

STRÖMUNGSFELDER IN STRASSENSCHLUCHTEN MIT UND OHNE BAUMPFLANZUNGEN - VERGLEICH ZWISCHEN LDA-MESSUNGEN UND CFD-SIMULATIONEN

FLOW FIELDS IN STREET CANYONS WITH AND WITHOUT TREE PLANTINGS - COMPARISON BETWEEN LDV-MEASUREMENTS AND CFD-SIMULATIONS

Christof Gromke, Bodo Ruck

Laboratory of Building- and Environmental Aerodynamics, Institute for Hydromechanics,
University of Karlsruhe, Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe, Germany

Schlagworte: Straßenschlucht, Bäume, Strömungsfeld, LDA-Messungen, CFD-Simulationen
Key words: Street Canyon, Tree Planting, Flow Field, LDV-Measurements, CFD-Simulations

Zusammenfassung

Zur Klärung der Strömungsverhältnisse in städtischen Straßenschluchten mit alleinartiger Baumpflanzung wurden Laser-Doppler-Anemometer Messungen an einem Windkanalmodell durchgeführt. Parallel wurden numerische Berechnungen mit einem kommerziellen CFD-Code (FLOVENT) bei Verwendung eines modifizierten $k-\varepsilon$ Turbulenzmodells zur Schließung der Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) Gleichungen ausgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine verminderte Durchlüftung des Straßenraums in Gegenwart von Baumpflanzungen. Typische Wirbelstrukturen, die sich in der leeren, baumfreien Straßenschlucht ausbilden, sind nur noch rudimentär, in abgeschwächtem Ausmaß präsent. Ein Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse liefert nur qualitative Übereinstimmungen zwischen beiden Methoden. In den CFD-Simulationen werden geringere Strömungsgeschwindigkeiten und somit ein reduzierter Luftaustausch im Straßenraum prognostiziert.

Einleitung

Den Hintergrund der Untersuchungen bildet die Fragestellung, wie die Luftqualität in innerstädtischen Straßenschluchten durch Baumbesatz beeinflusst wird. Die vom Straßenverkehr bodennah freigesetzten Schadstoffe müssen zur Gewährleistung einer ausreichenden Luftqualität effizient verdünnt und aus dem Straßenraum abtransportiert werden. Dabei spielt die natürliche Ventilation, angetrieben durch die Interaktion zwischen atmosphärischem Wind und Bebauung, neben der verkehrsinduzierten Turbulenz eine wesentliche Rolle, siehe Baik und Kim 1999, Chang und Meroney 2003, Kastner-Klein et al. 2001, Pavageau und Schatzmann 1999. In der vorliegenden Arbeit werden die Auswirkungen von alleinartigen Baumpflanzungen auf die natürliche Durchlüftung des Straßenraums beschrieben. Die Strömungsfelder in Gegenwart einer einreihig mittig angeordneten Pflanzung mit ineinander greifenden Baumkronen wurden untersucht. Die Ergebnisse für verschieden ausgebildete 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 2006 sowie in Gromke und Ruck 2007a, b, c, d, e zu finden.

Experimentelle Untersuchungen - Windkanalmodell und Strömungsverhältnisse

Die Untersuchungen wurden an einem Modell einer isoliert stehenden, städtischen Straßenschlucht (Maßstab 1:150) in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal durchgeführt (Abb. 1). Die geometrischen Abmessungen der Straßenschlucht sind durch ein Straßenlängen- zu Breitenverhältnis von $L/W = 10:1$, ein Verhältnis von Gebäudehöhe- zu Breite von $H/W = 1:1$ und ein Straßenbreiten zu Gebäudehöhenverhältnis von ebenfalls $W/H = 1:1$ charakterisiert. Das Windkanalmodell war senkrecht zu seiner Straßenlängsachse einer für Stadtlandschaften typischen Anströmung mit Profilexponent $\alpha = 0.30$ gemäß dem Potenzgesetz ausgesetzt (Abb. 2). Weitere Daten zum Windkanal und dem Anströmungsprofil sind in Gromke und Ruck 2005 enthalten.

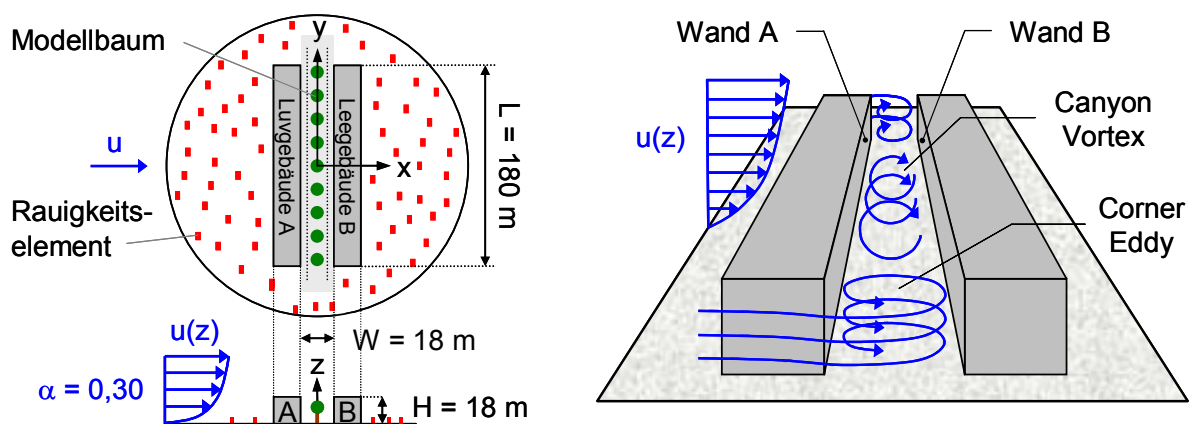


Abb.1: Straßenschluchtmodell (Maßstab 1:150) und Strömungsverhältnisse in baumfreier Straße

