

# **EXPERIMENTELLE UND NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR AUSBREITUNG VON AUTOABGASEN IN STÄDTISCHEN STRASSENSCHLUCHTEN MIT BAUMPFLANZUNGEN**

Dipl.-Ing. C. Gromke, Prof. Dr.-Ing. B. Ruck  
Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik  
Institut für Hydromechanik  
Universität Karlsruhe  
Kaiserstraße 12  
D-76128 Karlsruhe

**ABSTRACT.** Flow- and concentration fields in street canyons with avenue-like tree plantings have been investigated. Small scale wind tunnel studies as well as numerical simulations employing a  $k-\epsilon$  turbulence closure scheme have been performed. For both, the experimental investigations and the numerical simulations, reduced flow velocities and increased pollutant concentrations have been found in street canyons with avenue-like tree plantings when compared to the tree-free street canyon. A comparison of experimental and numerical results shows higher pollutant concentrations and lower flow velocities in the case of the numerical simulations.

**ZUSAMMENFASSUNG.** Strömungs- und Konzentrationsfelder in Straßenschluchten mit alleinartigen Baumpflanzungen wurden untersucht. Windkanaluntersuchungen am Modell einer idealisierten Straßenschlucht und numerische Simulationen mit einem  $k-\epsilon$  Turbulenzschließungsansatz wurden durchgeführt. Sowohl in den experimentellen Untersuchungen als auch in den numerischen Simulationen wurden in Straßenräumen mit Baumpflanzungen geringere Strömungsgeschwindigkeiten und höhere Schadstoffbelastungen im Vergleich zur baumfreien Straßenschlucht gefunden. Ein Vergleich beider Methoden zeigt höhere Schadstoffbelastungen und geringere Strömungsgeschwindigkeiten im Falle der numerischen Simulationen.

## **1 Einleitung**

Die Freisetzung von Abgasen durch den Straßenverkehr stellt in Innenstadtbereichen in der Regel die größte Emissionsquelle für Luftschadstoffe dar. Hohe Schadstoffkonzentrationen treten insbesondere in engen städtischen Straßenschluchten mit starkem Verkehrsaufkommen auf. In Bezug auf die gesundheitliche Belastung der Anwohner ist somit ein ausreichender Luftaustausch bzw. eine effiziente Verdünnung der Schadstoffe im Straßenraum von enormer Bedeutung. Für den Luftaustausch und die Verdünnung der Verkehrsemissionen spielt neben der verkehrsinduzierten Turbulenz durch den fahrenden Verkehr vor allem die natürliche Lüftung, angetrieben durch den atmosphärischen Wind, eine große Rolle. Während die Strömungs- und Konzentrationsverhältnisse in leeren Straßenschluchten aus zahlreichen, vergangenen Studien bereits bekannt sind (siehe z.B. /1,2,3,4/) wurden zur Klärung der Situation in alleinartig baumbepflanzten Straßenzügen bisher noch keine systematischen Untersuchungen unternommen.

Um die Konzentrations- und Strömungsverhältnisse in Straßenschluchten mit Baumbesatz zu klären, wurden experimentelle Untersuchungen im Windkanal und numerische Simulationen durchgeführt. Für die im Hinblick auf die Schadstoffbelastung kritischste Windsituation, einer atmosphärischen Anströmung senkrecht zur Straßenträngsachse, wurden die Auswirkungen von alleinartigen Pflanzkonfigurationen auf die Ausbreitung von bodennah freigesetzten Verkehrsemissionen untersucht. Die experimentellen und numerischen Ergebnisse für einrei-

hig mittig angeordnete Baumpflanzungen mit verschiedenen ausgebildeten Kronenformen und Kronenporositäten werden vorgestellt und in Bezug zum Referenzfall der baumfreien Straßenschlucht gesetzt. Weitere Untersuchungsergebnisse zu Strömungs- und Schadstoffausbreitungsverhältnissen in Straßenschluchten bei Variation anderer Baumcharakteristika wie Kronendurchmesser, Kronenhöhe und Baumabstand sind in Gromke und Ruck /5,6,7,8,9,10/ zu finden.

Bild 1 zeigt die für das Verständnis von Ausbreitungsvorgängen relevanten Strömungsverhältnisse in einer endlich langen, baumfreien Straßenschlucht mit einem Gebäudehöhen zu Straßenbreitenverhältnis ( $H/B$ ) von Eins bei senkrechter Anströmung. Zwei dominierende Wirbelstrukturen sind zu erkennen. Es sind dies der Canyon Vortex im mittleren Bereich und die Corner Eddies an den Enden der Straßenschlucht. In den äußeren Straßenbereichen sind aufgrund der Superposition beider Wirbelstrukturen ein im Vergleich zum inneren Abschnitt verstärkter Luftaustausch und geringere Schadstoffbelastungen vorzufinden. Gemäß Hunter et al. /11/ ist nur im inneren Bereich langer Straßenschluchten (Straßenlängen zu Straßenbreitenverhältnis  $L/B > 7$ ) ein allein vom Canyon Vortex dominiertes Strömungsfeld vorhanden.

