

Zeitschrift: Regio Basiliensis : Basler Zeitschrift für Geographie
Herausgeber: Geographisch-Ethnologische Gesellschaft Basel ; Geographisches Institut der Universität Basel
Band: 52 (2011)
Heft: 1

Artikel: Dynamik der urbanen CO₂-Verteilung. Teil 1 : Messungen in einer Strassenschlucht
Autor: Lietzke, Björn
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1088232>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 15.01.2026

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

Dynamik der urbanen CO₂-Verteilung

Teil 1: Messungen in einer Strassenschlucht

Björn Lietzke

Zusammenfassung

Dass Städte im Vergleich zu ruralen Gebieten eine wichtigere CO₂-Quelle darstellen, ist bekannt. Wie gross allerdings ihr Beitrag zum globalen Kohlenstoffkreislauf ist, lässt sich nur schwer erfassen. Komplexe und sehr heterogene urbane Strukturen sowie die raum-zeitlich variablen CO₂-Quellen stellen grosse Herausforderungen an die Messtechnik und die Interpretierbarkeit der erfassten Daten. In der vorgestellten Kampagne werden mit mikrometeorologischen Messverfahren die lokalen CO₂-Austausch- und Transportprozesse in und über einer Strassenschlucht in Basel erfasst und untersucht. Die ersten Resultate zeigen innerhalb der Strassenschlucht – im Gegensatz zu den Messungen darüber – eine starke Abhängigkeit der vertikalen CO₂-Flüsse vom Verkehr. Aus den vertikalen Konzentrationsprofilen lässt sich ableiten, dass der Austausch zwischen der Strassenschlucht und den darüber liegenden Schichten stark von der Windrichtung und den daraus resultierenden Strömungsstrukturen abhängig ist.

1 Einleitung

Städte sind die grosse Unbekannte im globalen CO₂-Kreislauf. In den Ballungsräumen dieser Welt leben heute bereits rund 49 % der Weltbevölkerung (UN 2008) und werden Unmengen an fossilen Energieträgern verbrannt. Die daraus resultierenden CO₂-Emissionen und der Beitrag zum Treibhauseffekt sind jedoch schwer abschätzbar. Ansätze zur Quantifizierung des städtischen Beitrags – z. B. als Input für Modellierungen des globalen Kohlenstoffkreislaufs – basieren oft nur auf Abschätzungen des Verbrauchs fossiler Energieträger (Grimmond et al. 2002, 243) oder berücksichtigen nur die natürlichen Prozesse und ignorieren die direkten anthropogenen Beiträge schlichtweg (Churkina 2008, 110). Während der CO₂-Austausch über den verschiedensten ruralen Oberflächen mittlerweile relativ gut untersucht ist (z. B. FLUXNET [Baldocchi et al. 2001]), werden

Adresse des Autors: Dipl. geogr. Björn Lietzke, Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel, Klingelbergstrasse 27, CH-4056 Basel; E-Mail: bjoern.lietzke@unibas.ch

die Untersuchungen zur Erfassung der städtischen Bilanzen mit Hilfe direkter mikrometeorologischer Messtechnik erst in den letzten Jahren häufiger (z. B. *Grimmond et al.* 2002, *Nemitz et al.* 2002, *Moriwaki et al.* 2005, *Salmond et al.* 2005, *Vogt et al.* 2006, *Järvi et al.* 2009). Ein grosses Problem für solche Messungen ergibt sich aus der sowohl lokal- als auch meso-skali- äusserst heterogenen städtischen Oberflächenstruktur und den räumlich wie zeitlich sehr variablen CO₂-Quellen. Mit Eddy-Kovarianz-Messungen (z. B. *Stull* 1988) lassen sich Flüsse zwar zeitlich hochaufgelöst bestimmen, die Zuordnung der an einem Punkt gemessenen Flüsse zu einer Quellfläche gestaltet sich in einer komplexen urbanen Umgebung allerdings schwieriger. Extrapolationen von einzelnen, lokalen Punktmessungen auf ganze Städte kommen eher vagen Versuchen einer Abschätzung denn einer exakten Bilanz gleich. Flächendeckende Flussmessungen, welche der heterogenen urbanen Struktur gerecht werden, übersteigen schlicht die technischen Möglichkeiten. Um mit den verfügbaren Mitteln eine möglichst repräsentative Quantifizierung von CO₂-Bilanzen für ein Stadtgebiet vornehmen zu können, sind also räumlich wie zeitlich detaillierte Kenntnisse der Austauschprozesse im Quellgebiet eines Sensors erforderlich. Langjährige, kontinuierliche Messreihen der CO₂-Konzentrationen und -Flüsse an einem Standort sowie Untersuchungen der lokalen Einflüsse bilden hierfür die Grundvoraussetzungen.

