

Instrumental and **Data-driven Approaches to Source-Partitioning**  
of **Greenhouse Gas Fluxes: Comparison, Combination, Advancement**  
**(IDAS-GHG)**

*(Weiterentwicklung und Vergleich von Methoden zur instrumentellen und  
analytischen Komponentenerlegung gemessener Treibhausgasflüsse)*



Alexander Graf\*, Anne Klosterhalfen, Patrizia Ney, Maria Quade, Yuri Rothfuss, Daniel Weymann,  
Odilia Esser, Normen Hermes, Astrid Gottschalk, Veronika Valler, Katharina Pick, Josef Noel,  
Alexander Bütow, Nicolas Brüggemann, Harry Vereecken

\*Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Bio- und Geowissenschaften 3 (IBG-3): Agrosphäre

52425 Jülich, +49 2462 61-8676, a.graf@fz-juelich.de

Dieses Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) durch den Projektträger im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (PT-DLR) unter FKZ 01LN1313A gefördert. Die Dauer des Projektes mit dem Titel „Weiterentwicklung und Vergleich von Methoden zur instrumentellen und analytischen Komponentenerlegung gemessener Treibhausgasflüsse“ betrug 5 Jahre vom 1.8.2014 bis zum 31.7.2019.

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	3
Abbildungsverzeichnis .....	4
Tabellenverzeichnis .....	5
Abkürzungsverzeichnis .....	6
I Kurzdarstellung der Rahmenbedingungen .....	7
I.1 Aufgabenstellung.....	7
I.2 Voraussetzungen .....	7
I.3 Planung und Ablauf .....	8
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	11
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	14
II Eingehende Darstellung .....	15
II.1 Zuwendungsverwendung und Einzelergebnisse in Bezug auf Ziele .....	15
II.1.1 Ansatz 1: Modellierung auf Basis finaler Flüsse .....	16
II.1.2 Ansatz 2: Nutzung turbulenzauflösender bivariater Statistiken .....	18
II.1.3 Ansatz 3: Zusatzmessungen (Hauben, Mikrolysimeter, Profil) .....	20
II.1.4 Ansatz 4: Isotopenmessungen.....	23
II.1.5 Messkampagne auf einem extensiven Gründach in Berlin .....	25
II.1.6 Bilanzierung einer landwirtschaftlichen Fruchtfolge und Zwischenfruchtanbau .....	27
II.1.7 Waldumbau in einem Nationalpark .....	30
II.1.8 Reaktion unterschiedlicher europäischer Ökosysteme auf das Dürrejahr 2018 .....	33
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	36
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	36
II.4 Voraussichtlicher Nutzen .....	36
II.5 Fortschritt bei anderen Stellen während Durchführung des Vorhabens .....	37
II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen.....	37
Literaturverzeichnis .....	38

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über vorhandene Ansätze zur Quellpartitionierung, ihre Weiterentwicklung und Nutzung im Rahmen des Vorhabens.....	11
Abbildung 2: Fließschema (links) des „Gap-Filling-Source-Partitioning“ – Algorithmus nach Ney (2019).....	16
Abbildung 3: Fließschema des Modells AgroC und Beispiel aus unterschiedlichen Parameterbestimmungsmethoden resultierender Jahressummen der CO <sub>2</sub> -Aufnahme .....	17
Abbildung 4: CO <sub>2</sub> - und H <sub>2</sub> O-Flusspartitionierung im Tagesintegral an einem Standort nach verschiedenen Varianten von SK10 und TH08.....	18
Abbildung 5: Links: Entwicklung messbarer Streudiagramme von Fluktuationen der CO <sub>2</sub> - und H <sub>2</sub> O-Fluktuationen mit der Messhöhe in einem synthetischen Experiment.....	19
Abbildung 6: Schemazeichnung der Profilanlage und Beispielprofile in einem Zuckerrübenbestand am Standort Selhausen.....	20
Abbildung 7: Mit der Profilanlage gemessene Konzentrationsprofile (H <sub>2</sub> O / CO <sub>2</sub> ), daraus abgeleitete vertikale Quellstärkenverteilung .....	21
Abbildung 8: Partitionierungsergebnisse nach verschiedenen Methoden für die Evapotranspiration und den CO <sub>2</sub> -Fluss für drei Intensivmesskampagnen .....	22
Abbildung 9: Profile der atmosphärischen Wasserdampfkonzentration und ihres relativen Anteils an Deuterium und <sup>18</sup> O.....	23
Abbildung 10: EC-basierte Gesamtverdunstung als latenter Wärmefluss und Evaporationsanteile daran nach Mikrolysimeter-, Deuterium und <sup>18</sup> O-Messungen.....	24
Abbildung 11: Messungen auf extensivem Gründach .....	25
Abbildung 12: Linien: Kontinuierlich (automatisch) gemessene CO <sub>2</sub> -Flusskomponenten auf extensivem Gründach .....	26
Abbildung 13: Fruchtweise kumulierte Summen von des Netto-CO <sub>2</sub> -Austauschs NEE, der partitionierten Gesamtrespiration R <sub>eco</sub> und Bruttoprimärproduktion GPP.....	27
Abbildung 14: elftägig gemittelte und kumulierte CO <sub>2</sub> -Bilanzen der Ackerstandorte Merzenhausen und Selhausen.....	28
Abbildung 15: Tagesgang des CO <sub>2</sub> -Austauschs vom 3. Dezember 2015 auf Basis von Eddy-Kovarianz- und Haubenmessungen .....	28
Abbildung 16: Entwicklung der Aussaat- und Erntetermine für drei Fruchtfolgeglieder im Bundesdurchschnitt .....	29
Abbildung 17: Untersuchungsgebiet Wüstebach mit EC-Stationen und manuellen Bodenatmungsmesspunkten .....	30
Abbildung 18: EC-basierte CO <sub>2</sub> -Flüsse am Waldstandort Wüstebach als 7-Tages-Mittel der Fichten- und entfichteten Fläche, GPP und Reco partitioniert mit dem DT-Verfahren.....	31
Abbildung 19: Ergebnisse der N <sub>2</sub> O-Flussmessungen am Standort Wüstebach.....	32
Abbildung 20: Verteilung der EC-Standorte, deren CO <sub>2</sub> -, Verdunstungs- und Wärmeflüsse 2018 mit denen eines vorangehenden Referenzzeitraums verglichen wurden.....	33
Abbildung 21: Budyko-Plot der Jahressummen von Niederschlag, potentieller und tatsächlicher Verdunstung der untersuchten Standorte.....	34
Abbildung 22: ET als latenter Wärmefluss und fühlbarer Wärmefluss am Standort Selhausen .....	35
Abbildung 23: Zur CO <sub>2</sub> -Aufnahme verwendete Energie als Funktion der zur Verdunstung aufgewendeten Energie (latenter Wärmefluss) .....	35

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Häufig benutzte Symbole und Abkürzungen .....	6
Tabelle 2: An den tatsächlichen Förderbeginn angepasster Balkenplan .....	8
Tabelle 3: Meilensteinplanung, letzter Stand, angepasst an den tatsächlichen Förderbeginn .....	9
Tabelle 4: Arbeitspakete gem. deutschsprachigem Anhang der Vorhabenbeschreibung .....	10
Tabelle 5: Kohlenstoffbilanzen der Fruchtfolge aus Abbildung 13 .....	29

# Abkürzungsverzeichnis

Tabelle 1: Häufig benutzte Symbole und Abkürzungen

E	Evaporation (nicht-stomatäre Verdunstung, v.a. Bodenverdunstung, Einheiten → ET)
EC	„Eddy-Covariance“: Eddy-Kovarianz (-Methode)
ET	Evapotranspiration (Gesamtverdunstung in mm)
DT	„Daytime algorithm“: Partitionierungsalgorithmus nach Lasslop et al. (2010), siehe auch Wutzler et al. (2018)
GPP	„Gross primary production“: Bruttoprimärproduktion (Photosyntheseleistung in $\mu\text{mol}$ oder g Kohlenstoff pro $\text{m}^2$ Grundfläche und Zeiteinheit nach Abzug aller Respirationsterme von → NEE)
GWP <sub>x</sub>	„Global warming potential“: Erwärmungspotential eines nicht-CO <sub>2</sub> -Treibhausgases (hier N <sub>2</sub> O) ausgedrückt als die CO <sub>2</sub> -Emission / Konzentration, die bezogen auf den Zeithorizont x Jahre dieselbe Wirkung hätte
NEE	„Net ecosystem exchange“: Nettoaufnahme (negatives Vorzeichen) oder Abgabe von CO <sub>2</sub> , verwendete Einheiten siehe → GPP
NPP <sub>a</sub>	„Net primary production (aboveground)“: Oberirdischer Teil der Nettoprimärproduktion (→ NEE abzüglich oberirdischer Atmung (i.W. Atmung oberirdischer Pflanzenorgane))
NT	„Nighttime algorithm“: Partitionierungsalgorithmus nach Reichstein et al. (2005), siehe auch Wutzler et al. (2018)
Reco	„total ecosystem respiration“ (in der Literatur tlw. auch TER): Gesamtrespiration des Ökosystems, Summe aus oberirdischer Atmung (siehe auch → NPP <sub>a</sub> ) und → R <sub>s</sub> , verwendete Einheiten siehe → GPP
R <sub>s</sub>	„soil respiration“: Bodenatmung, verwendete Einheiten siehe → GPP
SK10	Partitionierungsalgorithmus nach Scanlon und Sahu (2008) und Scanlon und Kustas (2010)
T	Transpiration (stomatäre Verdunstung, Einheit siehe → ET)
TH08	Partitionierungsalgorithmus nach Thomas et al. (2008)

# I Kurzdarstellung der Rahmenbedingungen

## I.1 Aufgabenstellung

Das Vorhaben diente der Entwicklung eines verbesserten Verfahrens zur Abschätzung von Treibhausgasflüssen zwischen der Landoberfläche (von z.B. Agrar- und Forstökosystemen) und der Atmosphäre. Insbesondere zielte es auf eine bessere Trennung der verschiedenen Quellen ab (z.B. Atmung von Photosynthese, Evaporation von Transpiration). Dies ist Voraussetzung für eine bessere Parametrisierung und Validierung von Modellen, die Rückkopplungen der Biosphäre auf den Klimawandel abschätzen. Zunächst wurden existierende Ansätze zur Komponentenerlegung („Flux partitioning“) von Eddy-Kovarianz-(EC)-Daten verglichen:

- 1) Bestehende Modelle zum Füllen von Datenlücken in (EC-basierten) CO<sub>2</sub>-Fluss-Zeitreihen. Diese beinhalten als Zwischenprodukt eine Aufteilung des Nettoflusses in Bruttoprimärproduktion (Photosynthese) und Gesamtrespiration.
- 2) Zwei Methoden auf der Basis turbulenzauflösender EC-Rohdaten zielen auf eine Aufteilung des CO<sub>2</sub>-Flusses in Nettoprimärproduktion und Bodenrespiration bzw. der Gesamtverdunstung in Blatt-Transpiration und Bodenevaporation.
- 3) Kammer- oder Profilmessungen zur Abschätzung der unter 2 benannten Komponenten
- 4) stabile Isotope als Tracer, die Informationen über den Ursprung der am Fluss beteiligten Gasmoleküle enthalten.