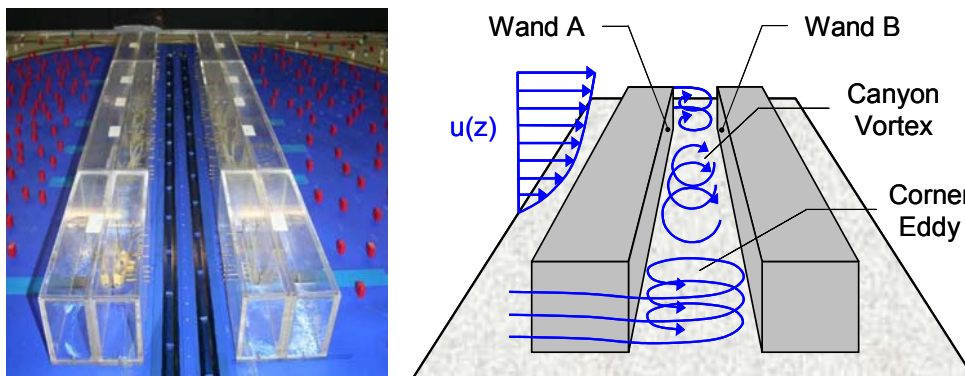


Bild 1: Windkanalmodell und Strömungsverhältnisse in baumfreier Straße

## 2 Methoden

### 2.1 Windkanal, Windkanalmodell und Messtechnik

Die experimentellen Untersuchungen wurden an einem Modell einer isoliert stehenden, idealisierten Straßenschlucht (Maßstab 1:150) in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal durchgeführt (Bild 2). Die geometrischen Abmessungen der Straßenschlucht sind durch ein Straßenlängen- zu Breitenverhältnis von  $L/B = 10/1$ , ein Verhältnis von Gebäudehöhe- zu Breite von  $H/B = 1/1$  und ein Straßenbreiten zu Gebäudehöhenverhältnis von ebenfalls  $B/H = 1/1$  gegeben. Das Windkanalmodell war senkrecht zu seiner Straßenlängsachse einer für Stadtlandschaften typischen Anströmung mit Profilexponent  $\alpha = 0.30$  gemäß dem Potenzgesetz ausgesetzt (Bild 3). Der Versperrungsgrad des Windkanals betrug 7.2 % und der Druckgradient in Strömungshaupttrichtung wurde durch Deckenadjustierung ausgeglichen. Weitere Daten zum Windkanal und dem Anströmungsprofil sind in Gromke und Ruck /12/ enthalten. Das Modell besteht aus zwei parallel angeordneten Häuserzeilen, in deren Mitte Modellbäume angeordnet sind. Die Freisetzung der Autoabgase wird durch eine im Modellboden entlang der Straßenlängsachse angebrachte Linienquelle realisiert, wobei Schwefelhexafluorid ( $SF_6$ ) als Spurengas zum Einsatz kommt. An den beiden innenseitigen Häuserwänden befinden sich Absaugstellen zur Bestimmung der wandnahen Spurengaskonzentrationen.

Am Windkanalmodell wurden Strömungsgeschwindigkeits- und Konzentrationsmessungen vorgenommen. Für die Geschwindigkeitsmessungen wurde ein Rückwärtsstreuung detektierendes 2-D Laser-Doppler-Anemometer (LDA) eingesetzt. Das System besteht aus einem

Argon-Ionen Laser (4 Watt) und nachgeschalteten TSI Komponenten zur Signalaufnahme- und Verarbeitung. Die in diesem Artikel vorgestellten LDA-Messungen der Geschwindigkeitsfelder beschränken sich auf den inneren, austauscharmen Straßenschluchtabschnitt. In einer Ebene senkrecht zur Straßenlängsachse bei  $y/H = 0.5$  wurden die vertikalen Geschwindigkeitskomponenten mit einer Abtastfrequenz von 50 Hz gemessen. Zur Messung der Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) Spurengaskonzentrationen wurde ein Elektroneneinfangdetektor (ECD), Typ Meltron LH 108, eingesetzt. Die Elektroneneinfangdetektion erlaubt die Messung zeitgemittelter Konzentrationen elektronenaffiner Spurengase.

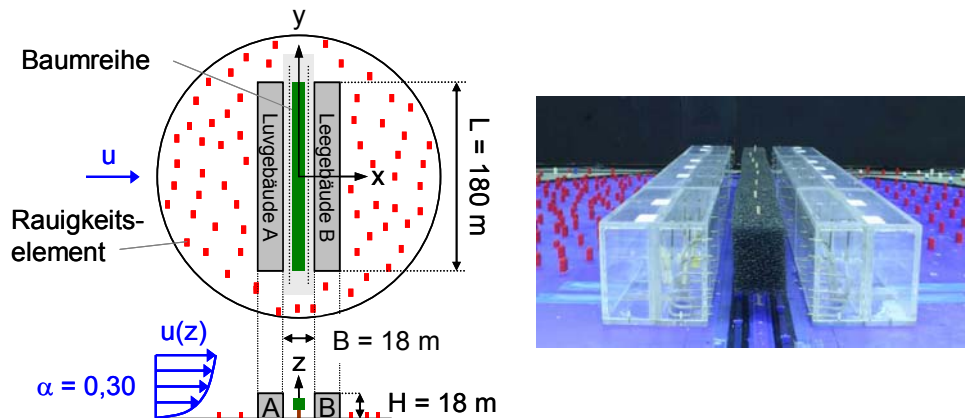


Bild 2: Straßenschluchtmodell (Maßstab 1:150)

## 2.2 CFD-Software und numerisches Modell

Der kommerzielle CFD-Code FLOVENT wurde für die numerischen Berechnungen genutzt. Bei diesem Programmpaket steht ein LVEL  $k-\epsilon$  Turbulenzmodell zur Schließung der Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) Gleichungen zur Verfügung. Die turbulente Wirbelviskosität (turbulente Impulsdiffusivität)  $\nu_t$  wird in wandnahen Bereichen über eine Gewichtung der turbulenten Viskosität  $\nu_{t,k-\epsilon}$ , basierend auf dem klassischen  $k-\epsilon$  Ansatz, und einer, auf einem algebraischen Ansatz basierenden, turbulenten Viskosität  $\nu_{t,LVEL}$  berechnet. Bei Letzterem wird die turbulente Viskosität aus einer charakteristischen Länge  $L$  und einer charakteristischen Geschwindigkeit  $VEL$  bestimmt. Die charakteristische Länge  $L$  ist hierbei ein Maß für den Wandabstand, die charakteristische Geschwindigkeit  $VEL$  ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit. Standardwandfunktionen für glatte bzw. raue Wände werden zusätzlich zur Berechnung der Strömung in wandangrenzenden Zellen herangezogen. Zur Berechnung der Ausbreitung nichtreaktiver skalarer Beimengungen wird die Reynolds-gemittelte Advektions-Diffusionsgleichung gelöst. Die Korrelationen der turbulenten Fluktuationen werden durch Gradientenansätze substituiert. Hierbei wird der turbulente Stoffdiffusionskoeffizient gleich dem turbulenten Impulsdiffusionskoeffizienten  $\nu_t$  angenommen (turbulente Schmidt-Zahl  $Sc_t = 1$ ). Die Diskretisierung der advektiven Terme geschieht durch eine Aufwinddifferenz erster Ordnung, die der diffusiven Terme durch eine Zentralfdifferenz zweiter Ordnung. Aus der Diskretisierung der Differenzialgleichungen resultierende algebraische Differenzengleichungen werden nach der Finite-Volumen-Methode auf einem strukturierten, versetzten Gitter gelöst (siehe /13/).

Zunächst wurde in der numerischen Modellierung das in der leeren Messsektion im atmosphärischen Grenzschichtwindkanal vorliegende Anströmungsprofil nachgebildet. Bild 3 zeigt die Vertikalprofile der mittleren Windgeschwindigkeit  $u(z)$  und der Turbulenzintensität  $I_{xyz}(z)$  im Ursprung des Koordinatensystems. Die Profile aus den numerischen Berechnungen weisen eine gute Übereinstimmung mit den Windkanalprofilen auf.

