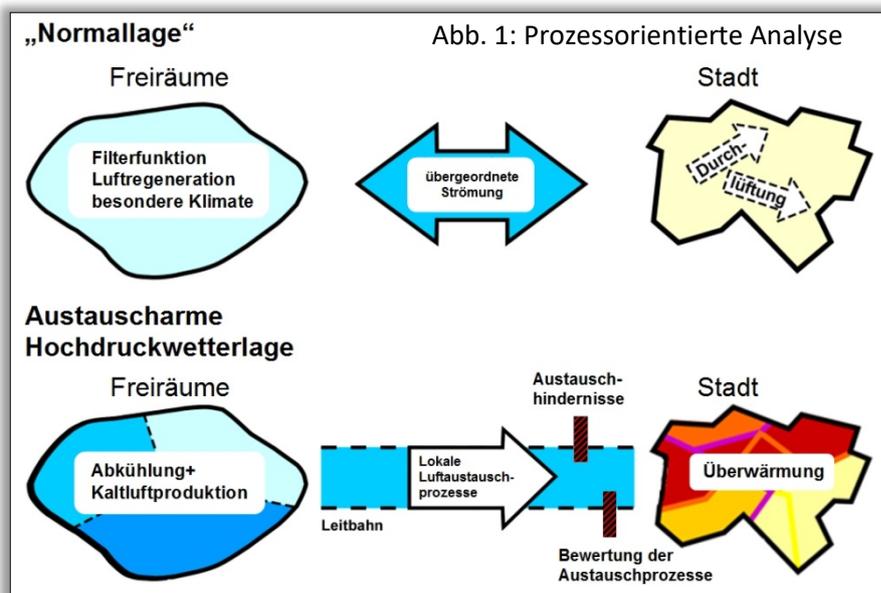


Analyse der klimaökologischen Funktionen und Prozesse für das Gebiet des Kantons Zürich

- Zusammenfassung -

1 Allgemeines

Das lokale Klima in Städten unterscheidet sich von dem des Umlandes und vor allem im Sommer zeichnen sich grössere Städte als „Wärmeinseln“ ab. Bebaute und versiegelte Flächen speichern die Hitze des Tages bis in die Nacht hinein und geben sie dann wieder an die darüber lagernde Luft ab. Zudem wird in Städten zusätzlich Wärme erzeugt - durch Gewerbe und Industrie sowie den Verkehr. Daher liegt in Städten - über das Jahr gesehen - die mittlere Lufttemperatur der Innenstädte um ein bis drei Grad Celsius über den Werten im Umland oder grossen innerstädtischen Grünflächen. Während windschwacher Sommernächte mit wolkenlosem Himmel kann dieser Unterschied sogar mehr als 10 Grad betragen. In diesem Zusammenhang spricht man vom „Stadtklima“. Die Stadt als Wärmeinsel ist in Mitteleuropa besonders in den Sommernächten nachweisbar. Solche heißen Nächte, in denen die Lufttemperatur nicht unter 20 °C fällt, werden auch Tropennächte genannt. Hohe nächtliche Temperaturen können beispielsweise in den dicht bebauten Innenstadtbereichen oder grösseren Gewerbeflächen auftreten. Gleichzeitig kann es aber auch vergleichsweise kühle Sommer geben, wo keine einzige Tropennacht auftritt. In den letzten Jahrzehnten ist allerdings eine tendenzielle Zunahme der Anzahl von Tropennächten zu beobachten. Die Überwärmung der Siedlungsflächen kann zu gesundheitlichen Belastung führen, die vor allem alte und ganz junge Menschen betreffen. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen (Abb. 1).



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. 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). Bei diesen Wetterlagen werden die Luftströmungen im bodennahen Bereich vor allem durch die Geländeform sowie den Temperaturunterschied zwischen den bebauten Flächen und Grünarealen geprägt.

