

Ausbreitung von Fallböen innerhalb dichtebesiedelter Städte

Spreading of downbursts within densely populated cities

Alexandra Richter¹, Bodo Ruck¹, Oliver-Robin Lang¹, Susanna Mohr², Michael Kunz²

¹ Institut für Hydromechanik, Karlsruher Institut für Technologie, Kaiserstr. 12, Karlsruhe

² Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie, Hermann-von-Helmholtz Platz 1, Eggenstein-Leopoldshafen

Starkwindereignisse, Fallböen, Windlasten, LDA, Druckmessungen, Blockstruktur
severe wind events, downbursts, wind loads, LDV, pressure measurements, block array

Zusammenfassung

Konvektive Fallböen, also starke Fallwinde, führen zu Windverhältnissen in Bodennähe, die stark von denen in einer atmosphärischen Grenzschicht abweichen. Die Wechselwirkung einer solchen Strömung mit einer komplexen Bebauungsstruktur wurde bisher nicht untersucht und ist ein Ziel des aktuellen Forschungsprojektes *ConWinG*. Hierzu wurden experimentelle Laboruntersuchungen durchgeführt, bei denen die durch einen Luftstrahl simulierte Fallböe auf eine idealisierte Modellstadt trifft. Untersucht wurden die Auswirkungen der Bebauungsdichte auf die Geschwindigkeiten innerhalb der Straßenschluchten. Die Geschwindigkeiten wurden mithilfe eines 2D LDA-Systems gemessen. Des Weiteren wurde die Druckverteilung an einzelnen Gebäuden innerhalb der Blockstruktur gemessen, um Windlasten zu bestimmen.

Die maximal erreichten Geschwindigkeiten innerhalb der Straßenschluchten sind unabhängig von der Bebauungsdichte λ_D . Die Strecke, über die diese hohen Geschwindigkeiten konserviert werden, nimmt jedoch mit abnehmender Bebauungsdichte ab. Die Windlasten sind im Zentrum der Fallböe hoch, an den Fassaden- und Dachflächen wird dort ein c_p -Wert von etwa 1,0 erreicht. Aufgrund der Instationarität der Böe kann es zu kurzzeitigen Spitzenwerten kommen, die die stationären Werte um bis zu 25 % übersteigen.

Einleitung

Fallböen sind starke Fallwinde konvektiven Ursprungs. Für intensive Ereignisse wurde im Deutschen auch das englische Wort *Downburst* übernommen. Aufgrund von Dichteunterschieden und Reibung von Hydrometeoren wird ein Luftpaket vertikal in Richtung Boden beschleunigt. Trifft dieses Luftpaket auf der Erdoberfläche auf, entsteht dort ein Gebiet hohen Druckes. Von diesem Gebiet wird die Luft radial beschleunigt und verursacht hohe Geschwindigkeiten in Bodennähe. Die Ausbreitung entlang der Erdoberfläche wird als Outflow bezeichnet. Die höchste jemals gemessene Geschwindigkeit in einem solchen Ereignis war 67 m/s in einer Höhe von 5 m in den USA (Fujita, 1990). Auch in Europa können Downbursts auftreten. Ihre Entwicklung ist dabei wahrscheinlicher als die Entstehung eines Tornados (Dotzek, 2004).

Fallböen oder Downbursts werden seit den 1970ern unter meteorologischen Gesichtspunkten untersucht. Hier wurde u. a. gezeigt, dass das mittlere Geschwindigkeitsprofil im Outflow,

dem eines Wandstrahls ähnelt (Hjelmfelt, 1988). Die Auswirkungen solcher Ereignisse auf isolierte Strukturen, wie Gebäude oder Freileitungsmasten, werden seit Ende der 1990er erforscht, z. B. in Chay und Letchford, 2002; Zhang et al., 2013; Jesson et al., 2015. Es hat sich dabei gezeigt, dass sich die Windlasten von denen in den Normen (DIN, EUROCODE, ASCE) unterscheiden. Grund hierfür ist die Annahme einer stationären, horizontalen Grenzschichtströmung zur Auslegung von Windlasten in den Normen. Das von einer Fallböe verursachte Strömungsfeld ist jedoch, zumindest zu Beginn, stark instationär, es besitzt eine nicht zu vernachlässigbare Vertikalkomponente und sein Geschwindigkeitsmaximum liegt in Bodennähe. Die Interaktion mit komplexeren Strukturen, wie die einer Stadt, wurde bisher kaum betrachtet.

