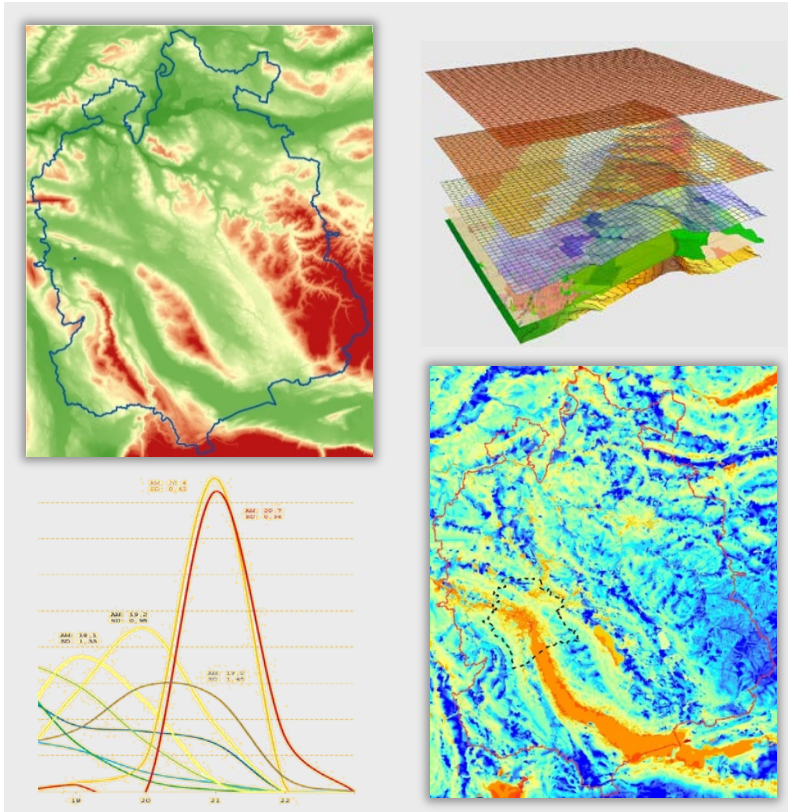


Analyse der klimaökologischen Funktionen und Prozesse für das Gebiet des Kantons Zürich

Abschlussbericht



Auftraggeber:

Baudirektion Kanton Zürich
AWEL/Luft
Stampfenbachstrasse 12
8090 Zürich



GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Grosse Pfahlstrasse 5a
3 0 1 6 1 Hannover
Tel. (0511) 3887200
FAX (0511) 3887201
www.geo-net.de

Hannover, April 2018

Auftrag: Analyse der klimaökologischen Funktionen und Prozesse für das Gebiet des Kantons Zürich

Standort: Kanton Zürich
Schweiz

Auftraggeber: Baudirektion Kanton Zürich
AWEL/Luft
Stampfenbachstrasse 12
8090 Zürich

Projektnummer: 2_16_014

Berichtsnummer: 2_16_014_Zuerich_Kanton_Klimaanalyse_Rev00

Version: 1


Datum: 27. April 2018

Erstellt von: 


Dipl.-Geogr. Dirk Funk

Geprüft von: 

Dipl.-Geogr. Peter Trute

Unter Mitarbeit von: 

M.Sc. Meteor. Gregor Meusel



Prof. Dr. Günter Groß

 GEO-NET
Umweltconsulting GmbH
Geschäftsführer:
Dipl.-Geogr. Thorsten Frey
Dipl.-Geogr. Peter Trute

Große Pfahlstraße 5a
30161 Hannover
Germany
Tel. +49 (0) 511 388 72 00
Fax +49 (0) 511 388 72 01

info@geo-net.de
www.geo-net.de

Amtsgericht Hannover
HRB 61218

Hannoversche Volksbank eG
kto. 532 248 000
blz 251 900 01

BIC VOHADE2H
IBAN DE81 2519 0001
0532 2480 00
VAT DE 228892587



Inhaltsverzeichnis

Seite:

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	V
Glossar.....	VI
Zusammenfassung	VIII
1. Aufgabenstellung	1
2 Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen	3
3. Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse	6
3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D	6
3.2 Synoptische Rahmenbedingungen.....	7
3.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen.....	9
3.4 Auswertung kantonaler Wetterstationen	10
3.4.1 Auswahl der Referenzstationen	10
3.4.2 Selektion von Sommertagen mit autochthoner Wetterlage (Station Zürich- Fluntern).....	11
3.4.3 Stationsmittelwerte verschiedener meteorologischer Parameter	12
3.4.4 Hauptanströmrichtungen.....	13
3.4.5 Berg-Tal-Vergleich der Stationen „Bachtel Turm“, „Wald Höhenklinik“ (Berg) und „Rapperswil Tüchelweier“ (Tal).....	18
4. Ergebnisse der Klimamodellierung.....	20
4.1 Nächtliches Temperaturfeld.....	20
4.2 Physiologisch Äquivalente Temperatur.....	23
4.3 Autochthones Windfeld	24
4.4 Kaltluftvolumenstrom	27
5 Modellierung von Klimawandelszenarien nach der ENVELOPE-Methode.....	32
5.1 Vorgehensweise	32
5.2 Eingangsdaten	35
5.2.1 Geodaten.....	36
5.2.2 Klimadaten	36

5.3	ENVELOPE-Ergebnisse	39
5.3.1	Hitzetage	40
5.3.2	Sommertage	47
5.3.3	PET-Überschreitungstage	56
5.3.4	Tropennächte	63
6	Planungshinweiskarten Stadtklima	71
6.1	Vorgehensweise	71
6.1.1	Bewertung der Nachtsituation	71
6.1.2	Bewertung der Tagsituation	75
6.2	Ergebnisse	76
6.2.1	Nachtsituation	76
6.2.2	Tagsituation	80
7	Literatur	86

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Prozessorientierte Analyse	1
Abb. 2.1:	Geländehöhe im Untersuchungsgebiet	3
Abb. 2.2:	Nutzungsstruktur im Kantonsgebiet	5
Abb. 3.1:	Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen	8
Abb. 3.2:	Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation	9
Abb. 3.3:	Prinzipiskizze Kaltluftleitbahn	10
Abb. 3.4:	Standorte der Meteo-Messstationen	11
Abb. 3.5:	Vorherrschende Windrichtung an Sommertagen an der Station Stampfenbachstrasse (urban) um 14 Uhr als Windrose und als Histogramm	14
Abb. 3.6:	Vorherrschende Windrichtung an Sommertagen an der Station Stampfenbachstrasse (urban) um 04 Uhr als Windrose und als Histogramm	15
Abb. 3.7:	Vorherrschende Windrichtung an Sommertagen an der Station Dietlikonerstrasse (urban) um 14 Uhr als Windrose und als Histogramm	16
Abb. 3.8:	Vorherrschende Windrichtung an Sommertagen an der Station Dietlikonerstrasse (urban) um 04 Uhr als Windrose und als Histogramm	17
Abb. 4.1:	Temperaturfeld im Bereich Zürich/Kernstadt zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)	21
Abb. 4.2:	Temperaturfeld im Bereich Bülach zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)	22

Abb. 4.3: PET im Bereich Zürich/Kernstadt zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags (2m ü. Grund)	24
Abb. 4.4: Prinzipskizze Flurwind	25
Abb. 4.5: Nächtliches Windfeld im Bereich Milchbuck zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)	27
Abb. 4.6: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom	28
Abb. 4.7: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern	29
Abb. 4.8: Kaltluftvolumenstrom im Bereich Zürich/westliche Kernstadt zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)	30
Abb. 5.1: Downscaling globaler Klimaprojektionen über die regionale Skala bis hin zur lokalen Skala (Quelle: DWD 2017)	33
Abb. 5.2: Exemplarische Häufigkeitsverteilungen von Temperatur (T), Windgeschwindigkeit (u) und relativer Feuchte (rf)	33
Abb. 5.3: Begrenzungsraum für die ausgesuchten Wettersituationen	34
Abb. 5.4: Exemplarische Verteilung der 14 Uhr-Situationen im Zustandsraum	34
Abb. 5.5: Schema zur Berechnung der meteorologischen Variablen für einzelne Wettersituationen aus den Ergebnissen der acht Basis-Simulationen	35
Abb. 5.6: Anthropogener Strahlungsantrieb (RF) verschiedener IPCC-Klimaszenarien (RCP, SRES bzw. IS92a; Quelle: Klimanavigator 2017	36
Abb. 5.7: Lage der aus dem Modellgitter ausgewählten Gitterpunkte	39
Abb. 5.8: Räumliche Verteilung von Hitzetagen im Kanton Zürich in der Referenzperiode (1961-1990)	41
Abb. 5.9: Räumliche Verteilung von Hitzetagen in der Stadt Zürich in der Referenzperiode (1961- 1990)	42
Abb. 5.10: Mittlere jährliche Anzahl an Heissen Tagen ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) in der Referenzperiode und den Zukunftsperioden in Abhängigkeit von der Flächennutzung	43
Abb. 5.11: Räumliche Verteilung von Hitzetagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode I (2021- 2040)	44
Abb. 5.12: Räumliche Verteilung von Hitzetagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode II (2041- 2070)	45
Abb. 5.13: Räumliche Verteilung von Hitzetagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode III (2071- 2100)	46
Abb. 5.14: Räumliche Verteilung von Hitzetagen in der Stadt Zürich in der Zukunftsperiode III (2071- 2100)	47
Abb. 5.15: Räumliche Verteilung von Sommertagen im Kanton Zürich in der Referenzperiode (1961- 1990)	48
Abb. 5.16: Räumliche Verteilung von Sommertagen in der Stadt Zürich in der Referenzperiode (1961- 1990)	50
Abb. 5.17: Mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen ($T_{max} \geq 25 \text{ °C}$) in der Referenzperiode und in den Zukunftsperioden in Abhängigkeit von der Flächennutzung	51

Abb. 5.18: Räumliche Verteilung von Sommertagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode I (2021-2040)	52
Abb. 5.19: Räumliche Verteilung von Sommertagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode II (2041-2070)	53
Abb. 5.20: Räumliche Verteilung von Sommertagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode III (2071-2100)	54
Abb. 5.21: Räumliche Verteilung von Sommertagen in der Stadt Zürich in der Zukunftsperiode III (2071-2100)	55
Abb. 5.22: Räumliche Verteilung von PET-Überschreitungstagen im Kanton Zürich in der Referenzperiode (1961-1990)	57
Abb. 5.23: Räumliche Verteilung von PET-Überschreitungstagen in der Stadt Zürich in der Referenzperiode (1961-1990)	58
Abb. 5.24: Mittlere jährliche Anzahl an PET-Überschreitungstagen (PET > 35 °C) in der Referenzperiode und den Zukunftsperioden in Abhängigkeit von der Flächennutzung	59
Abb. 5.25: Räumliche Verteilung von PET-Überschreitungstagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode I (2021-2040)	60
Abb. 5.26: Räumliche Verteilung von PET-Überschreitungstagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode II (2041-2070)	61
Abb. 5.27: Räumliche Verteilung von PET-Überschreitungstagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode III (2071-2100)	62
Abb. 5.28: Räumliche Verteilung von PET-Überschreitungstagen in der Stadt Zürich in der Zukunftsperiode III (2071-2100)	63
Abb. 5.29: Räumliche Verteilung von Tropennächten im Kanton Zürich in der Referenzperiode (1961-1990)	64
Abb. 5.30: Räumliche Verteilung von Tropennächten in der Stadt Zürich in der Referenzperiode (1961-1990)	65
Abb. 5.31: Mittlere jährliche Anzahl an Tropennächten (Tmin ≥ 20 °C) in der Referenzperiode und deren Zunahme in den Zukunftsperioden in Abhängigkeit von der Flächennutzung	66
Abb. 5.32: Räumliche Verteilung von Tropennächten im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode I (2021-2040)	67
Abb. 5.33: Räumliche Verteilung von Tropennächten im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode II (2041-2070)	68
Abb. 5.34: Räumliche Verteilung von Tropennächten im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode III (2071-2100)	69
Abb. 5.35: Räumliche Verteilung von Tropennächten in der Stadt Zürich in der Zukunftsperiode III (2071-2100)	70
Abb. 6.1: Verknüpfungsmodell zur Ermittlung der bioklimatischen Bedeutung der Grünflächen in der Nacht	74
Abb. 6.2: Planungshinweiskarte Nachtsituation für den Bereich Zürich/östliche Kernstadt	77

Abb. 6.3: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Kanton Zürich (Nachtsituation)..... 79

Abb. 6.4: Planungshinweiskarte Tagsituation für den Bereich Zürich/östliche Kernstadt 82

Abb. 6.5: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Kanton Zürich (Tagsituation) 83

Abb. 6.6: Klimatisch günstige Ausgestaltung von Freiflächen 85

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung 4

Tab. 3.1: Mittlere Temperatur und Windgeschwindigkeit um 14 Uhr und 04 Uhr an den Referenzstationen. 12

Tab. 3.2: Mittlere Temperatur und Windgeschwindigkeit um 14 Uhr und 04 Uhr an den Ergänzungsreferenzstationen. 18

Tab. 3.3: Höhe der einzelnen Stationen über Normalnull 19

Tab. 4.1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI 2004) 23

Tab. 4.2: Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms..... 29

Tab. 5.1: Mitglieder des für die Zürcher Modellrechnung zusammengestellten Ensembles der Modellsimulationen der EURO-CORDEX Initiative (Stand: 11/2016) 38

Tab. 6.1: Bewertung des nächtlichen Wärmeineffekts im bebauten Siedlungsraum sowie Strassen und Plätzen..... 72

Tab. 6.2: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden..... 75

Tab. 6.3: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise..... 78

Tab. 6.4: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise..... 79

Tab. 6.5: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete am Tage und abgeleitete Planungshinweise..... 80

Tab. 6.6: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale am Tage und abgeleitete Planungshinweise..... 81

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.

Ausgleichsraum: Grüengeprägte, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → *Wirkungsraum* angrenzt oder mit diesem über → *Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen und lufthygienischen 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.

Autochthones Windfeld: Strömungen, deren Antrieb im Betrachtungsgebiet selber liegt und die nicht durch grossräumige Luftdruckgegensätze beeinflusst werden, z.B. → *Kaltluftabflüsse* und → *Flurwinde*, die sich als eigenbürtige, landschaftsgesteuerte Luftaustauschprozesse während einer windschwachen sommerlichen → *autochthonen Wetterlage* ausbilden.

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 Wälder.

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).

Kaltluftabfluss: Flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auftretende Kaltluftabflüsse. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Der Abfluss erfolgt schubweise. Er setzt bereits vor Sonnenuntergang ein und kann die ganze Nacht andauern.

Kaltlufteinwirkbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb des bebauten Siedlungsraumes (Siedlungsflächen innerhalb des Kantonsgebietes, die von einem klimatisch wirksamen

→ *Kaltluftvolumenstrom* > 425 m³ s⁻¹ durchflossen werden; Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Kantonsgebiet).

Kaltluftentstehungsgebiete: Grünflächen mit einem überdurchschnittlichen → *Kaltluftvolumenstrom*, die → *Kaltluftleitbahnen* speisen (→ *Flurwinde* zeigen in Richtung der Kaltluftleitbahnen) bzw. über diese hinaus bis in das Siedlungsgebiet reichen.

Kaltluftleitbahnen: Kaltluftleitbahnen verbinden → *Kaltluftentstehungsgebiete* (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkungsräume*) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Beinhalten thermisch induzierte Ausgleichsströmungen sowie reliefbedingte → *Kaltluftabflüsse*.

Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der → *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts einer 25 m Rasterzelle (Durchflussbreite). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an → *Kaltluft* in der Einheit m³, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer → *Kaltluftleitbahn* fließt. Anders als das → *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

Kelvin (K): SI-Basiseinheit der thermodynamischen Temperatur, die zur Angabe von Temperaturdifferenzen verwendet wird. Der Wert kann in der Praxis als Abweichung in Grad Celsius (°C) interpretiert werden.

PET (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: Bewertung der bioklimatischen Belastung im bebauten Siedlungsraum sowie an Strassen und Plätze im Kantonsgebiet (→ *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als → *Ausgleichsräume* für die Tag- und die Nachtsituation und Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

Städtische Wärmeinsel (Urban Heat Island): Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, un bebauten 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.

Strahlungswetterlage → *Autochthone Wetterlage*

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

Strukturwind: Kleinräumiges Strömungsphänomen, das sich zwischen strukturellen Elementen einer Stadt ausbildet (bspw. zwischen einer innerstädtischen → *Grünfläche* und der Bebauung entlang einer angrenzenden Strasse).

Wirkungsraum: Bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum (Siedlungs- und Gewerbeflächen), in dem eine bioklimatische oder lufthygienische 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.

Zusammenfassung

Im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zürich wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH in Kooperation mit Prof. Dr. G. Gross (Universität Hannover) eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen Funktionen für das Kantonsgebiet Zürich erstellt. Ziel war es, meteorologische Basisdaten in einer hohen räumlichen Auflösung zu simulieren (25 m x 25 m Raster) und die stadtklimatischen Zusammenhänge und Prozesse herauszuarbeiten – insbesondere die Kaltluftentstehungsgebiete einschliesslich des Kaltluftvolumenstroms in Grün- und Freiflächen sowie die Flächen mit einem Wärmeinseleffekt. Zudem wird auch die Aufenthaltsqualität an Sommertagen mit starker solarer Einstrahlung bewertet. Zentraler Baustein dieses Verfahrens war das Klimamodell FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources). Diese Herangehensweise beinhaltet folgende wichtige Vorteile:

- Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Gesamttraum wird gewährleistet
- Neben den qualitativen Aussagen zur Ausprägung einzelner stadtklimatischer Phänomene werden auch quantitative Aussagen zu klimaökologischen Zuständen und zu Austauschprozessen möglich
- Klimaökologische Ausgleichs- und Prozessräume werden im Kantonsgebiet verortet und in ihrer (möglichst exakten) räumlichen Ausprägung dargestellt
- Ein wichtiger Aspekt des klimaökologischen Ausgleichspotenziales von Freiflächen - der Kaltlufthaushalt - kann nur auf diese Weise flächendeckend untersucht werden.

Im Gegensatz zu punkthaften Messungen liegen mit dem modellgestützten Ansatz flächendeckende Daten zum Kaltlufthaushalt für das gesamte Kantonsgebiet vor. Die Nachtsituation ist dahingehend von Relevanz, da nur dann eine im Vergleich zu Siedlungsflächen intensivere Abkühlung auf Freiflächen mit Vegetation erfolgt. Dabei entstehen je nach Größe unterschiedliche Mengen an Kaltluft, welche als lokale Strömungssysteme Kalt-/Frischluft für den Siedlungsbereich liefern und dort die Wärmebelastung während sommerlicher Hitzeperioden abmildern können. Dargestellt wird eine windschwache, austauscharme sommerliche Wettersituation für die Monate Juli / August. Diese Wetterlage ist das sogenannte Worst-Case-Szenario, das wegen seiner belastenden Wirkung auf die Gesundheit des Menschen unter besonderer Beachtung von Älteren, Kranken und Kindern zur Beurteilung der bioklimatischen Situation gemäss VDI-RL 3785 Blatt 1 herangezogen wird.

Besondere Bedeutung haben im stadtklimatischen Zusammenhang die windschwachen autochthonen Luftaustauschprozesse. Der Begriff 'autochthon' bezeichnet dabei klimatische Vorgänge, die an Ort und Stelle bzw. von selbst (also ohne Fremdwirkung, z.B. durch grossräumige Windströmungen) entstehen (Gegensatz: allochthon). Verglichen mit einer „mittleren“ sommerlichen Wettersituation gehen die austauscharmen sommerlichen Hochdruckwetterlagen häufig mit höheren Lufttemperaturen und einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen einher („Worst-Case“-Szenario). Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen ohne nennenswerte übergeordnete Windströmung können nächtliche Kalt- und/oder Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen. Der „Antrieb“ für diesen Luftaustausch ist der Temperaturunterschied zwischen warmen Siedlungsflächen und kühleren Grün- und Freiflächen.

In bebautem Gelände üben die einzelnen Gebäude eine Hinderniswirkung auf nächtliche Kaltluftströmungen aus und verzögern diese. Als Kaltluft produzierende Bereiche werden vegetationsgeprägte Freiflächen identifiziert, wie z.B. Ackerflächen und Parkareale, aber auch Grünflächen wie Kleingärten und Friedhofsanlagen.

Die Kaltluftströmungen tragen direkt zur Frisch-/Kaltluftversorgung der angrenzenden Siedlungsflächen bei. Zum Zeitpunkt 04 Uhr morgens befinden sich ca. 52 % der Siedlungsfläche im Einwirkungsbereich. Es zeigt sich, dass eine gering überbaute Einzel- und Reihenhausbauung besser durchströmt wird als eine Block- und Blockrandbebauung oder die verdichtete Zürcher Innenstadt. Überdurchschnittlich hohe Kaltluftvolumina entstehen vor allem durch Kaltluftabflüsse über Hangbereichen. Die vom Uetliberg ausgehenden Abflüsse wirken bis zu 2000 m in Richtung Zürcher Innenstadt ein. Kleinere Grünareale können als „grüne Trittsteine“ das Eindringen von Kaltluft in die Bebauung unterstützen und damit den klimatischen Einwirkungsbereich vergrössern. Eine hohe Bedeutung kommt aber auch den kleineren Park-, Ruderal- und Brachflächen oder gering versiegelten Sportplätzen zu, sofern sie Entlastungswirkungen für die benachbarte Bebauung erzeugen können. Zudem können diese an Tagen mit starker Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstungskühle auch (kleinräumig) klimatisch günstige Aufenthaltsbereiche darstellen.

Teile der überbauten Flächen wie beispielsweise die Zürcher Innenstadt und Oerlikon weisen während austauscharmer sommerlicher Hochdruckwetterlagen einen Mangel an Durchlüftung auf und werden nicht nennenswert von Kaltluft durchströmt, da die hohe Bebauungsdichte und das im Vergleich zum Freiland höhere Temperaturniveau die Kaltluftströmung abschwächen. Eine starke Wärmebelastung am Tage ist über den stark versiegelten Strassen und Plätzen, Gleisanlagen sowie Gewerbeflächen anzutreffen.

Die Ergebnisse der stadtklimatischen Parameter wurden durch die Modellierung von Klimawandelszenarien ergänzt. Über die ENVELOPE-Methode ist es möglich, die Daten der globalen Klimaprojektionen auf die räumlich hoch aufgelöste Flächenkulisse der FITNAH-Simulation aufzuprägen. Dabei zeigt sich, welche Stadtstrukturen eher abschwächend oder verstärkend auf die zukünftig ansteigende Wärmebelastung wirken werden. Letzteres betrifft vor allem die innerstädtischen Siedlungsflächen sowie die gewerblich genutzten Areale.

Im Hinblick auf weitere Nutzungsintensivierungen im Kanton Zürich sollten die Funktionen der klima- und immissionsökologisch wichtigen Strukturen möglichst wenig beeinträchtigt werden. Die aus den meteorologischen Parametern zur Tag- und Nachtsituation abgeleiteten Planungshinweiskarten sollen dafür als Abwägungsgrundlage dienen.

1. Aufgabenstellung

Die Schutzgüter Klima bzw. Luft sind wichtige Aspekte der räumlichen Planung und Bestandteile der Abwägung in der Nutzungsplanung, Umweltverträglichkeitsprüfung und bei Massnahmen in der Bestandsbebauung. Vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zur sachgerechten Beurteilung dieser Schutzgüter. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas sowie der dadurch mitbestimmten lufthygienischen Situation und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmassnahmen zur Verbesserung von Klima und Luft ableiten. Dieser Leitgedanke gilt der Sicherung, Entwicklung und Wiederherstellung klima- und immissionsökologisch wichtiger Oberflächenstrukturen und zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse und die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität ab.

Im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zürich wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH in Kooperation mit Prof. Dr. G. Gross (Universität Hannover, Deutschland) im Zeitraum 2016 bis 2017 eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen Funktionen für das Kantonsgebiet durchgeführt. Im Vordergrund standen dabei austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen (auch autochthone Wetterlagen genannt), die häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen einhergehen. Technisch ermöglichen nur solche Wetterlagen eine Analyse der lokalklimatischen Situation, da übergeordnete Wetterphänomene aufgrund von grossräumigen Luftdruckdifferenzen die zu analysierenden lokalen Phänomene nicht überlagern. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen (Abb. 1.1).

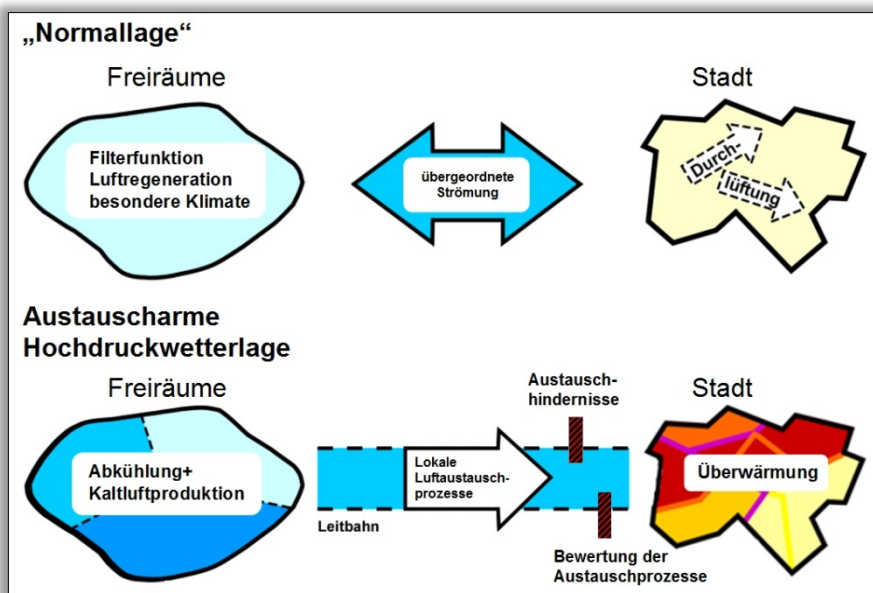


Abb. 1.1: Prozessorientierte Analyse

Zwischen klimatisch wirksamen Grün-/Freiflächen einerseits und städtisch verdichteten Bereichen andererseits sowie verbindender Strukturen ergibt sich ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen im Kanton Zürich.

Wesentliches Ziel der Analyse ist, mit der Anwendung des Klimamodells FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources) und den aus der Klimaanalyse gewonnenen Ergebnissen umfassende Bestandsaufnahme der klimatischen Situation im Kanton Zürich durchzuführen. Weiterhin besteht das Ziel, klimaökologisch wichtige und bioklimatisch belastete Raumstrukturen herauszuarbeiten und darzustellen. Im Gegensatz zu punkthaften Messungen liegen mit dem modellgestützten Ansatz flächendeckende Daten zum Kaltlufthaushalt für das gesamte Kantonsgebiet vor. Diese erlauben eine optimierte Darstellung der thermischen Belastung und insbesondere des Kaltluftprozessgeschehens in der Nacht. Die Ergebnisse spiegeln neben der Nacht-Situation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider (Planungshinweiskarten). Darüber hinaus werden, getrennt für die Nacht- und Tagsituation, eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in den Siedlungsräumen bzw. der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume vorgenommen und allgemeine Planungshinweise abgeleitet.

Der vorliegende Bericht stellt die Stadtklimaanalyse dar, geht auf die Methodik der Modellrechnung sowie die Analyse- und Planhinweiskarten ein und schliesst mit der Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf das regionale Klima im Kanton Zürich ab.

2 Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen

Bei einer Gesamtgrösse des Untersuchungsraums von ca. 2.880 km² geht die Abgrenzung des Simulationsraumes deutlich über das Kantonsareal hinaus und zielt darauf ab, auch ausserhalb des Kantonsgebietes vorhandene Strukturen wie Wald- und Ackerflächen in die Klimamodellierung zu integrieren. Somit ist gewährleistet, dass alle für den Kaltlufthaushalt relevanten Struktureinheiten - insbesondere des Reliefs - berücksichtigt werden. Die für die FITNAH-Modellierung vorgesehene Rasterzellenauflösung beträgt 25 m. Zur Bereitstellung der orographischen Eingangsparameter für die Klimaanalyse konnte auf ein digitales Geländehöhenmodell (DHM25) mit einer Auflösung von 10 m zurückgegriffen werden, welches das gesamte Untersuchungsgebiet abdeckt (Abb. 2.1).

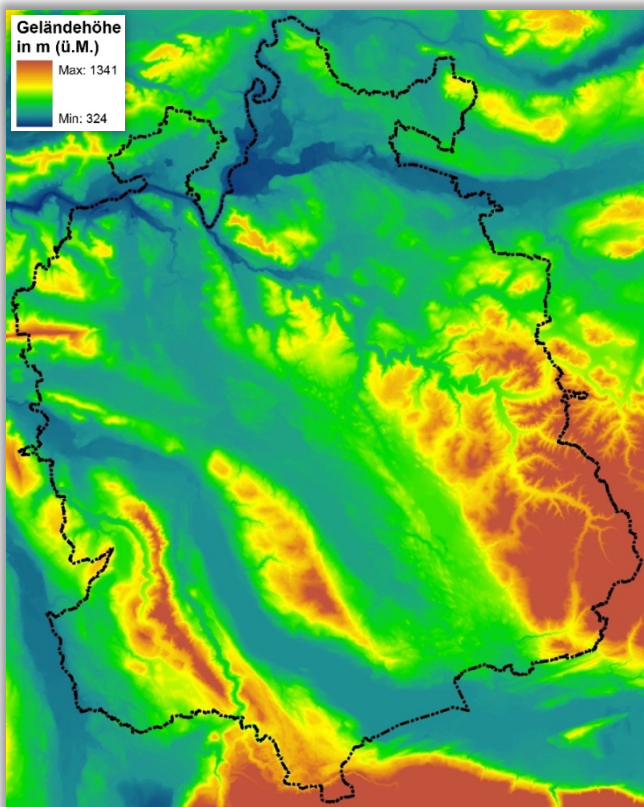


Abb. 2.1: Geländehöhe im Untersuchungsgebiet

Für die Aufbereitung der Nutzungsstrukturen wurden im Wesentlichen Daten aus der Informationsebene Bodenbedeckung (AV MOpublic; Datenstand Juni 2016) sowie der Quartiersanalyse ZH (Datenstand 2015) verwendet. Ein wichtiger Modelleingangsparameter stellt darüber hinaus die Höhe der Baustrukturen dar, welche einen wesentlichen Einfluss auf das lokale Windfeld ausüben. Da auf Masstabebene der kantonsweiten Klimamodellierung keine Einzelgebäude aufgelöst wurden, sind für die Einordnung der Strukturhöhe und des Oberflächenversiegelungsgrades nutzungsklassifizierte vorliegende Literaturdaten (u.a. MOSIMANN et al. 1999) genutzt worden, die auf empirisch gewonnenen Untersuchungsergebnissen aus mehreren deutschen Städten beruhen. Um den speziellen Anforderungen der Modellanalyse gerecht werden zu können, wurde bei der Aufbereitung der Nutzungsstrukturen ein 14-klassiger Nutzungsschlüssel verwendet.

Der Schlüssel wurde vor allem auch dahingehend definiert, eine problemlose Zuweisung des mittleren Versiegelungsgrades auf Basis der in den Eingangs- und Literaturdaten vorkommenden Nutzungsklassifizierungen zu ermöglichen. In einem weiteren Schritt sind unter Verwendung von

Luftbildern die Datenpunkte der Modellrechnung überprüft und gegebenenfalls ergänzt worden. Damit war es beispielsweise möglich, über die in den Nutzungsdaten enthaltenen Informationen hinaus zusätzliche Grünanteile innerhalb von Siedlungsbereichen zu erfassen und deren klimatische Wirkung zu berücksichtigen. Die verwendeten Nutzungskategorien zeigt Tab. 2.1.

Klasse	Flächentyp	Beschreibung	Mittlerer Versiegelungsgrad (%)	Mittlere Strukturhöhe (m)
1	Zentrumsbebauung	Kerngebietsnutzung, welche durch einen sehr hohen Bebauungs- und Versiegelungsgrad gekennzeichnet ist.	95	25.0
2	Block- und Blockrandbebauung	Vergleichsweise dicht bebaute und häufig auch stark versiegelte Siedlungsfläche. Baustrukturell ist sie meist durch geschlossene Blockinnenhöfe geprägt. Sie umfasst sowohl Vorkriegs- als auch Nachkriegsbauten.	78	15.0
3	Industrie- und Gewerbefläche	Sie weist einen ähnlich hohen Versiegelungsgrad wie die Zentrumsbebauung auf, gleichzeitig ist der versiegelte Flächenanteil oft grösser als der mit Gebäuden bestandene.	87	10.0
4	Zeilen- und Hochhausbebauung	Zu diesem Flächentyp zählen sowohl freistehende Punkthochhäuser als auch halboffene Blockrandbebauung und Zeilenbebauung. Gemeinsames Merkmal ist ein relativ hoher Grünflächenanteil, welcher sich durch die zwischen den Gebäudekörpern befindlichen Abstandsflächen ergibt.	55	15.0
5	Einzel- und Reihenhausbebauung	Dieser Typ weist unter den Siedlungsräumen den geringsten Überbauungsgrad auf. Der Übergang zwischen dicht ausgeprägter Reihenhausbebauung und einer Zeilenbebauung ist fließend.	41	5.0
6	Strassenraum	Ebenerdig versiegelte Fläche des Strassenraums.	95	0.0
7	Gleisfläche	Schienenverkehrsfläche mit geringer Strukturhöhe.	25	0.5
8	Baulich geprägte Grünfläche	Unter diesem Flächentyp sind vegetationsgeprägte Flächen zusammengefasst, welche zugleich auch einen gewissen Anteil an versiegelter Fläche (Zuwegungen) und/oder Bebauung aufweisen. Dazu zählen z.B. Kleingartenanlagen und Gartenbauflächen, sowie Spiel- und Sportplätze. Es überwiegt aber letztlich die Eigenschaft als Grünfläche.	25	5.0
9	Freiland	Beinhaltet vor allem landwirtschaftlich genutzte Wiesen und Weiden sowie ackerbaulich genutzte Flächen. Innerstädtisch handelt es sich meist um Rasenflächen mit geringem Gehölzanteil.	5	1.0
10	Gehölz	Diese Nutzungskategorie umfasst sowohl innerstädtische Parkareale und Gehölzflächen als auch Obstbauflächen, Baumschulen und Strassenbegleitgrün.	5	2.0
11-13	Wald	Waldflächen sowie waldartige Bestände im Siedlungsbereich.	5	12.5
14	Wasserfläche	Still- und Fließgewässer.	0	0.0

Tab. 2.1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung

Für die Klimamodellierung ist weniger die Nutzungsart relevant als vielmehr die Nutzungsstruktur und damit der Flächentyp. Modellrechnungen verwenden rasterhafte Repräsentationen von Eingangsvariablen.

Für die Bereitstellung der Modelleingangsdaten muss die Flächengeometrie daher auf Rasterzellen jeweils einheitlicher Nutzungsstruktur – hier mit einer Maschenweite von 25 m – übertragen werden. Da bei dieser Auflösung Einzelgebäude noch nicht explizit aufgelöst werden können, gehen sie entsprechend parametrisiert durch die Definition der Nutzungsklassen in die Modellierung ein. Sie werden daher je Rasterzelle über eine mittlere Rauigkeit und Hindernishöhe repräsentiert. Die Nutzungsstruktur im Kantonsgebiet zeigt Abbildung 2.2 als Datenpunkte der Modellrechnung mit einer Auflösung von 25 m x 25 m.

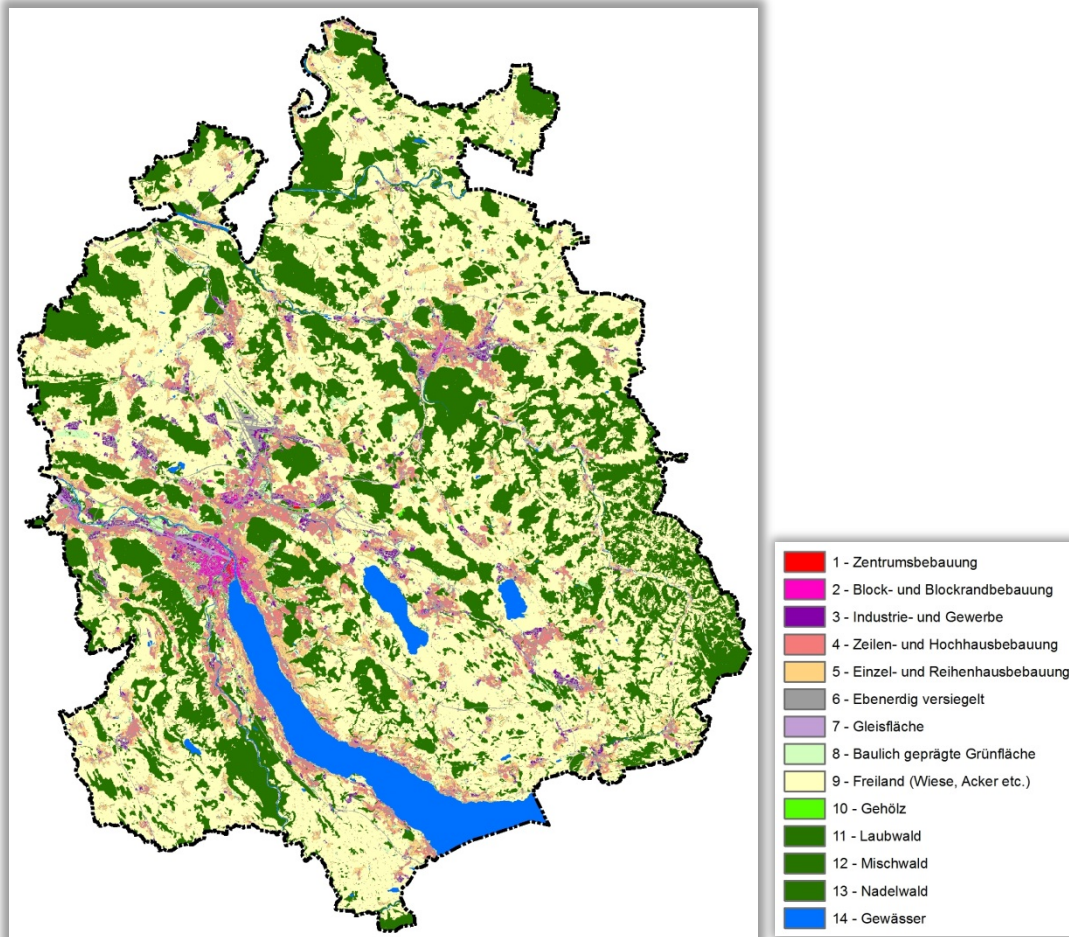


Abb. 2.2: Nutzungsstruktur im Kantonsgebiet

Massgeblichen Einfluss auf die meteorologischen Parameter üben die Flächeneigenschaften wie z.B. Versiegelungsgrad, Bebauungsdichte und Strukturhöhe aus. Daher gilt es eine Einstufung zu finden, welche am ehesten die strukturelle Eigenschaft einer Fläche widerspiegelt. Ergänzt wurden die Eingangsdaten durch die Einbindung von Vegetationshöhen aus einer Laserscanbefliegung (Stand 2014) zur Ausweisung grösserer Baumbestände innerhalb von Grünflächen. Aus der Verknüpfung der unterschiedlichen Quellen ist somit eine aktuelle Informationsebene zur Realnutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung aufgebaut worden.

3. Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse

3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D

Neben globalen Klimamodellen und regionalen Wettervorhersagemodellen wie sie zum Beispiel vom Deutschen Wetterdienst (DWD) oder in der Schweiz von der MeteoSchweiz für die tägliche Wettervorhersage routinemässig eingesetzt werden, nehmen kleinräumige Modellanwendungen für umweltmeteorologische Zusammenhänge im Rahmen von stadt- und landschaftsplanerischen Fragestellungen einen immer breiteren Raum ein. Die hierfür eingesetzten mikro- und mesoskaligen Modelle erweitern das Inventar meteorologischer Werkzeuge zur Berechnung atmosphärischer Zustände und Prozesse. Der Grossteil praxisnaher umweltmeteorologischer Fragestellungen behandelt einen Raum von der Grössenordnung einer Stadt bzw. Region. Die bestimmenden Skalen für die hier relevanten meteorologischen Phänomene haben eine räumliche Erstreckung von Metern bis hin zu einigen Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis Stunden. Unter Verwendung des üblichen Einteilungsschemas meteorologischer Phänomene werden diese in die Meso- und Mikroskala eingeordnet. Beispiele für mesoskalige Phänomene sind Land-See-Winde, Flurwinde oder die Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel, wobei der Übergang zur Mikroskala fließend ist (bspw. der Einfluss von Hindernissen auf den Wind wie Kanalisierung, Umströmung bzw. Düseneffekte, aber auch die klimaökologischen Auswirkungen von Begrünungsmassnahmen).

Obwohl die allgemeine Struktur und physikalischen Ursachen dieser lokalklimatischen Phänomene im Wesentlichen bekannt sind, gibt es nach wie vor offene Fragen hinsichtlich der räumlichen Übertragbarkeit auf andere Standorte oder der Sensitivität bezüglich der Wechselwirkungen einzelner Strömungssysteme untereinander. Ein Grund hierfür sind die relativ kleinen und kurzen Skalen dieser Phänomene und deren unterschiedliches Erscheinungsbild in komplexem Gelände. Entsprechend ist es schwierig aus einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen eine umfassende Charakterisierung zu erhalten, jedoch kann dieser Nachteil mit Hilfe ergänzender Modelluntersuchungen überwunden werden.

Beginnend mit einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG 1988) wurden gerade in Deutschland eine Reihe mesoskaliger Modelle konzipiert und realisiert. Der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist sehr hoch und zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen steht neben Messungen vor Ort und Windkanalstudien ein weiteres leistungsfähiges und universell einsetzbares Werkzeug zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen in kleinen, stadt- und landschaftsplanerisch relevanten Landschaftsausschnitten zur Verfügung.

GRUNDLAGEN MESO- UND MIKROSKALIGER MODELLE

Die Verteilung lokalklimatisch relevanter Grössen wie Wind und Temperatur können mit Hilfe von Messungen ermittelt werden. Aufgrund der grossen räumlichen und zeitlichen Variation der meteorologischen Felder im Bereich einer komplexen Umgebung sind Messungen allerdings nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung in benachbarte Räume selten möglich. Stadtklimamodelle wie FITNAH

3D können zu entscheidenden Verbesserungen dieser Nachteile herangezogen werden, indem sie physikalisch fundiert die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken zwischen den Messungen schliessen, weitere meteorologische Grössen berechnen und Wind- bzw. Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur ermitteln. Die Modellrechnungen bieten darüber hinaus den Vorteil, dass Planungsvarianten und Ausgleichsmassnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz studiert und auf diese Art und Weise optimierte Lösungen gefunden werden können.

Für jede meteorologische Variable wird eine physikalisch fundierte mathematische Berechnungsvorschrift aufgestellt. Die Modelle basieren daher, genauso wie Wettervorhersage- und Klimamodelle, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (Navier-Stokes Bewegungsgleichung), der Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung) und der Energieerhaltung (1. Hauptsatz der Thermodynamik). Je nach Problemstellung und gewünschter Anwendung kann dieses Grundgerüst erweitert werden, um z.B. die Effekte von Niederschlag auf die Verteilung stadtklimatologisch wichtiger Grössen zu berücksichtigen. In diesem Falle müssen weitere Bilanzgleichungen für Wolkenwasser, Regenwasser und feste Niederschlagspartikel gelöst werden. Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst.

Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. In der vorliegenden Untersuchung beträgt die für die Modellierung mit FITNAH 3D verwendete horizontale räumliche Maschenweite 25 m. Die vertikale Gitterweite ist dagegen 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 4, 10, 15, 20, 30, 40, 50 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 Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Die Auswertungen der FITNAH-Modellierung beziehen sich auf das bodennahe Niveau der Modellrechnung (2 m ü. Gr. = Aufenthaltsbereich der Menschen).

3.2 Synoptische Rahmenbedingungen

Während sogenannter autochthoner („eigenbürtiger“) Wetterlagen können sich die lokalklimatischen Besonderheiten in einer Stadt besonders gut ausprägen, da es nur eine geringe „übergeordnete“ Windströmung gibt. Eine solche Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwachen überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, , sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten einer Stadt besonders gut ausprägen. Dahingehend wurden die grossräumigen synoptischen Rahmenbedingungen folgendermassen festgelegt:

- Relative Feuchte der Luftmasse 50 %
- Bedeckungsgrad 0/8
- Kein überlagernder geostrophischer Wind
- Lufttemperatur über Freiland um 21:00 Uhr in Anlehnung an die in Kap. 4.1 beschriebenen Referenzstationen

Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten bei einer austauscharmen Wetterlage bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht und tragen zur Anreicherung von Luftschadstoffen bei. Bei gleichzeitiger Wärmebelastung in den Siedlungsflächen können sich lokal bioklimatische und lufthygienische Belastungsräume ausbilden. Diese Wettersituation stellt damit ein „Worst-Case“-Szenario dar. Charakteristisch für diese (Hochdruck-) Wetterlage ist hingegen die Entstehung eigenbürtiger Kaltluftströmungen (Flurwinde und Kaltluftabflüsse), die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden und zu einem Abbau der Belastungen beitragen. In Abb. 3.1 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt.

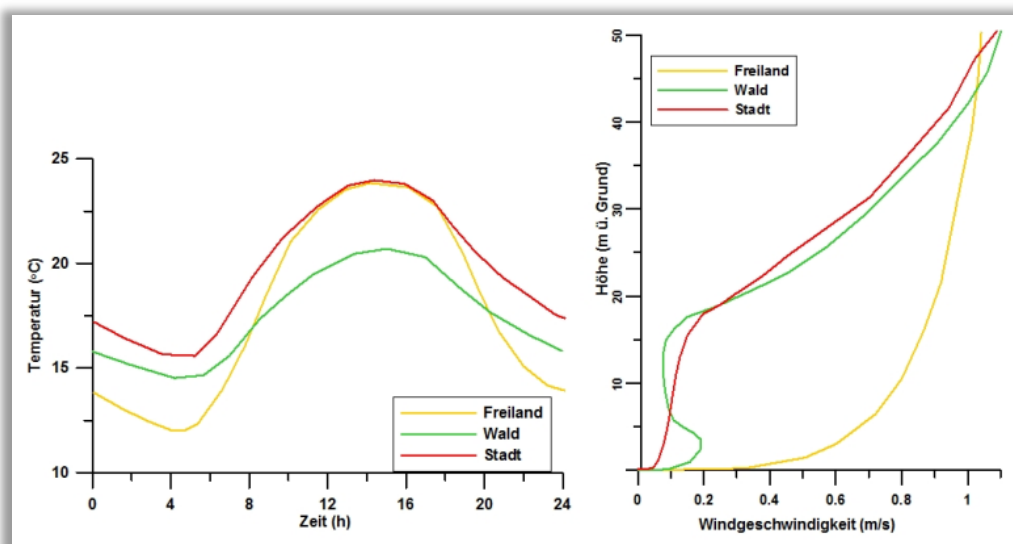


Abb. 3.1: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen

Hinsichtlich des Temperaturverlaufs zeigt sich, dass sowohl Freiflächen wie z.B. Wiesen als auch Bebauung ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, die nächtliche Abkühlung der Siedlungsflächen vor allem durch die Wärme speichernden Materialien hingegen deutlich geringer ist. Bei den durch Wiese geprägten Grünflächen trägt der Mangel an Verschattung zum hohen Temperaturniveau bei, während hier nachts die Abkühlung am stärksten ist. Waldflächen nehmen eine vermittelnde Stellung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird der Einfluss von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

3.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Maschenweite von 25 m zu erzeugen. Aus diesen punkthaften Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten Modellergebnisse in Form flächenhaft berechneter Klimaparameter (Abb. 3.2). 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. Um die Ausprägung der Klimaparameter auf planungsrelevante und massstabsgerechte Einheiten zu übertragen, wurden den Referenzflächen der verwendeten digitalen Nutzungsinformationen die relevanten Klimaparameter wie z.B. Lufttemperatur oder Kaltluftvolumenstrom 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 hochaufgelöste rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (vgl. Kap. 4), zum anderen als planungsrelevante und massstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (vgl. Kap. 6). Auf diese Weise bleibt, in Ergänzung zur abstrahierten Darstellung der klimatischen Funktionszusammenhänge (als Flächen- und Beziehungstypen in den Synthesekarten), die flächeninterne Heterogenität der Klimaparameter als Detailinformation jederzeit abrufbar.

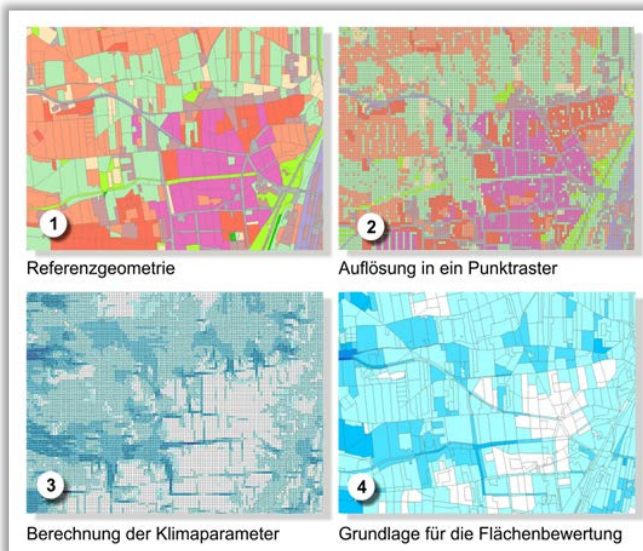
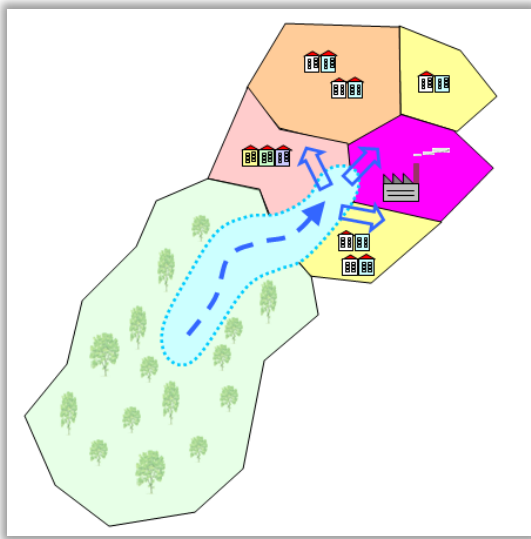


Abb. 3.2: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation

KALTLUFTLEITBAHNEN

Leitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches (Abb. 3.3). Die Ausweisung der Leitbahnbereiche orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation und wird sowohl in der Klimafunktionskarte als auch der Planungshinweiskarte dargestellt. Als geeignete Oberflächenstrukturen innerhalb von Siedlungsräumen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung erleichtern, dienen sowohl gering bebaute vegetationsgeprägte Freiflächen, Kleingärten und Friedhöfe als auch Gleisareale und breite Strassenräume. Kaltluftabflüsse treten über unbebauten Hangbereichen auf, sofern sie Neigungen von $\geq 1^\circ$ aufweisen. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt sie sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung.



Durch diese „Beschleunigung“ weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als Strömungen, die sich nur aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Aus stadtklimatischer Sicht sind daher Abflüsse als sehr wirksam zu bewerten. Aufgrund der ausgeprägten Reliefsituation im Kantonsgebiet werden Kaltluftabflüsse nicht gesondert ausgewiesen.

Abb. 3.3: Prinzipskizze Kaltluftleitbahn

3.4 Auswertung kantonaler Wetterstationen

3.4.1 Auswahl der Referenzstationen

Für die stadtklimatische Analyse des Kantons Zürich benötigt das verwendete Modell FITNAH meteorologische Eingangsdaten, die als modellinterner Antrieb fungieren. Idealerweise werden hierfür Messdaten verwendet, die an Tagen mit autochthoner Wetterlage (strahlungsreiche, windschwache Hochdruckwetterlage) erhoben wurden, um die human-biometeorologische Bedeutung bestmöglich abbilden zu können. Das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich stellt Messdaten von insgesamt 24 Wetterstationen zur Verfügung, aus denen im ersten Schritt geeignete Messstandorte extrahiert werden. Um das Kanton mustergültig repräsentieren zu können, wird mit „Zürich-Stampfenbachstrasse“ (Station 1 in Abb. 4.1) eine urbane Station und mit „Wallisellen-Dietlikonerstrasse“ (Station 2 in Abb. 3.4) eine rurale Station gewählt. Diese beiden Stationen bieten sich an, da einerseits der Zeitraum der verfügbaren Datensätze kongruent ist und andererseits keine wichtigen Hitzejahre fehlen (wie z.B. 2003).

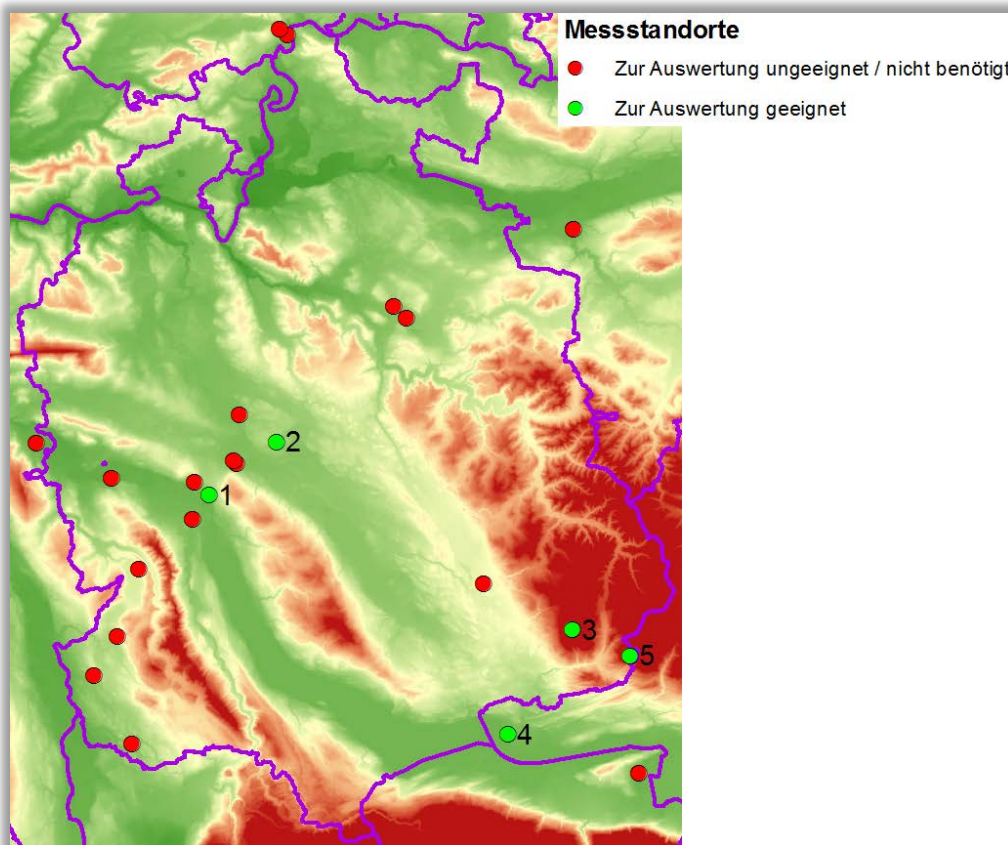


Abb. 3.4: Standorte der Meteo-Messstationen

3.4.2 Selektion von Sommertagen mit autochthoner Wetterlage (Station Zürich-Fluntern)

Die Datensätze der beiden gewählten Stationen Stampfenbach- sowie Dietlikonerstrasse verfügen unglücklicherweise über keine Information zum Bedeckungsgrad, welcher im Sommer neben einer geringen Windgeschwindigkeit und einem hohen Luftdruck ein gutes Mass für eine autochthone Wetterlage aufzeigt. Daher wird die einzige Station, die über diese Information verfügt – Zürich-Fluntern – zur Selektierung der Tage mit autochthoner Wetterlage verwendet. Es wird folglich die Annahme getroffen, dass an denselben Tagen auch an den beiden zu untersuchenden Stationen Stampfenbach- und Dietlikonerstrasse eine strahlungsreiche, windschwache Hochdruckwetterlage vorlag. Als erstes Kriterium wurden alle Tage im Juli und August des Datensatzes (von 1901 bis 2015) gefiltert, für die ein Bedeckungsgrad von unter 2/8 angegeben war. Zusätzlich musste das Tagesmaximum für diese Tage mindestens 25 °C betragen, was die Definition eines Sommertages darstellt. Sowohl am Tage als auch in der Nacht ist bei solchen Temperaturen mit einer erhöhten Wärmebelastung für die Bevölkerung zu rechnen, weshalb diese Eingangsdaten für das Modell und die spätere Berechnung von bioklimatischen Bewertungsindizes von besonderem Wert sind.

Aufgrund der allgemein kurzen und in teils verschiedenen Jahren vorliegenden Messzeiträume wurde ausserdem zugunsten statistischer Relevanz entschieden, für alle verfügbaren Stationen den grössten möglichen Messzeitraum statistisch auszuwerten. Die Länge der betrachteten Zeiträume ist für jede der Stationen in Tabelle 3.3 aufgetragen.

3.4.3 Stationsmittelwerte verschiedener meteorologischer Parameter

Zur Berechnung der Mittelwerte meteorologischer Parameter der beiden Referenzstationen werden aus den Sommertagen zuerst jeweils alle Werte von 14 Uhr des Sommertages und von 04 Uhr des Folgetages extrahiert. Die berechneten Werte für die jeweilige Station, Uhrzeit und meteorologische Grösse sind in Tab. 3.1 aufgetragen.

Parameter	Zürich- Stampfenbachstr. (urban, 14 Uhr)	Zürich- Stampfenbachstr. (urban, 04 Uhr)	Wallisellen- Dietlikonerstr. (rural, 14 Uhr)	Wallisellen- Dietlikonerstr. (rural, 04 Uhr)
Mittlere Temperatur	28.8 °C	19.6 °C	28.3 °C	15.5 °C
Mittlere Windgeschwindigkeit	1.87 m/s	1.05 m/s	2.67 m/s	0.81 m/s

Tab. 3.1: Mittlere Temperatur und Windgeschwindigkeit um 14 Uhr und 04 Uhr an den Referenzstationen.

Die urbane Mitteltemperatur von 14 Uhr, die die gemittelte Tageshöchsttemperatur darstellt, ist etwas grösser als die rurale Mitteltemperatur derselben Zeit. Dies hängt mit der im Vergleich zum Umland deutlich andersartigen Bebauung zusammen, die ein stärkeres Aufheizen des besiedelten Raumes ermöglicht. Zu nennen sind hier vor allem die dichtere städtische Bebauung bzw. die grössere Versiegelung, die unterschiedliche Bausubstanz der Gebäude oder der im Vergleich zum Umland geringere Anteil an begrünter Fläche. Dass die Differenz beider Mitteltemperaturen der Erwartung folgend nicht noch grösser ist, hängt neben den verschiedenen langen untersuchten Zeiträumen wohl damit zusammen, dass sich die Station Dietlikonerstrasse direkt über einer unbeschatteten Ackerfläche befindet. Diese kann sich tagsüber ähnlich stark erwärmen wie Asphalt, kühlt sich nach Sonnenuntergang aber deutlich schneller ab.

In der Nacht (4 Uhr) zeigen sich Temperaturunterschiede von 4.1 K zwischen der Stadt und dem Umland. Dass die Abweichungen nachts deutlich höher ausfallen als am Tag, hängt ebenfalls mit der unterschiedlichen Bausubstanz zusammen. Städtische Materialien wie Asphalt oder Beton haben eine höhere Wärmekapazität und geben langwellige Wärmestrahlung noch bis in die Morgenstunden an die Atmosphäre ab. Durch die geringere Zahl grüner Flächen können Evapotranspirationsprozesse im städtischen Raum auch weniger stark wirken als im ländlichen. Ausserdem ist der Sky View Factor – ein Mass für die Horizonteinengung – im besiedelten Raum oft nahe 0 (hohe Einengung), während er im ländlichen Raum gegen 1 (geringe Einengung) geht. Eine geringere Horizonteinengung bedeutet gleichzeitig die grössere Fähigkeit des Gebietes zur langwelligen Ausstrahlung, wohingegen eine hohe Horizonteinengung, ähnlich einer Wolkendecke, die Wärmestrahlung zwischen Boden- und Dachniveau festhält. Die mittlere Windgeschwindigkeit liegt im urbanen sowie im ruralen Gebiet am Tage bei Windstärke 2 auf der Beaufort-Skala und nachts in beiden Siedlungsbereichen auf Stärke 1 und ist damit schwachwindig, vernachlässigbar gering und charakteristisch für eine autochthone Wetterlage.

3.4.4 Hauptanströmrichtungen

Die Abb. 3.5 bis Abb. 3.8 zeigen die vorherrschenden mittleren Windrichtungen an der urbanen Station Stampfenbachstrasse und der ruralen Station Dietlikonerstrasse jeweils für 14 Uhr und für 04 Uhr des Folgetages zum einen als Windrose und zum anderen als Histogramm.

Am Tag (14 Uhr) ist an der urbanen Station die am häufigsten auftretende Windrichtung 50° (s. Abb. 3.5), was einer Anströmung aus Nordost entspricht. Die rurale Station zeigt eine ähnliche Anströmung auf, wobei der östliche Einfluss ein wenig höher ausfällt (60° , s. Abb. 3.7). Betrachtet man die häufigsten Windrichtungen um 04 Uhr des Folgetages an der Station Stampfenbachstrasse., dreht sich diese nur um 10° in Richtung Nord (40° , s. Abb. 3.7), wohingegen die Windrichtung am Standort Dietlikonerstrasse einem nord-nordwestlichen Einfluss ausgesetzt ist ($330\text{-}340^\circ$, s. Abb. 3.8).

Insgesamt fällt auf, dass die am häufigsten vorkommenden Windrichtungen an der städtischen Wetterstation deutlich mehr in alle möglichen Richtungen streuen als an der ländlichen. Die Windrichtungen letzterer befinden sich nahezu ausnahmslos im Bereich des ersten und vierten Quadranten (West-Nord-Ost). Dies kann damit zusammenhängen, dass der im Norden und leicht exponiert liegende Wald Kaltluft produziert, die gerade in der Nacht gegen Süden in die tieferen Geländebereiche vordringt. Im urbanen Raum ist es hingegen nicht unüblich, wenn keine konkrete Hauptwindrichtung vorliegt, da an schwachwindigen, strahlungsreichen Tagen unvorhersagbare, kleinskalige Turbulenzen oder Kanalisierungseffekte an Strassenschluchten auftreten können. Auch die Dichte des Strassenverkehrs fließt an Strahlungstagen in die Bildung dieser Effekte mit ein.

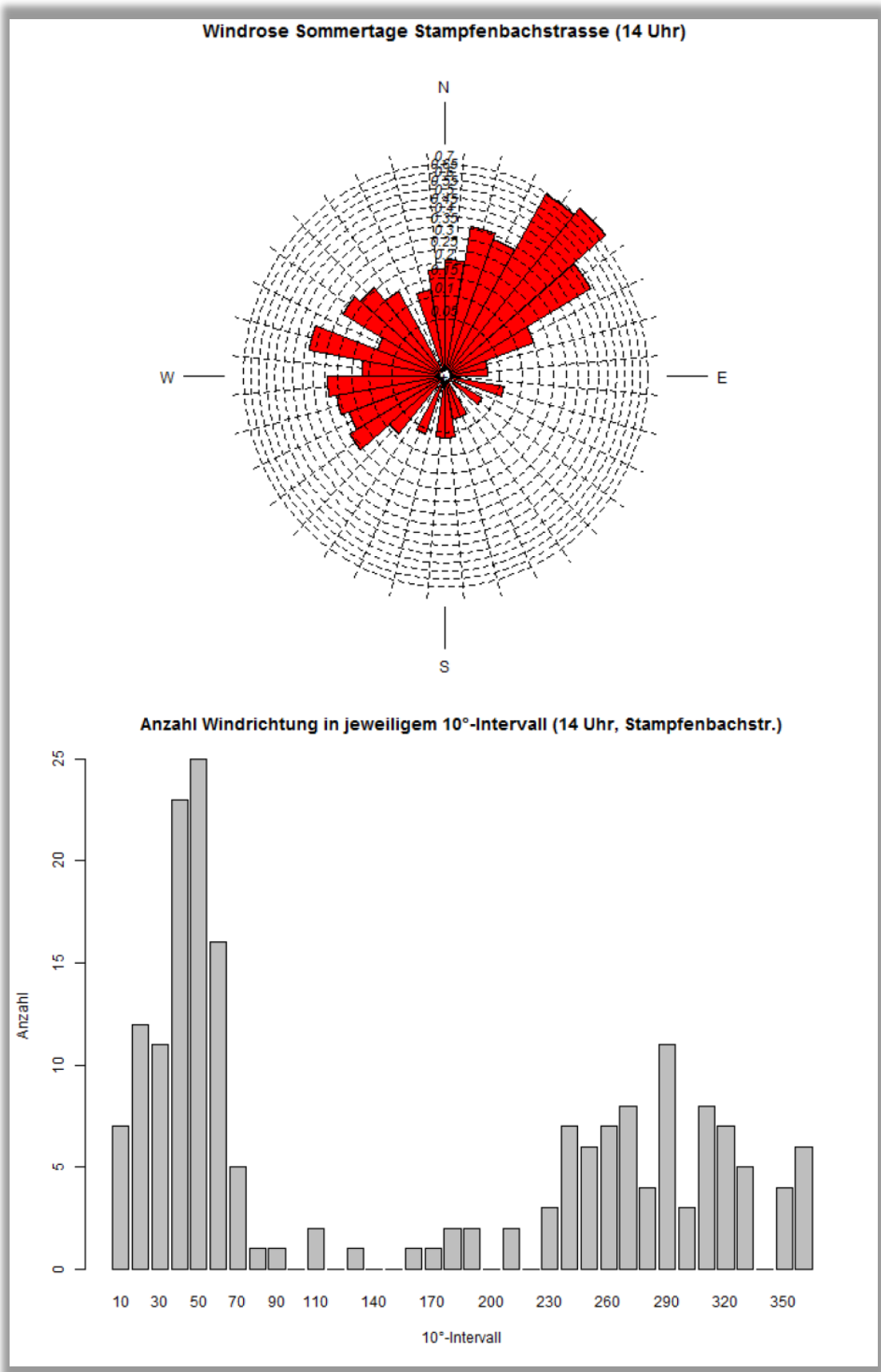


Abb. 3.5: Vorherrschende Windrichtung an Sommertagen an der Station Stampfenbachstrasse (urban) um 14 Uhr als Windrose und als Histogramm

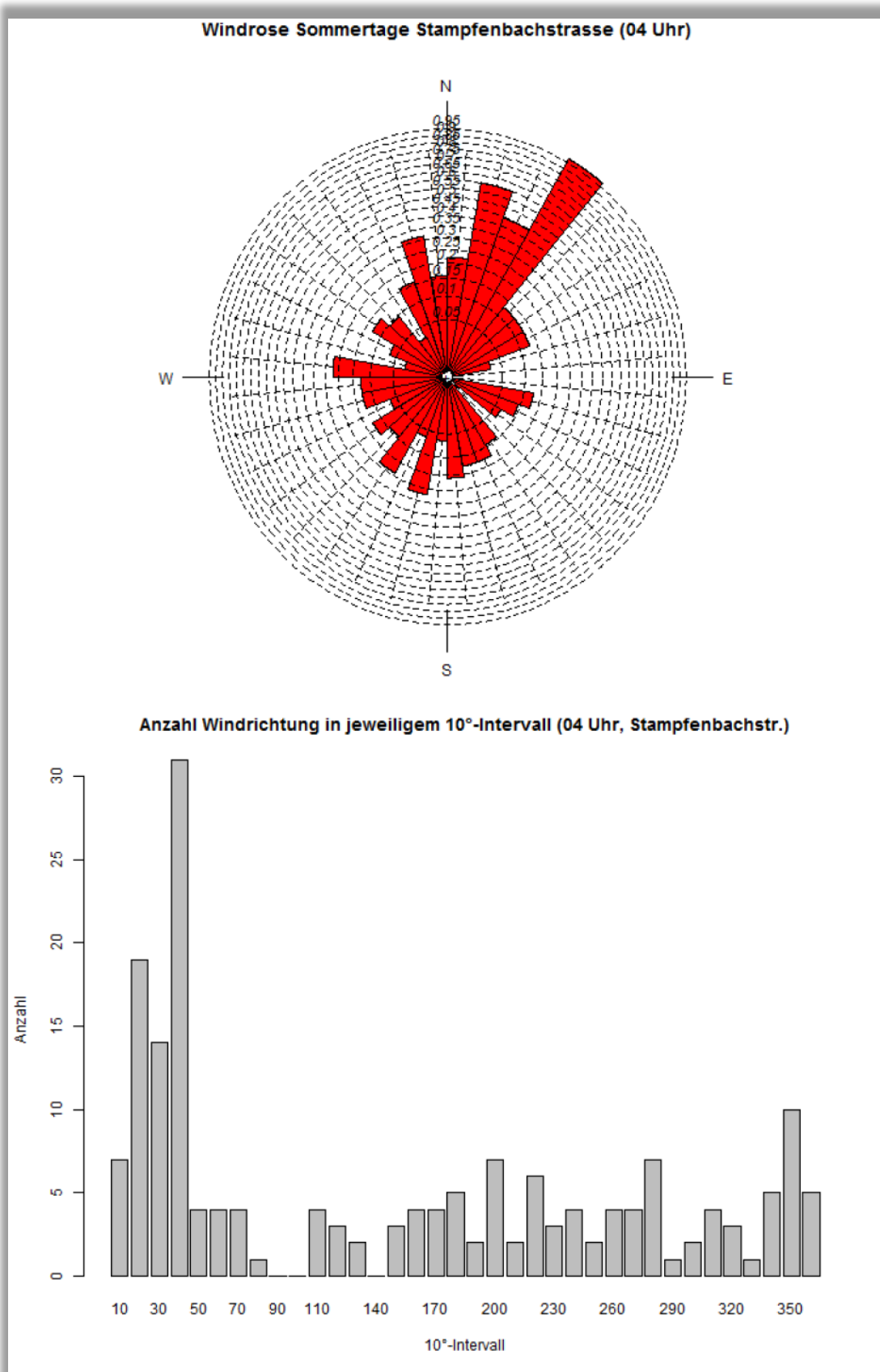


Abb. 3.6: Vorherrschende Windrichtung an Sommertagen an der Station Stampfenbachstrasse (urban) um 04 Uhr als Windrose und als Histogramm

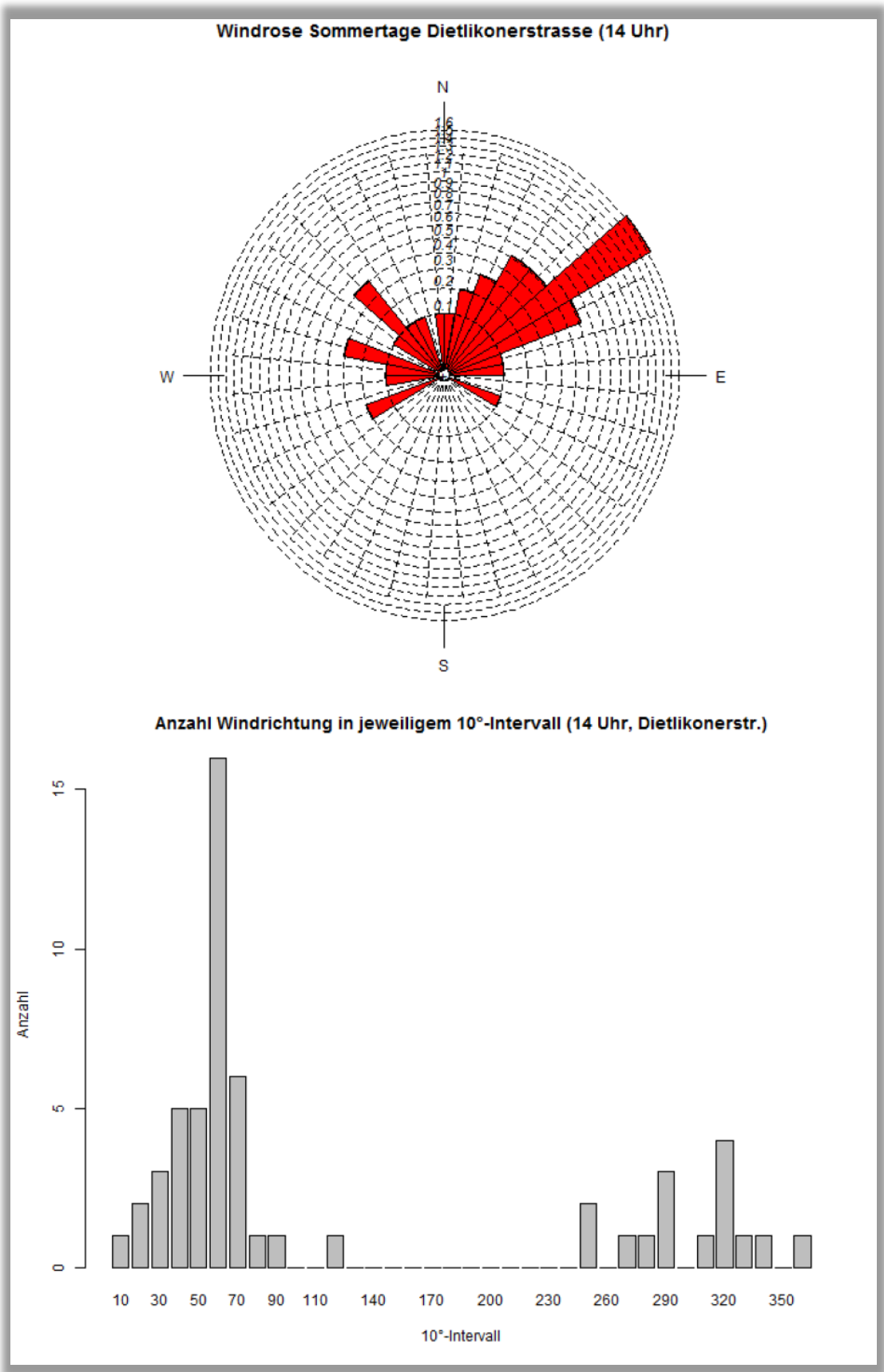


Abb.3.7: Vorherrschende Windrichtung an Sommertagen an der Station Dietlikonerstrasse (urban) um 14 Uhr als Windrose und als Histogramm

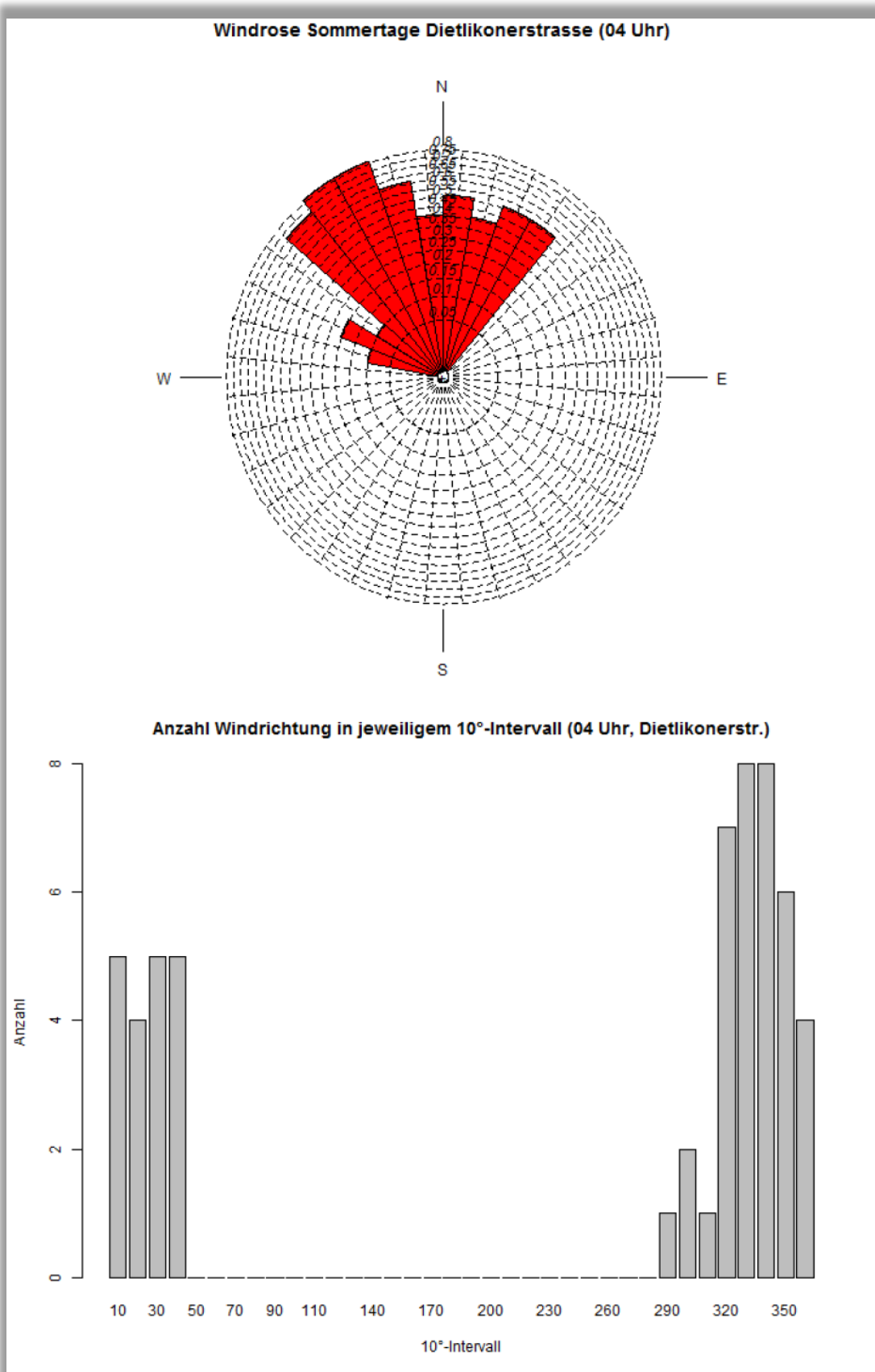


Abb. 3.8: Vorherrschende Windrichtung an Sommertagen an der Station Dietlikonerstrasse (urban) um 04 Uhr als Windrose und als Histogramm

3.4.5 Berg-Tal-Vergleich der Stationen „Bachtel Turm“, „Wald Höhenklinik“ (Berg) und „Rapperswil Tüchelweier“ (Tal)

Neben dem rural-urbanen Temperatur- und Windvergleich bietet sich ein solcher auch für Berg- und Talstationen an. Hierfür werden die Stationen „Bachtel Turm“ (Station 3 aus Abb. 3.4) und „Wald Höhenklinik“ (Station 5 aus Abb. 3.4) als Bergstationen und „Rapperswil Tüchelweier“ (Station 4 aus Abb. 3.4) als Talstation betrachtet, wobei deren Werte jedoch nicht mehr als Antrieb in die Modellsimulationen einfließen. Die Talstation Rapperswil Tüchelweier befindet sich ausserhalb des Kantonsgebiets Zürich – in St. Gallen – bietet sich aber aufgrund seiner Tallage und der Nähe zu den beiden auf dem Zürcher Oberland befindlichen Bergstationen Bachtel Turm und Wald Höhenklinik als Vergleichsstation an. Da die Station Bachtel Turm zwar den gleichen Messzeitraum aufweist, allerdings über keinerlei Winddaten verfügt, wurde mit der Station der Höhenklinik in der Gemeinde Wald eine zusätzliche Station für den Klimavergleich Berg-Tal herangezogen. Zu beachten ist bei letztgenannter, dass deren Messzeitraum erst im Jahr 2008 beginnt.