Das Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung der Universität Basel betreibt seit dem Jahr 2004 an der Klingelbergstrasse in Basel kontinuierliche CO₂-Fluss-Messungen. Messkampagnen wie BUBBLE (Basel Urban Boundary Layer Experiment; *Rotach et al.* 2005, *Vogt et al.* 2006) haben viel zur Förderung des Verständnisses von urbanen Austauschprozessen beigetragen. Mit dem Ziel, die lokalen Prozesse im Quellgebiet und insbesondere nahe dem wichtigsten CO₂-Emittenten, dem Verkehr, besser zu verstehen, werden seit Oktober 2009 bis Ende 2010 an der Klingelbergstrasse zusätzlich Messungen der CO₂-Konzentrationen und -Flüsse in der Strassenschlucht vorgenommen. Ausserdem wurde im Juni 2009 am Aeschenplatz eine zweite urbane Messstation in Betrieb genommen. Dieser Bericht soll erste Einblicke in die raum-zeitliche CO₂-Dynamik in der Strassenschlucht geben und in Referenz auf den nachfolgenden Artikel (*Gartmann* 2011) die Möglichkeiten und Grenzen lokalräumlicher urbaner CFD-Modellierung ('Computational Fluid Dynamics') im Vergleich aufzeigen.

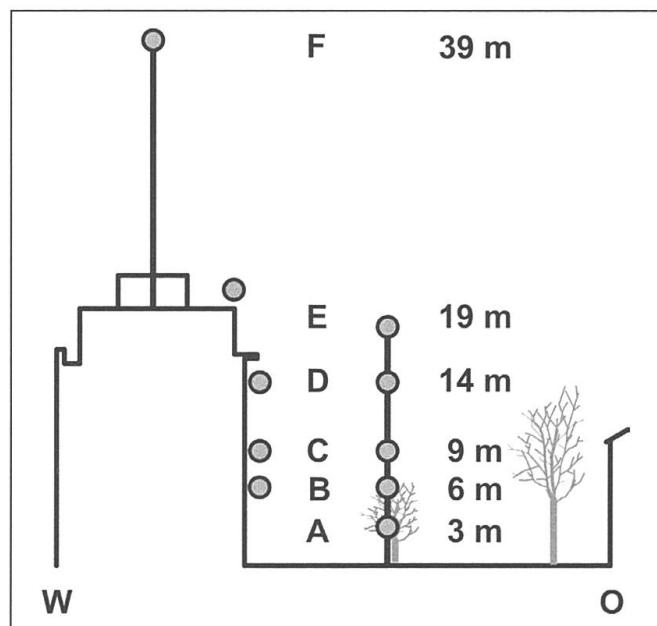
2 Methoden

Die Klingelbergstrasse ist Teil des vielbefahrenen inneren Cityrings von Basel. Der 19 m hohe Messmast befindet sich auf einem schmalen Grünstreifen zwischen zwei Fahrspuren in südlicher und einer Fahrspur in nördlicher Richtung (Abb. 1). Seit Oktober 2009 werden Konzentrationen und Flüsse von CO₂ und H₂O, Turbulenz und Wind sowie Temperatur und Luftfeuchte in der Strassenschlucht erfasst. Die in diesem Artikel verwendeten Daten decken den Zeitraum von Oktober 2009 bis Oktober 2010 ab. Sowohl am Mast wie auch nahe der Fassade des angrenzenden 21 m hohen Institutsgebäudes wird auf fünf Höhen (siehe Abb. 2. Mast: A-E; Fassade: B-F) Luft angesaugt und zu einem CO₂/H₂O-Infrarot-Gasanalysator geführt (closed-path LI-6262, LI-COR Inc.; Messfrequenz: 1 Hz). Vier Ultraschall-Anemometer (CSAT3, Campbell Scientific; 10 Hz; A,C-E), drei ventilierte Psychrometer (0.1 Hz; A, C & E) und ein open-path CO₂/H₂O-Infrarot-Gasanalysator (LI-7500, LI-COR Inc.; 10 Hz; E) erfassen Wind/Turbulenz, Temperatur/Feuchte resp. CO₂/H₂O in der Strassenschlucht. Am Mast auf dem Dach des Institutsgebäudes werden seit 2004 in total 39 m Höhe (F) ebenfalls ein LI-7500 und ein Ultraschall-Anemometer (Gill HS) betrieben. Die gesammelten Daten werden als aggregierte 30 min-Mittelwerte in einer Datenbank abgelegt. Die CO₂-Flüsse werden mit der Eddy-Kovarianz-Methode bestimmt und nach *Schotanus et al.* (1983) und *Webb et al.* (1980) korrigiert. Fehlerhafte Werte aufgrund von