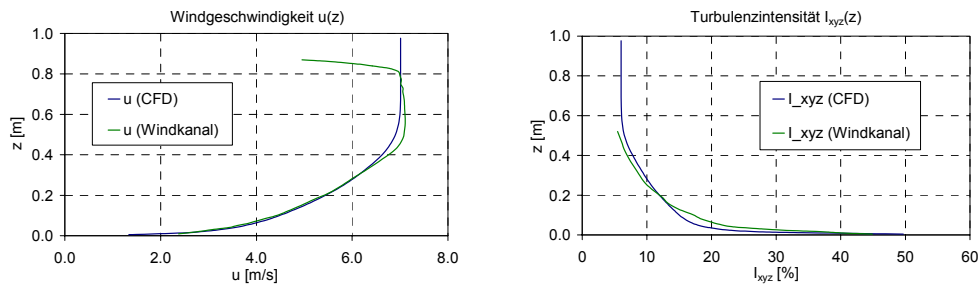


Bild 3: Profile der mittleren Windgeschwindigkeit  $u(z)$  und Turbulenzintensität  $I_{xyz}(z)$

Ein bekannter Schwachpunkt des klassischen  $k-\varepsilon$  Turbulenzmodells wird unter dem Begriff Staupunktanomalie zusammengefasst. Ein Charakteristikum dieser Anomalie ist die Überproduktion von turbulenter kinetischer Energie TKE in Staupunktbereichen. Bei der Überströmung von Hinderniskanten bewirkt diese TKE-Überproduktion einen verstärkten Impulsaustausch zwischen wandfernen und wandnahen Strömungsgebieten. Der verstärkte Eintrag von Impuls bzw. kinetischer Energie aus wandfernen in wandnahe Bereiche wirkt einem Ablösen der Strömung an luvseitigen Hinderniskanten entgegen. Ablöseblasen und Rezirkulationsgebiete an strömungsparallelen Wänden werden beim klassischen  $k-\varepsilon$  Turbulenzmodell nicht, oder allenfalls in wesentlich zu geringen Ausmaßen wiedergegeben.

Frühere CFD-Studien zeigten, dass das Vorhandensein eines Ablösegebietes an der luvseitigen Gebäudekante entscheidend für den Luftaustausch zwischen Straßenschluchtraum und Überdachbereich ist (Gromke und Ruck /9/). Im Falle einer Strömungsablösung wird die atmosphärische Überdachströmung vom Gebäude abgedrängt. Der obere Teil des in der Straßenschlucht rotierenden Canyon Vortex's (Bild 1) ragt leicht über das Dachniveau hinaus in die verlangsamte Strömung unmittelbar über der Gebäudeoberkante. Tritt hingegen keine Ablösung auf, wird die unmittelbare Überdachströmung weniger stark verlangsamt und die rezirkulierenden Luftmassen im Canyon Vortex werden nicht oder nur sehr schlecht ausgetauscht. In diesem Fall sind höhere Schadstoffkonzentrationen im Straßenraum die Folge.

Um in den numerischen Simulationen der Straßenschlucht eine Strömungsablösung an der luvseitigen Häuserkante des windzugewandten Gebäudes zu reproduzieren, war eine Diskretisierung im Dachbereich durch ein stark verfeinertes Gitter notwendig. Bezogen auf die Gebäudehöhe  $H$  beträgt die Kantenlänge der Zellen 0.2 % im vorderen und 0.4 % im anschließenden Dachbereich. Auch wenn die hiermit in den numerischen Berechnungen erzeugte Ablöseerscheinung in ihren räumlichen Ausmaßen wesentlich kleiner ausfällt als die am Windkanalmodell beobachtete, so ist mit ihr dennoch ein entscheidender Einfluss auf die maximale Schadstoffbelastung- und Verteilung im Straßenraum verknüpft. Insgesamt wurde das numerische Modell durch 1.2 Mio. Zellen diskretisiert. Detailliertere Ausführungen über das zugrunde liegende numerische Gitter und ein Vergleich der numerisch reproduzierten mit der experimentell beobachteten luvseitigen Strömungsablösung finden sich bei Gromke und Ruck /9/.

### 3 Ergebnisse

Im Folgenden werden zeitgemittelte Ergebnisse aus experimentellen Messungen im Windkanal denen aus numerischen Simulationen gegenübergestellt. Im Anschluss daran werden Ergebnisse für Straßenschluchten mit einreihig mittig angeordneten Baumpflanzungen besprochen. Für die Untersuchungen wurden Konfigurationen mit hoher Pflanzdichte und ineinander greifenden Kronen benachbarter Bäume modelliert. Es wurde die Kronenquerschnittsform sowie die Kronenporosität variiert.

Die im Folgenden abgebildeten Konturbilder der wandnahen Konzentrationen zeigen dimensionslose Konzentrationswerte  $c^+$ . Diese wurden wie bei Linienquellen üblich gemäß der Formel

$$c^+ = \frac{c_{\text{gem}} u_{\text{ref}} L_{\text{ref}}}{Q_T/l} \quad (1)$$

dimensionslos gemacht. Hierbei sind  $c_{\text{gem}}$  die gemessene Konzentration,  $u_{\text{ref}}$  die Windgeschwindigkeit der freien Anströmung in Dachhöhe  $H$ ,  $L_{\text{ref}}$  die Dachhöhe  $H$  und  $Q_T/l$  die Emissionsstärke der Linienquelle. Weiterhin sind Konturbilder wandnaher Konzentrationen, dargestellt als relative Abweichungen in Bezug zu einem spezifischen Referenzfall, zu finden. Bezüglich des Strömungsfeldes wird in den Konturbildern die normierte Vertikalkomponente der Geschwindigkeit  $w^+ = w/u_{\text{ref}}$  gezeigt. Es werden jeweils zeitlich gemittelte Geschwindigkeitsfelder in einer vertikalen Ebene nahe der Straßenschluchtmittle bei  $y/H = 0.5$  dargestellt. Als Referenzgröße  $u_{\text{ref}}$  wurde die Windgeschwindigkeit  $u(H)$  in Gebäudehöhe  $H$  gewählt. Der unmittelbar über die Gebäudedächer strömende Wind treibt den Canyon Vortex zur Rotation an und stellt somit eine physikalisch sinnvolle Referenzgröße dar.