Parameter	Bachtel Turm (Berg, 14 Uhr)	Bachtel Turm (Berg, 04 Uhr)	Wald Höhenklinik (Berg, 14 Uhr)	Wald Höhenklinik (Berg, 04 Uhr)	Rapperswil Tüchelweier (Tal, 14 Uhr)	Rapperswil Tüchelweier (Tal, 04 Uhr)
Mittlere Temperatur	22.0 °C	17.8 °C	25.5 °C	20.0 °C	30.2 °C	19.5 °C
Mittlere Windgeschwindigkeit	---	---	1.55 m/s	1.09 m/s	1.50 m/s	0.50 m/s

Tab. 3.2: Mittlere Temperatur und Windgeschwindigkeit um 14 Uhr und 04 Uhr an den Ergänzungsreferenzstationen.

Ein Vergleich der Station 3 (Rapperswil-Tüchelweier) mit den Referenzstationen 1 und 2, welche ebenfalls Talstationen sind, zeigt ein ähnliches Temperaturbild: Tagsüber werden Temperaturen um 30 °C erreicht, während die nächtlichen Temperaturen unter 20 °C verbleiben. Dass die Temperaturen tagsüber nochmals um ca. 2 K grösser sind als bei den Stationen 1 und 2, obwohl Station 3 in der Nähe des Zürichsees liegt, verwundert nur auf den ersten Blick. Einerseits schafft es der schwache, im Mittel bei 1.5 m/s liegende, überwiegend nord- bis südwestliche Wind aufgrund diverser Hindernisse nicht, kühlere Luftmassen vom See in Richtung der Messstation zu transportieren. Andererseits liegt die Messstation im stark versiegelten Raum, zwischen einem Parkplatz, der dreispurigen „Neue Jonasstrasse“, und unweit von drei- bis siebengeschossigen Bauten, wodurch sich gerade am Tage die umgebende Luft stark erhitzt. Nachts wird die im asphalt- und betonartigen Baumaterial gespeicherte Wärme dann mit einer ähnlich hohen Intensität an die Umgebung abgegeben, wie im Zürcher Stadtzentrum (Station 1).

Station	Zürich, Stampfenbachstr.	Wallisellen, Dietlikonerstr.	Bachtel Turm	Rapperswil, Tüchelweier	Wald, Höhenklinik
Nummer	1	2	3	4	5
Höhe ü. NN.	438 m	468 m	1114 m	416 m	910 m
Messzeitraum für Untersuchung	01.01.1993- 31.12.2015	01.01.1993- 31.12.2007	01.01.1993- 31.12.2008 (keine Winddaten)	11.01.2007- 31.12.2015 (nur ungera- de Jahre)	01.01.2009- 31.12.2015

Tab. 3.3: Höhe der einzelnen Stationen über Normalnull

Die höchste nächtliche Mitteltemperatur wird wider Erwarten auf der Bergstation Wald-Höhenklinik (Station 5) mit 20.0 °C erreicht. Ein Grund hierfür könnte die im Vergleich zu den anderen Stationen um ca. 15 Jahre verkürzte Messreihe sein. Da der Klimawandel in den letzten Jahrzehnten immer weiter voranschritt, fehlen in dieser Messperiode nominell kühlere Jahre. Weitere Gründe könnten die Temperaturinversion mit bodennah kühlerer Luft aber auch die nahegelegenen Parkplatz- und Strassenflächen sein, die gespeicherte Wärme in der Nacht an die Umgebungsluft abgeben.

Am Tage zeigt sich die mittlere Lufttemperatur an (Berg-)Station 5 mit 25.5 °C um 4.7 K tiefer als die Temperatur der Talstation in Rapperswil. Da erstere etwa 500 m höher liegt (s. Tab. 3.3), passt diese Beobachtung zum trockenadiabatischen Temperaturgradienten, der eine Abnahme der Lufttemperatur mit der Höhe von etwa 1 K pro 100 m beschreibt. Bachtel Turm, das sich nochmals ca. 200 m höher befindet, weist mit vergleichsweise kühlen 22 °C im Hinblick auf die beiden tiefer gelegenen Stationen 3 und 5 einen grösseren Temperaturgradienten auf. Dieser lässt sich dadurch erklären, dass die Station „Bachtel Turm“ inmitten einer Wiese und umringt von grossen Bäumen aufgestellt wurde, welche am Tag ein starkes Aufheizen umgebener Flächen durch ihre Schattenwirkung verhindern.

Die Auswertung der Strömungsrichtungen analog zu Kap. 3.4.4 ergibt, dass sowohl Station 4 (250 °) als auch Station 5 (270 °) gegen 14 Uhr westliche Hauptanströmrichtungen haben. Dabei zeigt sich allerdings, dass die weit weniger urban geprägte Station Wald eine viel geringere Wertestreuung aufweist als die städtische Station Tüchelweier. In der Nacht (4 Uhr) dreht sich diese auf Ost um (Station 4: 90 °, Station 5: 90-100 °). Allgemein ist die Streuung der Windrichtung infolge der geringen Windgeschwindigkeiten um 1 m/s und darunter recht gross.

4. Ergebnisse der Klimamodellierung

Im Folgenden werden die Modellergebnisse zu den Parametern Lufttemperatur bzw. Physiologisch Äquivalente Temperatur in 2 m Höhe, Kaltluftströmungsfeld sowie Kaltluftvolumenstrom erläutert. Als meteorologische Rahmenbedingung wurde eine austauscharme Wetterlage zugrunde gelegt, da sich die stadtklimatischen Effekte vor allem während windschwacher Strahlungswetterlagen im Sommer entwickeln. Auslöser dieser Prozesse sind die Temperaturunterschiede zwischen vergleichsweise warmen Siedlungsräumen und kühleren vegetationsgeprägten Freiflächen. Die ausgewerteten Referenzstationen wurden sowohl für den Modellantrieb als auch für die Validierung der Ergebnisse herangezogen (Kap. 3.4).

4.1 Nächtliches Temperaturfeld

Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher i.d.R. einen ausgeprägten Abfall während der Abend- und Nachtstunden. Dieser erreicht kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages ein Maximum. Das Ausmass der Abkühlung kann, je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage des Standorts und landnutzungsabhängigen physikalischen Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften, grosse Unterschiede aufweisen. Besonders auffällig ist das thermische Sonder-klima der Siedlungsräume mit seinen gegenüber dem Umland modifizierten klimatischen Verhältnissen.

Das Ausmass der Temperaturabweichung im **Siedlungsbereich** ist vor allem von der Grösse der Stadt und der Dichte der Überbauung abhängig. Doch auch über **grünbestimmten Flächen** weisen Luftvolumina keinen einheitlichen Wärmezustand auf. Die Abkühlungsrate natürlicher Oberflächen wird insb. von ihren thermischen Bodeneigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) sowie eventuell vorhandenen Oberflächenbedeckungen bestimmt (Bewuchs, Laubstreu, etc.). Dynamische Luftaustauschprozesse zwischen den Flächen, das Relief in Form von Geländehöhe, Exposition sowie Geländeneigung und die Lage im Mosaik der Landnutzungen üben weiteren Einfluss aus (bspw. macht es einen Unterschied, ob sich eine Freifläche neben einem Gewässer, Waldgebiet oder dicht versiegelten Bereich befindet).

Eine Sonderstellung nehmen Wald- und Gewässerflächen ein. Der gedämpfte, insgesamt vermittelnde Tagesgang der Temperatur im **Wald** beruht zu einem grossen Teil auf dem zweischichtigen Strahlungsumsatz zwischen Atmosphäre und Kronendach sowie zwischen Kronendach und Stammraum. Grössere Waldgebiete sind wichtige Frischluftproduktionsgebiete, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht. Während im Stammraum tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ geringe Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit vorherrschen, treten nachts durch die abschirmende Wirkung des Kronendachs vergleichsweise milde Temperaturen auf. Stadtnahe Wälder können demnach auch am Tage Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen, nachts fällt deren Kaltluftproduktion dagegen geringer aus als über unversiegelten Freiflächen – ausserdem können sie ein Strömungshindernis darstellen. Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wassern, seine besondere Art der Strahlungsabsorption und die im Wasserkörper stattfindenden turbulenten Durchmischungsvorgänge sorgen für eine (von hohen Absolutwerten ausgehend) deutlich verringerte tägliche Temperaturamplitude über grösseren Gewässern. Da hier die Lufttemperaturen im Sommer tagsüber niedriger und nachts höher als in der

Umgebung sind, wirken grössere **Gewässer** auf bebaute Flächen am Tage klimatisch ausgleichend, während sie in der Nacht deren Abkühlung verringern. 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.

Das sich um 4 Uhr in der Nacht einstellende Temperaturfeld im Untersuchungsraum umfasst bei Minimalwerten von 8.6 °C und Maximalwerten von bis zu 20.9 °C eine Spannweite von ca. 12 °C. Die mittlere Temperatur liegt bei den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 16.3 °C. Es zeigt sich insgesamt eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten der Stationen Stampfenbachstrasse und Dietlikonerstrasse. Innerhalb der bebauten Gebiete ist die Temperaturverteilung räumlich differenziert, da Areale mit Einzelhausbebauung, Kernbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen. Im Rahmen der durchgeführten Klimamodellierung weisen die Zürcher Innenstadt sowie grössere Gewerbeflächen die höchsten Temperaturen > 20 °C auf, was mit dem hohen Bauvolumen und der hohen Oberflächenversiegelung von bis zu 95 % einhergeht (Abb. 4.1). Zur Peripherie hin nehmen Bebauungsdichte und auch die Lufttemperatur tendenziell ab, was sich deutlich im Temperaturfeld zeigt. In durchgrünter Bebauung z.B. in Fluntern sind Werte zwischen 17 °C und 18 °C zu beobachten. Innerhalb grösserer Hausgärten gehen die Temperaturen lokal auch weiter zurück. Lokale Kaltluftabflüsse führen zu zusätzlicher Abkühlung.

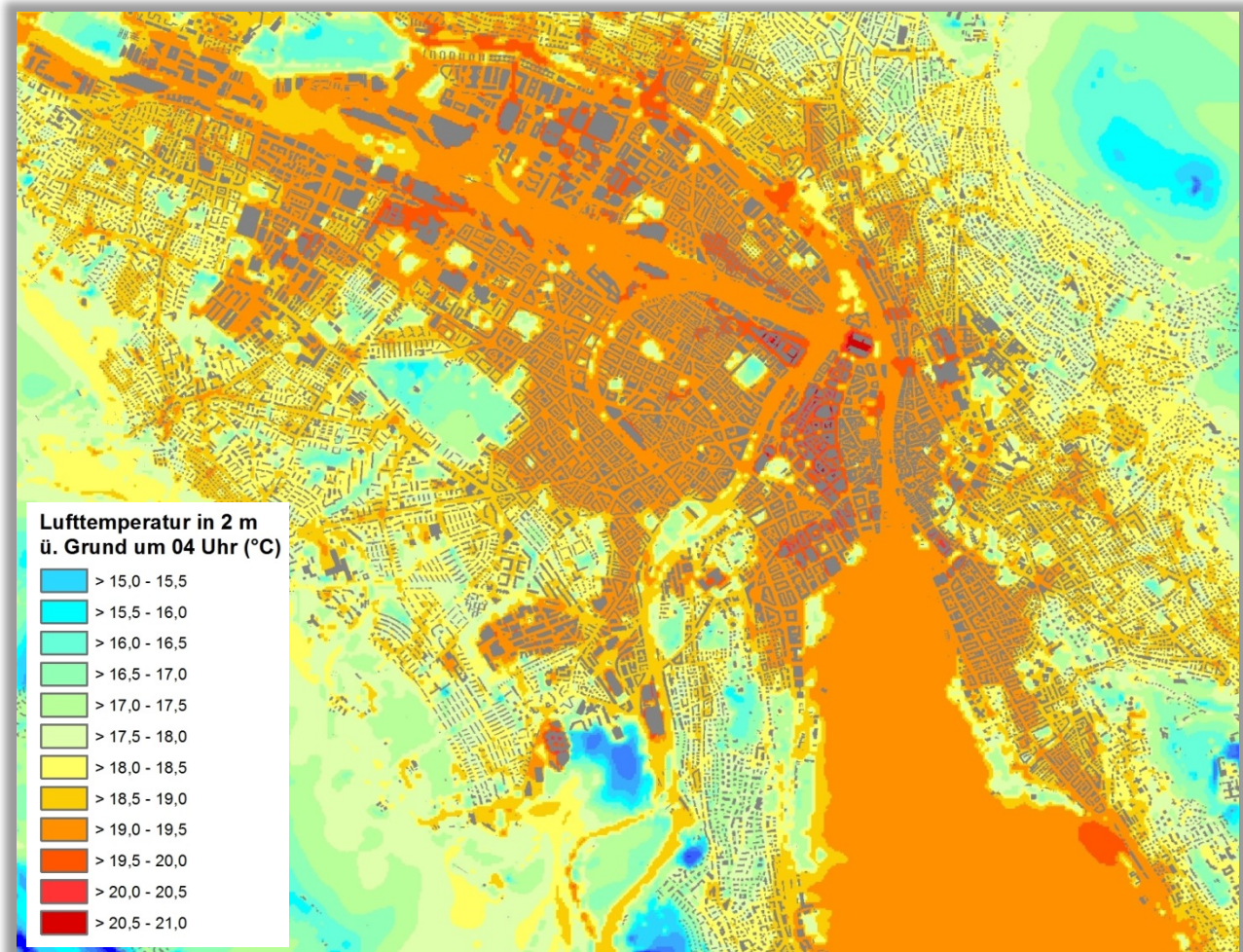


Abb. 4.1: Temperaturfeld im Bereich Zürich/Kernstadt zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

Die innerstädtischen Grünflächen zeichnen sich, abhängig von ihrer Grösse und Lage, mit einem niedrigeren Wertenniveau ab. So weisen die Bäckeranlage und der Alte Botanische Garten Temperaturen zwischen 17 °C und 18 °C auf. Grössere Grünflächen wie der Friedhof Sihlfeld kühlen sich in den Nachtstunden hingegen intensiver ab, was durch einen hohen Rasenanteil noch verstärkt wird. Der einhergehende Abkühlungseffekt ist auch in der direkt angrenzenden Bebauung zu beobachten. Ausserhalb der grossstädtisch geprägten Räume (Stadt Zürich und Winterthur) sind auch in den urban geprägten Siedlungsräumen insgesamt niedrigere Lufttemperaturen anzutreffen. Abb. 4.2 zeigt beispielhaft die Situation im Bereich Bülach, wo lediglich Gewerbeflächen und grössere versiegelte Bereiche mit Werten über 19.0 °C lokal hervortreten.

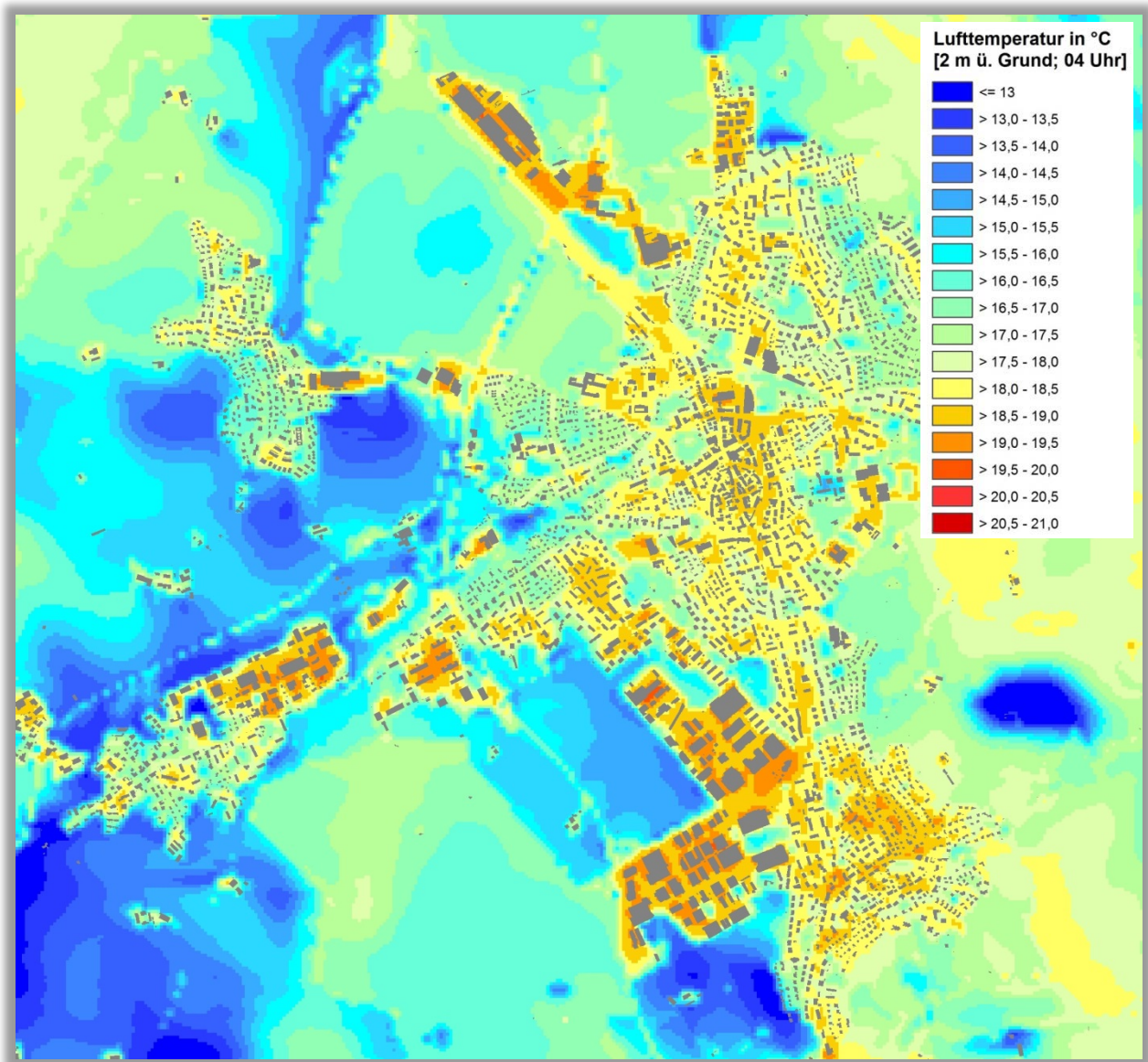


Abb. 4.2: Temperaturfeld im Bereich Bülach zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

Die Abkühlung über den landwirtschaftlich genutzten Flächen ist stark ausgeprägt und führt zu Minimumtemperaturen von weniger als 14.0 °C. In der Ortsmitte sind 18.5 °C bis 19.0 °C zu beobachten, ansonsten dominiert im Siedlungsraum ein Temperaturniveau von 16.0 °C bis 17.0 °C.

4.2 Physiologisch Äquivalente Temperatur

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 abschätzen¹. 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 dem Kanton Zürich 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. 4.1; 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

Tab. 4.1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI 2004)

Zum Zeitpunkt 14 Uhr zeigt sich, dass die auftretende Wärmebelastung am Tage vor allem über die Verschattung beeinflusst wird.

¹ 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).

Eine mässige Wärmebelastung mit einer PET von 29 °C bis 32 °C ist insbesondere unter den grösseren Waldbeständen zu beobachten (grüne Farben; Abb. 4.3). Aber auch im Bereich grösser Baumgruppen von innerstädtischen Grünflächen sind günstige Aufenthaltsbedingungen anzutreffen.

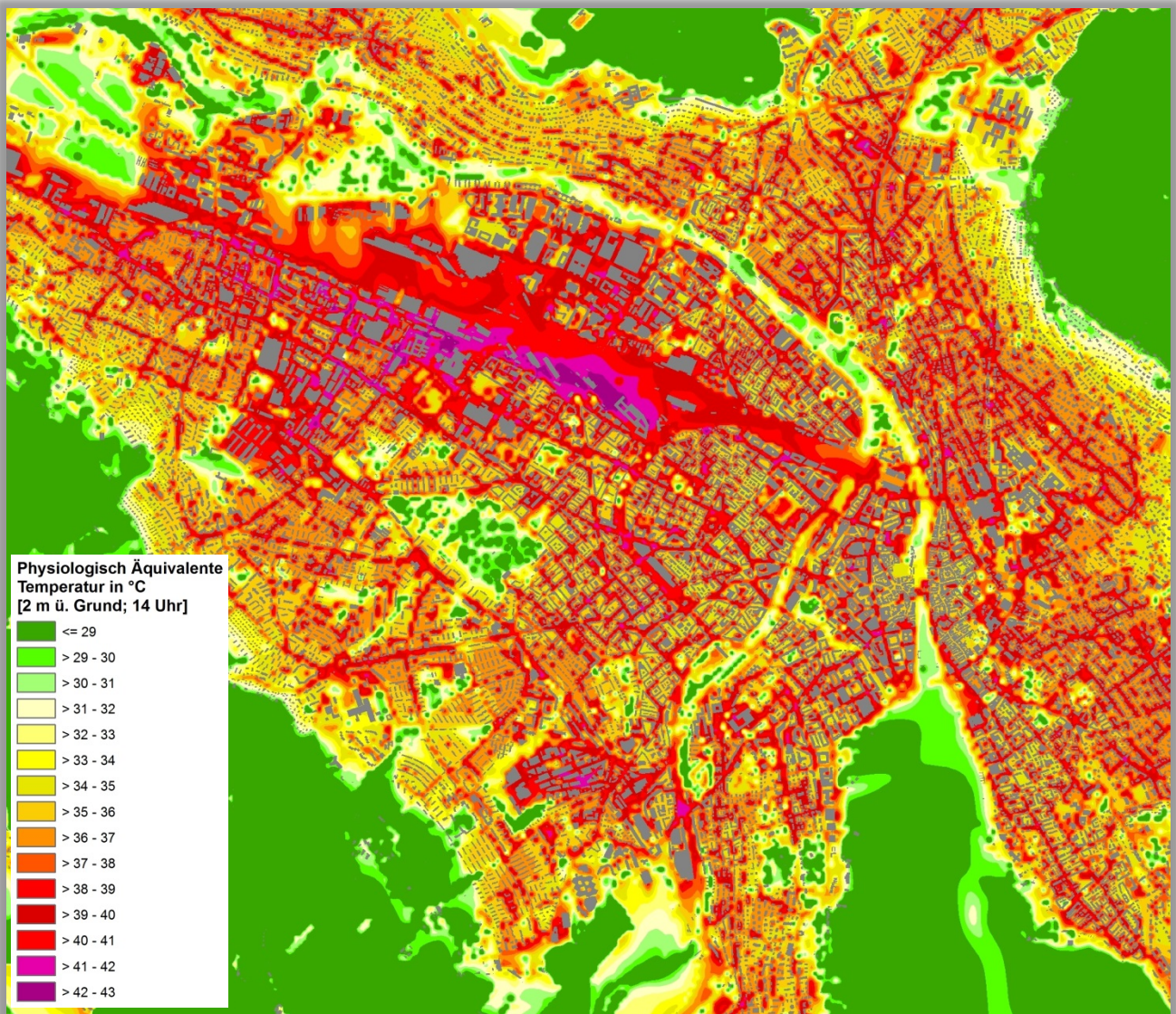


Abb. 4.3: PET im Bereich Zürich/Kernstadt zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags (2m ü. Grund)

Dem stehen die stark besonnten Areale gegenüber, wo die Wärmebelastung mit einer PET von deutlich mehr als 35 °C häufig als stark einzustufen ist (Orange/Rot). Die höchste Belastung tritt im Bereich Güterbahnhof und Hardplatz auf.

4.3 Autochthones Windfeld

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.

Neben den orographisch bedingten Strömungen mit Kaltluftabflüssen bilden sich auch so genannte Flur-/Strukturwinde, d.h. eine direkte Ausgleichsströmung vom hohen zum tiefen Luftdruck aus. Sie entstehen, wenn sich stark überbaute oder versiegelte Gebiete stärker erwärmen als umliegende Freiflächen, und dadurch ein thermisches Tief über den urbanen Gebieten entsteht (vgl. Abb. 4.4).

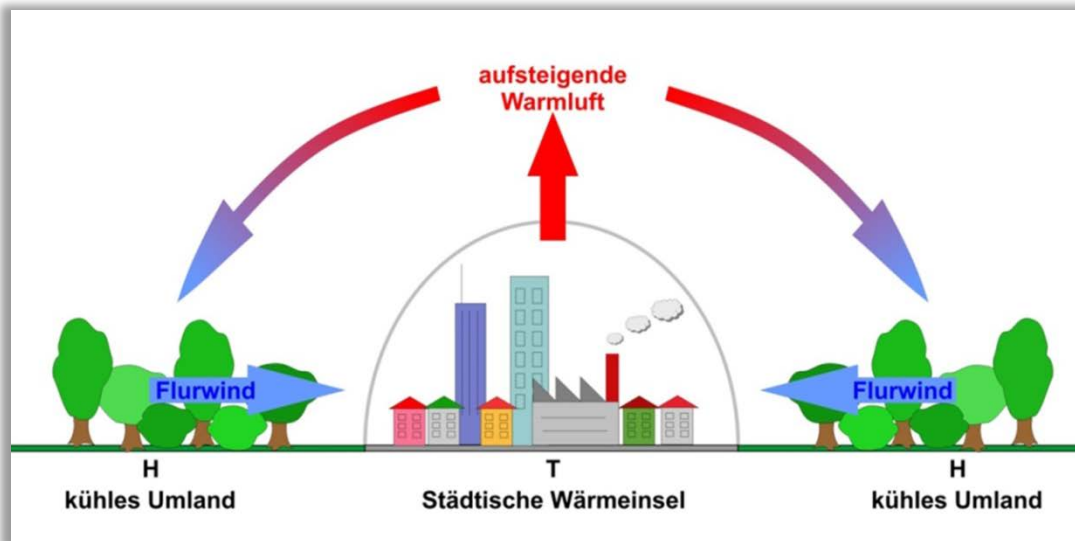


Abb. 4.4: Prinzipskizze Flurwind

Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (u.a. Kiese et al. 1992). Für die Ausprägung dieser Strömungen ist es wichtig, dass die Luft über eine gewisse Strecke beschleunigt werden kann und nicht durch vorhandene Hindernisse wie Bebauung abgebremst wird. Die Flur-/ Strukturwinde sind eng begrenzte, oftmals nur schwach ausgeprägte Strömungsphänomene, die bereits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können. Ihre Geschwindigkeit liegt meist unterhalb von 2 m/s (Mosimann et al. 1999). Im Bereich stärkerer Hangneigungen treten im Untersuchungsraum Kaltluftabflüsse mit Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 3 m/s auf.

Die landnutzungstypischen Temperaturunterschiede beginnen sich schon kurz nach Sonnenuntergang herauszubilden und können die ganze Nacht über andauern. Dabei erweisen sich insbesondere Wiesen- und Ackerflächen als kaltluftproduktiv. Abhängig von den Oberflächeneigenschaften und Abkühlungsraten geht damit die rasche Entwicklung von Kaltluftströmungen einher, die zunächst vertikal nur von geringer Mächtigkeit (5-10 m Schichthöhe) sind und sich zwischen der Vielzahl der unterschiedlich temperierten Flächen ausbilden. Diese kleinskaligen Windsysteme werden im Laufe der Nacht von horizontal und vertikal etwas mächtigeren Flur- und Hangwinden (mehrere Dekameter Mächtigkeit) überdeckt, die zwischen den grossen Freiflächen und überbauten Arealen entstehen.

Den hier beschriebenen Phänomenen kommt eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu: Grössere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis.

Aus diesem Grund sind die Durchlüftung der Stadtkörper und ihr Luftaustausch mit dem Umland generell herabgesetzt. Die Abfuhr von schadstoffbelasteten und überwärmten Luftmassen in den Strassenschluchten kann in Abhängigkeit von der Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen und für Städte in Muldenlage wirken sich diese Faktoren bioklimatisch ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr frischer und kühlerer Luft eine bedeutende klimaökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

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. Die im Bericht beschriebenen Beispiele stehen stellvertretend für zahlreiche ähnliche Situationen im Kanton Zürich.

Das sich zum nächtlichen Analysezeitpunkt ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld stellt Abb. 4.5 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 100 m x 100 m Kantenlänge (entspricht 16 Rasterzellen) aggregiert worden sind. 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 25 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 für das 2 m-Niveau im Bereich Milchbuck beispielhaft wiedergegebenen Strömungsgeschwindigkeiten reichen von vollkommener Windstille bis zu Maximalwerten von 2.0 m/s innerhalb des Irchelparks südlich der Universität Zürich (Dunkelblau). Während innerhalb des östlich vorgelagerten Waldbestands der Stammraum die Ausbildung höherer Strömungsgeschwindigkeiten in Bodennähe unterbindet, zeigt sich am durch Rasen geprägten Randbereich ein flächenhaftes Ausströmen von Kaltluft in die Bebauung, wobei niedrige Bebauung und breite Strassenräume/Abstandsflächen ein Eindringen in die Siedlungsfläche begünstigen. Klimatisch wirksame Kaltluftabflüsse sind zum Beispiel auch über dem Käferberg zu beobachten. Grosse Teile der durch Blockrandbebauung geprägten Wohngebiete werden hingegen nicht nennenswert von Kaltluft durchströmt, da die zunehmende Bebauungsdichte und das im Vergleich zum Freiland höhere Temperaturniveau die Kaltluftströmung abschwächen. Auf gesamtstädtischer Ebene zeigt sich die wichtige Rolle grösserer Grünzüge, da sie die Kaltluft als Leitbahnen tief in die Bebauung heranführen können.

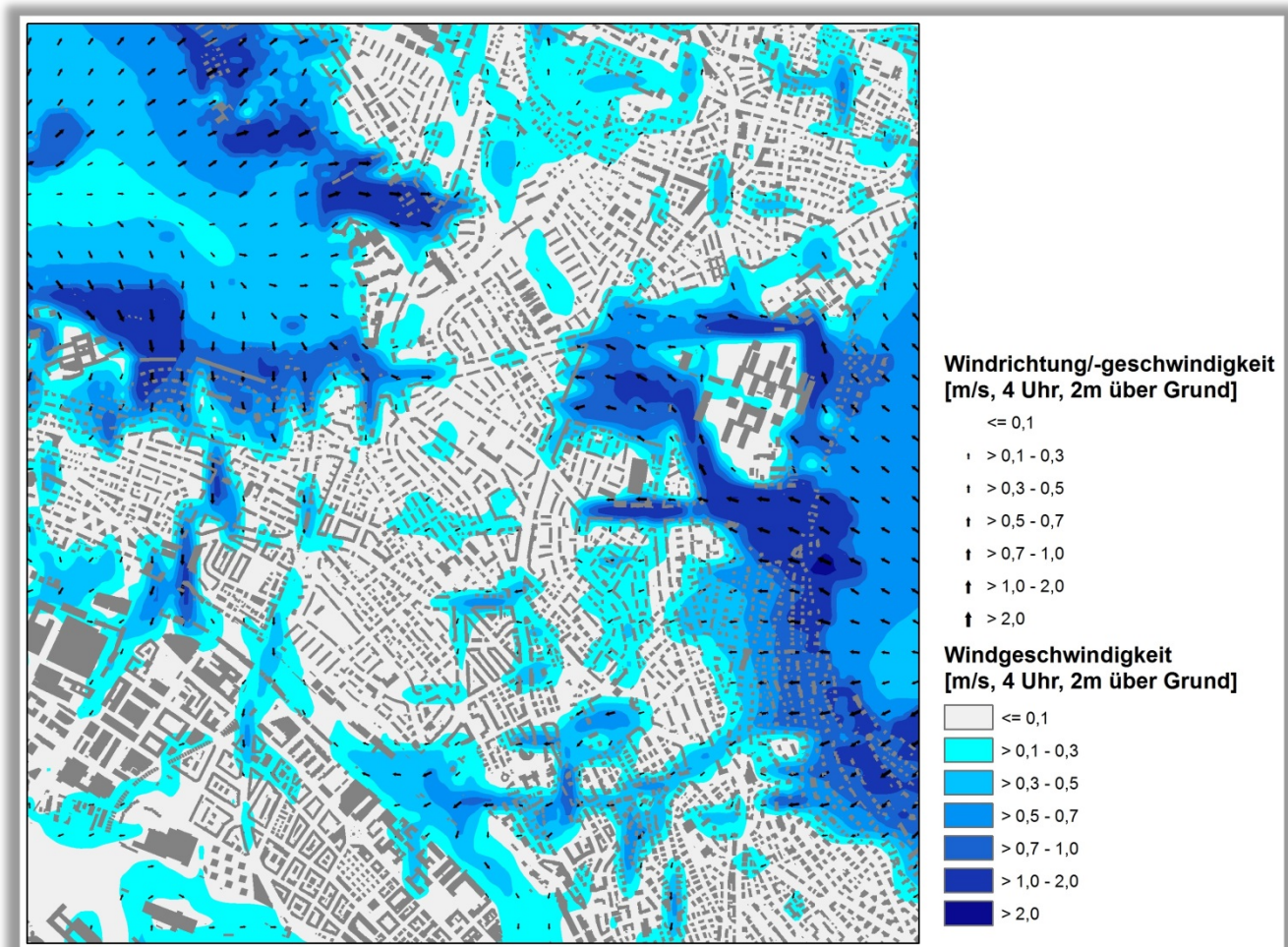


Abb. 4.5: Nächtliches Windfeld im Bereich Milchbuck zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

4.4 Kaltluftvolumenstrom

Wie bereits im Vorkapitel zum autochthonen 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 Mächtigkeit (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht) mitbestimmt wird, wird zur Bewertung der Grünflächen ein weiterer Klimaparameter herangezogen: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom. Für die Auswertung wurde der Zeitpunkt 04 Uhr morgens gewählt, da zu diesem Zeitpunkt die Intensität der Kaltluftströme voll ausgeprägt ist.

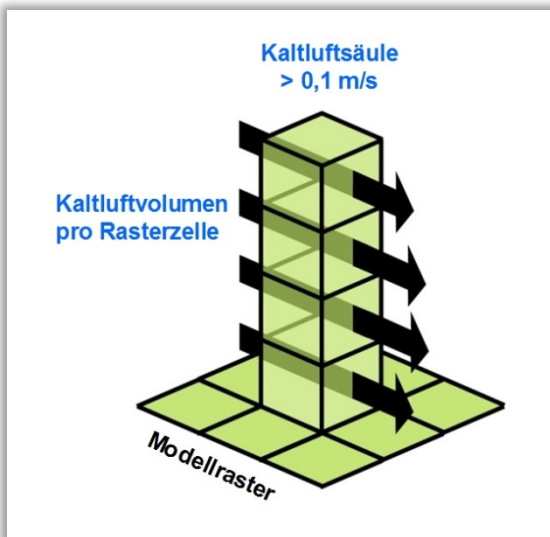


Abb. 4.6: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

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 durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt. Für die dargestellten Werte bedeutet dies folgendes: Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite, ist der resultierende

Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstromdichte aufzufassen. Diesen Wert kann man sich leicht veranschaulichen, indem man sich ein 25 m breites, quer zur Luftströmung hängendes Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht² bis hinab auf die Erdoberfläche reicht (Abb. 4.6). Bestimmt man nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft, erhält man die rasterbasierte Volumenstromdichte. Der Volumenstrom ist damit ein Mass für den Zustrom von Kaltluft und bestimmt somit, neben der Strömungsgeschwindigkeit, die Größenordnung des Durchlüftungspotenzials.

STANDARDISIERUNG DES KALTLUFTVOLUMENSTROMS (Z-TRANSFORMATION)

Für die qualitative Bewertung von Klimafaktoren bedarf es eines begründeten, nachvollziehbaren Massstabes. Nicht immer ist ersichtlich, aufgrund welcher Kriterien eine Klassifizierung in Kategorien wie „Hoch“ und „Niedrig“ oder „Günstig“ und „Ungünstig“ erfolgt ist. In der VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1 (VDI 2008) wird daher vorgeschlagen, für eine Beurteilung das lokale oder regionale Wertenniveau einer Klimaanalyse zugrunde zu legen und die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab heranzuziehen.

Wünschenswert wäre zudem, die Beurteilungskriterien sowohl mit der Ausprägung zusätzlich modellierter Variablen als auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichen zu können. Um eine solche Vergleichbarkeit herzustellen, wurde der Parameter Kaltluftvolumenstrom über das Verfahren der z-Transformation standardisiert³. Bei einer z-Transformation wird das arithmetische Gebietsmittel des Parameters zunächst gleich Null gesetzt, anschliessend werden die Originalmasseinheiten der um dieses Gebietsmittel streuenden Werte in Vielfache der Standardabweichung umgerechnet. Hieraus ergeben sich vier Bewertungskategorien, deren Abgrenzung durch den Mittelwert Null sowie die einfache positive und

² Die Schichtgrenze wird dort angesetzt, wo die horizontale Fließgeschwindigkeit nicht höher als 0,1 m/s wird

³ Rechnerisch wird dabei von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt

negative Standardabweichung von diesem Mittelwert festgelegt ist (standardmässig vier Bewertungskategorien durch Mittelwert, obere und untere S_1 -Schranke; s. Abb. 4.7).

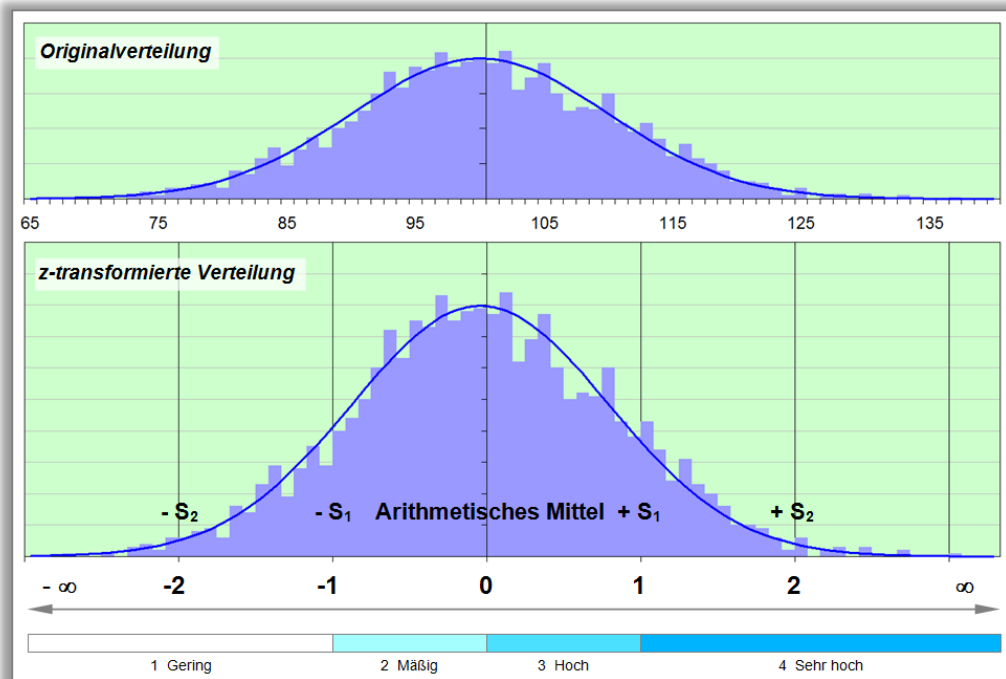


Abb. 4.7: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern

Die Klassifizierung des flächendeckenden Volumenstroms orientiert sich somit am auftretenden Wertespektrum innerhalb des Kantonsgebietes. Die daraus abgeleitete qualitative Bewertung dieser meteorologischen Grösse zeigt Tab. 4.2.

