

Komplexe Einflüsse von Hochbauten auf die Stadtbelüftung – Luftschadstoffausbreitung in städtischen Wärmeinseln

J.V. Harbers^a und O. Streuber^b

^a Peutz bv, Mook (NL)

^b Peutz GmbH, Dortmund (DE)

Kurzfassung

Umfangreiche städtebauliche Planungen verursachen häufig Veränderungen des Stadtklimas. Kommt es durch die Planungen zu einer verschlechterten Durchlüftung der Stadt, resultieren hieraus Erhöhungen von Luftschadstoffkonzentrationen im Umfeld der Planungen. Der Hochbau hat hierbei die größten Auswirkungen auf das lokale Windklima. Gerade dies kann jedoch auch zu einer Verbesserung der Luftqualität führen. Insbesondere die Belastung mit Feinstaub (PM₁₀ / PM_{2,5}) und Stickstoffdioxid (NO₂) an Straßen kann signifikant reduziert werden. Ein Paradox komplex bebauter Städte.

Neben unterschiedlichen Auswirkungen der Urbanisierung auf die Stadtbelüftung können auch städtische Wärmeinseln vergrößert werden. Durch neue Baukörper stehen zusätzliche Oberflächen zur Verfügung, an denen Sonnenstrahlung absorbiert wird. Besonders in austauscharmen, sommerlichen Schönwetterperioden führt dies zu einer Aufheizung der Baukörper. All diese Aspekte sollten bei der städtebaulichen Planung im Vorfeld berücksichtigt werden.

Anhand von Beispielprojekten aus Windkanaluntersuchungen und Untersuchungen mit Ausbreitungsmodellen (CFD, MM5) werden die unterschiedlichen Auswirkungen von städtebaulichen Planungen und hier insbesondere Hochbauten auf das Stadtklima und die Lufthygiene diskutiert.

1 Einführung

Die Luftqualität in einer Stadt ist abhängig vom Luftaustausch in Städten und einer Vielzahl von lokalen Schadstoffquellen (Hausbrand, Straßenverkehr und Industrie) sowie der regionalen Hintergrundbelastung. Die regionale Hintergrundbelastung umfasst den Ferntransport von Schadstoffen bzw. aller Quellen außerhalb der Stadt.

Die Luftqualität beeinflusst in besonderem Maße die Lebensqualität in einer Stadt. Asthmatiker und Allergiker leiden besonders bei hohen Konzentrationen von Luftschadstoffen und müssen ihr Alltagsverhalten teilweise auf die Luftqualität abstimmen.

Um eine gesundheitsschädliche Belastung durch Luftschadstoffe zu verhindern, wurden für die wichtigsten Luftschadstoffe europaweit Grenzwerte festgelegt. Zu diesen Schadstoffen gehören Feinstaub (PM₁₀) und Stickstoffdioxid (NO₂). Bei Überschreitung dieser Grenzwerte müssen die Behörde Maßnahmen zur Verringerung der Schadstoffbelastung einleiten.

Die Überwachung der Luftqualität erfolgt meistens mit Immissionsmessnetzen, deren Messstationen unter anderem an viel befahrenen Straßen oder auch ländlich (Hintergrundmesswerte) liegen können. Zur Beurteilung der Luftqualität für zukünftige Jahre werden validierte Berechnungsmethoden benutzt.

In den Niederlanden gibt es sogenannte Standard-Berechnungsmethoden, speziell entwickelt für die Beurteilung der Luftqualität in unkomplizierten Situationen. Diese Berechnungsmethoden basieren meistens auf gaußschen Ausbreitungsmodellen. Für komplizierte strömungstechnische Situationen sind diese standardisierten Methoden meistens nicht ausreichend. Dann müssen numerische Strömungsmodelle (computational fluid dynamics, CFD) oder Windkanaluntersuchungen angewendet werden. In Deutschland ist der Gebrauch von CFD vorgesehen und normativ geregelt. In den Niederlanden werden jedoch viele Windkanaluntersuchungen gemacht, weil CFD in den Niederlanden nicht als validiertes Modell für Luftqualitätsberechnungen zugelassen ist.

Mit CFD oder Windkanaluntersuchungen können die Einflüsse von kleinen Hochbauprojekten (ein oder wenige neue Gebäude) auf das lokale Straßenklima (Windgeschwindigkeit, Luftqualität) sehr gut untersucht werden. Der Effekt von umfangreichen städtebaulichen Planungen auf das Stadtklima, zum Beispiel die Entwicklung eines neuen Stadtteils mit viel neuem Hochbau, kann mit einem mesoskaligen meteorologischen Modell untersucht werden.

2 Einflüsse umfangreicher Hochbauplanungen

Sehr dichte Bebauung verringert die Windgeschwindigkeit und damit die Durchlüftung leewärtiger Bereiche in einer Stadt. Die verminderte Durchlüftung kann in Städten zu einer höheren Durchschnittstemperatur und höheren Luftschadstoffkonzentration, sowie zu niedrigeren Luftfeuchtigkeiten führen. Diese Aspekte haben eine negative Auswirkung auf die Lebensqualität in Städten.