Warum ist das Thema Stadtklima so bedeutsam? Es ist ein wichtiger Aspekt für die räumliche Planung und die Stadtentwicklung allgemein, um gesundheitlich unbedenkliche Lebens- und Wohnbedingungen in den Städten gewährleisten zu können. Dahingehend ist es als ein Schutzgut wie z.B. auch Boden und Wasser anzusehen, das im Zuge eines weiteren Wachstums der Städte vor negativen Einflüssen bewahrt werden sollte.

Was soll dabei für das Stadtklima erreicht werden?

1. Günstige bioklimatische Verhältnisse, d.h. Klimavielfalt, gute Durchlüftung, geringe Immissionsbelastung etc. müssen gesichert bzw. entwickelt werden.
2. Positive Funktionen wie Frischluftzufuhr und Durchmischung müssen erhalten und verbessert werden.
3. Vorhandene klimatische und lufthygienische Belastungen müssen durch ausgleichende Prozesse gemildert bzw. abgebaut werden.

Um den Zusammenhang zwischen den klimatisch wirksamen Grün-/Freiflächen einerseits und den unterschiedlich verdichteten Bereichen im Kanton Zürich herauszuarbeiten, wurde im Auftrag der Baudirektion des Kantons 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. Das wesentliche Ziel dieser Analyse ist, mit der Anwendung des Klimamodells FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources) eine 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 meteorologische Daten für das gesamte Kantonsgebiet vor. Die aus den Ergebnissen abgeleiteten Planungshinweiskarten spiegeln neben der Nacht-Situation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider. 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.

An dieser Stelle sei auch auf den vorliegenden Abschlussbericht verwiesen. In diesem wird die Stadtklimaanalyse umfassend dargestellt und er geht auf die Methodik der Modellrechnung sowie die Analyse- und Planungshinweiskarten ein. Zudem werden die Auswirkungen des Klimawandels auf das regionale Klima im Kanton Zürich beschrieben.



2 Ergebnisse der Klimamodellierung

Mit einem Klimamodell wurden verschiedene meteorologische Parameter simuliert. Für die Bereitstellung der Modelleingangsdaten musste die flächenhaft vorliegende Landnutzung des Kantons 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 Modellergebnisse liegen ebenfalls in der verwendeten Rasterauflösung vor und können für die Analyse herangezogen werden. Neben den Parametern zum nächtlichen Kaltlufthaushalt wie bodennahe Lufttemperatur und Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft wurde für die Tagsituation auch die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) berechnet. Dieser Temperaturwert wird vor allem über die Sonneneinstrahlung beeinflusst und repräsentiert gut das Wärmeempfinden des Menschen an Tagen mit starker solarer Strahlung.

Nächtliche Lufttemperatur und Kaltluftströmungsfeld

Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher in der Regel einen ausgeprägten Abfall während der Abend- und Nachtstunden. Dieser erreicht kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages ein Minimum. Das Ausmass der nächtlichen Abkühlung kann dabei – je nach den meteorologischen Verhältnissen, der Lage des Standorts und den landnutzungsabhängigen physikalischen Boden- und Oberflächeneigenschaften – grosse Unterschiede aufweisen, so dass sich bereits auf kleinem Raum ein differenziertes Temperaturfeld mit mehr als 9°C Temperaturabweichung einstellen kann.

Besonders auffällig dabei ist das thermische Sonderklima der Siedlungsräume. Die in Städten gegenüber dem Umland modifizierten klimatischen Verhältnisse lassen sich auf einige wesentliche Faktoren zurückführen. Hierzu gehören

- die erhöhte Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Boden- und Oberflächeneigenschaften
- die durch die Geometrie der städtischen Baukörper vergrösserte strahlungsabsorbierende Oberfläche
- die herabgesetzte Verdunstung durch die direkte Einleitung des Niederschlagswassers in die Kanalisation oder die Vorflut
- die über die vermehrte Emission von Gasen und Aerosolen zugunsten eines langwelligen Strahlungsgewinns veränderte Strahlungsbilanz (lokaler Treibhauseffekt)
- die Wirkung der Stadt als Strömungshindernis mit hoher aerodynamischen Rauigkeit und die damit verbundene Behinderung der Durchlüftung und des Luftaustausches mit dem Umland
- die erhöhte anthropogen bedingte Wärmeproduktion