### 3.1 Baumfreie Straßenschlucht

Die gemäß Formel (1) normierten, zeitlich gemittelten Spurengaskonzentrationen an der leeseitigen Wand A und an der luvseitigen Wand B für den Basisfall der baumfreien Straßenschlucht sind in Bild 4 dargestellt. Im linken Teil von Bild 4 sind die Ergebnisse der Windkanalmessung, im rechten Teil die der numerischen Simulation abgebildet.

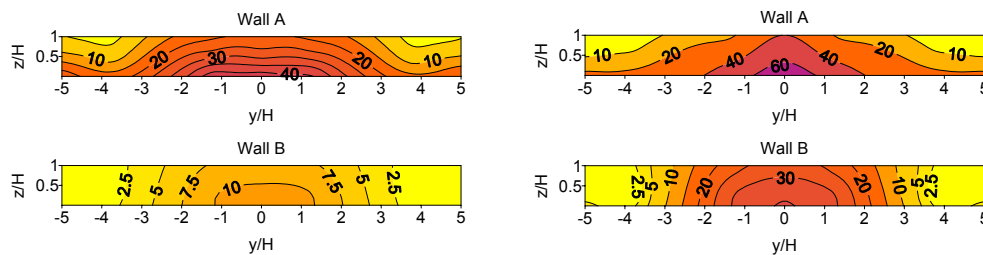


Bild 4: Normierte Konzentrationen  $c^+$  [-] an Wänden A und B, experimentelle (links) und numerische Ergebnisse (rechts)

Deutlich erkennbar ist, dass die Schadstoffbelastung an der leeseitigen Wand A (Leewand der stromauf gelegenen Gebäudezeile) höher ist als an der luvseitigen Wand B (Luvwand der stromabgelegenen Gebäudezeile). Diese Verteilung ist auf das Wirken des Canyon Vortex's zurückzuführen. Die unbelastete Luft der freien Anströmung überstreicht das Dach des Gebäudes A und wird über dem Straßenraum teilweise in den Canyon Vortex eingemischt (Bild 1). Vor Wand B erfährt ein im Canyon Vortex mitbewegtes Luftvolumen eine Abwärtsbewegung, bevor es bei der Rückströmung unmittelbar über der Straße dort freigesetzte Autoabgase aufammelt und weiter zu Wand A transportiert wird. Dieses schadstoffbelastete Luftvolumen erfährt vor Wand A eine Aufwärtsbewegung und vermischt sich im Dachniveau teilweise mit der Frischluft der Anströmung. Die Konzentrationsbelastung an Wand B ist also allein auf die im Canyon Vortex verbleibenden Schadstoffe zurückzuführen. Der an beiden Wänden beobachtbare Konzentrationsabfall an den Straßenschluchtenden ist mit dem Agieren der Corner Eddies zu erklären. Durch sie wird zusätzlich Frischluft in den Straßenraum eingetragen. Die Form der experimentell ermittelten Konzentrationsverteilung an Wand A lässt einen Schluss auf die laterale Eindringtiefe bzw. den Wirkungsbereich der Corner Eddies zu.

Im zentralen Bereich der Straßenschlucht ( $-1 < y/H < 1$ ) weist die Konzentrationsverteilung einen ausgeprägten vertikalen Gradienten auf. Diese Erscheinung lässt sich damit erklären, dass durch die seitlich eindringenden Corner Eddies keine Schadstoffe mehr zur Wand A herantransportiert werden. Die numerischen Ergebnisse hingegen lassen eine solche Verteilung der Schadstoffbelastung nicht erkennen. Hier scheint der Wirkungsbereich der seitlich eindringenden Corner Eddies größer auszufallen.

Die numerischen Simulationen resultieren in höheren Schadstoffbelastungen als die am Windkanalmodell gemessenen. Für Wand A sind die berechneten Konzentrationen im Mittel um 33 % höher, für Wand B um 180 %. Typische Charakteristika wie abnehmende Schadstoffbelastungen zu den Straßenschluchtenden hin und maximale Konzentrationen im Fußgängerbereich im Zentrum des Straßenabschnitts werden auch von der CFD-Simulation wiedergegeben. An Wand B weisen die berechneten Konzentrationsverteilungen darüber hinaus eine Deckungsgleichheit mit den im Windkanal gemessenen auf. An Wand A ist dies nicht der Fall. Es ist kein ausgeprägter Bereich mit vertikalen Konzentrationsgradienten festzustellen, was auf eine größere Eindringtiefe der Corner Eddies schließen lässt.

Die mit Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) am Windkanalmodell gemessenen und numerisch berechneten Vertikalgeschwindigkeiten  $w$  in einer senkrechten Ebene nahe dem Mittelquerschnitt bei  $y/H = 0.5$  sind in Bild 5 in normierter Form  $w^+ = w/u_{\text{ref}}$  dargestellt.

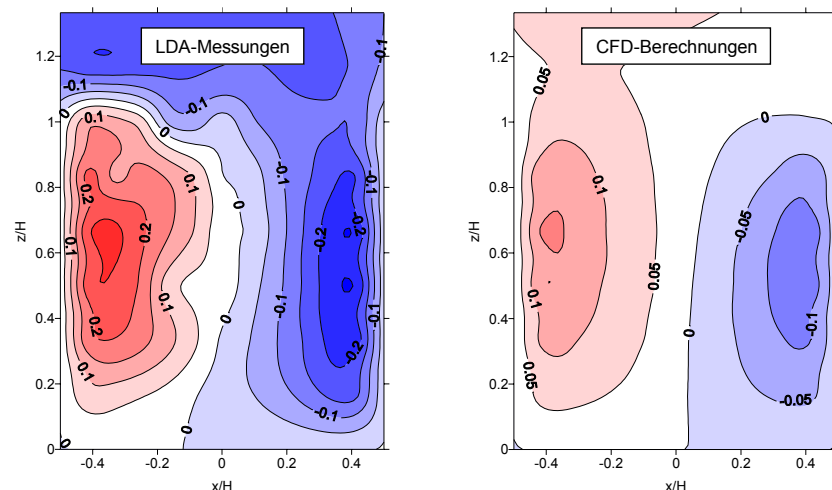


Bild 5: Normierte Vertikalgeschwindigkeiten  $w^+$  [-] bei  $y/H = 0.5$

Abwärtsgerichtete Luftbewegungen vor der luvseitigen Wand B des stromab gelegenen Gebäudes und aufwärtsgerichtete Luftströmungen vor der leeseitigen Wand A des stromauf gelegenen Gebäudes sind zu erkennen. Die gemessenen maximalen vertikalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Straßenschlucht betragen ca. 25 % der Referenzgeschwindigkeit in Dachhöhe  $u_{\text{ref}}$ . Im Vergleich dazu ergeben die numerischen Simulationen geringere vertikale Windgeschwindigkeiten mit maximalen Werten von etwa 15 % der Referenzgeschwindigkeit. Wird der durch die horizontale Ebene bei  $z/H = 0.7$  hindurchtretende vertikale Volumenstrom als Maß für die mit dem Canyon Vortex rotierenden Luftvolumina berechnet, ergibt sich aus den experimentellen Daten ein um den Faktor 1.8 größerer Volumenstrom. Damit lassen sich auch die im numerischen Modell berechneten höheren Schadstoffkonzentrationen erklären. Weiterhin sind qualitative Abweichungen in den Strömungsfeldern im Überdachbereich ( $z/H > 1$ ) erkennbar. Während am Windkanalmodell negative Vertikalkomponenten gemessen wurden, ergeben die numerischen Simulationen leicht positive Vertikalkomponenten.

