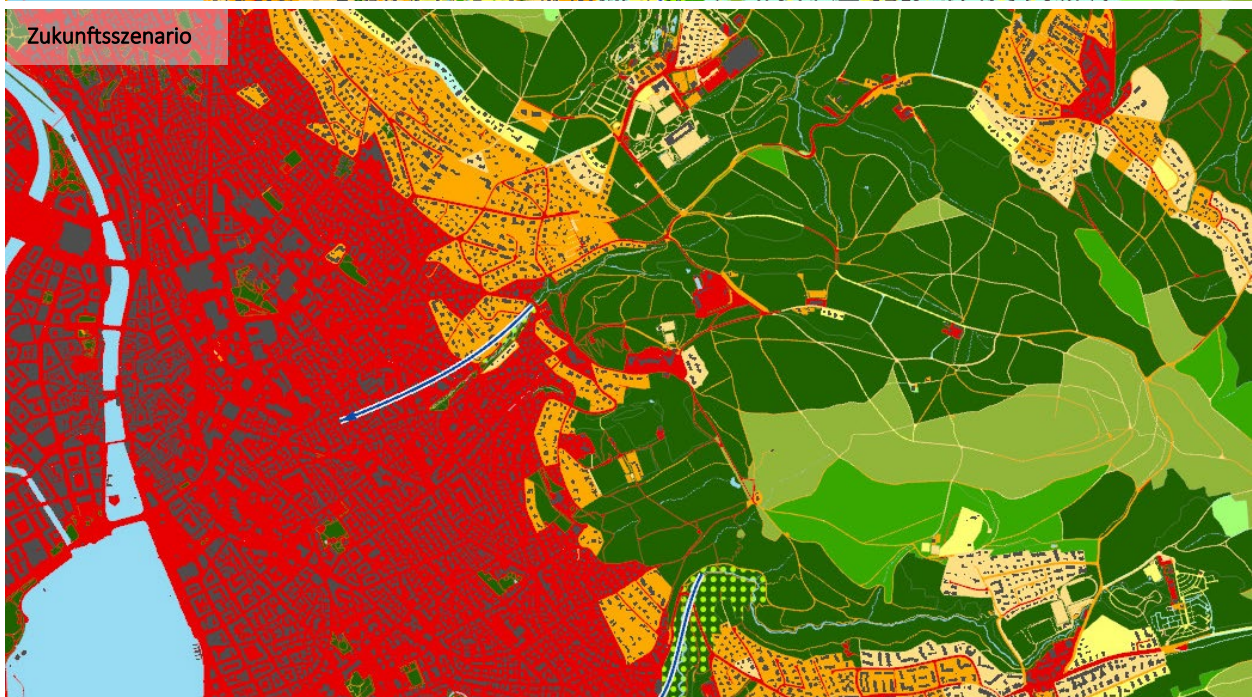
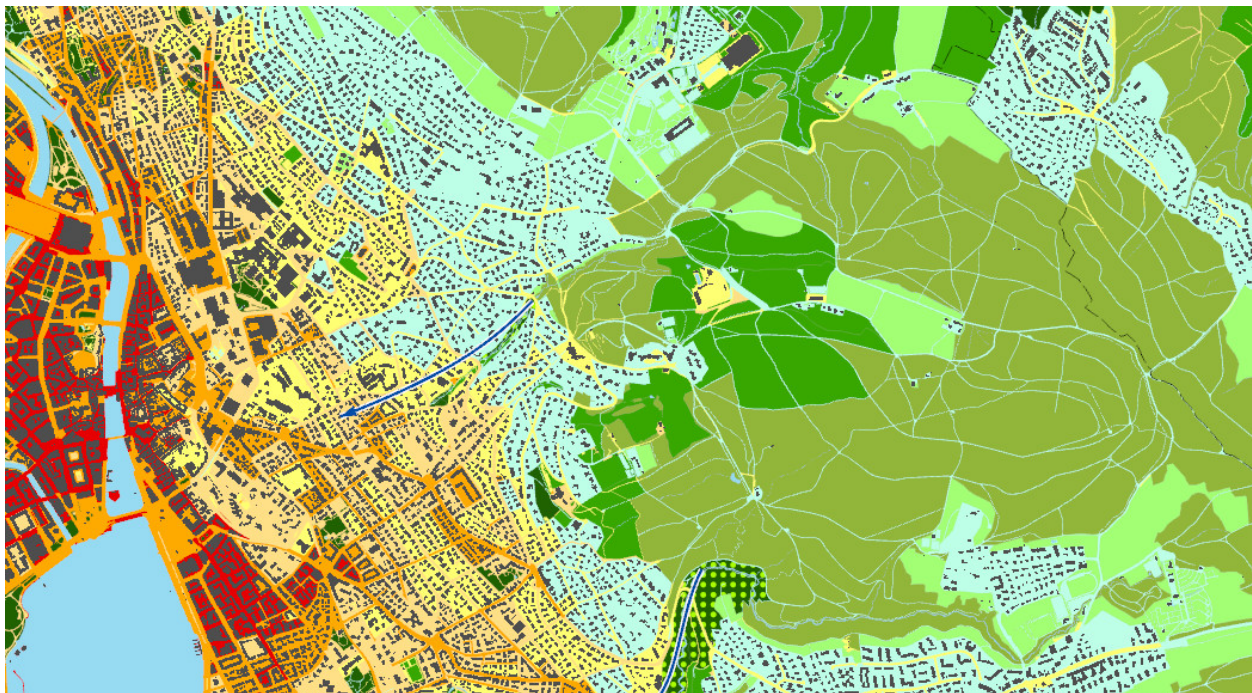
Ein erholsamer Schlaf ist nur bei günstigen thermischen Bedingungen möglich, weshalb der Belastungssituation in den Nachtstunden eine besondere Bedeutung zukommt. Da die klimatischen Verhältnisse der Wohnungen in der Nacht im Wesentlichen nur durch den Luftwechsel modifiziert werden können, ist die Temperatur der Aussenluft der entscheidende Faktor bei der Bewertung der thermophysiologischen Belastung. Entsprechend spiegelt die Beurteilung des Bioklimas weniger die thermische Beanspruchung des Menschen im Freien wider als vielmehr die positive Beeinflussbarkeit des nächtlichen Innenraumklimas. Wie in Kap. 3.3 beschrieben, ist die bioklimatische Belastungssituation der Baublöcke auf Basis der nächtlichen Überwärmung ausgewiesen worden. Damit ergibt sich eine räumliche Untergliederung des **Siedlungsraumes** in bioklimatisch belastete Bereiche einerseits sowie unbelastete bzw. lediglich gering belastete andererseits. Letztere sind, durch von Kaltluft produzierenden Grünflächen ausgehende Kaltlufteinwirkbereiche, nur gering überwärmt oder weisen aufgrund eines hohen Grünanteils eine starke flächeninterne Abkühlung auf. Häufig sind sie auch durch eine ausreichende Durchlüftung gekennzeichnet. Die Einwirkbereiche innerhalb der Bebauung sind durch die Schraffur gekennzeichnet. Am Ende einer warmen Sommernacht werden im Kanton Zürich bis 4 Uhr gegenwärtig ca. 65,9 % des Siedlungsraums mit Kalt-/Frischlufte versorgt und befinden sich damit im Einwirkbereich von Flurwinden und lokalen Kaltluftabflüssen. Im Zukunftsszenario verändert sich dieser Wert nur unwesentlich und liegt dann bei 65,8 %.

Diesen Gunsträumen stehen Belastungsbereiche mit einer überdurchschnittlichen Wärmebelastung und einem Durchlüftungsdefizit gegenüber. Dies betrifft vor allem die Innenstadtbereiche von Zürich und Winterthur, aber kleinräumiger auch Stadtteilzentren sowie grössere Gewerbeflächen, in denen bioklimatisch weniger günstige bzw. ungünstige Bedingungen vorliegen. Diese resultieren aus dem hohen Überbauungs- und Versiegelungsgrad sowie einer in Teilen unzureichenden Durchlüftung. Abbildung 33 zeigt in einem Ausschnitt aus der Bewertungskarte Nacht den Bereich östliche Altstadt/Fluntern in Zürich, **wobei die thermische Situation der Siedlungsräume sowie Strassen und Plätze mit einer Farbabstufung als Mittelwert für die jeweilige Fläche dargestellt ist.**

Analog zur Beschreibung des rasterbasierten Wärmeinseleffektes in der Klimaanalysekarte (vgl. Kap. 6) ist im dargestellten Ausschnitt gegenwärtig die stärkste Überwärmung und damit sehr ungünstige Bedingungen im Bereich der Altstadt sowie im Umfeld des Opernhauses anzutreffen (Rot). Der Anteil dieser Kategorie an der Siedlungsfläche beträgt gegenwärtig 2,6 %, während die Kategorie „Ungünstig“ 6,4 % der Siedlungsfläche einnimmt. Diese Flächen sind oftmals stark versiegelt und verfügen aufgrund grösserer Überbauung über eine erhöhte Rauigkeit, was Kaltluftströme von ausserhalb abschwächt. Darüber hinaus stehen in unmittelbarer Umgebung oftmals nur wenige Grün- und Freiflächen zur Verfügung, die Kaltluft produzieren und zur Verfügung stellen könnten.

Weiter hangaufwärts schliessen sich die stärker durchgrünzten Siedlungstypologien an, welche nur noch eine moderate Überwärmung aufweisen („Weniger günstig“; 11,1 %). Eine schwache bzw. nicht vorhandene Überwärmung ist in 22,9 % („Günstig“) bzw. 57,0 % (Sehr günstig“) der Siedlungsfläche anzutreffen. Diese Areale befinden sich meist in peripherer Lage angrenzend zu Kaltluftentstehungsgebieten und profitieren von auftretenden Hangabwinden. Im Allgemeinen weisen diese Bereiche einen hohen Schlafkomfort auf, da eine lockere Bebauung die nächtliche Durchlüftung begünstigt. Weiterhin sorgen hier der geringe Versiegelungsgrad und der hohe Baumbestand durch Verschattungseffekte am Tage bereits dafür,

dass allgemein weniger solare Strahlung aufgenommen und anschliessend in Wärme umgewandelt werden kann.