Damit ist das Ausmass der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich vor allem abhängig von der Grösse der Stadt und der Dichte der Überbauung. Das Relief (Exposition, Geländeneigung) und die Lage im Mosaik der Nutzungen und ihrer dynamischen Luftaustauschprozesse üben einen weiteren Einfluss aus. Eine Sonderstellung nehmen Wald- und Gewässerflächen ein. Der gedämpfte, insgesamt vermittelnde Tagesgang der Temperatur im Wald beruht zu einem grossen Teil auf dem zweiseichtigen Strahlungsumsatz zwischen Atmosphäre und Kronendach sowie zwischen Kronendach und Stammraum. Grössere Waldgebiete sind wichti-



ge Frischluftproduktionsgebiete, wobei hier sauerstoffreiche, staubfreie und wenig belastete Luft entsteht. Während tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ niedrige Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit im Stammraum vorherrschen, treten nachts, im Vergleich zu nicht mit Gehölz bestandenen Grünflächen, eher höhere Temperaturen auf. Stadtnahe Wälder können daher in begrenztem Masse auch am Tage Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen.

Das sich um 4 Uhr in der Nacht einstellende Temperaturfeld im Untersuchungsraum umfasst zwischen Minimalwerten von 8,6°C und Maximalwerten von bis zu 20,9°C eine Spannweite von etwa 12°C. Die mittlere Temperatur innerhalb des Kantonsgebietes liegt bei den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 16,3°C. 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 von mehr als 20°C auf, was mit dem hohen Bauvolumen und der hohen Oberflächenversiegelung von bis zu 95% einhergeht (Abb. 2). Zur Peripherie hin nehmen Bebauungsdichte und auch die Lufttemperatur tendenziell ab, was sich deutlich im Temperaturfeld zeigt. In der durchgrünte 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 einer zusätzlichen Abkühlung.