Nach Hunter et al. /11/ wird das Strömungsfeld im mittleren Straßenschluchtabschnitt zwischen  $-1.5 < y/H < +1.5$  durch den Canyon Vortex als alleinige Wirbelstruktur geprägt. Das



hier dargestellte Geschwindigkeitsfeld in der vertikalen Ebene bei  $y/H = 0.5$  sollte demnach einen stark ausgeprägten 2-dimensionalen Charakter aufweisen. Stellt man den abwärtsgerichteten Volumenstrom vor Wand B dem aufwärtsgerichteten Volumenstrom vor Wand A gegenüber, geht diese Bilanz allerdings nicht zu Null auf. Die Auswertung der LDA-Messungen ergeben einen 1.4-fach größeren aufwärtsgerichteten Volumenstrom durch die horizontale Ebene bei  $z/H = 0.7$ . Für die CFD-Berechnungen beträgt dieser Wert sogar 1.7. Daraus lässt sich folgern, dass in der untersuchten Vertikalebene noch nennenswerte laterale Strömungen in Richtung der Straßensängsachse präsent sein müssen und die in Hunter et al. /11/ gemachte Aussage einer ausgeprägten 2-dimensionalen Strömung im mittleren Straßenschluchtbereich in Frage zu stellen ist.

Das Strömungsfeld in der Straßenschlucht wird neben dem Canyon Vortex auch durch die an den seitlichen Enden ablösenden Corner Eddies bestimmt (Bild 1). Die normierten Horizontalgeschwindigkeiten  $v^+ = v/u_{ref}$  der seitlich durch die vertikalen Ebenen bei  $y/H = \pm 5$  einströmenden Luft sind in Bild 6 zu sehen.

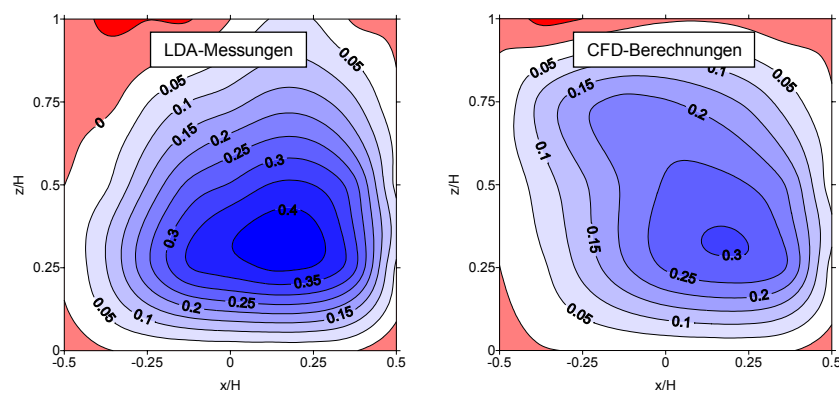


Bild 6: Normierte Horizontalgeschwindigkeiten  $v^+$  [-] bei  $y/H = \pm 5$

Die unbelastete Luft der freien Anströmung löst an den Kanten des stromauf gelegenen Gebäudes A ab und dringt leicht außermittig, zur Wand B versetzt, in den Straßenraum ein. Wie bei der Betrachtung der Strömungsfelder im zentralen Straßenschluchtabschnitt zuvor, ergeben die LDA-Messungen höhere Geschwindigkeiten als die numerischen Berechnungen. Der berechnete seitlich eindringende Volumenstrom ist im Experiment um den Faktor 1.2 größer als in der numerischen Simulation. Wie bereits oben ausgeführt, ergaben Vergleiche der experimentell und numerisch ermittelten Volumenströme im Canyon Vortex eine Abweichung um den Faktor 1.8. Somit ist in den CFD-Berechnungen der Einfluss der Corner Eddies auf das Strömungsfeld im Straßenraum relativ zum Canyon Vortex gestärkt. Dies erklärt die größere Eindringtiefe, ablesbar an der Form der numerisch berechneten Konzentrationsverteilung an Wand A in Bild 4.

### 3.2 Baumpflanzung mit nicht-poröser Krone und rechteckförmigem Querschnitt

Die Konzentrations- und Strömungsverhältnisse in einer Straßenschlucht mit einer einreihigen, mittig angeordneten Baumpflanzung (Bild 2) sind Gegenstand dieses Kapitels. Die untersuchte Baumkrone besitzt einen Rechteckquerschnitt von der Breite  $1/2 H$ , der Höhe  $2/3 H$  und erstreckt sich durchgehend über die gesamte Straßenschluchtlänge. Damit wird eine sehr dichte Pflanzung mit ineinander gewachsenen Kronen benachbarter Bäume nachempfunden. Der freie Lichtraum unterhalb der Krone beträgt  $1/3 H$  und das Kronendach schließt mit der Gebäudeoberkante ( $z/H = 1$ ) ab. Zwischen den seitlichen Häuserwänden und der Baumkrone liegen Freiräume von jeweils  $1/4 H$  Breite. In dieser Konfiguration sind  $1/3$  des Straßenraum-

volumens durch Kronenvolumen besetzt. Die Porosität natürlicher Baumkronen wird nicht berücksichtigt.

Bild 7 zeigt die normierten Konzentrationen  $c^+$  (oben) und die relativen Abweichungen in der Konzentrationsbelastung [%] in Bezug auf den Basisfall der baumfreien Straßenschlucht (unten). Im Vergleich zur baumfreien Straßenschlucht sind höhere Konzentrationsbelastungen an der leeseitigen Wand A und geringere Belastungen an der luvseitigen Wand B festzustellen. Im Durchschnitt beträgt der Konzentrationsanstieg an Wand A 70 % (exp.) bzw. 156 % (num.) und der Konzentrationsabfall an Wand B 35 % (exp.) bzw. 33 % (num.).