Abb. 1 Karte der Umgebung des Mess-Standes an der Klingelbergstrasse. A: 19 m Mast in der Strassenschlucht; B: 39 m Mast auf dem Dach des Instituts.

Abb. 2 Schematischer Querschnitt durch die Strassenschlucht der Klingelbergstrasse von West (links) nach Ost (rechts) mit den beiden Messmasten in der Strassenschlucht und auf dem Dach des Institutsgebäudes. Die grauen Punkte entsprechen den Platzierungen der im Text genannten Instrumente (Höhen A = 3 m bis F = 39 m).



Beeinträchtigungen des optischen Pfads des LI-7500 (meist durch Niederschlag) werden automatisch gefiltert, unplausible Werte werden nach visueller Datenüberprüfung manuell entfernt. Während zweier Wochen (April/September) wurde ausserdem mit automatischen Plattenzählungen das Verkehrsaufkommen auf allen drei Fahrspuren erfasst. Diese Daten werden im Rahmen dieses Artikels als repräsentativ für die gesamte Messperiode angenommen.

Die mittlere Höhe der Gebäude um den Messstandort beträgt 15–20 m. Westlich der Klingelbergstrasse befinden sich überwiegend Wohnhäuser mit oftmals grünen Hinterhöfen. Im Osten und im Norden befinden sich mit dem Universitätsspital und dem Pharmazentrum zwei grössere und höhere Gebäudekomplexe sowie der grossflächig angelegte Garten des Spitals und weitere Gebäude der Universität (Abb. 1).

3 Ergebnisse & Diskussion

3.1 CO₂-Konzentrationen

Betrachtet man den Verlauf des mittleren Tagesgangs der CO₂-Konzentrationen (Abb. 3a1) sowohl am oberen Rand der Strassenschlucht (19 m) als auch in 39 m Höhe über ein Jahr hinweg, so sind bis auf eine aufgrund der vertikalen Distanz zu erwartende und relativ konstante Differenz von ca. 3–7 ppm keine markanten Unterschiede zwischen den Tagesgängen feststellbar. Die Konzentrationen erreichen am Nachmittag ihr tiefstes Niveau mit 390 resp. 394 ppm, steigen im Verlauf der Nacht kontinuierlich an und kulminieren am frühen Morgen bei 418 resp. 422 ppm. Nach Sonnenaufgang und mit einsetzender Auflösung der nächtlichen Inversion und anwachsender Mischungsschichthöhe beginnen die Konzentrationen wieder relativ rasch zu sinken. Vergleicht man den Tagesgang mit demjenigen des Verkehrs (Abb. 3c1), so zeigt sich, dass keine offensichtliche Abhängigkeit besteht. Die Morgenspitze des Werktagverkehrs tritt erst nach Erreichen des Maximums der CO₂-Konzentration auf. Das rasche Absinken und die Koinzidenz des Minimums am späten Nachmittag mit der Abendspitze des Verkehrs zeigen eindeutig, dass der Tagesgang nicht vom Verkehrsaufkommen abhängt, sondern von der Dynamik der Mischungsschicht und der effizienten vertikalen Durchmischung tagsüber dominiert wird. Der während des BUBBLE-Experiments an der Sperrstrasse in Basel erfasste Tagesgang der Mischungsschichthöhe (Vogt et al. 2006, 122) mit einem zur CO₂-Konzentration (Maximum gegen Morgen, Minimum nachmittags) fast gegenläufigem Verlauf (Minimum nachts, Maximum am frühen Nachmittag) unterstützt diese Vermutung.