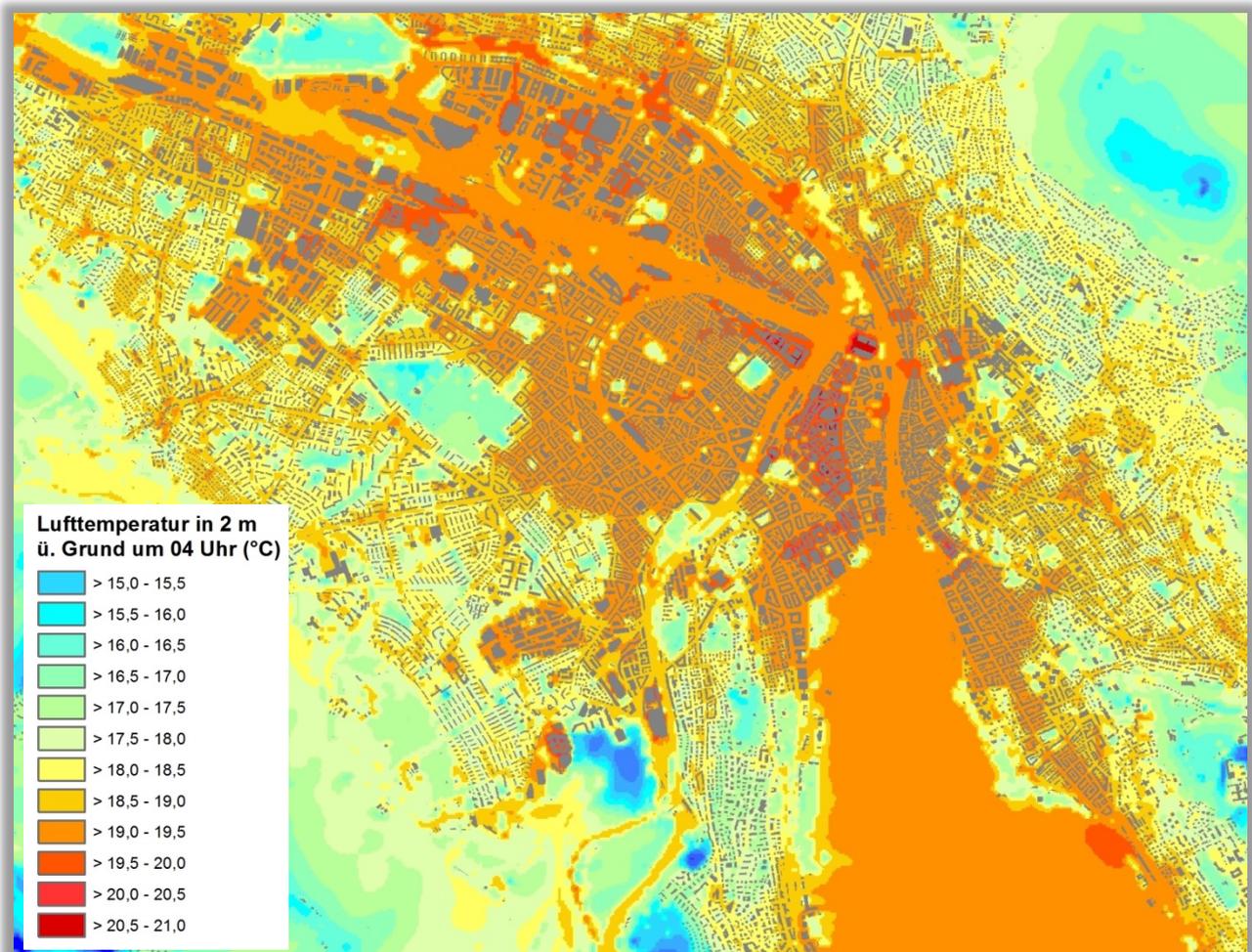


Abb. 2: Temperaturfeld im Bereich Zürich/Kernstadt zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)



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

An den geeigneten Flächen setzt sich abgekühlte und damit schwerere Luft in Richtung zur tiefsten Stelle des Geländes in Bewegung. 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. 3).