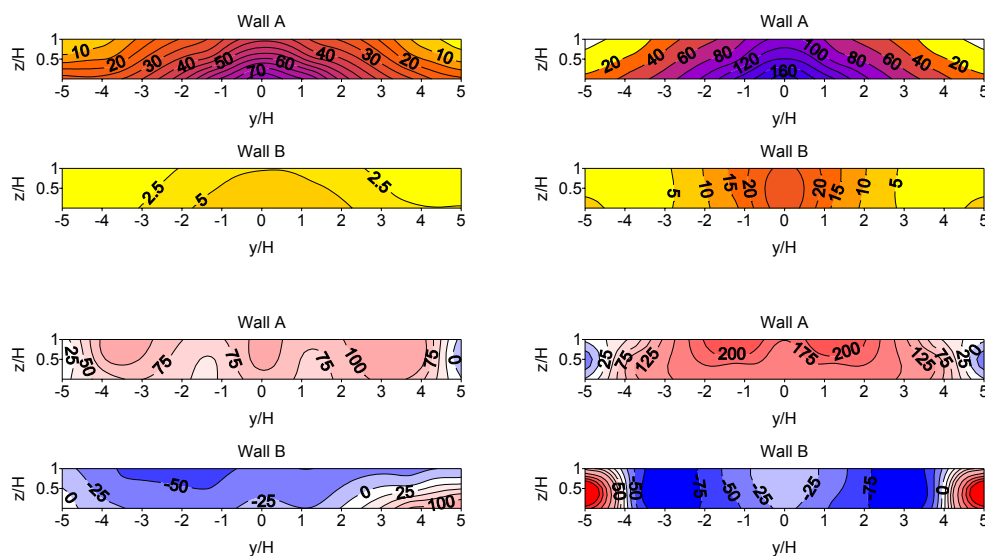


Bild 7: Normierte Konzentrationen  $c^+$  [-] an Wänden A und B (oben), relative Konzentrationsabweichungen [%] zur baumfreien Straßenschlucht (unten), experimentelle (links) und numerische Ergebnisse (rechts)

In Bild 8 sind die normierten Vertikalgeschwindigkeiten  $w^+$  [-] in der Ebene  $y/H = 0.5$  dargestellt. Auch im Falle der vorliegenden Baumpflanzung sind eine abwärtsgerichtete Strömung vor Wand B und eine aufwärtsgerichtete Strömung vor Wand A vorhanden. Die maximalen vertikalen Windgeschwindigkeiten im Straßenraum sind etwas geringer als im Basisfall (Bild 5). In Verbindung mit dem stark eingeschnürten, für die Rotation des Canyon Vortex's zur Verfügung stehenden offenen Querschnitt, reduziert sich der vertikale Volumenstrom durch die horizontale Ebene bei  $z/H = 0.7$  auf 36 % im Windkanal und auf 41 % in den CFD-Berechnungen. Ein Vergleich der Mess- mit den Simulationsergebnissen zeigt abermals geringere Windgeschwindigkeiten bei den numerischen Berechnungen. Bis auf die Strömungsverhältnisse im Überdachbereich besteht eine qualitative Kongruenz zwischen beiden Methoden.

Die Änderungen in den Konzentrationsbelastungen können nun mit Hilfe der veränderten Strömungsfelder im Straßenschluchtraum erklärt werden. Die erhöhten Schadstoffbelastungen an Wand A sind auf das geringere im Straßenraum rotierende Luftvolumen zurückzuführen. Bei konstanter Emissionsstärke der Linienquelle weist der vor Wand A aufsteigende Luftstrom folglich eine höhere Schadstoffbelastung auf. Um die Konzentrationsabnahmen an Wand B zu verstehen, müssen die Strömungsverhältnisse im unmittelbaren Überdachbereich des Straßenraums betrachtet werden. Beim Vergleich der Bilder 5 und 8 ist zu erkennen, dass die Vertikalgeschwindigkeiten des vor Wand A aus dem Straßenschluchtraum austretenden Luftstroms in Gegenwart der Baumpflanzung größer sind als im baumfreien Basisfall. Belastete Luft aus dem Straßenraum wird in höhere Schichten der atmosphärischen Überdach-



strömung eingetragen und stärker verdünnt. Somit besitzt die vor Wand B in die Straßenschlucht eingetragene Luft geringere Schadstoffbelastungen. Zudem ist durch die vorhandene Anordnung der Baumkrone kein direkter Schadstofftransport von Wand A zu Wand B unterhalb des Dachniveaus wie zuvor durch den Canyon Vortex möglich.

