



Technische  
Universität  
Braunschweig



INSTITUT FÜR GEOÖKOLOGIE  
Klimatologie und  
Umweltmeteorologie

15. Fachsymposium Stadtgrün, 13. November 2025, Berlin

## Potentiale der Kohlenstoff- und Wasserspeicherung von Dachbegrünung - ein Baustein für städtischen Klimaschutz und Klimaanpassung



**Stephan Weber, Niklas Markolf**  
Technische Universität Braunschweig

## Forschung an Gründächern - Einleitung

- Gebäudebegrünung als „**natur-basierte**“ Lösung für städtischen Klimaschutz bzw. Klimaanpassung (direkte und indirekte Effekte)
- **Ökosystemleistungen:** Wasserspeicherung, Erhöhte Verdunstung, Minderung der lokalen Lufttemperatur, Aufnahme von CO<sub>2</sub>
  - *Gründachpotential Braunschweig (Grunwald et al. 2017): status-quo 0,8 m<sup>2</sup>/Einwohner, Potential 12 m<sup>2</sup> Gründach/Einwohner*
- Es fehlen **belastbare/langfristige Beobachtungsdaten** zum Austausch von Wärme, Wasserdampf und CO<sub>2</sub> zwischen Gebäudebegrünung und der Atmosphäre (u.a. Bewertungsverfahren für nature-based carbon credits, freiw. Kohlenstoffmarkt)
- Das gilt insbesondere für CO<sub>2</sub>-Flüsse von (extensiven) Gründächern bzw. mehrjährige Untersuchungen (annuelle Variabilität)



## Forschung an Gründächern - Einleitung

### Motivation →

- Quantifizierung der direkten CO<sub>2</sub>-Aufnahme und Verdunstungsleistung eines Gründachs unter Berücksichtigung der saisonalen und annuellen Variation (Konopka et al., 2021)
- Erstmaliger Einsatz einer weltweit etablierten mikrometeorologischen Methode auf einem Gründach (Heusinger und Weber, 2017)

### Forschungshypothesen →

- Ein extensives Gründach ist eine urbane Kohlenstoffsenke, d.h. es nimmt mehr CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre auf, als es veratmet
- Der Wassergehalt des Gründachsubstrats hat wichtigen Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Aufnahmekapazität



## Mikrometeorologische Messmethodik

**Eddy-Kovarianz – Methode zur direkten Messung des turbulenten Austauschs zwischen Oberfläche und Atmosphäre →**

- Schnelle, synchrone Messungen der vertikalen Windgeschwindigkeit und weiterer Größen (z.B. Temperatur, Wasserdampf, CO<sub>2</sub>)
- Ultraschallanemometer und optische Gasanalysatoren@10 Hz
- Messsignal ist repräsentativ für bestimmten Bereich der Landoberfläche, sog. turbulenter Quellbereich



- Positive Kovarianz zeigt einen in die Atmosphäre gerichteten Fluss
- Negative Kovarianz zeigt einen gegen die Oberfläche gerichteten Fluss

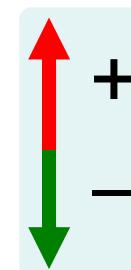
## Mikrometeorologische Messmethodik

**Eddy-Kovarianz – Methode zur direkten Messung des turbulenten Austauschs zwischen Oberfläche und Atmosphäre →**

- Schnelle, synchrone Messungen der vertikalen Windgeschwindigkeit und weiterer Größen (z.B. Temperatur, Wasserdampf, CO<sub>2</sub>)
- Ultraschallanemometer und optische Gasanalysatoren@10 Hz
- Messsignal ist repräsentativ für bestimmten Bereich der Landoberfläche, sog. turbulenter Quellbereich



