

Zeitschrift: Regio Basiliensis : Basler Zeitschrift für Geographie
Herausgeber: Geographisch-Ethnologische Gesellschaft Basel ; Geographisches Institut der Universität Basel
Band: 55 (2014)
Heft: 3

Artikel: Klimaanalyse der Stadt Zürich (KLAZ)
Autor: Parlow, Eberhard / Fehrenbach, Ute / Scherer, Dieter
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1088180>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Klimaanalyse der Stadt Zürich (KLAZ)

Eberhard Parlow, Ute Fehrenbach und Dieter Scherer

Zusammenfassung

Die Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in der räumlichen Planung hat das allgemeine Ziel, die zukünftige Entwicklung der Landnutzung und ihre konkrete Ausgestaltung so zu planen, dass negative Effekte auf das lokale Klima reduziert bzw. vermieden, positive Auswirkungen hingegen erhalten bzw. gefördert werden. Mit der Klimaanalyse der Stadt Zürich (KLAZ), die im Auftrag der Umweltschutzfachstelle der Stadt Zürich durchgeführt wurde, sollte dieses allgemeine Ziel für die Stadt Zürich unterstützt und in eine planerisch verwertbare Form umgesetzt werden. Sommerliche Wärmebelastung, austauscharme Wetterlagen sowie lokale und mesoskalige Windsysteme üben einen wesentlichen Einfluss auf die Klimasituation der Stadtbevölkerung aus. Zur Sicherung einer günstigen klimatischen und lufthygienischen Situation Zürichs kommt der planerischen Steuerung der Raumentwicklung eine besondere Bedeutung zu. Die Basis hierzu stellt die Generierung räumlich differenzierter Informationen zu den relevanten klimatischen und lufthygienischen Sachverhalten im Untersuchungsgebiet dar.

Die Konzeption von KLAZ ist auf die Verwendung automatisierter Verfahren hin ausgerichtet. Eingangsdaten in Form flächendeckender, hochaufgelöster, räumlich und zeitlich homogener Satellitendaten sowie GIS-Daten zur Erfassung der aktuellen Landbedeckung, des Reliefs und damit verbundener Strukturparameter, dienen der Generierung aller Zwischen- und Endergebnisse durch Anwendung numerischer Analyse- und Bewertungsmodelle ohne manuelle Intervention. Da im Allgemeinen Studien wie KLAZ nur in grösseren Zeitabständen wiederholt werden, werden nur solche Daten verwendet, die sich nicht auf meteorologische Einzelsituationen beziehen, sondern über viele Jahre hinaus Gültigkeit besitzen.

Alle aus den Eingangsdaten abgeleiteten Informationsschichten können durch Umrechnung in verschiedene Rasterauflösungen in einer den Bedürfnissen der jeweiligen Fachplanung adäquaten räumlichen Differenzierung dargestellt und miteinander kombiniert werden.

1 Einleitung

Die Stadt Zürich hat im Jahr 2007 die Basler Forschungsgruppe mit der Durchführung einer Klimastudie für das Stadtgebiet Zürich beauftragt. Die Arbeiten wurden – wie auch schon in anderen Fällen – in enger Kooperation mit dem Fachgebiet Klimatologie der Technischen Universität Berlin durchgeführt.

Die Stadt Zürich nimmt eine Fläche von 92 km² ein, wobei die eigentliche Siedlungsfläche ca. 57 % beträgt. Zwischen 1957 und 1990 war die stärkste Ausweitung des Siedlungsgebietes um nahezu ein Viertel zu verzeichnen. Dagegen verlangsamte sich von 1990 bis heute das Wachstum mit sechs Prozent wieder deutlich (*Stadt Zürich* 2007). Es besteht aber weiterhin zusätzlicher Raumbedarf innerhalb des jetzigen Siedlungsgebietes, der durch “verdichtetes Bauen” gedeckt werden soll, so dass der Grün-, Frei- und Erholungsraum trotz steigendem Nutzungsdruck erhalten werden kann (*Stadt Zürich* 2007).

Die für die räumliche Planung relevanten Aspekte des Klimas und der Luftqualität betreffen vor allem die lokalen und teilweise die mesoskaligen atmosphärischen Prozesse. Die Windverhältnisse in Zürich werden, zusätzlich zur übergeordneten mesoskaligen Windsituation, sowohl von Berg-Talwind-Systemen des umgebenden Reliefs als auch von Land-Seewind-Effekten des Zürichsees mitbestimmt (*Schuhmacher* 1992). Lokalskalige Kaltlufttransporte, ermöglicht durch die gegebene Topographie sowie landbedeckungsabhängige Kaltluftproduktion, spielen ebenfalls eine Rolle bei der Ausprägung der örtlichen Windverhältnisse. Die mesoskaligen Windverhältnisse müssen als Randbedingungen bei numerischen Modellierungen einfließen, obwohl sie im Gegensatz zu den planungsrelevanten lokalen bis mikroskaligen Durchlüftungsbedingungen nicht bzw. kaum durch den Menschen beeinflussbar sind.

Die Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in der räumlichen Planung hat das allgemeine Ziel, die zukünftige Entwicklung der Landnutzung und ihre konkrete Ausgestaltung (Art, Grösse, Ausrichtung von Gebäuden, Gestaltung von Siedlungsräumen und benachbarten Freiflächen, Anlage von Verkehrsflächen etc.) so zu planen, dass negative Effekte auf das lokale Klima reduziert bzw. vermieden, positive Auswirkungen hingegen erhalten bzw. gefördert werden. Aufgabe einer Klimaanalyse ist es daher nicht nur, die derzeit wirksamen wechselseitigen Zusammenhänge zwischen Klima, Luftqualität und dem Lebensraum der Bevölkerung aufzuzeigen (“Ist-Zustand”), sondern auch räumlich differenzierte Planungsempfehlungen auszusprechen, welche die Beurteilung projektierter Landnutzungsänderungen aus klimatologischer und lufthygienischer Sicht ermöglichen. Durch Eingriffe in die Landnutzung wird die Landbedeckung – und infolge dessen das lokale Klima – teils stark verändert, weshalb eine Abschätzung der zu erwartenden Auswirkungen schon aufgrund des Vorsorgeprinzips geboten ist.

Auch angesichts der zu erwartenden, im regionalen Massstab aber bislang noch nicht ausreichend bekannten Klimaänderungen, ist es daher in jeder dichter besiedelten Region eine wichtige Zukunftsaufgabe der räumlichen Planung, die positiv auf den menschlichen Organismus (Wohlbefinden, Gesundheit) sich auswirkenden Klimaphänomene zumindest zu erhalten sowie eine irreversible Verschlechterung der klimatischen bzw. lufthygienischen Verhältnisse im Gesamtgebiet sowie in einzelnen Teilgebieten zu verhindern.

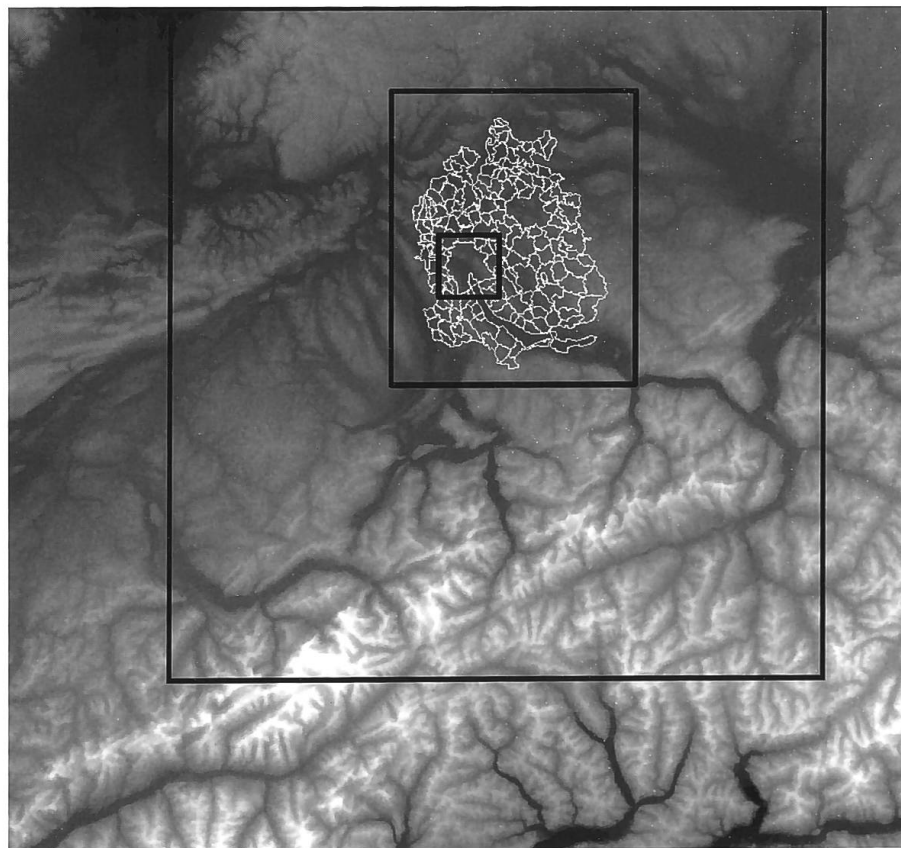
KLAZ hat das primäre Ziel, aussagekräftige und räumlich differenzierte Grundlagen zur Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in der räumlichen Planung für die Stadt Zürich in planerisch verwertbare Form umzusetzen. Die wesentlichen Ergebnisse wurden hierzu in Form digitaler Klimaanalysekarten aufbereitet. In einem zweiten Teil wurden Planungshinweiskarten für die weitere Verwertung in der Planung erstellt. Grundlage für die Fortschreibung von Plänen bzw. der Beurteilung von Auswirkungen geplanter Bauvorhaben in einem Gebiet sind genaue Kenntnisse vor allem der Durchlüftungsverhältnisse, der Lufthygiene sowie der thermischen Situation.

Neben diesem Verwendungszweck der KLAZ-Ergebnisse liefert die Studie den kommunalen Planungsträgern Ergebnisse und Methoden, mit denen eine problemspezifisch angepasste Vertiefung des Klimaaspektes bei konkreten Planungsvorhaben ermöglicht und erleichtert wird.

KLAZ baut auf den entwickelten Methoden vorangegangener Klimaanalysen auf, wie z. B. REKLISO (Regionale Klimaanalyse Südlicher Oberrhein; *Parlow et al. 2006*), KABA (Klimaanalyse beider Basel; *Fehrenbach 1999, Parlow 1996, Parlow et al. 1997*) oder CAMPAS/CH (Climate Analysis Maps for Planning Aspects of Solothurn/Switzerland; *Fehrenbach & Scherer 2000, Fehrenbach et al. 2001, Parlow et al. 2001, Scherer et al. 1996a, 1996b und 1999*). Jedoch sind auch Weiterentwicklungen vorgenommen worden, die folgende Ziele haben: Effizienzsteigerung, stärkere Transparenz für die Anwender sowie die Einarbeitung des aktuellen Wissensstandes im Bereich der Angewandten Klimatologie und der Stadtklimatologie.

Das Untersuchungsgebiet von KLAZ und die darzustellenden Ergebnisse haben zwar ihren Fokus auf der Stadt Zürich, jedoch müssen zur vollständigen Erfassung der in die Stadt hinein reichenden klimatischen und lufthygienischen Wirkungen sowohl die unmittelbar daran angrenzenden Räume als auch das weitere Umland bei den Modellierungen mit einbezogen werden. In KLAZ wurde daher ein dreistufiges Gebietsschema verwendet, das in Abb. 1 dargestellt ist.

Abb. 1 Definition der in KLAZ bearbeiteten Räume. Der grosse Rahmen umrandet die Modelldomäne, der mittlere die Studienregion und der kleine die Detailregion. In Weiss sind die Gemeindegrenzen des Kantons Zürich dargestellt.



Den äusseren Rahmen bildet ein $160 \times 160 \text{ km}^2$ grosses Gebiet (Koordinaten: 610000-770000, 150000-310000), das grosse Teile der Nordschweiz umfasst und als Modelldomäne für die numerische Modellierung mit dem mesoskaligen meteorologischen Modell MetPhoMod (*Perego 1999*) verwendet wird. Die in dieser Modelldomäne (MD) verwendete Gitterweite beträgt 1000 m.