Im Rahmen des aktuellen Projektes *ConWinG* (Convective Wind Gusts), das am Karlsruher Institut für Technologie gemeinsam vom Institut für Meteorologie und Klimaforschung, sowie dem Institut für Hydromechanik bearbeitet wird, werden sowohl die meteorologischen Randbedingungen in Deutschland, die für die Entstehung von konvektiven Böen erforderlich sind, wie auch die Strömungssituation während solcher Ereignisse innerhalb einer städtischen Bebauung betrachtet. Hierbei hat sich gezeigt, dass 50-jährige Böengeschwindigkeiten für konvektive Böen von 30,2 m/s ($\pm 3,1$ m/s) in ganz Deutschland zu erwarten sind, an einzelnen Messstationen jedoch bereits Geschwindigkeiten von mehr als 50 m/s beobachtet wurden (Mohr et al., 2017). Außerdem können hohe Geschwindigkeiten innerhalb von Straßenzügen deutlich länger erhalten bleiben, als dies von einer Böenausbreitung auf offenem Gelände bekannt ist. Wichtiger Parameter ist hierbei das Verhältnis von Gebäudehöhe zu Fallböendurchmesser (Richter et al., 2017). Instationäre Effekte können zu einer zusätzlichen Erhöhung der Geschwindigkeiten führen (Richter et al., 2016). In der aktuellen Arbeit wird darauf eingegangen, wie sich die Bebauungsdichte auf die Strömungsverhältnisse auswirkt und welche Windlasten innerhalb einer bebauten Umgebung während einer Fallböe zu erwarten sind.

Versuchsaufbau

Zur Simulation der Fallböe wird ein Luftstrahl verwendet, der von einem Radialgebläse erzeugt wird. Eine anschließende Verrohrungsstrecke (Länge ca. 3 m) mit Beruhigungskammer und mehreren Gittern sorgt für die gewünschten Eigenschaften der simulierten Fallböe: eine über den Querschnitt nahezu konstante Geschwindigkeit, eine geringe Aufweitung des Strahls und eine geringe Turbulenz.

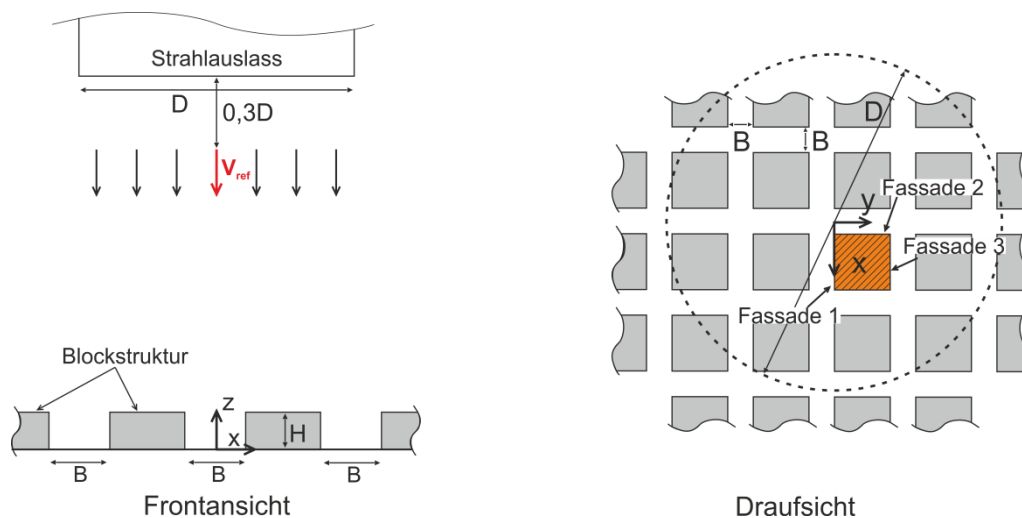


Abb. 1: Versuchsaufbau mit Blockstruktur.