3.2 CO₂-Flüsse

Ein anderes Bild zeigt sich beim mittleren Tagesgang der vertikalen CO₂-Flüsse (F_C ; Abb. 3b1–b3). Gemeinsam ist den auf 19 m und 39 m gemessenen Flüssen, dass sie – was in einer quellendominierten städtischen Umgebung durchaus zu erwarten ist und auch bereits anhand der im Tagesgang durchgehend vorhandenen Konzentrationsabnahme mit der Höhe (Abb. 3a) angenommen werden konnte – im Mittel immer positiv, d. h. nach oben gerichtet sind. Am oberen Rand der Strassenschlucht (19 m) zeigt F_C einen Tagesgang, der von der Charakteristik her dem des Verkehrsaufkommens auf der Strasse (Abb. 3c) stark ähnelt. Werktags (Mo–Fr) (b1) zeichnet sich das starke Ansteigen am Morgen, der leichte Einbruch um die Mittagszeit und die Abendspitze des Verkehrs in den Flüssen (mittleres Tagesmaximum F_C : $46 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 17:00 Uhr) klar ab. Auch an den Wochenenden (b2 & b3) ist die Charakteristik der Kurven ähnlich, sogar die kurzzeitige Samstag-Nacht-Spitze des Verkehrs um ca. 23 Uhr lässt sich in den Flüssen erkennen. Die CO₂-Flüsse in 39 m Höhe zeigen hingegen nur vormittags an Werktagen ein Ansteigen mit zunehmendem Verkehrsaufkommen und dem Anwachsen der Mischungsschicht (mittleres Tagesmaximum F_C : $22 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um 8:30 Uhr) und nehmen dann im Tagesverlauf kontinuierlich bis in die Nacht hinein ab. An den Wochenenden ist der Tagesgang auf dieser Höhe nur relativ schwach ausgeprägt. Die Entkoppelung der Flüsse vom Verkehr rührt vor allem daher, dass der Sensor in doppelter Gebäudehöhe misst und so eine viel grössere und heterogenere Quellfläche “sieht”. Auf diesem Niveau werden nicht nur die zusätzlichen vor allem im Winter vom Hausbrand verursachten Emissionen erfasst, auch die Grünflächen und Bäume in den Hinterhöfen scheinen sich als Senken bemerkbar zu machen. Das Signal des Verkehrs wird durch diese Vermischung mit anderen Signalen stark gedämpft.