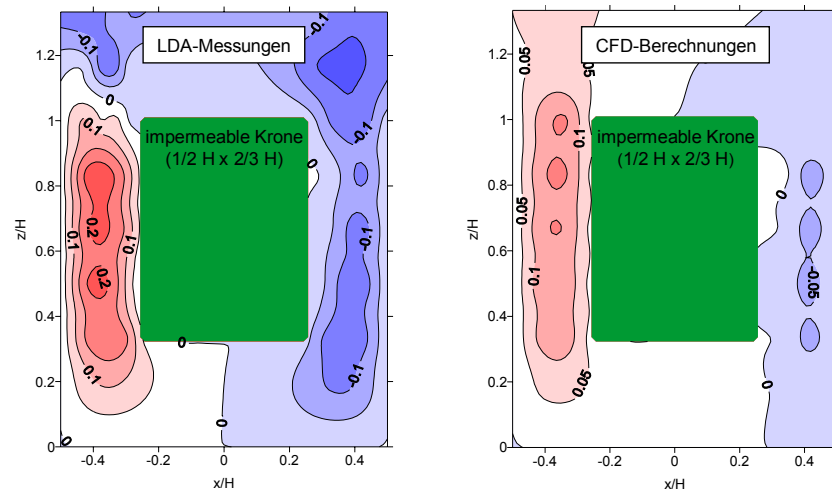


Bild 8: Normierte Vertikalgeschwindigkeiten  $w^+ [-]$  bei  $y/H = 0.5$

### 3.3 Baumpflanzung mit poröser Krone und rechteckförmigem Querschnitt

Die untersuchte Straßenschlucht/Baumkonfiguration ist analog zur der im vorherigen Kapitel beschriebenen. Der alleinige Unterschied besteht darin, dass eine poröse Baumkrone mit der Eigenschaft permeabel für Fluidströmungen zu sein, nachgebildet wurde. In den Windkanalversuchen wurde dazu ein offenporiger Schaumstoff mit einem Luftporenanteil von 97 Vol. % eingesetzt. Um die Permeabilität des Schaumstoffmaterials quantitativ durch eine strömungsmechanische Kenngröße zu beschreiben, wurde der Druckverlustbeiwert  $\lambda$  experimentell ermittelt. Der Druckverlustbeiwert  $\lambda$  gibt den Abbau des statischen Drucks  $\Delta p_{\text{stat}}$  bezogen auf den dynamischen Staudruck  $p_{\text{dyn}}$  bei einer Zwangsdurchströmung des porösen Mediums mit Abmessung  $d$  in Strömungsrichtung an. Die Messungen ergaben einen Druckverlustbeiwert von  $\lambda = 250 \text{ Pa (Pa m)}^{-1}$ . In den numerischen Simulationen wurde die poröse Baumkrone durch einen permeablen Widerstandskörper, charakterisiert durch einen isotropen Druckverlustbeiwert von  $\lambda = 250 \text{ Pa (Pa m)}^{-1}$ , modelliert.

Die relativen Abweichungen [%] zwischen poröser und nicht-poröser Baumkronenanordnung sind in Bild 9 zu sehen. Die Windkanalmessungen (links) zeigen nur geringfügige Änderungen in der Konzentrationsbelastung an Wand A. Für die gemessenen Durchschnittswandkonzentrationen bei porös und nicht-porös ausgebildeter Baumkrone ergibt sich eine Abweichung von nur 3 %. An Wand B sind die relativen Abweichungen aufgrund der inhärent geringeren Schadstoffbelastung (siehe Bild 4 und Bild 7) deutlicher ausgeprägt (31 % im Durchschnitt). Die absoluten Konzentrationsänderungen fallen allerdings ebenfalls sehr klein aus. Eine einseitige Längenimperfektion der porösen Modellbaumkrone ist Ursache für die höheren Abweichungen im Straßenschluchtabschnitt  $3 < y/H < 5$  und die damit einhergehende Asymmetrie. In den numerischen Berechnungen sind lokal beschränkt größere relative Abweichungen zu vorhanden (Bild 9 rechts). Im Durchschnitt treten jedoch nur moderate Abweichungen von 12 % an Wand A und 18 % an Wand B auf.

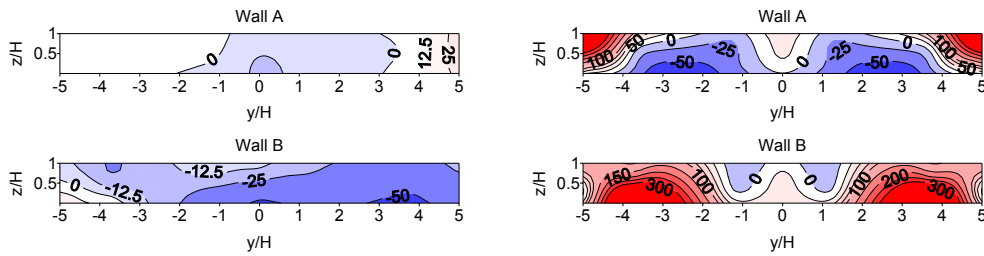


Bild 9: Relative Konzentrationsabweichungen [%] zum Referenzfall mit nicht-poröser Krone, experimentelle (links) und numerische Ergebnisse (rechts)

Ein Vergleich der LDA-Messergebnisse bei nicht-poröser und poröser Baumkrone offenbart nur geringfügige Unterschiede. Die durch die horizontale Ebene bei  $z/H = 0.7$  hindurchfließenden Volumenströme weichen nur um 8 % voneinander ab. Bei den CFD-Berechnungen beträgt der Unterschied 35 %.

### 3.4 Baumpflanzung mit nicht-poröser Krone und dreieckförmigem Querschnitt

Um die Auswirkungen der Kronenquerschnittsform auf das Konzentrations- und Strömungsfeld zu untersuchen wurden Messungen und Simulationen mit einer dreieckförmigen, nicht-porösen Krone durchgeführt. Im Vergleich zur rechteckförmigen Krone ist das durch die Baumpflanzung besetzte Straßenraumvolumen auf die Hälfte reduziert. Die Pflanzung ist wie zuvor zentral entlang der Straßenlängsachse angeordnet. Ihre Oberkante schließt mit der Dachkante der Gebäude ( $z/H = 1$ ) ab und der freie Lichtraum unterhalb dem Kronenfuß beträgt  $1/3 H$  (Bild 10).

Auch bei dieser Querschnittsausbildung wird Wand A mit einer zusätzlichen Konzentrationsbelastung im Vergleich zum baumfreien Basisfall beaufschlagt. Aus den experimentellen Untersuchungen ergibt sich für Wand A ein durchschnittlicher Konzentrationsanstieg von 48 % und aus den numerischen Simulationen ein Anstieg von 162 %. An Wand B ist nur bei den numerischen Ergebnissen ein integraler Konzentrationsabfall von 57 % festzustellen.

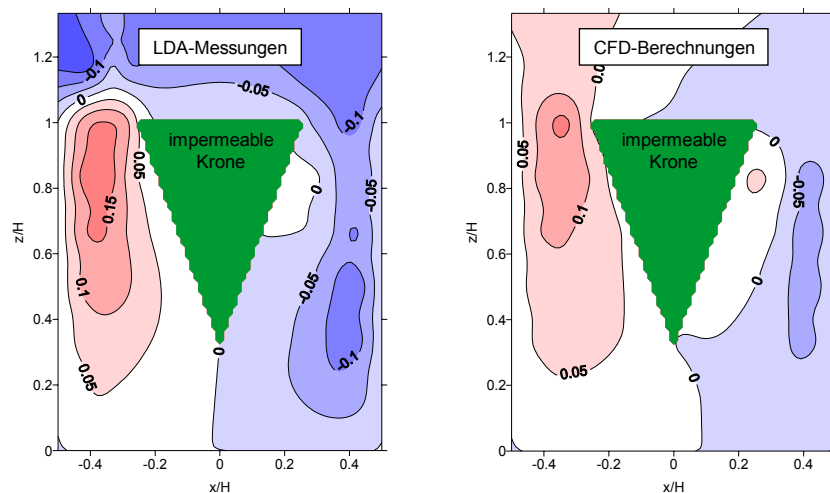


Bild 10: Normierte Vertikalgeschwindigkeiten  $w^+$  [-] bei  $y/H = 0.5$

Die Verengung des Strömungsquerschnitts des aufwärtsgerichteten Luftstroms vor Gebäude A führt zu einer Erhöhung der Vertikalgeschwindigkeiten wie in den Konturbildern der LDA-Messungen und CFD-Simulationen zu erkennen ist (Bild 10). Der gegenteilige Effekt, eine Geschwindigkeitsabnahme der einströmenden Luftmassen vor Wand B, ist nicht zu erkennen.