Diese vier Ansätze waren zu Projektbeginn noch nicht systematisch miteinander verglichen oder kombiniert worden. Insbesondere aussichtsreiche Methoden sollten im Projektverlauf um Verbesserungsvorschläge erweitert und erneut getestet werden. Weiterhin zielte das Projekt, vor allem in der Aufstockungsphase, auf eine Anwendung der Messungen und Datenanalysen auf klimawandelrelevante Fragestellungen ab, die die Rolle der Landnutzung im Klimawandel beleuchten und so auch Hinweise zum Beitrag der Land- und Forstwirtschaft zur Mitigation liefern.

## I.2 Voraussetzungen

Voraussetzungen für eine erfolgreiche Durchführung des Vorhabens waren neben der expliziten Förderung dieses Projekts durch das BMBF bzw. den Projektträger DLR unter FKZ 01LN1313A folgende in der Vorhabenbeschreibung berücksichtigte Beiträge einschließlich anderer Finanzierungsquellen (Institutsgrundhaushalte, andere zu Vorhabenbeginn bereits laufende Projekte):

- a) vorhandene und fortgesetzte Standardmessungen von Klima- und Bodenvariablen sowie CO<sub>2</sub>- und Wasserdampfströmen an Eddy-Kovarianz-Stationen des Instituts,
- b) die Zurverfügungstellung ähnlicher Datensätze von anderen Standorten durch externe Kooperationspartner,
- c) das Vorhandensein funktionsfähiger Geräte am Institut des Antragstellers, um die eigenen Messungen des Vorhabens (z.B. Profil- und Haubenmessungen) zu den geringen geplanten Material- und Investitionskosten durchführen zu können,
- d) die Zurverfügungstellung eines zusätzlichen Außenstandorts für eine Messkampagne, der dort vorhandenen Infrastruktur und Standardmessungen durch einen externen Kooperationspartner, und
- e) die fortgesetzten Beschäftigungsverhältnisse der geplanten internen Kooperationspartner

Diese Voraussetzungen waren überwiegend gegeben. Lediglich bei Voraussetzung c) und e) gab es jeweils eine Ausnahme, namentlich die wiederholt nötige Reklamation eines vor Projektbeginn aus projektfremden Mitteln angeschafften Gerätes für Isotopenmessungen beim Hersteller (c) und Schwierigkeiten bei der (Wieder)besetzung einer für N<sub>2</sub>O-Messungen zuständigen Postdoktorandenstelle (e). Beide Ausfälle konnten im für die erfolgreiche Durchführung des Vorhabens nötigen Umfang aufgefangen werden (Details s. Kap. II).

### I.3 Planung und Ablauf

Tabelle 2 zeigt den geplanten und durchgeführten Projektablauf. Dieser lässt sich grob in drei überlappende Phasen gliedern, nämlich *i*) die Vorbereitung der Mess- (Hardware) und Auswertungs- (Programminfrastruktur) Umgebung und Implementierung vorhandener Methoden (Arbeitspakete 0 bis 1.5), *ii*) Entwicklung und Test methodischer Neuerungen (Arbeitspakete 2.1 bis 2.4) und *iii*) abschließende Bewertung einschließlich inhaltlicher und mitigationsrelevanter Analyse (Arbeitspakete 2.5 bis 4).

Tabelle 2: An den tatsächlichen Förderbeginn angepasster Balkenplan mit Personenmonatsplanung, letzter Stand unter Einschluss der Hinweise des Zuwendungsgebers zum Aufstockungsantrag

Kalenderjahr	2014				2015				2016				2017				2018				2019				Leiter	Dokt. I	Dokt. II	Dokt. III	Sachb.	SHK				
Projektjahr	Jahr I				Jahr II				Jahr III				Jahr IV				Jahr V																	
Quartal	Aug	Nov	Feb	Mai	Aug	Nov	Feb	Mai	Aug	Nov	Feb	Mai	Aug	Nov	Feb	Mai	Aug	Nov	Feb	Mai	Aug	Nov	Feb	Mai	Personen									
DoktorandInnen																													Monate*					
AP 0																									4	0	0	0	2	2				
AP 1.1																									2	5	0	0	2	0				
AP 1.2																									2	5	0	0	2	0				
AP 1.3																									4	0	10	0	2	10				
AP 1.4																									2	0	0	10	2	10				
AP 1.5																									6	2	2	2	2	0				
AP 2.1																									2	6	0	0	2	0				
AP 2.2																									2	6	0	0	2	0				
AP 2.3																									4	0	12	0	2	8				
AP 2.4																									2	0	0	12	2	8				
AP 2.5																									6	2	2	2	2	5				
AP 3																									12	5	5	5	4	5				
AP 4																									12	5	5	5	4	12				
Meilensteine			I				II				III				IV				V				VI	VII	60	36	36	36	30	60				
PM Leiter	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	60	Personenmonatssummen								
PM Dokt. I	0	0	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36									
PM Dokt. II	0	0	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36									
PM Dokt. III	0	0	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36									
PM* Sachb.	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	30									
PM SHK	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	60									

<sup>1)</sup> Gemäß Vorhabenbeschreibung wurden dreimonatige Folgeverträge der DoktorandInnen auf Kosten des Institutes auf eine Beteiligung der DoktorandInnen am weiteren Projektverlauf verwendet.

\* Zur besseren Vergleichbarkeit mit dem AZK sind Personenmonate von Teilzeitbeschäftigten unterschiedlich angegeben; ununterbrochene Beschäftigung der Sachbearb. während eines Quartals entspricht 1.5 PM, da im AZK die Teilzeitbeschäftigung über Multiplikation von 6 Monaten pro Jahr mit dem vollen Gehalt umgesetzt war; ununterbrochene Beschäftigung jeder anderen MitarbeiterIn während eines Quartals entspricht unabhängig von der jeweiligen Wochenarbeitszeit 3 PM, da im AZK der Teilzeitcharakter der SHK- und DoktorandInnenstellen bereits im Monatzsatz eingepreist war.

Tabelle 3 zeigt die zugehörige Meilensteinplanung:

*Tabelle 3: Meilensteinplanung, letzter Stand, angepasst an den tatsächlichen Förderbeginn, den Aufstockungsantrag einschließlich und Fragen und Hinweise des Mittelgebers berücksichtigend. Abweichungen im tatsächlichen Verlauf kursiv (Details s. Kap. II).*

Meilenstein, Projektmonat, Datum		Inhalt
<b>I</b> 7 Feb 15	Der Antragsteller hat die nötigen Voraussetzungen für die Einstellung gut und effektiv betreuter DoktorandInnen geschaffen. Dazu gehören die Auswahl der Feldstandorte, die Auswahl einer Programmiersprache und Konvention für die gemeinsame Arbeit, die Vorbereitung gemeinsam benötigter Codes, die Stellenausschreibung, KandidatInnenauswahl und Vorbereitung der Einstellung ( <i>zeitlich abhängig von der Bewerberlage</i> ). Die Auswahl der zusätzlichen Beispieldaten von Stationen Dritter ist so weit abgeschlossen, dass ein Überblick über die Verwendbarkeit der Daten besteht und klare Handlungsanweisungen an die DoktorandInnen möglich sind. <i>Der ursprünglich für Projektbeginns im Frühsommer angestrebte Aufbau erster zusätzlicher IDAS-GHG-spezifischer Feldmessungen verschob sich aufgrund der Vorgaben des Zuwendungsgebers (Projektstart August 14) leicht in den März 2015.</i>	
<b>II</b> 24 Jul 16	Die ersten Versuche in allen vier Ansätzen sind soweit abgeschlossen und verglichen worden, dass eine Entscheidung möglich ist, mit welchen der Ansätze in der zweiten Projektphase weitergearbeitet wird.	
<b>III</b> 30 Jan 17	Meilensteinbericht zur Zwischenbegutachtung	
<b>IV</b> 37 Aug 17	Vorbereitung des zusätzlichen fünften Projektjahrs ( <i>bei noch ausstehender Bewilligungsentscheidung planerischer Beginn reversibler Vorbereitungen</i> )	
<b>V</b> 48 Jul 18	Vorliegen aller wesentlicher Ergebnisse der Arbeitspakete bis einschließlich AP 2.5, ( <i>inhaltlicher</i> ) Abschluss der Doktorarbeiten. Die Arbeitspakete AP 3 und 4 sind soweit gediehen, dass erste publizierbare Ergebnisse vorliegen.	
<b>VI</b> 55 Feb 19	Die Ergebnisse der ersten 5 Monate des Aufstockungsprojekts (August-Dezember 2018) sind soweit ausgewertet, dass sie im Zwischenbericht über 2018 gemeinsam mit den 2018er Ergebnissen des laufenden Projektteils präsentiert werden können: Manuelle projektspezifische Messungen am Standort Selhausen - dreijährige Fruchtfolge inkl. Zwischenfrucht, Vor- und Nachlauf; fünfjährige manuell gestützten Gesamtbeobachtungszeit am Standort Wüstebach seit der Entfichtung (September 2013) im Herbst 2018. Die zusätzliche Kampagne hat je nach Standortwahl zu diesem Zeitpunkt schon stattgefunden, oder ihr Abschluss steht bevor (s. Meilenstein VII).	
<b>VII</b> 58 Mai 19	Alle projektrelevanten Messungen einschließlich Zusatzstandort sind spätestens hier abgeschlossen ( <i>die zusätzlichen Isotopenmessungen am Standort Selhausen fanden aufgrund herstellerbedingter technischer Geräteprobleme leicht verzögert im Juni 2019 statt</i> ). Den Schwerpunkt der verbleibenden drei Monate bildet ihre finale Auswertung im Sinne von Arbeitspaket 4 (Mitigationsrelevanz).	
<b>VIII</b> 60 Jul 19	Ende der Arbeiten, die Gegenstand des Aufstockungsantrags sind, und Vorliegen aller Projektergebnisse.	

Die konkrete Arbeitspaketplanung zeigt schließlich Tabelle 4.

Tabelle 4: Arbeitspakete gem. deutschsprachigem Anhang der Vorhabenbeschreibung. Abweichungen und Konkretisierungen im tatsächlichen Verlauf kursiv (Details s. Kap. II).