Zum Einsatz kam ein Strahldurchmesser von $D = 355$ mm. Der Auslass ist $1,7D$ von der Bodenplatte entfernt. Die Referenzgeschwindigkeit ist die Vertikalgeschwindigkeit in der Mitte des Strahls und beträgt in den hier gezeigten Experimenten $V_{ref} = 5,7$ m/s. Der Aufbau ist in Abb. 1 gezeigt. Das markierte Quadrat zeigt die Position des Blocks, an dem die Druckmessungen durchgeführt werden.

Ein dichtbesiedeltes Stadtgebiet wird mithilfe einer Blockstruktur idealisiert. Die Geometrie der Straßenschluchten ist konstant mit Höhe $H = 26$ mm und Breite $B = 26$ mm. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt in der Mittelachse des Strahls auf dem Niveau des Straßenbodens.

Zunächst werden Geschwindigkeitsmessungen inner- und oberhalb der Straßenschlucht mithilfe eines 2D-LDA-Systems gemessen. Zusätzlich wird für eine Bebauungsdichte Druckmessungen an einem einzelnen Block innerhalb der Struktur durchgeführt.

Bebauungsdichte

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss der Bebauungsdichte untersucht. Die Bebauung wird dabei durch eine Blockstruktur idealisiert. Die Packungsdichte der Blockstruktur bzw. die Bebauungsdichte λ_p wird in der Literatur häufig über das Verhältnis von projizierter Dachfläche A_p zur gesamten Grundfläche A_T definiert (Grimmond und Oke, 1999), was schematisch in Abb. 2a skizziert ist. Dabei wird ein Gebäude meist als einzelner Block idealisiert, was in einer Vorortbebauung mit Einfamilienhäusern eine gute Approximation ist. In den Innenstädten sind es jedoch häufig Wohnblocks mit Innenhöfen, die unbebaut oder teilweise bebaut sein können. Trifft eine Fallböe auf ein solches Gebiet, strömt die Luft lediglich über die Straßenzüge ab. Die Innenhöfe fungieren dabei als Totzone. Für die aktuelle Untersuchung wird daher eine modifizierte Definition verwendet:

$$\lambda_D = \frac{A_D}{A_T}$$

wobei A_D die Fläche der Totzonen darstellt, also sowohl Gebäude wie auch geschlossene Innenhöfe, und A_T die Gesamtfläche. Diese Definition ist in Abb. 2b skizziert.

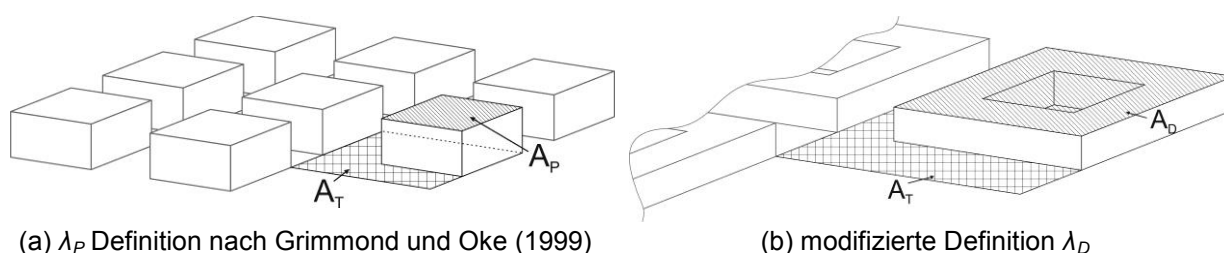


Abb. 2: Definition der Bebauungsdichte λ ; Gesamtfläche A_T , projizierte Dachfläche A_p , Totfläche A_D .