Das Hauptuntersuchungsgebiet, im Weiteren als Studienregion (SR) bezeichnet, wird durch ein 50 m Raster mit einer Ausdehnung von $60 \times 70 \text{ km}^2$ definiert (Koordinaten: 665000-725000, 220000-290000). Es umfasst das gesamte Gebiet des Kantons Zürich sowie angrenzende Gebiete.

Zur besseren Nutzung der KLAZ-Ergebnisse für Zwecke der Stadtplanung wurde zusätzlich eine 14×13 km² grosse Detailregion (DR) ausgewiesen (Koordinaten: 676000-690000, 242500-254500), welche das gesamte Gebiet der Stadt Zürich abdeckt. Die Rasterauflösung beträgt in der DR 10 m.

Ein konzeptionelles Grundelement von KLAZ ist die Verwendung räumlich und zeitlich homogener flächendeckender Datensätze mit gleich bleibender Informationsdichte, welche ein vollständiges Bild der jeweiligen Sachverhalte bieten. Aus diesem Grund werden in KLAZ Flächen-daten in Form digitaler Höhen- und Oberflächenmodelle, Satellitendaten sowie unterschiedliche GIS-Datensätze (siehe Abb. 2 sowie Tab. 1 und 2) eingesetzt. Ein Teil der in Abb. 2 aufgelisteten Datensätze (z. B. Luftbilder oder Stationsmessungen meteorologischer und luftchemischer Grös-sen) werden nur zur Validierung der Modellergebnisse herangezogen. Alle Eingangsdaten werden nur in aufbereiteter Form für die Klimaanalyse eingesetzt.

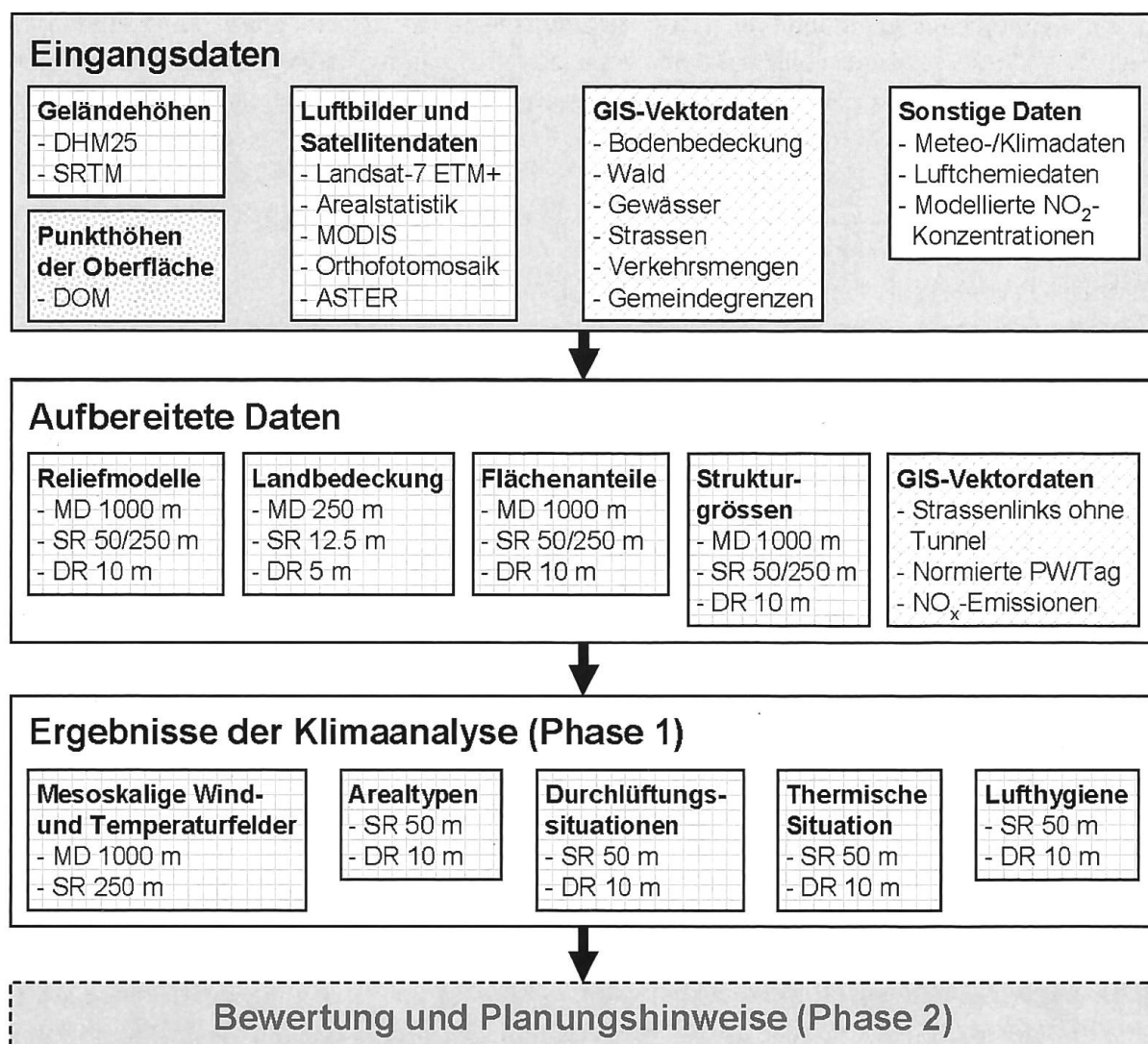


Abb. 2 Konzeption der Klimaanalyse der Stadt Zürich (KLAZ). In einem zweiten Teil – in der Abbildung Phase 2 genannt –, der nicht Bestandteil dieser Publikation ist, werden die Ergebnisse einer fachwissenschaftlich begründeten Bewertung unterzogen. Hierbei werden auf die Belange der räumlichen Planung ausgerichtete Zielsetzungen formuliert, welche die jeweiligen flächenspezifischen Wechselwirkungen zwischen Klima, Lufthygiene und Landnutzung berücksichtigen und entsprechende fachliche Empfehlungen zur Erreichung der jeweiligen Zielsetzungen umfassen.

Im Hinblick auf die zeitliche Dimension der Aussagen werden in KLAZ nur solche Daten verwendet, die sich nicht auf Einzelsituationen beziehen, sondern über viele Jahre hinaus Gültigkeit besitzen. Sofern Einzelsituationen wie autochthone Wetterlagen, Inversionen oder Stürme regelmässig auftreten oder im Falle ihres Auftretens erhebliche Auswirkungen (Belastungsrisiken, Schäden) haben und somit klimatisch bedeutsam sind, werden sie in die Klimaaanalyse integriert. Wichtig sind weniger die zeitlich variablen Absolutwerte einzelner klimatologischer oder lufthygienischer Grössen, als vielmehr zeitlich invariante, räumlich differenzierte relative Abstufungen. So sind beispielsweise das Verkehrsaufkommen und die daraus resultierenden Luftschadstoffemissionen starken zeitlichen Änderungen unterworfen, was aber auch für die gesetzlichen Grenzwerte der entsprechenden Luftschadstoffkonzentrationen gilt. Somit bleiben zwar nicht die Absolutwerte der Luftbelastung erhalten, aber die relative Bedeutung der Strassen mit erhöhtem Verkehrsaufkommen als Verursacher von Luftbelastungen über lange Zeiträume bestehen.

Die Eingangsdaten werden zur Berechnung der räumlichen Verteilung der Landbedeckung, ihrer jeweiligen Flächenanteile in einer Umgebung eines Hektars, hieraus abgeleiteter Strukturgrössen sowie zur Erstellung eines digitalen Reliefmodells eingesetzt. Unter Strukturgrössen sind sowohl über Attributdaten und Flächenanteile bzw. aus den aufbereiteten Eingangsdaten direkt berechnete Grössen wie die Gebäudehöhen, als auch klimatologische bzw. lufthygienische Informationen wie Kaltluftproduktionsraten oder NO₂-Emissionen aus Flächenquellen zu verstehen. Die Strukturgrössen werden zur Einschätzung der Risiken von Luft- und Wärmebelastung herangezogen. Die Klimaaanalyse umfasst ebenfalls die Berechnung der räumlichen Verteilung der Durchlüftungssituationen. Zur Ermittlung der Durchlüftungssituationen wurden sowohl die erwähnten Strukturgrössen verwendet, z. B. zur Bestimmung des lokalen Oberflächeneinflusses auf die Durchlüftung, als auch die Ergebnisse numerischer mesoskaliger Wind- und Temperaturfeldmodellierungen mit dem meteorologischen Modell MetPhoMod (*Perego 1999*).

Alle Ergebnisse liegen als digitale, georeferenzierte Rasterdatensätze vor, die direkt in einem GIS verwendet werden können. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass atmosphärische Prozesse nicht flächenscharf voneinander abgrenzbar sind und je nach dargestelltem Sachverhalt auch grössere räumliche Unschärfen als die gewählte Rasterauflösung aufweisen. Dies gilt insbesondere für die Ergebnisse der numerischen mesoskaligen Modellierung, welche für die 160×160 km² grosse MD mit einer Gitterweite von 1000 m durchgeführt wurde. Die Ergebnisse dieser numerischen Modellierung wurden mit Hilfe eines Nesting-Verfahrens in die Modellierung der Wind- und Temperaturverhältnisse in der Studienregion mit einer Rasterauflösung von 250 m eingespeist.

Die Inhalte der Informationsschichten und digitalen Karten sind das Ergebnis einer wissenschaftlichen Raumanalyse aus klimatologischer Sicht. In Bezug auf ihre räumliche Differenziertheit sind die Inhalte primär auf eine Nutzung auf der städtischen Planungsebene ausgerichtet. Für die Planung einzelner, grösserer Bauvorhaben (z. B. Laden-/Bürokomplexe, Wohnviertel) kommt den Ergebnissen eine orientierende Funktion zu. Im Einzelfall können daher Detailuntersuchungen der Schutzgüter Klima und Luft in einem grösseren Massstab erforderlich werden.

2 Klimafaktoren und lokales Klima im Untersuchungsgebiet

Die orographische Formenvielfalt und die Ausstattung der verschiedenen Teilräume des Untersuchungsgebiets modifizieren bei autochthonen Wetterlagen in erheblichem Umfang das Klimageschehen. Dann überprägen die Geofaktoren Relief, Höhenlage und Landnutzung lokal die grossräumig herrschenden Bedingungen.

Die Art der Landnutzung ist ebenfalls für die Ausprägung des Lokal- und Mikroklimas von grosser Bedeutung, insbesondere der Grad der Versiegelung und Verdichtung der Oberfläche durch Bebauung. Im Bereich von Siedlungen bilden sich während der Nachtstunden häufig städtische Wärmeinseln aus, d. h. überbaute Gebiete heben sich durch höhere Temperaturen von ihrer nicht überbauten Umgebung ab (*Vogt & Parlow 2011, Parlow et al. 2014*). Während heisser Sommertage heizen sich die Asphalt- und Gebäudeflächen stark auf, speichern diese Wärme am Tage und geben sie in der Nacht langsam wieder an die Umgebung ab. Die Wärmebelastung für den Menschen ist in den Städten daher vor allem in der Nacht am grössten (*Jendritzky 1995, Jendritzky & Grätz 1995*). Tagsüber bestehen für die Einwohner durch das Aufsuchen mikroklimatisch günstigerer Räume mehr Möglichkeiten, der belastenden Situation auszuweichen (z.B. Schattenbereiche, klimatisierte Laden- und Büroräume).