Burba, 2013

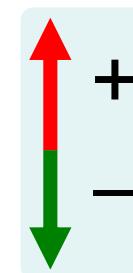
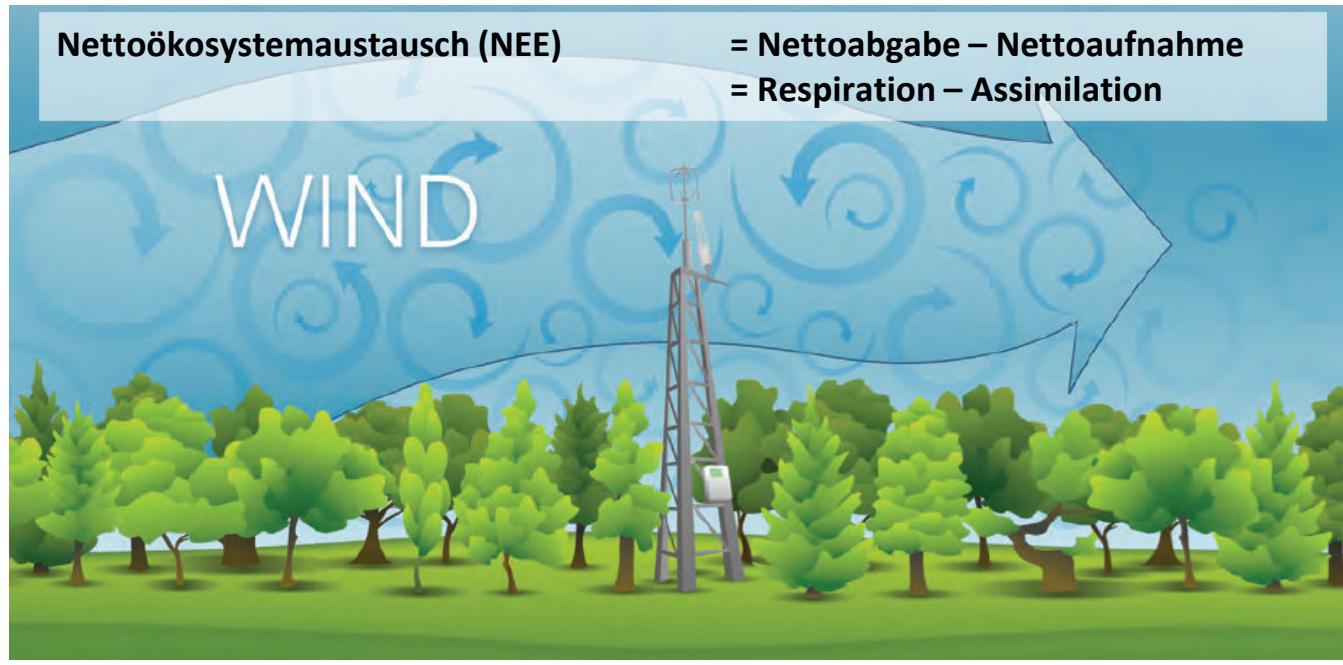


- Positive Kovarianz zeigt einen in die Atmosphäre gerichteten Fluss
- Negative Kovarianz zeigt einen gegen die Oberfläche gerichteten Fluss

## Mikrometeorologische Messmethodik

**Eddy-Kovarianz – Methode zur direkten Messung des turbulenten Austauschs zwischen Oberfläche und Atmosphäre →**

- Schnelle, synchrone Messungen der vertikalen Windgeschwindigkeit und weiterer Größen (z.B. Temperatur, Wasserdampf, CO<sub>2</sub>)
- Ultraschallanemometer und optische Gasanalysatoren@10 Hz
- Messsignal ist repräsentativ für bestimmten Bereich der Landoberfläche, sog. turbulenter Quellbereich



- Positive Kovarianz zeigt einen in die Atmosphäre gerichteten Fluss
- Negative Kovarianz zeigt einen gegen die Oberfläche gerichteten Fluss

## Untersuchungsstandorte

Eddy Kovarianz auf zwei extensiven Gründächern →

Berlin → Flughafen BER, seit 07/2014 (8.600 m<sup>2</sup>, 2012 gebaut)



Obernburg/Main → ICO Logistikcenter, seit 03/2022 (70.000 m<sup>2</sup>, 2019 gebaut)