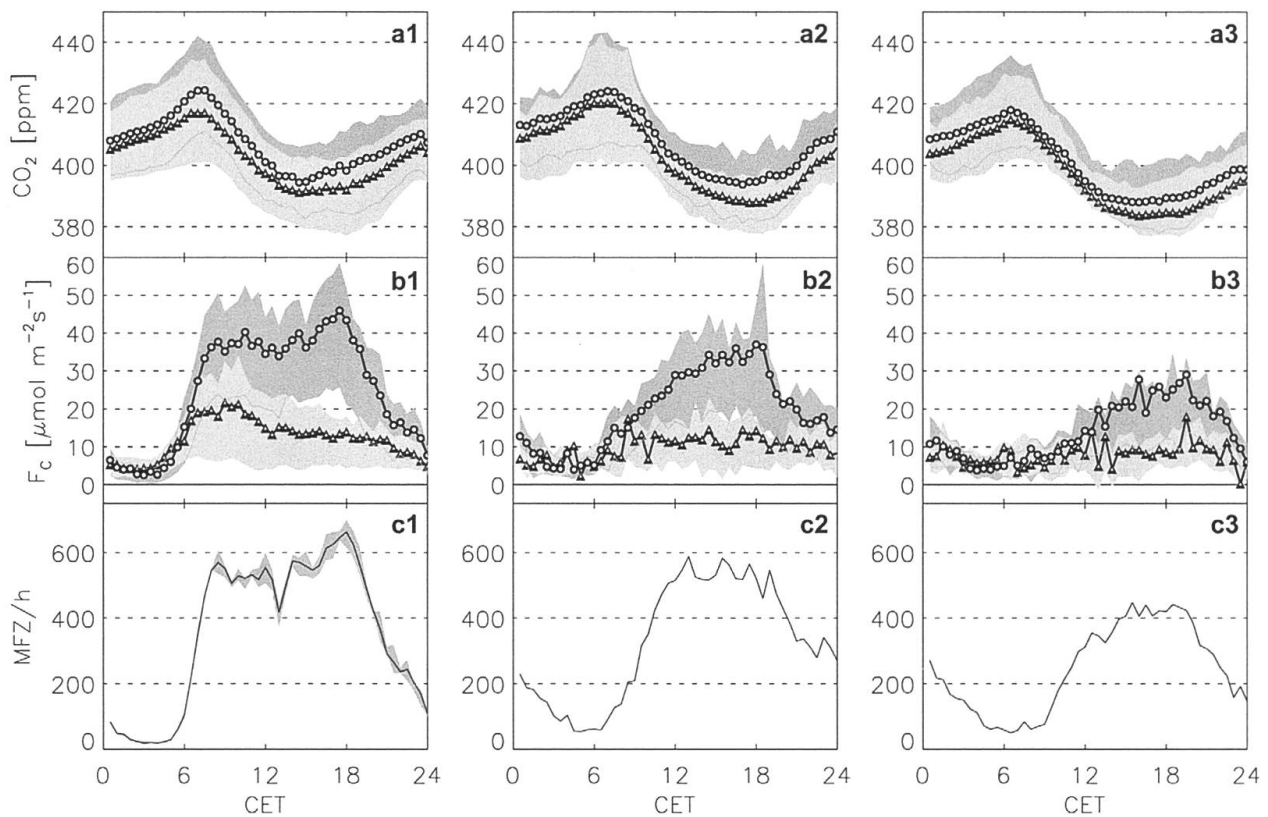


Abb. 3 Mittlere Tagesgänge der CO_2 -Konzentrationen (a) und der CO_2 -Flüsse (b) über ein Jahr hinweg sowie die mittlere Verkehrsdichte auf der Klingelbergstrasse (c) in der Woche vom 12.–19.04.2010. Jeweils als Mittel aller Werkstage (1; Mo–Fr), für Samstag (2) und Sonntag (3). Kreise entsprechen den Messungen in 19 m, Dreiecke jenen in 39 m Höhe. Die grauen Flächen markieren jeweils den Bereich, in dem 50 % der Messwerte liegen (hell = 39 m; dunkel = 19 m, wobei die dunkelgraue Linie den unteren Rand bildet).

Die grossen Unterschiede im Verhalten der CO_2 -Flüsse mit der Höhe lassen vermuten, dass die Austauschvorgänge innerhalb und über der dreidimensionalen urbanen Struktur äusserst komplex sind. CFD-Berechnungen (siehe Gartmann 2011) auf Basis von ähnlichen Daten aus dem Jahre 2005 (Eitel 2006) zeigen, dass v. a. die CO_2 -Verteilung in der Strassenschlucht stark von der jeweiligen Windrichtung und -stärke abhängig ist. Idealerweise verläuft die Klingelbergstrasse fast senkrecht zu den in Basel vorherrschenden Hauptwindrichtungen (West resp. Südost), so dass sich die interessanten Fälle mit Anströmungen quer zur Strassenschlucht relativ häufig einstellen. Betrachten wir die vertikale CO_2 -Verteilung in ihrem mittleren Tagesgang für Anströmrichtungen aus Westen respektive Osten (Abb. 4), so sehen wir sowohl im Verlauf des Profils in der Strassenmitte (SM) als auch beim Profil entlang der Hauswand (HW) deutliche Unterschiede. Im Normalfall erwarten wir eine Abnahme der Konzentrationen mit der Höhe, wie es das SM-Profil in Abb. 4b zeigt: Je stärker die Quellen (tagsüber), desto grösser der Gradient in Bodennähe (3–6 m), während oberhalb von 6 m eine relativ konstante Abnahme folgt. Der CO_2 -Austausch ist vom Boden der Strassenschlucht bis hinauf auf 39 m durchgehend gewährleistet. Ein anderes Bild zeigt sich bei den Westwind-Fällen (Abb. 4a): Die Strömung über das Institut hinweg scheint dahinter wie ein Deckel das CO_2 in der Strassenschlucht gefangen zu halten und den vertikalen Austausch zu reduzieren. Die CO_2 -Konzentration in der SM ist zwischen 6 und 19 m annähernd konstant, nimmt teilweise mit der Höhe sogar wieder zu. Erst oberhalb ist wieder ein deutlicher vertikaler Gradient zu erkennen. Dies spricht für eine gute Durchmischung innerhalb der Strassenschlucht und einen schlechten Austausch mit den darüber liegenden Luftschichten. Der starke Gradient zwischen 3 und 6 m rührt vermutlich daher, dass die Bäume auf dem Grünstreifen (ca. 6 m hoch) die Durchmischung in diesem Bereich beeinträchtigen. Das Interessante am Verlauf des HW-Pro-