Im Gegensatz hierzu stehen reliefbedingte Kaltluftansammlungen, die in Tälern und Becken entstehen können, wenn sich in klaren Strahlungsnächten die Luft durch Wärmeabgabe stark abkühlt. Diese spezifisch schwerere Luft sinkt tiefer und fliesst dem natürlichen Gefälle folgend mit geringer Geschwindigkeit ab bzw. staut und sammelt sich in Senken, in denen der Abfluss nicht möglich oder reduziert ist. Die in grösseren Tälern bei autochthonen Wetterlagen entstehenden tagesperiodischen Berg-Talwind-Systeme stehen zwar mit den lokalen Kaltluftabflüssen in Verbindung, weisen aber eine eigene Dynamik auf. Für die thermische Situation vieler Siedlungen sind Berg-Talwind-Systeme bedeutsam, da sie neben ihrer grossen lufthygienischen Bedeutung teilweise auch den Aufbau der Wärmeinsel verhindern oder zumindest deren negative Effekte abschwächen können (*Parlow 1983, Ernst 1995*). Auch Land-Seewinde können am Zürichsee aufgrund der unterschiedlichen Temperaturentwicklung der verschiedenen städtischen Oberflächen sowie der Oberfläche des Sees erwartet werden, wenn auch nur in schwachem Ausmass (*Kornblueh 1990*).

Das Windfeld über Zürich erfährt seinen Antrieb aus der grossräumigen Wetterlage und somit aus der geostrophischen Anströmung in der freien, d. h. durch die Oberflächenreibung nicht beeinflussten Atmosphäre. Für eine flächendeckende Betrachtung werden heute mesoskalige meteorologische Modelle herangezogen, die in der Lage sind, in Gitterabständen von mehreren hundert Metern bis einigen Kilometern die Strömungssituation in der planetarischen Grenzschicht und darüber zu simulieren.

Kleinräumiger sind die mesoskaligen bis lokalen Berg-Talwind-Systeme, die sich aufgrund der Topographie in der Umgebung von Zürich insbesondere während autochthoner Wetterlage ausbilden und tagesperiodisch ihre Richtung wechseln. Anhand von Messungen und Modellierungen wurden am Nachmittag bis in den frühen Abend Strömungen für das Sihltal oder das Linthgebiet aufgezeigt, die aufgrund ihrer Richtung als Bergwinde interpretiert werden (*Schuhmacher 1992*). Diese Windsysteme sind bioklimatisch besonders während der Sommermonate von Bedeutung. Statistische Analysen zeigen jedoch, dass die Bergwinde ebenso ausgeprägt auch während des Winterhalbjahres auftreten.

Schuhmacher (1992) beschreibt in seiner Arbeit auf der Basis numerischer Modellrechnungen die das Windfeld von Zürich bestimmenden Prozesse. Er geht davon aus, dass in windschwachen Situationen die relativen Temperaturunterschiede das Windfeld bestimmen. Je nach Verteilung ergeben sich Windsituationen völliger Stagnation mit fast radialsymmetrischer Konvergenz oder

einer Entlüftung in Richtung See. Der Einfluss der Topographie äussert sich in nächtlichen Hangabwinden. Am Tage entstehen auf der Zürichberg-Seite Hangaufwinde, die jedoch aufgrund der Expositionsverhältnisse nicht auf der Uetliberg-Seite erwartet werden. Eine Zunahme des geostrophischen Windes führt zur Überdeckung dieser thermisch bedingten Windfeldmuster in Abhängigkeit von der Windrichtung. Leicht stabile Verhältnisse und mittlere geostrophische Windgeschwindigkeiten führen zu deutlichen Kanalisierungen durch die Topographie. Winde aus nördlicher bzw. nordöstlicher Richtung überströmen meist die Kette vom Gubrist zum Pfannenstiel, wobei jedoch der Zürichberg umströmt wird, resultierend in einer Umlenkung in Richtung Milchbuck und Fluntern. Die Albiskette ist zu hoch, als dass sie von diesen Winden überströmt werden kann. Die genaue Anströmrichtung bestimmt, ob die Bodenströmung vollständig oder nur teilweise durch die beiden Hügelketten seeaufwärts kanalisiert wird. Die sehr häufigen westlichen und südwestlichen Winde erzeugen in der Stadt Zürich sowohl im Winter als auch im Sommer konvergente Windfelder; dabei wirkt der Uetliberg als Strömungsriegel. Bei einer leicht stabil geschichteten Atmosphäre wird der Uetliberg umströmt und die Winde fliessen unterhalb des Zürichbergs und des Höggerbergs wieder zum Milchbuck hin zusammen. Ist eine städtische Wärmeinsel vorhanden, so verstärkt sich die Konvergenz. Die Konvergenzzone des Windes verschiebt sich innerhalb des Stadtgebietes in Abhängigkeit vom zeitlichen Aufeinandertreffen der See- und Hangabwinde.

Kornblueh (1990) gelangt durch Modellierungen mit dem Modell FITNAH (*Gross* 1989) zu dem Schluss, dass die Hangbereiche beidseitig der Stadt sowie der Eingang in das Sihltal nicht weiter bebaut werden sollten, da sie für die Durchlüftung der Stadt einen wesentlichen Beitrag leisten. Auch der Zugang zum Limmattal sollte in seiner damaligen Form erhalten bleiben, damit westliche Strömungskomponenten in die Stadt eindringen können. Topographische Einflüsse auf das Windfeld im Stadtgebiet Zürich wurden ebenfalls mittels Stationsmessungen von *Schmid* (1984) gezeigt.

3 Eingangsdaten und Datenaufbereitung

Für die Arbeiten an der Stadtklimaanalyse wurden Datensätze unterschiedlicher Herkunft und räumlicher Genauigkeit verwendet. Die in KLAZ verwendeten Eingangsdaten sind in Tab. 1 und 2 aufgelistet.

3.1 Landbedeckung und Landnutzung

Die Landbedeckung eines Gebietes steht in unmittelbarem Zusammenhang mit einer Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Grössen, welche das lokale Klima in Bodennähe beeinflussen bzw. die klimatischen Einflüsse auf den menschlichen Lebensraum und dessen Nutzung dokumentieren. Änderungen der Landnutzung ziehen in Kulturräumen meist Änderungen der Landbedeckung und somit auch der lokalen Klimabedingungen nach sich.

Die Klassifikation der Landbedeckung wurde auf der Basis unterschiedlicher Datenquellen für die drei Teilgebiete (MR, DR und SR) durchgeführt. Die kantonalen GIS-Vektordaten zu den Wald- und Gewässerflächen sowie dem Strassennetz (ohne Tunnelstrecken) wurden in zwei Raster mit 5 bzw. 12.5 m Auflösung transformiert.

Die orthorektifizierte Szene des Satelliten Landsat-7 ETM+ wurde in Schweizer Landeskoordinaten mit einer Rasterauflösung von 25 m transformiert, welches den grössten Teil der SR überdeckt.

Tab. 1 Übersicht über die in KLAZ verwendeten Eingangsdaten für die Klassifikation und Validierung der Landbedeckung und der Landnutzung.

Name	Beschreibung	Eigenschaften	Quelle	Verwendung
Bodenbedeckung	Bodenbedeckung der Stadt Zürich, Stand 1999	GIS-Vektordaten der Stadt Zürich mit sehr hoher thematischer und räumlicher Differenzierung	Geomatik + Vermessung Stadt Zürich	Klassifikation der Landbedeckung (Stadt Zürich)
Wald	Bestockte Flächen im Übersichtsplan 1:5'000; Erstellungszeitraum 1997–2001	GIS-Vektordaten des Kantons Zürich mit hoher räumlicher Differenzierung	GIS-Zentrum Kanton Zürich	Klassifikation der Landbedeckung (Kantonsgebiet ohne Stadt Zürich)
Gewässer	Gewässernetz, basierend auf Gewässerübersichtsplänen 1:5'000; Stand 2002	GIS-Vektordaten des Kantons Zürich mit hoher räumlicher Differenzierung	GIS-Zentrum Kanton Zürich	Klassifikation der Landbedeckung (Kantonsgebiet ohne Stadt Zürich)
Strassen	Alle Staats- und National- sowie die wichtigsten Gemeindestrassen	GIS-Vektordaten des Kantons Zürich mit hoher räumlicher Differenzierung	GIS-Zentrum Kanton Zürich	Klassifikation der Landbedeckung (Kantonsgebiet ohne Stadt Zürich)
Landsat-7 ETM+	Orthorektifizierte Szene (195/27) des <i>Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper</i> vom 11.9.1999	Sechs optische Kanäle mit 30 m, ein TIR-Kanal mit 60 m, ein PAN-Kanal mit 15 m Rasterauflösung	United States Geological Survey (USGS)	Klassifikation der Landbedeckung (Flächen ausserhalb der Stadt Zürich ohne bessere Daten)
Arealstatistik	Landnutzung der Schweiz; Erhebungszeitraum 1992–1997	Bodennutzung mit 74 Nutzungsarten; 100 m Rasterauflösung	Bundesamt für Statistik (BFS)	Klassifikation der Landbedeckung (Flächen der SR und MD ohne bessere Daten)
MODIS	Landbedeckungsklassen 2004 aus Daten des <i>Moderate Resolution Imaging Spectrometer</i>	MOD12 PFT Landbedeckungsklassen 1000 m Rasterauflösung	National Aeronautics and Space Administration (NASA)	Klassifikation der Landbedeckung (Flächen der MD ohne bessere Daten)
Orthofoto	Mosaik Version 1.0 vom 28.11.2007	aus Luftbildern des Jahres 2007; Rasterauflösung 10 cm	Geomatik + Vermessung Stadt Zürich	Validierung der Landbedeckung (Stadt Zürich)
ASTER	Szene des <i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i> vom 30.5.2002	drei VNIR-Kanäle mit 15 m, sechs SWIR-Kanäle mit 30 m sowie fünf TIR-Kanäle mit 90 m Rasterauflösung	USGS	Validierung der Landbedeckung (Flächen ausserhalb der Stadt Zürich)

Auf der Basis dieser verschiedenen Datenquellen wurde die Landbedeckung in Form sog. Arealtypen berechnet. Arealtypen sind Landnutzungseinheiten, bei denen verschiedene Aspekte wie Umgebungsbezug und Flächenanteile (z. B. Grünfläche in Wohngebiet) oder Dichteabstufungen wie bei den städtischen Klassen berücksichtigt werden. Die Auswahl der Arealtypen basiert auf klimatologischen Gesichtspunkten und unterscheidet sich dabei von Klassifikationen, die für Landnutzungsstatistiken erstellt werden. Für eine detaillierte Beschreibung des Arealtyp-Konzeptes wird auf *Fehrenbach et al. (2001)* sowie *Scherer et al. (1999)* verwiesen. Den räumlich verteilten Arealtypen werden über ein Attributierungsverfahren stadtplanungsrelevante klimatische und lufthygienische Eigenschaften zugewiesen, die in Tab. 3 zusammengefasst sind. Das Ergebnis der Klassifikation der Arealtypen ist in Abb. 3 dargestellt.

Tab. 2 Übersicht über die in KLAZ verwendeten Eingangsdaten für die Berechnung der digitalen Reliefmodelle, der Luftschadstoffausbreitung sowie für kartographische Darstellungen.

Name	Beschreibung	Eigenschaften	Quelle	Verwendung
DHM25	Digitales Geländemodell DHM25 der Schweiz	Geländehöhe (in m NN); 25 m Rasterauflösung	Bundesamt für Landestopographie	Erstellung der DHM für überdeckte Flächen der SR und DR
SRTM	Digitales Höhenmodell (DHM) aus Daten der Shuttle Radar Topography Mission	Höhe (in m NN); drei Bogensekunden Rasterauflösung	USGS	Erstellung der DHM für die MD, SR und DR (Flächen ohne Überdeckung durch das DHM25)
DOM	Digitales Oberflächenmodell der Stadt Zürich; Stand 2002/2003	Höhe der beständig sichtbaren Oberfläche (in m NN); xyz-Punkt- daten;	Bundesamt für Landestopographie sowie Geomatik + Vermessung Stadt Zürich	Berechnung der Gebäudehöhen in der Stadt Zürich
Verkehrsmengen	Anzahl Fahrzeuge pro Tag, aufgeschlüsselt nach unterschiedlichen Fahrzeugkategorien	Attributdaten zu den Ostluft-Strassenlinks (GIS-Vektordaten, Ⓜ ₁)	GIS-Zentrum "Ostluft"	Berechnung des NO ₂ -Konzentrations- beitrags der Linienquellen
NO ₂ -Modellierung	Modellierte NO ₂ -Konzentrationen für einzelne Jahre im Zeitraum 2000–2015	Jahresmittelwerte (in µg/m ³); 100 m Rasterauflösung		Validierung der in KLAZ modellierten NO ₂ -Konzentrationen.
Gemeindegrenzen	Gemeindegrenzen entsprechend offiziellem Verlauf (inkl. Seeufer und ausserkantonalen Anteilen des Zürichsees)	GIS-Vektordaten	GIS-Zentrum Kanton Zürich	Kartographische Darstellung

Tab. 3 Klimatische und lufthygienische Eigenschaften der in KLAZ ausgewiesenen Arealtypen.