Mittlerer z-Wert	Bewertung	Kaltluftvolumenstrom in m^3/s um 04:00 Uhr
> 1	Sehr hoch	> 2020
> 0 bis 1	Hoch	2020 bis \geq 1225
> -1 bis 0	Mässig	1225 bis \geq 425
bis -1	Gering	< 425

Tab. 4.2: Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms

Ausgehend vom der gebietstypischen Ausprägung im Untersuchungsraum wird als Schwellenwert für einen klimaökologisch wirksamen Kaltluftstrom ein Wert von mindestens $425 m^3/s$ 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. 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 – wobei die Kaltluft selber auf alle diese Parameter modifizierend einwirken kann. Gebäude, Mauern oder Strassendämme können als Strömungshindernisse wirken und luvseitig markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von grösseren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strömungsmaxima stehen kann.

Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebautes Gebiet hängt wesentlich von der Siedlungsgrösse, Bebauungsdichte, anthropogenen Wärmefreisetzung und der Menge einströmender Kaltluft ab. Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum geht im Wesentlichen mit der des bodennahen Strömungsfeldes einher. Abbildung 4.8 zeigt den Kaltluftstrom für den Ausschnitt Zürich/westliche Kernstadt in einer qualitativen Abstufung. Ausgehend vom Uetliberg sind intensive Kaltluftabflüsse zu beobachten, welche weit in die Bebauung einwirken. Analog zur Strömungsgeschwindigkeit treten die höchsten Werte meist über den mit Rasen bewachsenen und gut überströmbaren Hangbereichen auf.

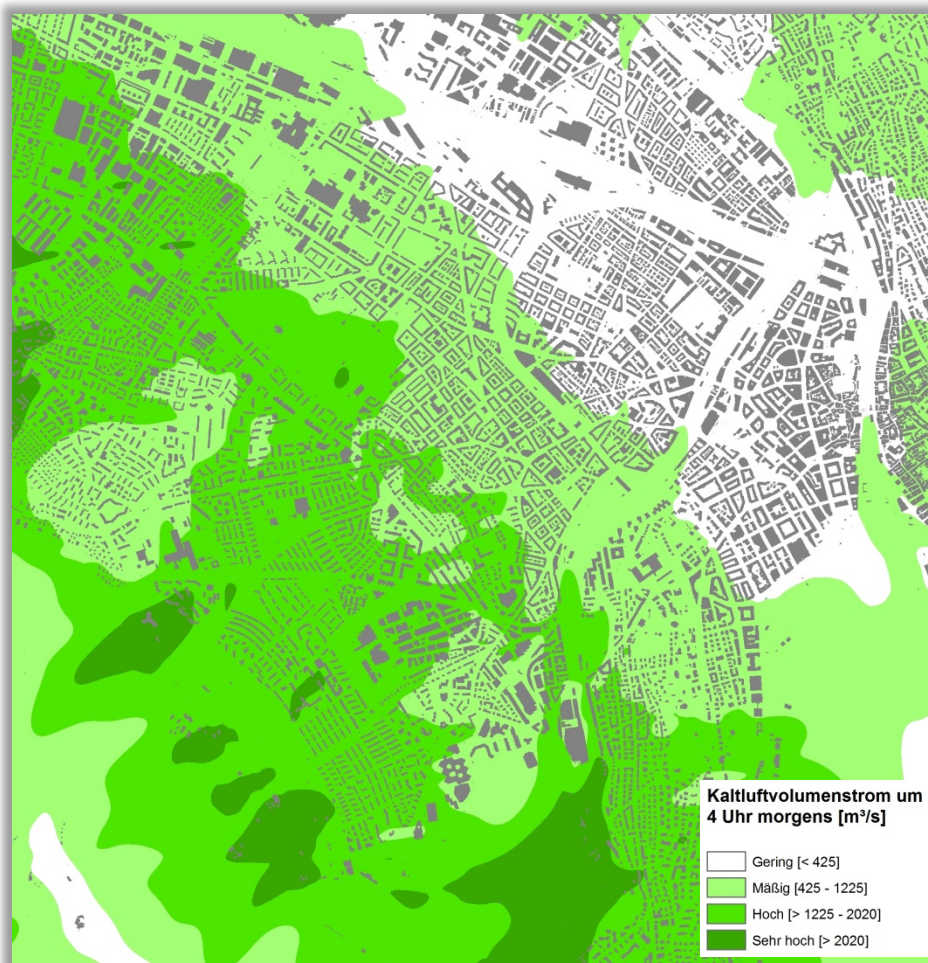


Abb. 4.8: Kaltluftvolumenstrom im Bereich Zürich/westliche Kernstadt zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

Insbesondere entlang von Grünachsen dringt die Kaltluft auch in die Bebauung ein und kann dort die thermische Belastung senken. Im Laufe einer (autochthonen) Sommernacht steigt die Kaltluftmächtigkeit

i.d.R. an, sodass geringe Hindernisse überwunden werden können. Beispielsweise können einzelne Grünflächen, die zwar nicht zusammenhängen, aber räumlich naheliegen und durch nur wenige Hindernisse getrennt sind, als „Trittsteine“ für Kaltluft dienen. Folglich sind die in das Siedlungsgebiet reichenden Kaltluftvolumenströme ausgeprägter als die bodennahen Windgeschwindigkeiten in der Darstellung des Kaltluftströmungsfeldes.

5 Modellierung von Klimawandelszenarien nach der ENVELOPE-Methode

5.1 Vorgehensweise

Die räumlich hochaufgelöste Analyse des Zürcher Stadtklimawandels erfolgt auf Basis des Methodenpakets ENVELOPE. Das Paket koppelt das mesoskalige Stadtklimamodell FITNAH-3D mit den aktuellsten Ergebnissen regionaler Klimamodell-Ensemble Rechnungen und erlaubt auf diese Weise die numerische Simulation stadtklimatisch relevanter Parameter. Diese können mithilfe eines Geographischen Informationssystems visualisiert werden.

Entsprechend des Projektansatzes werden sich die Modellanalysen auf den thermischen Wirkungskomplex beziehen und räumlich differenzierte Informationen zur zukünftigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit ausgewählter klimatologischer Kenntage bereitstellen. Aus dem Vergleich mit den Daten für die aktuelle Klimanormalperiode 1961-1990, kann das zu erwartende Ausmass des Stadtklimawandels in Zürich räumlich hochaufgelöst analysiert werden. Die Modellrechnungen liefern Ergebnisse in einer einheitlichen horizontalen Auflösung für das gesamte Kantonsgebiet.

Obwohl die Ergebnisse der Regionalen Klimamodelle auf einem, verglichen mit dem globalen Massstab, sehr feinen Rechengitter vorliegen, werden für die Abschätzung von Klimafolgen in der Regel noch detailliertere Aussagen benötigt. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund notwendig, dass regionale Klimamodelle mit einer sehr guten räumlichen Auflösung von gegenwärtig bis zu 12.5 km dennoch nicht in der Lage sind, die relevanten lokalen Handlungsfelder wie fein strukturierte Wälder, unterschiedliche landwirtschaftliche Kulturen oder Städte aufzulösen und in den Klimaprojektionen ausreichend zu berücksichtigen. Diese Aufgabe können mesoskalige und an den entsprechenden Raum angepasste Simulationsmodelle übernehmen. Sie sind aufgrund ihrer höheren räumlichen Auflösung in der Lage, die Vielfalt und Heterogenität der naturräumlichen Gliederung einer Landschaft auf die Verteilung der meteorologischen Grössen zu erfassen. Abbildung 5.1 zeigt schematisch den verfolgten Downscaling-Ansatz ausgehend von der globalen Klimaprojektion bis hin zum Stadtklimamodell.

Mesoskalige dreidimensionale Simulationen werden dabei nicht parallel zu einem regionalen Klimamodell ausgeführt, vielmehr erfolgt die Übertragung der regionalen Ergebnisse auf die lokale Ebene durch ein statistisch-dynamisches Verfahren. Dabei werden die grösserskaligen Ergebnisse statistisch ausgewertet und mit den Ergebnissen einer Vielzahl mesoskaliger Simulationen verknüpft. Es werden keine lokalen Klimaszenarienrechnungen für die nächsten Dekaden durchgeführt, sondern die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle „intelligent“ auf kleinere Raumeinheiten interpoliert, wobei eine Berücksichtigung der lokalen Besonderheiten einer Landschaft mit unterschiedlicher Landnutzung und Relief erfolgt.

Ausgehend von einer definierten Fragestellung, werden die Ergebnisse der regionalen Klimaszenarienrechnungen ausgewertet, sodass sie als übergeordnete Eingangsdaten für das mesoskalige Modell verwendet werden können. Beispielhaft soll das Vorgehen anhand der Fragestellungen „Wie ändert sich die Wärmebelastung in Städten in Zukunft (Hitzestress)?“ bzw. „Wie viele Tage mit Hitzestress sind in Zukunft zu erwarten?“ beschrieben werden.

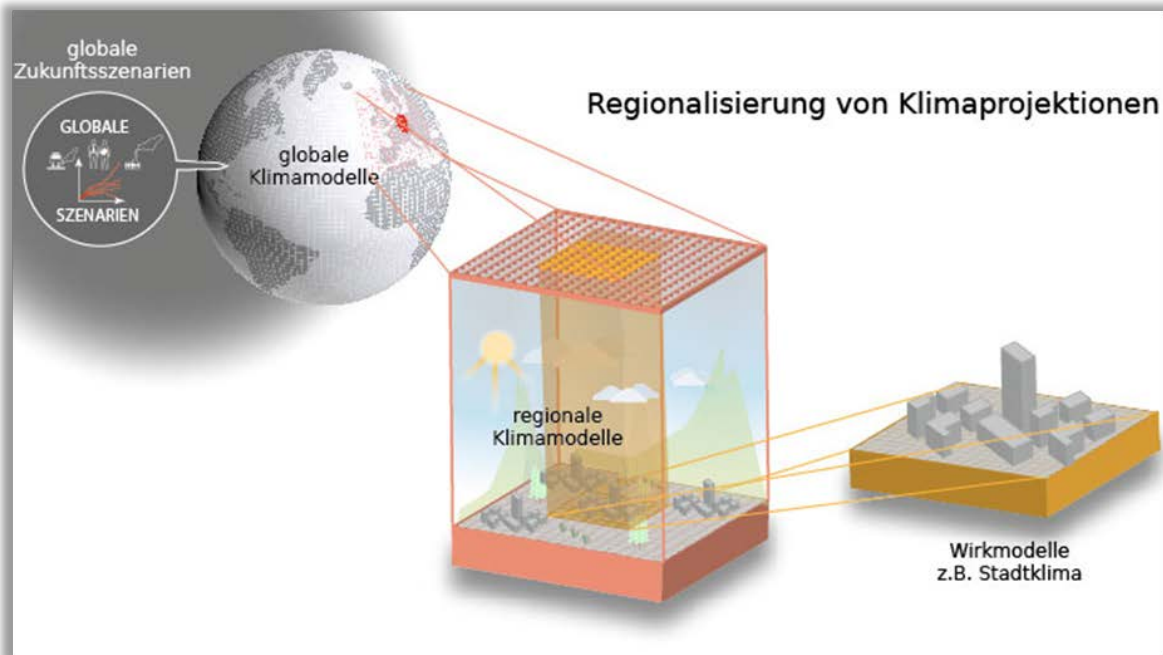


Abb. 5.1: Downscaling globaler Klimaprojektionen über die regionale Skala bis hin zur lokalen Skala (Quelle: DWD 2017)

Zur Beantwortung der Ausgangsfragen kann die Auswertung der regionalen Klimaszenarienrechnungen entsprechend eingengt werden. Regionale Klimamodelle liefern aufgrund interner Variabilität für verschiedene Rechenläufe bei gleichem Emissionsszenario unterschiedliche Resultate. Um sich von den Zufälligkeiten einer bestimmten Realisierung eines regionalen Klimaszenarios zu lösen, ist es daher notwendig, die Ergebnisse dieser Rechnungen statistisch zu analysieren und daraus die notwendigen Eingangsgrößen für das mesoskalige Modell zu generieren. Die aus den Zeitreihen berechneten Häufigkeitsverteilungen für Wind, Temperatur und relativer Feuchte liefern neben der Aufteilung in entsprechende Werteabschnitte auch die Eckpunkte innerhalb derer sich die regionalen Ergebnisse für alle Tage der nächsten 100 Jahre bewegen (niedrigster Wert, höchster Wert; Abb. 5.2).

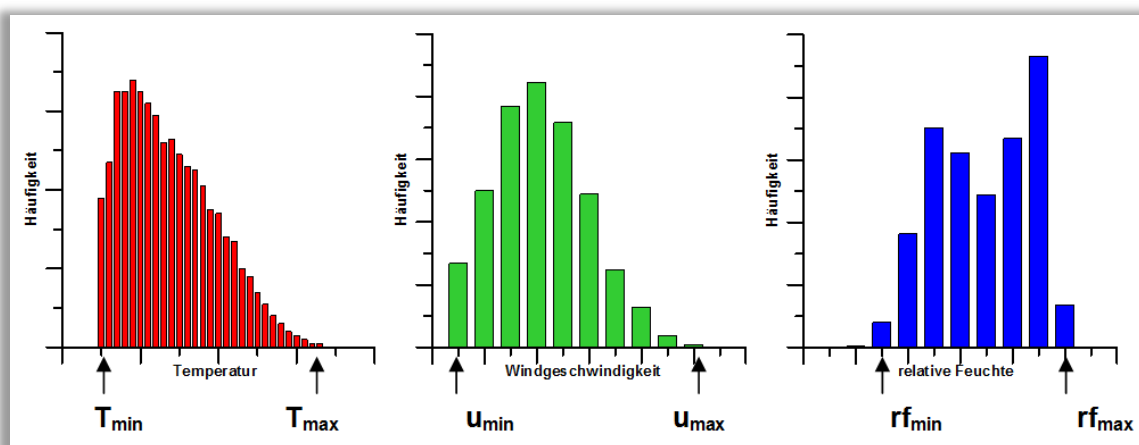


Abb. 5.2: Exemplarische Häufigkeitsverteilungen von Temperatur (T), Windgeschwindigkeit (u) und relativer Feuchte (rf)

Werden diese Auswertungen für die meteorologischen Parameter durchgeführt, spannen die daraus abgeleiteten Extremwerte (Minimum und Maximum) einen Raum auf, in dem alle berechneten regionalen

meteorologische Situationen liegen und von dessen Seitenflächen eingehüllt werden⁴ (Abb. 5.3) - in dem Raum befinden sich nun z.B. alle 14 Uhr-Situationen, die sich in Zukunft im Sommer abspielen (Abb. 5.4). In Anlehnung an ein vom Deutschen Wetterdienst vorgestellten Verfahren, werden für grösserskalige meteorologische Situationen für jeden der acht durch den Würfel definierten Eckpunkte die Verteilungen der lokalen Wind-, Temperatur- und Feuchteverhältnisse mit dem mesoskaligen Modell berechnet (Früh et al. 2011). Dabei bilden die mit dem mesoskaligen Modell berechneten Temperaturen in 2 m über Grund für verschiedene regionale Szenarien die Grundlage für die weitere Bearbeitung (u_{\min} , T_{\min} , rf_{\min} bzw. u_{\max} , T_{\max} , rf_{\max}).

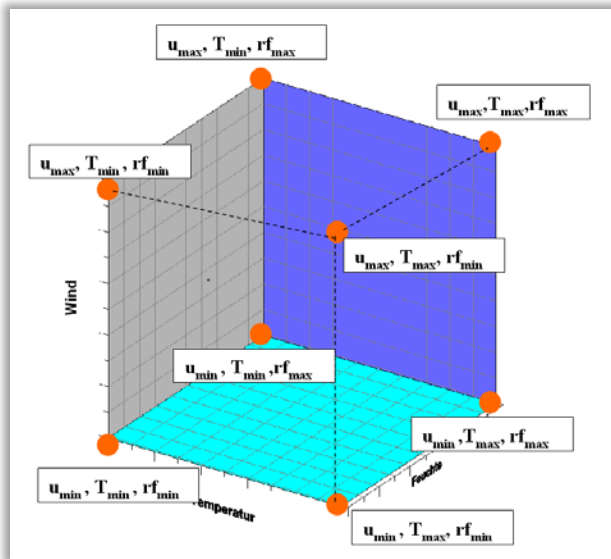


Abb. 5.3: Begrenzungsraum für die ausgesuchten Wettersituationen

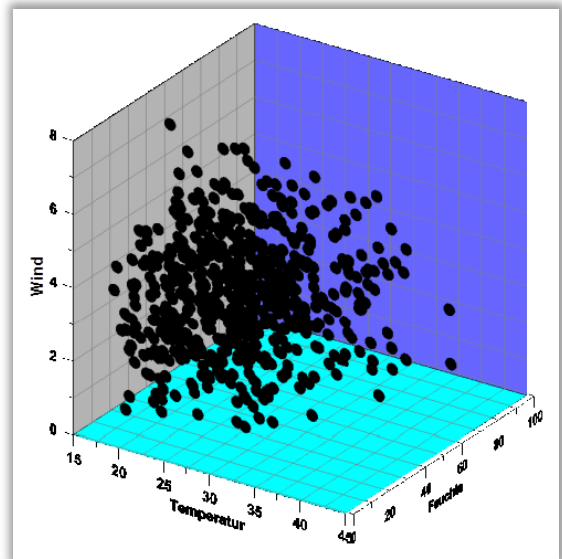


Abb. 5.4: Exemplarische Verteilung der 14 Uhr-Situationen im Zustandsraum

Basierend auf den Häufigkeitsverteilungen der Parameter des Regionalmodells, wird eine grosse Anzahl von meteorologischen Situationen festgelegt (Wetterlagen), die in ihrer statistischen Gesamtheit die Einzelverteilungen wiedergeben. Diese Vorgehensweise befreit von den individuellen Ergebnissen eines Szenarienlaufs des regionalen Modells, die für eine andere Realisierung abweichen können.

Die Bestimmung der Verteilungen von Wind, Temperatur und relativer Feuchte für ein Stadtgebiet und eine bestimmte meteorologische Situation der regionalen Klimarechnung erfolgt nunmehr nicht durch eine eigene mesoskalige Rechnung für diese Wetterlage, sondern aus der anteilmässigen Gewichtung der Resultate der mesoskaligen Simulationen für die acht Eckpunkte des Würfels, der die Gesamtheit aller Wetterlagen des ausgesuchten Zeitabschnittes umspannt (z.B. ein Sommer, eine Dekade, ein Jahrhundert; Abb. 5.5). Dabei wird jeweils eine lineare Änderung vorausgesetzt, was für einzelne, ausgewählte Situationen eine hinreichend genaue Näherung darstellt. Für jeden Tag eines ausgesuchten Zeitfensters kann die räumliche Verteilung von beispielsweise Windgeschwindigkeit, Temperatur und relativer Feuchte in einem Stadtgebiet berechnet und daraus z.B. der PET-Wert als Kriterium für die Wärmebelastung des

⁴ Engl.: „envelope“ = Einhüllende

Menschen abgeleitet werden. Anhand der Einzelergebnisse kann schliesslich die Gesamtzahl der Tage mit Wärmebelastung bzw. Hitzestress pro Jahr bestimmt werden. Wie alle Modelle sind Regionale Klimamodelle Abbilder der Wirklichkeit und nicht „perfekt“. Die Ergebnisse von Klimamodellen beinhalten einen gewissen Anteil an Modellunsicherheit, der aus der Struktur des Modells, den verwendeten Techniken und Ansätzen sowie der Parametrisierung bestimmter Prozesse resultiert. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, nicht nur die Simulationsergebnisse eines Modells, sondern mehrerer Modelle zu verwenden - ein sogenanntes Modellensemble. Diesem Ansatz folgend wurde für die Modellierung der zukünftigen thermischen Belastung im Kanton Zürich auf ein Ensemble bestehend aus 27 Regionalen Klimamodellen zurückgegriffen.

Für die Auswertung der Ergebnisse eines Modellensembles stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. So ist es möglich die Ergebnisse zu aggregieren und einen Ensemble-Mittelwert auszuwerten oder aus den Ergebnissen statistische Werte wie bspw. Quantile abzuleiten. Auch komplexe statistische Ansätze wie z.B. das Bayes-Verfahren werden bei der Auswertung von Modellensembles verwendet (vgl. Fischer et al. 2012). Weiterhin stellt sich die Frage, ob alle Ensemble-Mitglieder gleichberechtigt betrachtet oder eventuell nach ihrer Güte (die wiederum zu definieren wäre) gewichtet werden sollen. Jede Methode hat Vor- und Nachteile, die an dieser Stelle nicht tiefergehend diskutiert werden können.

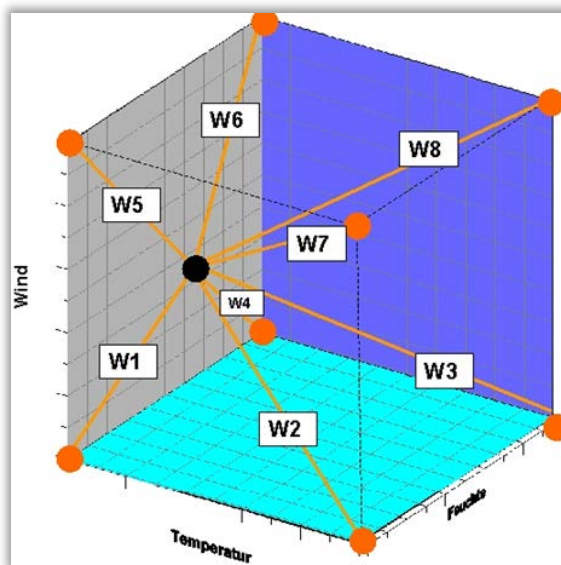


Abb. 5.5: Schema zur Berechnung der meteorologischen Variablen für einzelne Wettersituationen aus den Ergebnissen der acht Basis-Simulationen

5.2 Eingangsdaten

Die Anwendung des Methodenpakets ENVELOPE besitzt die Prämisse der Verfügbarkeit räumlich bzw. zeitlich hochaufgelöster Geo- bzw. Klimainformationen. Im Folgenden wird für beide Eingangsgrößen dokumentiert, welche Daten im Rahmen des Projektes verwendet wurden, um den Klimawandel im Kanton Zürich projizieren zu können.

5.2.1 Geodaten

Zur Modellierung der acht Eckpunkte des ENVELOPE-Würfels mit dem mesoskaligen Klimamodell FITNAH-3D wurden zur Beibehaltung der Konsistenz und Vergleichbarkeit mit den bereits existierenden Analysen zur stadtklimatischen Ist-Situation dieselben Geodaten verwendet, die auch der Stadtklimaanalyse des Kantons Zürich (s. Kapitel 2) zugrunde liegen. Hieraus ergab sich analog eine horizontale räumliche Auflösung der Modellrechnungen von 25 m.

5.2.2 Klimadaten

Für Europa stehen aktuell drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung⁵: RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5. Die Zahl in der Bezeichnung der Szenarien benennt den mittleren Strahlungsantrieb in $W m^{-2}$, der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (Abb. 5.6):

- Das Szenario RCP 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf knapp $3 W m^{-2}$. Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf $2,6 W m^{-2}$. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das $2 ^\circ C$ -Ziel nicht überschreiten (DKRZ 2017).
- RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach nur noch geringfügig bis etwa 2075 steigt und in der Folge stagniert.
- Das Szenario RCP 8.5 weist den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur um ca. $4 ^\circ C$ gegenüber dem Zeitraum 1986-2005 bewirken würde (DKRZ 2017).

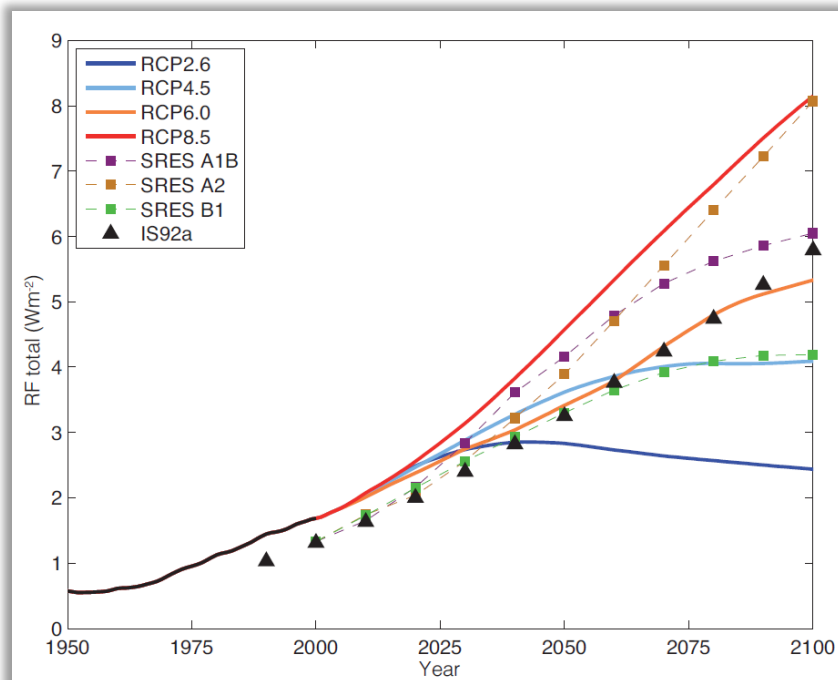


Abb. 5.6: Anthropogener Strahlungsantrieb (RF) verschiedener IPCC-Klimaszenarien (RCP, SRES bzw. IS92a; Quelle: Klimanavigator 2017)

⁵ RCP = Representative Concentration Pathways

Um die zukünftige Entwicklung des Stadtklimas mit dem Methodenpaket ENVELOPE analysieren zu können, werden Daten benötigt, die in hinreichender räumlicher Auflösung Aussagen über die möglichen Eigenschaften des Klimas der nächsten Jahrzehnte zulassen. Dies ist durch die Verwendung Regionaler Klimamodelle möglich, die globalen Klimaszenarien auf die regionale Skala projizieren (Downscaling). Prinzipiell kommen dynamisch-numerische oder empirisch-statistische Downscaling-Verfahren zur Anwendung (Christensen et al. 2007). Beim im Rahmen dieses Projekts verwendeten dynamisch-numerischen Downscaling wird in das grobmaschige Gitter des Globalmodells (GCM⁶) ein wesentlich höher aufgelöstes Gitter des Regionalmodells (RCM⁷) eingebettet und die Atmosphärenphysik unter Verwendung räumlich höher aufgelöster Eingangsvariablen wie Orographie, Boden und Vegetation neu berechnet (vgl. Pavlik et al. 2012). Die Ausgabedaten des Globalmodells dienen dabei als meteorologischer Antrieb an den Rändern des regionalen Gitters. Beim empirisch-statistischen Downscaling werden dagegen statistische Beziehungen zwischen grossräumigen Mustern der globalen Zirkulation und meteorologischen Eigenschaften von Stationsdaten abgeleitet und auf die Ergebnisse der Zukunftsszenarien des jeweils verwendeten GCMs angewendet (vgl. Benestad et al. 2007).

Für die Analyse der zukünftigen thermischen Belastung des Kantons Zürich wurden die Daten eines Ensembles regionaler Klimamodelle von EURO-CORDEX verwendet. EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der CORDEX⁸-Initiative, die regionale Projektionen des Klimawandels für alle terrestrischen Gebiete der Erde im Rahmen des Zeitplanes des fünften IPCC Assessment Reports (AR5; vgl. IPCC 2014a) und darüber hinaus erstellt. Basierend auf einer Vielzahl von Downscaling-Modellen und angetrieben von verschiedenen globalen Klimamodellen generiert EURO-CORDEX dabei z.B. Ensembles von Klimasimulationen für Europa. Wenngleich mit CH2011 auch Klimaszenarien aus der Schweiz vorliegen, stellt EURO-CORDEX die aktuellste verfügbare Datenbasis für den Kanton Zürich dar.

Die Hauptziele der CORDEX-Initiative sind die Bereitstellung eines koordinierten Rahmenwerks zur Modellevaluierung, eines Klimaprojektionsrahmens und einer Schnittstelle für die Nutzer von Klimasimulationen zur Impaktforschung, für Studien der Klimaanpassung und des Klimaschutzes (Giorgi et al., 2009). Die Daten sind für die wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung frei verfügbar und werden im Internet über mehrere Knoten der Earth System Grid Federation (ESGF) bereitgestellt⁹. Verwendet wurden tägliche Daten mit einer räumlichen Auflösung von ca. 12.5 km (0.11 °).

Tabelle 5.1 listet die aktuell verfügbaren Modellrechnungen von EURO-CORDEX auf, die die Grundlage für das zusammengestellte Ensemble bilden. Für die beiden Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 ergeben sich zwölf Kombinationen aus Global- und Regionalmodellen, während für das Szenarium RCP 2.6 drei Modellkombinationen verfügbar sind. Folglich können zur Prognose zukünftiger Klimadaten 27 Modellläufe herangezogen werden (unter Berücksichtigung der drei RCP-Szenarien). Zusätzlich zur Prognose zukünftiger Klimadaten wird unter den Annahmen des jeweiligen Modells auch in die Vergangenheit zurückgerechnet. Dies dient einerseits der Modellvalidierung, andererseits können Aussagen bspw. zur

⁶ Global Climate Model

⁷ Regional Climate Model

⁸ Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment

⁹ Siehe <http://www.euro-cordex.net>

klimawandelbedingten Zunahme verschiedener Parameter immer nur in Relation einer Referenzperiode desselben Modelllaufs getroffen werden. Somit stehen für verschiedene Zeiträume in der Vergangenheit zwölf Modellläufe zur Verfügung (diese sind unabhängig von den drei RCP-Szenarien).

Die Auswahl der entsprechenden Daten aus dem Gitter der Modellsimulationen, welches Europa flächendeckend überspannt, erfolgte durch die Ermittlung der dem Kanton Zürich am nächsten gelegenen Gitterpunkte (Abb. 5.7). Bei der Extraktion von punktbezogenen Klimamolldaten aus einem räumlichen Gitter wird die Einbeziehung der umliegenden Gitterpunkte empfohlen, wobei die Daten der insgesamt 30 Gitterpunkte räumlich gemittelt werden, um eine repräsentative Zeitreihe zu erhalten (DWD 2016). Nach dieser Vorgehensweise wurden die Daten für jedes der insgesamt 27 Ensemble-Mitglieder zusammengestellt und zur Verwendung für das Methodenpaket ENVELOPE aufbereitet.

GCM	RCM	historical	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CNRM-CM5	CCLM	✓	✗	✓	✓
CNRM-CM5	RCA4	✓	✗	✓	✓
EC-EARTH	CCLM	✓	✗	✓	✓
EC-EARTH	RACMO22E	✓	✗	✓	✓
EC-EARTH	RCA4	✓	✓	✓	✓
CM5A-MR	RCA4	✓	✗	✓	✓
HadGEM2-ES	CCLM	✓	✗	✓	✓
HadGEM2-ES	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
HadGEM2-ES	RCA4	✓	✗	✓	✓
MPI-ESM	CCLM	✓	✗	✓	✓
MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
MPI-ESM	RCA4	✓	✗	✓	✓

Tab. 5.1: Mitglieder des für die Zürcher Modellrechnung zusammengestellten Ensembles der Modellsimulationen der EURO-CORDEX Initiative (Stand: 11/2016)

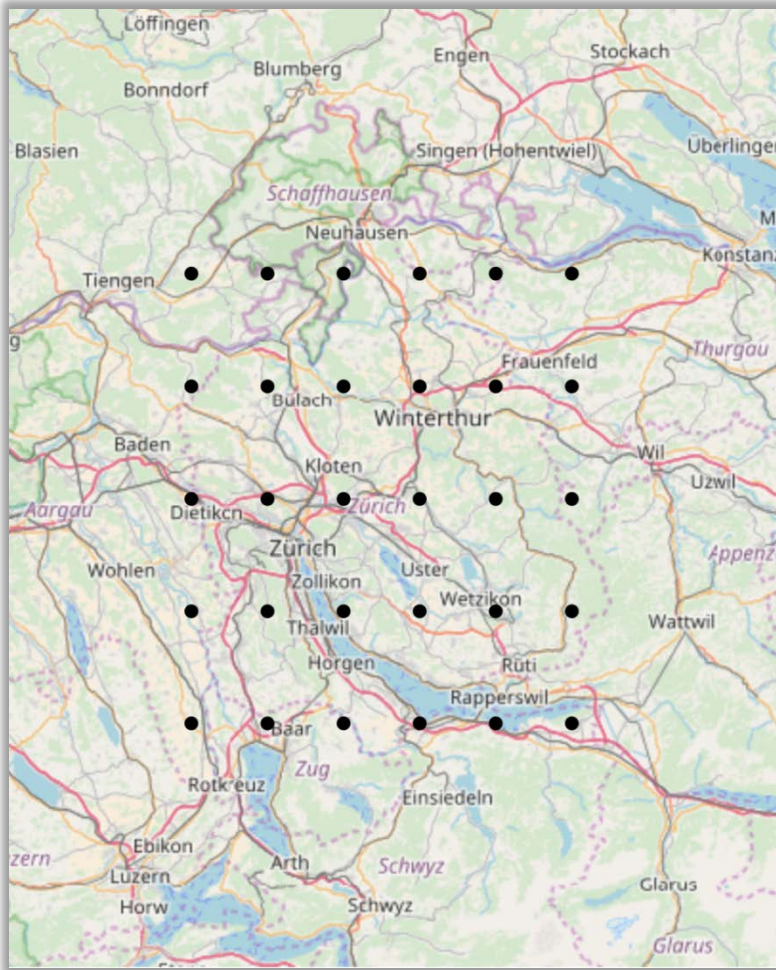


Abb. 5.7: Lage der aus dem Modellgitter ausgewählten Gitterpunkte

5.3 ENVELOPE-Ergebnisse

Um die zukünftige Entwicklung der Intensität der thermischen Belastung im Kanton Zürich räumlich differenziert und akteursgerecht für Politik und Verwaltung abbilden zu können, werden im Folgenden vier langjährige Zeiträume miteinander verglichen:

- die aktuelle Klimanormperiode der WMO 1961-1990 (Referenzperiode),
- die kurzfristige Zukunft p1 im Zeitraum 2021-2040 (Zukunftsperiode I),
- die mittelfristige Zukunft p2 im Zeitraum 2041-2070 (Zukunftsperiode II),
- die langfristige Zukunft p3 im Zeitraum 2071-2100 (Zukunftsperiode III).

Betrachtungsraum ist der freie, nicht von Gebäuden bestandene Raum. Die bioklimatische Situation in den Sommermonaten kann über verschiedene meteorologische Parameter sowie für die Tag- und Nachtsituation ausgedrückt werden. Ausgewertet wurden jeweils die durchschnittlichen jährlichen Auftrittshäufigkeiten innerhalb der 30-jährigen Zeiträume für folgende bioklimatischen Kenngrößen:

- Hitzetage, $T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$,
- Sommertage $T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$,
- PET-Überschreitungstage, $PET > 35 \text{ °C}$ (Tage mit starker Wärmebelastung),
- Tropennächte, $T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$.

Durch die Kombination verschiedener Modellketten und Klimaszenarien, ergeben sich für die Referenzperiode zwölf und für die drei Zukunftsperioden I, II sowie III jeweils 27 Ergebnisse pro Rasterzelle (vgl. Kap. 5.2.2). Damit wird der Wertebereich aller derzeit verwendeter Modelle und Klimaszenarien aufgespannt, welcher über den Median auf einen belastbaren Wert je Periode reduziert wird (vgl. Kap. 5.1).

5.3.1 Hitzetage

Unter Hitzetagen versteht man diejenigen Tage, an denen das Tagesmaximum der Temperatur 30 °C erreicht oder übersteigt. Die Abb. 5.8 zeigt die räumliche Verteilung von Hitzetagen in der Referenzperiode von 1961 bis 1990. Das Auftreten von Hitzetagen steht in starker Abhängigkeit zur Art der Flächennutzung. So weisen hochversiegelte Innenstadtbereiche mit ihrer Zentrums-, Block- sowie Blockrandbebauung die grösste Zahl an jährlichen Hitzetagen auf (durchschnittlich 14.5 in der Referenzperiode). Die an Strahlungstagen meist direkte solare Einstrahlung dringt schnell in die grösstenteils mineralischen Baustoffe ein und sorgt für eine städtische Überwärmung. Auch (versiegelte) Freiflächen weisen daher sehr hohe Werte auf (im Mittel von 11.5 Tage in der Referenzperiode pro Jahr auf Verkehrsflächen bzw. Freiland). Auf Grünflächen sind dagegen deutlich geringere Werte zu beobachten, die insb. auf den Schattenwurf durch Bäume und eine damit reduzierte Einstrahlung zurückzuführen sind. So sind in Waldgebieten allgemein maximal 0,9 und bspw. in den Wäldern des deutlich höher gelegenen Zürcher Oberlandes keinerlei Hitzetage zu verzeichnen. Da der Anteil an aufgelockerter Einzel- und Reihenhausbauung mit dem Verlauf des Zürichsees in Richtung Südosten zunimmt und diese über einen verringerten Versiegelungsgrad und eine vergrösserte Vegetationsfläche verfügt, zeigt sich hier die Zahl der Hitzetage ebenfalls verringert. Zusätzlich trägt der Zürichsee zum einen durch die ohnehin tagsüber kühlere Oberflächentemperatur, zum anderen durch Evaporationsprozesse an der Wasseroberfläche zur Abkühlung der Umgebungsluft bei. Mit 0,3 Hitzetagen pro Jahr zeigen sich die Gewässer im gesamten Kanton sehr kühl.

Dieses Nordwest-Südost-Gefälle der Zahl der Hitzetage ist jedoch nicht nur auf die Art der Landnutzung oder die Reliefsituation zurückzuführen. Die in Kapitel 5.2.2 genannten, insgesamt dreissig in Nord-Süd-Richtung angelegten Gitterpunkte des Regionalmodells sind für den „Antrieb“ des mesoskaligen Modells FITNAH 3D gleichermassen verantwortlich. Weisen folglich zwei benachbarte Gitterpunkte des Regionalmodells grössere Unterschiede auf, werden diese auch auf kleinerer Ebene einen sichtbaren Einfluss zu erkennen geben.

Beim Zoom in die Stadtgrenzen Zürichs hinein zeigt sich an der vergleichsweise hohen Zahl von Hitzetagen einmal mehr die starke Erwärmung der dicht bebauten Zentrumsflächen (s. Abb. 5.9). Auch die Gleisanlagen zwischen den Bahnhöfen Zürich Altstetten und Hauptbahnhof tragen trotz des durch die geringe Rauigkeit gegebenen Potenzials zur verbesserten nächtlichen Durchlüftung nicht zu einer signifikanten Verringerung des täglichen Temperaturmaximums und damit der Hitzetage bei. Deutlich wird hingegen nochmals der enorme Wert innerstädtischer Grünflächen als potenzielles Entlastungsgebiet bei extremer Hitze: Während im Zürcher Stadtzentrum in der Referenzperiode stets bis zu fünf Hitzetage pro Jahr erreicht werden, bleiben diese beispielsweise auf dem Friedhof Sihlfeld oder der Bäckeranlage mit maximal einem Hitzetag im Jahr weitgehend aus. Gleiches gilt für Gewässerflächen, deren Ufer bei grosser Hitze einen ebenso angenehmen Aufenthalt gewährleisten.