Im rechten Teil von Abb.1 sind die Strömungsverhältnisse in der leeren, baumfreien Straßenschlucht bei senkrechter Anströmung skizziert. Zwei charakteristische Wirbelstrukturen sind zu erkennen, die seitlichen Corner Eddies und der zentrale Canyon Vortex. Im Bereich der Straßenenden findet eine Superposition beider Wirbelstrukturen statt und ein verstärkter Luftaustausch zwischen Straßenraum und atmosphärischer Strömung ist die Folge. Nach Hunter et al. 1990/91 besteht bei der vorliegenden Straßenschluchtgeometrie nur im mittleren Abschnitt zwischen $-1.5 < y/H < +1.5$ ein allein vom Canyon Vortex dominiertes 2-dimensionales Strömungsfeld. In diesem Bereich ist ein geringerer Luftaustausch vorhanden, folglich treten hier die höchsten Konzentrationen von im Straßenraum selber freigesetzten Abgasen auf. Die in diesem Artikel vorgestellten LDA-Messungen der Geschwindigkeitsfelder konzentrieren sich auf den mittleren, austauscharmen Straßenschluchtabschnitt. In einer Ebene senkrecht zur Straßenlängsachse bei $y/H = 0.5$ wurden die vertikalen Geschwindigkeitskomponenten gemessen. Der Einfluss von einreihig mittig angeordneten, alleinartigen Baumpflanzungen mit unterschiedlichen Kronenausbildungen auf das zirkulierende Luftvolumen im Canyon Vortex wurde untersucht.

Numerische Simulationen - CFD-Code und numerisches Straßenschluchtmodell

Die numerischen Berechnungen wurden mit dem kommerziellen CFD-Code FLOVENT ausgeführt. Ein LEVEL k- ϵ Turbulenzmodell zur Schließung der Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) Gleichungen wurde angewendet. In wandnahen Bereichen wird die turbulente Wirbelviskosität ν_t über eine Gewichtung der turbulenten Viskosität $\nu_{t,k-\epsilon}$, basierend auf dem klassischen k- ϵ Ansatz, und einer turbulenten Viskosität $\nu_{t,LEVEL}$ berechnet. Bei Letzterem handelt es sich um ein algebraisches Wirbelviskositätsmodell. Die turbulente Viskosität wird

aus einer charakteristischen Länge L und einer charakteristischen Geschwindigkeit VEL bestimmt. Die charakteristische Länge L ist hierbei ein Maß für den Wandabstand und die charakteristische Geschwindigkeit VEL ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit in der betrachteten Zelle. Zusätzlich werden zur Berechnung der Strömung in wandangrenzenden Zellen Wandfunktionen herangezogen. Advektive Terme werden durch eine erster Ordnung Aufwindifferenz und diffusive Terme durch eine zweiter Ordnung Zentralfdifferenz diskretisiert. Die aus der Diskretisierung der Differenzialgleichungen resultierenden algebraischen Differenzengleichungen werden nach der Finite-Volumen-Methode auf einem strukturierten, versetzten Gitter gelöst (FLOVENT 6.1 2005).

Der erste Schritt in der numerischen Modellierung war die Generierung des im atmosphärischen Grenzschichtwindkanal vorliegenden Anströmungsprofils. Die Vertikalverläufe der mittleren Windgeschwindigkeit $u(z)$ und der Turbulenzintensität $I_{xyz}(z)$ im Ursprung des Koordinatensystems (Abb. 1) sind für den Windkanal und den numerischen Rechenbereich ohne Straßenschluchtmodell in Abb. 2 dargestellt und zeigen eine gute Übereinstimmung.

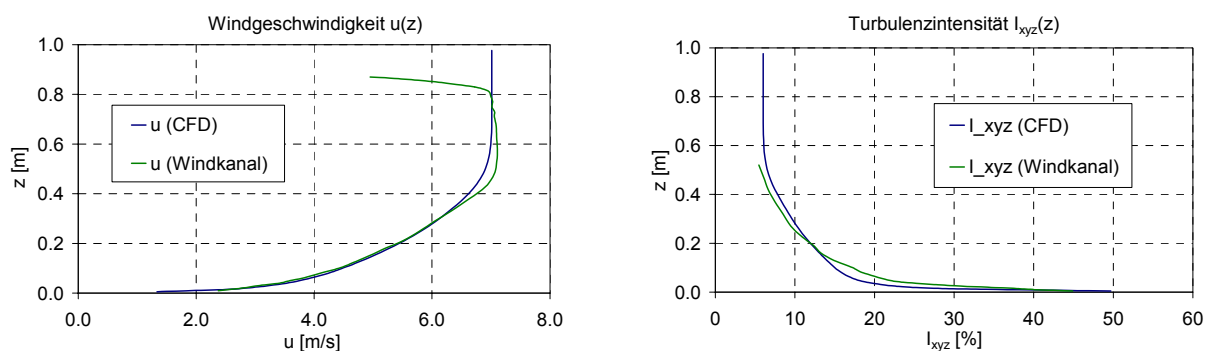


Abb. 2: Vertikalprofile der mittleren Windgeschwindigkeit $u(z)$ und Turbulenzintensität $I_{xyz}(z)$

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 verhindert ein Ablösen der Strömung an luvseitigen Hinderniskanten. Ablöseblasen und Rezirkulationsgebiete werden beim klassischen $k-\varepsilon$ Turbulenzmodell nicht, oder allenfalls in wesentlich zu geringen Ausmaßen wiedergegeben.