Arealtyp	Durchlüftung	Lufthygiene	Thermische Situation
Gewässer	Sehr niedrige Rauigkeiten; kaum Strömungshinder- nisse	Keine nennenswerten Emissionen	Ausgeglichene Tagesgänge; gedämpfte Jahresgänge; z. T. Kaltluftproduktion
Gletscher und Schneedecken	Niedrige Rauigkeiten; kaum Strömungshindernisse	Keine Emissionen	Ausgeprägte Tagsgänge; starke Kaltluftproduktion
Wälder	Sehr hohe Rauigkeiten; kaum Strömungshindernisse, jedoch als Strömungs- widerstand wirksam	Hohe biogene Emissionen (VOC); kaum anthropogene Emissionen; hohe Frischlufthproduktion	Ausgeglichene Tagesgänge; hohe Kaltluftproduktion (grosse Volumina, mittlere Abkühlung)
Vegetationsbestandene Freiflächen	Niedrige bis mittlere Rauigkeiten; kaum Strömungshindernisse	Variable biogene Emissionen; kaum anthropogene Emissionen; Frischlufthproduktion	Ausgeprägte Tagesgänge; Kaltluftproduktion (kleine Volumina, starke Abkühlung)
Vegetationslose Freiflächen	Niedrige Rauigkeiten; vereinzelt Strömungs- hindernisse	Kaum biogene Emissionen; mittlere bis hohe anthropogene Emissionen (Verkehr)	Stark ausgeprägte Tagesgänge
Bebaute Flächen mit niedriger Verdichtung	Mittlere Rauigkeiten; Strömungshindernisse	Niedrige biogene Emissionen; niedrige bis mittlere anthropogene Emissionen (Hausbrand, Verkehr)	Mittlere nächtliche Abkühlung
Bebaute Flächen mit mittlerer Verdichtung	Mittlere bis hohe Rauig- keiten; teils massive Strömungshindernisse	Kaum biogene Emissionen; mittlere anthropogene Emissionen	Geringe nächtliche Abkühlung; geringe bis mittlere Abwärme; teilweise Wärmeinsel
Bebaute Flächen mit hoher Verdichtung	Hohe bis sehr hohe Rauigkeiten; massive Strömungshindernisse	Keine biogenen Emissionen; mittlere bis hohe anthropogene Emissionen	Sehr geringe nächtliche Abkühlung; mittlere bis hohe Abwärme; Wärmeinsel

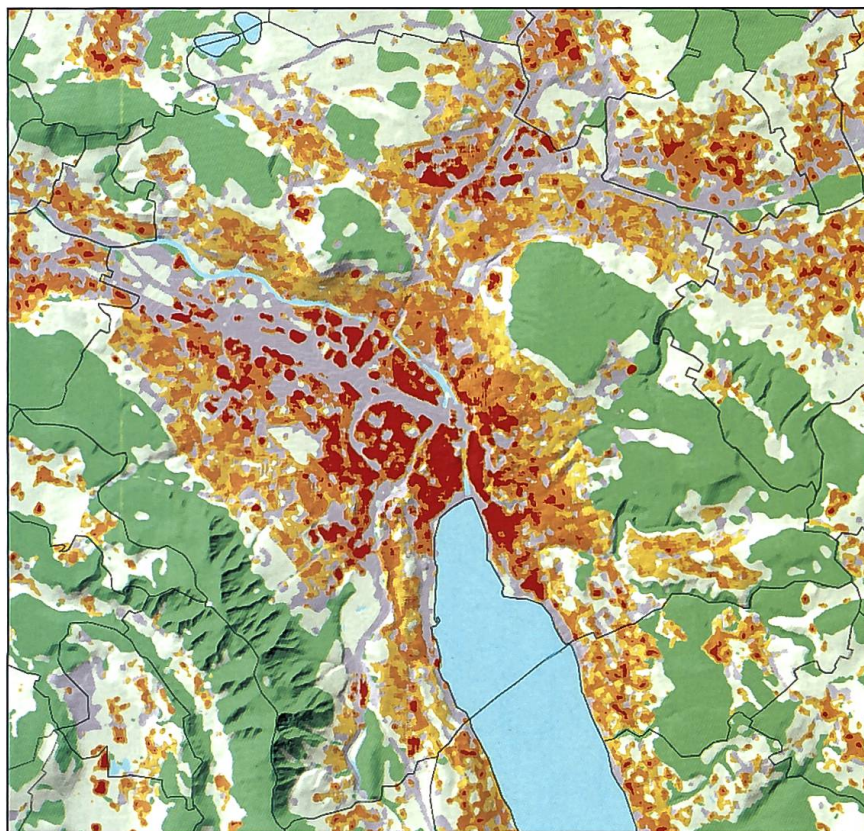
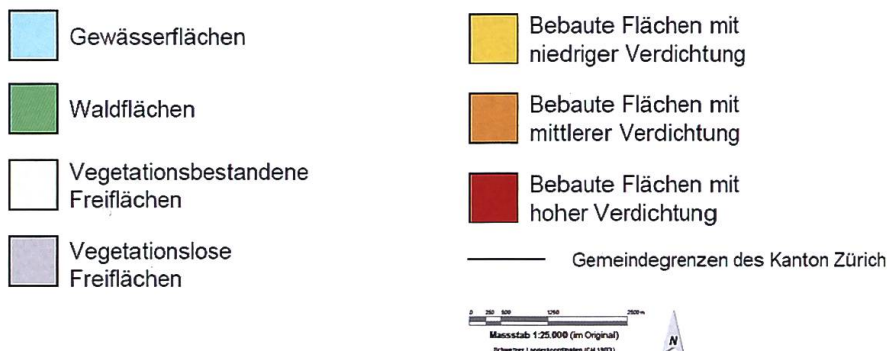


Abb. 3 Verteilung der klimarelevanten Landbedeckung (Arealtypen) der Stadt Zürich und Umgebung mit überlagerter Reliefschummerung.



3.2 Relief

Das Relief der Erdoberfläche spielt für die Ausprägung des regionalen und lokalen Klimas sowie für die Ausbreitung von Luftschadstoffen eine zentrale Rolle. Dies gilt auch für das vorliegende Untersuchungsgebiet.

3.2.1 Digitale Höhenmodelle

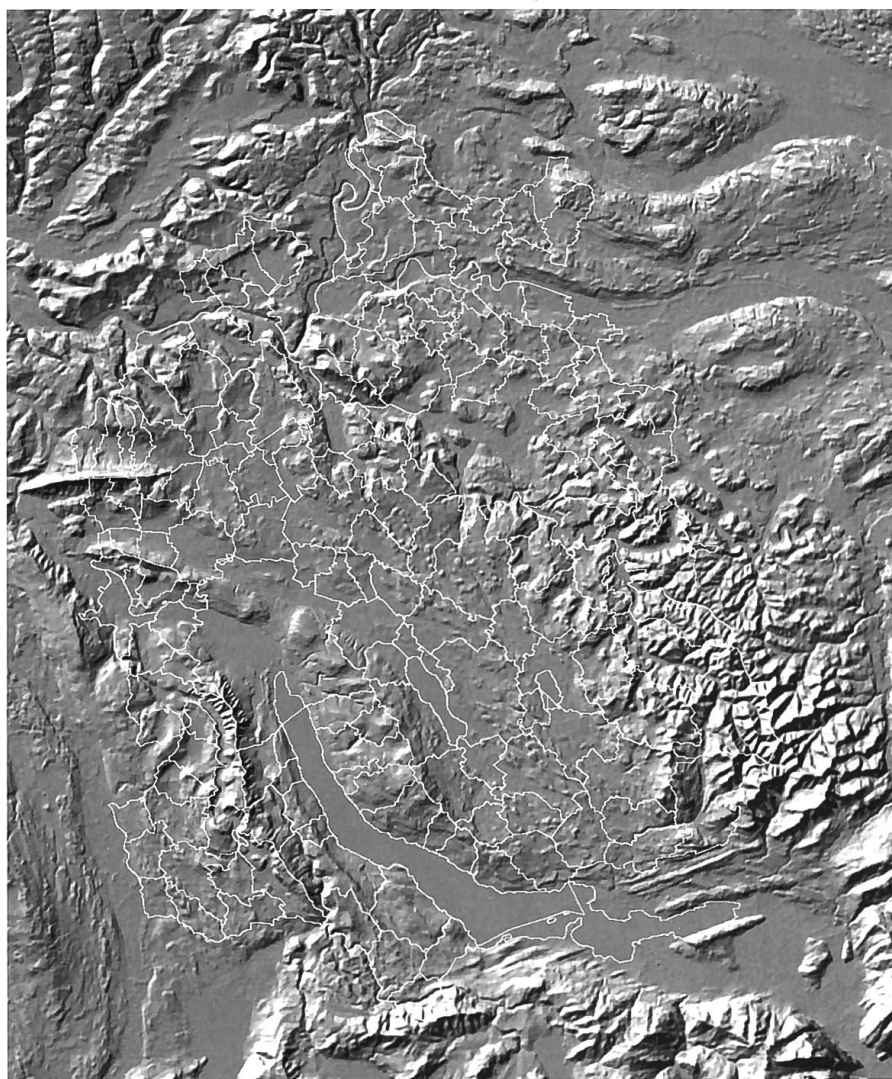
Als Eingangsdaten für die in KLAZ durchgeführte Analysen der reliefbeeinflussten lokalklimatisch und lufthygienisch wirksamen Prozesse dienten zwei $1^\circ \times 1^\circ$ grosse Kacheln der SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) sowie das digitale Höhenmodell DHM25 der Schweizer Landestopographie.

Für die SRTM-Daten wurde nach einer Mosaikierung der beiden Kacheln eine Koordinatentransformation in Schweizer Landeskoordinaten (einschliesslich einer Überprüfung der Qualität der Georeferenzierung) durchgeführt, wobei ein Resampling mit bilinearer Interpolation in das

jeweilige Zielraster der MD (1000 m), der SR (50 m) und der DR (10 m) eingesetzt wurde. Für eine Analyse systematischer Höhenabweichungen im Vergleich zum DHM25 wurde zudem ein 25 m Raster der SR erzeugt.

Das DHM25 wurde auf das o. a. 25 m Raster der SR projiziert; die Höhenwerte wurden auf ganze Meter gerundet. Anhand der Werte für den Zürichsee wurde festgestellt, dass die Höhen im SRTM-Datensatz um 4 m zu tief sind, was entsprechend korrigiert wurde. Die DHM25-Werte wurden dann in die SRTM-Daten des 25 m Rasters der SR eingeblendet. Die Übergangsbereiche zwischen SRTM- und DHM25-basierten Höhen wurden anschliessend mit einem gleitenden Interpolationsverfahren aufeinander angepasst, um Höhengsprünge in den DHM zu vermeiden. Die endgültigen DHM wurden schliesslich durch erneutes Resampling des fusionierten Höhendatensatzes erzeugt. Abb. 4 zeigt eine darauf basierende Reliefschummerung, welche dessen sehr gute Qualität verdeutlicht.

Abb. 4 Reliefschummerung auf der Basis des digitalen Höhenmodells der SR mit 50 m Rasterauflösung. Weiss dargestellt sind alle Vektoren des Gemeindegrenzen-Datensatzes (inkl. Seeufer und ausserkantonale Flächen).



3.2.2 Digitale Reliefmodelle

Aus den digitalen Höhenmodellen wurden die in Tab. 4 angeführten Reliefgrössen mit Standardverfahren der digitalen Reliefanalyse gewonnen. Die resultierenden digitalen Reliefmodelle wurden für alle Analysen der lokalen Reliefeinflüsse auf Klima und Lufthygiene herangezogen.