Für die Simulation von Luftströmungen im Bereich einer Stadt kann ein mesoskaliges meteorologisches Modell (zum Beispiel MM5) angewendet werden. Die Simulation der Luftströmungen auf mesoskaligem Niveau ist für ein einzelnes Hochbauprojekt nicht sinnvoll. Für umfangreiche Hochbauplanungen kann die Simulation mit einem mesoskaligen meteorologischen Modell nützliche Information für die Planung liefern.

Für die Simulation der Luftströmungen für den Bereich eines Stadtteils können mikroskalige Simulationsmodelle (zum Beispiel ENVI-met und MISKAM) verwendet werden.

2.1 Beispielprojekten

In verschiedenen Studien sind die Effekte von umfangreichen Hochbauplanungen auf die Durchlüftung der Stadt untersucht worden. Dazu ist das Stadtklima im Nullfall mit dem Stadtklima im Planfall verglichen worden. Die Unterschiede in Temperatur, Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeiten zwischen dem Nullfall und dem Planfall geben dann Hinweise auf Wärmeinseln und Veränderungen der Durchlüftung der Stadt.

2.1.1 Mesoskalige Klimamodelle

Das mesoskalige meteorologische Modell 5, kurz MM5, ist ein Computerprogramm für Modellrechnungen zur Wettervorhersage im mittleren und regionalen Bereich [6]. Das Programm ermöglicht die Simulation und Prognose atmosphärischer Zirkulation und damit eine numerische Wettervorhersage mit Auflösungen von etwa 1 bis 100 km. Es wurde an der Pennsylvania State University (PSU) sowie am National Center for Atmospheric Research (NCAR) entwickelt.

MM5 ist ein gitterbasiertes Modell mit bodenfolgenden Koordinaten. Die wesentlichen

Eigenschaften von MM5 sind die Multinesting-Fähigkeit einschließlich beweglicher Rechengitter und eine nicht-hydrostatische Dynamik, welche die Simulation von Prozessen unter 10 km Auflösung erlaubt.

Das vollständige Modellsystem besteht neben dem eigentlichen Simulationsprogramm MM5 aus einer Kette von Pre- und Postprocessor-Programmen. Das erste Modul der Preprocessor-Kette legt das Modellgebiet fest und bereitet geografische Eingangsdaten auf, also unter anderem Orografie, Vegetation und Bodentyp. Anschließend werden meteorologische Eingangsdaten (auf Druckflächen gegebene atmosphärische Strömungs-, Feuchte-, Temperatur- und Geopotenzialfelder sowie das Bodendruckfeld) aus globalen Zirkulationsmodellen durch ein weiteres Modul aufbereitet. Der meteorologische Eingangsdatensatz kann durch zusätzliche Boden- und Radiosondenbeobachtungen ergänzt werden. Ein weiteres Modul führt eine vertikale Interpolation der atmosphärischen Eingangsdaten von den Druckflächen auf die von MM5 verwendeten geländefolgenden Koordinaten durch und stellt Anfangsbedingungen sowie die für den gesamten Simulationszeitraum benötigten Randbedingungen zur Verfügung. Dies ist notwendig, da MM5 als Limited-Area-Modell nur einen begrenzten Teil der Atmosphäre betrachtet.

Modellbildung

In MM5 sind verschiedene Standardkarten mit Bodentypen und Orografie verfügbar. Die am häufigsten angewendete und detaillierteste Karte wurde vom U.S. Geological Survey entwickelt und hat eine Auflösung von 900m zu 900m. Diese Karte unterscheidet jedoch nur einen (allgemeinen) städtischen Bodentyp mit folgenden typischen Eigenschaften: Rauigkeit $z_0=0,5$ Bodenfeuchtigkeit 5% und Albedo 18%. Wenn detailliertere Daten verfügbar sind, kann für spezifische Untersuchungsgebiete diese Karte jedoch ergänzt und erweitert werden. Eine detaillierte Bodentypkarte ist für Europa bei CORINE [3] verfügbar. Diese Bodentypkarte unterscheidet in die folgenden urbanen Kategorien:

- durchgehend urbanisierte Ortschaften
- locker bebaute Ortschaften
- Industrielle- und kommerzielle Zonen (Industrie- und Gewerbegebiete)

Für das Untersuchungsgebiet sind die geografischen Eingangsdaten von MM5 (Bodentyp, Orografie, Vegetation) mit Bodentypenkarten von CORINE auf die spezifische Situation abgestimmt.

Neben dem Bodentyp kann auch die Rauigkeitslänge der urbanen Kategorien auf ein spezifisches Untersuchungsgebiet abgestimmt werden. Da aus dem geplanten Hochbau eine Erhöhung der Rauigkeit in einer Gitterzelle resultiert, wird in dieser Untersuchung zwischen der Rauigkeitslänge im Nullfall und im Planfall unterschieden. Die Rauigkeitslänge im Nullfall ist für ein großes Gebiet NW-Europas beim niederländischen Ministerium für Infrastruktur und Umwelt verfügbar [5].