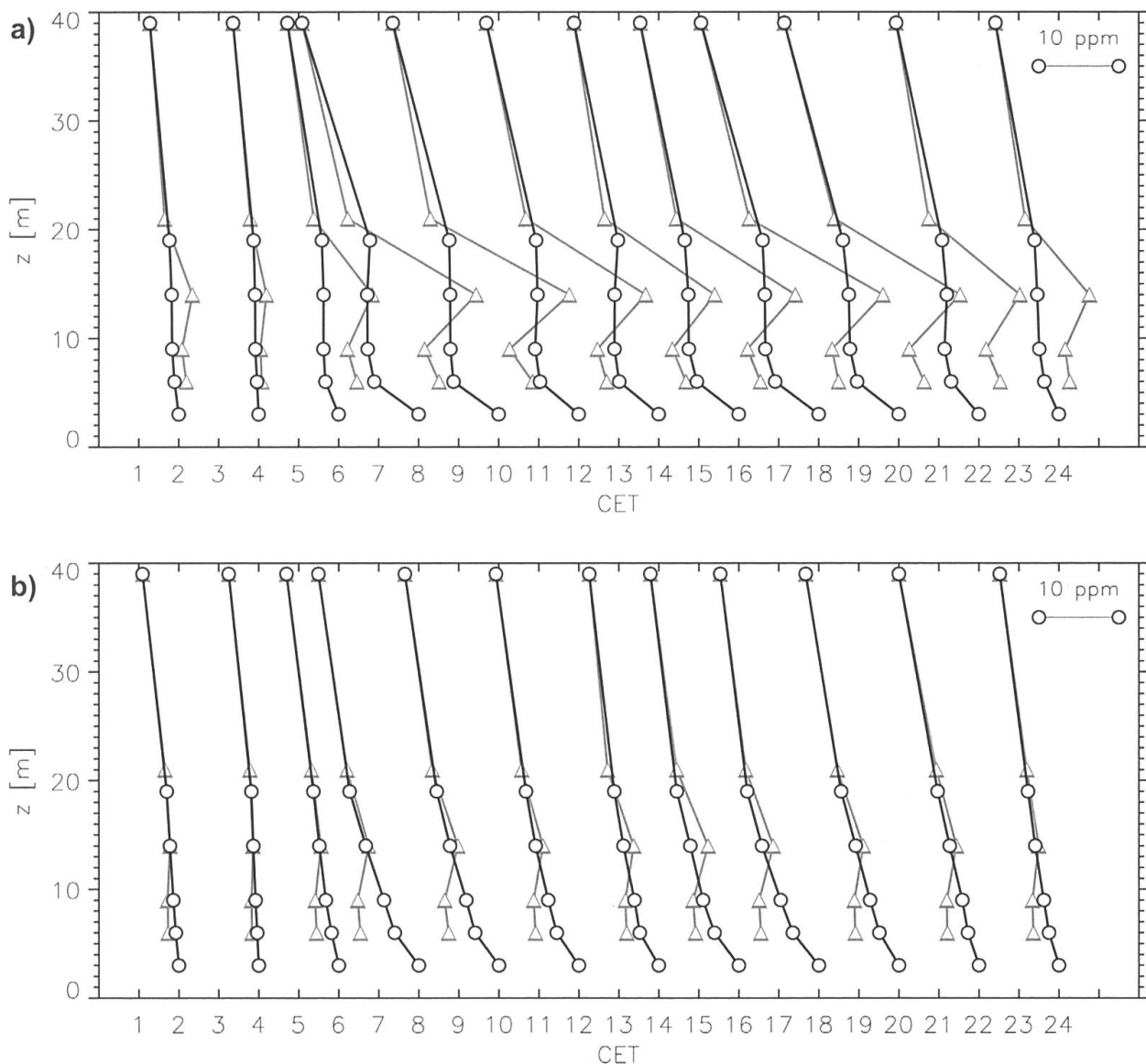


Abb. 4 Mittlere Tagesgänge der Vertikalprofile der CO_2 -Konzentrationen für Windrichtungen aus Westen (a) und Osten (b). Jedes Profil entspricht einem Mittel über die vorangehenden 2 Stunden, der unterste Kreis gibt die Tageszeit an. Schwarze Kreise stehen für das Profil in der Strassenmitte, graue Dreiecke für dasjenige an der Hauswand des Instituts.