Nach diesem Prinzip werden die Bebauungsdichten beispielhaft für drei Stadtteile bzw. Stadtteilbereiche ermittelt. Zwei dieser Auswertungen sind in Abb. 3 gezeigt. In blau ist jeweils das untersuchte Gebiet dargestellt (entspricht A_T) und in pink die Totflächen A_D . Im ausgewerteten Bereich in Stuttgart Degerloch handelt es sich hauptsächlich um einzeln stehende Gebäude, jedoch recht nah beieinander, was zu einer Dichte von $\lambda_D = 0,44$ führt. In der Karlsruher Südweststadt (nicht gezeigt) sind die Wohnblocks meist umgeben von einer geschlossenen Häuserzeile, wodurch der gesamte Block als Totzone angesehen wird.

Dadurch kommt es zu einer recht hohen Dichte von $\lambda_D = 0,88$. Ein Beispiel, das am ehesten der im Experiment untersuchten gleichmäßigen Blockstruktur entspricht, ist das Planviertel Eixample in Barcelona mit $\lambda_D = 0,68$ (s. Abb. 3b).



(a) Stuttgart Degerloch $\lambda_D = 0,44$



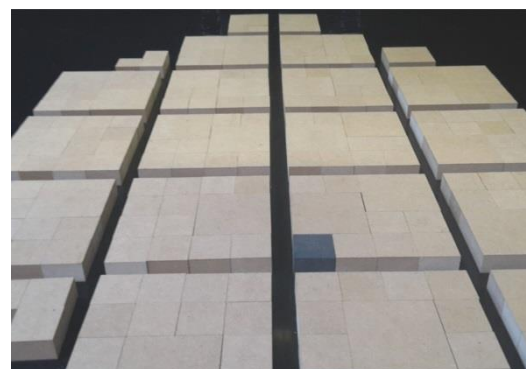
(b) Barcelona Eixample $\lambda_D = 0,68$

Abb. 3: Bebauungsdichten; Beispiele von realen Stadtteilen (Quelle: Open Street Map).

Die Bebauungsdichte soll in den Experimenten systematisch variiert werden. Aus früheren Arbeiten ist bekannt, dass sowohl das Verhältnis H/D wie auch die Straßengeometrie H/B einen Einfluss auf die Geschwindigkeiten, die Druckverteilung und Fluktuationen haben (Richter et al., 2017). Um in der folgenden Experimentenserie lediglich den Effekt der Bebauungsdichte herauszuarbeiten, werden diese beiden genannten Parameter konstant gehalten ($H/D = 0,07$; $H/B = 1,0$). Die Geometrie der Straßen ist dadurch vorgegeben. Die Bebauungsdichte lässt sich daher nur über die Grundfläche der Blöcke, also A_D variieren. Insgesamt werden vier verschiedene Konfigurationen mit $\lambda_D = 0,40$; $\lambda_D = 0,60$; $\lambda_D = 0,70$; $\lambda_D = 0,76$ untersucht. Die Modelle der dichtesten und lockersten untersuchten Bebauungsdichte sind in Abb. 4 dargestellt.



(a) $\lambda_D = 0,40$



(b) $\lambda_D = 0,76$

Abb. 4: Blockstrukturen; zwei der vier untersuchten Modellkonfigurationen.