Für den Planfall kann die Rauigkeitslänge in einer Gitterzelle mit Hilfe von Formel 1 berechnet werden [4]:

$$z_0 = \frac{0.5 \cdot h^x \cdot s}{A} \quad (1)$$

mit:

- z_0 : Rauigkeitslänge [m]
- h^x : Mittlere Hindernishöhe der Rauigkeitselemente [m]
- s : Gesamte Windangriffsfläche von allen Strömungshindernissen in der Gitterzelle [m²]
- A : Spezifische Oberfläche der Gitterzelle [m²]
- 0,5: Mittlerer Widerstandsbeiwert der Rauigkeitselemente

Mit Hilfe von Formel 1 kann die Erhöhung der Rauigkeitslänge aufgrund der neu geplanten Gebäude berechnet werden. Für das Untersuchungsgebiet sind die unterschiedlichen Bodentypen (Rauigkeiten) für den Nullfall und Planfall in Abbildung 1 wiedergegeben.

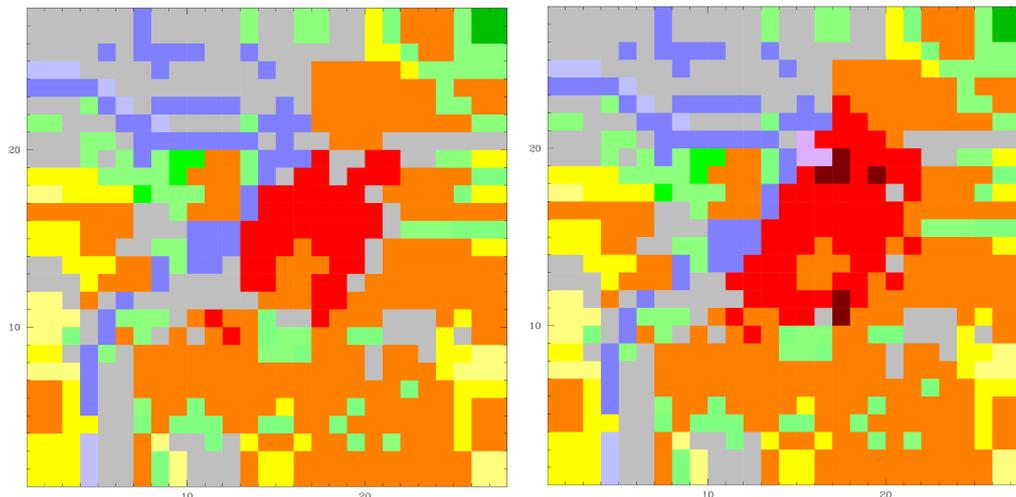


Abbildung 1: Änderung der Bodentypen durch umfangreiche Hochbauplanungen (Nullfall links ; Planfall rechts)

Wenn das Modellgebiet festgelegt ist und die geografischen Eingangsdaten auf das spezifische Untersuchungsgebiet abgestimmt sind, können die Modellsimulationen mit MM5 durchgeführt werden. In der vorliegenden Studie wurden Simulationen für einen sehr warmen Sommertag ($T_{\max} = 33^\circ\text{C}$) mit Südwestwind und einer Durchschnittswindgeschwindigkeit von ($U_{10} = 4 \text{ m/s}$) durchgeführt.

Ergebnisse der Modellsimulationen

In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der Temperatursimulationen für den Nullfall (links) und Planfall (rechts) dargestellt.

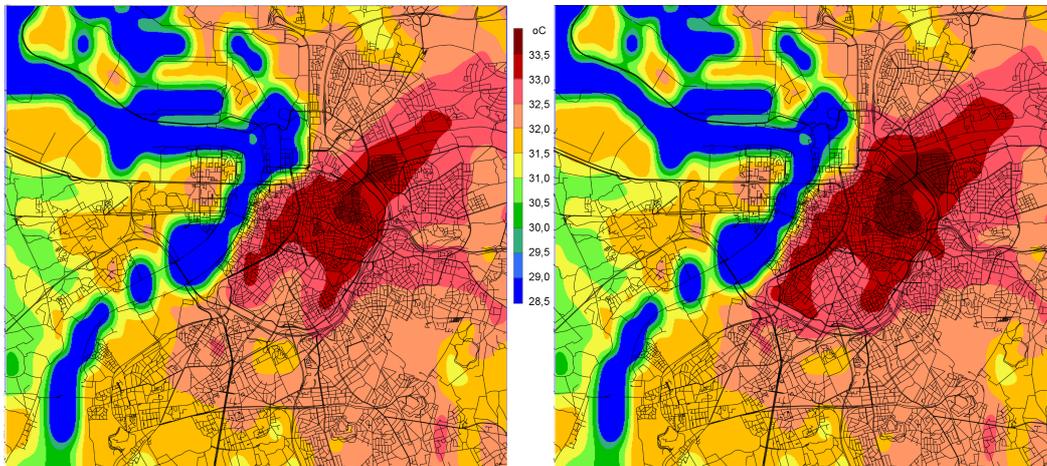


Abbildung 2: Änderung der Temperatur in einer Stadt durch umfangreiche Hochbauplanungen (Nullfall links ; Planfall rechts)