Arbeitspaket	Inhalt
0	Vorbereitung der Arbeitsumgebung (Messstellenauswahl, Zusatzmessungen, Daten, Auswahl und Vorbereitung einer Programmierumgebung) durch den Leiter, KandidatInnenauswahl für die weiteren Stellen.
1.1	Fertigstellung des Eingangsdatensatzes, Implementierung und Anwendung mindestens zweier Modelle durch DoktorandIn 1 ( <i>Arbeit mit Gap-Filling-Modellen auch durch DoktorandIn 2</i> )
1.2	Implementierung und Anwendung mindestens eines Algorithmus ( <i>beide Algorithmen</i> ) aus Ansatz 2 durch DoktorandIn 1 und den Projektleiter
1.3	Kammer- und Profilmessungen durch den Projektleiter und DoktorandIn 2
1.4	Isotopenmessungen durch DoktorandIn 3 mit Unterstützung durch den Projektleiter und die internen Kooperationspartner
1.5	Vergleich und Kombination der vier Ansätze aus AP 1.1-1.4. Die Verfolgung der folgenden Arbeitspakete 2.1 bis 2.4 hängt von diesem Vergleich ab
2.1	Erweiterung der Modelle aus AP 1.1 hinsichtlich der Zahl ihrer Eingangsvariablen und der Parameterschätzung (DoktorandIn 1 <i>und 2</i> , interne und externe Kooperationspartner)
2.2	Erweiterung von AP 1.2 mittels Hauptkomponenten- oder Clusteranalyse ( <i>Clusteranalyse</i> , DoktorandIn 1, Projektleiter)
2.3	Kombination von zeitlich und räumlich hochauflösenden Profilmessungen mit dem "Surface renewal"-Ansatz (DoktorandIn 2, Projektleiter, <i>aufgrund dessen mäßiger Performance Ersatz des surface renewal – durch andere Ansätze</i> )
2.4	Kombination von Messungen des <sup>18/16</sup> O-Isotopenverhältnisses mit der Eddy-Kovarianz- oder Gradientmethode ( <i>Gradientmethode</i> ), Vergleich N <sub>2</sub> O-Flüsse mit den geschätzten CO <sub>2</sub> -Flusskomponenten (DoktorandIn 3, interne Kooperationspartner/ <i>Projektleiter, interne Kooperationspartner</i> )
2.5	Vergleich und Kombination der Neuerungen aus AP 2.1 bis 2.4
3	Charakterisierung der einzelnen Flusskomponenten und ihres Beitrags zur Treibhausgasbilanz eines Standorts unter zusätzlicher Berücksichtigung von N <sub>2</sub> O ( <i>eine detaillierte Betrachtung von N<sub>2</sub>O entfiel aufgrund durchweg geringer Flüsse und Relevanz an den Untersuchungsstandorten und personeller Ausfälle</i> )
4	Charakterisierung des Mitigationspotentials einer Landnutzungsoption/ eines Anbauverfahrens ( <i>zweier: Fichtenforst vs. Sukzessionsfläche im Waldbau und Zwischenfrüchte im Ackerbau, zusätzlich grundsätzlicher Vergleich der Reaktion von Landnutzungen auf Dürre im europäischen Eddy-Kovarianz-Stationsnetz</i> )

## I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Vorhandene Quellenpartitionierungsverfahren können in vier verschiedene Ansätze unterteilt werden, deren wissenschaftlicher und technischer Stand zu Vorhabenbeginn im Folgenden jeweils kurz beschrieben wird (Abbildung 1). Dasselbe gilt für den Kenntnisstand zur Klimabilanzierung und Mitigationsrelevanz von Flächennutzung.

Der am weitesten verbreitete **Ansatz (1)** zur Quellpartitionierung wird standardmäßig gemeinsam mit Algorithmen zur Füllung von Datenlücken in Eddy-Kovarianz- (EC-) Flussmessungen, sogenannten „Gap-filling“-Algorithmen, angewandt. An den meisten Stationsstandorten sind mit dem CO<sub>2</sub>-Fluss korrelierende Zusatzdaten wie die photosynthetisch aktive Einstrahlung und die Temperatur verfügbar. Die allgemeine Form der Abhängigkeit der einzelnen Flusskomponenten von diesen Einflussgrößen (z.B. Michaelis-Menten-Abhängigkeit der Photosynthese von der Einstrahlung, exponentielle Temperaturabhängigkeit der Atmung) ist bekannt. Über die statistische Ermittlung der optimalen Funktionsparameter für einen bestimmten Standort und Zeitraum können so indirekt auch die Zeitreihen der Einzelkomponenten Photosynthese und Atmung geschätzt werden (Lasslop et al., 2010; Moffat et al., 2007; Reichstein et al., 2005; Ruppert et al., 2006; Stoy et al., 2006). Dieser Ansatz benötigt nur halbstündige und daher in Datenbanken leicht verfügbare Fluss- und Zusatzdaten. Von Nachteil ist, dass sich jede zwischen Fluss und Einflussgröße gefundene etwaige nicht-kausale statistische Beziehung direkt auf die Schätzung des Komponentenflusses auswirkt und später ggf. bei Nutzung der partitionierten Daten zur Validierung eines anspruchsvolleren prozessbasierten Modells reproduziert wird. Daher werden Partitionierungsalgorithmen dieses Typs meist nur für die direkte Analyse und für die Schätzung von jährlichen Kohlenstoffbilanzen verwendet.

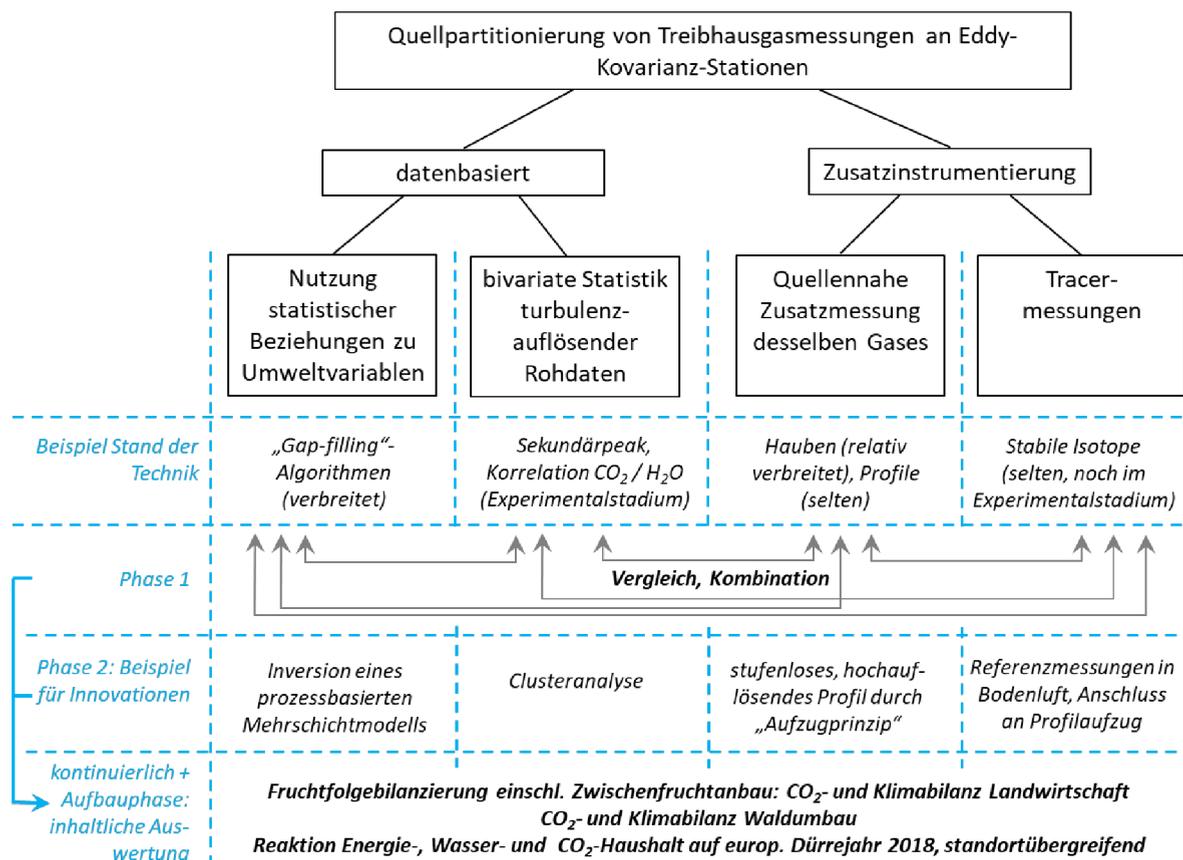


Abbildung 1: Überblick über vorhandene Ansätze zur Quellpartitionierung, ihre Weiterentwicklung und Nutzung im Rahmen des Vorhabens

Aus der Analyse der Rohdaten, aus denen EC-Flüsse berechnet werden, ist ein neuer **Ansatz (2)** entstanden, der ohne Annahmen über die oben genannten Einflussfaktoren auszukommen versucht. Typischerweise werden an EC-Stationen H<sub>2</sub>O- und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gleichzeitig mit hoher Auflösung (z.B. 20 s<sup>-1</sup>) gemessen. Pflanzenblätter geben durch die Spaltöffnungen während eines typischen Sommertags Wasserdampf ab und nehmen CO<sub>2</sub> auf, während die Bodenoberfläche sowohl Wasserdampf als auch CO<sub>2</sub> abgibt. Die bivariate Häufigkeitsverteilung der einzelnen 20 s<sup>-1</sup>-Messungen dieser zwei Gase innerhalb einer halben Stunde kann theoretisch verwendet werden, um oberirdische Pflanzenbeiträge (Nettoprimärproduktion von CO<sub>2</sub> und Transpiration von H<sub>2</sub>O) und Bodenbeiträge (Bodenrespiration von CO<sub>2</sub> und Evaporation von H<sub>2</sub>O) voneinander zu trennen. Zwei Machbarkeitsstudien hierzu wurden von Thomas et al. (2008) und Scanlon und Sahu (2008) veröffentlicht. Thomas et al. (2008) schlugen einen Algorithmus zur getrennten Auswertung eines Sekundärpeaks vor, der durch die Bodenatmung und Evaporation in der gemeinsamen Häufigkeitsverteilung von CO<sub>2</sub>- und Wasserdampfschwankungen von Waldstandorten verursacht wird. Somit führt die Methode zu einer etwas anderen Partitionierung als „Gap-Filling“-Algorithmen, da sie die Blattatmung im Photosyntheseterm einschließt, bei dem es sich somit nun um die oberirdische Nettoprimärproduktion handelt. Abhängig von der Fragestellung kann dies vor- oder nachteilhaft sein. Allerdings fanden Thomas et al. (2008) Hinweise auf eine zunehmende Verletzung der zum Auftreten bedeutsamer Sekundärpeaks nötigen Annahme unvollständiger Durchmischung mit zunehmender Messhöhe über dem Kronendach. Dies würde im Einklang mit früheren Untersuchungen des Antragstellers (Graf et al., 2010) zur univariaten turbulenten Häufigkeitsverteilung von Temperaturschwankungen stehen, aus denen sich letztlich Grenzschichttemperaturen leichter ableiten ließen als Oberflächentemperaturen. Es ist daher wichtig, die Robustheit des Ansatzes an mehreren Datensätzen von unterschiedlichen Standorten zu testen. Ein ähnlicher Ansatz von Scanlon und Sahu (2008) und Scanlon und Kustas (2010) erfordert nur den Korrelationskoeffizienten zwischen CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O, benötigt allerdings zusätzliche Annahmen zur Wassernutzungseffizienz (WUE) auf Blattebene. Beide Methoden waren vor Beginn des Vorhabens noch nicht auf gemeinsamen Rohdatensätzen verglichen worden.