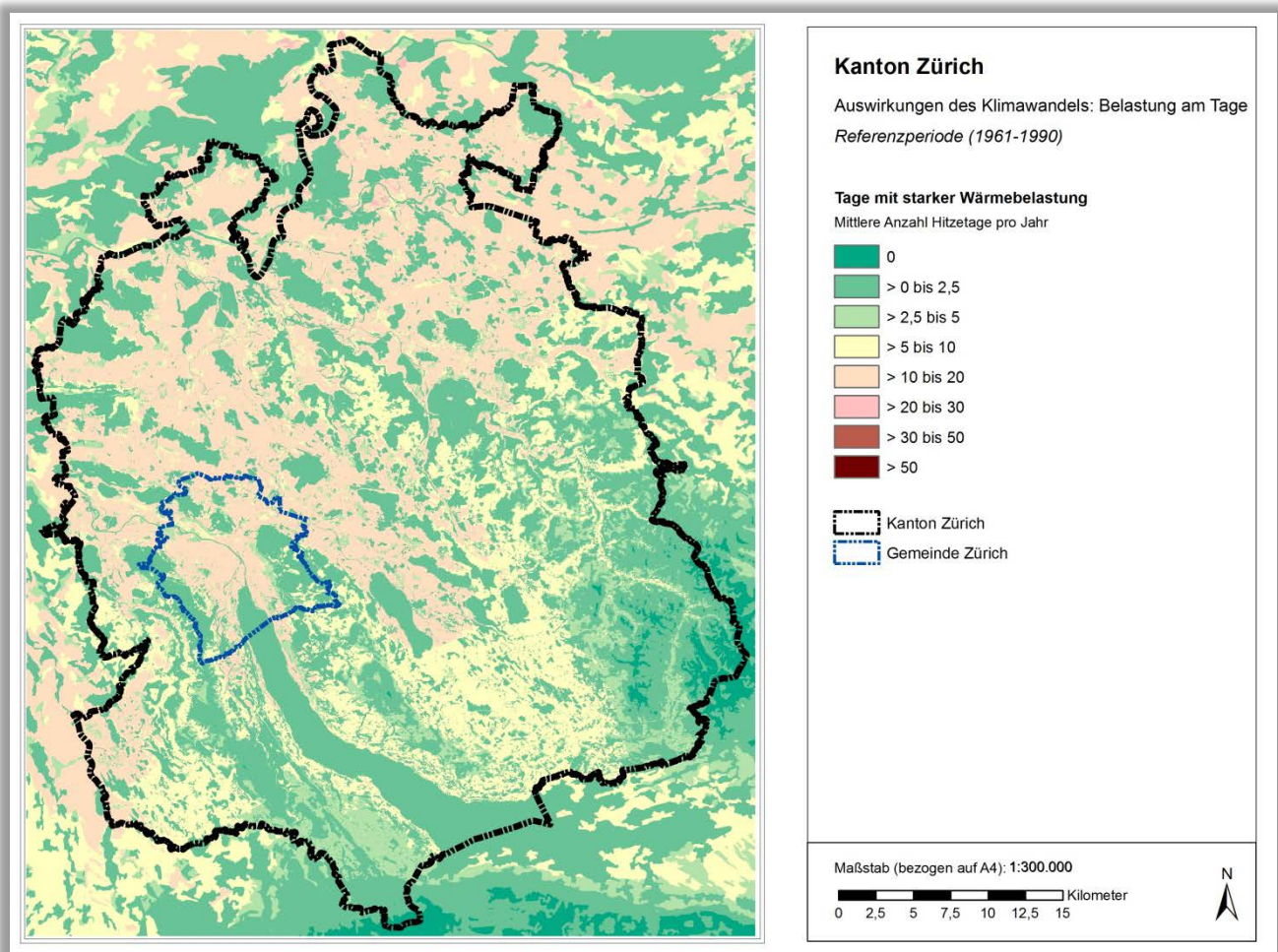


Abb. 5.8: Räumliche Verteilung von Hitzetagen im Kanton Zürich in der Referenzperiode (1961-1990)

Dabei wird deutlich, dass Flächennutzungen, die bereits heute durch ein hohes Wertenniveau gekennzeichnet sind, zusätzlich die stärksten Zunahmen aufweisen, sodass die Intensität überproportional steigt (s. Abb. 5.10) – übertragen auf die Fläche bedeutet dies, dass bereits belastete Bereiche in Zukunft noch stärker belastet sind (s. Abb. 5.11 bis Abb. 5.13). Man spricht hierbei vom Phänomen der wachsenden Hotspots. Hervorzuheben sind dabei wiederum sämtliche versiegelte und dichtbebaute Areale, aber auch Freiflächen.

Dies ist auch im Bereich der Stadt Zürich erkennbar (s. Abb. 5.14), in deren Zentrum in der Zukunftsperiode $p3$ lokale Maxima von ca. 59 Hitzetagen pro Jahr erreicht werden (knapp 57 Tage im Mittel). Noch etwas höhere Werte sind stellenweise in den Gewerbegebieten rund um die Gleisanlagen im Stadtgebiet Zürich zu beobachten. Dies ist auf einen ähnlich hohen Versiegelungsgrad wie bei der Zentrums-, Block- und Blockrandbebauung bei gleichzeitig geringerer mittlerer Strukturhöhe zurückzuführen. Niedrigere Bauten verfügen tagsüber über eine verringerte Beschattungsfähigkeit, was höhere Tagestemperaturmaxima und daher mehr Hitzetage pro Jahr erlaubt.

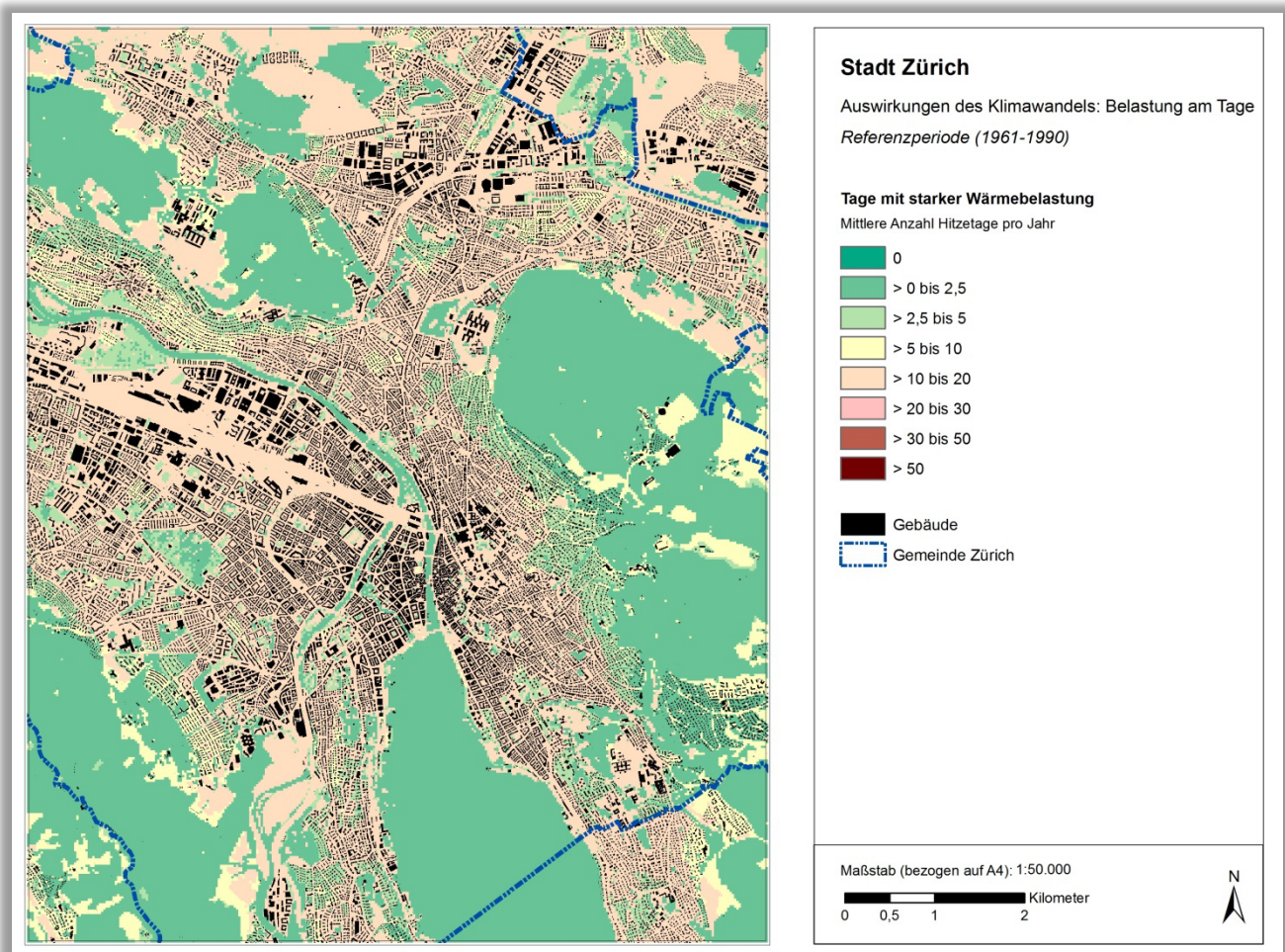


Abb. 5.9: Räumliche Verteilung von Hitzetagen in der Stadt Zürich in der Referenzperiode (1961-1990)

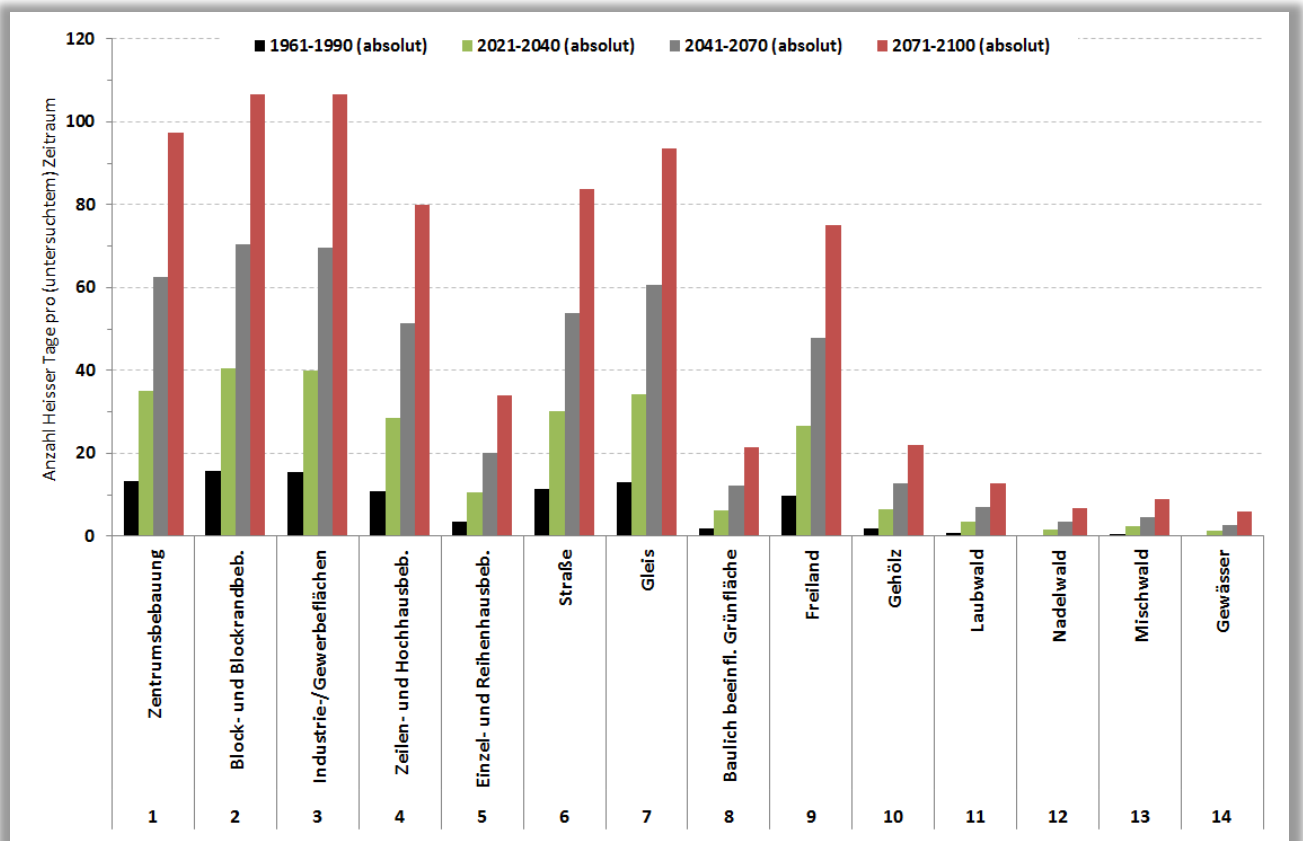


Abb. 5.10: Mittlere jährliche Anzahl an Hitzetagen ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) in der Referenzperiode und den Zukunftsperioden in Abhängigkeit von der Flächennutzung

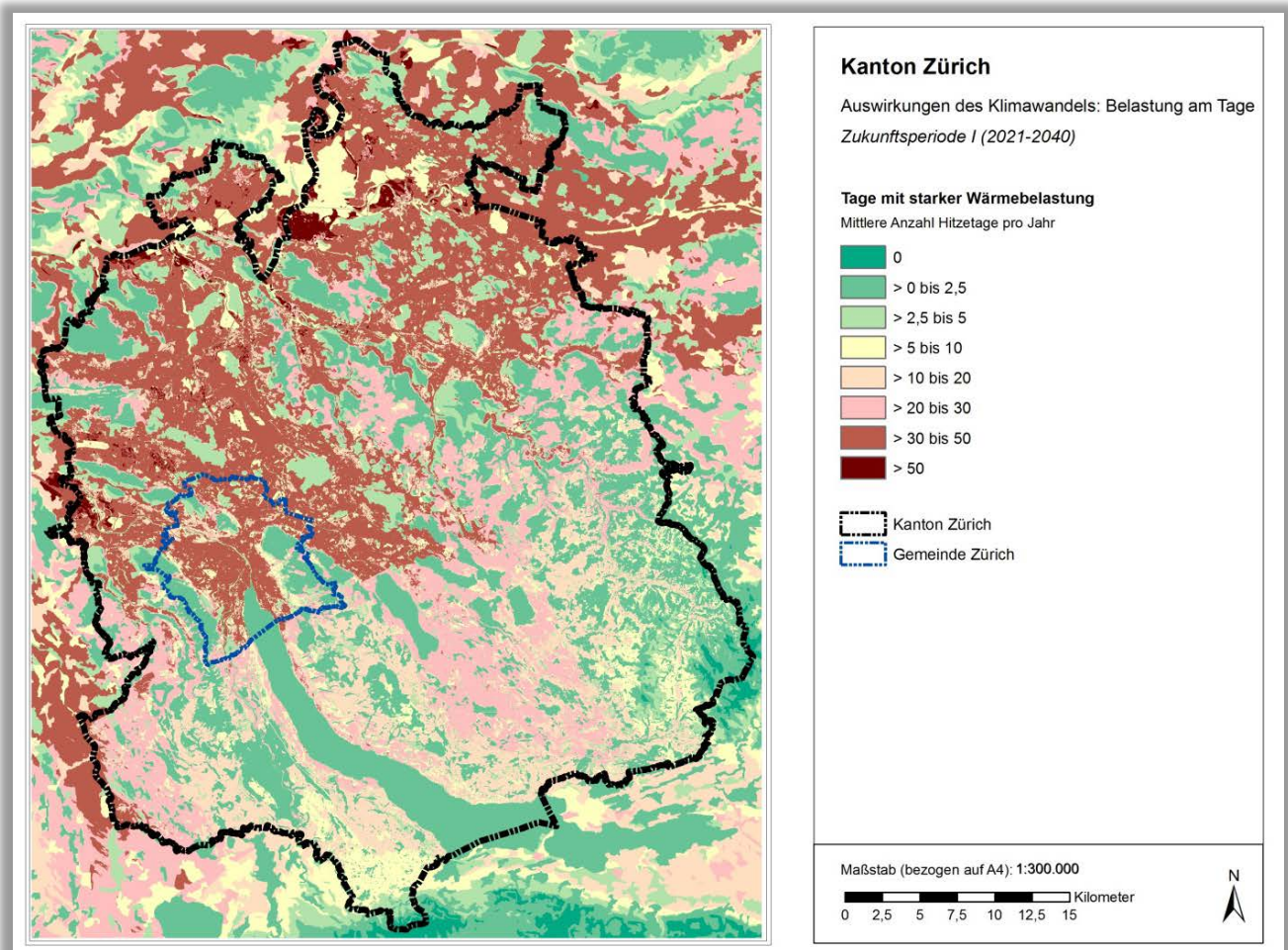


Abb. 5.11: Räumliche Verteilung von Hitzetagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode I (2021-2040)

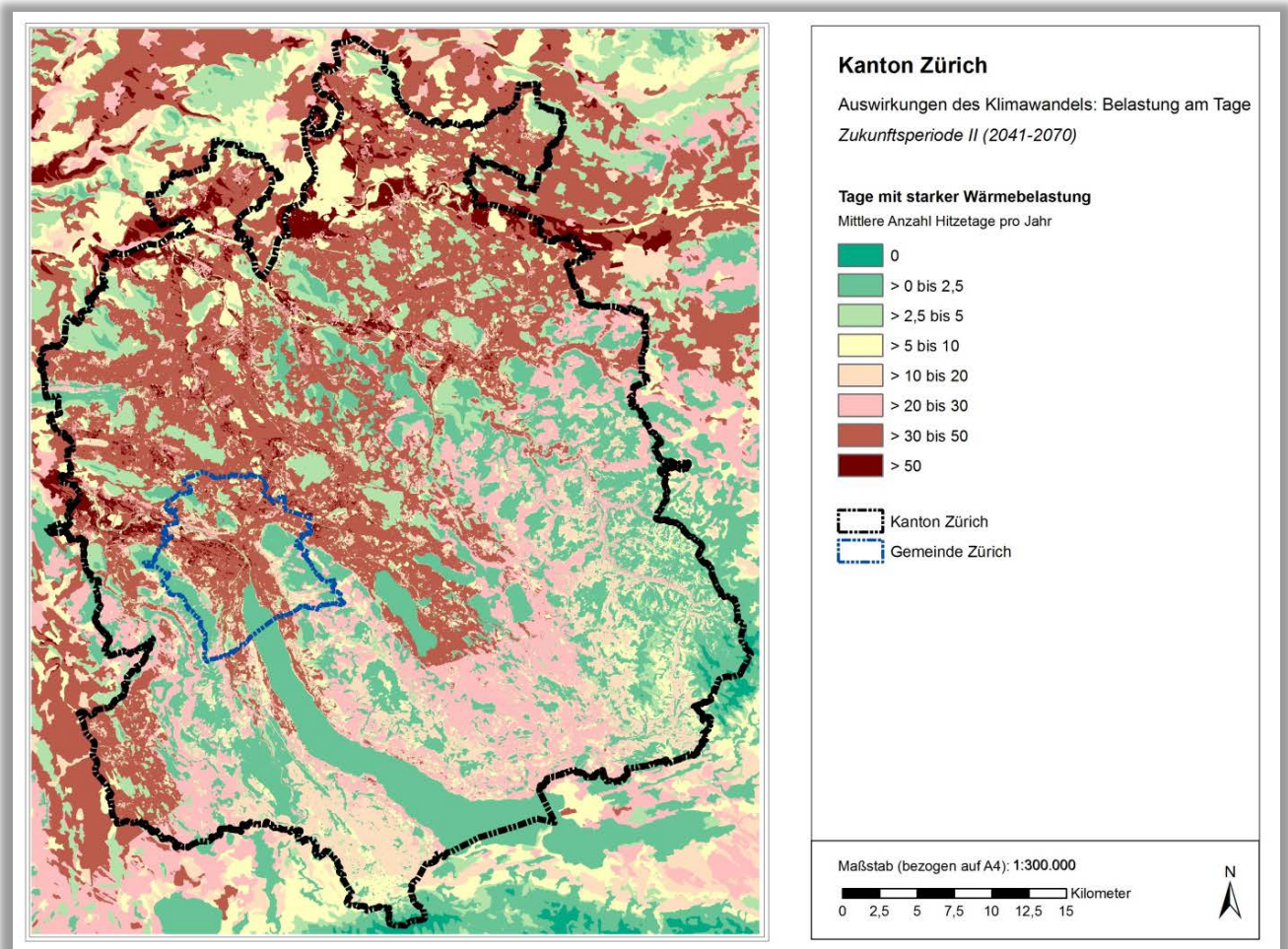


Abb. 5.12: Räumliche Verteilung von Hitzetagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode II (2041-2070)

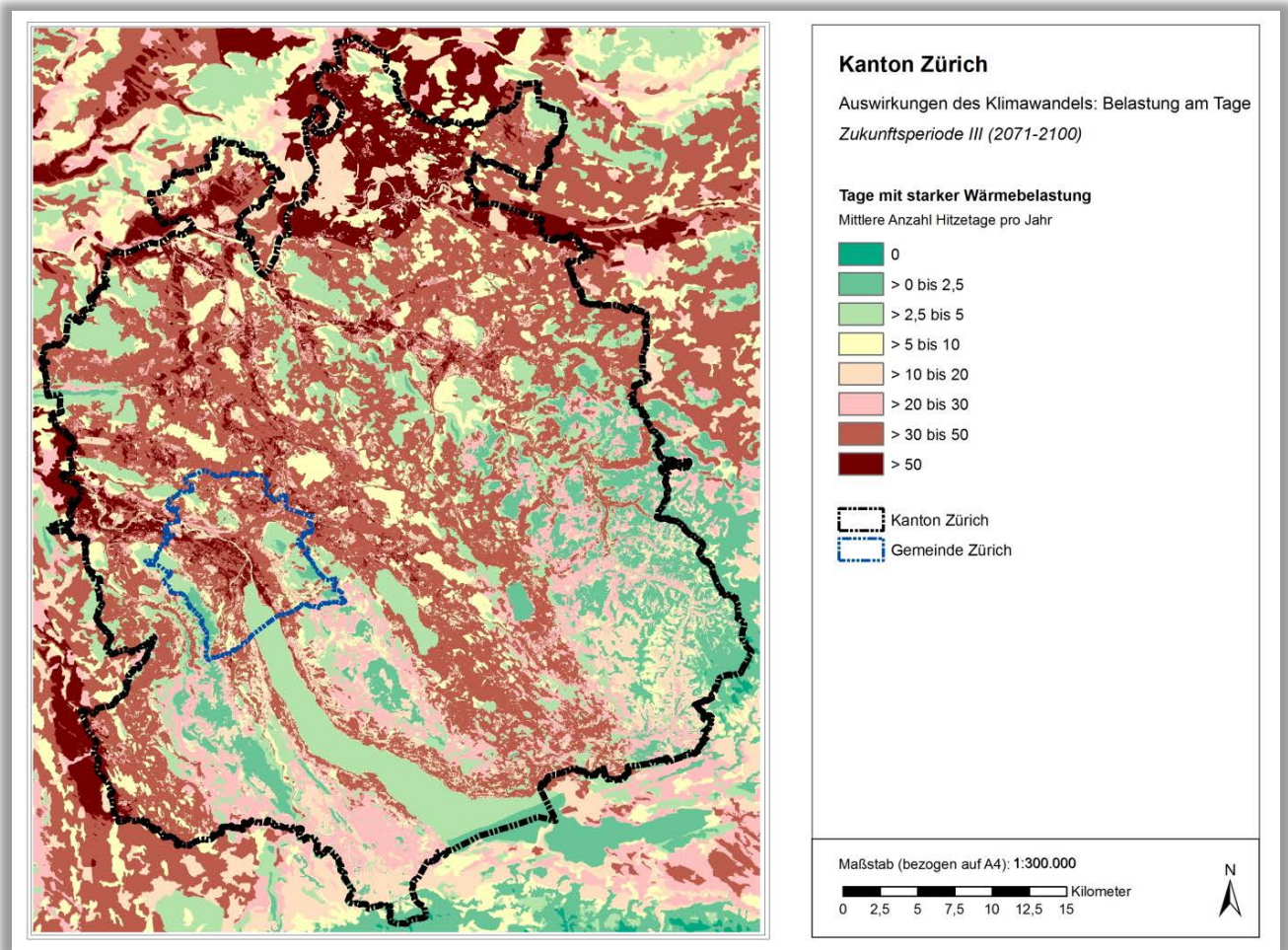


Abb. 5.13: Räumliche Verteilung von Hitzetagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode III (2071-2100)

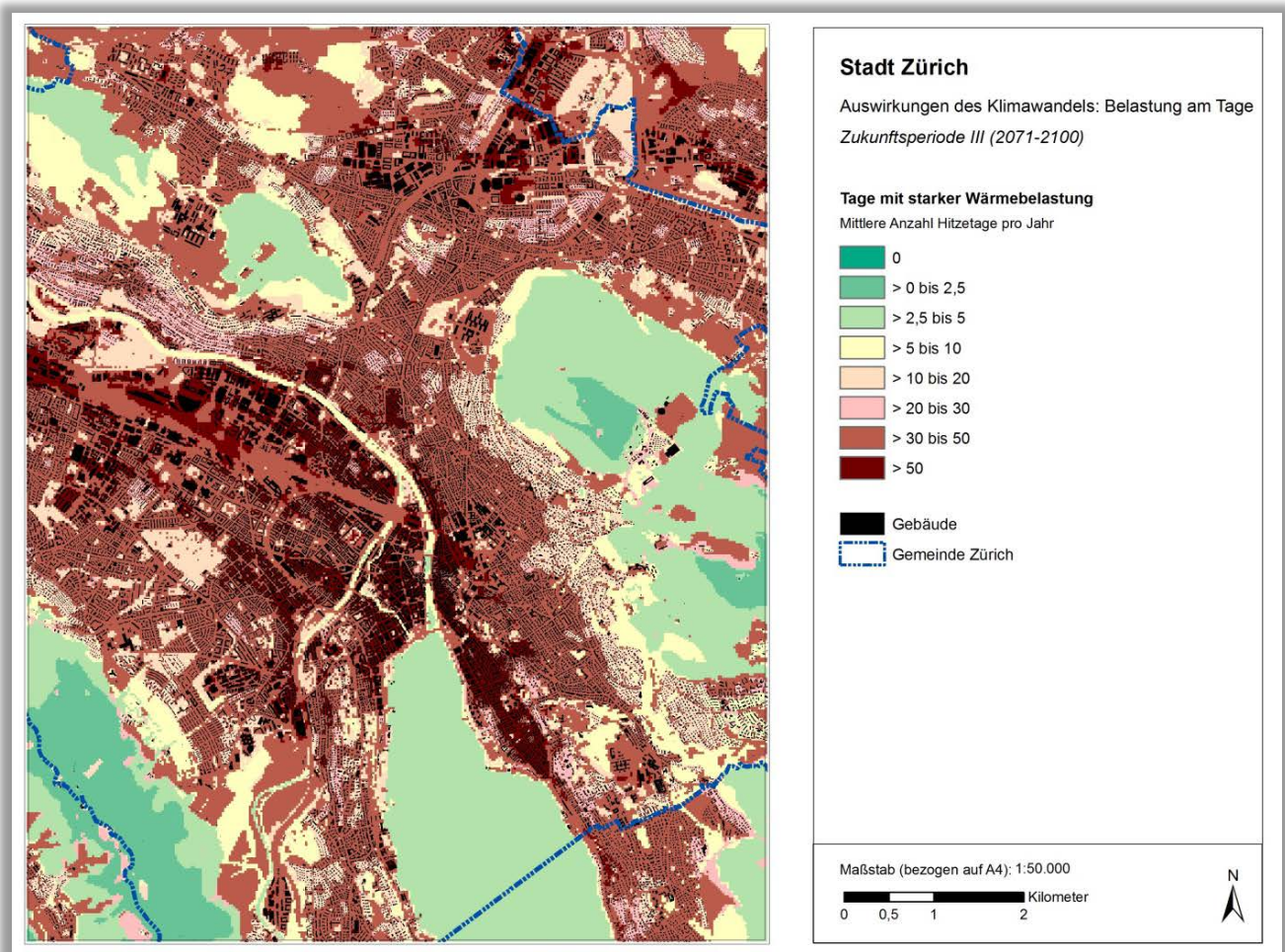


Abb. 5.14: Räumliche Verteilung von Hitzetagen in der Stadt Zürich in der Zukunftsperiode III (2071-2100)

5.3.2 Sommertage

Ein Tag gilt als Sommertag, sofern an diesem eine Tageshöchsttemperatur von mindestens 25 °C erreicht wurde. Sommertage sind demnach genau wie Hitzetage ausschliesslich temperaturinduziert und weisen infolgedessen ein vergleichbares Wertgefüge in der Fläche auf (s. für die Referenzperiode Abb. 5.15 im Vergleich zu Abb. 5.9). Analog beeinflusst die Art der Flächennutzung die Zahl der Sommertage signifikant: In der Referenzperiode sind die höchsten Werte im Bereich der dicht bebauten Siedlungsflächen sowie in Gewerbegebieten mit im Mittel 56 bis 58 Sommertagen zu finden. Unbeschattete (versiegelte) Flächen wie Gleisanlagen, Strassen und Freiland liegen wegen der nahezu unverminderten solaren Einstrahlung mit im Mittel rund 52, 48 und 43 Sommertagen nur knapp hinter den stark verdichteten Zentren Stadt Zürich und Winterthur. Neben den hochversiegelten Siedlungsbereichen werden die flächenmässig grössten Bereiche hoher Werte im Norden des Kantons im Bereich des Thurtals sichtbar. Zur mit hohen Werten in Verbindung stehenden Freiland-Nutzungsklasse liefert ebenfalls der im Kapitel 5.3.1 erwähnte Sachverhalt der erhöhten Antriebstemperaturen aus dem Regionalmodell eine Erklärung für dieses lokale Maximum an Sommertagen.

Bei hohen innerstädtischen Temperaturen bieten allgemein stärker durchgrünte Gebiete wie Wälder, baulich geprägte Grünflächen oder lockere Einzel- und Reihenhausbebauung mit einem geringen Versiegelungsgrad von 41 % durch Transpiration und Beschattung, aber auch die Uferbereiche der

anliegenden Gewässer durch Evaporationsprozesse einen Rückzugsort für vulnerable Bevölkerungsgruppen. Die Zahl der Sommertage im Bereich dieser Flächen mit im Mittel 10 bis 25 Sommertagen im Jahr ist nichtsdestotrotz relativ hoch, lediglich Nadelwälder bleiben mit gemittelt 7 Sommertagen im Jahr einstellig. Der Wert von Wald- und Gewässerflächen als stadtnahe Rückzugsorte wird auch in der Referenzabbildung der Stadt Zürich deutlich (Abb. 5.16).

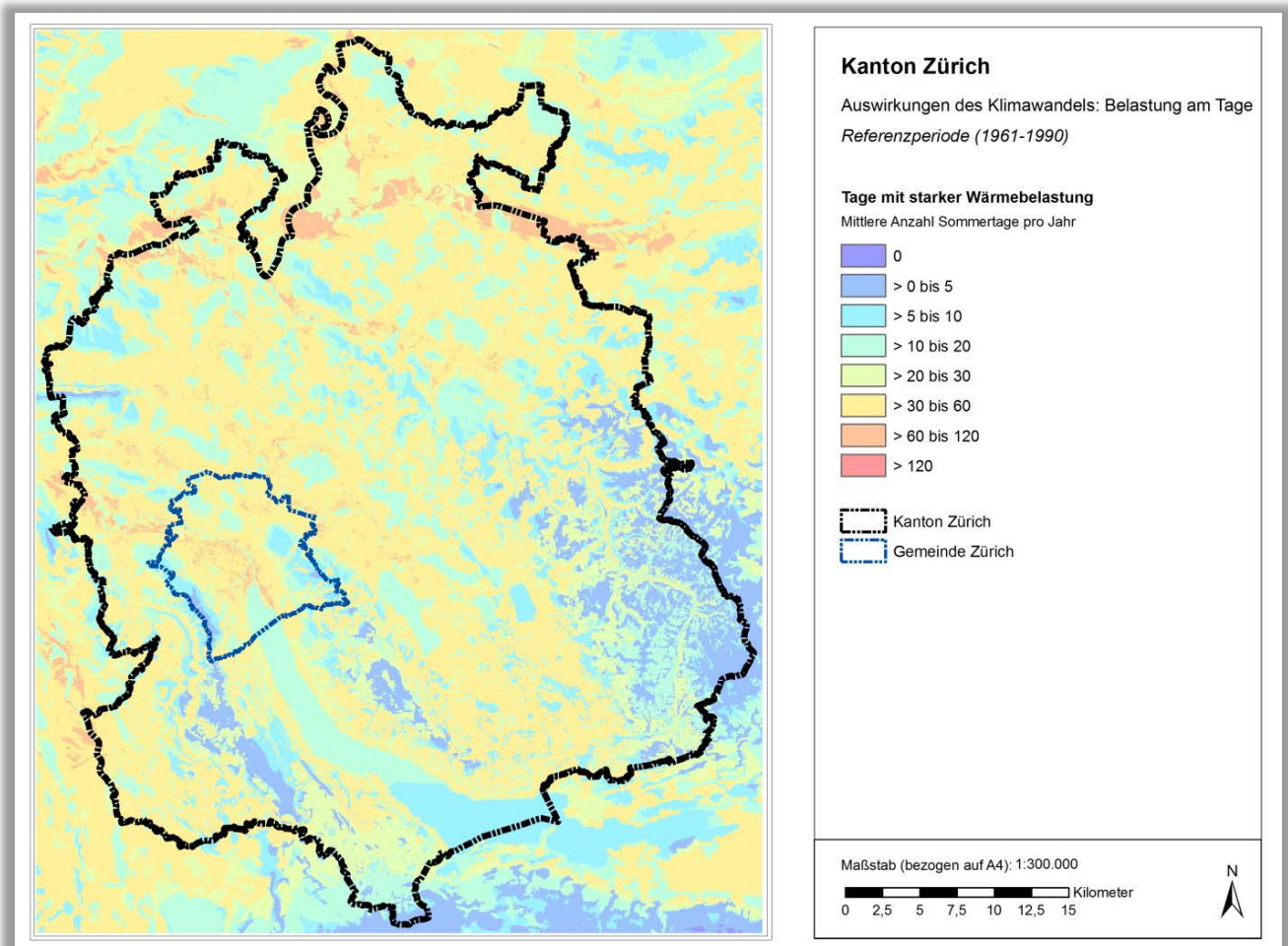


Abb. 5.15: Räumliche Verteilung von Sommertagen im Kanton Zürich in der Referenzperiode (1961-1990)

In Abb. 5.17 ist die absolute Zahl der jährlichen Sommertage für die Referenzperiode und die drei Zukunftsperioden aufgetragen. Da Temperaturwerte grösser oder gleich 25 °C pro Jahr deutlich öfter erreicht werden als 30 °C oder mehr, ist die absolute Zahl an Sommertagen um ein Vielfaches grösser als die der Hitzetage. Man erkennt, dass der grösste Zuwachs zwischen zwei Untersuchungszeiträumen von der Referenzperiode zum ersten Zukunftsszenario p1 stattfindet. Dabei sind für alle Nutzungsklassen extrem hohe relative Zunahmen zwischen 118 % (Zentrumsbebauung) und 167 % (Laubwald) zu beobachten. In absoluten Zahlen zeigt sich erneut, dass Klassen mit bereits hohen Werten in der Referenzperiode, auch in Zukunft eine hohe Zahl an Sommertagen vorweisen werden. Führend sind in p1 wie bereits bei den Hitzetagen die hochgradig versiegelten, innerstädtischen Nutzungsklassen Zentrumsbebauung (im Mittel 122.6 Sommertage), Block- und Blockrandbebauung sowie Industrie- und Gewerbeflächen (beide letztgenannten mit jeweils im Mittel 128.7 Sommertagen). Zwischen p1 und p2 (grösste mittlere Zunahme: 19.1 % bzw. 6.5 Sommertage) bzw. p2 und p3 (grösste mittlere Zunahme: 20.0 % bzw. 11.2 Sommertage) sind die relativen und absoluten Zunahmen in der Folge gering bis moderat.

Für die flächenhafte Verteilung der Anzahl an zukünftigen Sommertagen im Kanton sind die Abbildungen 5.18 bis 5.20 und für die Stadt Zürich Abb. 5.21 zu betrachten. Während wie erwähnt insbesondere Siedlungs- und unbeschattete Flächen die grösste Zahl an Sommertagen aufzeigen (im Mittel 114.2 im Freiland bis 143.7 im Gewerbegebiet in Zukunftsperiode p3), ist diese in den Wäldern, vornehmlich in den Gebirgszügen des Kantons stark reduziert und bleibt dies auch bis p3 mit je nach Art des Waldes im Mittel 29.3 bis 47.9 Sommertagen.