Bioklima Wärmeeffekt um 04:00 Uhr
Siedlungs- und Verkehrsflächen

- Sehr Günstig
- Günstig
- Weniger günstig
- Ungünstig
- Sehr ungünstig

Grün- und Freiflächen

Bewertung

- Sehr hohe bioklimatische Bedeutung
- Hohe bioklimatische Bedeutung
- Mittlere bioklimatische Bedeutung
- Geringe bioklimatische Bedeutung
- Leitbahnkorridor
Grün- und Freiflächen innerhalb einer Kaltluftleitbahn

→ Kaltluftleitbahn

Abbildung 33: Bewertungskarte der Nachtsituation im Status quo (oben) und Zukunftsszenario (unten)



Im Zukunftsszenario zeigt sich ein deutlich anderes Bild. Der Anteil der höchsten Belastungsstufe „Sehr ungünstig“ steigt von 2,6 % im Status quo auf 61,0 % an. Auch der Anteil der übrigen Belastungsstufen nimmt zu, wobei nun auch ein Grossteil der zurzeit noch eher gering belasteten Hangbebauung diese Kategorie zuzuordnen sein. Die Einstufung „Ungünstig“ macht zukünftig einen Anteil an 25 % der Siedlungsfläche aus, die Kategorien betragen „Ungünstig“ und weniger günstig betragen 10,0 % bzw. 3,3 %. Der Anteil der als „Günstig“ bzw. „Sehr günstig“ zu beurteilenden Flächen geht auf 3,3 % bzw. 0,7 % zurück. Dabei handelt es sich um Siedlungsflächen mit sehr hohem Grünanteil, die zumeist unmittelbar an Kaltluftentstehungsflächen angrenzen.

Den **Grün- und Freiflächen** kommt als Ausgleichsräumen im Status quo zu 23,9 % eine sehr hohe bioklimatische Bedeutung zuteil, während eine hohe Bedeutung 30,6 % des Grünflächenbestandszugeordnet werden kann. Eine mittlere Bedeutung liegt für 29,9 % der Grünflächen vor, wobei es sich dabei meist um Waldflächen handelt. Etwa 22,7 % der Grünflächen weisen eine geringe Bedeutung auf, d.h. sie erfüllen für den derzeitigen und gering/nicht belasteten Siedlungsraum keine Funktion bzw. stellen für diesen keinen Ausgleichsraum dar. Mehrheitlich handelt es sich dabei um eher siedlungsferne und landwirtschaftlich genutzte Flächen.

Im Zukunftsszenario ist eine starke Verschiebung der Flächenanteile in Richtung „Sehr hoch“ zu beobachten. Aufgrund der Tatsache, dass der Anteil wärmebelasteter Siedlungsflächen zunimmt, wird auch der Anteil der als Ausgleichsräume zugeordneten Grün- und Freiflächen auf 78,5 % ansteigen. Gleichzeitig geht der Anteil der hoch bedeutsamen Grünflächen auf 5,5 % zurück. Die Kategorien „Mittel“ und „Gering“ betragen zukünftig 13,2 % bzw. 2,8 %.

Generell gilt, dass im Falle einer Bebauung der Flächen selbst bzw. in ihrer Umgebung die Bewertung neu vorgenommen werden muss. Dies resultiert aus der Tatsache, dass durch eine Nutzungsänderung die Eigenschaft einer Grünfläche wie die Kaltentstehung bzw. -Lieferung möglicherweise verändert sein kann und dies einen Effekt für angrenzende Flächen hätte. Bei einer Neuplanung sollte daher die Rolle der überplanten Fläche für den angrenzenden Bestand auf Grundlage der vorhandenen Ergebnisse (z.B. Klimaanalysekarte; Kap.5) eingeschätzt werden. Wenn ersichtlich wird, dass ein Gebäude den Kaltluftstrom durch eine abriegelnde Wirkung voraussichtlich massiv abschwächen wird, ist eine Abwägungsrelevanz gegeben. Es existiert dahingehend aber kein Schwellenwert. Die Relevanz nimmt allerdings mit den zu erwartenden Auswirkungen zu und ist bei umfänglichen Bauvorhaben potenziell hoch. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn Grünflächen mit sehr hoher Bedeutung bzw. Grünflächen mit einer Funktion als Kaltluftleitbahn überplant werden und deren Funktion als Kaltluftliefergebiet oder Durchlüftungsbereich beeinträchtigt werden könnte.

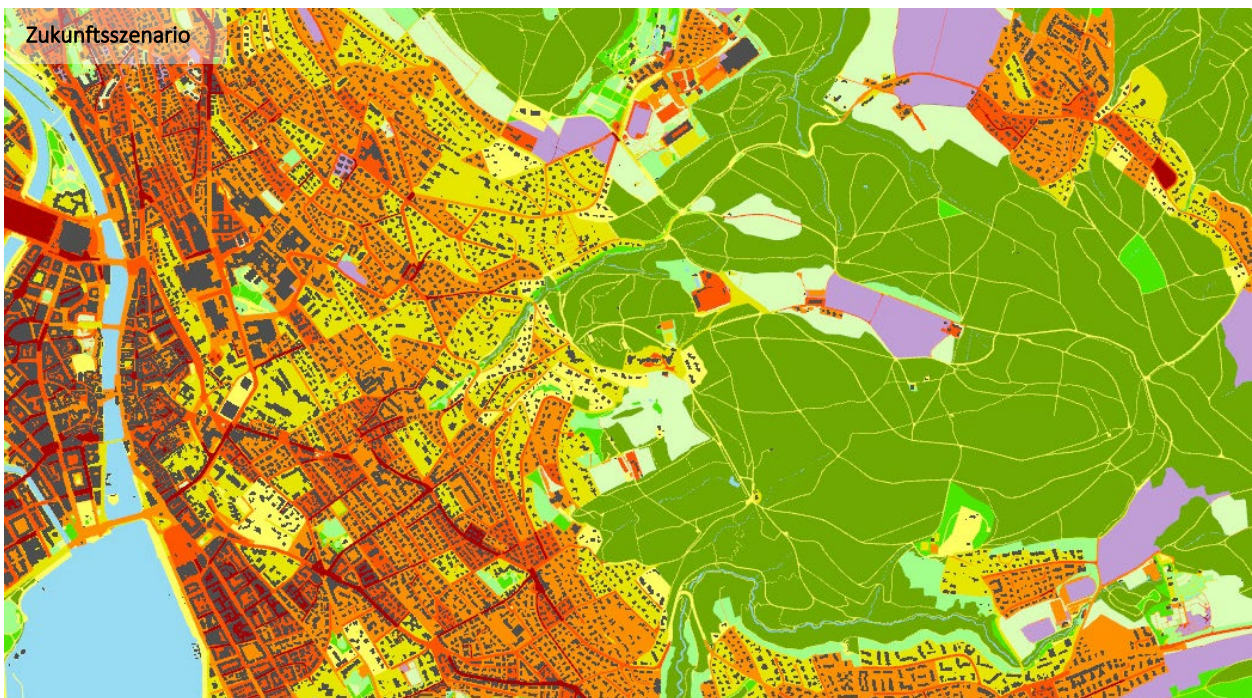
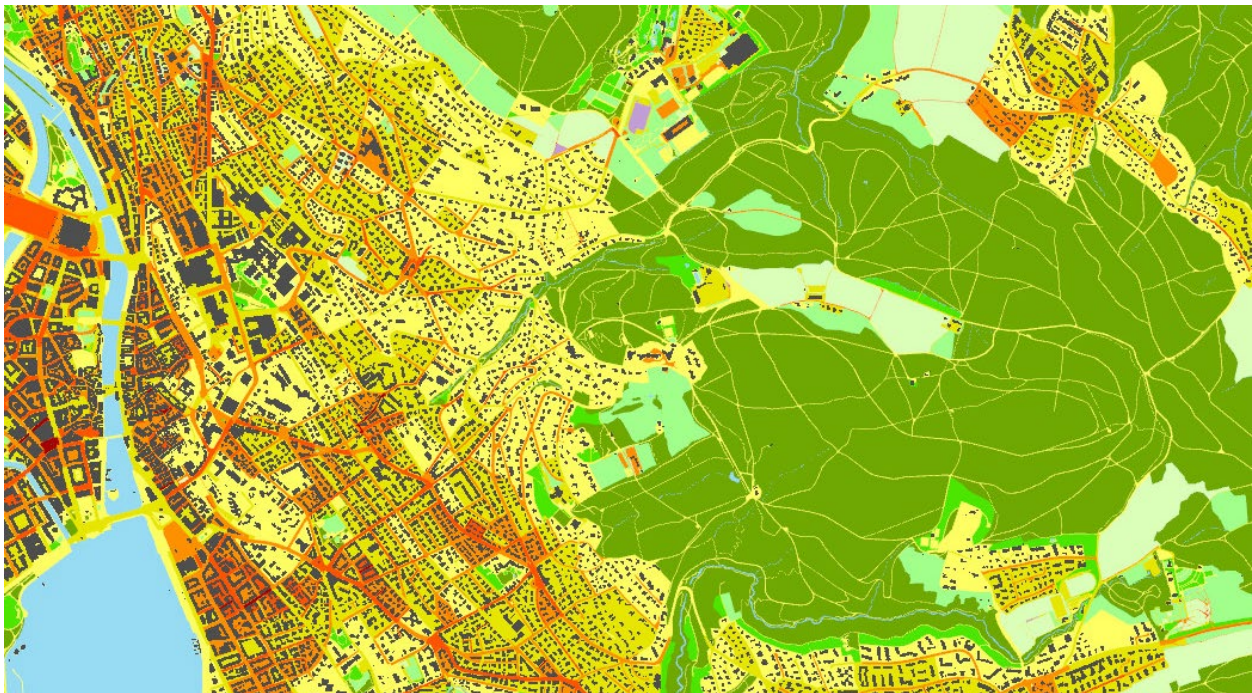
8.3.3.2 TAGSITUATION

Am Tage sind deutliche Unterschiede in der Aufenthaltsqualität sowohl in den bebauten bzw. versiegelten Bereichen als auch den Grünflächen zu erkennen (Abb. 34). Vor allem die **urbanen Siedlungsflächen** lassen im Status quo eine starke und sehr starke bioklimatische Belastung erkennen (43,2 % bzw. 8,6 %), wobei eine extreme Belastung lediglich auf 0,2 % der Flächen vorliegt. Dies betrifft meist Gewerbeflächen, welche oftmals grosse versiegelte Areale aufweisen und in der Regel wenige Grünflächen und eher niedrigere Gebäude aufweisen, sodass die Einstrahlung und entsprechend die thermische Belastung am Tage hoch ausfällt. Verkehrsflächen weisen aufgrund ihrer nahezu vollständigen Versiegelung ebenfalls verbreitet thermische Belastungen auf. Bei diesem Flächentyp liegt generell eine grosse Bandbreite struktureller Ausprägungen vor - von offenen, vollversiegelten Plätzen bis hin zu durch Bäume (oder Gebäude) stark verschatteten Strassenabschnitten. Eine mässige Belastung ist mit einem Anteil von 33,7 % in den eher peripheren Siedlungsflächen mit höherem Anteil mit Schatten spendenden Grünstrukturen zu beobachten. Vor allem im Nahbereich zu Waldflächen zeigt sich die positive Wirkung grösserer Baumbestände für die angrenzende Bebauung (Abb. 34). Areale mit schwacher Belastung spielen mit einem Flächenanteil von 14,4 % eine eher untergeordnete Rolle.