In Abbildung 2 wird der Effekt einer städtischen Wärmeinsel sichtbar. Durch die starke Aufwärmung tagsüber und die eingeschränkte Abkühlung nachts sind die Städte im Vergleich zum Umland deutlich wärmer. Die bebauten Gebiete heizen sich durch Sonneneinstrahlung stärker auf. Steine heizen nehmen schneller mehr Wärme auf und sind weiterhin ein guter Wärmespeicher und geben daher die gespeicherte Wärme nachts nur langsam ab. Aus Abbildung 2 folgt zudem ein geringer Temperaturanstieg in der Stadt aufgrund der Hochbauplanungen und hieraus resultierend eine Verstärkung der städtischen Wärmeinsel. Dies hat eine negative Auswirkung auf die Lebensqualität in Städten.

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Windgeschwindigkeitssimulationen für den Nullfall (links) und Planfall (rechts) dargestellt.

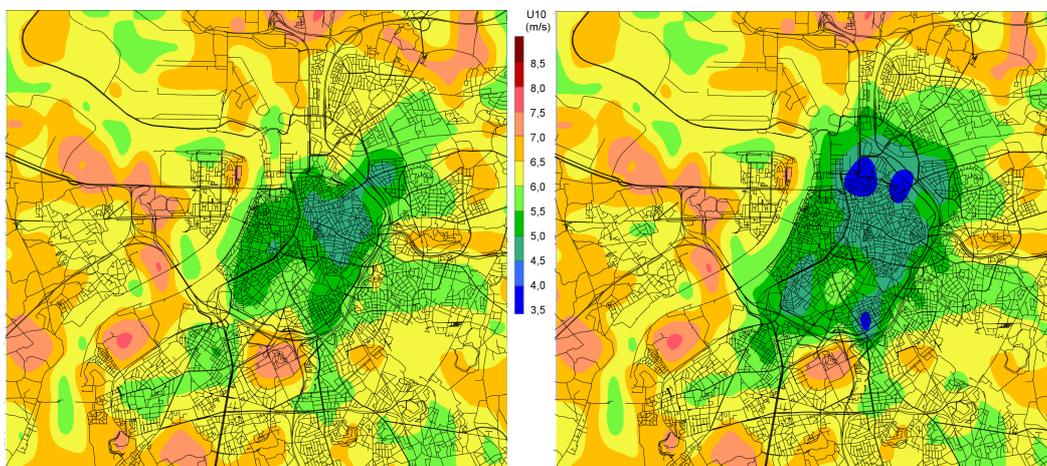


Abbildung 3: Änderung der Windgeschwindigkeit in einer Stadt durch umfangreiche Hochbauplanungen (Nullfall links ; Planfall rechts)

Die Rauigkeit der Oberfläche ist in bebauten Gebieten größer als in unbebauten. Dadurch ist die Windgeschwindigkeit in Städten niedriger als in freiem Gelände. Aus Abbildung 3 folgt außerdem eine Abnahme der Windgeschwindigkeiten in der Stadt aufgrund der Hochbauplanungen. Die verschlechterten Durchlüftung der Stadt resultiert in Erhöhungen von Luftschadstoffkonzentrationen im Umfeld. In Stadtteilen mit einer im Nullfall schlechten Luftqualität kann diese Erhöhung von Luftschadstoffkonzentrationen eine Überschreitung des Grenzwertes im Planfall verursachen und hat deshalb ebenfalls eine negative Auswirkung auf die Lebensqualität in Städten.

2.1.2 Mikroskalige Klimamodelle

MISKAM (mikroskaliges Klima- und Ausbreitungsmodell) wird an der Universität Mainz entwickelt und entspricht dem aktuellen Wissensstand der mikroskaligen Strömungs- und Ausbreitungssimulation [2]. Durch Gebäude blockierte Zellen werden als Strömungshindernisse undurchlässig abgebildet, sodass auch der Einfluss von Gebäuden berücksichtigt werden kann. Durch die Wahl des äußeren Rechengebietes mit einer deutlichen größeren Abmessung als das innere Rechengebiet wird die Unabhängigkeit der Modellergebnisse von der Gebietsgröße erreicht.

Mit MISKAM können z.B: die Auswirkungen eines neuen Hochhauses auf den Windkomfort ermittelt werden. In Abbildung 4 liegt in den dunkelblauen Bereichen nur ein mäßiger bis schlechter Windkomfort vor.