Ergebnisse

Zunächst werden Geschwindigkeitsprofile in der Mitte der Straßenschlucht ($y = 0$) gemessen, also in der Straße, die direkt vom Auftreffzentrum der Fallböe bzw. des Strahls wegführt. Aus früheren Arbeiten ist bekannt, dass die Strömung innerhalb der Straße bis zu einer Distanz von $x/D = 1,1$ beschleunigt wird (Richter et al., 2017). Die Profile der Horizontalgeschwindigkeiten an dieser Stelle sind in Abb. 5a gezeigt, sowohl für die Blockstrukturen mit unter-

schiedlicher Bebauungsdichte, wie auch für eine einzelne durchgehende Straßenschlucht (SC) und für eine Ausbreitung der Böe auf ebener Platte (OT). Aus der Grafik wird ersichtlich, dass in allen Fällen dieselbe Geschwindigkeit erreicht wird. Die Profile innerhalb der Straße unterscheiden sich nicht wesentlich voneinander. Lediglich für eine Ausbreitung auf ebener Platte nimmt die Geschwindigkeit mit der Höhe schneller ab. Dies bedeutet, dass die Struktur in diesem zentrumsnahen Bereich ($x/D \leq 1,1$) keinen nennenswerten Einfluss auf die Beschleunigung der Strömung und die entstehenden Maximalgeschwindigkeiten hat. In Abb. 5b sind die Profile am Ende der Messstrecke dargestellt ($x/D = 2,6$). Hier lässt sich ein deutlicher Unterschied erkennen. Die höchsten Geschwindigkeiten sind in einer durchgehenden Straßenschlucht zu beobachten, mit abnehmender Bebauungsdichte λ_D nehmen auch die Geschwindigkeiten ab. Dies liegt daran, dass an den Kanten der einzelnen Blöcke Ablösungen entstehen, die eine Energiedissipation zur Folge haben. Je kleiner λ_D , desto mehr Kreuzungen befinden sich auf der Strecke $1,1 \leq x/D \leq 2,6$ und desto mehr Ablösekannten. Im Fall von $\lambda_D = 0,40$ entspricht das Profil annähernd dem einer Ausbreitung auf ebener Platte (OT). Die Konservierung hoher Geschwindigkeiten innerhalb bebauter Strukturen hängt demnach auch von der Bebauungsdichte ab, die maximal erreichten Geschwindigkeiten sind davon jedoch unabhängig.

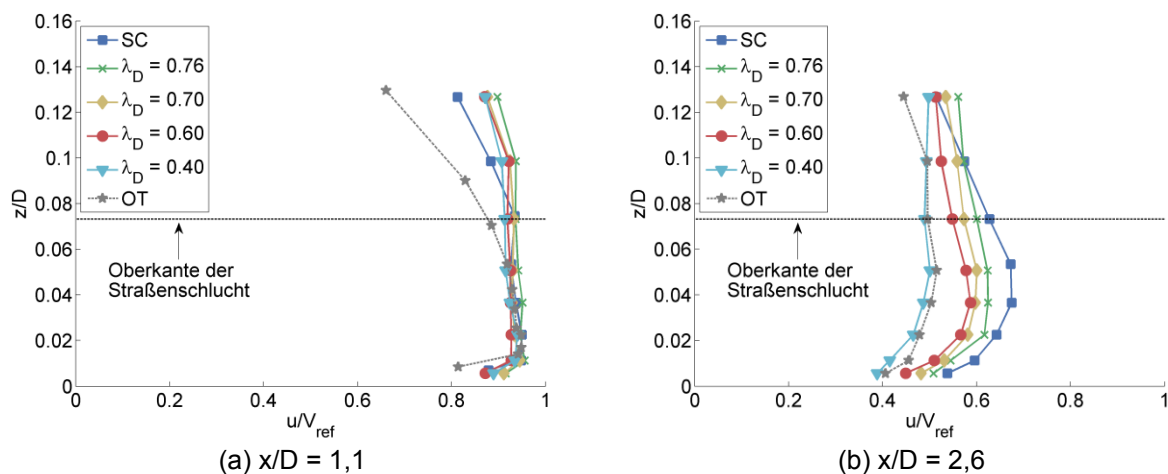


Abb. 5: Profile der Horizontalgeschwindigkeiten für verschiedene Bebauungsdichten λ_D , für die einzelne Straßenschlucht (SC) und für eine Ausbreitung auf offenem Gelände (OT).