Vorausgehende CFD-Studien zeigten, dass das Vorhandensein eines Ablösegebietes an der luvseitigen Vorderkante entscheidend für den Luftaustausch zwischen Straßenschluchtraum und Überdachbereich ist (Gromke und Ruck 2007d). Im Falle einer Ablöseerscheinung wird die atmosphärische Überdachströmung vom Gebäude abgedrängt. Der obere Teil des in der Straßenschlucht rotierenden Canyon Vortex's (Abb. 1) ragt leicht über das Dachniveau hinaus in die verlangsamte Strömung unmittelbar über der Gebäudeoberkante. Tritt keine Ablösung auf, wird die unmittelbare Überdachströmung weniger stark verlangsamt und der Canyon Vortex verbleibt vollständig in der Straßenschlucht unterhalb der Gebäudeoberkante. In diesem Fall ist der Luftaustausch geringer. Emissionen, freigesetzt im Straßenraum, verbleiben länger und führen zu höheren Schadstoffkonzentrationen. Um in den vorliegenden numerischen Simulationen der senkrecht angeströmten, freistehenden Straßenschlucht eine Ablöseerscheinung an der luvseitigen Häuserkante des windzugewandten Gebäudes zu reproduzieren, wurde eine Gitterstudie durchgeführt. Das für die Berechnungen gewählte Gitter ist als Ergebnis der Studie in Abb. 3 dargestellt. Die Gitterzellengröße wurde um die Stra-

ßenschluchtanordnung sukzessive verfeinert (embedded grids). Im Bereich der luvseitigen Dachkante des windzugewandten Gebäudes A wurde das Gitter zusätzlich verfeinert (Abb. 3, rechts). Bezogen auf die Gebäudehöhe H beträgt die Kantenlänge der Zellen 0.2 % im vorderen und 0.4 % im anschließenden Dachbereich. Insgesamt wurde das numerische Modell durch 1.2 Mio. Zellen diskretisiert.

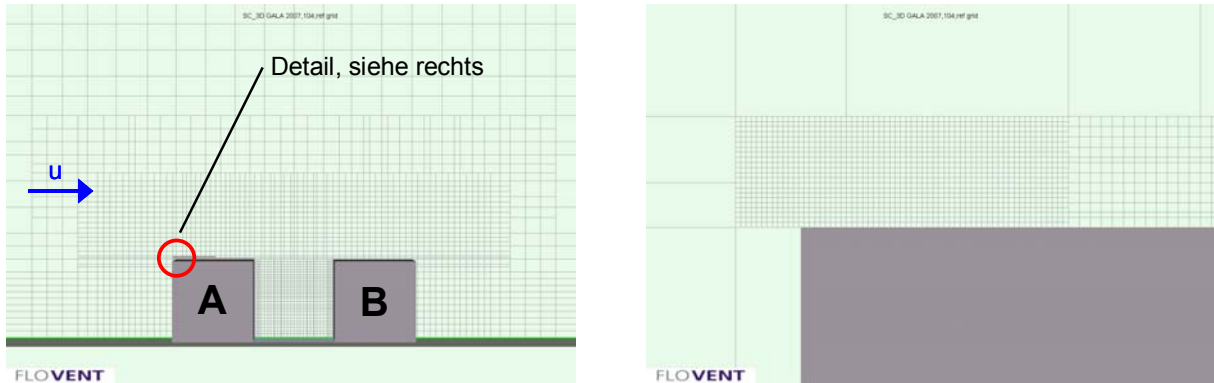


Abb. 3: Numerisches Gitter um Straßenschluchtmodell (links) und Detailansicht (rechts)

Ergebnisse

In den folgenden Konturbildern und Diagrammen wird die normierte Vertikalkomponente der Geschwindigkeit $w^+ = w/u_{ref}$ [-] dargestellt. Es werden jeweils die Geschwindigkeitsfelder in einer vertikalen Ebene in der Nähe der Straßenschluchtmitte bei $y/H = 0.5$ gezeigt. Als Referenzgröße u_{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. Die Ergebnisse der LDA-Messungen und der numerischen Simulationen werden immer abschnittsweise parallel für eine untersuchte Baumpflanzkonfiguration vorgestellt und analysiert.

Baumfreie Straßenschlucht - Referenzfall

Die normierten vertikalen Strömungsgeschwindigkeiten w^+ für den Referenzfall sind in Abb. 4 dargestellt. Im linken Konturbild sind die mittels LDA gemessenen und im rechten Bild die numerisch berechneten normierten Strömungsgeschwindigkeiten zu sehen. Abwärtsgerichtete Luftbewegungen vor der luvseitigen Wand B des leeseitigen Gebäudes (Abb. 1) und aufwärtsgerichtete Luftströmungen vor der leeseitigen Wand A des luvseitigen Gebäudes sind zu erkennen. Die gemessenen maximalen vertikalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Straßenschlucht betragen ca. 25 % der Referenzgeschwindigkeit in Dachhöhe u_{ref} . Im Vergleich dazu ergeben die numerischen Simulationen geringere vertikale Windgeschwindigkeiten mit maximalen Werten von etwa 15 % der Referenzgeschwindigkeit. Zwischen den Konturbildern der LDA-Messung und der CFD-Berechnung lässt sich jedoch im Bereich zwischen den Häuserwänden eine Kongruenz feststellen. Nur im Überdachbereich ($z/H > 1$) sind qualitative Abweichungen erkennbar. Während am Windkanalmodell negative Vertikalkomponenten gemessen wurden, ergeben die numerischen Simulationen leicht positive Vertikalkomponenten.