Zwei weitere Typen von Partitionierungsansätzen ergeben sich, wenn Standard-EC-Messungen um Zusatzmessungen erweitert werden, die entweder an anderen Stellen in der Vertikalstruktur des Ökosystems dem bereits an der EC-Anlage gemessenen Gas von Interesse (z.B. CO<sub>2</sub> und/oder H<sub>2</sub>O) gelten (Ansatz 3), oder Tracer für die Herkunft dieses Gases (Ansatz 4). Häufig werden im Rahmen von **Ansatz 3** Haubenmessungen z.B. der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Boden an einem EC-Standort verwendet, um neben dem Nettofluss auch die Bodenatmung zu quantifizieren (Suleau et al., 2011), seltener Küvetten für den Netto-Gasaustausch einzelner Pflanzenblätter. Der Robustheit dieser Methoden steht die ungewollte Wirkung der Kammer auf das Mikroklima der Boden- oder Blattoberfläche (Davidson et al., 2002; Xu et al., 2006), aber auch der statistische Fehler durch Messung an einem bzw. wenigen kleinen Oberflächenausschnitten des heterogenen Ökosystems, entgegen. Weniger anfällig für diese Fehlerquellen, aber aufgrund der komplexeren und möglicherweise weniger robusten Auswertung weniger verbreitet, sind Profilauswertungen. Hierbei wird die Konzentration des Gases in mehreren Höhen zwischen Boden und EC-Sensorhöhe gemessen und das Quellprofil aus dem Konzentrationsprofil durch einen Inversionsalgorithmus geschätzt, in den Annahmen über die turbulente Ausbreitung von Gasen in der Pflanzendecke und rauhen Unterschicht einfließen (Haverd et al., 2009; Raupach, 1989; Santos et al., 2011; Schween, 2002; Warland und Thurtell, 2000).

Im Rahmen der Oberflächen-Atmosphären-Flussmessungen sind die derzeit wichtigsten Tracer (**Ansatz 4**) stabile Isotopologe von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O sowie zuletzt Carbonylsulfid (COS, Stimler et al., 2010). Aufgrund des sehr experimentellen Stadiums und des großen Aufwands, der für die Analyse von COS aufgewendet werden muss, lag der Schwerpunkt dieser Studie auf Sauerstoff- und

Wasserstoffisotopen in CO<sub>2</sub> und insbesondere H<sub>2</sub>O. Die Analyse z.B. des <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O-Verhältnisses in CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O erlaubt die Unterscheidung oberirdischer CO<sub>2</sub>-Flüsse sowie der Verdunstung des Bodens von der Transpiration von Pflanzen aufgrund der unterschiedlichen Isotopensignaturen in Pflanzen- und Bodenwasserpools und aufgrund des Sauerstoffaustausches zwischen CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O. Dazu sind allerdings genaue Referenzwerte des jeweiligen Isotopenverhältnisses in reinem Evaporations- bzw. reinem Transpirationswasser nötig. Diese werden üblicherweise durch Beprobung der Pflanzen bzw. des Bodens gewonnen, allerdings sind für das Evaporationswasser fraktionierungsbedingte Unterschiede zum Bodenwasser zu berücksichtigen, die modelliert werden müssen (Craig und Gordon, 1965).

Aufgrund des CO<sub>2</sub>-Düngeeffektes gelten die meisten natürlichen und naturnahen Ökosysteme, insbesondere Wälder, im Rahmen des **globalen Wandels** als Kohlenstoffsenke. Wesentlich unsicherer stellt sich die Kenntnislage dagegen bei Ökosystemen dar, die stark durch Nutzung oder andere menschliche Einflüsse geprägt sind. Im zu Vorhabenbeginn veröffentlichten fünften Sachstandsbericht des IPCC wurden zum Thema Landwirtschaft nur Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen explizit behandelt mit der Begründung, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Treibstoffverbrauch und Düngemittelproduktion schon außerhalb des Landwirtschaftssektors behandelt wurden und die CO<sub>2</sub>-Bilanz eines Feldes im Jahresverlauf ausgeglichen sei (IPCC, 2014, Chapter 11). Zugleich wurden jedoch in Kap. 11.3 und Tabelle 11.2 pfluglose Bearbeitung und Zwischenfruchtanbau als Mitigationsoptionen gelistet, um den C-Gehalt im Boden kontinuierlich zu steigern und damit der Atmosphäre CO<sub>2</sub> zu entziehen. Noch weiter geht die im Zuge der Pariser Klimaverhandlungen gestartete „4-permil-Initiative“ (<http://4p1000.org/>), die von der Möglichkeit einer vollständigen Neutralisierung der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch eine Steigerung des organischen Kohlenstoffgehaltes der Böden um 4‰ ausgeht. Wo eine derartige positive Veränderung eines Kohlenstoffspeichers zumindest theoretisch möglich erscheint, kann ein negativer Trend durch die derzeitige Bewirtschaftung jedoch nicht ausgeschlossen werden. Tatsächlich legten Wiesmeier et al. (2016) Hinweise auf einen C-Verlust landwirtschaftlich genutzter europäischer Böden vor, und Kutsch et al. (2010) gehen zumindest bei Einbezug von Kohlenstoffim- und exporten davon aus, dass europäische landwirtschaftliche Flächen im Mittel CO<sub>2</sub>-Quellen sind. Bei der Untersuchung der Nutzungsabhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Bilanz von Agrarflächen geht es somit nicht nur um die Identifikation potentieller Senken, sondern vor allem um diejenige noch nicht hinreichend erkannter Quellen und ihrer Minderungspotentiale. Sinngemäß stellt sich bei Wäldern die Frage nach den Auswirkungen von Eingriffen auf den CO<sub>2</sub>-Haushalt; bei allen Ökosystemen sollten zu einer vollständigen Klimabilanzierung die Relevanz weiterer Faktoren wie des Treibhausgases N<sub>2</sub>O (z.B. Rochette, 2008) oder der Albedo (z.B. Rotenberg und Yakir, 2010) überprüft werden.

## **I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Arnold F. Moene betreute die Doktorandin Anne Klosterhalfen während ihres dreimonatigen Gastaufenthalts am Department Meteorology and Air Quality der Universität Wageningen (NL), wies sie in die Large-Eddy-Simulation (LES) mit dem dort entwickelten Modell DALES ein und unterstützte uns bei den Modellsimulationen zum theoretischen Verständnis und zur Sensitivitätsanalyse von Ansatz 2.

Ebenfalls an Ansatz 2 beteiligten sich im Rahmen einer Analyse über 12 Standorte verschiedener Ökosystemtypen hinweg die folgenden Einrichtungen und Partner mit hochauflösenden Rohdaten ihrer Standorte und/oder Diskussions- und Analysebeiträgen, darunter Partner des TERENO-Themenclusters „Atmosphäre“: Universität Trier (G. Heinemann, C. Drüe), das andalusische Forschungsinstitut des ländlichen Raums IFAPA, Córdoba (ES, M.P. González-Dugo, M. Ramos Rodríguez), Universität Virginia (USA, T.M. Scanlon), Universität Wageningen (NL, C.M.J. Jacobs), Karlsruher Institut für Technologie (Campus Alpin Garmisch-Partenkirchen, M. Mauder, R. Steinbrecher, M.J. Zeeman), Umweltforschungszentrum Leipzig (C. Rebmann) und Universität Bayreuth (C.K. Thomas).

Gemeinsame Feldmessungen wurden mit der Abteilung Umweltmeteorologie der Universität Trier (G. Heinemann, C. Drüe, U. Baltés) am Waldstandort Wüstebach, dem Department Meteorology and Air Quality der Universität Wageningen (NL, J. Vila, O. Hartogensis) und der Universität Utrecht (H. de Boer, T. Röckmann) am Ackerstandort Selhausen und der technischen Universität Braunschweig (S. Weber, J. Heusinger) an deren Untersuchungsstandort, einem extensiven Gründach in Berlin, durchgeführt.

Die Doktorandin Anne Klosterhalfen beteiligte sich als Mitautorin an einer Übersichtsstudie zur Quellenpartitionierung von P. Stoy (Universitäten Wisconsin-Madison und Montana State, USA) unter maßgeblicher Beteiligung des Max-Planck-Instituts für Biogeochemie (Jena), dessen „Gap-Filling“-Algorithmen außerdem im Projekt vielfach genutzt wurden. Für eine Studie zum Klimafeedback europäischer Landökosysteme (CO<sub>2</sub>, Wasserhaushalt, Energie, Albedo) arbeitete Alexander Graf mit Stationsbetreibern und Diskussionspartnern aus 34 verschiedenen Einrichtungen zusammen, die jeweils mehrjährige Datensätze von 56 EC-Stationen beitrugen.

Die Doktorandin Maria Quade arbeitete für eine Übersichtsstudie mit M. Dubbert (Universität Freiburg) zusammen und wurde bei der Probenaufbereitung durch M. Dubbert, A. Kübert und N. Orłowski (Universität Freiburg und Universität Gießen) unterstützt.

Die Verwaltung des Nationalparks Eifel (M. Rööß, H.-J. Spors) und ihre übergeordnete Organisation Wald und Holz NRW stand uns nicht nur durch Zurverfügungstellung des Untersuchungsgebiets Wüstebach, sondern auch als Diskussionspartner zur waldbaulichen und -ökologischen Fragen sowie für gemeinsame Fortbildungs-/Öffentlichkeitsarbeit immer wieder zur Verfügung.

## II Eingehende Darstellung

### II.1 Zuwendungsverwendung und Einzelergebnisse in Bezug auf Ziele

**Gesamtziel** des Vorhabens war ein Beitrag zum verbesserten Verständnis der Rückkopplungen von Landökosystemen im Treibhausgas- und Klimahaushalt, insbesondere durch Bewertung, Verbesserung und Kombination der vorhandenen Methodik zur Quellenpartitionierung an Eddy-Kovarianz-Stationen gemessener Nettoflüsse von Treibhausgasen und durch Bilanzierung von Landnutzungsoptionen.