files in Abb. 4a ist, dass es die in den CFD-Resultaten sichtbaren Wirbelbildungen und die damit verbundene CO_2 -Anreicherung im Lee des Gebäudes bestätigt: Bei Westwind sind tagsüber die Konzentrationen in 14 m an der HW um 12–16 ppm höher als in der SM. Auch auf dem 3 und 6 m-Niveau betragen die Differenzen noch 6–11 ppm. Die Konzentrationen an der HW sind sogar im gesamten mittleren Tagesverlauf höher als diejenigen in 3 m Höhe in der SM, nahe dem Verkehr.

Aus Abb. 4b lässt sich ableiten, dass die Strömung bei Ostwinden sowohl vertikal wie auch horizontal für eine bessere Durchmischung sorgt. Auch die an der HW in 6 bis 9 m Höhe niedrigeren Konzentrationen bei Ostwinden (max. 5 ppm im mittleren Tagesgang) lassen sich mit den Strömungsmustern der CFD Modellierung gut erklären: Dadurch, dass das Gebäude auf der Ostseite der Strasse niedriger ist, trifft der Wind auf den oberen Teil des Institutsgebäudes und es entsteht eine vertikale Wirbelstruktur (siehe Gartmann 2011, Abb. 6), welche CO_2 -ärmere Luft nach unten transportiert.

Sowohl die vertikalen als auch die horizontalen Differenzen bei Westwind zeigen in ihrem Tagesgang eine Abhängigkeit von den Verkehrsspitzen: Zu den Rushhour-Zeiten sind sie am grössten, um die Mittagszeit leicht schwächer und in der zweiten Nachthälfte am geringsten. Betrachtet man nur die verkehrsreicheren Werktage, sind die soeben beschriebenen Phänomene noch ausgeprägter erkennbar.

4 Fazit

Die bislang ausgewerteten und hier vorgestellten Daten bestätigen die eingangs gemachte Aussage, dass urbane CO₂-Bilanzen auf Basis einzelner lokaler Punktmessungen der komplexen heterogenen Struktur einer Stadt nicht gerecht werden. Die raum-zeitliche Verteilung und die unterschiedlichen Stärken der Quellen und Senken haben ganz klar Auswirkungen auf die CO₂-Flüsse und -Konzentrationen im lokal- bis mikroskaligen Bereich, um Gebäude und in Strassenschluchten. Ihre Einflüsse lassen aber mit der Höhe nach und vermengen sich über den Gebäuden mit anderen zu einem Mischsignal. Lokale Eigenheiten wie z. B. die Charakteristik der Quellen, die dominierenden Windrichtungen, das Verhalten lokaler Inversionen im Tagesgang, Strömungsstrukturen in einer Strassenschlucht oder das Vorhandensein von Vegetation – sei es als Strömungshindernis oder als CO₂-Senke – beeinflussen die lokalen Austauschprozesse.

Die CO₂-Konzentrationen weisen sowohl über als auch in der Strassenschlucht einen Tagesgang auf, der mit den CO₂-Emissionen des Verkehrs nicht erklärt werden kann. Vielmehr zeigt sich hier die direkte Abhängigkeit von der Höhe der Mischungsschicht. Der Tagesgang der CO₂-Flüsse in 19 m Höhe über der Klingelbergstrasse kann anhand des Verkehrs am Boden hingegen gut nachvollzogen werden, während diese Abhängigkeit in 39 m Höhe viel geringer ausgeprägt (werktags) bzw. kaum mehr nachweisbar ist (am Wochenende). Das Ansteigen der Mischungsschichthöhe am Morgen scheint hier ebenfalls einen stärkeren Einfluss zu haben als die Unterschiede in der Quellstärke – die abendliche Rushhour ist in den Flüssen nicht sichtbar. Da CO₂ zwar Bestandteil der Luft ist, sich aber nicht einfach in selbige auflösen kann, besteht die Vermutung, dass das in der Strassenschlucht produzierte CO₂ je nach Windrichtung schlicht am Sensor in 39 m Höhe vorbeitransportiert und somit von diesem nicht erfasst wird. Dies bedeutet, dass eine Positionierung der Messungen in vielleicht nur weniger als hundert Metern Distanz ein völlig anderes Bild der CO₂-Flüsse ergeben könnte.