Tab. 4 Reliefgrößen der in KLAZ verwendeten digitalen Reliefmodelle.

Reliefgrösse	Kürzel	Einheit	Beschreibung
Geländehöhe	z	m NN	Höhe über dem Meeresspiegel
Gradient der Geländehöhe	$\bar{\nabla}z$		Vektor mit den Komponenten dz/dx und dz/dy , welche den Anstieg der Geländehöhe z in x- bzw. y-Richtung (Ost bzw. Nord) pro Meter horizontale Wegstrecke angeben
Hangneigung	α	Grad	gemessen in Richtung des Gradienten $\bar{\nabla}z$, d. h. in Richtung des stärksten Anstiegs der Geländehöhe z
Exposition	Φ	Grad	Azimet der Hangnormalen; $0^\circ = \text{N}$, $90^\circ = \text{E}$, $180^\circ = \text{S}$, $270^\circ = \text{W}$
Muldentiefe	$\Delta h_{M,z}$	m	Berechnung der maximalen Tiefe einer Hohlform aus dem Reliefmodell, d. h. der Muldentiefe z. B. eines Kaltluftsees

3.2.3 Strukturgrößen des Zürcher Stadtgebiets

Für das Stadtgebiet Zürichs steht ein digitales Oberflächenmodell (DOM) zur Verfügung, welches die Höhe der beständig sichtbaren Oberfläche in einem detaillierten Punktraster (in m NN) enthält. Für das 5 m Raster der DR wurden die in die jeweilige Rasterzellen fallenden Punkthöhen des DOM ermittelt und neben der mittleren Höhe auch die minimalen und maximalen Werte sowie die Schwankungsbreite und die Anzahl der Punkte berechnet.

Aus den aufgerasterten Höhendaten der beständig sichtbaren Oberfläche wurden anschliessend im 50 m Raster der SR sowie im 10 m Raster der DR für die Stadtflächen Zürichs die Gebäudehöhe h , das Verhältnis von Oberfläche zu Grundfläche λ_C sowie die aerodynamische Rauigkeitslänge z_0 und die Nullpunktverschiebung z_d berechnet.

4 Klimaaanalyse

4.1 Mesoskalige Wind- und Temperaturfelder

Die für die Belange der räumlichen Planung relevanten lokalskaligen Klima- und Lufthygienebedingungen werden erheblich von mesoskaligen atmosphärischen Prozessen beeinflusst. Dies gilt erstens für die bodennahe Durchlüftung, welche vom übergeordneten Windfeld angetrieben wird, zweitens aber auch für die mit dem Windfeld und den daraus resultierenden Durchlüftungsbedingungen verbundene Transmission (Dispersion) von Luftschadstoffen, und drittens für die thermischen Bedingungen in Bodennähe.

Die infolge des bei autochthonen Wetterlagen geringen bzw. nicht vorhandenen grossräumigen Luftdruckgradienten meist nur schwachen Winde führen dazu, dass die lokalen Klimafaktoren am Erdboden starke Modifikationen der bodennahen Wetter- und Lufthygienebedingungen bewirken.

Die für die Modellierung gewählten geostrophischen Anströmrichtungen West bzw. Ost decken die am häufigsten auftretenden Windrichtungen der Höhenströmung ab. Die Dominanz dieser Windrichtungen ist gut aus den in den Abb. 5 und 6 dargestellten Windrosen ausgewählter Stationen in der weiteren Umgebung Zürichs zu erkennen. Die Basis für die Windrosen sind langjährige Erhebungen der Stundenwerte für Windgeschwindigkeit und Windrichtung durch Meteo-Schweiz.

Die Station Zürich zeigt die für das Untersuchungsgebiet charakteristische bimodale Windrichtungsverteilung, die durch die reibungsbedingte Winddrehung in Bodennähe von der West-Ost-Verteilung der Höhenströmung abweicht. Bei der Station Zürich dominieren die Nordostwinde vermutlich infolge lokaler Kaltlufttransporte. Höhere Windgeschwindigkeiten sind nur bei Westanströmung zu verzeichnen.

Die höher gelegene Station auf dem Hörnli östlich von Zürich repräsentiert die übergeordneten, synoptisch bedingten, bimodal verteilten Windsituationen (Abb. 5). An der Station Hörnli dominieren Winde aus westlichen und östlichen Richtungen. Höhere Windgeschwindigkeiten sind dort vor allem mit westlichen Richtungen verbunden.

An der Station Lägern (Abb. 6) werden, bis auf wenige Ausnahmen, Winde aus südsüdwestlicher Richtung sowie aus nordnordöstlicher Richtung erfasst. Auch an dieser Station pausen sich aufgrund der Höhenlage noch die bimodal verteilten synoptischen Windverhältnisse weitgehend durch, jedoch ist die Bodenreibung und die damit verbundene Winddrehung in Bodennähe stärker und vom Relief und der Waldbedeckung deutlich beeinflusst. Die Station Zürich-Kloten liegt deutlich niedriger und ist durch eine markant abweichende Windrichtungsverteilung gekennzeichnet. Die bimodale Windrichtungsverteilung mit dominierenden südwestlichen und weniger häufigen nordöstlichen Windrichtungen ist gut sichtbar. In beiden Fällen treten auch stärkere Windgeschwindigkeiten auf. Im Vergleich zur Station Lägern ist die Winddrehung schwächer, was auf die geringere Bodenreibung, bedingt durch Relief und Oberflächenrauigkeit, zurückzuführen ist. Zusätzlich kommen an dieser Station auch häufig Winde aus Nordwesten und Südosten vor, allerdings meist mit nur niedrigen Windgeschwindigkeiten. Diese Winde sind das Ergebnis eines schwachen, aber vermutlich vor allem in Wetterlagen mit stabil geschichteter Grenzschicht wirksamen Führungseffekts des umgebenden Reliefs. Auch ist die Anzahl der Kalmen (Windstille bzw. Windgeschwindigkeit $< 0.5 \text{ m/s}$) gegenüber den bisher beschriebenen Stationen erhöht, was durch die niedrige Höhenlage der Station erklärbar ist.

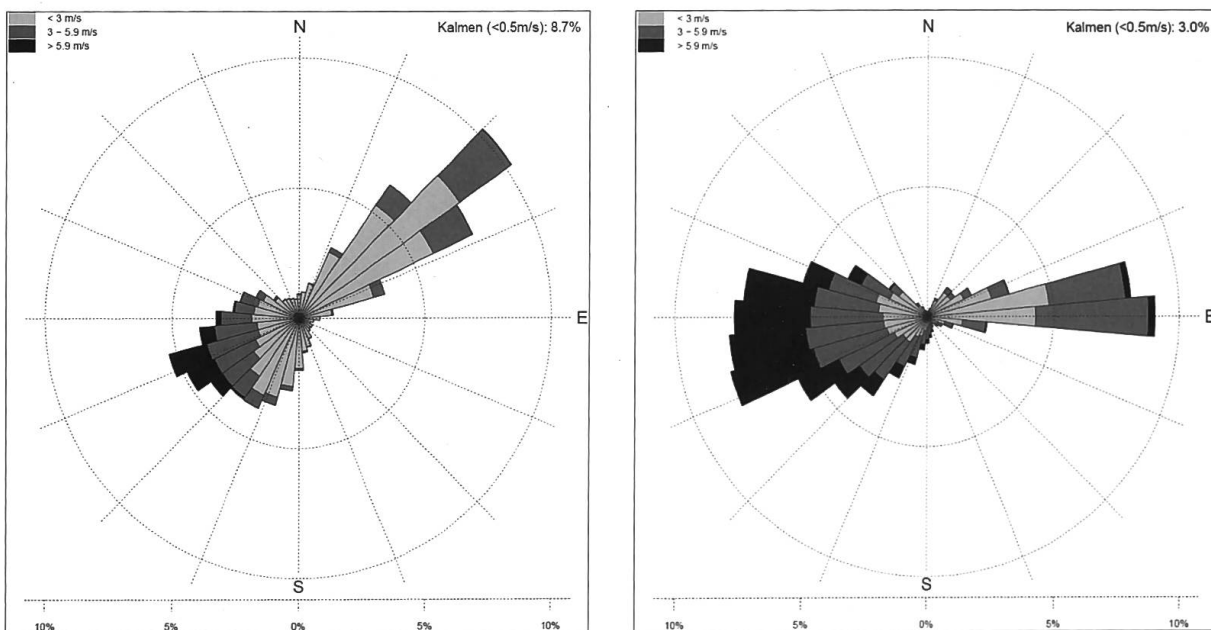


Abb. 5 Mittlere jährliche Windrosen der Stationen Zürich (links, 1981–2000, Höhe: 556 m NN, Lage: 685125/248090) und Hörnli (rechts, 1992–2000, Höhe: 1144 m NN, Lage: 713500/247750) (Quelle: Meteo-Schweiz).

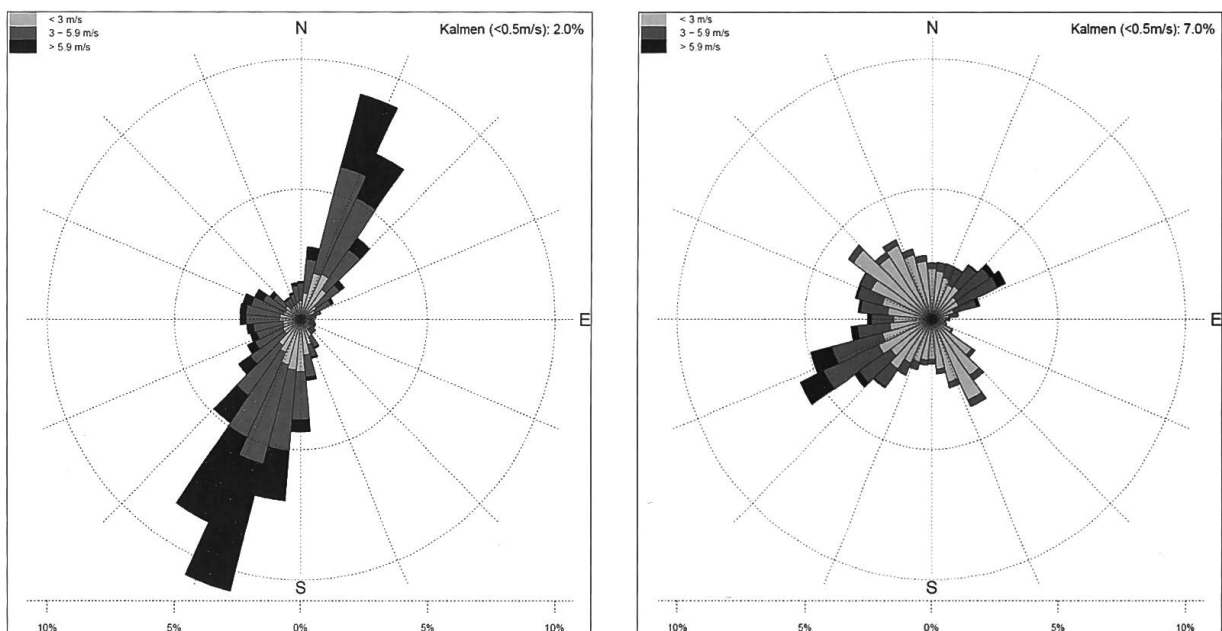


Abb. 6 Mittlere jährliche Windrosen der Stationen Lägern (links, 1990–2000, Höhe: 868 m NN, Lage: 672250/259460) und Zürich-Kloten (rechts, 1981–2000, Höhe: 436 m NN, Lage: 682720/259740) (Quelle: MeteoSchweiz).