Das Gesamtziel bediente damit vor allem den Förderschwerpunkt 1: "Systemforschung: Treibhausgasflüsse" der **Ausschreibung** „Nachwuchsgruppen globaler Wandel 4+1“. Durch Quantifizierung der CO<sub>2</sub>- und sonstigen Klimabilanz von Landnutzungsoptionen und Ökosystemen im Allgemeinen sowie unter besonderen Bedingungen wie dem Dürrejahr 2018 konnte es jedoch auch Beiträge zu den übrigen Themen (Entscheidungsfindung und Anpassung), insbesondere Thema 3 „Mitigation“, leisten.

**Wissenschaftlich-technische Arbeitsziele** des Hauptantrags waren a) Die Entwicklung verbesserter Partitionierungsmethoden für H<sub>2</sub>O- und CO<sub>2</sub>-Flüsse, b) der Vergleich existierender und verbesserter Ansätze untereinander, c) die beispielhafte Bearbeitung inhaltlicher Fragestellungen zur Klimabilanz von Landnutzung und d) die Berücksichtigung von N<sub>2</sub>O-Flüssen. Bei Ziel a) und b) ist außerdem zwischen den in Kap. I.4 beschriebenen verschiedenen Partitionierungsansätzen I (Gap-Filling- und andere Modelle), II (turbulenzauflösende bivariate Statistiken, III (Hauben- und Profilmessungen) und IV (Isotopen) zu unterscheiden. Zusammenfassend lässt sagen, dass die Ziele erreicht und sogar in allen vier Ansätzen Innovationen erarbeitet und getestet wurden, die zumindest zu inkrementellen, in einigen Fällen deutlichen Verbesserungen führten (a und b). Der Vergleich der Ansätze untereinander (b) erbrachte ein graduelles Verbesserungspotential bei Ansatz 1 in erster Linie durch Verwendung komplexerer Modelle, bei Ansatz 2 hohe inhärente Unsicherheiten mit nur geringen Verbesserungsmöglichkeiten, jedoch erhebliche Verbesserungspotentiale bei Ansatz 3 und 4. Bezüglich Ziel (c) wurden vier Fallbeispiele (Gründach, Landwirtschaft/Zwischenfruchtanbau, Waldumbau und europaweiter Ökosystemvergleich) untersucht und in zweien davon die Relevanz von N<sub>2</sub>O bewertet (d). Die folgenden Unterkapitel zu den Einzelergebnissen sind somit nach den vier Ansätzen (II.1.1 bis II.1.4, Ziele a und b) und Fallbeispielen (II.1.5 bis II.1.8, Ziele c und d) gegliedert. Ein Methodenvergleich über alle vier Ansätze hinweg findet sich in Kapitel II.1.3, Beispiele weiterer ansatzübergreifender Vergleiche in mehreren weiteren Unterkapiteln.

Die **Zuwendung** wurde vor allem für Personalmittel zur Erreichung der Ziele genutzt, während technische Ausrüstung überwiegend bereits vorhanden war. Die drei Doktorandenstellen wurden dem jeweiligen Aufwand gemäß auf die Ansätze und Fallbeispiele verteilt (Anne Klosterhalfen: Ansatz 1, 2 und Mikrolysimetermessungen zu 3 und 4, Unterstützung bei Fallbeispiel 1 und 4; Patrizia Ney: Ansatz 1 und 3, Fallbeispiel 2 und 3, Unterstützung bei Fallbeispiel 1 und 4; Maria Quade: Ansatz 4). Das übrige Projektpersonal (Projektleiter Alexander Graf, jeweilige Besetzungen der Sachbearbeiter- und Hilfskraftstelle) unterstützte alle Teilaspekte nach Bedarf, zusätzlich war der Projektleiter vor allem für die kohärente Planung der Einzelarbeiten, das Zusammenführen ihrer Ergebnisse im Sinne von Ziel (b) und (c) sowie die vierte Fallstudie verantwortlich. Die Erreichung der Ziele wäre nicht möglich gewesen ohne vielfältige Unterstützung durch nicht projektfinanziertes Institutspersonal, darunter die Mentoren und internen Kooperationspartner des Projekts. Die wichtigsten Beitragenden sind in der Autorenliste dieses Berichts aufgelistet. Zusätzlich wurden in kleinerem Umfang Projektmittel für Material zur Realisierung der Messungen in Ansatz 3 und 4 sowie für Reisekosten zu Feldmessungen, Projektbesprechungen und Konferenzen beantragt und verwendet.

## II.1.1 Ansatz 1: Modellierung auf Basis finaler Flüsse

Die bereits existierenden Algorithmen vom Typ „Gap Filling“ nach Reichstein et al. (2005), im Folgenden auch „NT“ und Lasslop et al. (2010), im Folgenden auch „DT“ (vgl. Tabelle 1), wurden bei all unseren Analysen von Langzeit-Eddy-Kovarianz-Daten mitberechnet. Aufgrund ihrer weiten Verbreitung und minimalen Ansprüche an den Datensatz (keine hochaufgelösten Rohdaten, wenige meist standardmäßig vorhandene Zusatzvariablen) stellen sie eine ideale Referenz für alle Vergleiche dar. Auf einige Daten wurde außerdem zusätzlich ein ähnlicher Algorithmus nach Schmidt et al. (2012) angewandt. Die Doktorandin Patrizia Ney entwickelte mit Unterstützung des Gruppenleiters einen Algorithmus, der hinsichtlich der Trennung zwischen Nacht- (Schätzung der Gesamtrespiration  $R_{eco}$ ) und Tag-Daten (Schätzung der der Bruttopräprimärproduktion GPP unter Berücksichtigung von  $R_{eco}$ ) eine intermediäre Stellung zwischen NT und DT einnimmt, die vorherige Definition einer Tag-Nacht-Grenze z.B. über die Sonneneinstrahlung jedoch vermeidet (Ney, 2019).

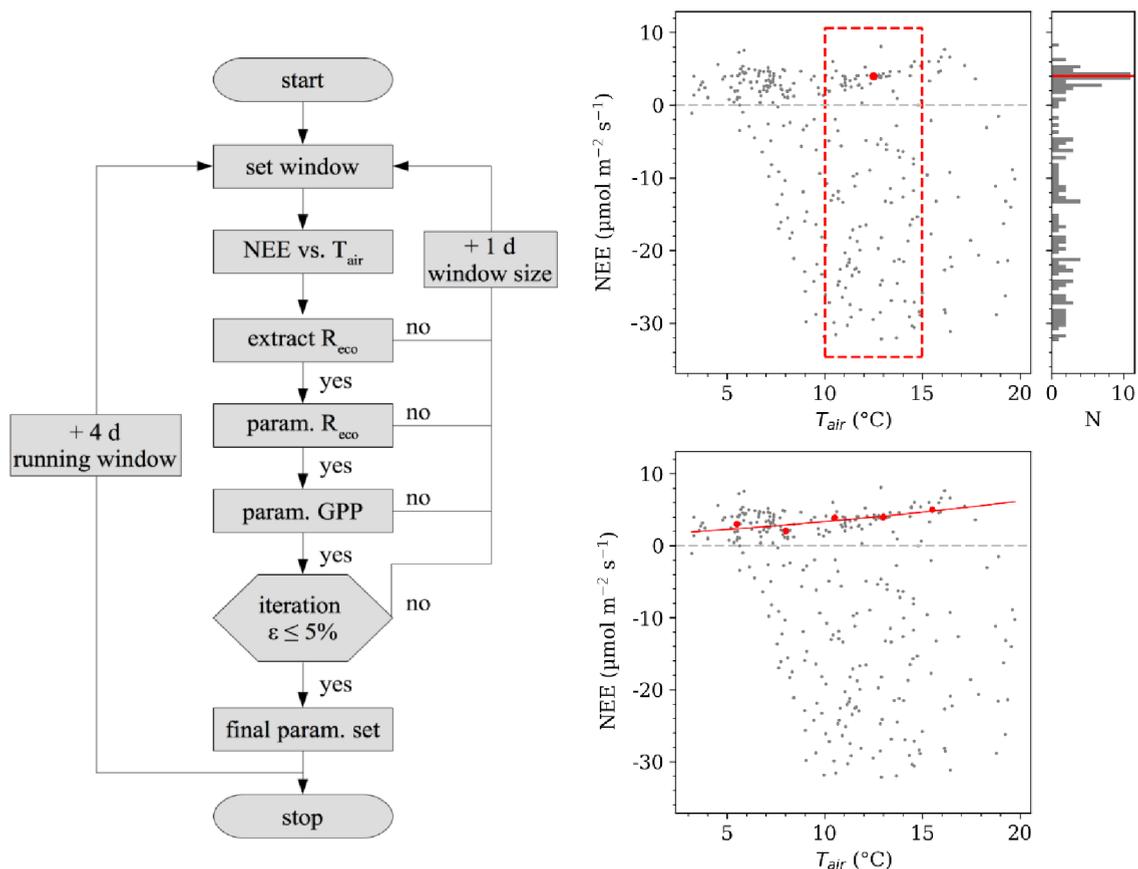


Abbildung 2: Fließschema (links) des „Gap-Filling-Source-Partitioning“ – Algorithmus nach Ney (2019). Der gegenüber existierenden Algorithmen neuartige initiale Selektionsmechanismus für  $R_{eco}$  aus allen verfügbaren  $NEE$  – Daten ( $NEE$  vs.  $T_{air}$  bis param.  $R_{eco}$ ) ist rechts beispielhaft dargestellt. Dabei wird der Umstand genutzt, dass innerhalb eines bestimmten Zeit- (initial 7 Tage) und Temperaturfensters (5 K) der Modalwert (das Maximum der Häufigkeitsdichte) von  $NEE$  ein guter Schätzwert für weder durch stochastische Messfehler noch Photosynthese verfälschte  $R_{eco}$ -Messungen ist.

Die Doktorandin Anne Klosterhalfen führte als alternative, weitergehende Innovation die Partitionierung mittels inverser Parameterbestimmung an einem prozessbasierten Pflanzenwachstums- und Bodenmodell durch (Klosterhalfen et al., 2017a). Aus beiden Arbeiten werden im Folgenden Beispiele gezeigt. Abbildung 2 zeigt ein Fließschema sowie das Funktionsprinzip

des Algorithmus nach Ney (2019), Abbildung 3 ein Schema und Beispielergebnis des in Klosterhalfen et al. (2017a) verwendeten Modells AgroC.