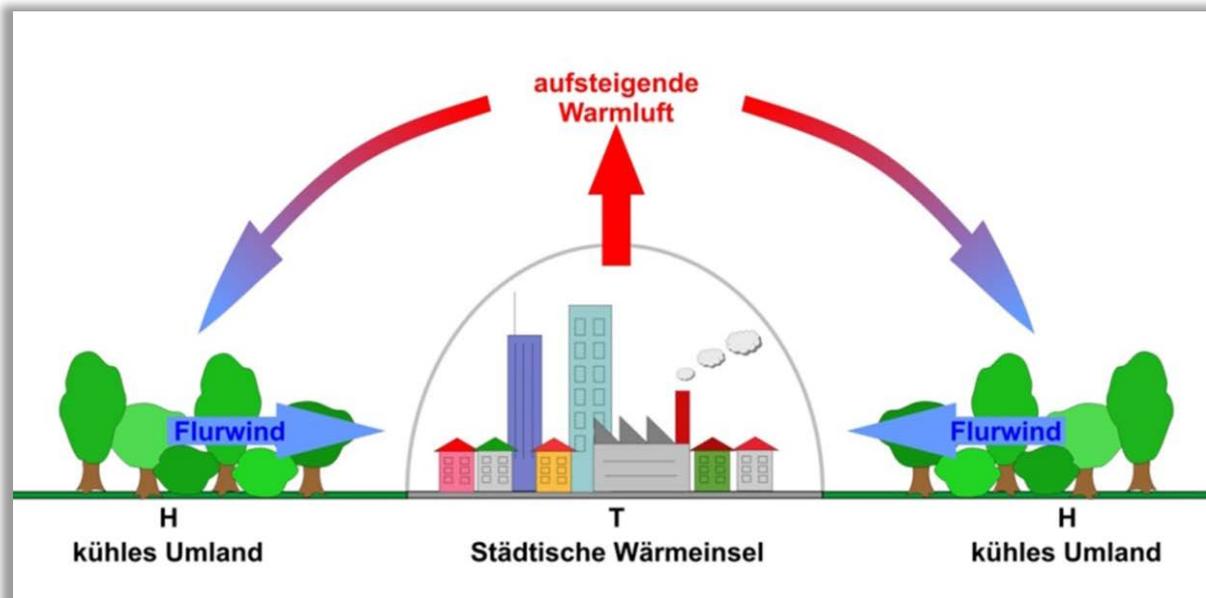


Abb. 3: Prinzipskizze Flurwind

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 (Abb. 4). Zum Zeitpunkt 04 Uhr morgens befindet sich etwa die Hälfte 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.

Das nächtliche Windfeld im Bereich Milchbuck zeigt Abb. 4. Eine niedrige Bebauung und breite Strassenräume begünstigen ein Eindringen in die Siedlungsfläche. Die durch dichte Zeilenbebauung oder Blockrandbebauung geprägten Wohngebiete werden hingegen nicht nennenswert von Kaltluft durchströmt, da die zu-



nehmende Bebauungsdichte und das im Vergleich zum Freiland höhere Temperaturniveau die Kaltluftströmung abschwächen. Auf Kantonsweiter Ebene zeigt sich die wichtige Rolle grösserer Grünzüge, da sie die Kaltluft als Leitbahnen tief in die Bebauung heranführen können.