Wie bereits beschrieben unterscheiden sich die Annahmen zur Auslegung von Windlasten in der DIN von den Charakteristiken einer Fallböe. So sind in der DIN keine Vertikalgeschwindigkeiten berücksichtigt. In einer Fallböe können diese jedoch nicht vernachlässigt werden und führen im Auftreffzentrum zu einem hohen Staudruck. Dies wird auch als Druckdom bezeichnet, welcher sich innerhalb kurzer Zeit aufbaut. Bei geschlossenen Gebäuden wirkt dieser statische Druck zusätzlich zum dynamischen. Um die Windlasten dort zu bestimmen, werden Druckmessungen an einem Block im Zentrum ($x/D = 0,1$) durchgeführt. Die Messposition ist in Abb. 1 farblich markiert. Abb. 6 zeigt die Verteilung des Druckbeiwerts c_p an diesem Block. Der c_p -Wert ist dabei wie folgt definiert:

$$c_p = \frac{\bar{p}}{0,5\rho V_{ref}^2}$$

Wobei \bar{p} der mittlere Druck an der jeweiligen Messstelle V_{ref} die Vertikalgeschwindigkeit des Strahls und ρ die Luftdichte ist. Anhand von Abb. 6 lässt sich erkennen, dass sowohl an den

Fassaden- wie auch auf der Dachfläche c_p -Werte zwischen 0,8 - 1,0 erreicht werden. Insbesondere die hohen Drücke auf dem Dach werden in der DIN nicht berücksichtigt.

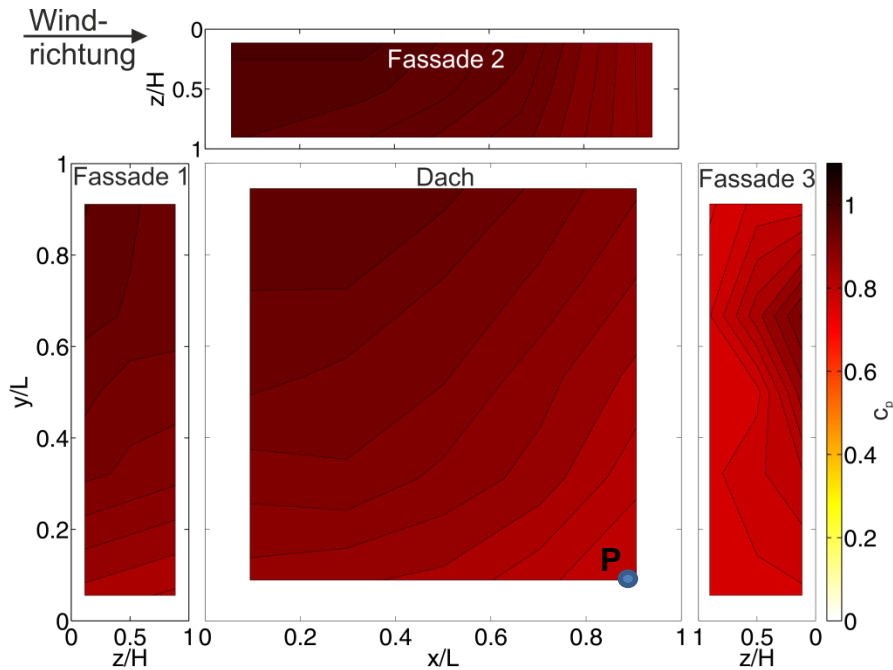


Abb. 6: c_p -Werte an einem Gebäude im Auftreffzentrum der Fallböe, stationär.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen stationäre Verhältnisse. Eine markante Eigenschaft einer Fallböe ist jedoch ihr plötzliches Auftreffen mit der damit verbundenen Instationarität. Die Druckmessungen werden daher für einen plötzlich anlaufenden Strahl wiederholt. Dabei wird zu Beginn ein Ringwirbel in der Scherschicht zwischen Strahl und ruhender Umgebungsluft erzeugt, welcher sich oberhalb der Stadtstruktur ausbreitet und innerhalb der Straßenschluchten zu einer zusätzlichen Erhöhung der Geschwindigkeiten führt. Auch der Druck am Gebäude erfährt dadurch einen kurzzeitigen Peak, wie beispielhaft für die Druckmessstelle P in Abb. 7 gezeigt ist. Die Messstelle P befindet sich am Rand der Dachfläche (s. Abb. 6).