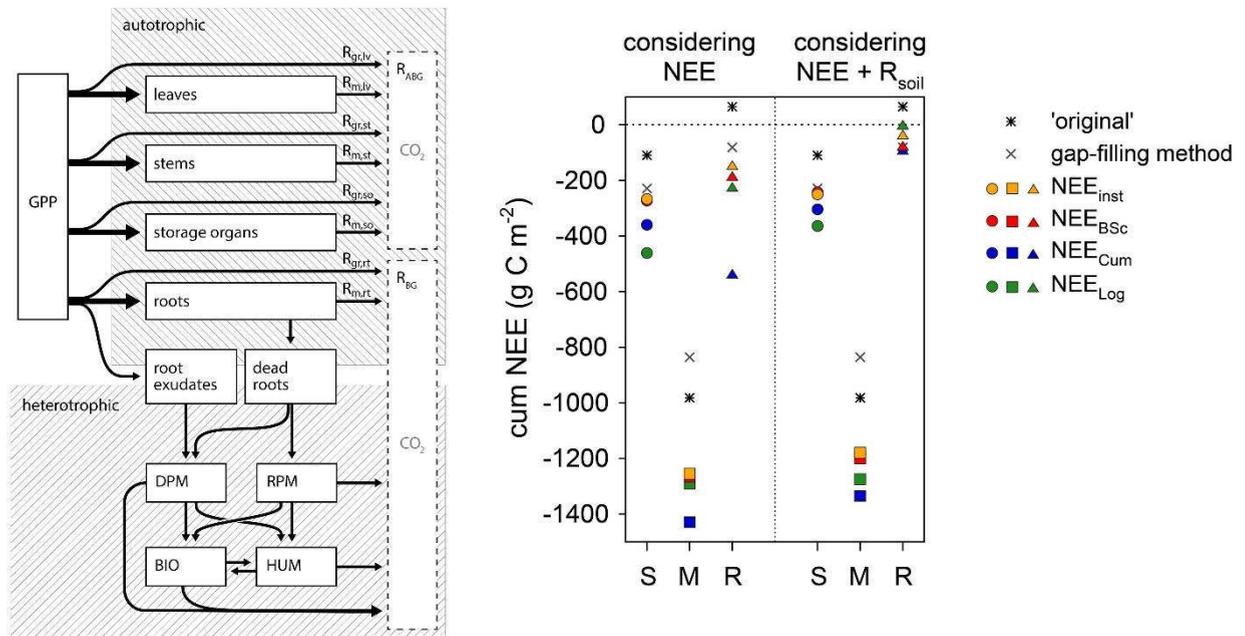


Abbildung 3: Fließschema des Modells AgroC und Beispiel aus unterschiedlichen Parameterbestimmungsmethoden resultierender Jahressummen der CO<sub>2</sub>-Aufnahme für drei Standorte Selhausen (S), Merzenhausen (M) und Rollesbroich (R). „Original“ bezieht sich auf das Modell ohne Inversion mithilfe der Eddy-Kovarianz-Messungen, „gap-filling method“ auf NT bzw. MDS (die geringsten quadratischen Fehler erbrachten die Methoden inst und BSc, ihre Jahressummen stimmen meist gut überein, weichen aber tlw. von NT ab).

Detaillierte Ergebnisse zu den drei „Gap-Filling“-Algorithmen sind wegen ihrer inhaltlichen Relevanz in Kap. II.1.6 (Abbildung 13) aufgeführt. Wie dort zu sehen, führt DT typischerweise zu einer etwas stärkeren Aufspreizung des gemessenen NEE in ein somit höheres GPP und  $R_{eco}$ . Der eigene neue Algorithmus liegt meist zwischen beiden Ansätzen. Bildet man aus  $GPP_{DT}$  und  $R_{eco,DT}$  mit diesen konsistente NEE-Schätzwerte für Datenlücken, so unterscheidet sich nicht nur die Partitionierung, sondern auch die Gesamtbilanz zwischen NT (bzw. den hier standardmäßig verwendeten MDS-Schätzern, vgl. Wutzler et al., 2018) und DT, wobei DT zumindest in unserem Fall zu etwas höheren Senken- bzw. geringeren Quellstärken tendiert (Abbildung 13). Auch hier liegt der eigene neue Ansatz meist zwischen NT und DT und nimmt somit nicht nur hinsichtlich des methodischen Ansatzes, sondern auch hinsichtlich der Ergebnisse eine vermittelnde Rolle ein. Ebenfalls leicht unterhalb NT bzw. MDS liegen typischerweise die lückenlosen Jahresbilanzen das an die Eddy-Kovarianz-Messungen angepassten AgroC-Modells (v.a. mit den mutmaßlich besten Inversionsmethoden inst und BSc, s. Abbildung 3). An einem Standort mit guter Messdatenverfügbarkeit und günstigen Bedingungen für die EC-Methode wie Selhausen fallen die Unterschiede zu NT gering aus, können aber bei ungünstigeren Bedingungen, wie sie leider an vielen EC-Standorten herrschen (hier Standorte Merzenhausen und Rollesbroich) erheblich sein. Ein weiterer Vorteil eines Modells wie AgroC ist die feinere Partitionierung in weitere Komponenten wie autotrophe und heterotrophe Bodenatmung (vgl. Fig. 6 in Klosterhalfen et al., 2017a).

## II.1.2 Ansatz 2: Nutzung turbulenzauflösender bivariater Statistiken

Die beiden Algorithmen nach Scanlon und Sahu (2008) bzw. Scanlon und Kustas (2010), im Folgenden SK10, und nach Thomas et al. (2008), im Folgenden TH08, wurden von Anne Klosterhalfen und dem Projektleiter als Python-Code implementiert, um in beliebigem Umfang Varianten und inkrementelle Verbesserungen testen zu können. Unsere implementierten und getesteten Verbesserungen umfassten unter anderem eine Clusteranalyse zur Abtrennung der Respirationsereignisse bei Thomas et al. (2008) und alternative Abschätzungsmöglichkeiten der Blattoberflächentemperatur aus Strahlungsmessungen oder der Monin-Obukhov-Ähnlichkeitstheorie bei Scanlon und Kustas (2010). Außerdem wurden im Rahmen eines von Arnold F. Moene betreuten Auslandsaufenthalts von Anne Klosterhalfen am Institut für Meteorologie und Luftqualität der Universität Wageningen (NL) mehrere Large-Eddy-Simulationen (LES) entworfen und durchgeführt, um synthetische Eingangsdaten für Ansatz 2 unter idealen Bedingungen sowie im Feld nicht messbare Daten zu erzeugen. Mit diesen konnten die Annahmen und Zwischenergebnisse der Methoden überprüft und ihre Partitionierungsergebnisse mit einer bekannten, wahren Referenz verglichen werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden unter anderem in Klosterhalfen et al. (2019a) und Klosterhalfen et al. (2019b) veröffentlicht, einige Beispielergebnisse werden im Folgenden beschrieben. Ein Vergleich (Klosterhalfen et al., 2019a) beider Algorithmen an Rohdaten von 12 Eddy-Kovarianz-Stationen über unterschiedlich hohen und dichten Pflanzenbeständen unter Zuhilfenahme von Haubenmessungen und Ansatz 1 als Referenz zeigte, dass Ansatz 2 (für CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O) generell wesentlich weniger robuste und plausible Ergebnisse erbringt als Ansatz 1 (nur für CO<sub>2</sub>). Vergleichsweise nutzbar sind aus Messdaten mehrerer aufeinanderfolgender Tage gemittelte Tagesgänge der partitionierten Flüsse, während ungemittelte Zeitreihen (halbstündige Auflösung für jeden Beobachtungstag einzeln) zahlreiche Ausreißer nach oben und unten enthalten, wobei TH08 eher zur Unter- und SK10 eher zur Überschätzung des Absolutbetrags der Flusskomponenten neigte (Abbildung 4).

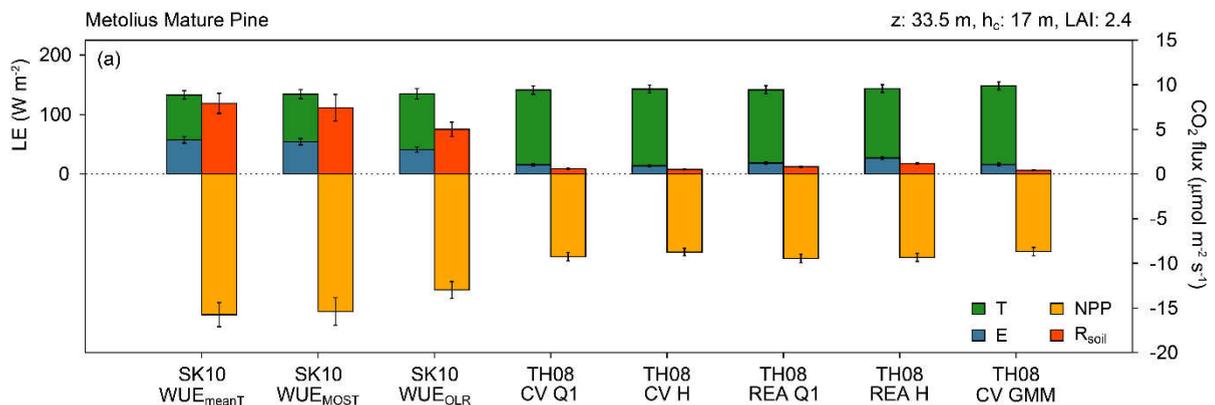


Abbildung 4: CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Flusspartitionierung im Tagesintegral an einem Standort nach verschiedenen Varianten von SK10 und TH08, aus Klosterhalfen et al. (2019a). Die nach standortübergreifender Evaluierung an Haubenmessungen und Ausreißerstatistiken zuverlässigste Methode ist SK10 WUE<sub>OLR</sub> (SK10 mit Ermittlung der Blattoberflächentemperatur für WUE anhand langwelliger Ausstrahlung).