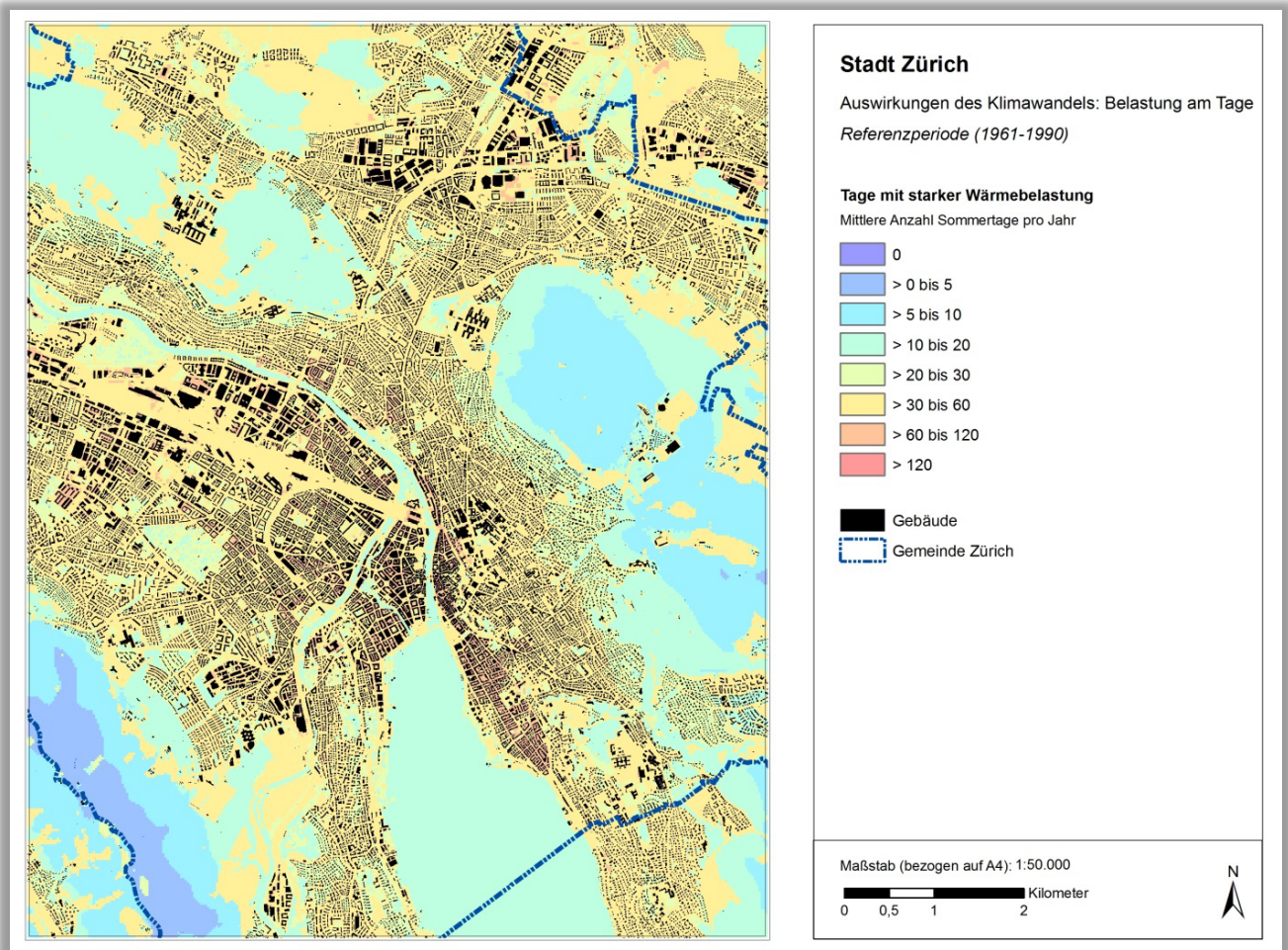


Abb. 5.16: Räumliche Verteilung von Sommertagen in der Stadt Zürich in der Referenzperiode (1961-1990)

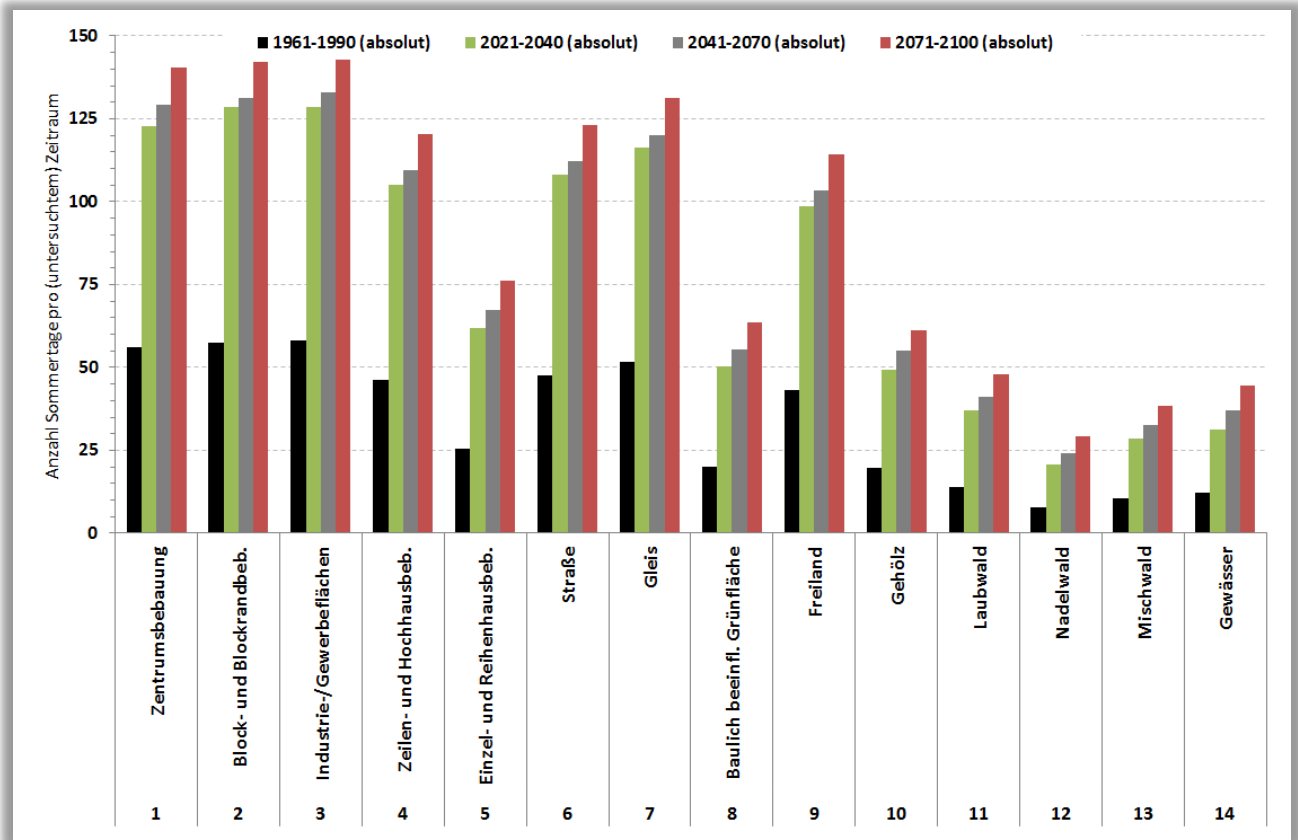


Abb. 5.17: Mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen ($T_{max} \geq 25 \text{ °C}$) in der Referenzperiode und in den Zukunftsperioden in Abhängigkeit von der Flächennutzung

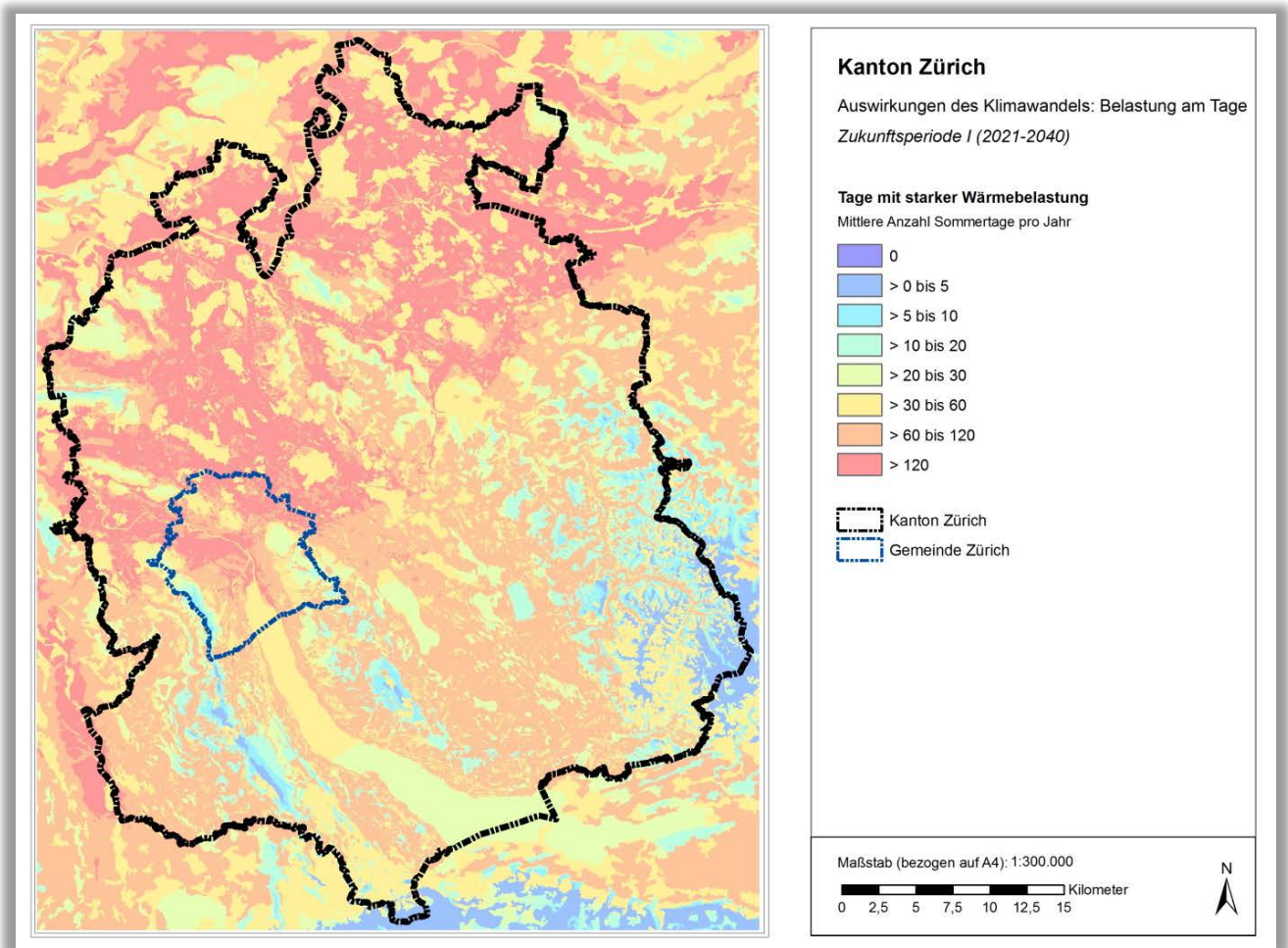


Abb. 5.18: Räumliche Verteilung von Sommertagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode I (2021-2040)

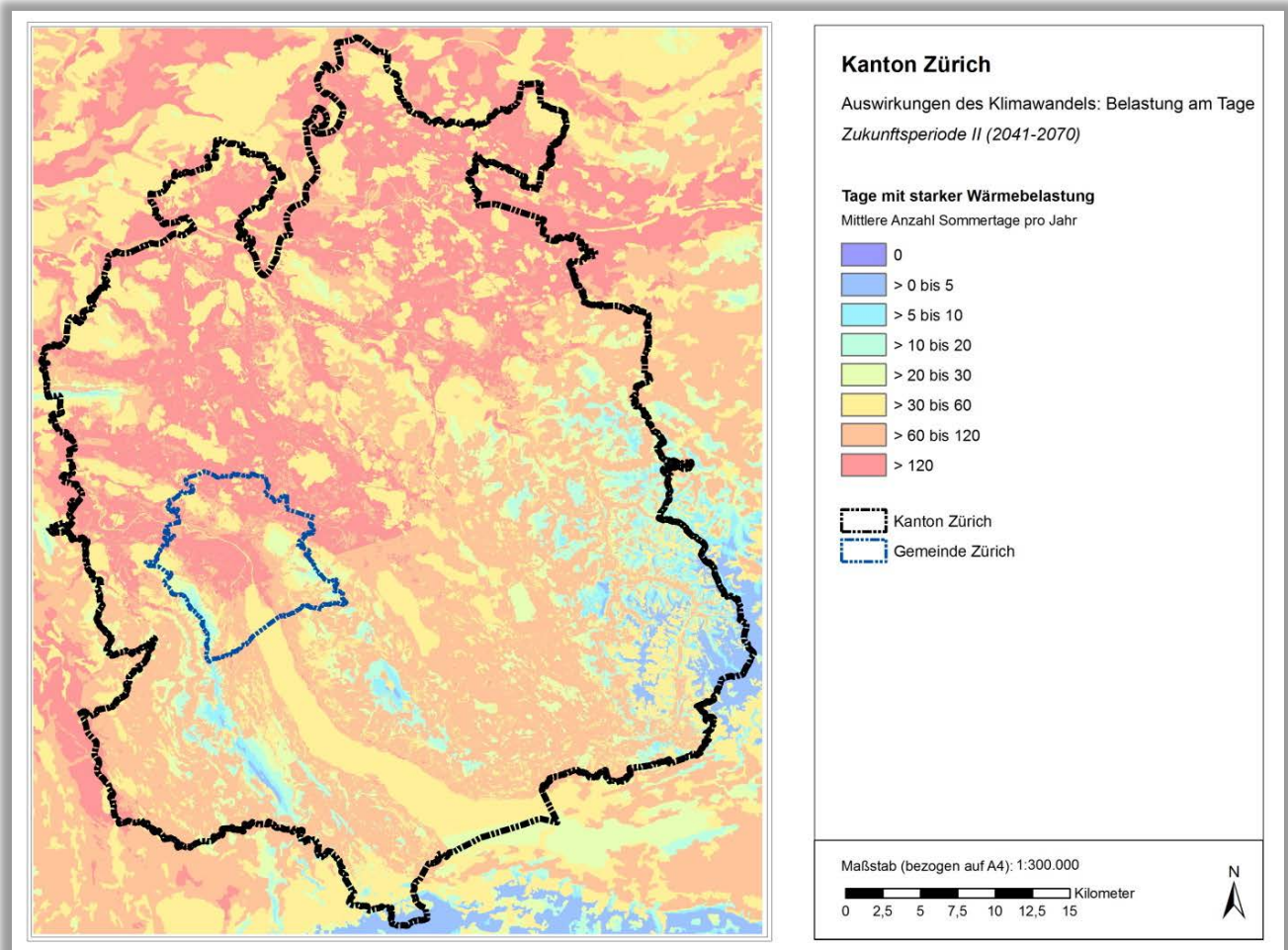


Abb. 5.19: Räumliche Verteilung von Sommertagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode II (2041-2070)

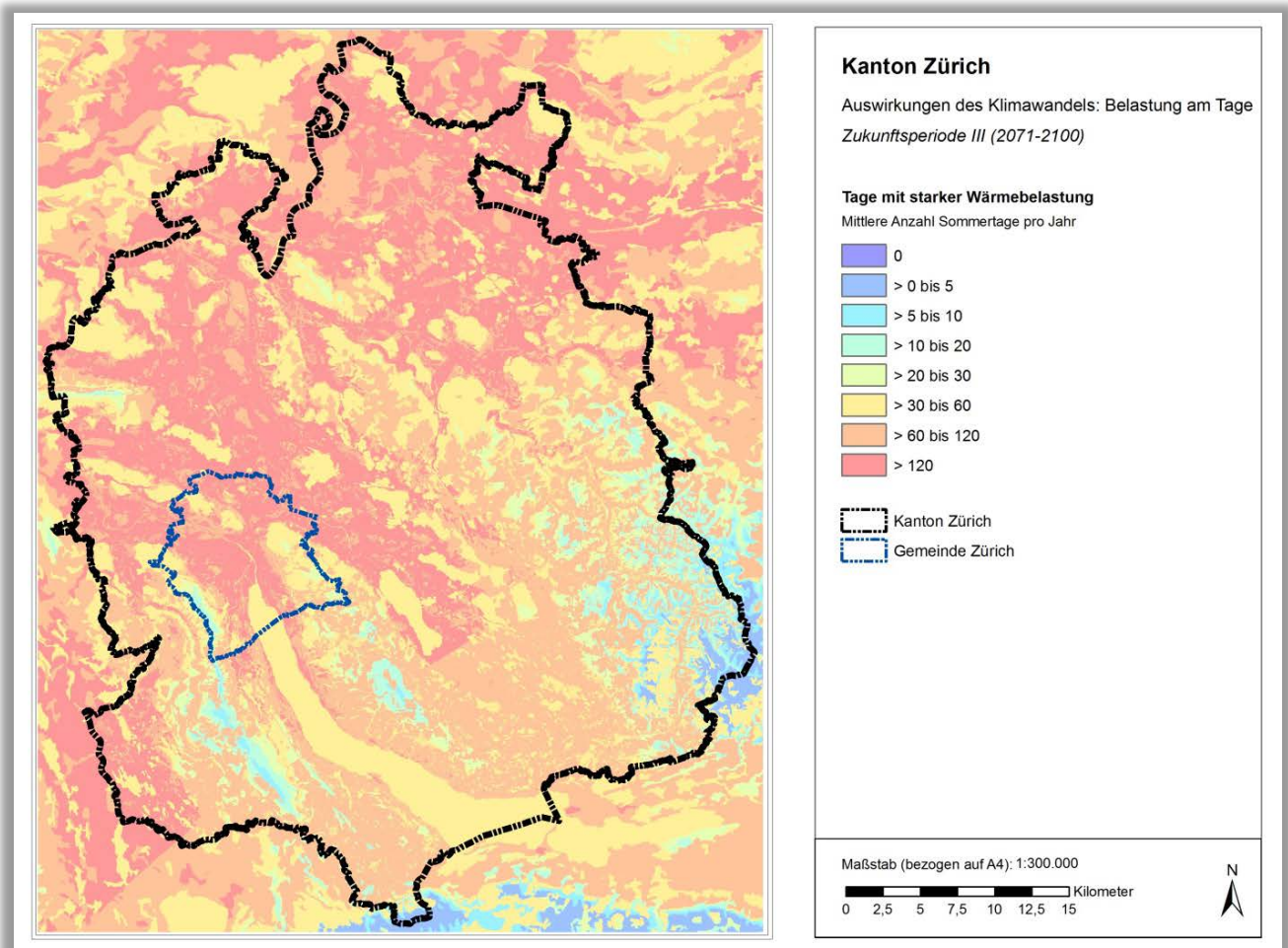


Abb. 5.20: Räumliche Verteilung von Sommertagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode III (2071-2100)

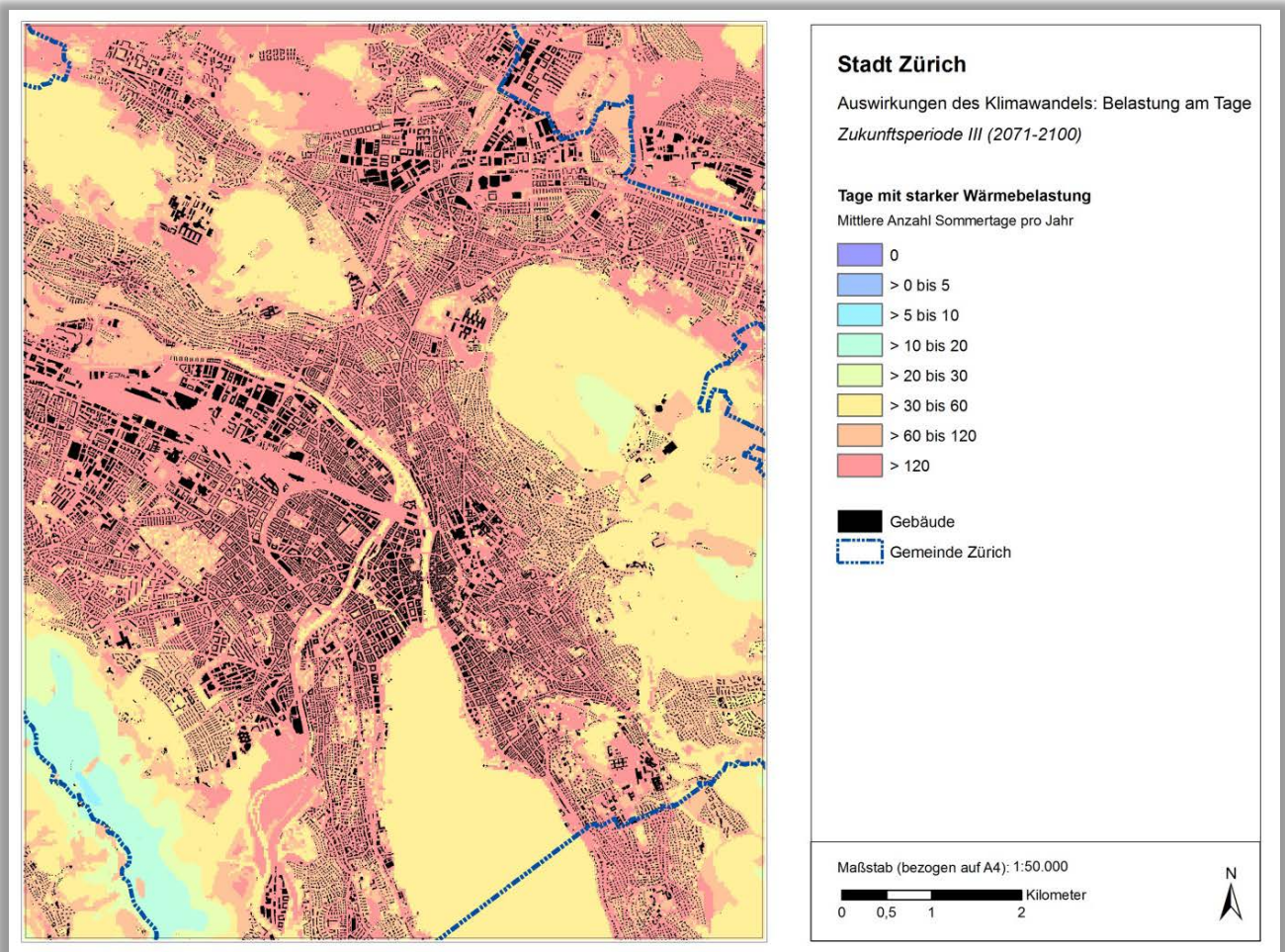


Abb. 5.21: Räumliche Verteilung von Sommertagen in der Stadt Zürich in der Zukunftsperiode III (2071-2100)

5.3.3 PET-Überschreitungstage

Noch besser als Hitze- oder Sommertage eignen sich PET-Überschreitungstage mit Werten $> 35\text{ °C}$ zur Bewertung der Hitzebelastung auf den Menschen. Die PET ist nicht nur an die Temperatur, sondern auch an andere meteorologische Grössen wie Wind, Strahlung und Feuchte der Umgebung sowie die Bekleidung von Personen gebunden und dadurch in der Lage, die thermische Empfindlichkeit zu repräsentieren (vgl. Kap. 4.2).

Im Kanton Zürich sind während der Referenzperiode insgesamt geringe Werte der PET-Überschreitungstage von im Mittel unter einem Tag pro Jahr zu erkennen (s Abb. 5.22). Ähnlich wie bei den Hitzetagen stellt sich erneut eine grosse Abhängigkeit der Anzahl von PET-Überschreitungstagen von der Flächennutzung ein. In der Referenzperiode befindet sich die grösste Zahl dieser Kenntage im Gegensatz zu den Hitzetagen aber ausschliesslich bei den (versiegelten) Flächen wie Freiflächen (maximal 16 Überschreitungstage p.a.), Strassen (maximal 12 Überschreitungstage p.a.) und Gleisen (maximal 7 Überschreitungstage p.a.) bzw. den stark mineralisch geprägten Flächen geringen Bauvolumens (z.B. Gewerbe mit maximal 7 Überschreitungstage p.a.) wieder. Zentrums-, Block- und Blockrandbebauung, aber auch Zeilen- und Hochhausbebauung haben aufgrund ihrer hohen mittleren Strukturhöhe tagsüber ein grosses Beschattungspotenzial, das die einfallende kurzwellige Sonnenstrahlung vermindert. Da diese direkt als einer der Parameter zur Berechnung der PET verwendet wird, sind auch die jährlichen PET-Überschreitungstage im vielgeschossig bebauten Bereich auf unter einen Tag p.a. reduziert. Wald- und Gewässerflächen weisen analog der Hitzetage im gesamten Untersuchungsgebiet im Mittel keinerlei PET-Überschreitungstage während der Referenzperiode auf.

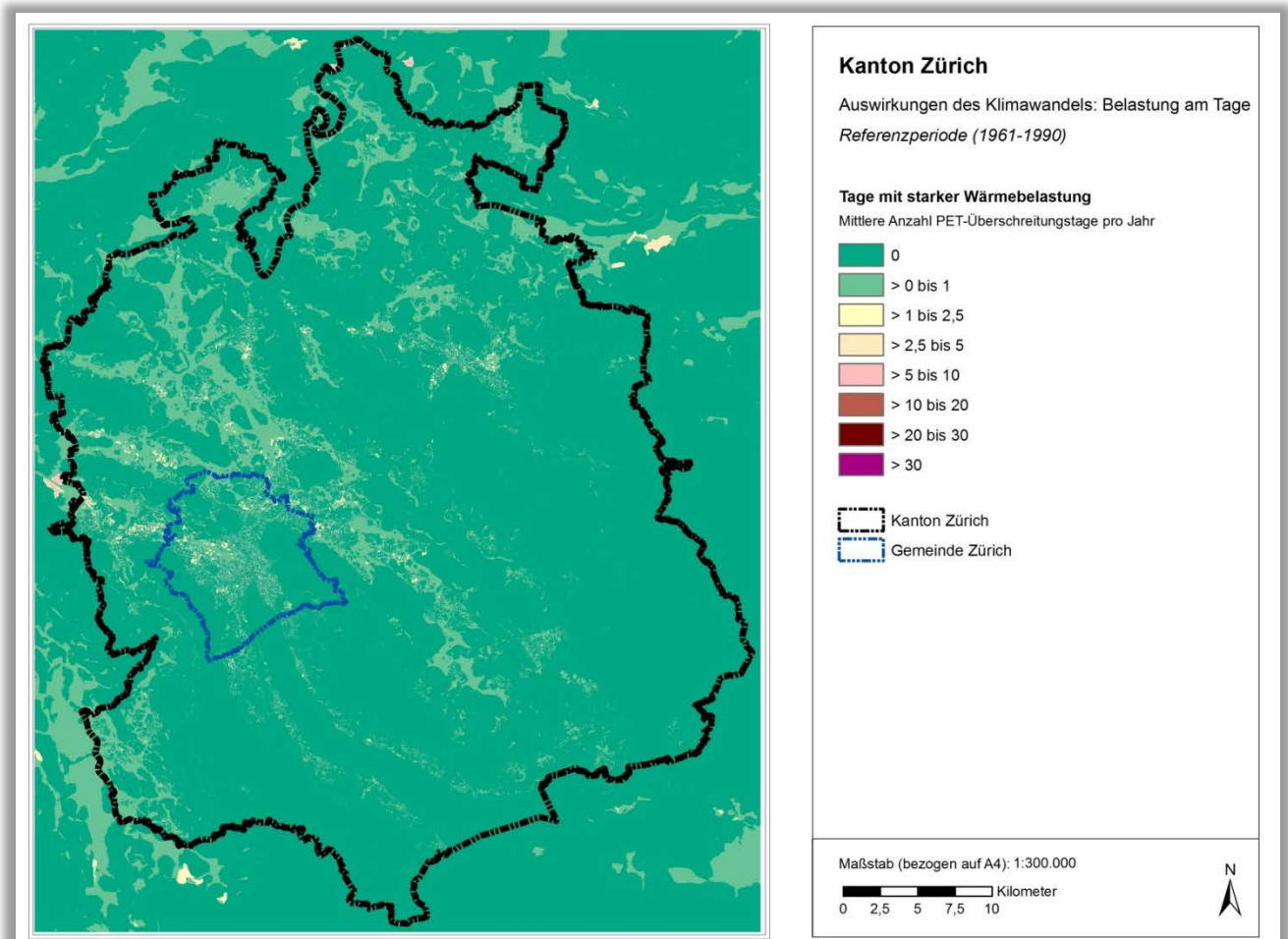


Abb. 5.22: Räumliche Verteilung von PET-Überschreitungstagen im Kanton Zürich in der Referenzperiode (1961-1990)

Dies gilt gleichermassen für die Einzel- und Reihenhausbebauung sowie baulich geprägte Grünflächen, da sie der Überwärmung tagsüber mit jeweils moderatem Versiegelungsgrad und einer Mischung aus baulicher und vegetativer Beschattung entgegenwirken.

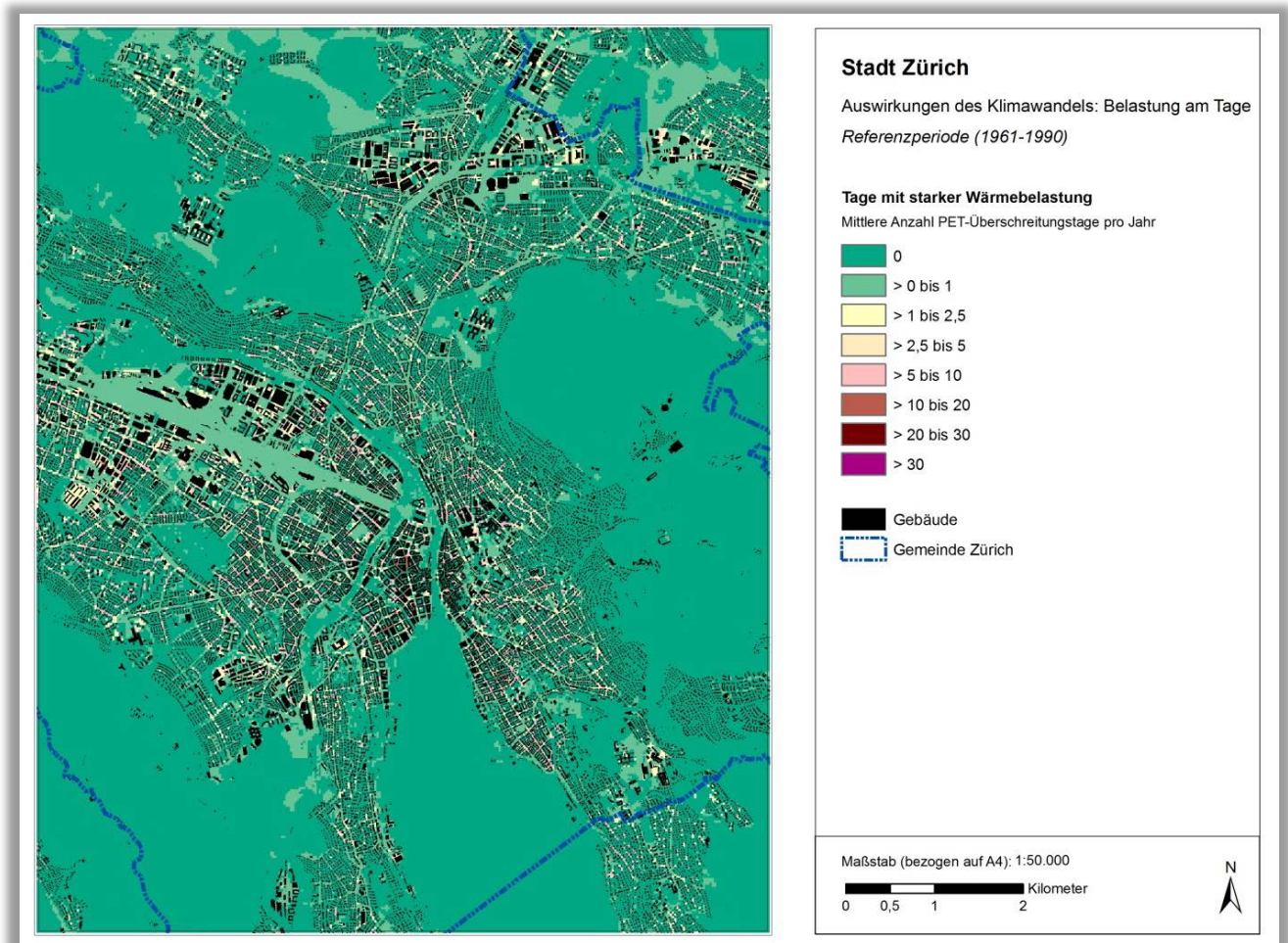


Abb. 5.23: Räumliche Verteilung von PET-Überschreitungstagen in der Stadt Zürich in der Referenzperiode (1961-1990)

Auch der Blick in den Ausschnitt der Stadt Zürich zeigt innerhalb der Referenzperiode die höchsten Werte im Bereich der Gewerbe-, Verkehrs- und Freiflächen (s. Abb. 5.23). Die genannten Nutzungsklassen sind nach der im Kap. 5.3.1 gewonnenen Erkenntnis der wachsenden Hotspots ebenfalls die Flächen mit der zukünftig grössten absoluten Zunahme an PET-Überschreitungstagen (s. Abb. 5.24). Insbesondere Gewerbeflächen mit ihrem grossen Volumen an wärmespeicherfähigem Material bei gleichzeitig geringem Schattenwurf stehen mit im Mittel knapp elf jährlichen PET-Überschreitungstagen bis Ende des Jahrhunderts (p3) heraus. Auf den Abbildungen Abb. 5.25 bis Abb. 5.27 sind flächenhaft die kontinuierlichen Zunahmen der PET-Überschreitungstage für den Kanton, in Abb. 5.28 die der Stadt Zürich zu erkennen.

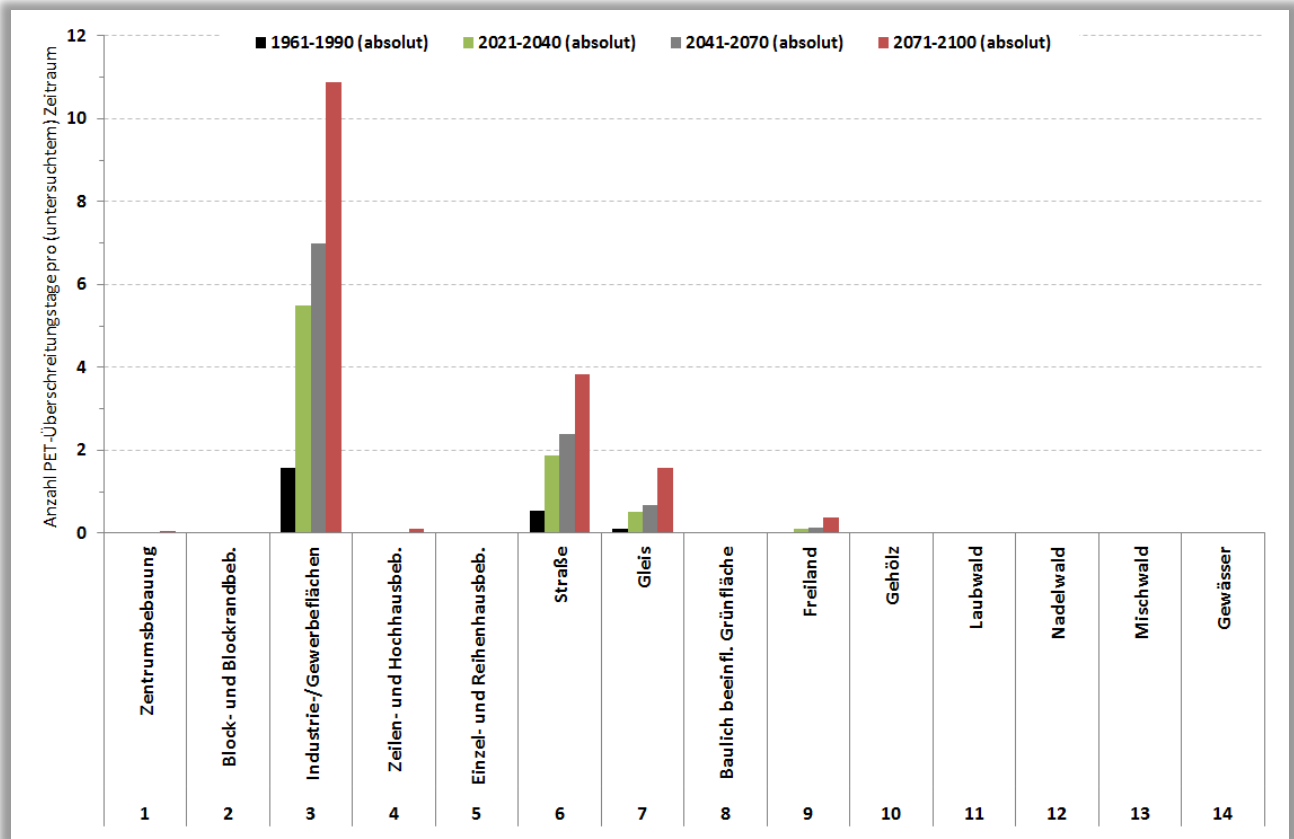


Abb. 5.24: Mittlere jährliche Anzahl an PET-Überschreitungstagen (PET > 35 °C) in der Referenzperiode und den Zukunftsperioden in Abhängigkeit von der Flächennutzung

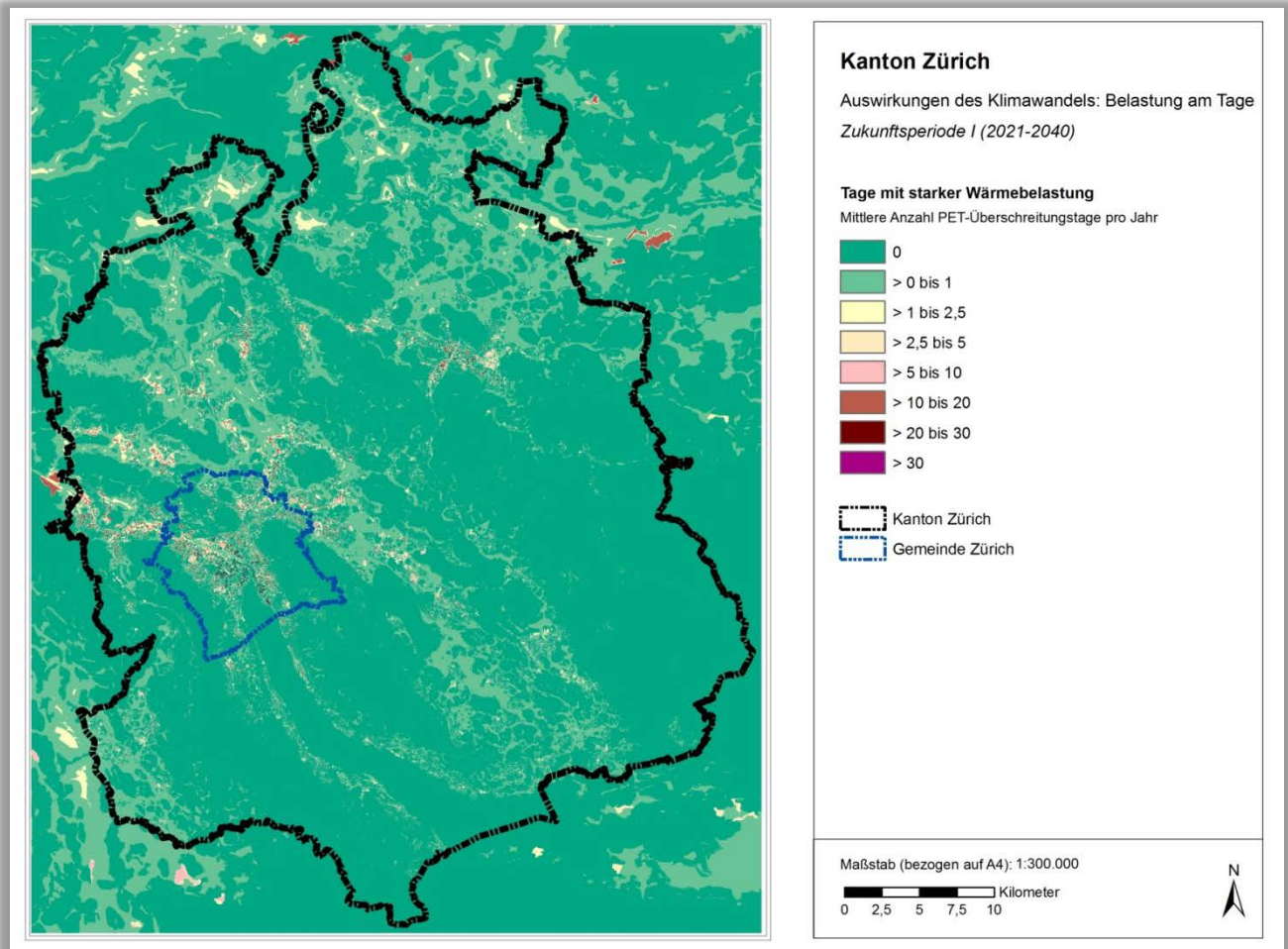


Abb. 5.25: Räumliche Verteilung von PET-Überschreitungstagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode I (2021-2040)