## Messungen an den Standorten BER, ICO

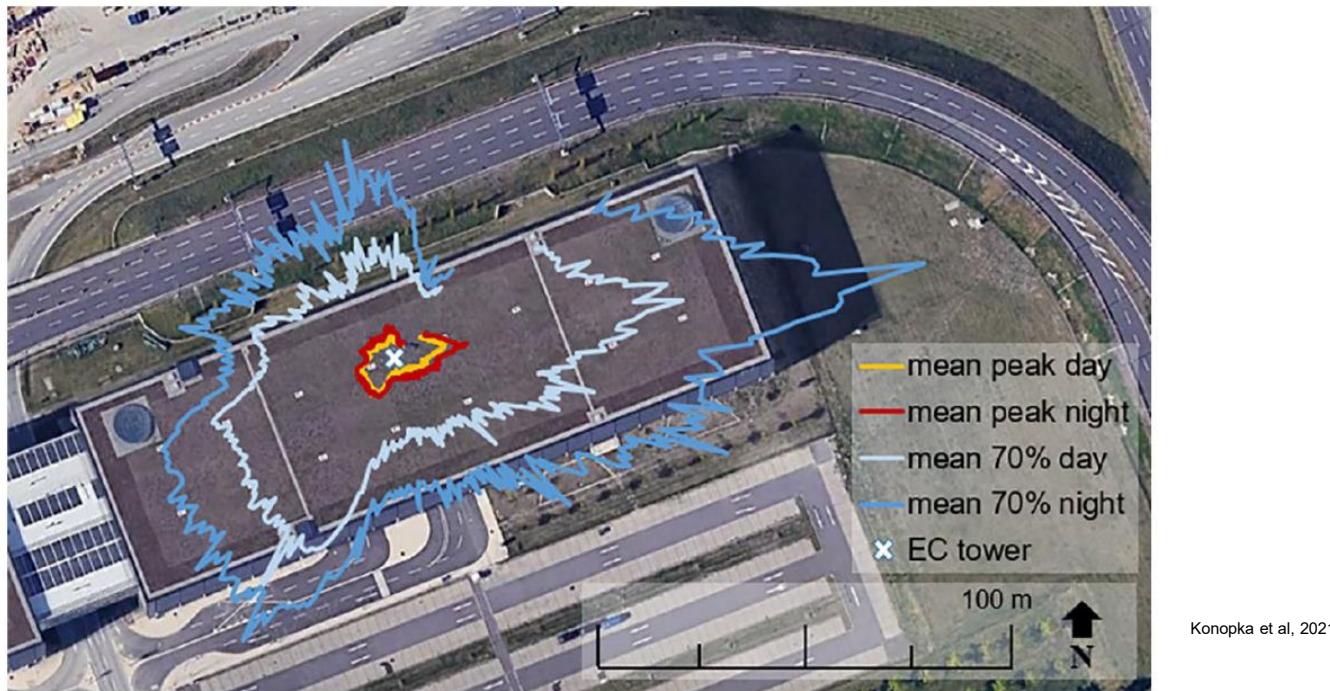


**Untersuchungszeitraum: 2015 - 2020 bzw. bis heute**

- Energiebilanz →  $Q^*$ ,  $Q_H$ ,  $Q_E$ ,  $Q_G$
- CO<sub>2</sub>-Fluss →  $F_{CO_2}$ , Net Ecosystem Exchange (NEE)
- Meteorologische Größen → Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind, Niederschlag
- Substrateigenschaften → Wassergehalt, Temperatur, C-Gehalt
  
- EddyPro-Software zur Datenprozessierung, Etablierte Methoden zur Datenqualitätsprüfung
- Meteorological Year (MY) vom 1 September bis 31 August des Folgejahres (z.B. MY15 = 01. Sep 14 – 31 Aug. 15)

## Ergebnisse – Turbulenter Quellbereich

- Der Quellbereich repräsentiert das von der EC gemessene Signal, d. h. die „Herkunft“ des Flusses
- Der maximale Beitrag zum Quellbereich des turbulenten Flusses repräsentiert eindeutig das Gründach