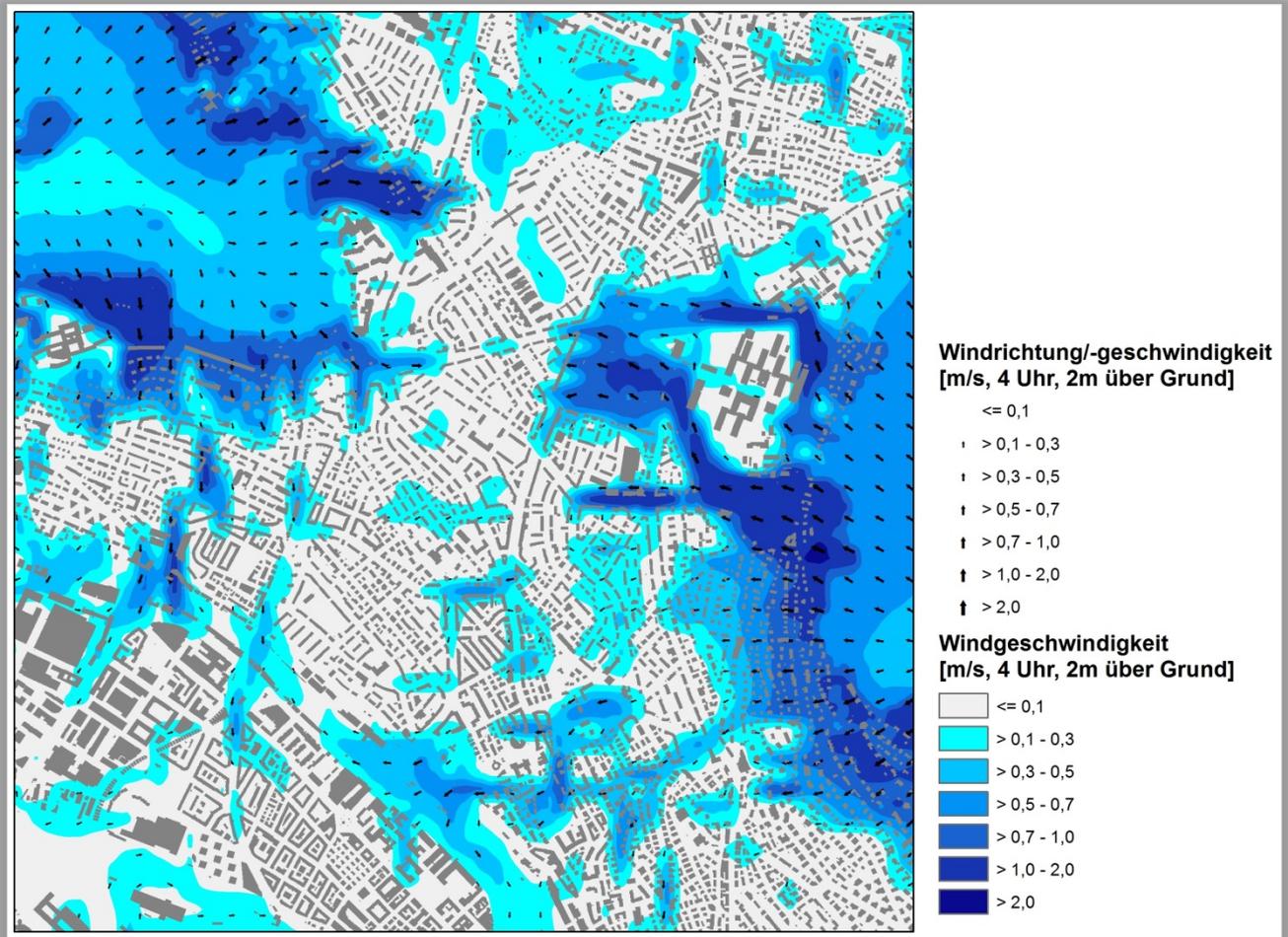


Abb. 4: Nächtliches Windfeld im Bereich Milchbuck zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

In den Städten können mit Bäumen bestandene Grünflächen 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.

3 Modellierung von Klimawandelszenarien

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. Ein entscheidender Vorteil dieses Verfahrens ist die Tatsache, dass die Ergebnisse der Regionalmodelle mit einer räumlichen Auflösung von 12.5 km auf die Eingangsdaten der FITNAH-Simulation „aufgeprägt“ werden können („Downscaling“). Bei einer Rasterzellenauflösung von 25 m x 25 m lässt sich gut erkennen, in wieweit sich die Stadtstrukturen verstärkend oder abschwächend auf die zu erwartende Erwärmung auswirken werden (Abb. 5).