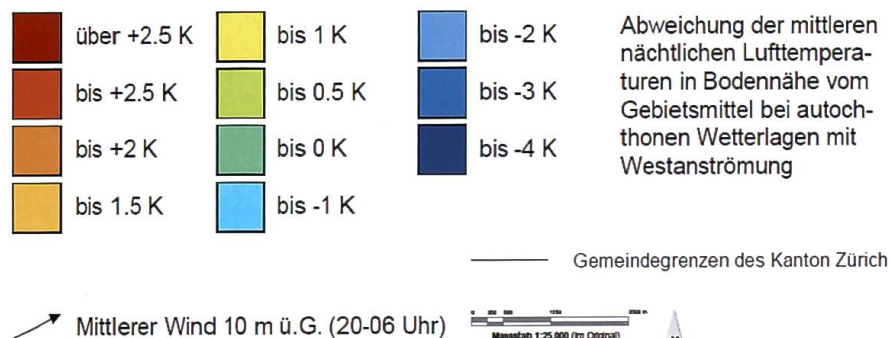
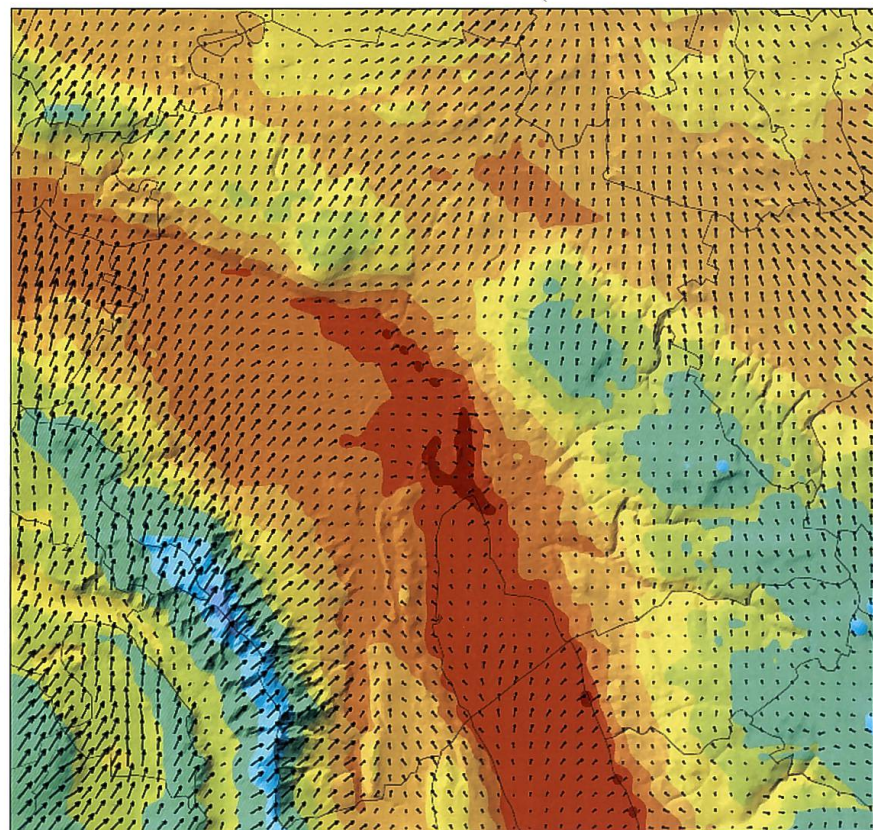
Mit Hilfe des mesoskaligen meteorologischen Modells MetPhoMod (*Perego* 1999) wurden zwei Modellsimulationen durchgeführt, um charakteristische mesoskalige Wind- und Temperaturfelder für autochthone Wetterlagen zu ermitteln, welche für Luft- oder Wärmebelastungen von grosser Bedeutung sind. Bei autochthonen Wetterlagen treten mesoskalige, orographisch bedingte Windsysteme – insbesondere Berg-Talwind-Systeme oder Gebirgswinde – in verstärkter Form auf. Diese Windsysteme kommen aber in überprägter Form auch bei allochthonen Wetterlagen vor.

Die Modellsimulationen wurden nur für die Nachtstunden zwischen 20:00 und 06:00 Uhr durchgeführt. In diesem Tageszeitraum ist durch das Fehlen der solaren Einstrahlung die konvektive Durchmischung der planetarischen Grenzschicht (Mischungsschicht) unterbrochen. Ein Teil der am Tage emittierten und in der Mischungsschicht verteilten Luftschadstoffe werden in der Nacht wieder in Bodennähe transportiert (Subsidenz, Rezirkulation), so dass kritische lufthygienische Bedingungen entstehen können, insbesondere in Gebieten, in denen zu dieser Zeit unterdurchschnittliche Windverhältnisse herrschen. Da bei lufthygienischen Wirkungszusammenhängen nicht nur mittlere, sondern auch extreme Luftschadstoffkonzentrationen von Bedeutung sind, können auch in Gebieten, die ansonsten höhere mittlere Windgeschwindigkeiten verzeichnen, erhöhte Luftbelastungen auftreten, wenn entsprechende Quellen in der Nähe sind. Auch das Problem der Wärmebelastung ist vor allem in den Nachtstunden von vordringlicher Bedeutung. Hier spielen nicht nur die Lufttemperaturen, sondern auch die Windgeschwindigkeiten eine wichtige Rolle. Diese sind jedoch in Zeiten der Wärmebelastung oft stark herabgesetzt. Der in diesem Fall wünschenswerte Effekt des turbulenten Austausches unterbleibt.

In Abb. 7 sind die mittleren nächtlichen Wind- und Temperaturfelder in Bodennähe der mit MetPhoMod gerechneten Modellergebnisse wiedergegeben. Man erkennt, dass sich der Innenstadtbereich durch erhöhte nächtliche Lufttemperaturen auszeichnet, was dem städtischen Wärmeinseleffekt gleichkommt. Die Lufttemperaturen über dem Zürichsee unterscheiden sich unwesentlich von denen der Stadt. Das hängt mit der hohen Wärmekapazität von Wasser zusammen und daher mit einer grossen Pufferwirkung von Wasserflächen während der Nachtstunden. Die

geringsten positiven bis negativen Temperaturabweichungen weisen die Waldgebiete auf den Höhenrücken um Zürich auf. Das ist bedingt durch die grosse Kaltluftproduktionsleistung von Waldflächen während der Nachtstunden bei negativer Strahlungsbilanz. Das Windfeld, das in Vektorform dem Temperaturfeld überlagert ist, zeigt einerseits auf den Höhenrücken die durch die aerodynamische Rauigkeit leichte Drehung auf Südwest mit höheren mittleren Geschwindigkeiten über den Höhenlagen, andererseits variable Windrichtungen durch Kanalisierungs- und Führungseffekte durch das Relief und eine deutliche Verringerung der mittleren Windgeschwindigkeiten im gesamten Innenstadtbereich. Wegen dieser schlechten nächtlichen Durchlüftung ist mit erhöhter Wärmebelastung insbesondere in den Sommermonaten und z. T. erhöhter Luftschadstoffbelastung zu rechnen.

Abb. 7 Mittleres nächtliches Windfeld und Abweichungen der nächtlichen Lufttemperatur in Bodennähe für den Raum Zürich bei autochthoner Wetterlage mit Westanströmung.



4.2 Durchlüftungssituation

Die in Abb. 8 dargestellte Durchlüftungssituation ist ein Beispiel aus zahlreichen Karten der Klimauntersuchung und beschreibt zusammenfassend die bodennahen Durchlüftungsbedingungen, die sich in charakteristischer Weise infolge der relief- bzw. landbedeckungsbedingten Klimafaktoren bei entsprechenden grossräumigen Witterungsbedingungen ergeben. Sie treten in den ausgewiesenen Gebieten regelmässig oder mit einer im Vergleich zu anderen Gebieten erhöhten Häufigkeit auf. In Tab. 5 werden die einzelnen Durchlüftungssituationen im Detail erläutert.

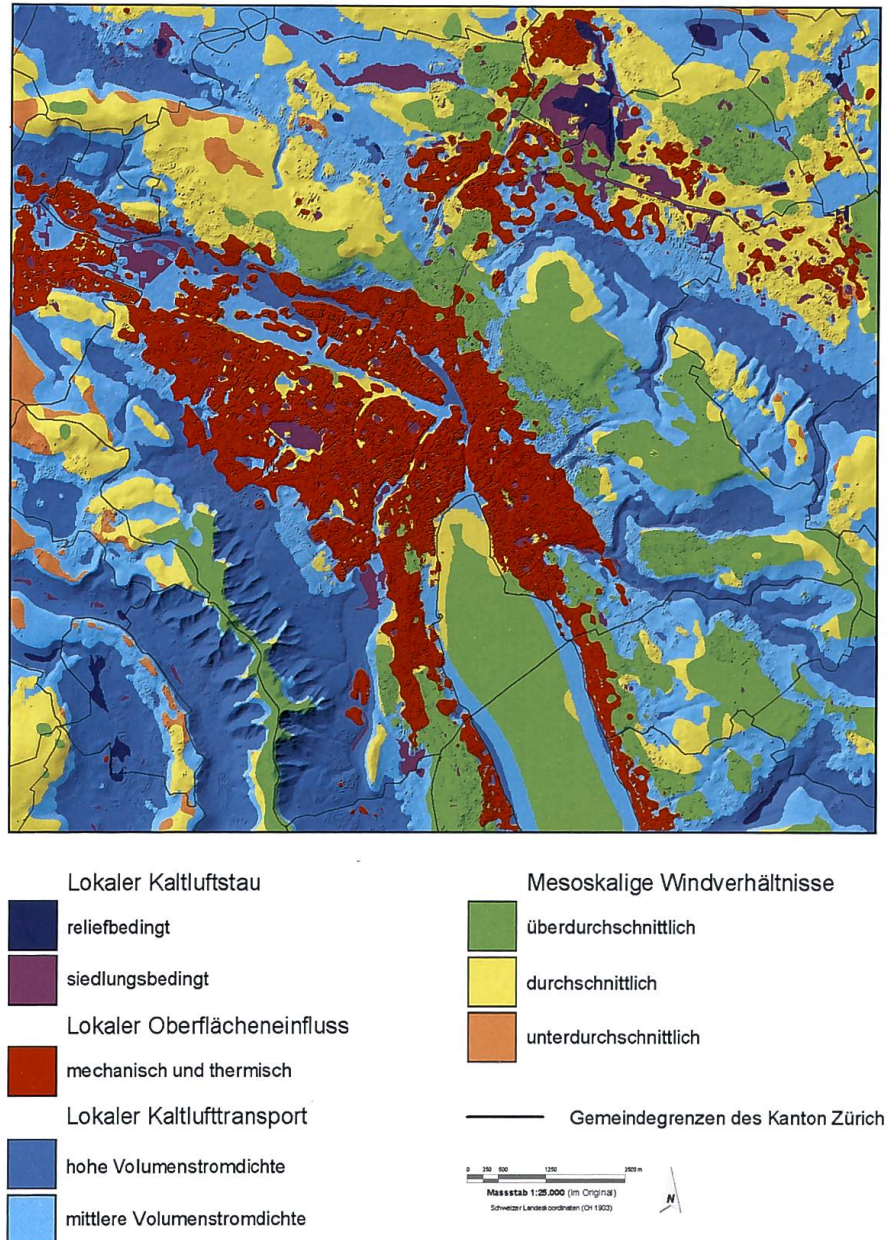
Tab. 5 Übersicht über die in KLAZ ausgewiesenen Durchlüftungssituationen (vgl. Abb. 8).