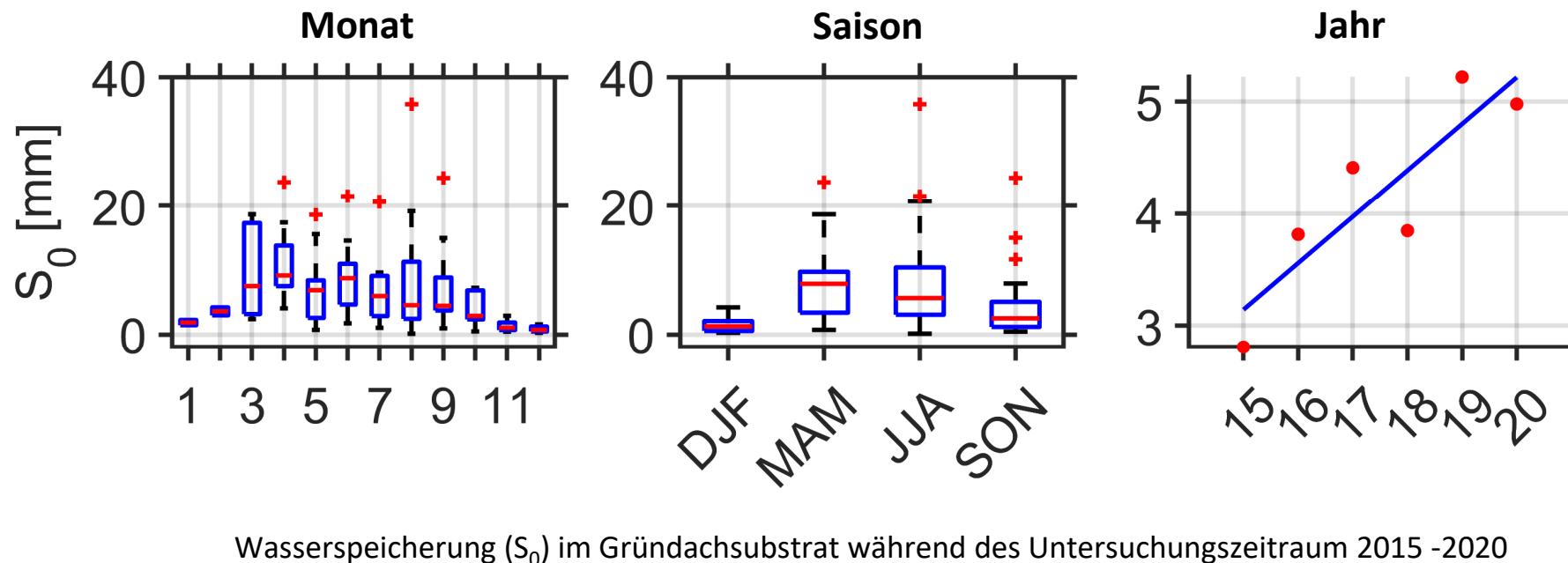


Abmessungen des Quellbereichs in Metern für Tag und Nacht (Quelle des Luftbilds © Google Earth).

## Ergebnisse – Wasserspeicherung und Verdunstung

Potential der Wasserspeicherung des extensiven Gründachs am BER →

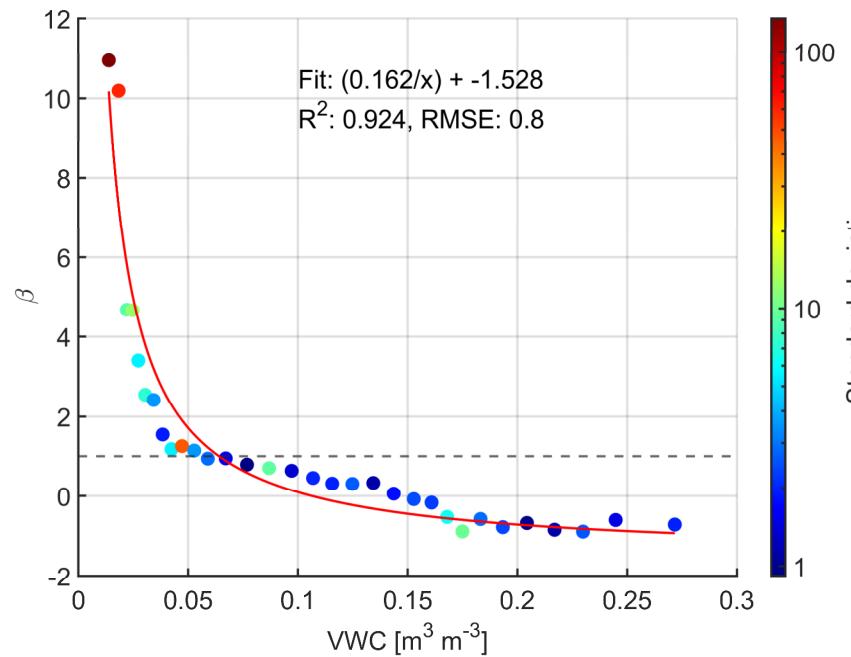
- Bestimmung der Wasserspeicherung durch sog. *recession analysis*
- Wasserspeicherung ( $S_0$ ) = Gesamtvolumen der Verdunstung während des vollständigen Abtrocknungsprozesses
- Wasserspeicherung 4,2 mm (Median) mit max. Speicherpotential von 35,8 mm.