Die alternative Bestimmung der Blattoberflächentemperatur aus der an der EC-Station gemessenen langwelligigen Ausstrahlung verbesserte die Ergebnisse von SK10 leicht, während die Clustermethode die Ergebnisse von TH08 nicht verbesserte. SK10 funktionierte am besten an Standorten mit einer im Vergleich zur Pflanzenhöhe geringen Messhöhe, TH08 an Standorten mit niedriger, schütterer Pflanzendecke. Messungen hoch über dichten Pflanzendecken, wie sie an vielen EC-Standorten aufgrund allgemeiner Erwägungen nötig oder bevorzugt sind, können somit mit beiden Algorithmen

nur ungenau und wenig robust partitioniert werden. Ein wichtiges Ergebnis der LES-basierten Analyse (Klosterhalfen et al., 2019b) bestand im Aufdecken einer oft verletzten Grundannahme in SK10: Der Korrelationskoeffizient zwischen pflanzen- und bodenbürtigen Fluktuationen eines Gases sollte dem Quotienten der Transporteffizienzen (Korrelationskoeffizient des Vertikalwinds mit den bodenbürtigen durch denjenigen mit den pflanzenbürtigen Fluktuationen) entsprechen. Dies ist bereits im LES, trotz erzwungener räumlich homogener und zeitlich stationärer Bedingungen, nicht der Fall. Die Einführung eines Korrekturfaktors für die Quotienten konnte die Ergebnisse deutlich verbessern, unter Feldbedingungen ist dieser Korrekturfaktor allerdings unbekannt. Auch der in der Feldstudie festgestellte ungünstige Einfluss einer großen Messhöhe über der Pflanzendecke konnte im LES gut nachgewiesen werden (Abbildung 5): Mit zunehmender Messhöhe nimmt aufgrund der bis dort erfolgten Durchmischung von Luftpaketen die nutzbare Information über boden- und pflanzenbürtige Fluktuationen im  $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$ -Streudiagramm massiv ab. Durchweg nach Ansatz 2 nutzbare EC-Messtationen vor allem für niedrige Pflanzenbestände müssten somit unter Gesichtspunkten errichtet werden, die den sonst üblichen Kriterien für hochwertige Nettoflüsse (z.B. Messhöhe mindestens 10 Rauigkeitslängen über der Verschiebungshöhe) widersprechen. Denkbar wäre allenfalls eine Ergänzung vorhandener Stationen um zusätzliche Messhöhen, wobei allerdings mehrere Messhöhen bzw. Messhöhen innerhalb und unterhalb der Pflanzendecke vorteilhafter wären und ein fließender Übergang zu Profilauswertungen nach Ansatz 3 (s.u.) gegeben wäre. Als zuverlässiges Werkzeug zur operationellen Flusspartitionierung an bereits vorhandenen Datensätzen von Standardstationen ist Ansatz 2 ohne Zusatzmessungen nach unseren Untersuchungen nicht geeignet.

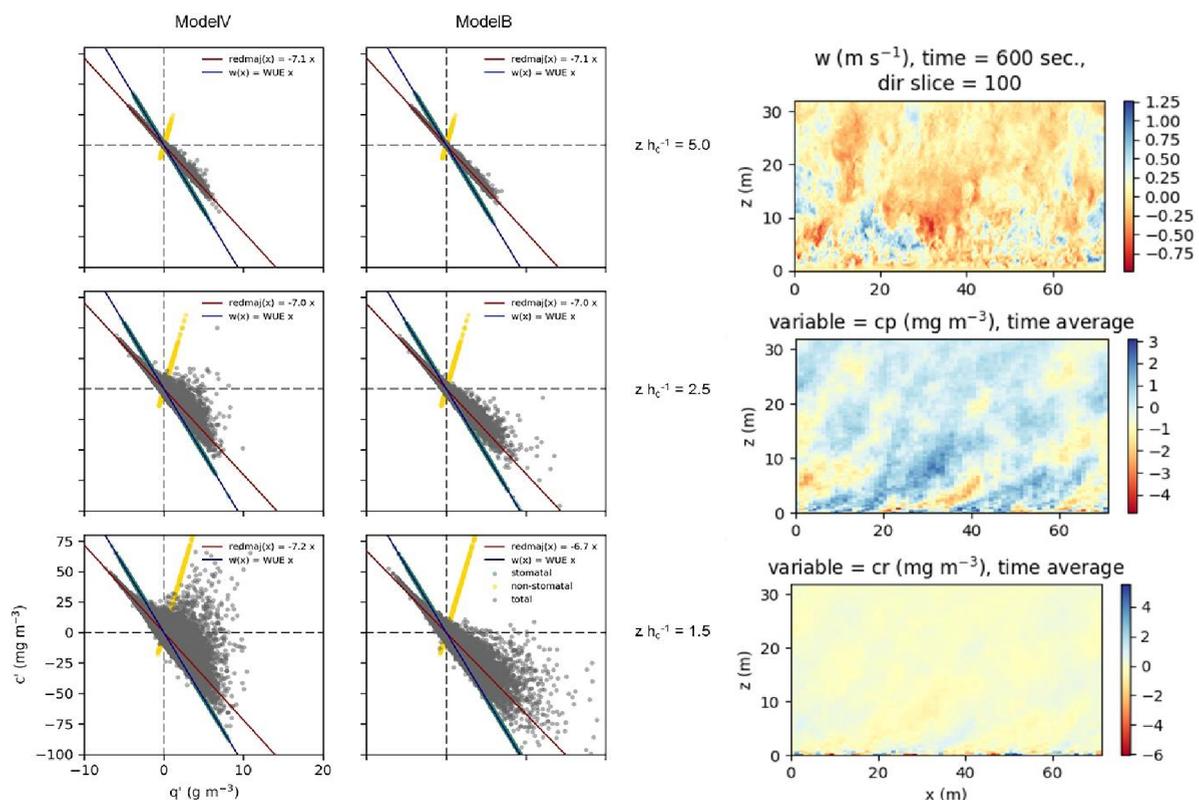


Abbildung 5: Links: Entwicklung messbarer Streudiagramme von Fluktuationen der  $\text{CO}_2$ - ( $c'$ ) und  $\text{H}_2\text{O}$ -Fluktuationen ( $q'$ ) mit der Messhöhe im Verhältnis zur Pflanzenhöhe ( $z h_c^{-1}$ ) in einem synthetischen Experiment nach Klosterhalfen et al. (2019b) für zwei verschiedene Quellstärkenverteilungen (ModelV und ModelB). Rechts: Beispiel-Momentaufnahmen (Längsschnitte durch das Modellgebiet) aus den LES für Vertikalwind (oben), pflanzen- (Mitte) und bodenbürtige (unten)  $\text{CO}_2$ -Fluktuationen.

### II.1.3 Ansatz 3: Zusatzmessungen (Hauben, Mikrolysimeter, Profil)

Hauben- und Mikrolysimetermessungen wurden im Projektverlauf vielfach eingesetzt, um unabhängige Referenzdaten für die übrigen Partitionierungsmethoden zu erzeugen und die inhaltlichen Fragestellungen des Projekts zu bearbeiten. Da jedoch gemäß Projektantrag keine systematischen Weiterentwicklungsversuche der bereits etablierten Methodik in größerem Umfang stattfanden, konzentriert sich dieses Kapitel im Folgenden auf die Profilmethode. Zu deren Anwendung und Weiterentwicklung entwickelten der Projektleiter und die Doktorandin Patrizia Ney eine Profilmessanlage nach dem „Aufzugprinzip“, die im Gegensatz zu herkömmlichen Profilmessanlagen Vertikalprofile mit extrem hoher vertikaler Auflösung ohne systematische Fehler zwischen für verschiedene Höhen zuständige Instrumente ermöglicht (vgl. Abbildung 6).

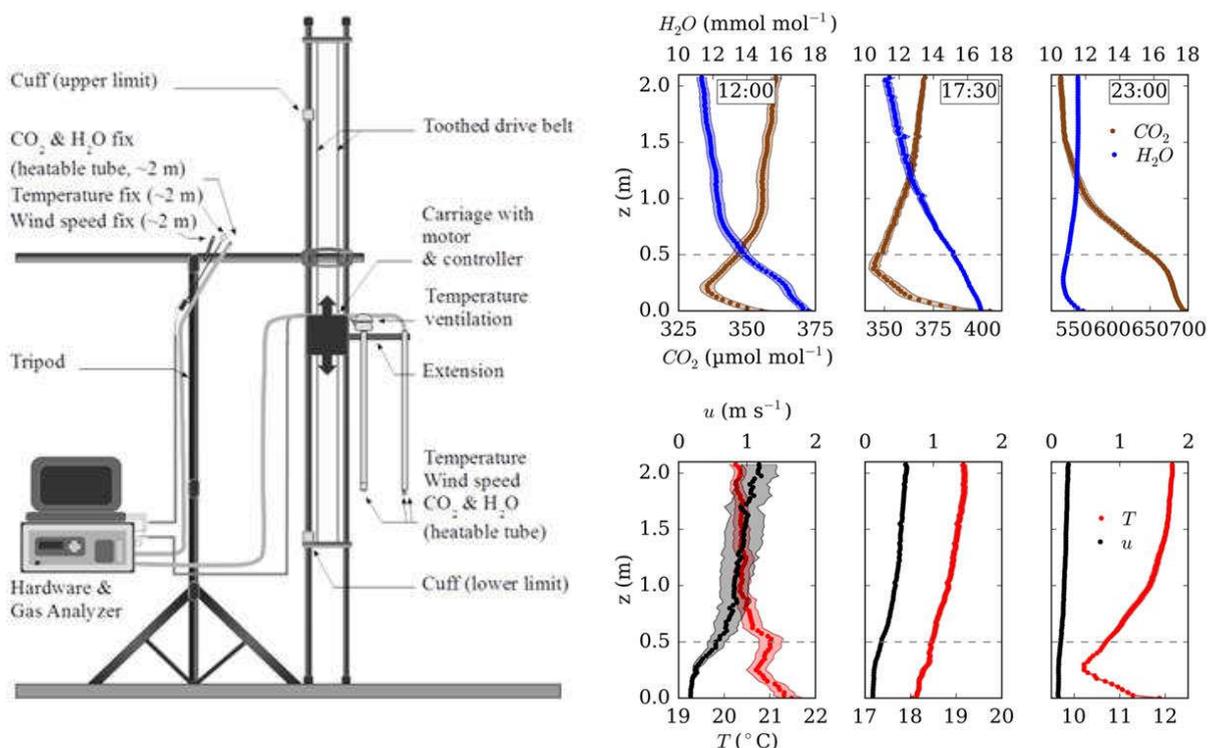


Abbildung 6: Schemazeichnung der Profilanlage (links, Foto s. Deckblatt) und Beispielprofile in einem Zuckerrübenbestand am Standort Selhausen am 21.8.2017 (rechts, Uhrzeiten in UTC). Die nachmittags gemessenen Profile zeigen eine starke CO<sub>2</sub>-Aufnahme und H<sub>2</sub>O-Abgabe in der Pflanzendecke sowie CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Abgabe an der Bodenoberfläche. Abends (17:30 UTC bzw. 19:30 MESZ) rückt aufgrund des Sonnenwinkels der Bereich stärkster CO<sub>2</sub>-Aufnahme nach oben. Nachts wird CO<sub>2</sub> in der Pflanzendecke durch Respiration abgegeben, während in diesem speziellen Fall durch Taubildung auf Höhe des Temperaturminimums in der Mitte der Pflanzendecke der Atmosphäre H<sub>2</sub>O entzogen wird.