Die Temperaturerhöhung im Zukunftsszenario führt zu deutlich heisseren und somit ungünstigere Bedingungen im Aussenraum, insbesondere in den stark versiegelten Stadtbereichen. So steigt der Anteil von Siedlungsfläche mit extremer Wärmebelastung am Tag auf 14,6 % an, während die Kategorie „Sehr starke Belastung“ mit 47,5 % den Hauptanteil ausmacht. Eine starke Wärmebelastung ist perspektivisch auf 28,1 % der Siedlungsfläche anzutreffen. Wie Abb. 45 zeigt, betrifft das auch die zurzeit noch mässig bzw. schwach belasteten Siedlungstypologien im Hangbereich. Dieser Anteil beträgt dann nur noch 7,8 % bzw. 2,0 %.

Etwa 39,2 % der **Grünflächen** kann gegenwärtig im Kanton Zürich eine sehr hohe Aufenthaltsqualität mit geringer PET zugeschrieben werden, d.h. sie bieten an Sommertagen hohe Aufenthaltsqualität und eignen sich je nach Lage als (potenzielle) Rückzugsorte und Aufenthaltsbereiche für die Bevölkerung. Dabei handelt es sich vor allem um Waldflächen sowie Parkanlagen mit ausgeprägtem Baumbestand. Für 3,4 % der Flächen ist eine hohe Aufenthaltsqualität zu verzeichnen. Zudem weisen 3,4 % der Grünflächen eine mässige Aufenthaltsqualität auf. Die übrigen Flächen im Stadtgebiet erlauben aufgrund der meist starken Sonneneinstrahlung keinen Rückzugsort und tragen zu einem Anteil an Grünflächen mit geringer bzw. sehr geringer Aufenthaltsqualität in Höhe von 27,0 % bzw. 17,4 % bei. In diese Kategorie sind vor allem auch die landwirtschaftlich genutzten Areale einzuordnen.

Im Zukunftsszenario wird eine Verschiebung der Flächenanteile in Richtung der Kategorien „Gering“ (15,1 %) sowie „Sehr gering“ (41,6 %) deutlich. Die Einstufung „Mässig“ stellt mit nur noch 3,8 % die kleinste Einstufung dar, gefolgt von „Hoch“ (7,6 %). Mehr als 30 % der Grünflächen können aber weiterhin mit einer sehr hohen Aufenthaltsqualität eingeordnet werden, wobei es sich vorwiegend um Waldareale und Grünflächen mit hohem Baumanteil handelt. Hier sind weiterhin bioklimatisch günstige Aufenthaltsbedingungen gegeben.



Siedlungs- und Verkehrsflächen
Bioklima

	Schwache Belastung
	Mässige Belastung
	Starke Belastung
	Sehr starke Belastung
	Extreme Belastung

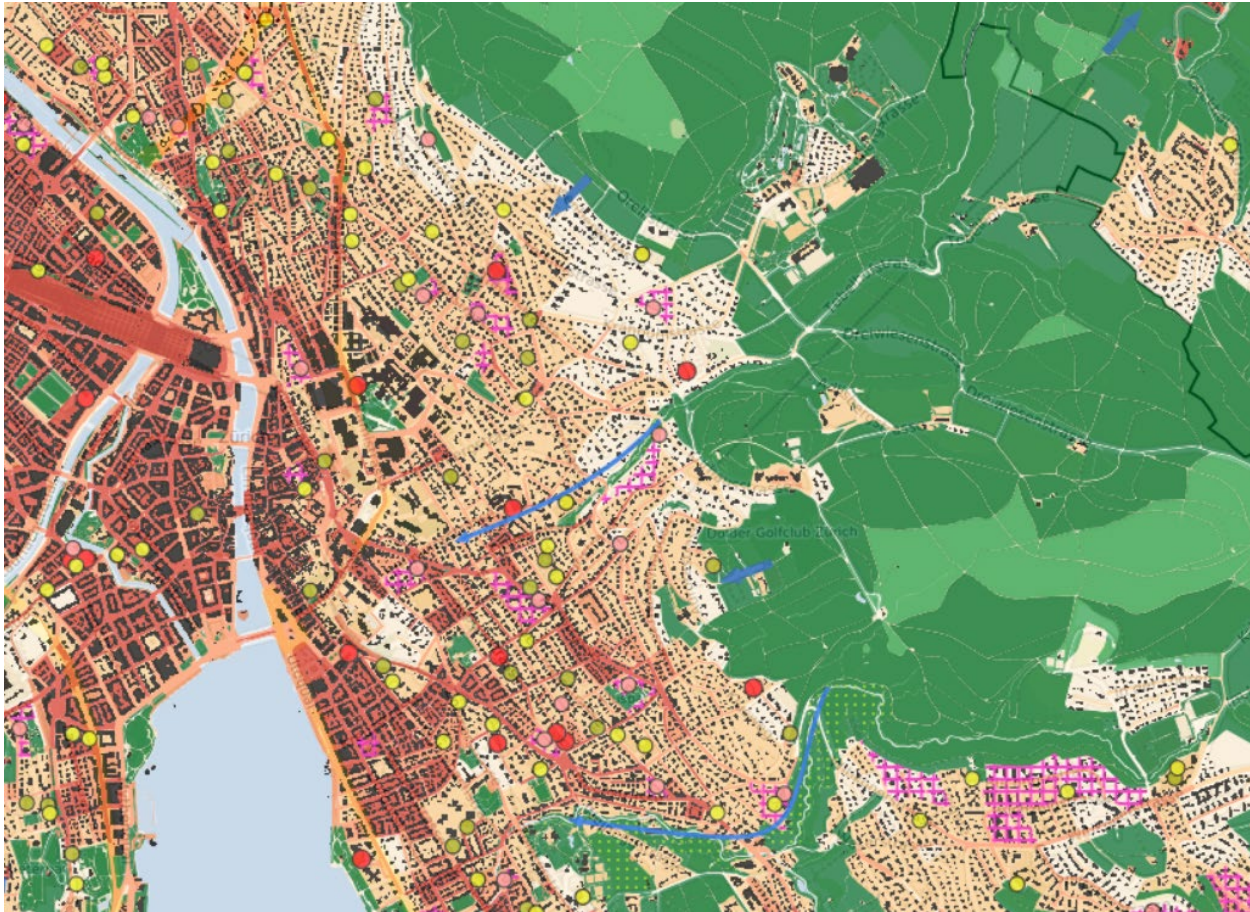
Grün- und Freiflächen
Aufenthaltsqualität am Tage

	Sehr hoch
	Hoch
	Mässig
	Gering
	Sehr gering

Abbildung 34: Bewertungskarte der Tagsituation Bewertungskarte der Nachtsituation im Status quo (oben) und Zukunftsszenario (unten)

8.4 PLANUNGSHINWEISKARTE

In der gemeinsamen *Planungshinweiskarte Stadtklima* wurden die Ergebnisse der vier Bewertungskarten für die Tag-/Nachtsituation zusammengefasst. Die Karte macht auf den ersten Blick ersichtlich, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo im Kanton Zürich Massnahmen zur Hitzeminderung vorrangig umgesetzt werden müssen (Abbildung 35). Im Ergebnis stellt die Planungshinweiskarte eine aus stadtklimatischer Sicht wichtige fachliche Grundlage für die räumliche Planung dar.



Wirkraum

Siedlungs- und Verkehrsflächen

Handlungskategorie

- 1 – dringlich verbessern
- 2 – verbessern
- 3 – vorbeugend verbessern
- 4 – erhalten

Kombination mit gleicher Gewichtung der vier Bewertungskarten. Daraus abgeleitet werden vier Handlungskategorien für die jeweiligen Siedlungs- und Verkehrsflächen.

Luftaustausch

→ Kaltluftleitbahn

⋯ Leitbahnkorridor

↑ Flächenhafter Kaltluftabfluss

Grün- und Freiflächen innerhalb einer Kaltluftleitbahn
Hangabwind

Ausgleichsraum

Grün- und Freiflächen

Bioklimatische Bedeutung

- 1 – sehr hoch
- 2 – hoch
- 3 – mässig
- 4 – gering

Bewertung der Bedeutung für die Hitzeminderung basierend auf der Lage der jeweiligen Grün- oder Freifläche in Bezug auf die Bedeutung im Kaltlufthaushalt und der Lage zu klimatisch belasteten Siedlungsstrukturen.