## Ergebnisse – Verdunstung und Bowen-Verhältnis

### Einfluss des Wassergehalts auf Wärmeabgabe des Gründachs →

- Bodenwassergehalt (VWC) beeinflusst Partitionierung der turbulenten Wärmeabgabe ( $\beta = \text{fühlbarer}/\text{latenter Wärmefluss}$ )
- Mit geringem Wassergehalt ( $< 0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) wird Energie hauptsächlich über fühlbare Wärme abgegeben

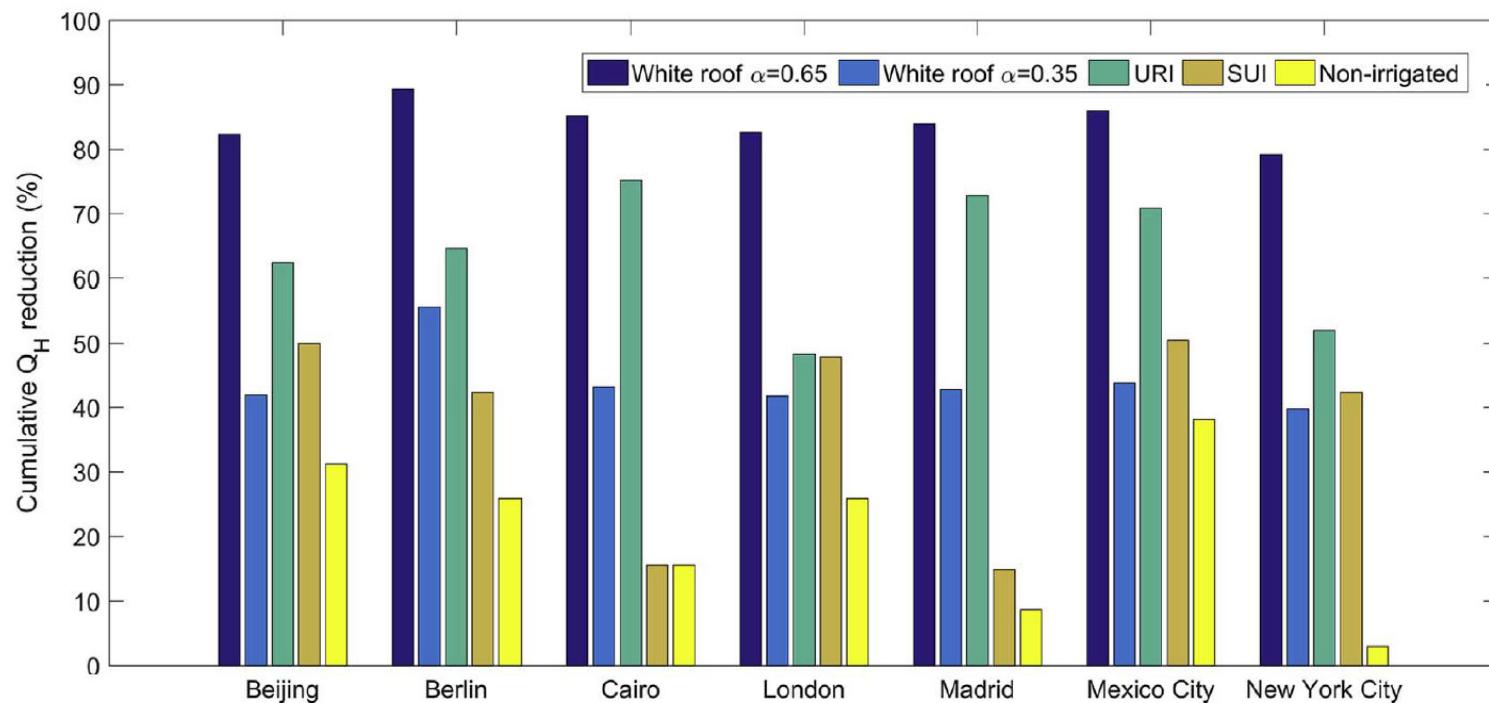


Zusammenhang von Substratwassergehalt und Bowen-Verhältnis während des Untersuchungszeitraum 2015 -2020

## Ergebnisse – Verdunstung und Lufttemperaturreduktion

### Modellierung der Reduzierung städtischer Überschusswärme durch Verdunstungskühlung von Gründächern

- Gründachmodul in EnergyPlus (modifiziert durch Implementierung einer Interzeptions- und verbesserten Abflussberechnung)
- Reduktion städtischer Überwärmung um 15 - 51 % bei nachhaltiger Bewässerung bzw. 48 - 75 % bei uneingeschränkter Bewässerung