Nach Hunter et al. 1990/91 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. 1990/91 gemachte Aussage einer ausgeprägten 2-dimensionalen Strömung im mittleren Straßenschluchtbereich in Frage zu stellen ist.

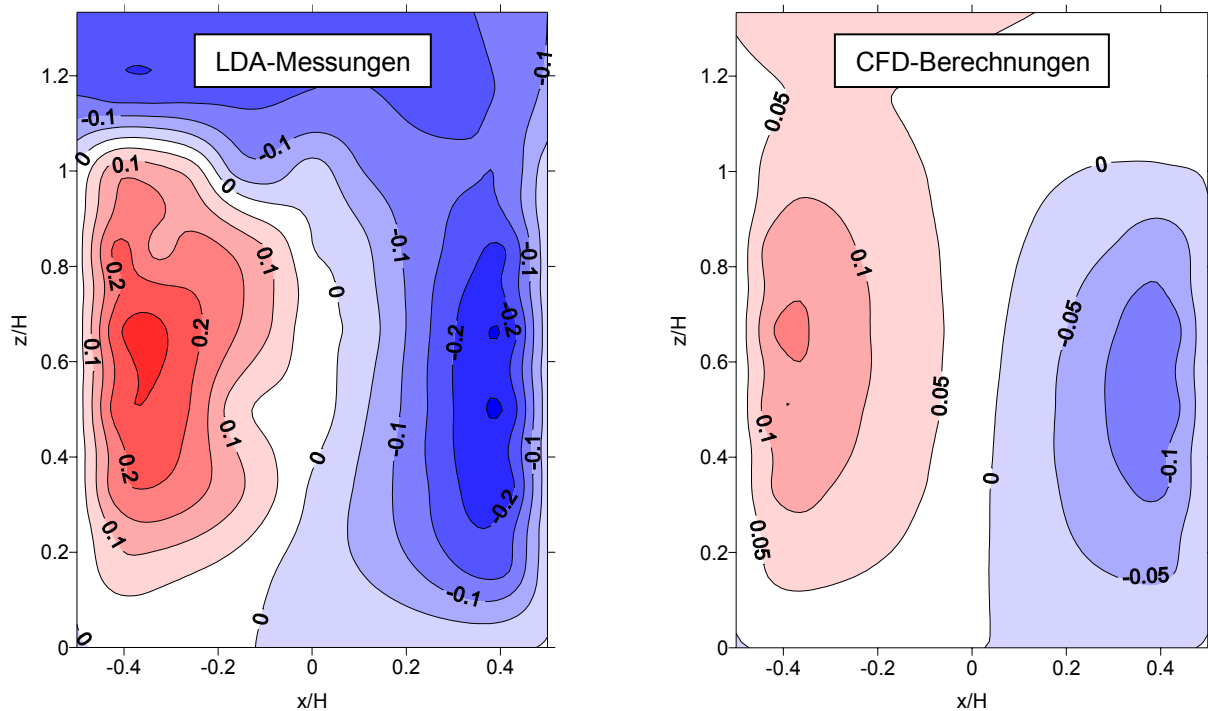


Abb. 4: Normierte Vertikalgeschwindigkeiten w^+ in baumfreier Straßenschlucht bei $y/H = 0.5$

Straßenschlucht mit durchgängiger, impermeabler Krone mit rechteckförmigem Querschnitt

Die Strömungsverhältnisse in einer Straßenschlucht mit einer mittig angeordneten, einreihigen, alleinartigen Baumpflanzung sind in den Konturbildern von Abb. 5 zu sehen. Die Baumkrone besitzt einen Rechteckquerschnitt von 9 m Breite mal 12 m Höhe und erstreckt sich über die gesamte Straßenschluchtlänge. Der freie Lichtraum unterhalb der Krone beträgt 6 m und das Kronendach schließt mit der Gebäudeoberkante auf 18 m ($z/H = 1$) ab. Zwischen den seitlichen Häuserwänden und der Baumkrone bestehen Freiräume von jeweils 4.5 m Breite.

Auch im Falle der vorliegenden Baumpflanzung sind eine abwärtsgerichtete Strömung vor Wand B und eine aufwärtsgerichtete Strömung vor Wand A zu beobachten (Abb. 5). Die maximalen vertikalen Windgeschwindigkeiten im Straßenraum sind etwas geringer als im baumfreien Referenzfall (Abb. 4). 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 LDA- und CFD-Ergebnissen. Auf der Leeseite der Baumkrone ist ein kleiner Bereich mit positiven, d.h. aufwärtsgerichteten Vertikalgeschwindigkeiten erkennbar. Die vektorielle Darstellung der numerisch berechneten Geschwindigkeiten in Abb. 8 lässt ein Rezirkulationsgebiet erkennen. Aus den Messungen ergibt sich, dass der Volumenstrom der abwärtsgerichteten Luftmassen auf 26 % des Wertes im Referenzfall abgefallen ist, der der aufwärtsgerichte-

ten Luftmassen auf 42 %. Die entsprechenden Werte aus der CFD-Simulation betragen 21 % bzw. 51 %.