Kürzel	Bezeichnung	Eigenschaften
KS_1	Lokaler Kaltluftstau reliefbedingt	stark verlangsamter bzw. stagnierender Kaltlufttransport in Mulden und Beckenstrukturen, Talverengungen
KS_2	Lokaler Kaltluftstau siedlungsbedingt	Wie bei KS_1 , allerdings ist in diesem Fall die Abschwächung bzw. die Stagnation des Kaltlufttransports durch Siedlungsstrukturen bedingt
OE_2	Lokaler Oberflächeneinfluss hoch	reduzierte Windgeschwindigkeiten in Bodennähe, verursacht durch hohe Rauigkeiten oder grosse Strömungshindernisse in Siedlungen; in ungünstig orientierten Strassenzügen und in der Nähe hoher Gebäude erhöhte Böigkeit durch Düseneffekte oder verstärkte Turbulenz
KT_2	Lokaler Kaltlufttransport hohe Volumenstromdichte	nächtlicher, im Winter teils ganztägiger Kaltluftabfluss in Tälern im Konvergenzbereich lokaler Kaltluftbahnen mittlerer Volumenstromdichte
KT_1	Lokaler Kaltlufttransport mittlere Volumenstromdichte	nächtlicher, im Winter teils ganztägiger Kaltluftabfluss in kleineren Tälern, Tiefenlinien und Hängen sowie in Abschnitten grösserer Täler mit erweiterten Querschnitten; Ausströmen von Kaltluft aus Wäldern mit hoher Kaltluftproduktion
MW_2	Mesoskalige Windverhältnisse überdurchschnittlich	höhere nächtliche Windgeschwindigkeiten in Bodennähe bei autochthonen Wetterlagen; dynamisch induziert durch Umlenk- oder Düseneffekte; thermisch induziert bei Berg-Tal- oder Gebirgswinden
MW_1	Mesoskalige Windverhältnisse durchschnittlich	durchschnittliche nächtliche Windgeschwindigkeiten in Bodennähe bei autochthonen Wetterlagen
MW_0	Mesoskalige Windverhältnisse unterdurchschnittlich	niedrigere nächtliche Windgeschwindigkeiten in Bodennähe bei autochthonen Wetterlagen; dynamisch induziert im Luv reliefbedingt verengter Strömungsquerschnitte oder durch Reliefabschattung

Die in Abb. 8 dargestellte Durchlüftungssituation ist ein Beispiel aus zahlreichen Karten der Klimauntersuchung und beschreibt zusammenfassend die bodennahen Bedingungen. Sie zeigt vier grundsätzliche Merkmale der Durchlüftung des Stadtgebietes:

1. Der gesamte Baukörper der Stadt hat einen starken lokalen Oberflächeneinfluss aufgrund der stark erhöhten aerodynamischen Rauigkeit. Hier muss mit erhöhter Luftbelastung und Wärmebelastung gerechnet werden.
2. Lediglich entlang der Eisenbahntrasse und den damit zusammenhängenden Freiflächen ist dieser lokale Einfluss gering. Die Bahntrasse kann, wie das auch schon in anderen Studien im Ruhrgebiet durch Kuttler (1993) gezeigt wurde, als Kanalisierungsbahn für nächtliche Kaltluft in die Stadtmitte dienen. Innerhalb des Baukörpers kommen auch lokale siedlungsbedingte Kaltluftseen vor. Dies sind insbesondere grössere Grünflächen, die von dichter Randbebauung umgeben sind. Während transportierte, d. h. sich bewegendende Kaltluft in der Regel eine positive Wirkung auf die Durchlüftung eines Gebietes ausübt und darüber hinaus Wärmebelastung reduziert, ist stagnierende, d. h. ruhende bzw. nur sehr langsam fliessende Kaltluft sowohl aus lufthygienischer als auch aus thermischer Sicht mit überwiegend negativen Auswirkungen verbunden.

Abb. 8 Mittlere Durchlüftungsbedingungen im Gebiet der Stadt Zürich unter Einfluss von Landbedeckung und Relief.



3. Kaltluftproduktionsgebiete unterschiedlicher Volumenstromdichte kommen in den Wald- und Freilandgebieten entlang der Hügelzonen vor. Mit der Volumenstromdichte wird angegeben, wieviel Volumen Kaltluft pro Stunde und Fläche unter autochthonen Bedingungen (klare Nacht) gebildet werden kann. Hier spielen die Wälder bezüglich des Volumens eine ganz besondere Rolle. Wenn diese Wälder auch noch in Hanglage vorkommen, entsteht daraus eine für das urbane Klima bedeutsame Hangwindzirkulation, die sich in grösseren Einzugsgebieten auch zu beträchtlichen nächtlichen Bergwindssystemen entwickeln kann.
4. Gebiete mit überdurchschnittlichen mesoskaligen Windverhältnissen, wie z.B. die Seefläche, die eine ungehinderte Ventilation ermöglichen und somit lufthygienischen Belastungen und Wärmebelastungen entgegenwirken.

Die klimatischen Auswirkungen auf Lufthygiene und thermische Belastung sind in Tab. 6 nochmals zusammengefasst.

Tab. 6 Klimatische und lufthygienische Auswirkungen der in KLAZ ausgewiesenen Durchlüftungssituationen.

Durchlüftungssituation	Durchlüftung	Lufthygiene	Thermische Situation
Lokaler Kaltluftstau relief- oder siedlungsbedingt	reduzierte Durchlüftung	erhöhte Luftbelastung	reduzierte Wärmebelastung; erhöhte Frostgefahr und Wärmeverluste
Lokaler Oberflächeneinfluss hoch	reduzierte Durchlüftung	erhöhte Luftbelastung	erhöhte Wärmebelastung; reduzierte Frostgefahr und Wärmeverluste
Lokaler Kaltlufttransport hohe Volumenstromdichte	verbesserte Durchlüftung	reduzierte Luftbelastung	reduzierte Wärmebelastung; erhöhte Frostgefahr und Wärmeverluste
Lokaler Kaltlufttransport mittlere Volumenstromdichte	geringfügig verbesserte Durchlüftung	geringfügig reduzierte Luftbelastung	reduzierte Wärmebelastung; erhöhte Frostgefahr und Wärmeverluste
Mesoskalige Windverhältnisse überdurchschnittlich	verbesserte Durchlüftung	reduzierte Luftbelastung	reduzierte Wärmebelastung
Mesoskalige Windverhältnisse durchschnittlich	indifferent	indifferent	indifferent
Mesoskalige Windverhältnisse unterdurchschnittlich	reduzierte Durchlüftung	erhöhte Luftbelastung	erhöhte Wärmebelastung

4.3 Thermische Situation

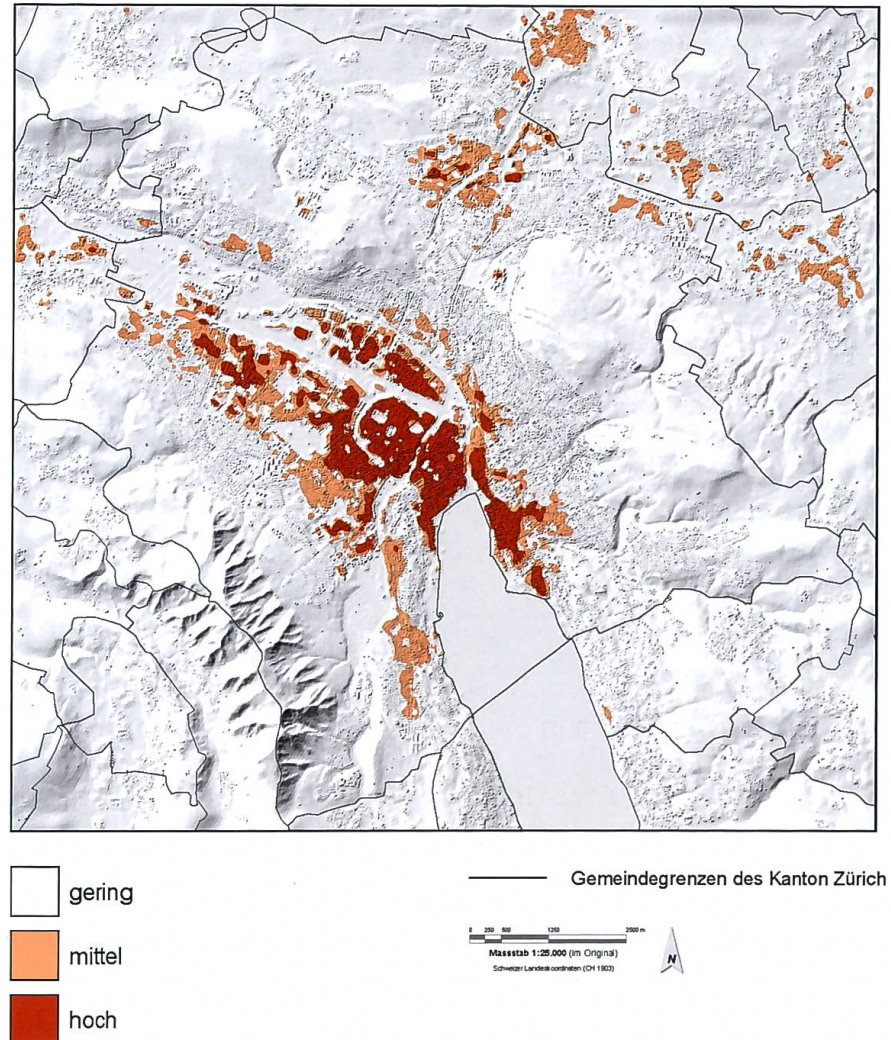
Die Diskussion der thermischen Situation im Untersuchungsgebiet erstreckt sich zum einen auf die lokale Überwärmung im Stadtgebiet und die damit zusammenhängende lokale Wärmebelastung, zum anderen auf die Kaltluftproduktion, welche zusammen mit dem Relief die Kaltlufttransporte massgeblich steuert und somit in bestimmten Siedlungsbereichen zur Reduzierung der lokalen Wärmebelastung beiträgt.

Wärmebelastung wird durch atmosphärische Prozesse verursacht, die dazu führen, dass die durch den menschlichen Stoffwechsel produzierte Wärme nicht ausreichend an die Umgebung abgegeben werden kann. Hierbei spielt neben der Lufttemperatur der gesamte Strahlungs-, Wärme- und Wasserdampfaustausch mit der Umgebung, und somit der vom Wind gesteuerte turbulente Austausch von fühlbarer und latenter Wärme, eine wesentliche Rolle.

Das Problem der Wärmebelastung tritt insbesondere in Nächten auf, da in dieser Zeit aktives Entgegensteuern (Aufsuchen von Schattenbereichen, kühlen oder gut durchlüfteten Gebieten, Besuch von Schwimmbädern oder klimatisierten Räumen etc.) zur Reduzierung der Belastung kaum bzw. gar nicht durchführbar ist. Die mit Wärmebelastung verbundenen Risiken werden anhand der in zahlreichen Studien nachgewiesenen erhöhten Morbiditäts- und Mortalitätsraten in Zeiträumen mit erhöhter Wärmebelastung ersichtlich. In der räumlichen Planung sind vor allem lokal erhöhte Wärmebelastungsrisiken relevant, währenddessen grossräumig auftretende Belastungsperioden (Hitzewellen) nicht direkt mit Instrumenten der räumlichen Planung beeinflussbar sind. Dies bedeutet, dass in Zeiten einer allgemeinen Wärmebelastung die lokal auftretenden Spitzenwerte beurteilungsrelevant sind und mittels geeigneter Anpassungsmassnahmen abgesenkt werden sollen.

In Abb. 9 ist die zu erwartende nächtliche lokale Wärmebelastung dargestellt, wie sie für den menschlichen Organismus von grosser Relevanz ist. In die Berechnung gehen verschiedene Variablen des Strahlungs- und Wärmehaushaltes sowie Strukturparameter ein, die aus den verschiedenen Höhenmodellen abgeleitet wurden.

Abb. 9 Mittlere lokale nächtliche Wärmebelastung im Gebiet der Stadt Zürich nach einem dreistufigen Klassifikationschema.



4.4 Lufthygiene

Luftbelastung entsteht durch hohe Immissionskonzentrationen, welche das Ergebnis der Emission von Luftschadstoffen bzw. ihrer Vorläufersubstanzen sowie ungünstiger Transmissionsbedingungen sind. Luftbelastung führt zu einer Vielzahl von Risiken, die sich von Schäden an Gebäuden und Böden bis hin zu gesundheitlichen Problemen erstrecken. Mittels gesetzlich vorgeschriebener Grenzwerte für einzelne Luftschadstoffe sollen die von den jeweiligen Luftschadstoffen ausgehenden Risiken begrenzt werden; synergistische Wirkungen von Luftschadstoffen sind damit aber nicht erfasst und bis heute auch nur unzureichend bekannt.