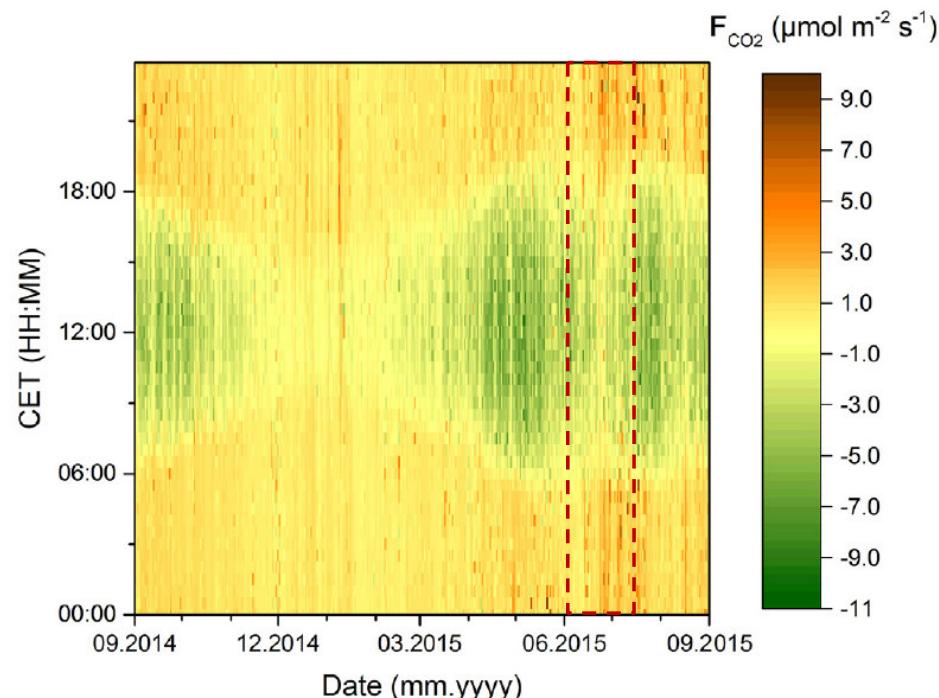


Reduktion der städtischen Überwärmung: Kumulatives  $Q_H$  der nachhaltigen Bewässerung (SUI), des Szenarios mit uneingeschränkter Bewässerung (URI) und der Szenarien mit weißen Dächern, normiert durch das kumulative  $Q_H$  des Szenarios mit schwarzen Dächern für jeden Standort während Hitzeperioden.

## Ergebnisse – CO<sub>2</sub> Austausch

### Saisonale Variation des CO<sub>2</sub> Austauschs am BER →

- Typische saisonale Variation im Vergleich zu anderen Ökosystemen
- EC-Methode reagiert sensitiv auf unterschiedliche Umwelt- bzw. Wetterbedingungen (z.B. trockene Phase Juni/Juli)

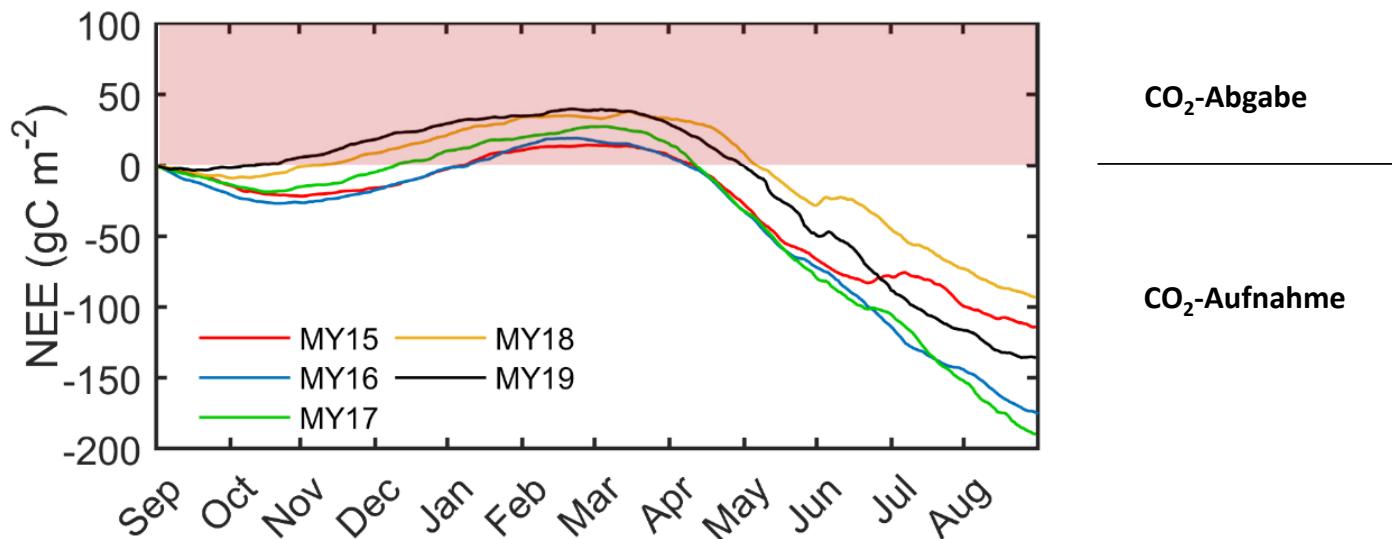


Tägliche und saisonale Schwankungen der CO<sub>2</sub>-Flüsse ( $F_{CO_2}$ ) von 09/2014 - 08/2015 (MY15)