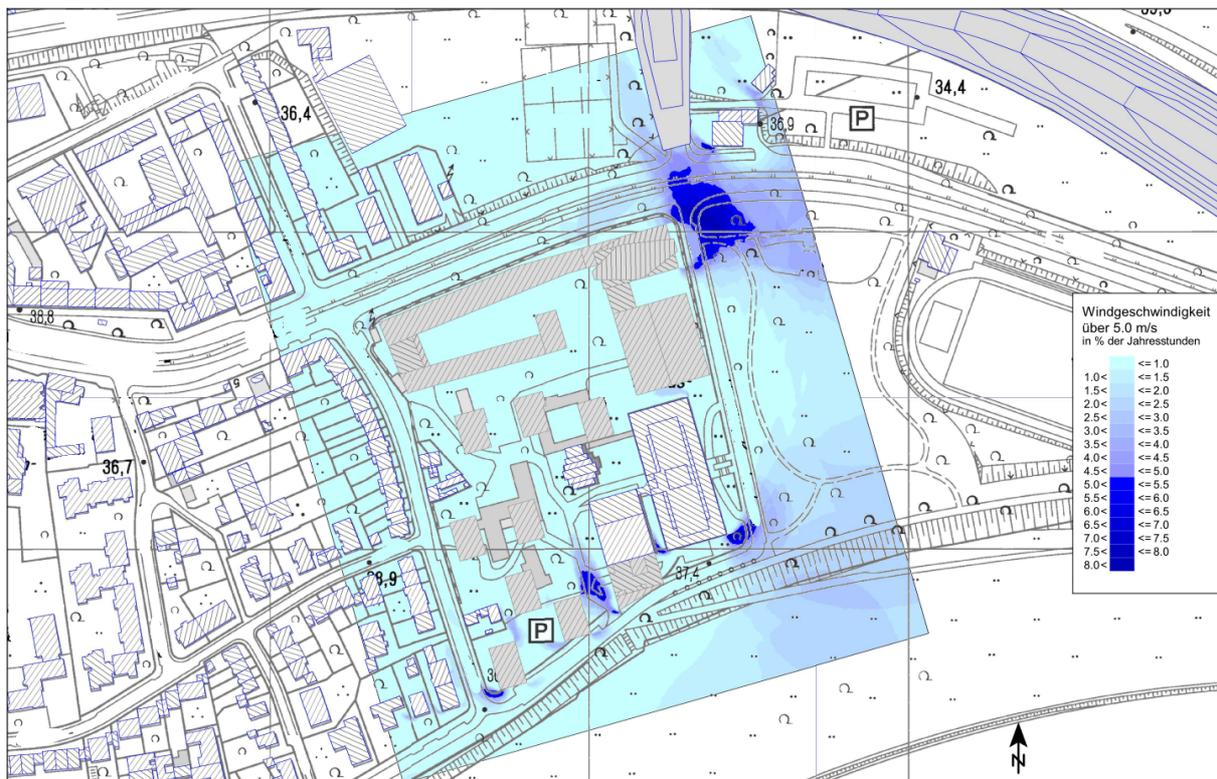


Abbildung 4: Windgeschwindigkeitssimulation mit MISKAM

ENVI-met ist ein dreidimensionales Klimamodell welches die Wechselwirkungen zwischen Oberflächenbedeckung, Vegetation und der Atmosphäre in einem definierten Zeitrahmen unter Berücksichtigung der Grundgesetze der Strömungsmechanik prognostiziert [1].

In Abbildung 5 ist das Ergebnis einer Temperaturberechnung mit ENVI-met mit und ohne Bebauung einer aktuell landwirtschaftlich genutzter Fläche mit einer industriellen Nutzung für eine Sommernacht dargestellt.