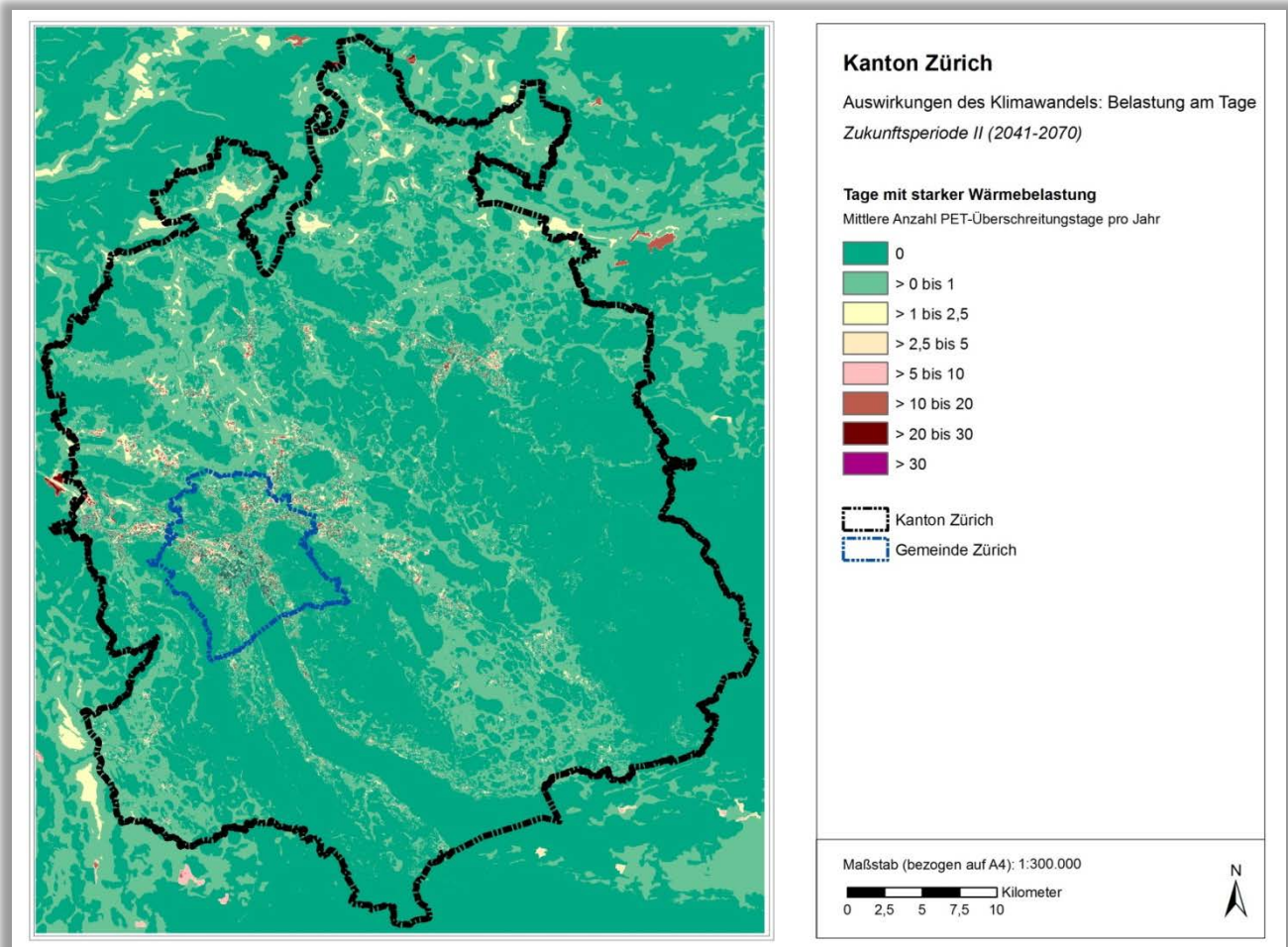


Abb. 5.26: Räumliche Verteilung von PET-Überschreitungstagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode II (2041-2070)

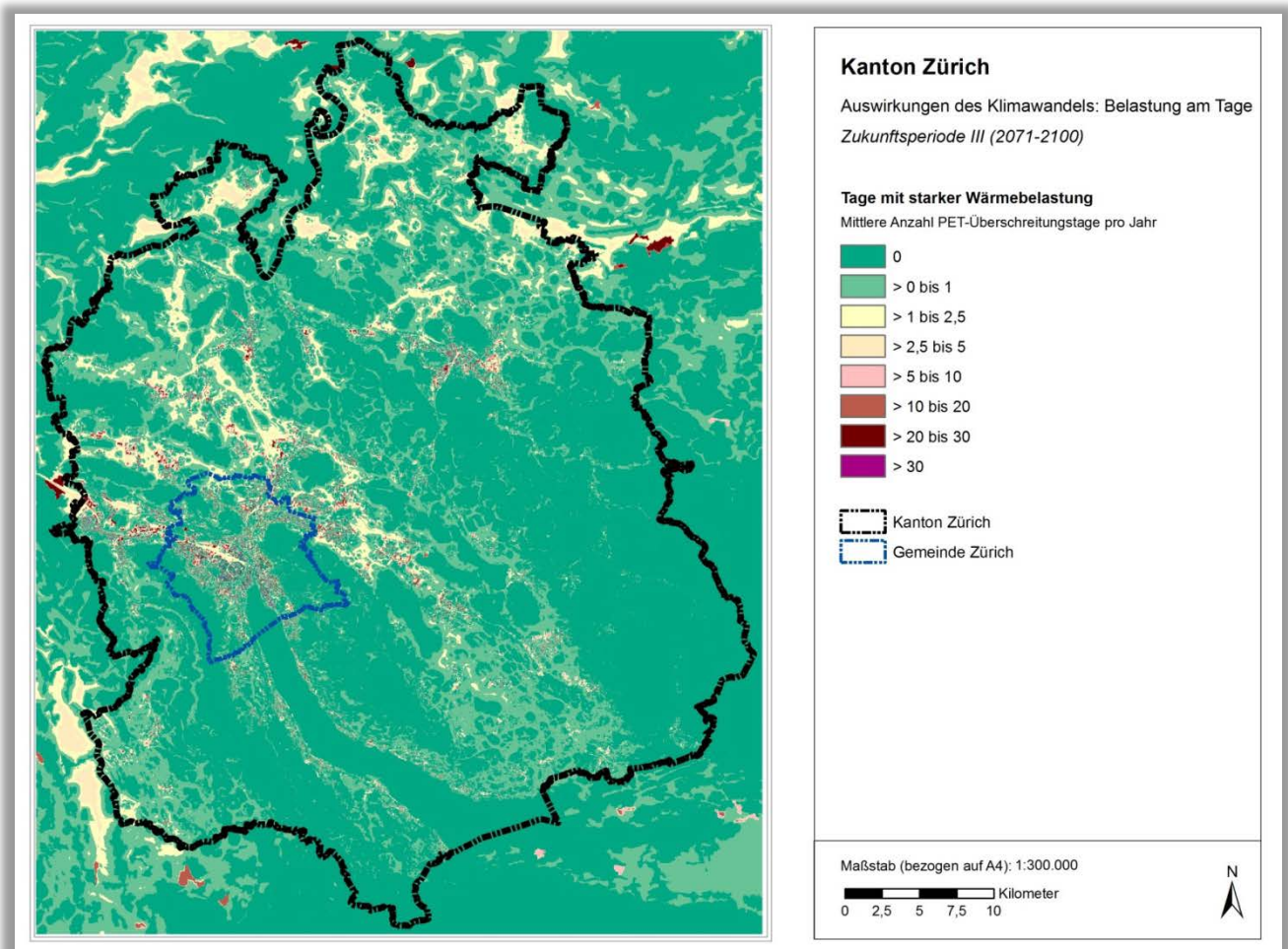


Abb. 5.27: Räumliche Verteilung von PET-Überschreitungstagen im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode III (2071-2100)

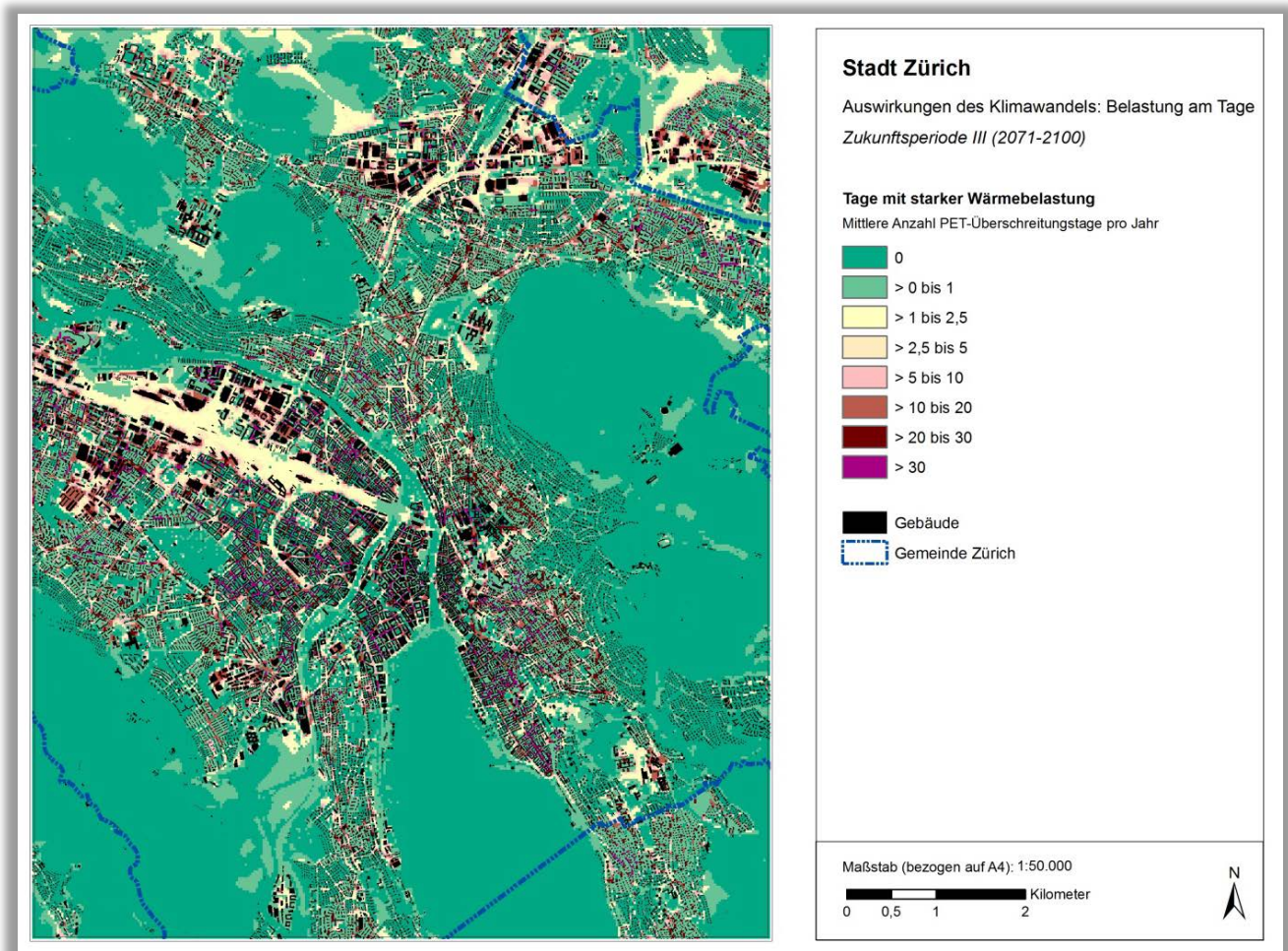


Abb. 5.28: Räumliche Verteilung von PET-Überschreitungstagen in der Stadt Zürich in der Zukunftsperiode III (2071-2100)

5.3.4 Tropennächte

Als Tropennacht wird eine Situation bezeichnet, bei der die nächtliche Minimaltemperatur 20 °C nicht unterschreitet. Die für die Bewertung als relevant einzustufenden Flächen sind in erster Linie Siedlungsräume, in denen die nächtliche Überwärmung einen erholsamen Schlaf erschwert und damit insb. für sensible Bevölkerungsgruppen eine gesundheitliche Belastung darstellen kann – zumal die Anpassungskapazität des Menschen auf diese Form der Belastung geringer einzustufen ist als z.B. an Hitzestress am Tage.

Auch in Bezug auf das Auftreten von Tropennächten ist eine deutliche Abhängigkeit von der Art der Flächennutzung festzustellen, die jedoch einem anderen Muster als bei den Hitze- bzw. den PET-Überschreitungstagen folgt (s. Abb. 5.29 für die Referenzperiode). Auffällig sind zuallererst die Gewässerflächen (bspw. des Zürich- und Greifensees), die mit 9.7 Tropennächten im Mittel und 20.6 im Maximum die grösste Zahl des Kennwertes stellen. Zwar braucht Wasser aufgrund seiner sehr hohen spezifische Wärmekapazität von ca. 4 kJ kg⁻¹ K⁻¹ verhältnismässig lang, um sich zu erwärmen, kann dafür aber viel Wärmeenergie aufnehmen. Diese „Trägheit“ führt auch dazu, dass das Wasser seine Temperatur innerhalb eines Tagesgangs kaum ändert und die tagsüber noch kühlenden Temperaturen, in der Nacht stellenweise zur Überwärmung beitragen können. Weiterhin weist die Zentrumsbebauung aufgrund ihrer

Dichte, des hohen Gebäudevolumens und hohen Anteils versiegelter Flächen deutlich höhere Werte auf (im Mittel in der Referenzperiode 9.6 Tropennächte) als z.B. Einzel- und Reihenhausbauung (im Mittel 0.3 Tropennächte), die durch eine aufgelockerte Bauweise und einen erhöhten Grünanteil gekennzeichnet ist.

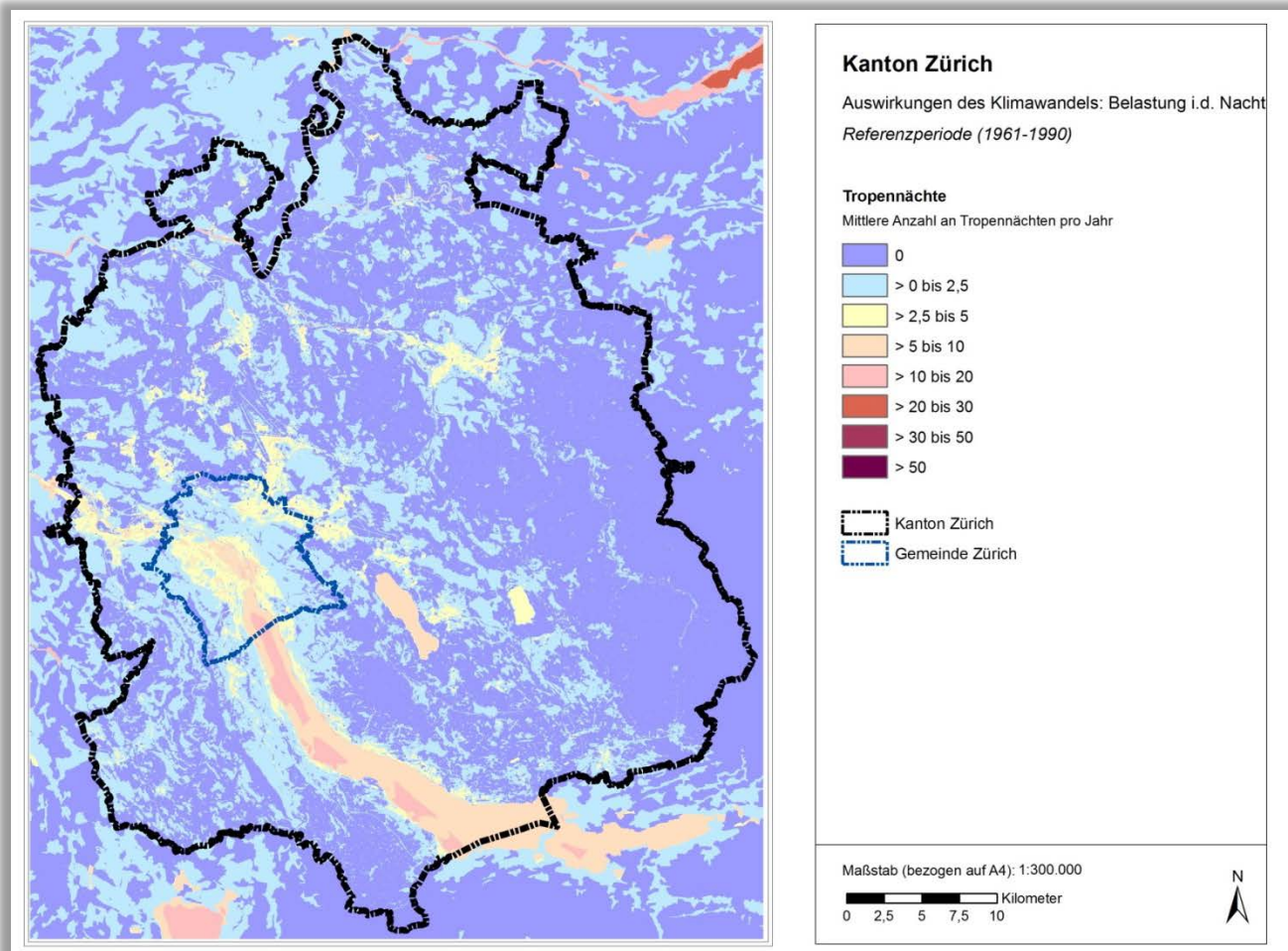


Abb. 5.29: Räumliche Verteilung von Tropennächten im Kanton Zürich in der Referenzperiode (1961-1990)

Dichter besiedelte Flächen sind auch ausserhalb der Stadt Zürich durch eine höhere Anzahl an Tropennächten gekennzeichnet, beispielsweise Winterthur, Dietikon oder Bülach. Verglichen mit Siedlungsflächen sind Grün- und insbesondere unversiegelte Freiflächen durch deutlich geringere Werte gekennzeichnet, was deren Bedeutung für den thermischen Ausgleich in den Nachtstunden unterstreicht.

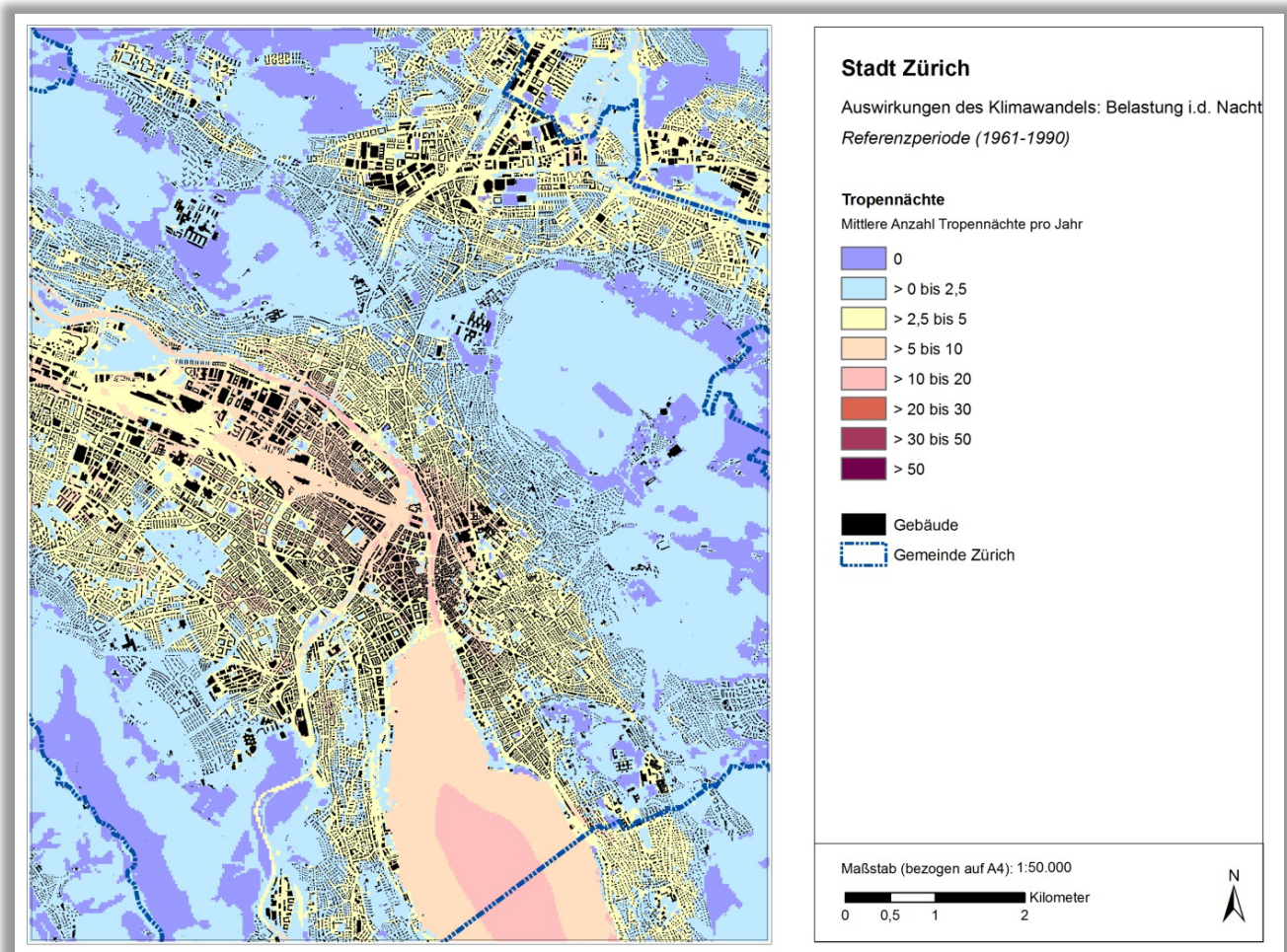


Abb. 5.30: Räumliche Verteilung von Tropennächten in der Stadt Zürich in der Referenzperiode (1961-1990)

Beim Blick auf den Ausschnitt der Stadt Zürich ist mit steigender Entfernung zum Zentrum ein Rückgang der Werte festzustellen (s. Abb. 5.30) – in den aufgelockerten Randbereichen z.B. Wipkingens, Flunterns oder Hottingens, aber auch in Teilen Albisriedens und Wiedikons sind Tropennächte mit 0 – 2.5 pro Jahr nur noch die Ausnahme. Während viele Ackerflächen nachts gar keine Tropennächte aufweisen, kommen Waldflächen in der Referenzperiode auf maximal 1.7 Tropennächte pro Jahr. Dies liegt an der Hinderniswirkung des Kronendachs der Bäume, die in der Nacht das vollständige Auskühlen der Luftschicht zwischen Boden und Blattwerk in Richtung der Atmosphäre, anders als auf einer freien Ackerfläche, verhindert. Dies gilt bspw. für die Acker- und Waldflächen des nördlichen Zürcher Quartiers Seebach oder den Wald im östlichen Hottingen bzw. in Hirslanden.

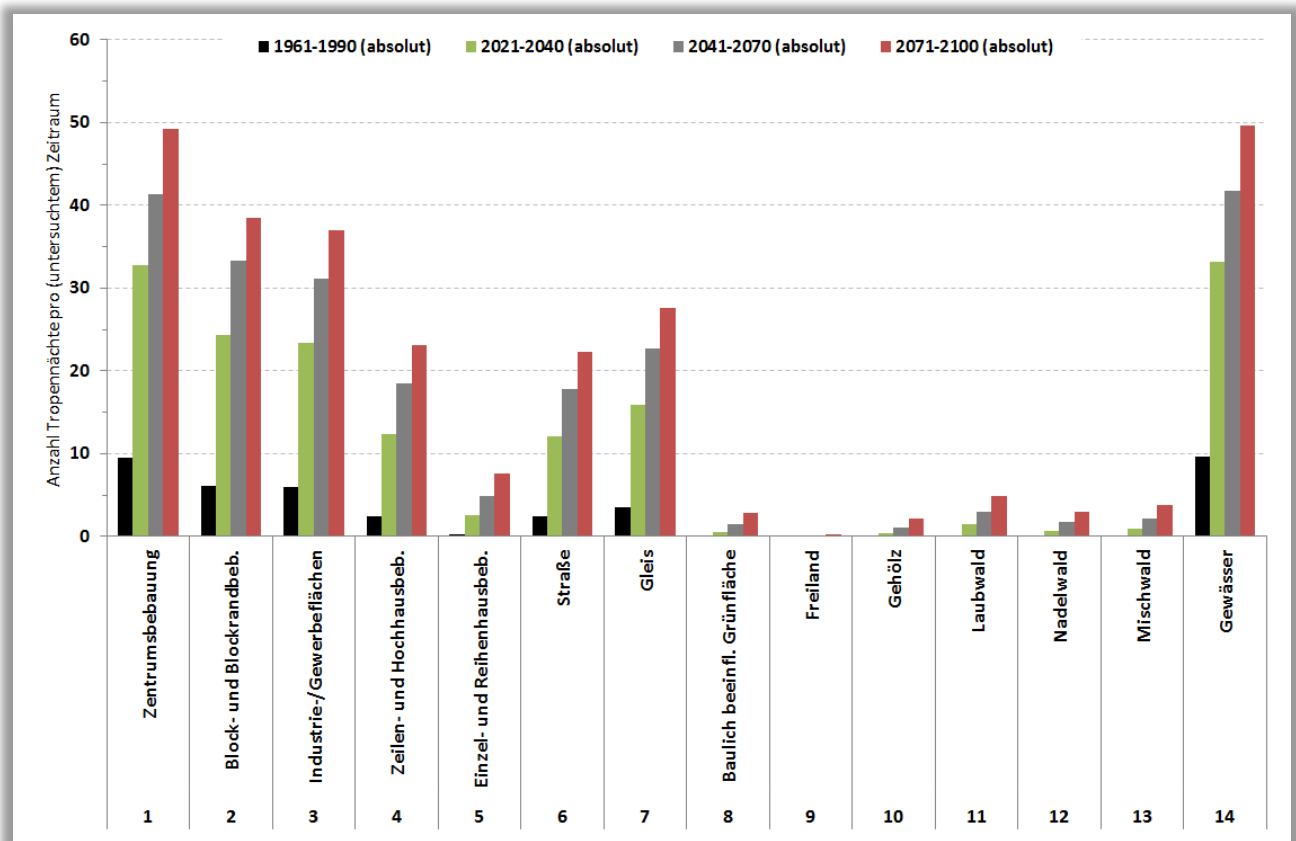


Abb. 5.31: Mittlere jährliche Anzahl an Tropennächten ($T_{min} \geq 20 \text{ °C}$) in der Referenzperiode und deren Zunahme in den Zukunftsperioden in Abhängigkeit von der Flächennutzung

Durch den Klimawandel nimmt die Anzahl an Tropennächten für alle Nutzungsklassen im gesamten Kantonsgebiet zu. Analog zur Situation bei Hitze- und PET-Überschreitungstagen werden für bereits belastete Gebiete höhere Zunahmen prognostiziert, sodass die Intensität der Belastung in diesen überproportional steigt (s. 5.31 für die einzelnen Nutzungsklassen, Abb. 5.32 bis Abb. 5.34 flächenhaft). Entsprechend weitet sich das regelmässige Auftreten von Tropennächten auch auf die Randbereiche aus, während im Kerngebiet bis Ende des Jahrhunderts ($p3$) sogar mit im Mittel 50, in einigen Bereich mit über 70 Tropennächten pro Jahr im Maximum zu rechnen ist (s. Abb. 5.35 für die Stadt Zürich).

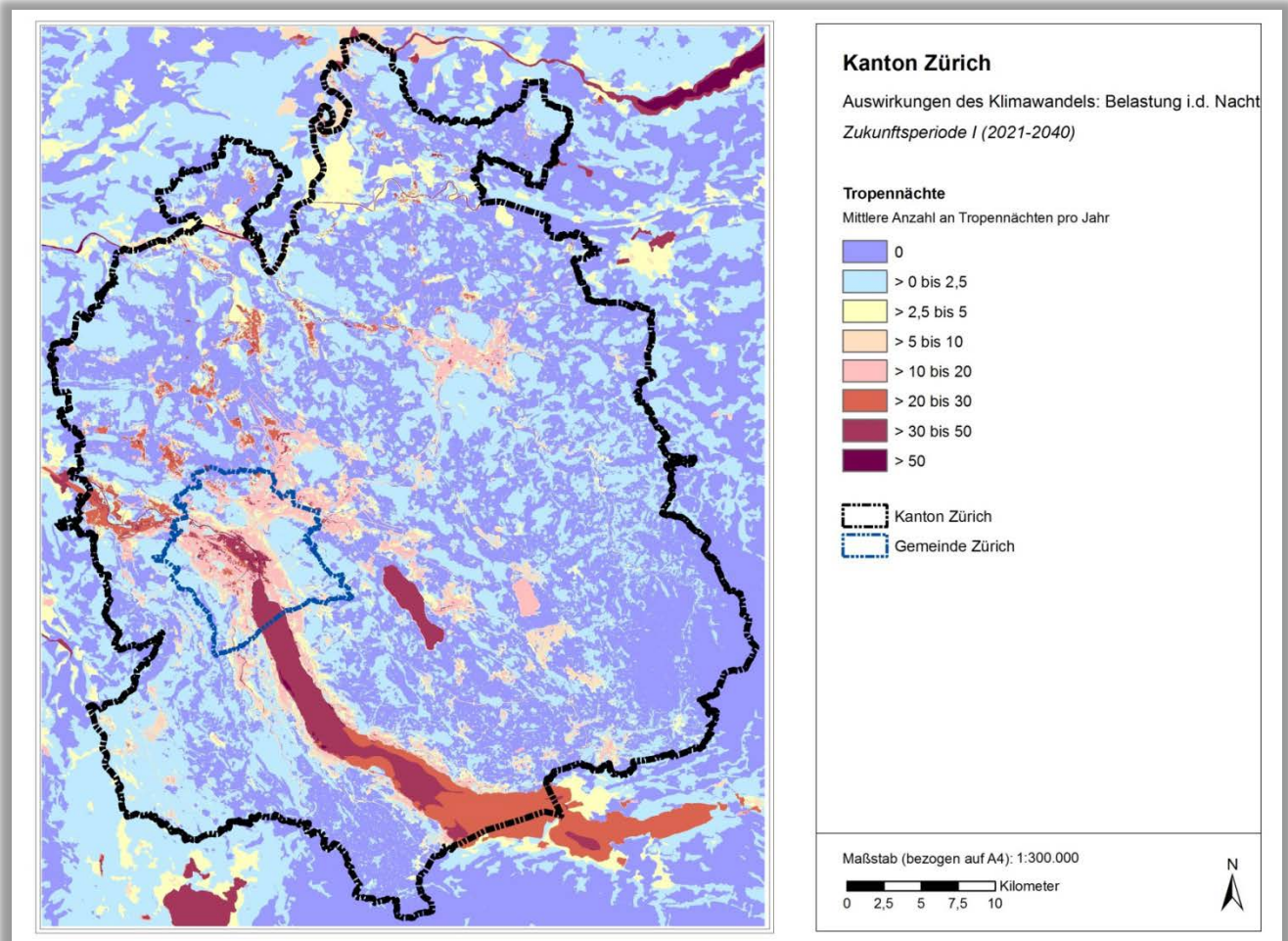


Abb. 5.32: Räumliche Verteilung von Tropennächten im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode I (2021-2040)

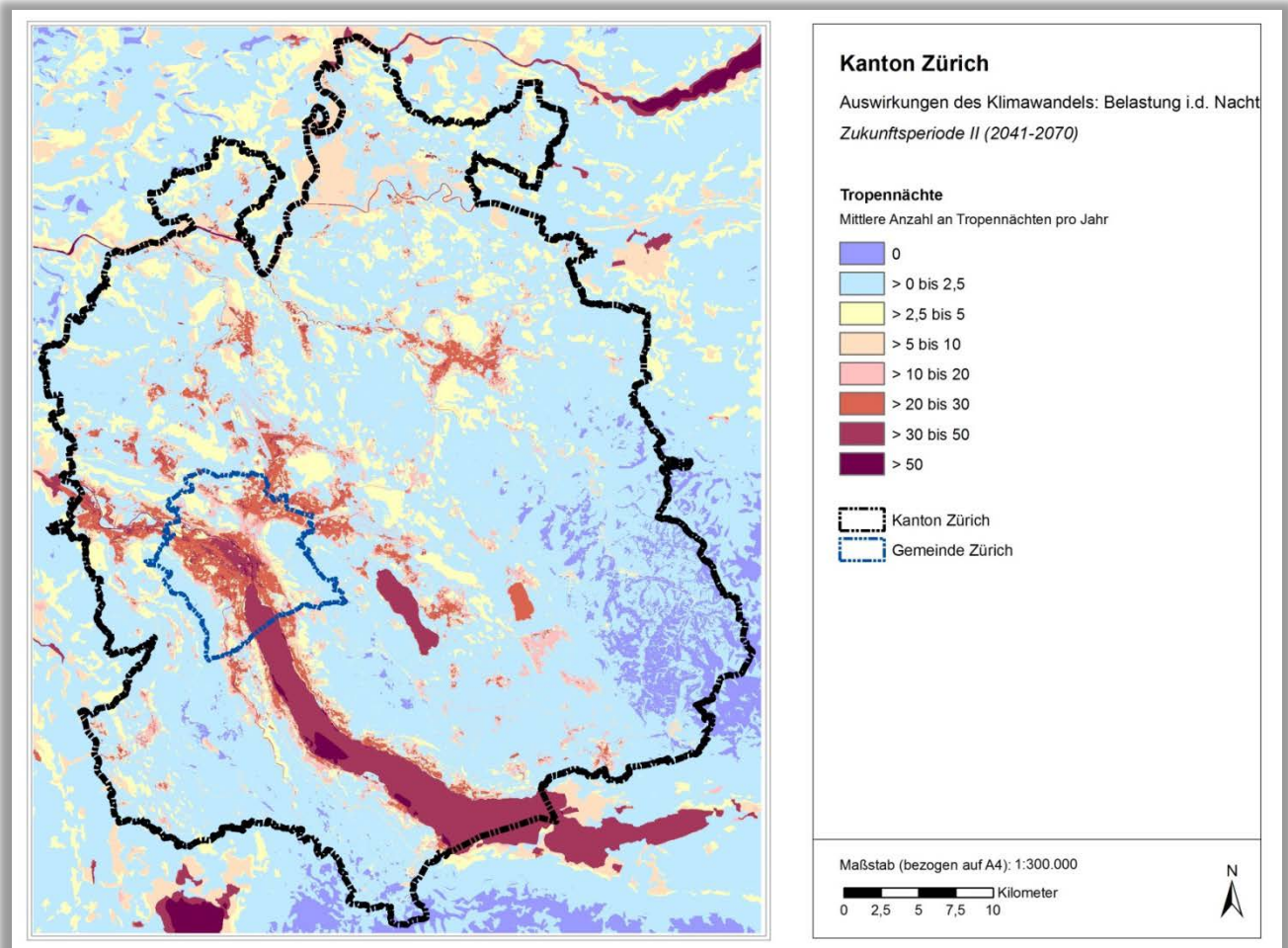


Abb. 5.33: Räumliche Verteilung von Tropennächten im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode II (2041-2070)

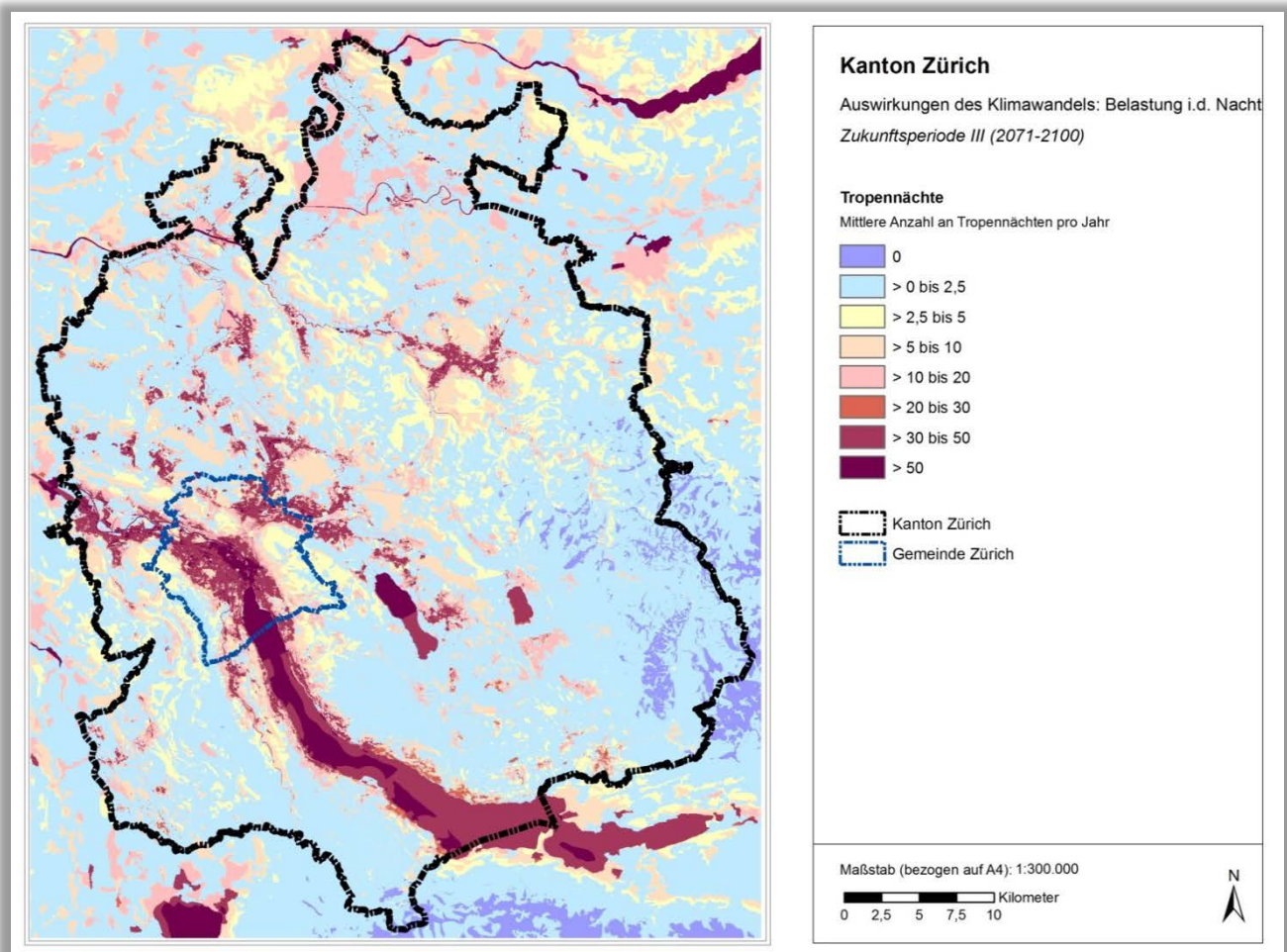


Abb. 5.34: Räumliche Verteilung von Tropennächten im Kanton Zürich in der Zukunftsperiode III (2071-2100)

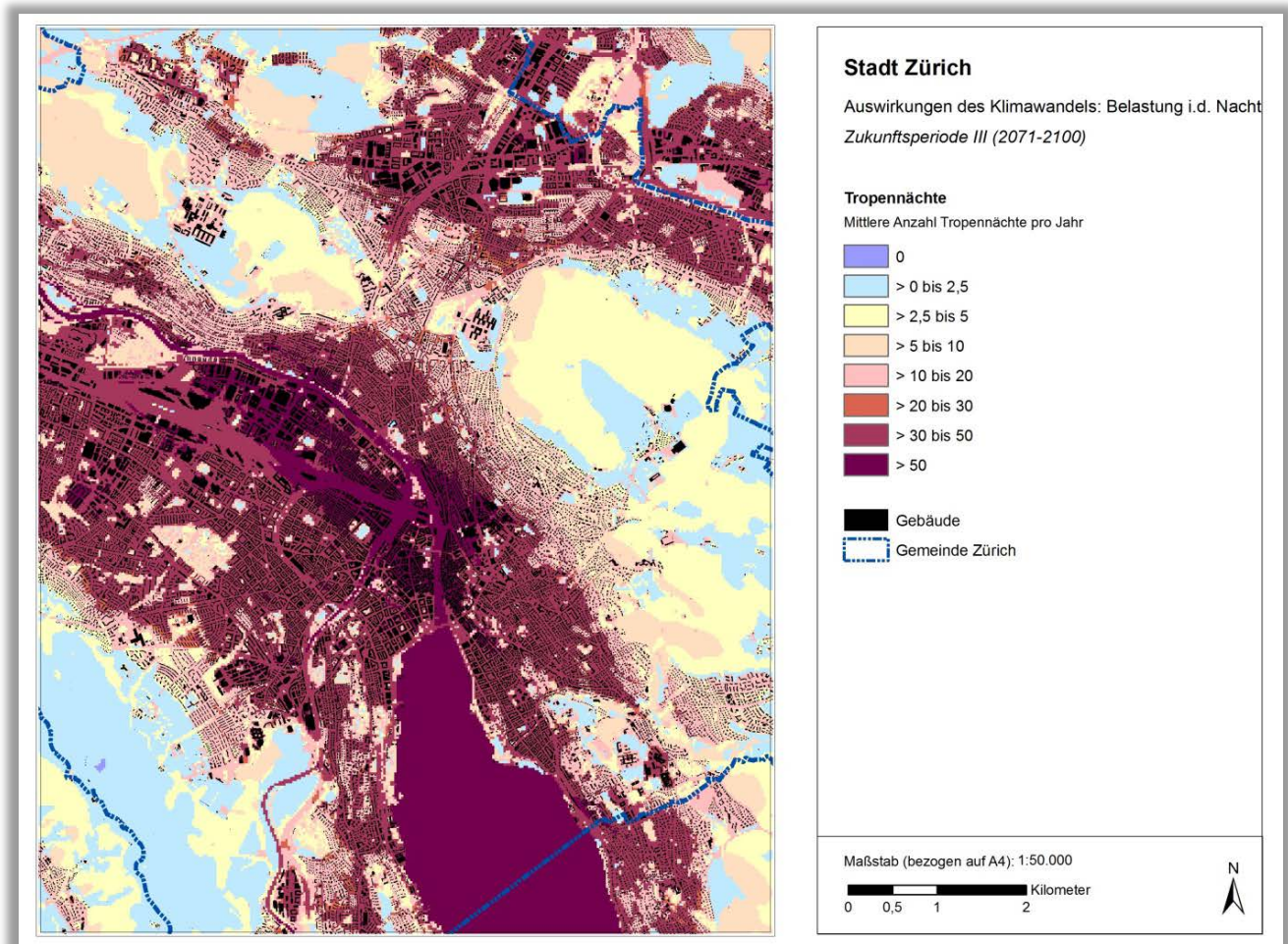


Abb. 5.35: Räumliche Verteilung von Tropennächten in der Stadt Zürich in der Zukunftsperiode III (2071-2100)

6 Planungshinweiskarten Stadtklima

Innerstädtische und siedlungsnaher Grünflächen haben eine wesentliche Wirkung auf das Stadtklima und beeinflussen die direkte Umgebung in mikroklimatischer Sicht positiv. Die Planungshinweiskarten Stadtklima stellen eine integrierende Bewertung der modellierten Klimaparameter im Hinblick auf planungsrelevante Belange dar. Aus ihnen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmassnahmen zur Verbesserung von Klima und - über die Effekte der Verdünnung und des Abtransportes - auch der Luft ableiten. Dem Leitgedanken dieser Bemühungen entsprechen die Ziele zur

- Sicherung,
- Entwicklung und
- Wiederherstellung

klimaökologisch wichtiger Oberflächenstrukturen. Die zugeordneten Planungshinweise geben Auskunft über die Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen, aus denen sich klimatisch begründete Anforderungen und Massnahmen im Rahmen der räumlichen Planung ableiten lassen.