Die Abbildungen lassen einen Bereich mit positiven Vertikalgeschwindigkeiten zwischen Baumkrone und Gebäudewand B erkennen. Die Ausbildung einer Ablöseblase mit Strömungsrezirkulation engt den effektiv durchströmten Querschnitt zwischen Krone und Gebäude B ein, sodass es zu keiner Geschwindigkeitsabnahme im Bereich der Querschnittsaufweitung kommt. Insgesamt werden wieder höhere Vertikalgeschwindigkeiten im Windkanal gemessen als in den CFD-Simulationen berechnet.

#### 4 Zusammenfassung

Die Ausbreitung bodennah freigesetzter Verkehrsemissionen in Straßenschluchten mit alleeartigen Baumpflanzungen wurde untersucht. An einem Windkanalmodell einer Straßenschlucht wurden Konzentrationsmessungen mit einem Elektroneneinfangdetektor (ECD) sowie Messungen des Geschwindigkeitsfeldes mittels Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) durchgeführt. Parallel dazu wurden numerische Simulationen auf der Basis der Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) Gleichungen bei Anwendung einer LVEL  $k-\varepsilon$  Turbulenzschließung zur Untersuchung eingesetzt.

Die Ergebnisse für eine zur Straßenslängsachse senkrechte Anströmung zeigen, dass bei den untersuchten Pflanzkonfigurationen im Vergleich zum baumfreien Basisfall Konzentrationsanstiege an der leeseitigen Wand A und Konzentrationsabnahmen an der luvseitigen Wand B auftreten. Die mit dem Canyon Vortex rotierenden Volumenströme (Bild 1) nehmen in Gegenwart von mittig angeordneten Baumreihen ab, und der Luftaustausch zwischen atmosphärischer Überdachströmung und Straßenraum ist reduziert. Die CFD-Simulationen ergeben höhere Schadstoffbelastungen und geringere Strömungsgeschwindigkeiten im Straßenraum als die Windkanalmessungen. Für die untersuchten Konfigurationen liefern die numerischen Berechnungen im Durchschnitt 101 % höhere Schadstoffkonzentrationen und 32 % kleinere, mit dem Canyon Vortex rotierende Volumenströme.

In Tabelle 1 sind die normierten Wanddurchschnittskonzentrationen sowie die normierten vertikalen Volumenströme durch die horizontale Ebene bei  $z/H = 0.7$  im Bereich der Straßenschluchtmitte bei  $y/H = 0.5$  zusammengefasst. Werden die normierten Volumenströme mit der Referenzgeschwindigkeit  $u_{ref}$  und der Gebäudehöhe  $H$  als Referenzlänge multipliziert, erhält man den Volumenstrom je Längeneinheit in Straßenslängsrichtung [ $m^3 m^{-1} s^{-1}$ ].

Tabelle 1: Normierte Durchschnittskonzentrationen [-] an den Wänden A und B und normierte Volumenströme [-] des Canyon Vortex bei  $y/H = 0.5$

Konfiguration	experimentelle Ergebnisse			numerische Ergebnisse		
	Konzentration		Volumenstrom	Konzentration		Volumenstrom
	A	B		A	B	
Basisfall (3.1)	19.5	5.4	0.070	26.0	15.1	0.039
Rechteckkrone (3.2) (nicht-porös)	33.2	3.5	0.025	66.5	10.1	0.016
Rechteckkrone (3.3) (porös)	32.3	2.4	0.022	58.5	11.9	0,022
Dreieckkrone (3.4) (nicht-porös)	28.9	5.4	0.027	68.0	6.5	0,021

## 5 Danksagung

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG sei gedankt für die finanzielle Unterstützung des Forschungsvorhabens (Ru 345/28).

## 6 Literatur

- /1/ Baik, J.J., Kim, J.J., 1999: A numerical study of flow and pollutant dispersion characteristics in urban street canyons, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 38, pp. 1576-1589.
- /2/ Chang, C., Meroney, R.N., 2003: Concentration and flow distributions in urban street canyons: wind tunnel and computational data, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91, pp. 1141-1154.
- /3/ Kastner-Klein, P., Fedorovich, E., Rotach, M.W., 2001: A wind tunnel study of organised and turbulent air motions in urban street canyons, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, pp. 849-861.
- /4/ Pavageau, M., Schatzmann, M., 1999: Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon, *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 3961-3971.
- /5/ Gromke, C., Ruck, B., 2006: Der Einfluss von Bäumen auf das Strömungs- und Konzentrationsfeld in Straßenschluchten, Proc. 14. GALA Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Braunschweig, September 2006, pp. 59-1-59-10.
- /6/ Gromke, C., Ruck, B., 2007: Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon - experimental investigation of the flow and concentration field, *Atmospheric Environment*, Vol. 41, pp. 3387-3302.
- /7/ Gromke, C., Ruck, B., 2007: Trees in urban street canyons and their impact on the dispersion of automobile exhausts, Proc. 6th International Conference on Urban Air Quality, Cyprus, March 2007.
- /8/ Gromke, C., Ruck, B., 2007: Flow and dispersion phenomena in urban street canyons in the presence of trees, Proc. 12th International Conference on Wind Engineering, Cairns, Australia, July 2007.
- /9/ Gromke, C., Ruck, B., 2007: Dispersion of traffic exhausts in urban street canyons with tree plantings - Experimental and numerical investigations -, *PHYSMOD 2007*, Orléans, France, August 2007.
- /10/ Gromke, C., Ruck, B., 2007: Effects of trees on the dilution of vehicle exhaust emissions in urban street canyons, Special Issue on Urban Air Pollution in *International Journal of Environment and Waste Management (IJEWM)*, paper accepted for publication, paper submitted on invitation.
- /11/ Hunter, L.J., Watson, I.D., Johnson, G.T., 1990/91: Modelling air flow regimes in urban canyons", *Energy and Buildings*, Vol. 15, pp. 315-324.
- /12/ Gromke, C., Ruck, B., 2005: Die Simulation atmosphärischer Grenzschichten in Windkanälen, Proc. 13. GALA Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Cottbus, September 2005, pp. 51-1-51-8.
- /13/ FLOVENT 6.1, 2005: User's Manuel, Flomerics Limited, September 2005.