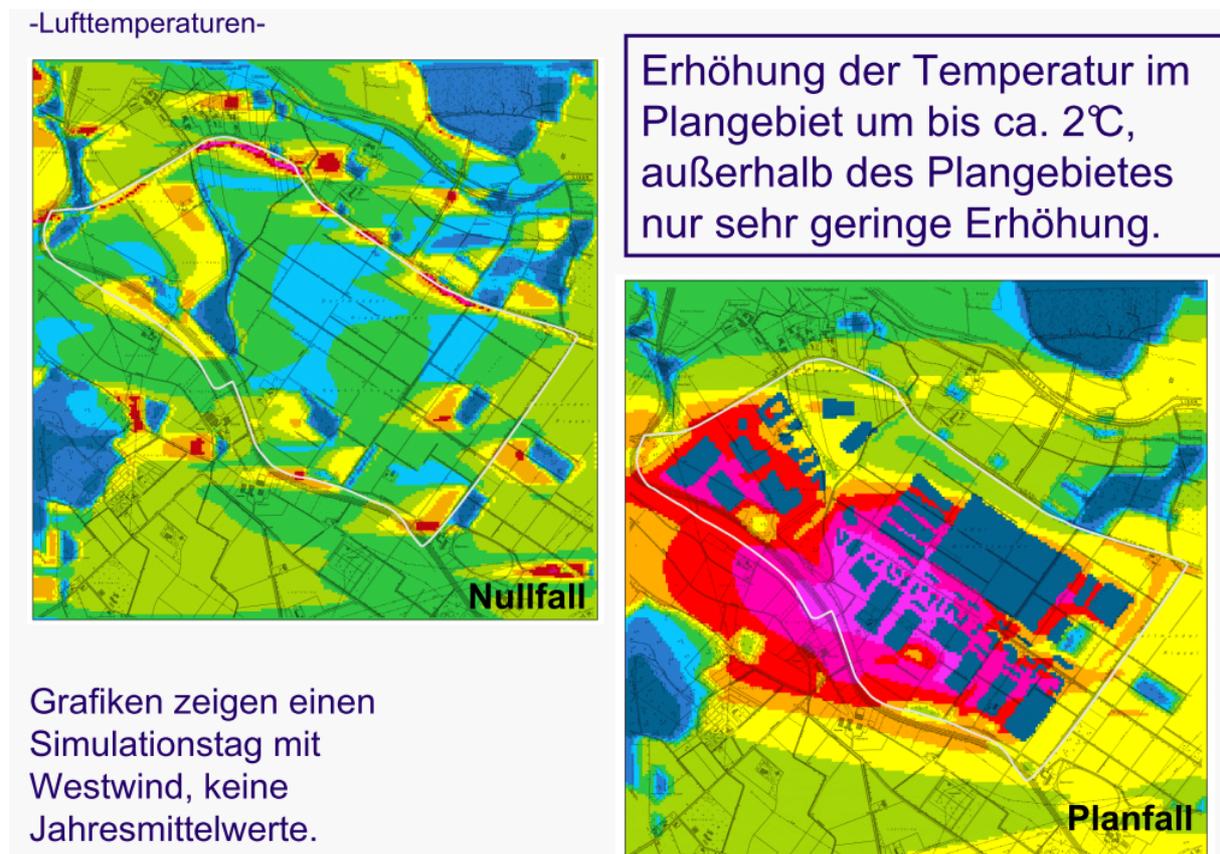


Abbildung 5: Änderung der Temperatur in einem Plangebiet durch neue Bebauung

3 Einflüsse einzelner Hochbauten

Einzelne Hochbauplanungen haben in der Regel keinen Effekt auf das gesamte Stadtklima, aber doch auf das lokale Straßenklima. Der Einfluss auf die Schadstoffausbreitung umfasst den Verkehrseinfluss (zusätzlicher Verkehr von und in das Plangebiet) und den Gebäudeeinfluss (Änderungen von Luftströmungen).

Bei städtebaulichen Planungen hoher Gebäude sind Windkanaluntersuchungen und numerische Simulationsmodelle (CFD) ein wichtiges Instrument zur Bewertung der bodennahen Windverhältnisse und der Analyse der Schadstoffkonzentrationen an Straßen und in der Nähe von Tunnelmündern oder Parkhäusern.

3.1 Windkanal

Mit einer Windkanaluntersuchung können die Auswirkungen einer Hochbauplanung auf die lokale Schadstoffausbreitung untersucht werden. Für das Untersuchungsgebiet wird ein Modell hergestellt, meistens im Maßstab 1:200 bis 1:400.

In Abbildung 6 ist ein Windkanalmodell für eine Untersuchung der Schadstoffausbreitung in einem innerstädtischen Gebiet dargestellt.



Abbildung 6: Windkanalmodell für eine Untersuchung der Schadstoffausbreitung in einem innerstädtischen Gebiet

Emissionen des Verkehrs werden mit einer Linienquelle simuliert. Durch Auslassöffnungen in den Linienquellen strömt ein inertes Tracergas mit einer bekannten Konzentration und einem bekannten Volumenstrom. Ein inertes Tracergas ist ein Gas, welches nicht mit einem anderen Gasen in der Luft und anderen Stoffen in der Umgebung reagiert und in der normalen Umgebungsluft nicht vorkommt.

Durch die Windströmungen in Windkanal erfolgt daher lediglich eine Verdünnung des Tracergases auf dem Weg von den Auslassöffnungen zu den Ansaugöffnungen von Messgeräten an den Immissionsorten. An den Immissionsorten wird die dann hier noch vorhandene Konzentration des Tracergases in der Luft gemessen und ins Verhältnis mit der Ausgangskonzentration gesetzt.

Hieraus ergibt sich ein Konzentrationskoeffizient (K) für die jeweilige Anströmrichtung (R) und Windgeschwindigkeit. In die Berechnung des Konzentrationskoeffizienten (K) gehen des weiteren die der aktuellen Messsituation entsprechende Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 10 Metern unter Freifeldbedingungen (U_{10}) sowie der Modellmaßstab (S) des Windkanalmodells ein:

$$K = \frac{C \cdot U_{10} \cdot S^2}{Q} \quad (2)$$

mit:

- K*: Konzentrationskoeffizient in [$\mu\text{m}/\text{m}^3$]
Q: Emissionsstärke der Quelle in [m^3/s]
C: Immissionskonzentration am jeweiligen Messpunkt in [ppm]
U₁₀: Windgeschwindigkeit in 10 Metern Höhe unter Freifeldbedingungen in [m/s]
S: Maßstab des Windkanalmodells (dimensionslos)