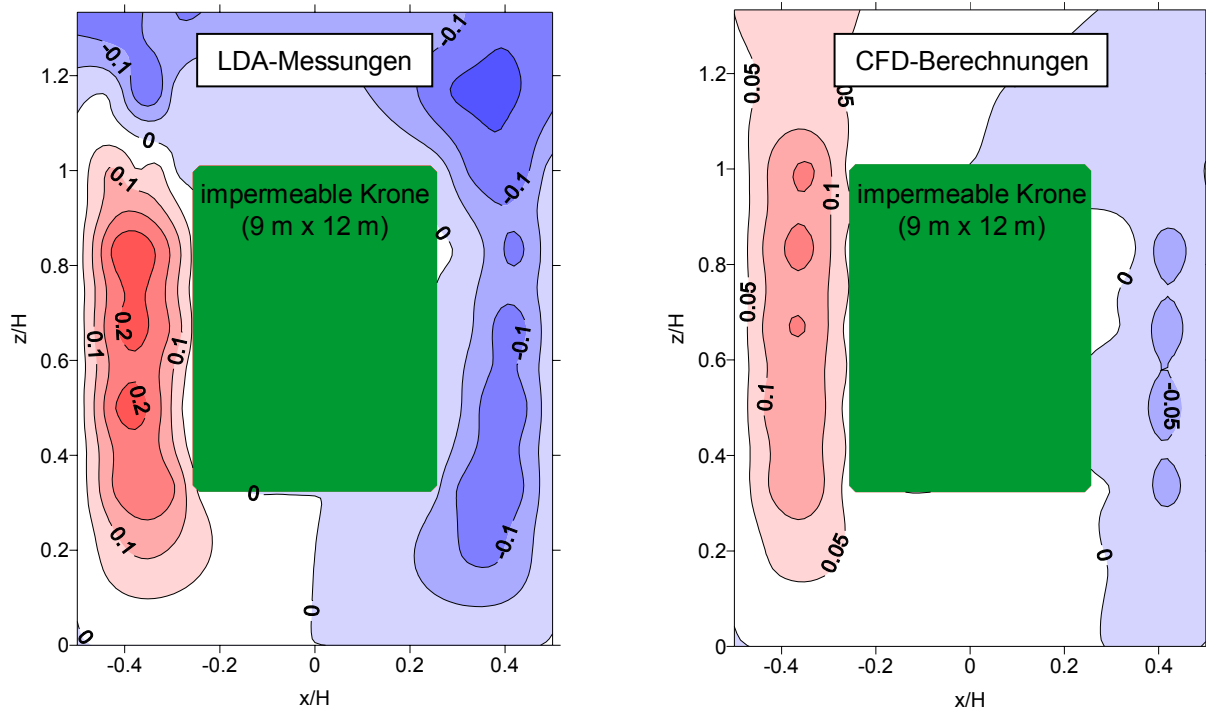


Abb. 5: Normierte Vertikalgeschwindigkeiten w^+ in Straßenschlucht mit durchgängiger, rechteckförmiger Krone bei $y/H = 0.5$

Straßenschlucht mit durchgängiger, permeabler Krone mit rechteckförmigem Querschnitt

Die untersuchte Straßenschlucht- und Baumkonfiguration ist analog zur der im vorherigen Abschnitt 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 λ [$\text{Pa} (\text{Pa m})^{-1}$] experimentell ermittelt. Der Druckverlustbeiwert λ gibt den Abbau des statischen Drucks Δp_{stat} bezogen auf den dynamischen Staudruck p_{dyn} bei einer Zwangsdurchströmung des porösen Mediums mit Abmessung d in Strömungsrichtung an. Die Messungen ergaben einen Druckverlustbeiwert von $\lambda = 250 \text{ Pa} (\text{Pa m})^{-1}$. In den numerischen Simulationen wurde die poröse Baumkrone durch einen permeablen Widerstandskörper, charakterisiert durch einen isotropen Druckverlustbeiwert von $\lambda = 250 \text{ Pa} (\text{Pa m})^{-1}$, modelliert. Abb. 6 zeigt die normierten vertikalen Geschwindigkeitsfelder in der Straßenschlucht bei $y/H = 0.5$. Ein Vergleich der LDA-Messergebnisse von impermeabler (Abb. 5 links) und permeabler Baumkrone (Abb. 6 links) offenbart nur geringfügige Unterschiede in den Geschwindigkeitsfeldern. Während in Gegenwart der impermeablen Baumkrone die aufwärtsgerichteten Strömungsgeschwindigkeiten vor Wand A etwas größer sind als für die permeable Kronenausführung, sind die Strömungsgeschwindigkeiten der abwärtsgerichteten Luftbewegungen leicht geringer. Ebenso wie in den zuvor behandelten Straßenschluchtkonfigurationen sind die numerisch berechneten Vertikalgeschwindigkeiten kleiner als die gemessenen. Qualitative Unterschiede zwischen numerischen und experimentellen Ergebnissen sind bei der

Durchströmung des porösen Mediums festzustellen. Während die CFD-Simulationen im überwiegenden Teil der Baumkrone eine aufwärtsgerichtete Durchströmung berechnen, legen die LDA-Messungen eine in großen Teilen der Krone vorhandene abwärtsgerichtete Strömung nahe. Im Falle der permeablen Rechteckkrone tritt aufgrund der Durchströmung kein Rezirkulationsgebiet leeseitig der Krone auf (Abb. 8).