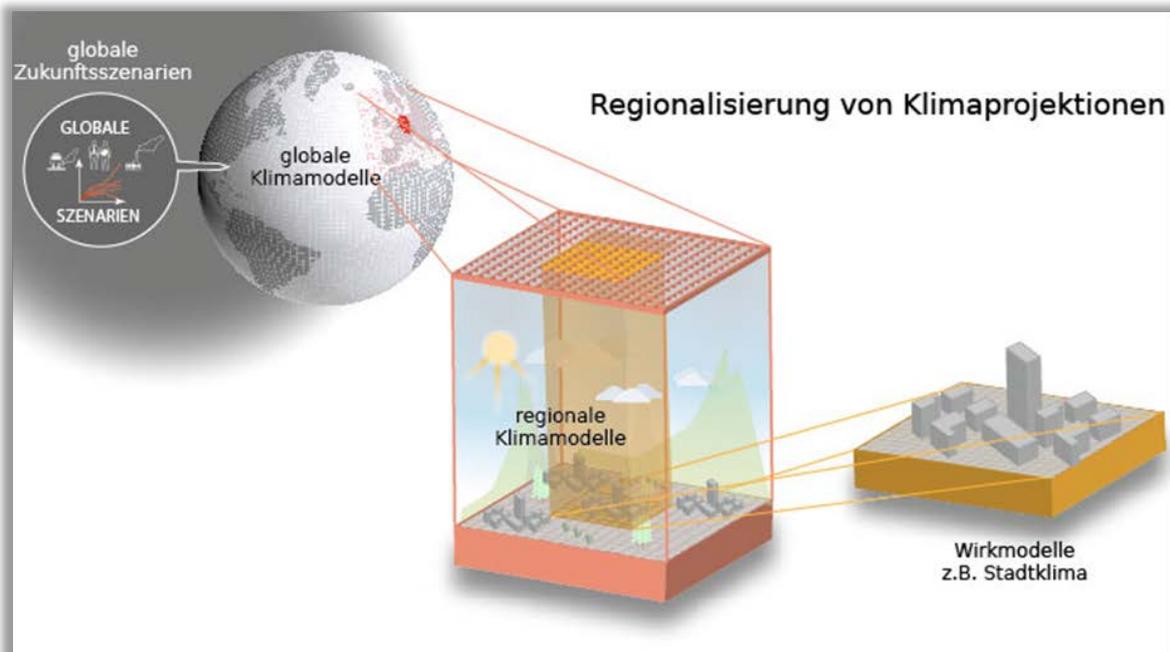


Abb. 5: Downscaling globaler Klimaprojektionen über die regionale Skala bis hin zur lokalen Skala (Quelle: DWD 2017)

Entsprechend des Projektansatzes beziehen sich die Modellanalysen auf den thermischen Wirkungskomplex und stellen räumlich differenzierte Informationen zur zukünftigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit ausgewählter klimatologischer Kenntage bereit. 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. Um die zukünftige Entwicklung der Intensität der thermischen Belastung im Kanton Zürich räumlich differenziert abbilden zu können, werden im Folgenden vier langjährige Zeiträume miteinander verglichen:

- die aktuelle Klimanormperiode der WMO 1961-1990,
- 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 Auftretshäufigkeiten 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, $T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$.

Die Anzahl der Sommertage in der Zukunftsperiode 2071-2100 zeigt Abb. 6 beispielhaft für die Analyse der Klimawandelszenarien. Ein Tag gilt als Sommertag, sofern an diesem eine Tageshöchsttemperatur von mindestens 25 °C erreicht wurde. Die Art der Flächennutzung beeinflusst die Zahl der Sommertage signifikant. Wie auch für die übrigen Parameter sind die höchsten Werte im Bereich der dicht bebauten Siedlungsflächen sowie in Gewerbegebieten anzutreffen.