Gefährdete Bevölkerungsgruppen nach Alter

+ Alter 80+

+ Alter 3-

Siedlungsgebiete mit hohen Bevölkerungsanteilen (> 10 % und mind. 20 Personen) vulnerabler Altersklassen: >= 80 oder <= 3

Sensible Orte

- Alters- / Pflegeheim
- Spital
- Kindergarten
- Primarschule

Zusammenstellung von Orten mit einem hohen Anteil vulnerabler Bevölkerungsgruppen. Datenquellen: Alters- und Pflegeheimliste Kanton Zürich (Gesundheitsdirektion ZH), Kennzahlen der Schweizer Spitäler (BAG CH) und Schulstandorte im Schuljahr 2024/25 (Bildungsdirektion ZH)

Abbildung 35: Planungshinweiskarte Stadtklima in einem Ausschnitt der Stadt Zürich



8.4.1 STADTKLIMATISCHE HANDLUNGSPRIORITÄT IM WIRKRAUM

Im Wirkraum (Siedlungsflächen) wird die *stadtklimatische Handlungskategorie* dargestellt. Für die Einteilung der Handlungskategorien wurde in einem ersten Schritt die für die Nacht- und Tagsituation vorgenommene bioklimatische Bewertung kombiniert. Dabei werden Tag- und Nachtsituation gleich gewichtet. Somit wurde die 5-stufige Bewertungsklassifikation aus den Bewertungskarten aufrechterhalten (Tabelle 4). Dieser Arbeitsschritt erfolgt gleichermassen für den Status quo und für das Zukunftsszenario.

Tabelle 4: Methodische Herleitung Gesamtbelastung des Siedlungsraums aus Tag- und Nachtbelastung

Wirkraum		Bioklimatische Situation Nacht				
Wärmebelastung am Tag		1 - sehr günstige	2 - günstige	3 - mittlere	4 - ungünstige	5 - sehr ungünstige
	1 - sehr günstige	1	2	2	3	3
	2 - günstige	2	2	3	3	4
	3 - mittlere	2	3	3	4	4
	4 - ungünstige	3	3	4	5	5
	5 - sehr ungünstige	3	4	4	5	5

Im zweiten Schritt wird die Gesamtbewertung aus Status quo und Zukunftsszenario gegeneinander abgefragt (Tabelle 5). Die Handlungskategorie 1 erhalten vor allem die Flächen, die bereits heute eine ungünstige bzw. sehr ungünstige Situation aufweisen. Je geringer die gegenwärtige und die zukünftige Gesamtbelastung ausfallen, umso nachrangiger wird die Handlungskategorie.

Tabelle 5: Methodische Herleitung der PHK-Handlungskategorie aus der Belastung im Status quo und dem Zukunftsszenario

Bewertung IST	Bewertung ZUKUNFT	Bewertung PHK - Handlungskategorie
sehr ungünstig (5)	sehr ungünstig (5)	1
ungünstig (4)	sehr ungünstig (5)	1
ungünstig (4)	ungünstig (4)	1
mittel (3)	sehr ungünstig (5)	2
mittel (3)	ungünstig (4)	2
mittel (3)	mittel (3)	2
günstig (2)	sehr ungünstig (5)	3
günstig (2)	ungünstig (4)	3
sehr günstig (1)	ungünstig (4)	3
günstig (2)	mittel (3)	4
sehr günstig (1)	mittel (3)	4
günstig (2)	günstig (2)	4
sehr günstig (1)	<=3	4

Die Handlungskategorien sollen eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Massnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig sind, ohne dass dadurch eine Reihenfolge der Massnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen vorgeschrieben wird. Dafür wurden die Handlungskategorien in Tabelle 6 mit stadtklimatischen Planungshinweisen versehen.

Tabelle 6: Allgemeine stadtklimatische Planungshinweise zu den Handlungskategorien im Wirkraum

Bewertung im Wirkraum	Stadtklimatische Planungshinweise
Handlungskategorie 1 Dringlich verbessern	Es besteht hoher Bedarf an stadtklimatisch optimierenden Massnahmen. Diese sind bei allen baulichen Entwicklungen und Sanierungen zur Verbesserung der klimatischen Situation umzusetzen. Im Bestand ist die Möglichkeit entsprechender Massnahmen zu prüfen.
Handlungskategorie 2 Verbessern	Es besteht Bedarf an stadtklimatisch optimierenden Massnahmen. Bei Nachverdichtungen, baulichen Entwicklungen und im Zuge von Strassensanierungen sind über den klimaökologischen Standard hinausgehende optimierende Massnahmen umzusetzen (bspw. Entsiegelung, Fassadenbegrünung, Flächen mit hoher Aufenthaltsqualität schaffen).
Handlungskategorie 3 Vorbeugend verbessern	Bei Nachverdichtungen, baulichen Entwicklungen und im Zuge von Sanierungen sind klimaökologische Standards einzuhalten (Bäume, Dachbegrünung, geringe Versiegelung).
Handlungskategorie 4 Erhalten	Klimaökologische Standards sind bei allen baulichen Entwicklungen einzuhalten (Bäume, Dachbegrünung, geringe Versiegelung, etc.).

Mit „*klimaökologischen Standards*“ sind u.a. eine geringe Versiegelung, das Einplanen von Bäumen mit ausreichend Wurzelraum und eine Dachbegrünung gemeint. Zu den darüberhinausgehenden „*optimierenden Massnahmen*“ zählen je nach Vorhaben bspw. die Schaffung öffentlicher kühler Orte, das Freihalten von Durchlüftungsachsen, eine Fassadenbegrünung oder die stadtklimatische Aufwertung öffentlicher Räume durch Sonnensegel und Fontänen bzw. Brunnen. Zudem hebt die Karte Kaltlufteinwirkbereiche im Siedlungsraum hervor, also Bereiche mit einer hohen Kaltluftströmung bzw. -entstehung, die potentiell auch auf angrenzende Räume günstig wirken, sodass bei Vorhaben in diesen Bereichen die Kaltluft-Funktion der Flächen zu beachten ist (Grünflächen erhalten, Gebäudestellung beachten, etc.).

Eine Bilanzierung zeigt, dass Siedlungsflächen mit der Handlungskategorie 1 einen Anteil von 8,8 % ausmachen (Abb. 36). Den Hauptanteil von 56,6 % machen Flächen mit der Handlungskategorie 3 aus, während der Handlungspriorität 2 noch 25,5 % der Flächen zuzuordnen sind. Etwa 12 % des Siedlungsraums machen Flächen der Handlungskategorie 4 aus.

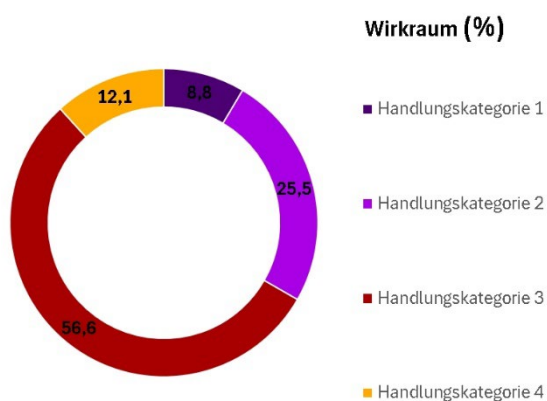


Abbildung 36: Prozentuale Verteilung der Handlungsprioritäten im Kanton Zürich



Diese Areale zeigen sich deutlich resilienter gegenüber der zukünftigen Erwärmung. Hier handelt es sich um Flächen, die auch bei einem starken Klimawandel eher nicht zu einem Belastungsraum mit erhöhter Wärmebelastung werden.

8.4.2 STADTKLIMATISCHE BEDEUTUNG IM AUSGLEICHSRaum

Die Planungshinweiskarte gibt die stadtklimatische Bedeutung von Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wäldern anhand ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Zur Ableitung der Bedeutung wurden zunächst die Bewertungen aus den Bewertungskarten Tag und Nacht kombiniert. Die Bewertung soll eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Massnahmen besonders wichtig und bevorzugt umgesetzt werden sollen.

Flächen im Ausgleichsraum, die im Status quo die höchste stadtklimatische Bedeutung aufweisen, werden der Kategorie sehr hoch zugewiesen. Zusätzlich erhalten auch Flächen, die unter Einfluss der Klimawandel-Szenarien die höchste stadtklimatische Bedeutung erlangen, die höchste Bedeutung (Tabelle 7). Die Abstufung der bioklimatischen Bedeutung ist auf den Siedlungsraum bezogen, sodass auf siedlungsfernen Flächen, die keine relevanten stadtklimatischen Funktionen aufweisen, keine besondere stadtklimatische Bedeutung gesehen wird (1,3 % der Flächen im Ausgleichsraum). Dieser Anteil ist verhältnismässig gering, was daran liegt, dass ein Grossteil der Siedlungsfläche zukünftig eine Belastung aufweisen wird und damit auch die Ausgleichsfunktion der Grünräume zunimmt. Zudem steigt auch die Wärmebelastung am Tage innerhalb der Grünflächen selbst an. Allgemeine stadtklimatische Hinweise zu den Bewertungsklassen sind in Tabelle 8 enthalten.

Tabelle 7: Methodische Herleitung des stadtklimatischen Schutzbedarf und der Anteil an den Flächen des Ausgleichsraums





Bioklimatische Bedeutung Ausgleichsraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Wirkraum
 sehr hoch	IST oder Zukunftsszenario = Höchste Bedeutung	80,0 %
 hoch	IST oder Zukunftsszenario = Sehr hohe Bedeutung	4,0 %
 mässig	IST oder Zukunftsszenario = Hohe Bedeutung	14,7 %
 gering	Übrige Flächen	1,3 %

Tabelle 8: Allgemeine stadtklimatische Planungshinweise zum Schutzbedarf im Ausgleichsraum

Bioklimatische Bedeutung im Ausgleichsraum	Stadtklimatische Planungshinweise
sehr hoch	Für die Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden bzw. sofern bereits planungsrechtlich zulässig unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der klimatischen Ausgleichsleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/ Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).
hoch	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren bis hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
mässig	Für die Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereit gestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen (z.B. Baukörperstellung).
gering	Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit bzw. befinden sich im Umfeld von Siedlungsflächen ohne nächtliche Überwärmung. Diese Areale weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber einer Nutzungsintensivierung auf, und lassen am ehesten ein Potenzial für eine bauliche Entwicklung erkennen.