Windkanalmessungen werden durchgehend für 24 Windrichtungen im 15° Schritten durchgeführt. Im nächsten Schritt erfolgt die Berechnung der Immissionskonzentration (C_{Gesamt}) an den Immissionsorten für die in der Realität vorhanden Emission der in Modell betrachteten Quelle:

$$C_{WT} = \sum_{i=1}^N \frac{Q_{\text{Quelle}}}{A \cdot U_{10} + \Phi_v} \cdot 10^6 \quad (3)$$

$$C_{\text{Gesamt}} = C_H + C_{WT} \quad (4)$$

mit:

- C_{Gesamt}*: Gesamtkonzentration am jeweiligen Immissionsort in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_H: vorhandene Hintergrundbelastung in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_{WT}: Konzentration am jeweiligen Immissionsort für die reale Quellstärke in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
A: $10^6 \cdot K$ aus Formel [2]
K: Konzentrationskoeffizient in [$\mu\text{m}/\text{m}^3$]
Q_{Quelle}: Emissionsstärke der Quelle in [g/s]
U₁₀: Windgeschwindigkeit in 10 Metern Höhe unter Freifeldbedingungen in [m/s]
Φ_v: Initiale vorverdünnung in [m^3/s]

Mithilfe der Formeln 3 und 4 und der für das Untersuchungsgebiet vorliegenden Windstatistik kann dann für jeden Immissionsort und Luftschadstoff der jeweilige Jahresmittelwert berechnet werden.

Für die Berechnung der Luftschadstoffkonzentration aufgrund von Emission des Kraftfahrzeugverkehrs sind deshalb verschiedene Daten notwendig: zum Beispiel Verkehrsdaten für den Nullfall und Planfall (weil das Bauvorhaben zusätzlichen Verkehr erzeugen wird), Abgas-Emissionsfaktoren pro Fahrzeugkategorie (Lkw, Pkw), meteorologische Daten und die Hintergrundbelastung.

3.2 Beispielprojekte

In verschiedenen Studien sind die Auswirkungen von Hochbauplanungen auf die Schadstoffausbreitung und die Konzentrationen von Feinstaub und Stickstoffdioxid an Straßen untersucht worden.

In Abbildung 7 sind die Stickstoffdioxid Konzentrationen im Nullfall (links) und Planfall (rechts) für eine Hochbauplanung in der Nähe einer Autobahn dargestellt, basiert auf Windkanalmessungen.

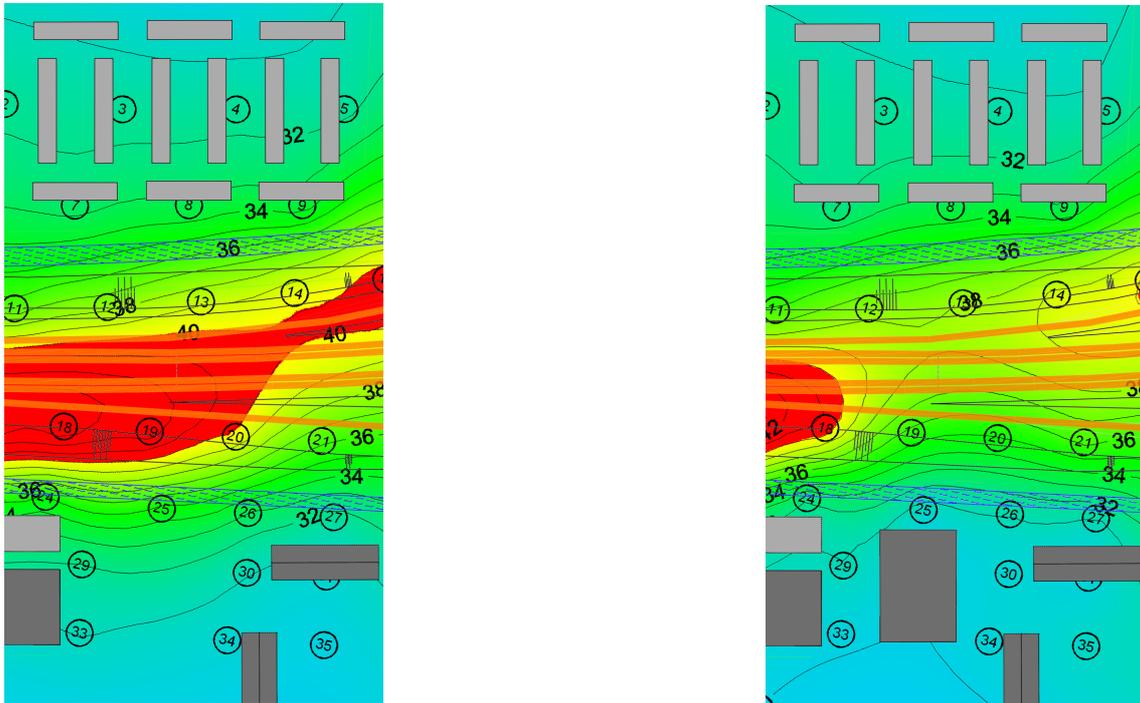


Abbildung 7: Änderung der Luftschadstoffkonzentration durch neue Bebauung (Nullfall links ; Planfall rechts)

Hieraus folgt das sich im Planfall die Luftqualität entlang der Autobahn und im Stadtteil durch den geplanten Hochbau deutlich verbessert. Dies ist das Resultat von turbulenten Strömungen leewärtig des geplanten Hochhauses.