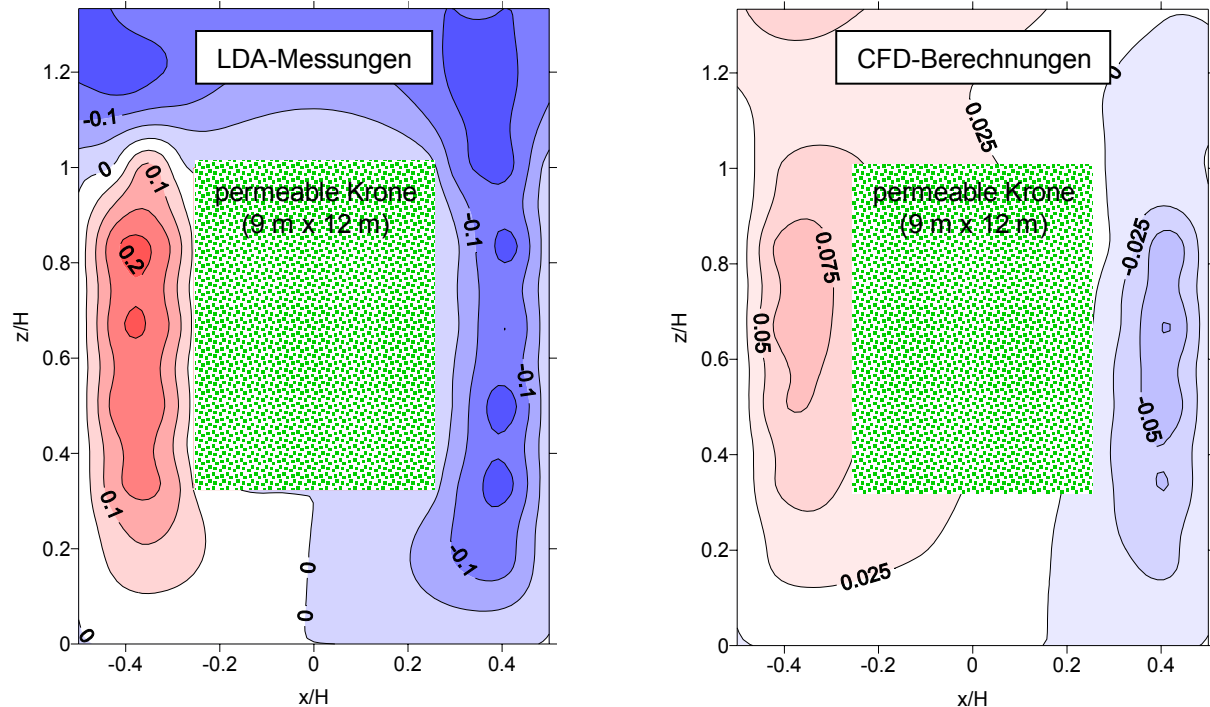


Abb. 6: Normierte Vertikalgeschwindigkeiten w^+ in Straßenschlucht mit durchgängiger, rechteckförmiger Krone bei $y/H = 0.5$

Straßenschlucht mit durchgängiger, impermeabler Krone mit dreieckförmigem Querschnitt

Abschließend werden noch die experimentellen und numerischen Ergebnisse einer alleenartigen Baumpflanzung mit dreieckförmiger, impermeabler Krone vorgestellt. 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 6 m (Abb. 7).

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. Der gegenteilige Effekt einer Geschwindigkeitsabnahme der einströmenden Luftmassen vor der Wand B ist nicht zu erkennen. Die CFD-Ergebnisse zeigen einen kleinen Bereich mit positiven Vertikalgeschwindigkeiten zwischen Baumkrone und Gebäudewand B. In Abb. 8 sind die Geschwindigkeitsvektoren aus der CFD-Berechnung dargestellt. Die Ausbildung einer kleinen Rezirkulationszone im oberen Straßenschluchtbereich auf der Leeseite der Baumkrone ist zu beobachten. Die Ablöseblase engt den effektiv durchströmten Querschnitt zwischen Krone und Gebäude B ein, sodass es zu keiner Strömungsverzögerung im Bereich der Querschnittsaufweitung kommt. In den LDA-Messungen wird dieses Rezirkulationsgebiet nur in wesentlich kleineren Ausmaßen erfasst. Insgesamt werden wieder höhere Vertikalgeschwindigkeiten im Windkanal gemessen als in den CFD-Simulationen berechnet.