Im Ergebnis dient die Planungshinweiskarte Stadtklima als zentrales Produkt der Klimaanalyse, um das Stadtklima beurteilen zu können. Auf Grundlage der Karte können klimatische belastete Bereiche sowie wertvolle Grünräume auf einen Blick identifiziert werden. Je nach Fragestellung und Fläche können daraus erste, allgemeine planerische Konsequenzen abgeleitet (Wo sind Massnahmen zur Anpassung nötig? Wo sind bei geplanten Vorhaben stadtklimatische Belange besonders zu berücksichtigen?) werden. Die weiteren Kartenwerke (Klimafunktionskarten und Bewertungskarten) sind ergänzend zur Planungshinweiskarte zu Rate zu ziehen – je nach Projektanlass enthalten sie wichtige Zusatzinformationen (Ist eine Fläche am Tag und/oder in der Nacht belastet? Sind Grünflächen für den Kaltlufthaushalt und/oder als Rückzugsorte an heissen Tagen von Bedeutung?).

8.5 MASSNAHMENKATALOG

Die Planungshinweiskarte zeigt Bereiche im Kanton Zürich auf, in denen Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation erforderlich bzw. empfehlenswert sind. Der nachstehende Massnahmenkatalog zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Ausgestaltung auf und soll dazu dienen, die Planungshinweise zu konkretisieren. Für den Kanton wurde ein Katalog aus 21 klimaökologisch wirksamen Einzelmassnahmen identifiziert.

Die Zuordnung bestimmter Massnahmensets aus dem Portfolio der 21 Einzelmassnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in der Planungshinweiskarte bzw. den Bewertungskarten ab (z.B. bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt, Aufenthaltsqualität). Die Massnahmen sind stickpunktartig und durch Bilder illustriert in **Tabelle 9** beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt:

- Thermisches Wohlbefinden im Aussenraum
- Verbesserung der Durchlüftung
- Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum

Die jeweilige Wirkung hängt stark von der konkreten Ausgestaltung der Massnahmen, ihrer Lage im Stadtgebiet sowie der betrachteten vertikalen und horizontalen Entfernung von der Massnahme ab. Grundsätzlich sind alle Massnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Stadtbevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Stadtklimas beizutragen – werden die Massnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Massnahmen.

Der hohe Grünanteil sollte erhalten und insbesondere in thermisch belasteten Bereichen möglichst erhöht werden (→ M01: Innen-/Hinterhof-Begrünung, → M02: Öffentliche Grünräume schaffen, → M04: Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren). Wasserversorgte strukturreiche Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität (→ M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können, ab einer gewissen Grösse, als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen). Insbesondere die grossflächigen Waldgebiete im Kanton stellen für die Stadt wichtige und schützenswerte Naherholungsräume dar (→ M08 Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen). Darüber hinaus sind aber auch kleinere Parkanlagen schützenswert und neu zu entwickeln, da diese neben ihrer humanbioklimatischen Gunstwirkung am Tage auch als „Trittsteine“ für Kaltluft dienen, die ein weiteres Eindringen dieser Ausgleichströmungen bis weit in den Siedlungsraum hinein begünstigen (→ M15: Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen).

Neben ihrem Potential zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.), übernehmen Bäume (und Sträucher) im Strassenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender Massnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der (vertikale) Luftaustausch erhalten



bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Strassenquerschnitten und hohem motorisierten Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei mehrspurigen Strassen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an (→ M05: Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben). Im Bereich von Leitbahnen sollten Verschattungselemente zudem keine Barriere für Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und daher möglichst nicht quer zur Fliessrichtung angelegt werden (→ M12: Optimierung des grossskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung). Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen. Bei Standorten unmittelbar an Gebäuden sind grosskronige Laubbäume Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden (vgl. Stadt Jena 2016).

Massnahmen zur Verschattung verringern die durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte thermische Belastung am Tage. Beschattete Strassen, Fuss- und Radwege oder (Park-)Plätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten versiegelten Freiflächen (→ M06: Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien). Bei grossflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche Wärmeinseleffekt und damit die thermische Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden (→ M18: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Massnahmen).

Gewässer wirken sich überwiegend positiv auf die thermische Situation aus. Die am Tage stattfindende Verdunstung bezieht Energie aus der umgebenden Luft und kühlt diese ab (Verdunstungskühlung). Je grösser die Wasseroberfläche und je höher ihre Temperaturdifferenz zur umgebenen Luft, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Dabei erzielt bewegtes Gewässer einen stärkeren Kühleffekt als stehendes, da durch Bewegung die verdunstungsfähige Oberfläche vergrössert, und der Austausch mit den tieferen, kühleren Wasserschichten verstärkt wird. Durch ihre geringe Rauigkeit wirken Gewässer überdies teils als hindernisarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen¹⁰ Wetterlagen der Transport von Kalt- und Frischluft stattfindet. Obwohl während längerer Hitzeperioden in der Nacht Gewässer durch deren Trägheit phasenweise wärmer sein können als umgebener Siedlungsraum, überwiegen insgesamt die genannten Vorteile. Daher ist der Schutz bestehender Gewässer, deren Erweiterung (z.B. über die Offenlegung eingehauseter Kanäle und Flussläufe) und die Neuerschliessung von Gewässern stets zu berücksichtigen (→ M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen). Diese Massnahme hat enge Synergien zur Regenwasserspeicherung und zur Etablierung von Bewässerungssystemen (→ M10), wo etwa durch das Anlegen von Regenwasserteichen, aber auch die Etablierung von Versickerungsmulden auf Grünflächen ebenfalls verdunstungsfähige Strukturen entstehen können, die zum humanbioklimatischen Komfort am Tage beitragen und durch ausgeklügelte Bewässerungssysteme den Schutz vorhandener Grünräume sicherstellen.

Klimaangepasstes Bauen enthält viele der bisher genannten Massnahmen und ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind Massnahmen zur Verbesserung

¹⁰ "Fremdbürtige", durch großräumige Luftströmungen bestimmte Witterung (=Gegenteil von autochthon)



bzw. Berücksichtigung stadtklimatischer Belange möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlafzimmern (oder auch Arbeitszimmer/Büroräume) der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird (→ M21: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Alten- und Pflegeheime. Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → M13: Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Auch die Albedo kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflexion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen grösser, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ M03: Oberflächen im Aussenraum klimaoptimiert gestalten). Bautechnische Massnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, energetische Sanierung oder technische Gebäudekühlung sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ M16, M17, M19, M20).

Bei Nachverdichtungen sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden (insbesondere die Gewährleistung einer guten Durchlüftung). In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei die aus stadtklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist die sogenannte doppelte Innenentwicklung in den Blickpunkt geraten (BfN 2016). Dabei geht es darum, Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf urbanes Grün zu entwickeln. Damit bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz.

Neben der aus Wohnungsknappheit ggf. notwendigen Nachverdichtung sollte der Aspekt einer möglichen Entdichtung im Stadtgebiet jedoch weiterhin im Blickpunkt verbleiben (→ M14). Die Verringerung von Bebauungsdichte und Bauvolumen ist insbesondere in heutigen Industrie- und Gewerbebrachen oder Bahnanlagen vorzunehmen und muss klimaangepassten Nachverdichtungsvorhaben nicht zwangsläufig entgegenstehen. Zusätzlich kann die Verlegung von Parkraum (z.B. in Quartierstiefgaragen bzw. -parkhäuser) dazu genutzt werden, von Garagen bestandene Innenhofbereiche oder den Strassenraum weiter zu entsiegeln und grün auszugestalten.

Auf Brachflächen oder hochversiegelten Stadtplätzen, die perspektivisch entwickelt oder klimaangepasst ausgestaltet werden sollen, die sich jedoch aktuell noch in der Planung befinden, bieten sich temporäre Massnahmen der klimaangepassten Ausgestaltung während der Sommermonate an. Schattenspendende Kübelbäume und Rollrasen gepaart mit Sitzgelegenheiten tragen zur Belebung des öffentlichen Raums durch grösseren Aufenthaltskomfort bei und bringen den Themenkomplex „Stadtklima“ ins Gespräch. Der Dialog mit Anwohnern kann dabei helfen, die Handlungsbedarfe im Wirkraum und Schutzprioritäten im Ausgleichsraum aus der PHK weiter zu priorisieren.



Tabelle 9: Empfehlungen allgemeiner stadtklimatisch wirksamer Massnahmen für den Kanton Zürich.

MASSNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM			
01	Innen-/Hinterhofbegrünung	Kurzerläuterung	<ul style="list-style-type: none">▪ Erhöhung des Vegetationsanteils und der Durchlässigkeit
		Wirkung	<div><ul style="list-style-type: none">▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts▪ Erhöhung der Aufenthaltsqualität▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität</div> <div><ul style="list-style-type: none">▪ Innen- und Hinterhöfe</div>



Bild: Grüner Innenhof in München (Quelle: © Jan Weber-Ebnet)



02 Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten
Wirkung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts ▪ Vernetzung von Grünflächen und damit Synergien zum Mobilitäts-/Radwegenetz ▪ Niederschlagsrückhalt und damit Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität 	Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Baulücken, grössere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten)



Bild: Sheridan Park (Quelle: © Pascal Cormont)

THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

03 Oberflächen im Aussenraum klimaoptimiert gestalten	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Helle Farben (insbesondere von Dächern) zur Erhöhung der Reflexstrahlung/ Verminderung der Absorption und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern
Wirkung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts 	Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dächer, Fassaden (Neubau und Bestand) ▪ ggf. Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze



Bild: Helle Fassade (Quelle: © Jens-Robert Schulz, pixelio)




04	Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rasenflächen oder Teilversiegelung (Rasengittersteine, etc.) ▪ niedrige Anzahl oberirdischer Stellplätze zugunsten von Grünflächen oder begrünte Gebäudeflächen 	
Wirkung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und insb. nachts ▪ Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassersmanagement 		Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe 	

Bild: Theodor-Heuss-Platz (Quelle: © Ruth Plössel/Stadt Augsburg)