Auch für einen Bebauungsplan in einer Innenstadt neben einer Straße mit Tunnelmündern ist mit einer Windkanaluntersuchung die Luftqualität im Nullfall und Planfall untersucht worden. Die Luftqualität in der Umgebung von Tunnelmündern ist meistens sehr schlecht aufgrund der konzentrierten Emission des Verkehrs. In dieser Studie wurden die Auswirkungen des Bebauungsplanes auf die Luftqualität im Windkanal untersucht.

In Abbildung 8 ist die Differenz der Luftqualität wiedergegeben. Orte mit einer Verschlechterung der Luftqualität sind in Rot wiedergegeben. Orte mit einer Verbesserung der Luftqualität sind Grün wiedergegeben. Die Verschlechterung der Luftqualität an der Fassade des Neubaus kann durch die Blockierung von Windströmungen erklärt werden. Die Verbesserung südlich der Straße ergibt sich durch neu entstehende turbulente Windströmungen aufgrund der Kombination des Neubaus mit den bestehenden Hochbauten.

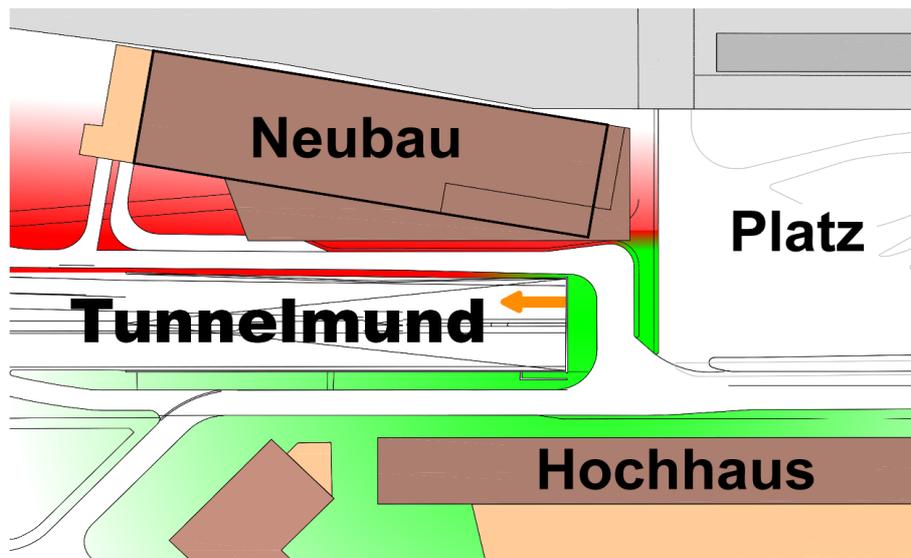


Abbildung 8: Auswirkungen einer Hochbauplanung auf die Luftschadstoffkonzentrationen im Bereich eines Tunnelmundes

4 Konklusion

Die vorgestellten Beispiele zeigen, dass Hochbauprojekte positive sowie negative Auswirkungen auf das Stadtklima und die Luftschadstoffsituation haben können.

Diese Auswirkungen können bereits im Planungsprozess mit Windkanalmessungen und verschiedenen numerischen Simulationen für lokale Bereiche in unmittelbarer Nähe der Planungen sowie großräumig für ganze Städte untersucht und beurteilt werden.

Negative Auswirkungen können so frühzeitig ermittelt und im weiteren Planungsprozess gemindert werden. Positive Auswirkungen können im Rahmen der Planung, wenn möglich, weiter verstärkt werden.

Literatur

- [1] M. Bruse. ENVI-met. Lehrstuhl für Geoinformatik, Environmental Modelling Group (EMG). Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- [2] J. Eichhorn. MISKAM. Arbeitsgruppe Stadtklima, Institut für Physik der Atmosphäre. Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- [3] European Environmental Agency. Corine Land Cover map for Europe (<http://www.eea.europa.eu>).
- [4] H. Lettau. Note on Aerodynamic Roughness-Parameter Estimation on the Basis of Roughness-Element Description. In: Journal of Applied Meteorology 8 (1969). S. 828-832.
- [5] Niederländische Ministerium für Infrastruktur und Umwelt. Rauigkeitskarte für Luftqualitätsberechnungen.
- [6] Pennsylvania State University (PSU) und the National Center of Atmospheric Research (NCAR). Mesoscale Meteorology Model 5 (MM5). (<http://www.mmm.ucar.edu/mm5>).