## Ergebnisse - Nettoökosystemaustausch

### Jährliche Variation des CO<sub>2</sub>- Austauschs am BER →

- Gründach ist Netto-Senke für CO<sub>2</sub>: mittlerer NEE von  $-141 \pm 36 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  (methodische Unsicherheit  $\pm 16 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ )
- Andere Gründachstudien:  $-306 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  (Japan; Kuronuma und Watanabe, 2017a),  $-398 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  (Japan; Kuronuma und Watanabe 2018),  $-190 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  (USA; Getter et al., 2009),  $-440 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  (Canada; Gaumont-Guay und Halsall, 2013)
- Durchschnitt europäischer Grasslandstandorte:  $-150 \pm 200 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  (Gilmanov et al., 2007)



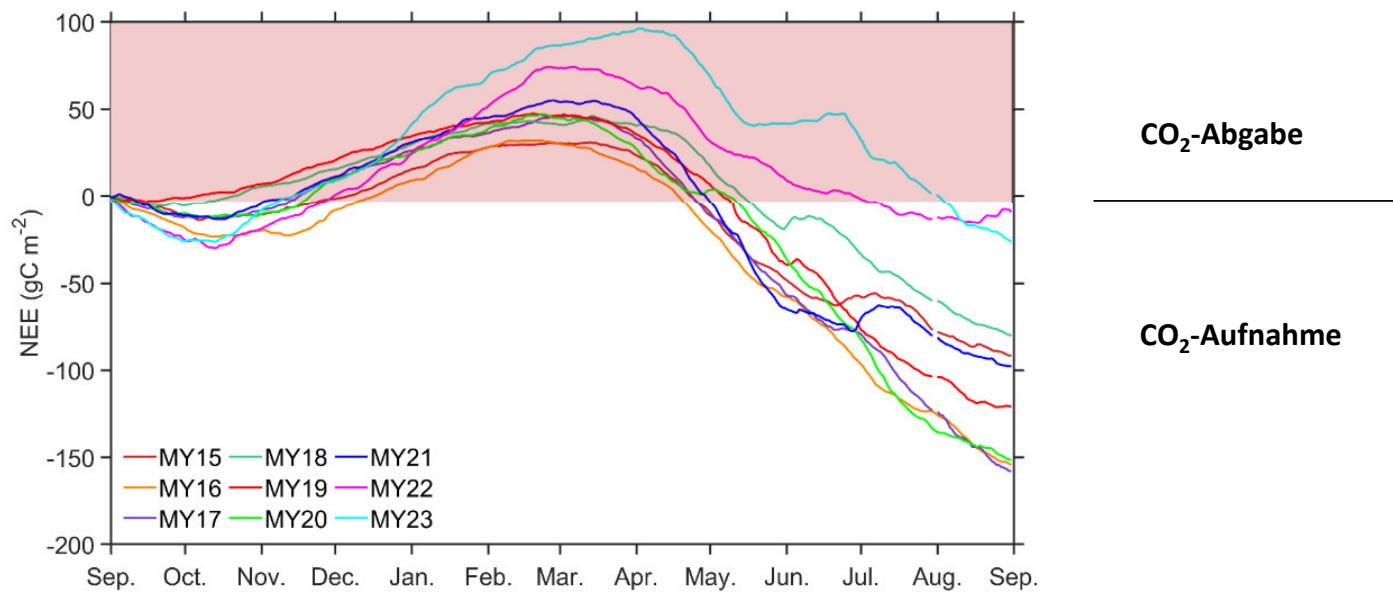
NEE als kumulative Summe für die verschiedenen meteorologischen Jahre MY15 - MY19

Konopka et al., 2021

## Ergebnisse - Nettoökosystemaustausch

### Jährliche Variation des CO<sub>2</sub>- Austauschs am BER →

- Senkenfunktion des Gründachs hat weiterhin Bestand → Ergebnisse über einen 9-jährigen Zeitraum (2014 - 2023)
- Im Oktober 2024 wurde großflächig Photovoltaik (PV) auf dem Gründach installiert