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

05	Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none">▪ Blaue und/oder grüne Massnahmen für den Verkehrsraum▪ Erhöhung des Vegetationsanteils im Verkehrsraum (Bäume, Alleen, Begleitgrün, Rasengitter, etc.)▪ Schaffung von offenen Wasserflächen (z.B. Brunnenanlagen auf Plätzen)▪ Im Innenstadtbereich: Teilverschattete Fussgängerzonen etablieren und Parkplatzangebot zugunsten von (baumbestandenen) Grünflächen minimieren▪ s. auch Forschungsprojekt „BlueGreenStreets: Multifunktionale Strassenraumgestaltung urbaner Quartiere“	 <p>Bild: Verlängerung Linie 3, Augsburg (Quelle: © Ruth Plössel/Stadt Augsburg)</p>
Wirkung <ul style="list-style-type: none">▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber bei Pflanzung neuer Bäume durch Verschattung, bei Entsiegelung durch Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung▪ Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement (Entlastung des Kanalnetzes bei Starkregen, Grundwasserneubildung, Verdunstungskühlleistung) und zur Biodiversität		Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none">▪ Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze	
06	Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none">▪ Bäume oder bautechnische Massnahmen (Markisen, Überdachung, Sonnensegel, auch Gebäude selbst können durch kluge Positionierung verschatten)▪ Möblierungsangebote im Schatten schaffen	 <p>Bild: Königsplatz in Augsburg (Quelle: © Ruth Plössel/Stadt Augsburg)</p>
Wirkung <ul style="list-style-type: none">▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei Einsatz von Vegetation) insb. tagsüber und nachts		Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none">▪ Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude im Wohn- und Arbeitsumfeld	



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM



07	Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen) 	
Wirkung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zur Biodiversität 		Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen ▪ Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze 	
08	Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe unten) 	
Wirkung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedeutung für den städtischen Kaltlufthaushalt, da durch Kaltluftproduktion und -transport die Abkühlung benachbarter Siedlungsbereiche unterstützt wird ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und damit Synergien zu Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement 		Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten) 	

Bild: Kräutergarten im Park am Roten Tor in Augsburg
(Quelle: © Gregor Meusel, GEO-NET)



Bild: Schlosspark Charlottenburg in Berlin (Quelle: © Mirian Lübbecke)

THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM


09	Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Stadtklimafunktion grösserer Fliess- und Stillgewässer und sonstiger Wasserflächen ▪ Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird 	
Wirkung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks) -> Hohe Aufenthaltsqualität ▪ Oberflächennahe Temperatur kann nachts oberhalb der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken 	Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gewässer ▪ Grün- und Freiflächen 	
10	Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schaffung wasserdurchlässiger Beläge durch (Teil-) Entsiegelung in Kombination mit der Etablierung von Regenwasserteichen, Versickerungsmulden und Rigolensystemen 	
Wirkung		Räumliche Umsetzung	

Bild: Schwallleeh Am Schwall in Augsburg (Quelle: © Gregor Meusel, GEO-NET)



- Reduktion der Wärmebelastung tagsüber durch Verdunstung
- Niederschlagsrückhalt und damit Synergien zur gezielten Wasserspeicherung und Bewässerung von Stadtgrün

- Grün- und Freiflächen
- Strassen, Wege, Plätze



Bild: Regenwasserteich am Potsdamer Platz in Berlin
(Quelle: © Miriam Lübbecke)

THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

11

(Temporäre) Saisonale klimaanangepasste Umgestaltung öffentlicher Räume

Kurzerläuterung

- Umwandlung hochgradig versiegelter Innenstadtplätze im Sommer durch Etablierung von Rollrasen, Strauchgewächsen und Kübelbäumen zu städtischen Klimaoasen
- Gesellschaftlicher Dialog zum Stadtklima-Thema; Sichtbar- und Erlebbarmachung nachhaltiger Ideen und Projekte (s. auch Projekt „Pop-Up-Innenstadt“ in Ludwigsburg)

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung
- Gesellschaftliche Etablierung des Themas Klima und Dialogmöglichkeit mit den Anwohnern

Räumliche Umsetzung

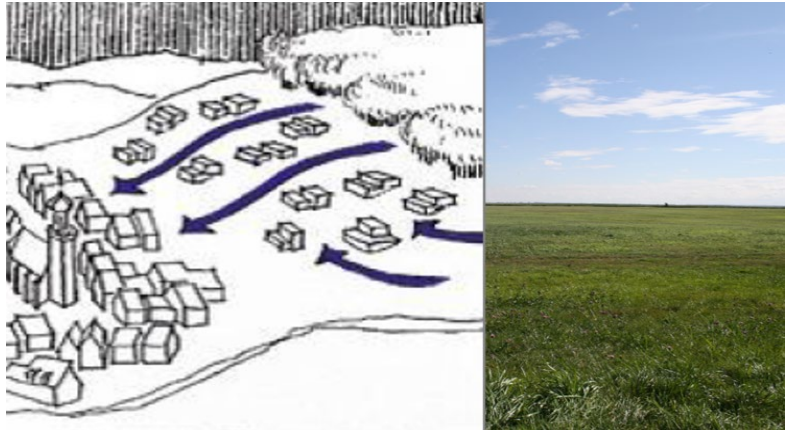
- Plätze, Brachflächen (auch als Übergangslösung bis langfristige Flächenentwicklung bzw. -entsiegelung erfolgt)



Bild: Stiftsplatz in Bonn (Quelle: © Bundesstadt Bonn)



MASSNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

12 Optimierung des grossskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung) Quer zur Fliessrichtung verlaufende bauliche (Dämme, Gebäude) oder natürliche Hindernisse (Baumgruppen, jedoch Beibehaltung bestehender Gehölze!) im Einflussbereich von Kaltluftflüssen vermeiden bzw. Gebäudeausrichtung und Bebauungsdichte auf klimaökologische Belange anpassen 	 <p>Bild: Symbolcollage Baukörpererstellung- und Durchlüftung (Quelle: © GEO-NET)</p>
Wirkung <ul style="list-style-type: none"> Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung Reduktion des Wärmestaus 	Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> Neubau, Gebäudekomplexe Grün- und Freiflächen Strassen, Wege, Plätze, Parkplätze 	

VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

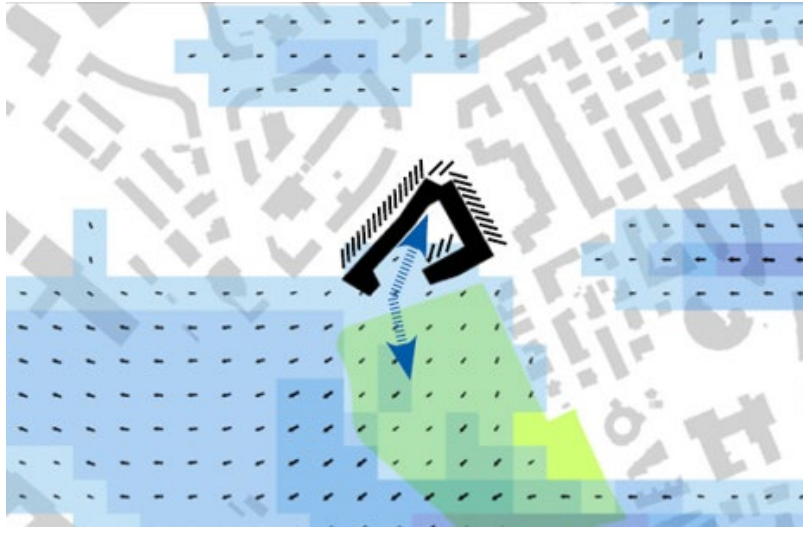
13 Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> Gebäudeanordnung parallel oder geöffnet zu anliegenden Grün- und Parkanlagen, die insb. in Augsburg oftmals Parkwinde induzieren Durchfahrten oder -gänge und allgemein wenig überbaute Fläche halten das kleinskalige Strömungsgeschehen auch für nahe Bestandsquartiere aufrecht 	
Wirkung <ul style="list-style-type: none"> Schutz kleinerer, innerstädtischer Luftaustauschsysteme Synergie zum Thermischen Wohlbefinden: Verschattung anliegender Strassen und Plätze durch durchdachte Baukörperstellung 	Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> Neubau im Umfeld bestehender Grünflächen oder Parks 	



Bild: Mit dem Schindlerpark vernetzter Innenhof. (Quelle: Fachplanung Hitzeminderung. Stadt Zürich (Hrsg.). Zürich, 2020.)

14 Entdichtung (Rückbau)	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen
Wirkung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts ▪ Verbesserung der Durchlüftung ▪ Synergien zum Niederschlagswassermanagement 	Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude(-teile), z.B. in Blockinnenhöfen ▪ Garagen ▪ Lagerhallen ▪ ggf. Industrie- und Gewerbebrachen ▪ Bahnanlagen



Bild: Symbolbild Rückbau (Quelle: ©Josephine Förster, GEO-NET)

VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

15 Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Freihaltung grossräumiger, möglichst wasserversorgter und durch flache Vegetation geprägter Grünflächen wie Wiesen, extensives Grünland, Felder, Kleingärten und Parklandschaften, die Einfluss auf den lokalen Kaltlufthaushalt haben ▪ Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft
Wirkung	Räumliche Umsetzung



<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz vor stärkerer Überwärmung ▪ Erhalt und Ausbau von Kaltluftentstehungsgebieten und Durchlüftung ▪ Synergien zur Biodiversität und damit zur Aufenthaltsqualität am Tage 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen 	 <p>Bild: Rudolph-Wilde-Park in Berlin (Quelle: © Dominika Lessmann, GEO-NET)</p>
---	---	--

MASSNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

16	Dachbegrünung	Kurzerläuterung	
		<ul style="list-style-type: none">▪ Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugrüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen)	
Wirkung		Räumliche Umsetzung	
<ul style="list-style-type: none">▪ Verbesserung des Innenraumklimas und damit Synergien zum Klimaschutz▪ Bei grossflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Aussenraumklimas möglich▪ Erhalt oder Schaffung von Naturraum und damit Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität		<ul style="list-style-type: none">▪ Flachdächer,▪ ggf. flach geneigte Dächer▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)	<p>Bild: Dachgarten Diakonissenkrankenhaus Augsburg (Quelle: © Evangelische Diakonissenanstalt)</p>

REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM



17	Fassadenbegrünung	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen)
Wirkung		Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Aussenraumklimas -> Steigerung der Aufenthaltsqualität ▪ Durch Naturraum an der Fassade entstehen Synergien zur Biodiversität sowie zu Lärm- und Gebäudeschutz 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)