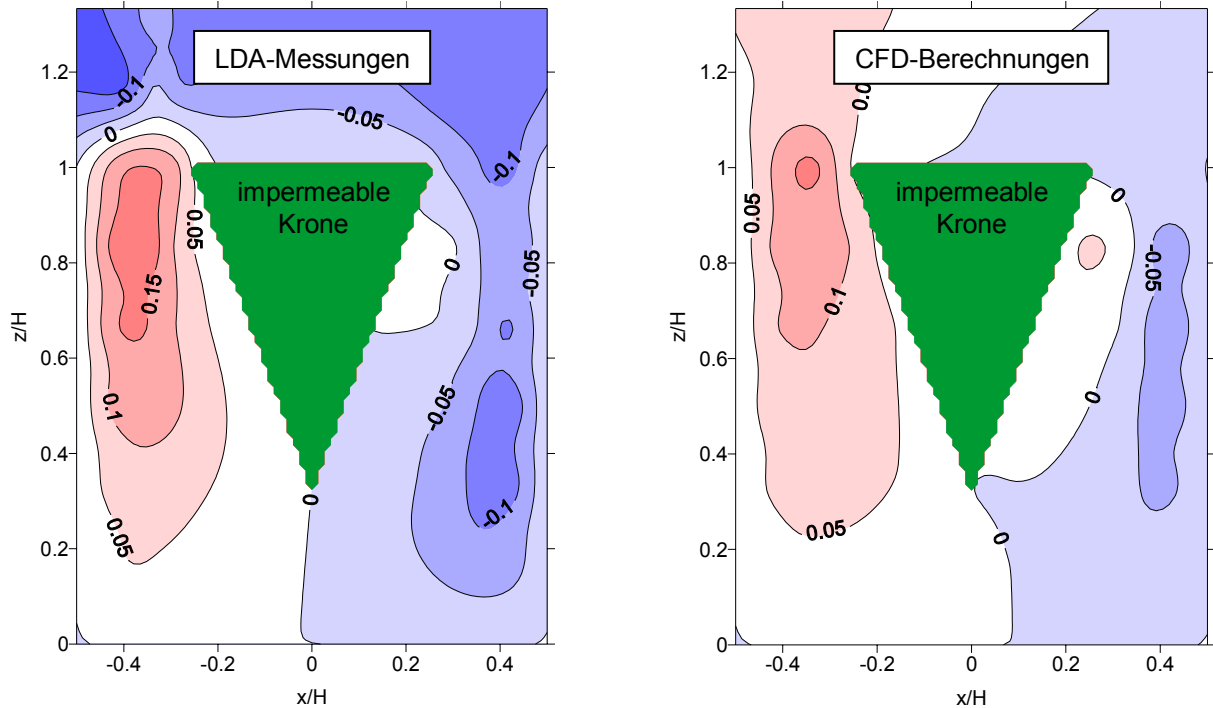


Abb. 7: Normierte Vertikalgeschwindigkeiten w^+ in Straßenschlucht mit durchgängiger, dreieckförmiger Krone bei $y/H = 0.5$

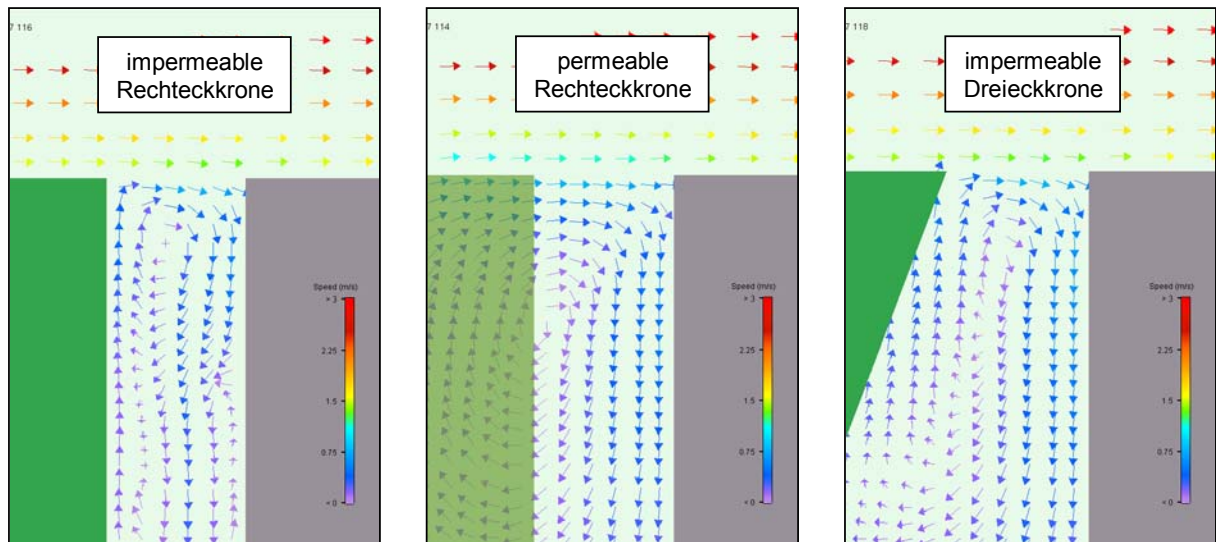


Abb. 8: Vektorbilder der Geschwindigkeitsfelder in Straßenschlucht bei $y/H = 0.5$, (CFD-Simulationen)

Zusammenfassung

Die Strömungsverhältnisse in einer städtischen Straßenschlucht mit unterschiedlich ausgeprägten alleinartigen Baumpflanzungen wurden untersucht. Es wurden Laser-Doppler-Anemometer-Messungen (LDA) an einer Modellstraßenschlucht im Windkanal und numerische Simulationen auf der Basis der Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) Gleichungen bei Anwendung einer LEVEL $k-\epsilon$ Turbulenzschließung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die mit dem Canyon Vortex rotierenden Volumenströme (Abb. 1) in Gegenwart

von mittig angeordneten Baumreihen im Vergleich zum baumfreien Referenzfall deutlich abnehmen. In Tab. 1 sind die normierten vertikalen Volumenströme durch eine horizontale Ebene bei $z/H = 0.7$ im Bereich der Straßenschluchtmitte bei $y/H = 0.5$ zusammengefasst. Werden diese Werte mit der Referenzgeschwindigkeit u_{ref} und der Gebäudehöhe H als Referenzlänge multipliziert, erhält man den Volumenstrom je Längeneinheit in Straßenlängsrichtung in $[m^2s^{-1}]$. Die Werte in Klammern geben den auf den Referenzfall bezogenen prozentualen Durchfluss an. In Abb. 9 sind die Verläufe der normierten Vertikalgeschwindigkeiten w^+ in der Höhe $z/H = 0.7$ im vertikalen Querschnitt bei $y/H = 0.5$ aufgetragen. Die CFD-Simulationen liefern geringere Vertikalgeschwindigkeiten in der Straßenschlucht als die LDA-Messungen. Im Durchschnitt aller untersuchten Konfigurationen ergeben die numerischen Berechnungen im Vergleich zu den LDA-Messungen einen um 32 % verringerten Volumenstrom des Canyon Vortex.