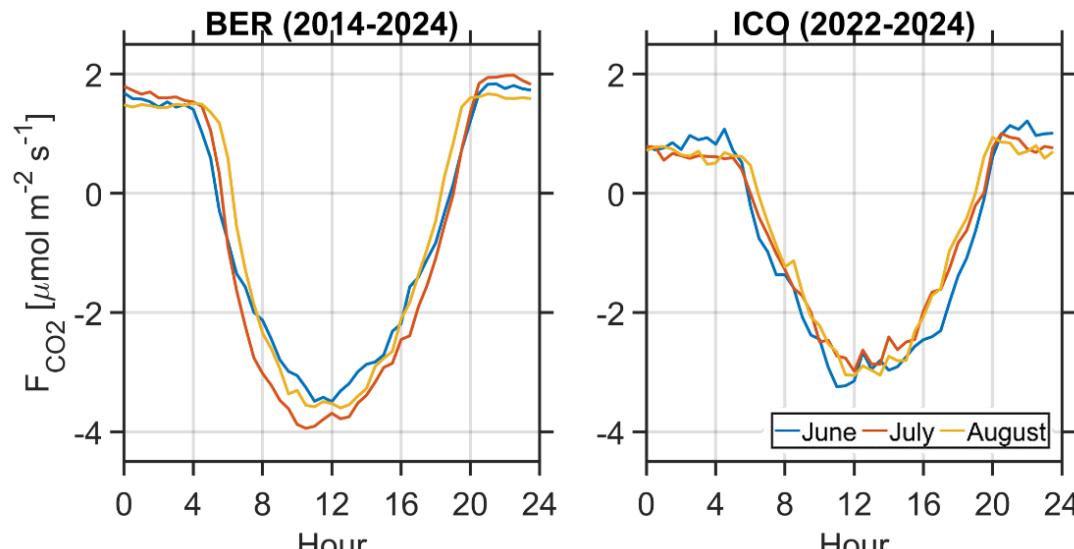


NEE als kumulative Summe für die verschiedenen meteorologischen Jahre MY15 - MY19

## Ergebnisse – Gründach ICO

**Vergleich des CO<sub>2</sub>-Austauschs zweier extensiver Gründächer (BER, ICO) →**

- Beide Gründächer (*Sedum*-dominiert) zeigen ähnliche Größenordnung und Zeitverläufe des CO<sub>2</sub>-Flusses
- CO<sub>2</sub>-Aufnahme und Respiration jeweils höher am BER (Dachalter BER = 12 Jahre, ICO = 4 Jahre).



Mittlere Tagesgänge des CO<sub>2</sub>-Flusses an BER und ICO für die Sommermonate



## Schlussfolgerungen

- Extensive Gründächer am BER und ICO sind **CO<sub>2</sub>-Senken** (Aufnahme BER rd. 4,4 t CO<sub>2</sub> y<sup>-1</sup>), allerdings ist die jährliche Variabilität sowie die Langzeitentwicklung zu beachten und Gegenstand weiterer Forschung
- Der **Wassergehalt des Substrats** ist ein wichtiger Faktor für die CO<sub>2</sub>-Aufnahme (v.a. Bruttoprimärproduktion)
- Eddy-Kovarianz ist eine **leistungsfähige Methode** zur Untersuchung von Austauschprozessen zwischen Gründach und Atmosphäre sowie zur Bewertung des Senkenpotentials
- Die **Kohlenstoffbilanz** von Gründach-Ökosystemen ist bisher noch nicht ausreichend erforscht (gelöster organischer Kohlenstoff, Langzeiteffekte)



# Vielen Dank!



- Grunwald, L., Heusinger, J. and Weber, S., 2017. A GIS-based mapping methodology of urban green roof ecosystem services applied to a Central European city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 22: 54-63.
- Heusinger, J. and Weber, S., 2017. Surface energy balance of an extensive green roof as quantified by full year eddy-covariance measurements. *Science of the Total Environment*, 577: 220-230.
- Konopka, J., Heusinger, J. and Weber, S., 2021. Extensive Urban Green Roof Shows Consistent Annual Net Uptake of Carbon as Documented by 5 Years of Eddy-Covariance Flux Measurements. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(2): e2020JG005879.
- Markolf, N., Heusinger, J. and Weber, S. 2024. Water storage levels and water storage capacity of an extensive green roof quantified from multi-year eddy covariance measurements. *Ecological Engineering* 206: 107333.