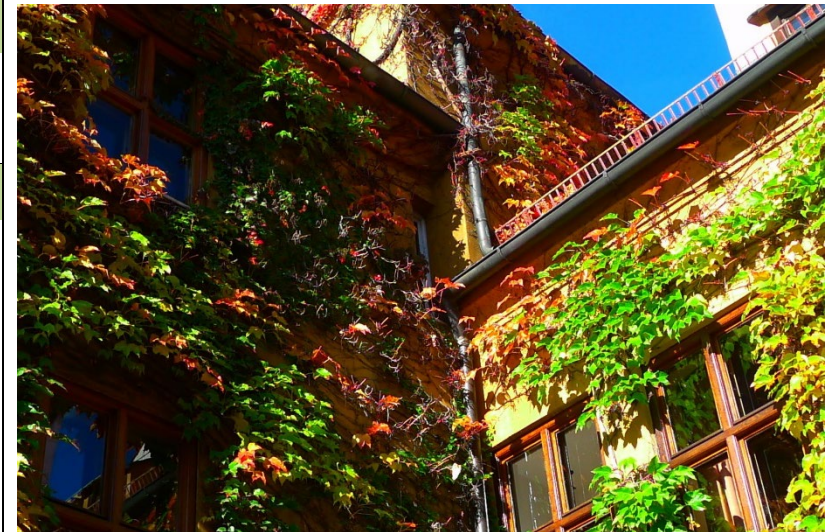


Bild: Fassadenbegrünung Fuggerei Augsburg (Quelle: © Sebastian Köhler, STPLA)


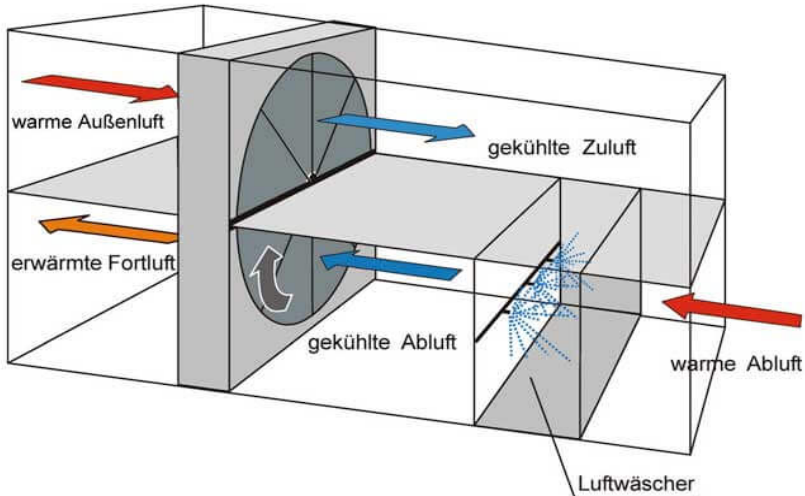
18	Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Massnahmen	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, benachbarte Gebäude, bautechnische Massnahmen wie aussen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie
Wirkung		Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei vorhandener Vegetation) tagsüber und nachts -> Erhöhung der Aufenthaltsqualität ▪ Verbesserung des Innenraumklimas ▪ Synergien zum Klimaschutz 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Neubau und Bestand)



Bild: Paul-Gossen-Str. in Erlangen (Quelle: © Janko Löbig, GEO-NET)


REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM



19	Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none">Dämmung von Gebäuden, helle Farbgebung (Erhöhung des Albedowertes), geeignete Raumlüftung, Nutzung von Prozessabwärme	
Wirkung		Räumliche Umsetzung	
<ul style="list-style-type: none">in erster Linie Klimaschutzmassnahme durch Reduktion des EnergiebedarfsVerbesserung des Innenraumklimas tagsüber		<ul style="list-style-type: none">Gebäude (Bestand)	Bild: Symbolbild Energetische Sanierung (Quelle: © ginasanders/123RF.com)
20	Technische Gebäudekühlung	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none">Möglichst ressourcenschonende LösungAdiabate Abluftkühlung, in der Regenwasser genutzt wirdErdkältenutzungAdsorptionskältemaschinen, die durch solare Energie oder Abwärme angetrieben werden	
Wirkung		Räumliche Umsetzung	
<ul style="list-style-type: none">Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung		<ul style="list-style-type: none">Gebäude, in denen passive Massnahmen nicht ausreichend angewendet werden können	Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung (Quelle: Deutsches Architektenblatt: https://www.dabonline.de/2012/06/01/coole-sache/)



REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

21	Anpassung des Raumnutzungskonzeptes	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Nutzung von Innenräumen, d.h. sensible Räume nicht nach Süden ausrichten (z.B. Schlaf-, Arbeits- oder von Risikogruppen genutzte Zimmer, z.B. im Seniorenzentrum) 	 <p>Bild: Aufnahme eines nach West ausgerichteten Büroraums. (Quelle: © Gregor Meusel, GEO-NET)</p>
Wirkung <ul style="list-style-type: none"> Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen) 		Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (z.B. bei Erziehungseinrichtungen, Betreutem Wohnen oder in der Altenpflege) vorwiegend im Neubau umsetzbar 	





Quellenverzeichnis

39. BImSchV (2010): Neununddreissigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutz-gesetzes, Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065)
- An der Heiden, M.; Muthers, S.; Niemann, H.; Buchholz, U.; Grabenhenrich, L.; Matzarakis, A. (2019): Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. In: Bundesgesundheitsblatt 62, Heft 5, S. 571-579.
- Augter, G. (1997): Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte. Deutscher Wetterdienst.
- BBSR (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung. Strategien und Massnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte.
- Beckmann S., Hiete M., Beck C. (2021): Threshold temperatures for subjective heat stress in urban apartments — Analysing nocturnal bedroom temperatures during a heat wave in Germany. Climate Risk Management, Volume 32. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100286>
- Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg (2012): Stadtklimaanalyse und Klimawandelszenario zum Landschaftsprogramm Hamburg.
- BFN (2016) – BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (HRSG.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung: BFN-Skripte Nr. 444.
- BMVI (2016): Handlungshilfe Klimawandelgerechter Regionalplan. Ergebnisse des Forschungsprojektes KlimREG für die Praxis: Schriftenreihe: MORO-Praxis. BMVI.
- Bundesregierung (2004): Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV).
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Business Wissen (2023): Grundlagen und Vorgehensweise bei der Szenario-Technik. Online: <https://www.businesswissen.de/hb/grundlagen-und-vorgehensweise-bei-der-szenario-technik>
- Bayerische Staatsregierung (2009): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS).
- Cannon A.J.; Sobie S.R.; Murdock T.Q. (2015): Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? J. Climate, 28, 6938–6959.
- CH2018 (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich.
- Chen, Yen-Chang; Tan, Chih-Hung; Wei, Chiang; Su, Zi-Wen (2014): Cooling effect of rivers on metropolitan Taipei using remote sensing. In: International journal of environmental research and public health 11 (2), S. 1195–1210. DOI: 10.3390/ijerph110201195.
- CLC (2017): Corine Landcover 2018. Technical Guidelines. https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/clc2018technicalguidelines_final.pdf
- Cubasch et al. (2013): Introduction. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (siehe IPCC, 2013)



- Deutschländer, T. & Mächel, H. (2017). Temperatur inklusive Hitzewellen. Klimawandel in Deutschland. 10.1007/978-3-662-50397-3_6.
- DGNB (2020): DGNB System – Kriterienkatalog Quartiere VERSION2020. Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges bauen.
- Donat M.G. et al. (2010) European storminess and associated circulation weather types: future changes deduced from a multi-model ensemble of GCM simulations. Climate Research 42:27–43
- DWD (2014): MUKLIMO_3 Modell.
- DWD (2018): Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur.
- DWD (2020): Nationaler Klimareport, Klima – gestern, heute und in der Zukunft.
- DWD (2020a): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten. ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/
- DWD (2020b): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten. ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/
- DWD (2020c): Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Temperaturverhältnisse und des Tagesgangs des Regionalwindes („Alpines Pumpen“) in München.
- DWD (2020d): Bundesweites Stadtklimamessnetz wird ausgebaut. Pressemitteilung des Deutschen Wetterdienstes vom 12.11.2020.
- DWD (2023a): Wetter- und Klimalexikon. https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html.
- DWD (2023b): Stadtklima - die städtische Wärmeinsel. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadt/pl/projekt_waermeinseln/startseite_projekt_waermeinseln.html.
- EU 2008: Richtlinie 2008/50/EG ...
- Fanger, P.O. (1972): Thermal Comfort, Analysis and Application in Environment Engineering. New York: McGraw Hill.
- Fink A.H. et al. (2012) Diagnosing the influence of diabatic processes on the explosive deepening of extratropical cyclones. Geophysical Research Letters 39:L07803
- Fischer et al. (2012): Climate Change Projections for Switzerland based on a Bayesian Multi-Model Approach. International Journal of Climatology. 32. 7797-. 10.1002/joc.3396.
- Freie Hansestadt Bremen (2013): Klimaanalyse für das Stadtgebiet der Hansestadt Bremen. https://www.lapro-bremen.de/assets/Lapro-Plan/FB_Stadtklima_2013/2_12_013_Bremen_Klimaanalyse_rev02_Aug2013.pdf
- Fürst, D. und Scholles, F. (Hg.) (2008): Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung. Dortmund: Dorothea Rohn, 3.Auflage.
- Gaede, M. und Härtling, J. (2010): Umweltbewertung und Umweltprüfung. Braunschweig: Westermann.
- Gross, G. (1987): Some effects of deforestation on nocturnal drainage flows and local climate – a numerical study. Boundary-Layer Meteorol. 38, 315-337.
- Gross, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. Fluid Dynamics Research (10): 483-498.