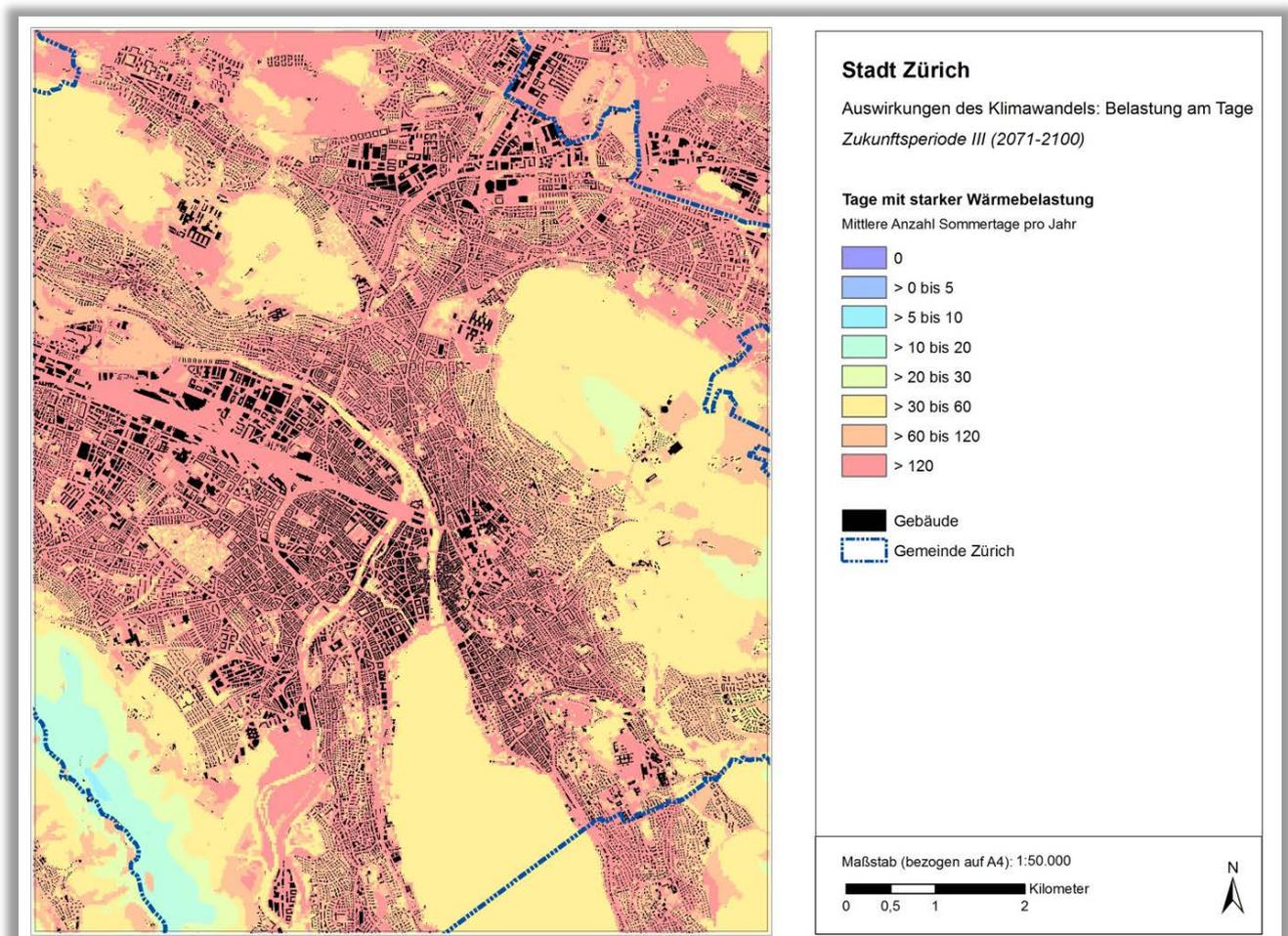


Abb. 6: Räumliche Verteilung von Sommertagen in der Stadt Zürich in der Zukunftsperiode III (2071-2100)

Bei hohen innerstädtischen Temperaturen bieten allgemein stärker durchgrünte Gebiete wie Wälder, baulich geprägte Grünflächen oder lockere Einzel- und Reihenhausbebauung mit einem eher geringen Versiegelungsgrad durch Transpiration und Beschattung, aber auch die Uferbereiche der anliegenden Gewässer durch Evaporationsprozesse einen Rückzugsort für wärmebelastete Bevölkerungsgruppen.



4 Planungshinweiskarten Stadtklima

Innerstädtische und siedlungsnahe 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 eine separate Planungshinweiskarte (PHK) für die Nacht- und Tagsituation erstellt, die sich jeweils auf das Kantonsgebiet Zürich beziehen.

Zur Bewertung der bioklimatischen Situation in der Nacht 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. Als optimale Schlaftemperaturen werden gemeinhin 16 bis 18 °C angegeben, während Tropennächte mit einer Minimumtemperatur ≥ 20 °C als besonders belastend gelten. Zudem wird die Bedeutung der Grün- und Freiflächen hinsichtlich ihrer klimatischen Bedeutung für die Siedlungsflächen ausgewiesen.

Zur Bewertung der bioklimatischen Situation am Tage wird die Physiologisch Äquivalente Temperatur um 14:00 Uhr herangezogen. Betrachtet werden sowohl die bebauten Bereiche als auch die Grün- und Freiflächen. 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.