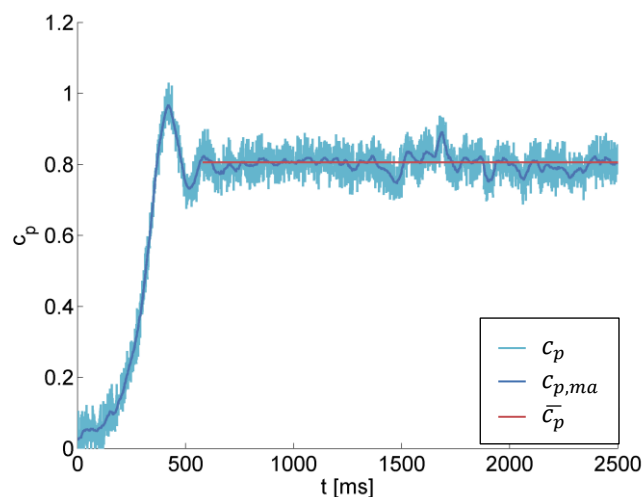


Abb. 7: c_p -Wert-Zeitreihe für den Messpunkt P auf dem Dach mit gleitendem Mittel $c_{p,ma}$ und stationärem Mittelwert \bar{c}_p .

Dieser Peak wird in der Literatur durch einen Overshoot-Koeffizient ausgedrückt (Takeuchi und Maeda, 2013), der hier wie folgt definiert ist:

$$R_{amp} = \frac{\max(c_{p,ma})}{\overline{c_{p,s}}}$$

Dabei ist $c_{p,ma}$ die Zeitreihe des gleitenden Mittels aus den instationären Versuchen, wie in Abb. 7 gezeigt, und $\overline{c_{p,s}}$ der Mittelwert aus der stationären Messung. In Abb. 8 ist R_{amp} für den Block im Zentrum dargestellt. Die Zeit, in der die Geschwindigkeit des Luftstrahls von null auf die Endgeschwindigkeit ansteigt, ist dabei 0,4 s. Anhand der Grafik lässt sich erkennen, dass durch das plötzliche Auftreffen der Fallböe kurzzeitig Druckbelastungen auftreten, die höher sind als die stationären Werte – in manchen Bereichen bis zu einem Faktor 1,25.