- Gross, G.; Frey, T.; Trute, P. (2002): Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhältnisse in komplexem Gelände, DEWI Magazin Nr. 20.
- Gross, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model, Meteorologische Zeitschrift, Vol. 11, No. 5, 701-710 (October 2002). DOI: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0601.
- Gross, G. (2012a): Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments, Meteorologische Zeitschrift, Vol. 21, No. 4, 399-412.
- Gross, G. (2012b): Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing, Meteorologische Zeitschrift, Vol. 21, No. 2, 173-181.
- Gross, G. (2013): On the parametrization of urban land use in mesoscale models, Boundary-Layer Meteorol (2014) 150:319-326.
- Gross, G. (2016): Dispersion of traffic exhausts emitted from a stationary line source versus individual moving cars – a numerical comparison, Meteorologische Zeitschrift.
- Gross, G. (2017): Some effects of water bodies on the n environment – numerical experiments, Journal of Heat Island Institute International Vol. 12-2.
- Gross, G. (2021): A numerical study on the effects of natural ventilation on summer nighttime indoor temperatures in an urban area, Meteorologische Zeitschrift.
- Höppe, P.; H. Mayer: Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. Landschaft und Stadt 19 (1987) 1, S. 22–29.
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- ISO (1989). ISO 7243. Hot environments - Estimation of the heat stress on working man based in the WBGT-index (wet bulb globe temperature). Geneva, Switzerland, International Organisation for Standards.
- IVU (2022): IMMISem/luft Version 9.001 IVU Umwelt GmbH, Freiburg
- Jacob et al. (2016): Regionale Klimamodellierung. In: Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven S. 27-35. Cham: Springer-Verlag.
- Jendritzky, G.; Menz, G.; Schirmer, H.; Schmidt-Kessen, W. (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). In: Beiträge der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Bd. 114.
- Jendritzky (2007): The Universal Thermal Climate Index UTCI. http://www.utci.org/cost/publications/ICEE_2007-12-Abstract_UTCI_Jendritzky.pdf
- Knutti et al. (2010): Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. Journal of Climate - J CLIMATE. 23. 2739-2758. 10.1175/2009JCLI3361.1.
- Krauser et al. (2018): Tropennächte - Forscher belegen: Darum schwitzen die Basler in Sommernächten stärker Krauser, Helena and Feigenwinter, Christian and Wicki, Andreas. (24 August 2018) Tropennächte - Forscher belegen: Darum schwitzen die Basler in Sommernächten stärker. bz basel. p. 1. Liestal.
- Kuttler, W. (2013): Klimatologie. Paderborn: UTB, 2. Auflage.



- LANUV (2018): Klimaanalyse Nordrhein-Westfalen. Schriftenreihe: LANUV-Fachbericht 86.
- Laurent et al (2018): Reduced cognitive function during a heat wave among residents of non-air-conditioned buildings: An observational study of young adults in the summer of 2016. In: PLOS Medicine.
- LfU (2002): Methodikband zur Erstellung von Landschaftsentwicklungskonzepten (lek) in Bayern. Bayerisches Landesamt für Umwelt. interne Arbeitsanleitung.
- LfU (2009): Lufthygienischer Jahresbericht 2009. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- LfU (2020): das Bayerische Klimaprojektionsensemble. Audit und Ensemblebildung. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Schriftenreihe: UmweltSpezial.
- LfU (2020a): Emissionskataster genehmigungsbedürftige Anlagen. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- LfU (2020b): Mündliche Absprache, GEO-NET/Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- LfU (2021): Klimareport Bayern 2021. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Schriftenreihe: UmweltSpezial.
- Linke C. et al. (2016): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamolldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamolldaten“, Potsdam.
- Maronga et al. (2020): Review of the PALM model system 6.0, Geosci. Model Dev., 13, 1335-1372.
- Mayer, H.; Beckröge, W. ;Matzarakis, A. (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report 5/94, S. 265-268.
- McDonald R. E. (2011) Understanding the impact of climate change on Northern hemisphere extra-tropical cyclones. Climate Dynamics 37:1399–1425
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2012): Handbuch Stadtklima. Massnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel.
- Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg (2011): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- Moore, G. E. (1903): Principia Ethica. Ditzingen: REKLAM.
- Mosimann et al. (1998): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Bearbeitung der klima- und immissionsökologischen Inhalte im Landschaftsrahmenplan und Landschaftsplan. Schriftenreihe: Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie.
- Moss et al. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature 463, 747–756.
- Mpelasoka F.S.; Chiew F.H. (2009): Influence of Rainfall Scenario Construction Methods on Runoff Projections. J. Hydrometeor., 10, 1168–1183.
- MVI (2012) - Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg: Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- Oke et al. (2017): Urban Climates. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pinto et al. (2009) Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO. Clim Dyn 32, 711–737. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0396-4>



- Pinto, J. & Reyers, M. (2017). Winde und Zyklonen. 10.1007/978-3-662-50397-3_8.
- Ragettli M. S., Luyten A., Rösli M.: Monitoring hitzebedingte Todesfälle: Sommer 2023. Impact-Indikator «Hitzebedingte Todesfälle». Juni 2024. Im Auftrag des BAFU und BAG.
- Rauthe M., Malitz G., Gratzki A., Becker A. (2014): Starkregen. In: Becker P., Hüttl R. F. (Hrsg.): Forschungsfeld Naturgefahren. Potsdam und Offenbach, S. 112.
- R Core Team (2019): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- ROMBERG et al. (1996): NO-NO₂-Umwandlungsmodell für die Anwendung bei Immissionsprognosen für Kfz-Abgase. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 56 Nr. 6, S. 215-218, 1996.
- STADT JENA (2016): Bäume in Jena. Stadt- und Strassenbäume im Klimawandel. Schriften zur Stadtentwicklung Nr. 7.
- SANTHOLZ und SETT (2019): Erfahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress. Ergebnisse einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in Bonn. UNU Workingpaper.
- Schädeler, G.; Lohmeyer, A. (1994): Simulation of nocturnal drainage flows on personal computers. Meteorologische Zeitschrift. 3, 167-171.
- Schär, Ch., Ch. Frei, D. Lüthi, H.C. Davies (1996): Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. Geophys. Res. Lett. 23, 669-672.
- Schlünzen, K. H. et al. (2018): Stadtklima in Hamburg. In: von Storch H., Meinke I., Claussen M. (eds) Hamburger Klimabericht – Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- SenStadtUm (2015): Klimamodell Berlin – Ausgabe 2016. <https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ib411.htm>
- SenStadtUm (2015a): Stadtentwicklungsplan Klima konkret. Klimaanpassung in der Wachsenden Stadt.
- SenSW (2021): Stadtentwicklungsplan Klima 2.0 für die Bundeshauptstadt Berlin. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen Berlin. bisher unveröffentlicht.
- Sievers, U. (2005): Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Berichte des DWD 227, Offenbach.
- Stachowiak, H. (1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer.
- Stadt Karlsruhe (2014): Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung. <https://www.karlsruhe.de/b3/bauen/projekte/klimaanpassung.de>
- Stadt Zürich (2020): Fachplanung Hitzeminderung. <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html>
- STMUV (2015): Klimaschutzprogramm Bayern 2050. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz.
- The COMET program (2017): Wildfire Smoke Tracing Up-Valley/Down-Valley Winds. <https://satelliteliaison-blog.com/2017/10/13/wildfire-smoke-tracing-up-valleydown-valley-winds/>
- The International Civil Aviation Organization (ICAO) Standard Atmosphere (1957). Nature 179, 299–300. <https://doi.org/10.1038/179299a0>



- UBA (2005): GESÜNDER WOHNEN — ABER WIE? Praktische Tipps für den Alltag. Umweltbundesamt.
- UBA (2019): Handbuch für Emissionsfaktoren für Strassenverkehr (HBEFA). Umweltbundesamt.
- UBA (2019a): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten. UBA-Texte.
- UBA (2020): Gesundheitsrisiken durch Hitze. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#gesundheitsrisiko-hitze>
- UBA (2022): HBEFA Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs. Version 4.2.2/Februar 2022. INFRAS AG, Bern, Schweiz, Hrsg.: UBA (Umweltbundesamt) Berlin
- UBA (2022a): Trend der PM10-Jahresmittelwerte. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/feinstaub-belastung#feinstaubkonzentrationen-in-deutschland>
- Urban H. & Steininger K.W. (2015): Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In: Steininger K., König M., Bednar-Friedl B., Loibl W., Kranzl L., Prettenhaler F., Haas W., Formayer H., Goetzl M., Zulka K. 2015: Economic Evaluation of Climate Change Impacts – Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria. Basel: 301–322.
- VDI (2003): VDI-Richtlinie 3787, Bl.5: Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft.
- VDI (2004) VDI-Richtlinie 3787, Bl.9: Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen.
- VDI (2008) VDI-Richtlinie 3785, Bl.1: Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- VDI (2013): Qualitätssicherung in der Immissionsberechnung. Kraftfahrzeugbedingte Immissionen. VDI-Richtlinie 3783 Blatt 14, August 2013, VDI Düsseldorf
- VDI (2015): Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1, September 2015, VDI Düsseldorf
- VDI (2017): VDI-richtlinie 3783, Bl.7: Umweltmeteorologie. Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder.
- VDI (2017 a): Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle – Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung. VDI-Richtlinie 3783 Blatt 9, Mai 2017, VDI Düsseldorf
- VDI (2019): Methoden zur Beschreibung der Luftqualität für die Stadt- und Regionalplanung. VDI-Richtlinie 3787 Blatt 3, Januar 2019, VDI Düsseldorf
- VDI (2020): VDI-Richtlinie 3787, Bl.4: Umweltmeteorologie. Methoden zur Beschreibung von Stark- und Schwachwinden in bebauten Gebieten und deren Bewertung.
- VDI (2020a): VDI-Richtlinie 3787, Bl.8: Umweltmeteorologie. Stadtentwicklung im Klimawandel.
- VDI (2020b): Kfz-Emissionsbestimmung – Luftbeimengungen. VDI-Richtlinie 3782 Blatt 7, Mai 2020, VDI Düsseldorf
- VDI (20022) VDI-Richtlinie 3785, Bl.2: Umweltmeteorologie. Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas.
- WHO (2021): Globale Luftgüteleitlinien der WHO: Feinstaubpartikel (PM_{2,5} und PM₁₀), Ozon, Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid und Kohlenmonoxid. Zusammenfassung. Kopenhagen: Weltgesundheitsorganisation Regionalbüro für Europa; 2021. Lizenz: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.





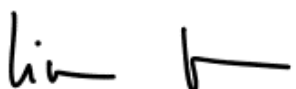
GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Hannover, den 11.06.2025

Erstellt von:



Dipl.-Geograph Dirk Funk

Geprüft von:



Dr. Jens Dahlhausen (M. Sc. Geoökologie)

Die Erstellung der Stadtklimaanalyse erfolgte entsprechend dem Stand der Technik nach bestem Wissen und Gewissen. Eigentum und Nutzungsrecht liegen bei den Auftraggebern.