Es lässt sich feststellen, dass die vermuteten lokalen Prozesse anhand der Daten relativ gut nachvollzogen werden können und CFD-Modellierungen ein valables und für die Zukunft vielversprechendes Mittel darstellen, um – ausgehend von lokalen Prozessen – auch Aussagen über grössere Bereiche machen zu können. Die Stadt als vielfältiger, komplexer Interaktionsraum von gebauten Strukturen, Mensch, Verkehr, Natur und meteorologischen Grössen stellt weiterhin grosse und spannende Herausforderungen an die Erforschung der urbanen Beiträge zum globalen CO₂-Kreislauf und an die mikrometeorologischen Messverfahren im Generellen, welche auch in Zukunft wohl nicht so leicht beseitigt werden können.

Literatur

- Baldocchi D.D., Falge E., Gu L., Olson R., Hollinger D., Running S., Anthoni P., Bernhofer C., Davis K., Fuentes J., Goldstein A., Katul G., Law B., Lee X., Malhi Y., Meyers T., Munger J.W., Oechel W., Paw U K.T., Pilegaard K., Schmid H.P., Valentini R., Verma S., Vesala T., Wilson K. & Wofsy S. 2001. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82: 2415–2434.
- Churkina G. 2008. Modeling the carbon cycle of urban systems. *Ecological Modeling* 216: 107–113.
- Eitel J. 2006. *CO₂-Flüsse und -Konzentrationen über einer urbanen Fläche im Jahreszyklus*. Diplomarbeit, Universität Basel, 1–93.
- Gartmann A. 2011. Dynamik der urbanen CO₂-Verteilung. Teil 2: CFD Simulation in einer Strassenschlucht. *Regio Basiliensis* 52(1): 45–53.
- Grimmond C.S.B., King T.S., Cropley F.D., Nowak D.J. & Souch C. 2002. Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago. *Environmental Pollution* 116: 243–254.
- Järvi L., Mammarella I., Eugster W., Ibrom A., Siivola E., Dellwik E., Keronen P., Burba G. & Vesala T. 2009. Comparison of net CO₂ fluxes measured with open- and closed-path infrared gas analyzers in an urban complex environment. *Boreal Environment Research* 14: 499–514.
- Moriwaki R., Kanda M. & Nitta H. 2005. Carbon dioxide build-up within a suburban canopy layer in winter night. *Atmospheric Environment* 40: 1394–1407.
- Nemitz E., Hargreaves K.J., McDonald A.G., Dorsey J.R. & Fowler D. 2002. Micrometeorological measurements of the urban heat budget and CO₂ emissions on a city scale. *Environ. Sci. Technol.* 36(14): 3139–3146.
- Rotach M.W., Vogt R., Bernhofer C., Batchvarova E., Christen A., Clappier A., Feddersen B., Gryning S.-E., Martucci G., Mayer H., Mitev V., Oke T.R., Parlow E., Richner H., Roth M., Roulet Y.A., Ruffieux D., Salmond J., Schatzmann M. & Voogt J. 2005. BUBBLE – an urban boundary layer meteorology project. *Theoretical and Applied Climatology* 81: 231–261.
- Salmond J.A., Oke T.R., Grimmond C.S.B., Roberts S. & Offerle B. 2005. Venting of heat and carbon dioxide from urban canyons at night. *Journal of Applied Meteorology* 44: 1180–1194.
- Schotanus P., Nieuwstadt F.T.M. & De Bruin H.A.R. 1983. Temperature measurements with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. *Boundary-Layer Meteorology* 26: 81–93.
- Stull R.B. 1988. *An introduction to boundary layer meteorology*. Dordrecht, 1–671.
- UN 2008. *World Urbanization Prospects. The 2007 Revision*. New York, 1–230.
Online verfügbar: www.un.org/esa/population/publications/wup2007/2007WUP_Highlights_web.pdf [Eingesehen am 10.11.2010]
- Vogt R., Christen A., Rotach M.W., Roth M. & Satyanarayana A.N.V. 2006. Temporal dynamics of CO₂ fluxes and profiles over a Central European city. *Theoretical and Applied Climatology* 84: 117–126.
- Webb E.K., Pearman G.I. & Leuning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 106: 85–100.