Der motorisierte Strassenverkehr ist mit 60 % die Hauptquelle der NO_2 -Belastung (*Stadt Zürich* 2007). Fast jedes dritte neue Auto ist heute ein Diesel-Kfz, und bis 2020 könnte es jedes zweite sein. Dieselaautos stossen rund dreimal mehr Stickoxide (NO_x) aus als Kfz mit Benzinmotoren. Dieser Dieselboom wird dazu führen, dass die NO_2 -Grenzwerte in der Stadt Zürich wahrscheinlich nicht vor 2015 eingehalten werden können. Im Gegensatz zu einer 30 %-igen Reduktion der Stickstoffdioxidbelastung von 1990 bis 2000 konnte keine weitere Reduktion bis 2007 erreicht

werden. Entlang von Hauptverkehrsachsen wurde der Jahresmittelwert von $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ deutlich überschritten. Neben dem Strassenverkehr tragen Feuerungsanlagen rund 20 % zur NO_2 -Belastung bei; hierbei bestehen jedoch kaum noch weitere Reduktionsmöglichkeiten (*Stadt Zürich* 2007).

Die komplexen lufthygienischen Bedingungen in städtisch geprägten Regionen erfordern ein indikatorbasiertes Analyseverfahren, das trotz der notwendigen Vereinfachung in der Lage ist, die strukturell bedingte, räumliche Verteilung der lokalen Luftbelastung wiederzugeben. Hierzu sind NO_2 -Jahresmittelkonzentrationen sehr gut geeignet, da sie erstens eines der Hauptprobleme der Lufthygiene darstellen und zweitens häufig mit den anderen lufthygienischen Problemen wie dem PM_{10} (Feinstaub) gekoppelt sind. Zur Ermittlung der von lokal erhöhten Luftbelastungen betroffenen Gebiete diente ein empirisch-statistisches Modell zur Berechnung der räumlichen Verteilung der Jahresmittelwerte der NO_2 -Konzentration (CNO_2).

In Abb. 10 sind die mittleren NO_2 -Konzentrationen dargestellt. In den dicht verbauten Stadtbezirken und entlang der Hauptverkehrsachsen sind die Konzentrationen deutlich erhöht. Kommen die Faktoren "geringe Durchlüftung" und "hohes Verkehrsaufkommen" zusammen, wie es in Bereichen der Innenstadt der Fall ist, dann liegen die Konzentrationen deutlich über den gesetzlich vorgegebenen Grenzwerten.

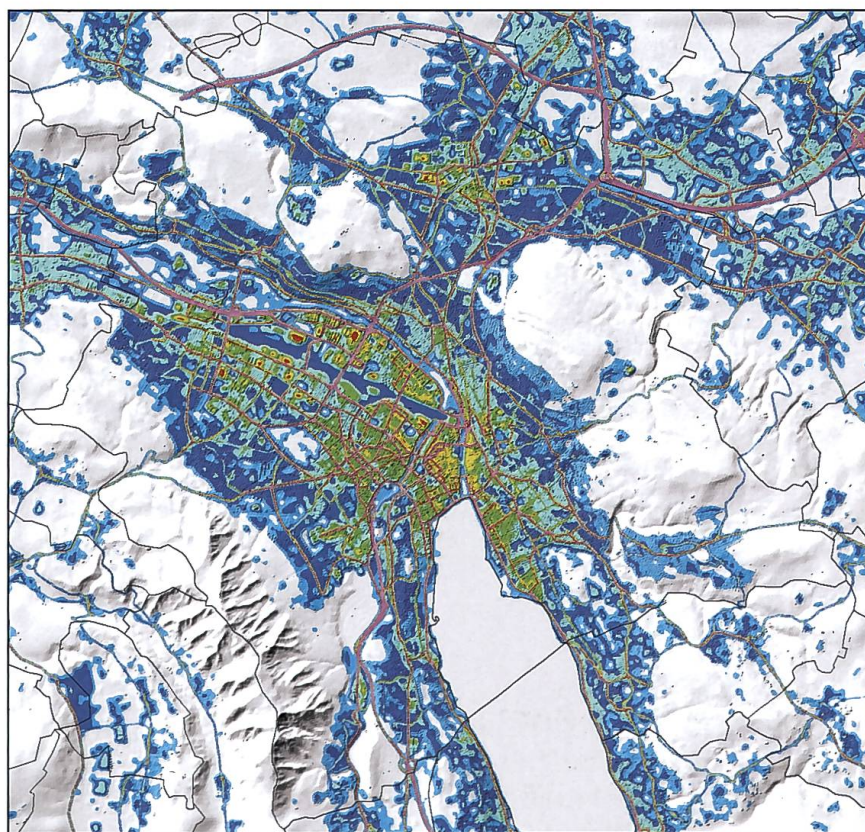


Abb. 10 Jahresmittel der Stickoxid-Konzentration im Raum Zürich aus Punkt-, Linien- und Flächenquellen.

Jahresmittel der NO_2 -Konzentration

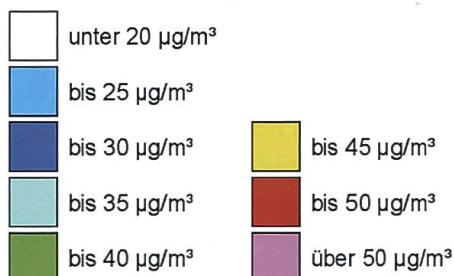


Tabelle 7 stellt die drei Intensitätsstufen und ihre Zuordnung zu den NO_2 -Konzentrationen dar, wie sie in die Bewertung für die Stadtplanung eingegangen sind. Die Schwellenwerte wurden über den entsprechenden Schweizer bzw. den in der EU geltenden Grenzwert festgelegt.


Tab. 7 Berechnung der Intensitätsstufen für lokale Luftbelastung (AQ) auf der Basis der modellierten Jahresmittelwerte der NO_2 -Konzentration C_{NO_2} .

Intensitätsstufe	Kürzel	Code	Zugeordnete Flächen
gering	AQ_0	0	$C_{\text{NO}_2} \leq 30 \mu\text{g} / \text{m}^3$
mittel	AQ_1	1	$C_{\text{NO}_2} > 30 \mu\text{g} / \text{m}^3 \wedge C_{\text{NO}_2} \leq 40 \mu\text{g} / \text{m}^3$
hoch	AQ_2	2	$C_{\text{NO}_2} > 40 \mu\text{g} / \text{m}^3$

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit den Ergebnissen der KLAZ-Studie liegen nun in insgesamt 46 Karten räumlich differenzierte, fachwissenschaftlich begründete und aufbereitete Aussagen zu klimatischen und lufthygienischen Sachverhalten für die Stadt Zürich sowie den Kanton Zürich vor.

Darauf aufbauend erfolgte ebenfalls auf fachwissenschaftlicher Ebene die Bewertung der Ergebnisse der Klimaanalyse, die aber nicht Gegenstand dieser Publikation sind. Für die beiden Zielbereiche "Thermische Situation" und "Lufthygiene" werden Zielsetzungen ausgesprochen, räumlich zugeordnet, in jeweils drei Karten dargestellt und mit jeweils spezifischen Planungsempfehlungen zur Erhaltung oder Verbesserung der lokal vorherrschenden Situation versehen.

Die Ergebnisse der Studie sind in digital verfügbaren Datenschichten sowie in digitalen Karten dargestellt, die der Berücksichtigung der Schutzgüter Klima und Luft in der Stadt- und Regionalplanung Zürichs dienen. Der vollständige Bericht mit einer detaillierten Beschreibung des methodischen Vorgehens und aller angefertigten Karten der Klimastudie wird der Öffentlichkeit über das Internet () zur Verfügung gestellt.

Literatur

- Ernst S. 1995. *Tagesperiodische Windsysteme und Belüftungsverhältnisse in Freiburg i. Brsg. Planungsrelevante Aspekte eines Bergwindsystems*. Freiburger Geographische Hefte 49, 1–103.
- Fehrenbach U. 1999. *Analyse und Bewertung lokal- und regionalklimatisch wirksamer Faktoren in der Region Basel*. Stratus 6, Basel, 1–177.
- Fehrenbach U. & Scherer D. 2000. Consequences of spatial resolution transformations for land-use classification. *Remote Sensing in the 21st Century: Economic and Environmental Applications*: 113–117.
- Fehrenbach U., Scherer D. & Parlow E. 2001. Automated classification of planning objectives for the consideration of climate and air quality in urban and regional planning for the example of the region of Basel/Switzerland. *Atmospheric Environment* 35(32): 5605–5615.
- Gross G. 1989. Numerical simulation of nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. *Beitr. Phys. Atm.*: 57–72.
- Jendritzky G. 1995. Bioklima. In: Reklip (Hrsg.): *Klimaatlas Oberrhein Mitte-Süd, Kartenteil*. Zürich et al., Karte 4.9.1.
- Jendritzky G. & Grätz A. 1995. Bioklima. In: Reklip (Hrsg.): *Klimaatlas Oberrhein Mitte-Süd, Textteil*. Zürich et al., 201–206.
- Kornbluh L. 1990. *Numerische Simulation lokalklimatischer Aspekte am Beispiel von Zürich*. Diplomarbeit am Institut für Meteorologie der Technischen Hochschule Darmstadt.

- Kuttler W. 1993. Planungsorientierte Stadtklimatologie. *Geographische Rundschau* 45(2): 95–106.
- Parlow E. 1983. Geländeklimatologische Untersuchungen in der Staufener Bucht unter besonderer Berücksichtigung lokaler Ausgleichsströmungen. *Freiburger Geographische Hefte* 20.
- Parlow E. 1996. The regional climate project REKLIP - an overview. *Theoretical and Applied Climatology* 53(1-3): 3–7.
- Parlow E., Scherer D., Fehrenbach U. & Beha H.-D. 1997. Satellite Based Urban Climate Analysis of Basle/Switzerland. *European Space Agency (ESA) SP-414(1)*: 271–274.
- Parlow E., Fehrenbach U., Scherer D. & Beha H.-D. 2001. Klimaanalysekarten der Region Basel. In: Thommes W., Parlow E., Paul P., Gossmann H. & Schaub O. (Hrsg.): *Klima und Raumplanung*. Schlussbericht REKLIP, Band 4, Strasbourg, 169–186.
- Parlow E., Scherer D. & Fehrenbach U. 2006. *Regionale Klimaanalyse der Region Südlicher Oberrhein (REKLISO)*. Regionalverband Südlicher Oberrhein, Freiburg i. Br., 1–99.
- Vogt R. & Parlow E. 2011. Die städtische Wärmeinsel von Basel – tages- und jahreszeitliche Charakterisierung. *Regio Basiliensis* 52(1): 7–15.
- Parlow E., Vogt R. & Feigenwinter C. 2014. The urban heat island of Basel – seen from different perspectives. *Erde* 145(1-2): 96–110.
- Perego S. 1999. MetPhoMod – A numerical mesoscale model for simulation of regional photosmog in complex terrain: Model description and application during POLLUMET 1993 (Switzerland). *Meteorology and Atmospheric Physics* 70: 43–69.
- Scherer D., Fehrenbach U., Parlow E. & Beha H.-D. 1996a. Determination of aggregated areal types from a Landsat-TM and ERS-1 based land-use classification for the agglomeration of Basel/Switzerland. In: Parlow E. (Hrsg.): *Progress in environmental remote sensing research and applications*. Rotterdam, 197–200.
- Scherer D., Parlow E. & Beha H.-D. 1996b. Roughness parameter derivation from ERS-1 and Landsat-TM satellite data for the agglomeration of Basel/Switzerland. In: Parlow E. (Hrsg.): *Progress in environmental remote sensing research and applications*. Rotterdam, 325–329.
- Scherer D., Fehrenbach U., Beha H.-D. & Parlow E. 1999. Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. *Atmospheric Environment* 33: 4185–4193.
- Schuhmacher P. 1992. *Messung und numerische Modellierung des Windfeldes über einer Stadt in komplexer Topographie*. Geographisches Institut, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1–123.
- Schmid H.P. 1984. *The horizontal wind field in the Zurich area*. Zürcher Geographische Schriften 16, 1–100.
- Stadt Zürich (Hrsg.) 2007. *Umweltbericht 2007*. Zürich, 1–47.

Internetlinks

① www.ostluft.ch/

② www.stadt-zuerich.ch/gud/de/index/umwelt/umweltpolitik/klimaanalyse.html