Es wurde jeweils eine separate Planungshinweiskarte (PHK) für die Nacht- und Tagsituation erstellt, die sich jeweils auf das Kantonsgebiet Zürich beziehen. In Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Blatt 1 bzw. 3787, Blatt 1 erfolgte eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungsflächen als **Wirkungsraum** bzw. der Bedeutung von Grünflächen als **Ausgleichsraum** (VDI 2008a, VDI 2014). Ausgehend von ihren Bewertungen werden den Flächen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben.

6.1 Vorgehensweise

6.1.1 Bewertung der Nachtsituation

BEBAUTER SIEDLUNGSRAUM SOWIE STRASSEN UND PLÄTZE

Zur Bewertung der bioklimatischen Situation wird die nächtliche Überwärmung in den Nachtstunden (04 Uhr morgens) herangezogen. Da die Planungshinweiskarte die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Luftaustausches abbilden soll, wird hier der nächtliche Wärmeinseleffekt betrachtet. In der Nacht ist weniger der Aufenthalt im Freien Bewertungsgegenstand, sondern vielmehr die Möglichkeit eines erholsamen Schlafes im Innenraum. Die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 weist darauf hin, dass die „Lufttemperatur der Aussenluft die entscheidende Grösse“ für die Bewertung der Nachtsituation darstellt und näherungsweise ein direkter Zusammenhang zwischen Aussen- und Innenraumluft unterstellt werden kann (VDI 2008b, 25). Als optimale Schlaftemperaturen werden gemeinhin 16 - 18 °C angegeben (UBA 2016), während Tropennächte mit einer Minimumtemperatur ≥ 20 °C als besonders belastend gelten. Eine mit der PET vergleichbare Bewertungsskala existiert für die nächtliche Situation im Innenraum (noch) nicht.

Für die Planungshinweiskarte erfolgte die räumlich differenzierte Bewertung der Nachtsituation daher über die nächtliche Überwärmung und orientiert sich an den o.g. Temperaturbereichen. Dafür wurde die mittlere Lufttemperatur innerhalb des bebauten Siedlungsraumes sowie der Strassen und Plätze in fünf Klassen untergliedert (Tab. 6.1).

Die Durchschnittstemperatur über alle bebauten Siedlungsflächen sowie Strassen und Plätze beträgt um 04 Uhr morgens im Kanton Zürich 17.5 °C. Beträgt die mittlere Temperatur einer Fläche weniger als 17.5 °C, liegt keine Überwärmung vor. Bei mehr als 20.0 °C ist hingegen von einer sehr hohen nächtlichen Überwärmung auszugehen, was mit einer entsprechend hohen thermischen Belastung einhergeht.

Spannweite der mittleren Lufttemperatur um 04:00	Bewertung
< 17,5 °C	Keine Überwärmung
≥ 17.5 °C bis < 18.0 °C	Schwache Überwärmung
≥ 18.0 °C bis < 19.0 °C	Mässige Überwärmung
≥ 19.0 °C bis < 20.0 °C	Hohe Überwärmung
≥ 20,0 °C	Sehr hohe Überwärmung

Tab. 6.1: Bewertung des nächtlichen Wärmeinseleffekts im bebauten Siedlungsraum sowie Strassen und Plätzen

GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika der Grünflächen¹⁰ 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. 6.1). 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 > 0,1 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 *Leitbahnen*
Leitbahnen 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 > 0.1 ha)

¹⁰ Als „Grünfläche“ werden hier unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung all jene Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal etwa 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Wälder.

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. Grünflächen aus (7) wird eine **mittlere bioklimatische Bedeutung** zugesprochen, wenn es sich um einen Waldbestand handelt
11. 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 belasteten Wirkungsraum oder weist ein überdurchschnittliches Kaltluftliefervermögen auf und ist gleichzeitig als Ausgleichsraum oder Kaltluftquellgebiet einzustufen.

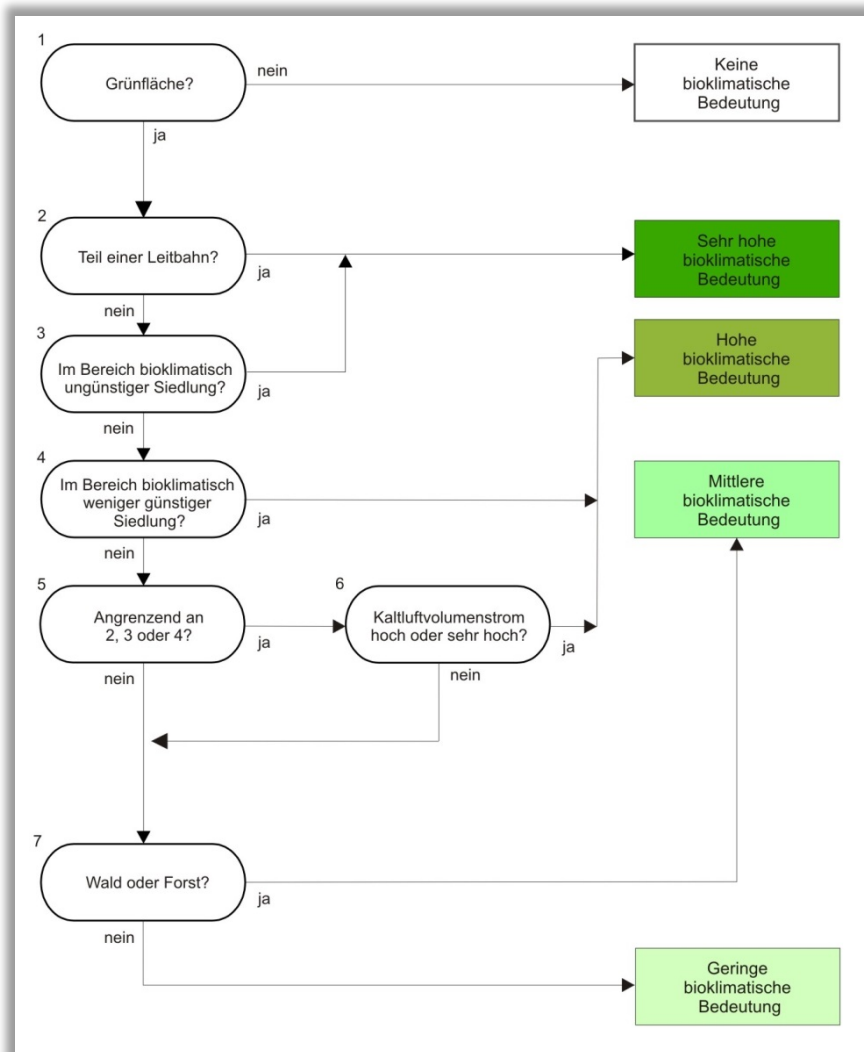


Abb. 6.1: Verknüpfungsmodell zur Ermittlung der bioklimatischen Bedeutung der Grünflächen in der Nacht

WEITERE KOMPONENTEN DER PLANUNGSHINWEISKARTE NACHTSITUATION

Siedlungsfläche mit perspektivisch hoher Zunahme der nächtlichen Wärmebelastung

Grundlage für die Bewertung ist die Zunahme an Tropennächten ($T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$) im bebauten Siedlungsraum zwischen der Referenzperiode 1961 - 1990 und der Zukunftsperiode 2021 - 2040 (Kap. 5.3.3) über das statistische Verfahren der Z-Transformation (Kap. 4.4). Die Zunahme beträgt - im Mittel über alle Siedlungsflächen - 7 Tage/Jahr gegenüber dem Referenzzeitraum. Die mit einer Schraffur gekennzeichneten Bereiche weisen eine hohe perspektivische Zunahme von mehr als 13 Tagen auf.

Hohe Einwohnerdichte

Grundlage für die Ausweisung einer hohen Bevölkerungsdichte sind die Rasterdaten des Einwohnerregisters für den Kanton Zürich (Stand 2016). Diese Daten werden in einer räumlichen Auflösung von 25 m x 25 m bereitgestellt. In der Karte wird das 90. Perzentil dargestellt, was einer Einwohnerdichte von mehr als 20 Einwohnern pro Rasterzelle entspricht.

Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung

Diese Schraffur kennzeichnet alle Siedlungsflächen, welche sich im „Einwirkungsbereich“ eines klimatisch wirksamen Kaltluftvolumenstroms von mindestens $425 \text{ m}^3/\text{s}$ befinden (Kap. 4.4).

Hauptströmungsrichtung der Kaltluft in Grünflächen

Zur Visualisierung des Prozessgeschehens ist für jede Grünfläche > 1 ha die mittlere Windrichtung berechnet worden. Die Grösse des Pfeiles repräsentiert die jeweilige Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms innerhalb der Einzelfläche.

Kaltlufteinzugsgebiete

Die Kaltlufteinzugsgebiete kennzeichnen die Bereiche mit einheitlichem Abflussgeschehen nach dem Wasserscheidenprinzip. Diese werden nicht bewertet.

Kaltluftleitbahnen

Leitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind aufgrund ihrer Klimafunktion elementarer Bestandteil des Luftaustausches (vgl. Kap. 3.3).

6.1.2 Bewertung der Tagsituation

Zur Bewertung der Tagsituation wird der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (vgl. Kap. 4.2). Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologischen Belastungsstufen quantifizieren (vgl. Tab. 6.2). Die Bewertung der thermischen Belastung im Kanton Zürich orientiert sich daran. Da die Kategorien jeweils eine Wertespanne von mehreren °C abdecken, ist zur besseren Darstellung der Belastungssituation im bebauten Siedlungsraum eine weitere Kategorie hinzugefügt worden. Diese umfasst den Temperaturbereich 37 °C bis 41 °C (als „sehr starke Wärmebelastung“) und führt zu einer besseren Differenzierung der Belastungssituation vor allem im urbanen Gebiet. Die Werteausprägung in den Grün- und Freiflächen machte diese zusätzliche Kategorie hingegen nicht notwendig.

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
37 °C	Heiss	Sehr starke Wärmebelastung
41 °C	Sehr heiss	Extreme Wärmebelastung

Tab. 6.2: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden

Die Zuweisung der Aufenthaltsqualität von Grün- und Freiflächen in der Planungshinweiskarte beruht auf der jeweiligen physiologischen Belastungsstufe. So liegt eine hohe Aufenthaltsqualität bei einer schwachen oder nicht vorhandenen Wärmebelastung vor, während eine starke oder extreme Wärmebelastung zu

einer geringen bzw. sehr geringen Aufenthaltsqualität führt. Die bioklimatische Bewertung am Tage ist ein Mass für die Aufenthaltsqualität in den Siedlungsflächen ausserhalb von Gebäuden sowie in Grün- und Freiflächen. Diese beeinflusst auch die Situation innerhalb der Gebäude, doch hängt das Innenraumklima von vielen weiteren (z.B. gebäudebezogenen) Faktoren ab. Diese Zusammenhänge können im Rahmen der vorliegenden Arbeit allerdings nicht weiter vertieft werden.

6.2 Ergebnisse

6.2.1 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 und 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 04 Uhr ca. 52 % des Siedlungsraums mit Kalt-/Frischlufte versorgt und befinden sich damit im Einwirkbereich von Flurwinden und lokalen Kaltluftabflüssen.

Diesen Gunsträumen stehen Belastungsbereiche mit einer überdurchschnittlichen Wärmebelastung und einem Durchlüftungsdefizit gegenüber. Dies betrifft vor allem die Kernstadt Zürich 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 6.2 zeigt in einem Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte den Bereich Zürich/östliche Kernstadt, wobei die thermische Situation der Siedlungsräume sowie Strassen und Plätze mit einer Farbabstufung dargestellt ist. Die stärkste Überwärmung ist im Umfeld der Bahnhofstrasse anzutreffen (Dunkelrot), während die Bebauung nach Osten hin in Richtung Hottingen eine schwache bis mässige Überwärmung aufweist. Wesentliche Teile der durch Blockrandbebauung geprägten Wohngebiete entlang Seefeldstrasse/Limmatquai weisen eine hohe Überwärmung auf (Dunkelorange). Der Einwirkbereich der Kaltluft ist mit einer Schraffur dargestellt.



Bebauter Siedlungsraum sowie Straßen und Plätze
Nächtlicher Wärmeinseleffekt

- Sehr hoch
- Hoch
- Mässig
- Schwach
- Nicht vorhanden
- Siedlungsfläche mit perspektivisch hoher Zunahme der nächtlichen Wärmebelastung
- Hohe Einwohnerdichte

Grün- und Freiflächen

- Sehr hohe bioklimatische Bedeutung
- Hohe bioklimatische Bedeutung
- Mittlere bioklimatische Bedeutung
- Geringe bioklimatische Bedeutung

Luftaustausch

- Kaltluftwirkebereich innerhalb der Bebauung (Kaltluftvolumenstrom > 425 m³/s)
- Hauptströmungsrichtung der Flurwinde in den Grün- und Freiflächen (Flächengröße > 1 ha)
- Volumenstrom Mittel / Hoch / Sehr hoch
- Kaltlufteinzugsgebiete
- Kaltluftleitbahn

Abb. 6.2: Planungshinweiskarte Nachtsituation für den Bereich Zürich/östliche Kernstadt

Flächen mit einer sehr hohen Überwärmung machen unter den **bebauten Siedlungsflächen sowie Strassen und Plätzen** im Kanton allerdings nur einen geringen Anteil von 0.1 % aus und sind vorwiegend in der Zürcher Innenstadt anzutreffen. In Zürich ist auch ein grosser Anteil von Flächen mit hoher Überwärmung lokalisiert (7.4 %). Ausserhalb von Zürich überwiegt eine mässige bis schwache Überwärmung (33.5 % bzw. 17.7 %), welche lokal im Umfeld von Gewerbeflächen oder verdichteten Stadtteilzentren auf ein hohes Niveau ansteigen kann. Innerhalb der eher dörflich strukturierten Siedlungsflächen ist keine nennenswerte nächtliche Überwärmung anzutreffen. Mit einem Anteil von ca. 41 % ist dies die im Kanton Zürich am häufigsten auftretende Kategorie.

Bewertung	Flächenanteil (%)	Allgemeine Planungshinweise
Keine Überwärmung	41.4	Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
Schwache Überwärmung	17.7	Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freiflächen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben.
Mässige Überwärmung	33.5	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
Hohe Überwärmung	7.4	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen).
Sehr hohe Überwärmung	0.1	Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmassnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen).

Tab 6.3: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise

Den **Grün- und Freiflächen** im Kanton Zürich kommt etwa zu einem Viertel eine hohe bis sehr hohe bioklimatische Bedeutung zuteil (7 % bzw. 16 %; vgl. Tab 6.4). Eine mittlere Bedeutung lässt sich 32 % der Grünflächen zuordnen. Etwa 45 % der Grünflächen weisen eine geringe Bedeutung auf, d.h. sie erfüllen für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion bzw. stellen für diesen keinen Ausgleichsraum dar. Mehrheitlich handelt es sich dabei um siedlungsferne Wald- und Ackerflächen.

Bedeutung der Grünflächen	Flächenanteil (%)	Allgemeine Planungshinweise
Gering	45	Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
Mittel	32	Für die gegenwärtige 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).
Hoch	16	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
Sehr hoch	7	Für die gegenwärtige 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).

Tab. 6.4: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise

Generell gilt, dass im Falle einer Bebauung der Flächen selbst bzw. in ihrer Umgebung die Bewertung neu vorgenommen werden muss. Die Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen sind in Abb. 6.3 zusammengefasst:

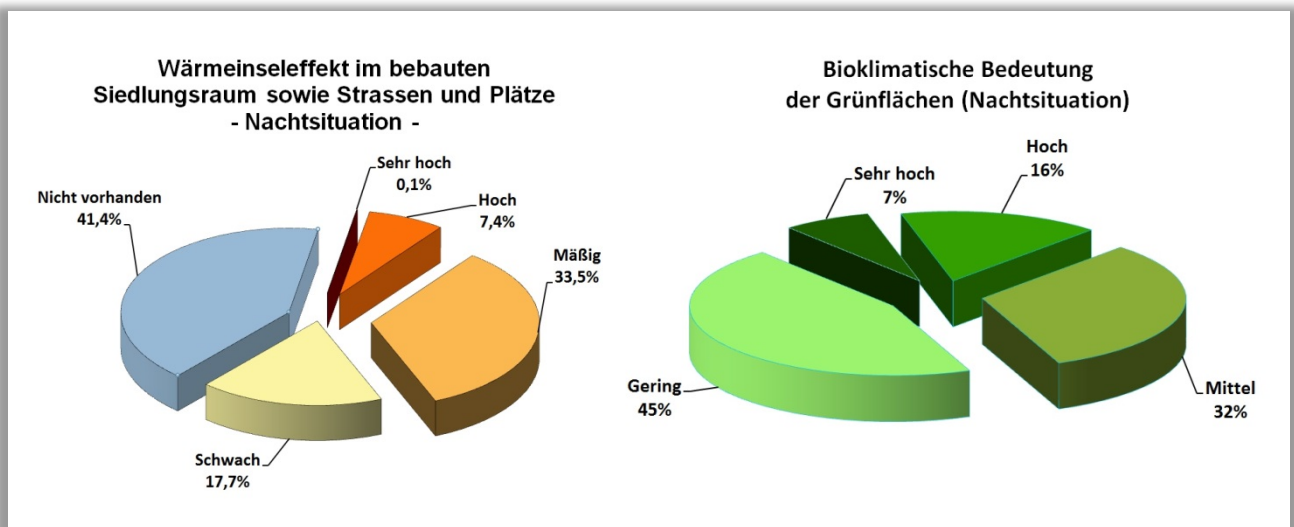


Abb. 6.3: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Kanton Zürich (Nachtsituation)

6.2.2 Tagsituation

Am Tage sind deutliche Unterschiede in der Aufenthaltsqualität sowohl in den bebauten bzw. versiegelten Bereichen als auch den Grünflächen zu erkennen (Abb. 6.4). **Urbane Siedlungsflächen** lassen mehrheitlich eine starke und sehr starke bioklimatische Belastung erkennen (36.7 % bzw. 27.0 %). Dies trifft auch auf Gewerbeflächen zu, 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 höher ausfällt. Strassen, Wege und Plätze weisen aufgrund ihrer nahezu vollständigen Versiegelung insgesamt die höchsten thermischen Belastungen auf, wenngleich ihr Flächenanteil mit extremer Belastung 0.5 % beträgt und daher eher gering ist (Tab. 6.5). 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 33.6 % in den eher peripheren Siedlungsflächen mit höherem Anteil mit Schatten spendenden Grünstrukturen zu beobachten. Vor allem im Nahbereich zu grösseren Waldflächen zeigt sich die positive Wirkung grösserer Baumbestände für die angrenzende Bebauung (Abb. 6.4).

Belastungssituation	Flächenanteil (%)	Allgemeine Planungshinweise
Nicht vorhanden	0.6	Es liegen bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein hoher Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt.
Schwach	1.6	Es liegen überwiegend bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein ausreichender Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuss- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden.
Mässig	33.6	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Dies gilt auch für Flächen des fliessenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Radwege sowie Plätze). Ausgleichsräume sollten fussläufig erreichbar und zugänglich sein.
Stark	36.7	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmassnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fliessenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fussläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
Sehr stark	27.0	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmassnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fliessenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fussläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
Extrem	0.5	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmassnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fliessenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fussläufig gut erreichbar und zugänglich sein.

Tab. 6.5: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete am Tage und abgeleitete Planungshinweise

Areale mit schwacher bzw. nicht vorhandener Belastung spielen mit einem Flächenanteil von 1.6 % bzw. 0.6 % eine untergeordnete Rolle.

Knapp 14 % der **Grünflächen** kann eine hohe Aufenthaltsqualität mit geringer PET zugeschrieben werden, d.h. sie bieten an Sommertagen eine relativ hohe Aufenthaltsqualität und eignen sich je nach Lage als (potenzielle) Rückzugsorte und Aufenthaltsbereiche für die Bevölkerung (Tab. 6.6). Dabei handelt es sich vor allem um Waldflächen sowie Parkanlagen mit ausgeprägtem Baumbestand. Die zahlreichen und weitläufigen landwirtschaftlichen Flächen im Kantonsgebiet erlauben aufgrund der meist ungehinderten Einstrahlung (unabhängig von der ohnehin fehlenden Zugänglichkeit) keinen Rückzugsort und tragen zu einem hohen Anteil an Grünflächen geringer bzw. sehr geringer Bedeutung (7 % bzw. 36 %) bei.

Aufenthaltsqualität der Grünflächen	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
Hoch	14	Grünflächen mit einem hohen Mass an Verschattung und damit einhergehender hoher Aufenthaltsqualität, die fussläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung), eine gute Erreichbarkeit sollte dahingehend gewährleistet sein.
Mässig	43	Grünflächen mit einem durchschnittlichen Mass an Verschattung, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und schützen (ggf. Bewässerung) sowie ggf. auszubauen. Zudem kann es sich um siedlungsferne Grünflächen mit hoher Verschattung handeln, die nicht in fussläufiger Erreichbarkeit liegen, aber als Aufenthaltsbereiche am Tage dienen können.
Gering	7	Frei- und Grünflächen mit einem Defizit an Verschattung (geringe Ausgleichsfunktion). Eher schlechte Eignung als Aufenthaltsbereich. Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
Sehr gering	36	Freiflächen bzw. siedlungsferne Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).





Tab. 6.6: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale am Tage und abgeleitete Planungshinweise

Einen Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte für die Tagsituation ist in Abb. 6.4 dargestellt. Hier zeichnen sich deutlich die Strassenbereiche mit einer sehr starken Belastung ab, wobei einzelne Abschnitte auch mit extremer Belastung hervortreten (rote Farbe). In den bebauten Siedlungsflächen dominiert je nach Siedlungstypologie eine starke bis sehr starke Belastung. Im Bereich Fluntern/Hottingen ist eine mässige Situation zu beobachten, was im Wesentlichen auf den höheren Grünanteil der Bebauung zurückzuführen ist. Plätze mit ausgeprägtem Baumbestand wie der Lindenhof weisen ebenfalls eine mässige Belastungssituation auf.



**Bebauter Siedlungsraum
sowie Straßen und Plätze**

Bioklimatische Belastungssituation

-  Extreme Belastung
-  Sehr starke Belastung
-  Starke Belastung
-  Mässige Belastung
-  Schwache Belastung
-  Keine Belastung

Grün- und Freiflächen





-  Hohe Aufenthaltsqualität am Tage
-  Mässige Aufenthaltsqualität am Tage
-  Geringe Aufenthaltsqualität am Tage
-  Sehr geringe Aufenthaltsqualität am Tage

Abb. 6.4: Planungshinweiskarte Tagsituation für den Bereich Zürich/östliche Kernstadt

In zahlreichen Grünflächen können Bäume durch ihren Schattenwurf für ein angenehmeres Aufenthaltsklima sorgen, da dieser den Strahlungseinfluss deutlich vermindert. Eine Bilanzierung der Flächenanteile für die Tagsituation zeigt Abb. 6.5.

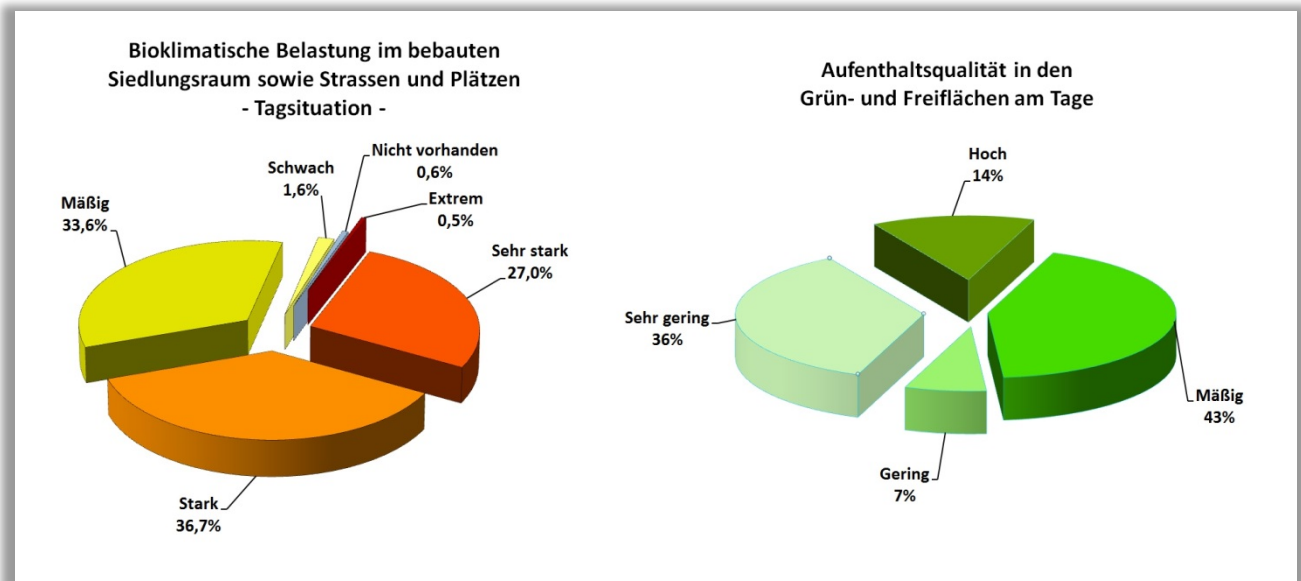


Abb. 6.5: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Kanton Zürich (Tagsituation)

WEITERE HINWEISE ZUR VERRINGERUNG DER WÄRMEBELASTUNG IN DEN SIEDLUNGSFLÄCHEN SOWIE ZUR AUFENTHALTSQUALITÄT VON GRÜNFLÄCHEN

Luftaustausch

Eine klimaoptimierte Gestaltung zukünftiger Baufelder sollte vorhandene Kalt-/Frischlufstromungen berücksichtigen, um deren klimatische Wohlfahrtswirkung sowohl in einem neuen Quartier als auch im Bestand zu sichern. Dazu sollten Gebäude parallel zur Fließrichtung der Kaltluft angeordnet werden sowie ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen ihnen erhalten bleiben. Ziel ist es, den Bebauungsrand durchlässig zu gestalten und von den angrenzenden Grünflächen auch weiterhin nächtliche Kaltluft in die Bebauung eindringen zu lassen.

Verringerung der Wärmebelastung im Siedlungsraum

Während am Tage die direkte, kurzwellige Strahlung der Sonne wirksam ist, geben nachts Bauwerke und versiegelte Oberflächen die tagsüber gespeicherte Energie als langwellige Wärmestrahlung wieder ab. Durch die Verringerung des Wärmeinputs am Tage mit Hilfe bspw. von Fassadenbegrünung oder Strassenbäumen wird gleichzeitig weniger Strahlungsenergie in der Baumasse gespeichert und damit in der Nacht auch weniger Wärme an die Luft abgegeben. Neben einer hohen Grünausstattung lässt sich zudem durch die Verwendung von hellen Baumaterialien die Reflexion des Sonnenlichtes (Albedo) erhöhen, so dass ebenerdig versiegelte Flächen oder auch Fassaden stärker zurückstrahlen. Dadurch bleiben sie kühler und nehmen damit insgesamt weniger Wärmeenergie auf.

Bedeutung von Dach- und Fassadenbegrünung

Zu den weiteren effektiven Massnahmen, die Erwärmung der Gebäude am Tage abzuschwächen, zählen Dach- und Fassadenbegrünung. Letztere wirkt zweifach positiv auf einen Gebäudebestand ein, da einerseits durch die Schattenspende die Wärmeeinstrahlung am Tage reduziert wird und andererseits über die Verdunstungskälte des Wassers Wärme abgeführt wird. Eine Fassadenbegrünung ist insbesondere an West-

und Südfassaden wirksam, da hier die stärkste Einstrahlung stattfindet. Darüber hinaus mindert eine Begrünung die Schallreflexion und damit die Lärmbelastung und kann zu einem gewissen Grad Stäube und Luftschadstoffe binden. Die Möglichkeiten bei der Realisierung einer Fassadenbegrünung werden allerdings entscheidend von der baulichen Ausgangssituation mitbestimmt.

Bei einer Dachbegrünung wirkt die Vegetation zusammen mit dem Substrat isolierend und verringert damit das Aufheizen des darunterliegenden Wohnraums. Zudem senkt die Dachbegrünung die Oberflächentemperatur des Daches aufgrund der Verdunstung von Wasser ab und verringert die Temperatur in der oberflächennahen Luftschicht. Allerdings kommt es bei einer hohen Traufhöhe von Gebäuden zu einer vertikalen Entkopplung der positiven Effekte. Nur relativ niedrige Gebäude (< 5 m) mit Dachbegrünung können zu einem im bodennahen Bereich positiven Abkühleffekt beitragen. Gründächer auf 4-5 geschossigen Gebäuden zeigen in der untersten Schicht der Stadtatmosphäre (= Aufenthaltsbereich des Menschen) keinen nennenswerten positiven Temperatureffekt. Voraussetzung für die Kühlwirkung ist allerdings immer ein ausreichendes Wasserangebot für die Vegetation. Sollte bei längeren Hitzeperioden die Vegetation austrocknen, steigen die Temperaturen wieder auf das Niveau eines normalen Daches an und können sogar darüber hinausgehen. Der Kühlungseffekt für die Innenräume bleibt dabei aber erhalten. Im Winter isoliert ein Gründach zusätzlich und kann zur Senkung des Heizbedarfes beitragen. Ein weiterer Vorteil von Dachbegrünung ist im Retentionsvermögen von Regenwasser zu sehen, wodurch die Kanalisation vor allem bei Starkregenereignissen entlastet wird.

Grünflächen und Aufenthaltsbereiche im Freien

Eine intensive Begrünung des Strassenraums und die Aufwertung der Bestandsbebauung mit Bäumen steigern die Aufenthaltsqualität im Freien beträchtlich, da somit grosse beschattete Bereiche geschaffen werden und das Gehen/Velofahren im Schatten ermöglichen. Dieser Aspekt ist vor allem relevant, um den Nutzen siedlungsnaher Grünflächen mit starker solarer Einstrahlung zu erhöhen.

Im Übergangsbereich einer Grünfläche zur Bebauung sollte allerdings auf dichte Vegetationselemente wie Gehölze und Hecken verzichtet werden, da diese die bodennahe Kaltluftströmung beeinträchtigen können. Ein weiteres klimaausgleichendes Gestaltungselement können Brunnenanlagen in Platzbereichen bzw. Freiflächen darstellen. Insbesondere die Temperaturspitzen können kleinräumig durch die durch Wasserflächen erzeugte Verdunstungskälte reduziert werden und die Aufenthaltsqualität im Freien verbessern. Für die strukturelle Ausgestaltung der Grünanlage lassen sich die folgenden Hinweise geben.

Innerstädtische Grün- und Freiflächen sollten möglichst vielfältige Mikroklimare bereitstellen, wobei als Leitbild der erweiterte „Savannentyp“ dienen kann (KUTTLER 2013). Er besteht zu einem grossen Anteil aus gut wasserversorgten Rasenflächen und kleinen Baumgruppen, die mit offenen multifunktionalen Wasserflächen (z.B. Wasserspielplatz und Retentionsraum für Starkregenereignisse), Hügellandschaften, verschatteten Wegen und Sitzgelegenheiten sowie weiteren Strukturmerkmalen (Beete, Rabatten, Blumenwiesen, Sukzessionsflächen) angereichert sind (Abb. 6.6). Ziel sollte sein, möglichst vielgestaltige „Klimaoasen“ zu schaffen, welche ein abwechslungsreiches Angebot für die unterschiedlichen Nutzungsansprüche der Menschen (z.B. windoffene und windgeschützte Bereiche, offene „Sonnenwiesen“, beschattete Bereiche) darstellen. Durch diese heterogene Anordnung wird sichergestellt, dass sowohl die nächtliche Abkühlung der Luft als auch der Aufenthalt am Tage für alle Zielgruppen optimiert ist.

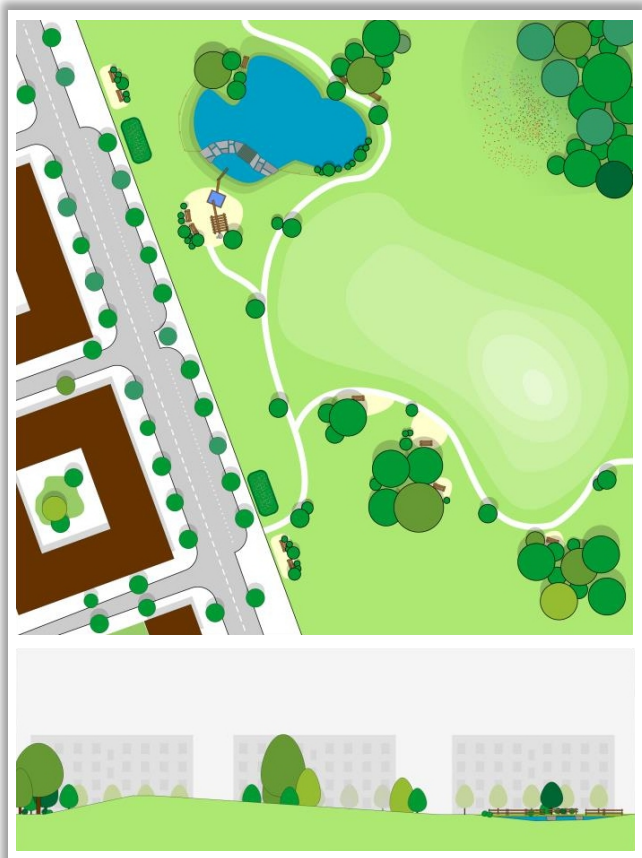


Abb. 6.6: Klimatisch günstige Ausgestaltung von Freiflächen

7 Literatur

- BENESTAD, R.E., HANSSEN-BAUER, I. & CHEN, D. (2008): Empirical-Statistical downscaling. World Scientific Publishing. Singapore.
- CHRISTENSEN, J.H. et al. (2007): Regional Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, S. 847 – 940.
- DKRZ (2017) – Deutsches Klimarechenzentrum: Globale Mitteltemperatur. Abruf: 28.03.2018. www.dkrz.de/Klimaforschung/konsortial/ipcc-ar5/ergebnisse/Mitteltemperatur
- DFG (1988) – Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- DWD (2017) – Deutscher Wetterdienst: Klimawandelgerechte Metropole Köln. Abruf: 28.03.2018. http://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadtpl/projekt_koeln/stadtpl_koeln_node.html
- DWD (2016) – Deutscher Wetterdienst: Nationaler Klimareport 2016. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 40 Seiten.
- FISCHER, A. M. et al. (2012): Climate change projections for Switzerland based on a Bayesian multi-model approach. *Int. J. Climatol.*, 32: 2348–2371.
- FRÜH, B. et al. (2011): Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. *JAMS*.
- GIORGI, F., JONES, C. & ASRAR, G. R. (2009): Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, *WMO Bulletin*, 58(3):175-183.
- GROSS, G. (1989): Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. *Beitr. Phys. Atmosph.*, H 62, S. 57-72.
- GROSS, G. (1993): Numerical Simulation of canopy flows. Springer Verlag Heidelberg.
- GROSS, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model. *Meteor. Z.schr.* Vol. 11 Nr. 5, S. 701-710.
- IPCC (2014) – Intergovernmental Panel on Climate Change: Synthesebericht des Fünften IPCC Sachstandsberichts.
- JENDRITZKY, G., et al. 1990. Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). *Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan.* Nr. 114.
- KIESE, O. et al. (1992): Stadtklima Münster. Entwicklung und Begründung eines klimarelevanten Planungskonzeptes für das Stadtgebiet von Münster. *Stadt Münster - Werkstattberichte zum Umweltschutz 1/1992*
- Klimanavigator (2017): Die RCP-Szenarien für den aktuellen 5. IPCC-Sachstandsbericht. Abruf: 28.03.2018 www.klimanavigator.de/dossier/artikel/012038/index.php

- KUTTLER, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig. Band 13.
- KUTTLER, W. (2013): Klimatologie. Kapitel: Lokale Massnahmen gegen den globalen Klimawandel. Paderborn: Schöningh (2. Auflage).
- MOSIMANN, Th., P. TRUTE & Th. FREY (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-275.
- PAVLIK, D. et al. (2012): Dynamic downscaling of global climate projections for Eastern Europe with a horizontal resolution of 7 km. Environ Earth Sci 65(5): 1475–1482.
- VDI (2004): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9. Umweltmeteorologie Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene.
- VDI (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- VDI (2008b): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.
- VDI (2014): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Entwurf.