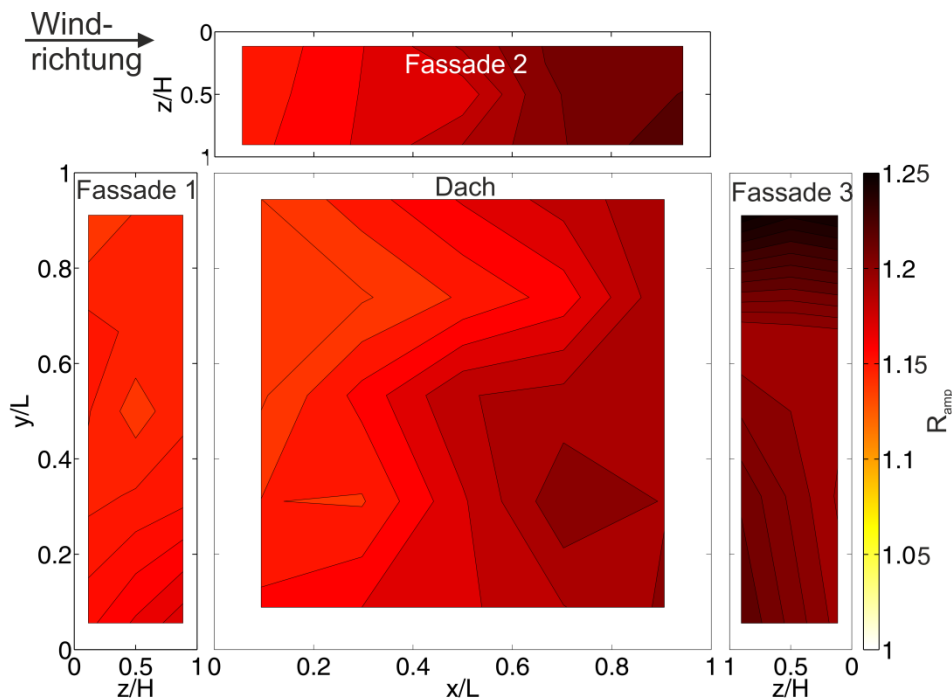


Abb. 8: Overshoot Koeffizient R_{amp} ; Verhältnis von instationärem Maximalwert zum stationären Mittelwert, für ein Gebäude im Auftreffzentrum der Böe ($x/D = 0$).

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts *ConWinG*, das die Interaktion von konvektiven Fallböen mit städtischen Bebauungsstrukturen untersucht, wurde in dieser Arbeit der Einfluss der Bebauungsdichte λ_D auf die Geschwindigkeiten untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass λ_D keinen Einfluss auf die maximal auftretende Horizontalgeschwindigkeit innerhalb der Straßenschlucht hat, die Geschwindigkeiten jedoch umso schneller abnehmen, je kleiner λ_D .

Innerhalb des Auftreffzentrums der Böe sorgt der Staudruck für hohe Drücke an allen Flächen, insbesondere der Dachfläche, die so in der DIN keine Berücksichtigung finden. Trifft die Böe plötzlich auf, werden kurzzeitige Maximaldrücke gemessen, die bis zu 25 % höher liegen können als bei einer stationären Betrachtung.

Dankesworte

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts „Erforschung kleinräumiger, extremer konvektiver Starkwindereignisse und deren Wechselwirkung mit Bebauungsstrukturen im urbanen Bereich“ (Ru 345/35-1 und KU 1923/2-1).

Literatur

- Chay MT, Letchford CW. 2002:** "Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst—Part A: stationary downburst observations". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90 (7) pp: 711–732
- Dotzek N. 2004:** "Tornado- und Downburstklimatologie". Deutscher Wetterdienst, Klimastatusbericht pp: 171–180
- Fujita TT. 1990:** "Downbursts: meteorological features and wind field characteristics". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 36 pp: 75–86
- Grimmond CS., Oke TR. 1999:** "Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form". *American Meteorological Society* 38 pp: 1262–1292
- Hjelmfelt MR. 1988:** "Structure and Life Cycle of Microburst Outflows Observed in Colorado". *Journal of Applied Meteorology* 27 (8) pp: 900–927
- Jesson M, Sterling M, Letchford CW, Haines M. 2015:** "Aerodynamic forces on generic buildings subject to transient, downburst-type winds". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 137 pp: 58–68
- Mohr S, Kunz M, Richter A, Ruck B. 2017:** "Statistical characteristics of convective wind gusts in Germany". *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*
- Richter A, Ruck B, Mohr S, Kunz M. 2016:** "Interaction of severe convective gusts with a street canyon". *Urban Climate*
- Richter A, Ruck B, Mohr S, Kunz M. 2017:** "Flow field within a street canyon in a simulated downburst". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* *submitted*
- Takeuchi T, Maeda J. 2013:** "Unsteady wind force on an elliptic cylinder subjected to a short-rise-time gust from steady flow". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 122 pp: 138–145
- Zhang Y, Sarkar PP, Hu H. 2013:** "An experimental study of flow fields and wind loads on gable-roof building models in microburst-like wind". *Experiments in Fluids* 54 (5) pp: 1511