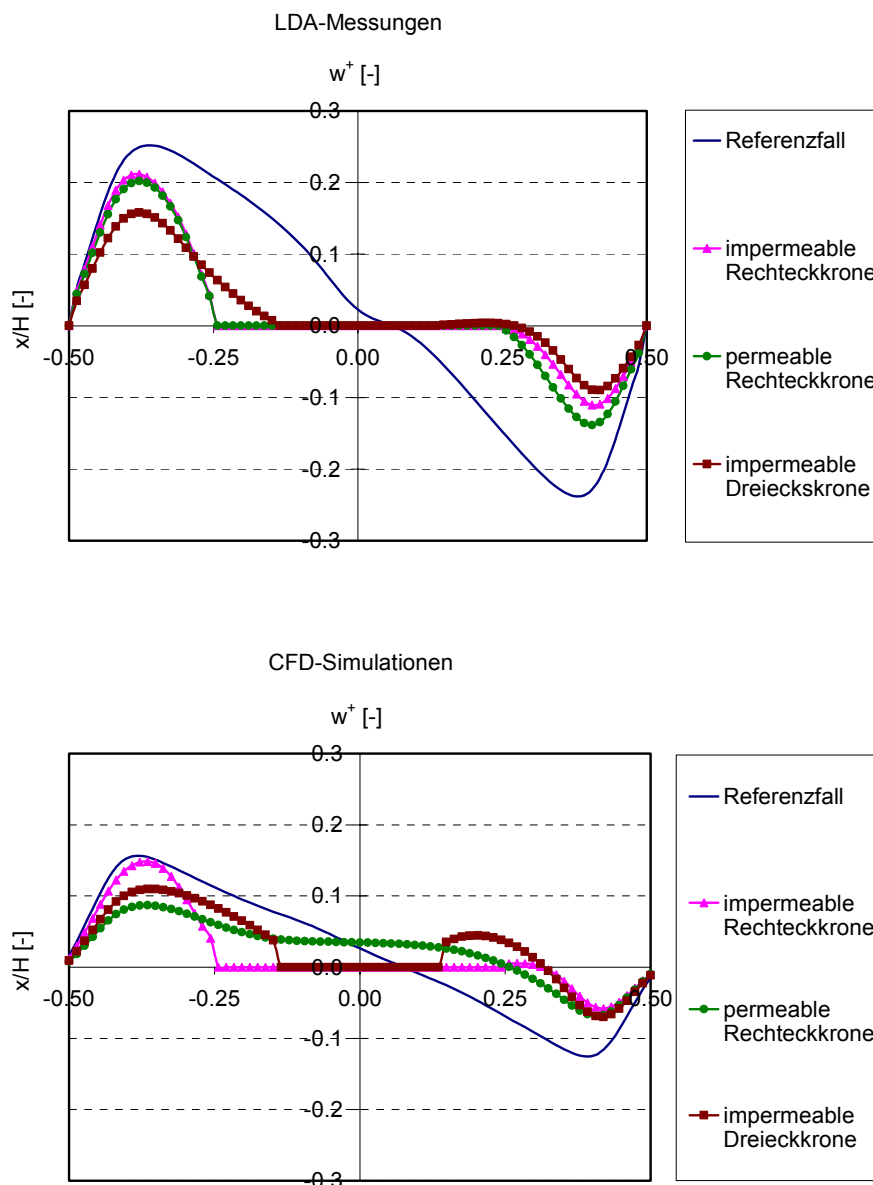


Abb. 9: Horizontale Verläufe der normierten Vertikalgeschwindigkeiten w^+ in der Straßenschlucht in Höhe $z/H = 0.7$ bei $y/H = 0.5$ aus LDA-Messungen (oben) und CFD-Simulationen (unten)

Konfiguration	experimentelle Ergebnisse		numerische Ergebnisse	
	aufwärtsgerichtet	abwärtsgerichtet	aufwärtsgerichtet	abwärtsgerichtet
Referenzfall	0.082	0.057	0.049	0.029
Rechteckkrone (impermeabel)	0.035 (42 %)	0.015 (26 %)	0.025 (51 %)	0.006 (21 %)
Rechteckkrone (permeabel)	0.032 (39 %)	0.011 (19 %)	0,034 (69 %)	0,009 (31 %)
Dreieckkrone (impermeabel)	0.034 (41 %)	0.020 (35 %)	0,034 (69 %)	0,008 (28 %)

Tab. 1: Normierte vertikale Volumenströme [-] durch die Horizontalebene $z/H = 0.7$ bei $y/H = 0.5$, Werte in Klammern geben die auf den Referenzfall bezogenen prozentualen Volumenströme an

Dankesworte

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die finanzielle Unterstützung (Projekt-Nr. Ru 345/28). Herrn Dr. Jordan Denev vom Institut für Technische Chemie und Polymerchemie der Universität Karlsruhe sei gedankt die Unterstützung bei der Durchführung der numerischen Simulationen.

Literatur

- 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
- 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
- FLOVENT 6.1, 2005: User's Manuel, Flomerics Limited, September 2005
- 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
- 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
- Gromke, C., Ruck, B., 2007a: 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.12.043>
- Gromke, C., Ruck, B., 2007b: 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
- Gromke, C., Ruck, B., 2007c: Flow and dispersion phenomena in urban street canyons in the presence of trees, Proc. 12th International Conference on Wind Engineering, Cairns, Australia, July 2007
- Gromke, C., Ruck, B., 2007d: Dispersion of traffic exhausts in urban street canyons with tree plantings - Experimental and numerical investigations -, PHYSMOD 2007, Orléans, France, August 2007
- Gromke, C., Ruck, B., 2007e: 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
- 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
- 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
- Pavageau, M., Schatzmann, M., 1999: Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon, *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 3961-3971