Durch die Verwendung von Instrumenten mit entsprechender Reaktionszeit ist dabei bis zu einem gewissen Grad auch die turbulente Varianz jeder Größe in jeder Höhe messbar. Die vertikale Auflösung und die Mittelungszeit für ein Profil lassen sich nach der eigentlichen Messung im Rahmen der Auswertung, unter Beachtung ihres jeweiligen Einflusses auf die stochastische Messunsicherheit, frei wählen. Die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse basieren auf einer Vertikalauflösung von 2.5 cm und einem Mittelungszeitraum von 30 Minuten, der etwa 50 Einzelprofilen entspricht. Ebenfalls im Rahmen der Rohdatenprozessierung nach einer Messung wurde ein hysteresebasierter Algorithmus zur Bereinigung der Zeitverzögerungen zwischen den Messkanälen für Aufzugposition und einzelne

Variablen entwickelt, z.B. aufgrund der Verweilzeit der Probenluft im Ansaugschlauch des Gasanalysators. Die Anlage misst in ihrer Standardausstattung Temperatur, Wind, CO<sub>2</sub> und Luftfeuchte (H<sub>2</sub>O), wurde jedoch auch an Isotopenanalysatoren getestet (vgl. nächstes Kapitel). Im Projektverlauf wurde sie kontinuierlich verbessert, unter anderem durch Beheizung und Isolation der Probenluftleitung für die genaue Messung von Luftfeuchteprofilen unter kondensierenden Bedingungen. Ergebnisse der Profilmessungen sind unter anderem in Ney und Graf (2018) und Vila-Guerau de Arellano et al. (2018) veröffentlicht. Die intensiv erprobte Kombination mit der Surface-Renewal-Methode musste als wenig aussichtsreich verworfen werden, stattdessen wurden drei verschiedene Inversionsalgorithmen zur Schätzung der Quellprofile aus den Konzentrationsprofilen in zahlreichen Varianten und eigenen Neuerungen zur Parametrisierung des Turbulenzprofils getestet. Die Beispielinversion eines halbstundengemittelten Profils zeigt Abbildung 7.

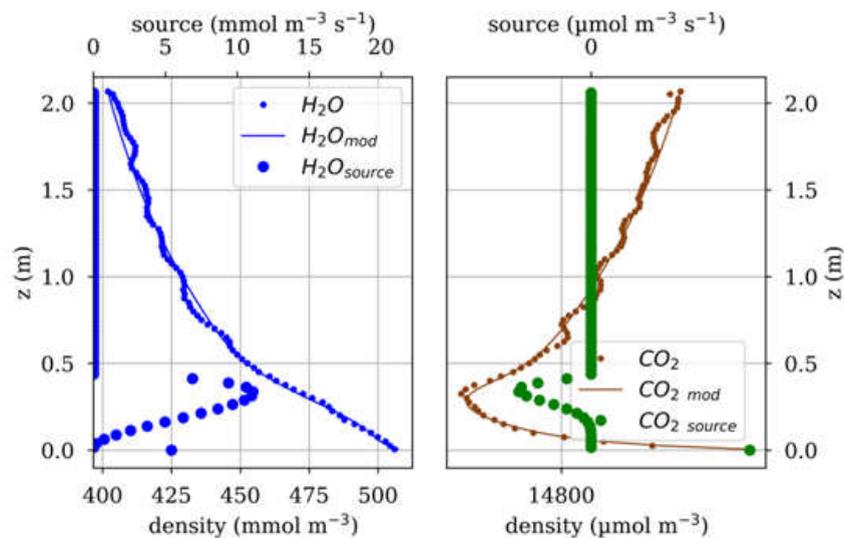


Abbildung 7: Mit der Profilanlage gemessene Konzentrationsprofile (H<sub>2</sub>O / CO<sub>2</sub>), daraus mittels inverser Parameterbestimmung aus einem Turbulenzmodell abgeleitete vertikale Quellstärkenverteilung (Index „source“) und resultierende angepasste Modell-Konzentrationsprofile (Index „mod“) am 7.5.2018, 12:00-12:30 UTC.

Ein weiteres Beispielergebnis als Mehrtagesgang aus der Inversion abgeleiteter Evaporation E, Transpiration T, Bodenrespiration R<sub>s</sub> und oberirdischer Netto-CO<sub>2</sub>-Aufnahme NPP<sub>a</sub> zeigt Abbildung 8. Diese beinhaltet zugleich einen simultanen Vergleich vieler anderer Methoden aus allen vier Ansätzen.

Die Veröffentlichung weiterer invertierter Quellprofile steht unmittelbar bevor (Vila-Guerau de Arellano et al., in Druck).

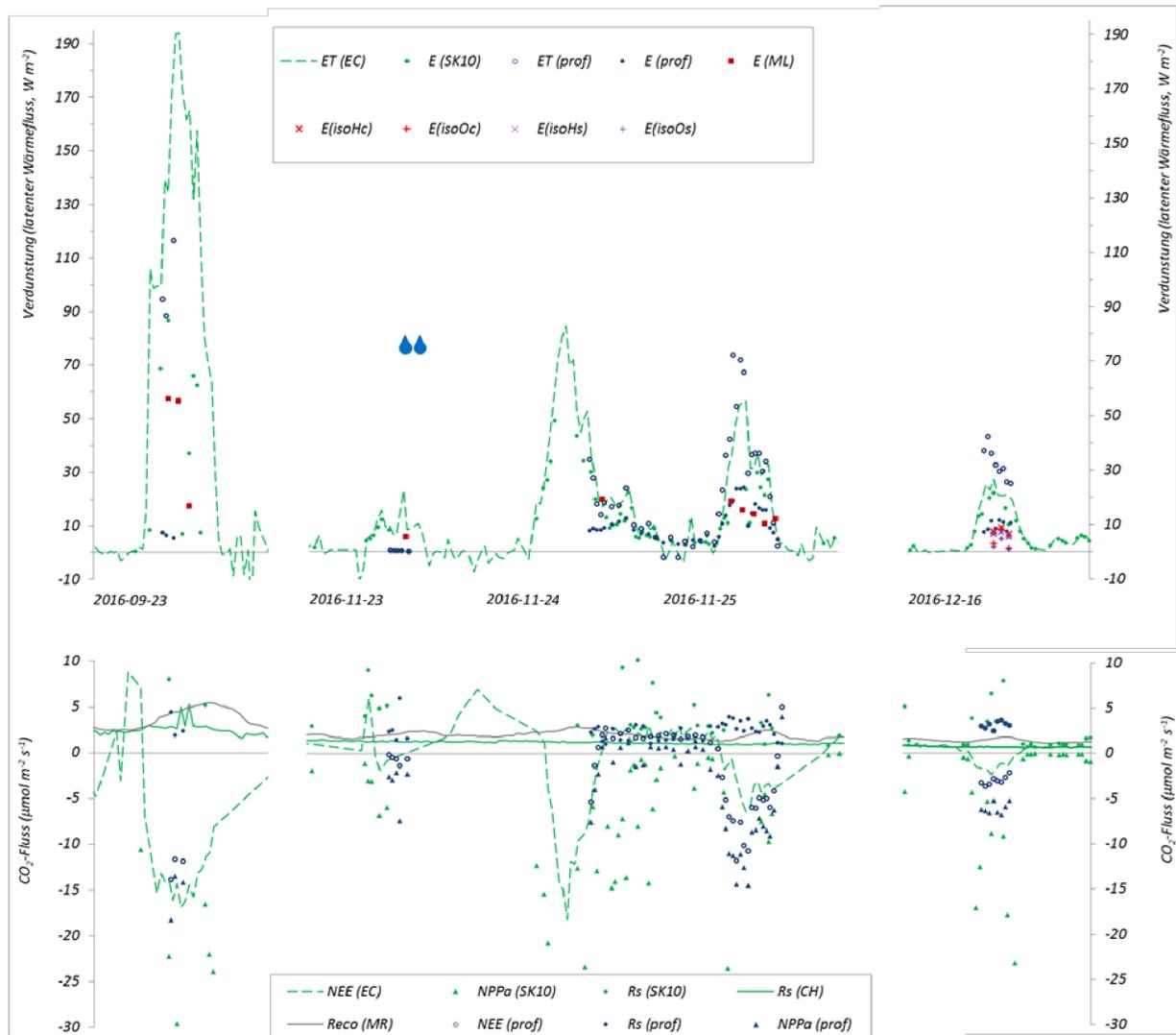


Abbildung 8: Partitionierungsergebnisse nach verschiedenen Methoden für die Evapotranspiration (oben) und den  $\text{CO}_2$ -Fluss (unten) für drei Intensivmesskampagnen am Standort Selhausen. ET(EC): Gesamtverdunstung nach der EC-Methode; E(SK10): Evaporationsanteil daran nach SK10, ET(prof): Gesamtverdunstung nach der Profilmethode; E(prof): Evaporationsanteil daran; E(ML): Evaporation nach Mikrolysimetermessungen; E(isoH): Evaporation nach 2H-Isotopenmessung; E(isoO): Evaporation nach 18O-Isotopenmessung, der Anhang s („soil sample“) bzw. c („chamber“) bezieht sich auf die jeweilige Quelle der Evaporations-Referenzisotopie im Mischungsmodell. NEE, NPPa und Rs bezeichnen den Nettofluss, die oberirdische Aufnahme (Nettoprimärproduktion) und Bodenrespiration von  $\text{CO}_2$  nach den entsprechenden Methoden und Reco(MR) die Ökosystemrespiration nach NT.

## II.1.4 Ansatz 4: Isotopenmessungen

Um Flüsse isotonenbasiert partitionieren zu können, wurden von der dritten Doktorandin Maria Quade zunächst umfangreiche Laborversuche durchgeführt. Diese hatten zum einen das Ziel, das zu diesem Zeitpunkt noch völlig neuartige Gerät (ein Infrarot-Doppellaserspektrometer für  $\text{H}_2\text{O}$ - und  $\text{CO}_2$ -Isotopologie des Herstellers Aerodyne) zu testen und konfigurieren, und zum anderen die Validierung von Methoden (u.a. Rothfuss et al., 2013) zum Monitoring der Bodenluft-Isotopie mittels semipermeabler Schläuche und zur Bestimmung des Fraktionierungsfaktors während der Evaporation. Während die Validierung der selbstentwickelten Probenahme- und Auswertemethodik erfolgreich verlief und u.a. in Quade et al. (2018) veröffentlicht wurde, musste das Gerät gegen ein anderes bestehendes Gerät (Picarro L2120-i) ausgetauscht werden, welches für die Messung von  $\text{H}_2\text{O}$ -Isotopen und nur für geringe Flussraten ausgelegt ist.

Auf Basis der erfolgreichen Laborversuche wurden mithilfe derselben Technik (semipermeable Schläuche in mehreren Bodentiefen und Ansaugleitungen in mehreren Höhen über dem Boden, im Rahmen des Projekts entwickelter Multiplexer, Picarro-Analyzer) und einer hierfür gebauten klimatisierten Box für das temperatursensitive Messgerät Feldmessungen am Standort Selhausen durchgeführt. Abbildung 9 zeigt als Beispiel mit der Anlage gemessene Profile von Wasserdampfkonzentration und Isotopenverhältnissen in und über dem Bestand.

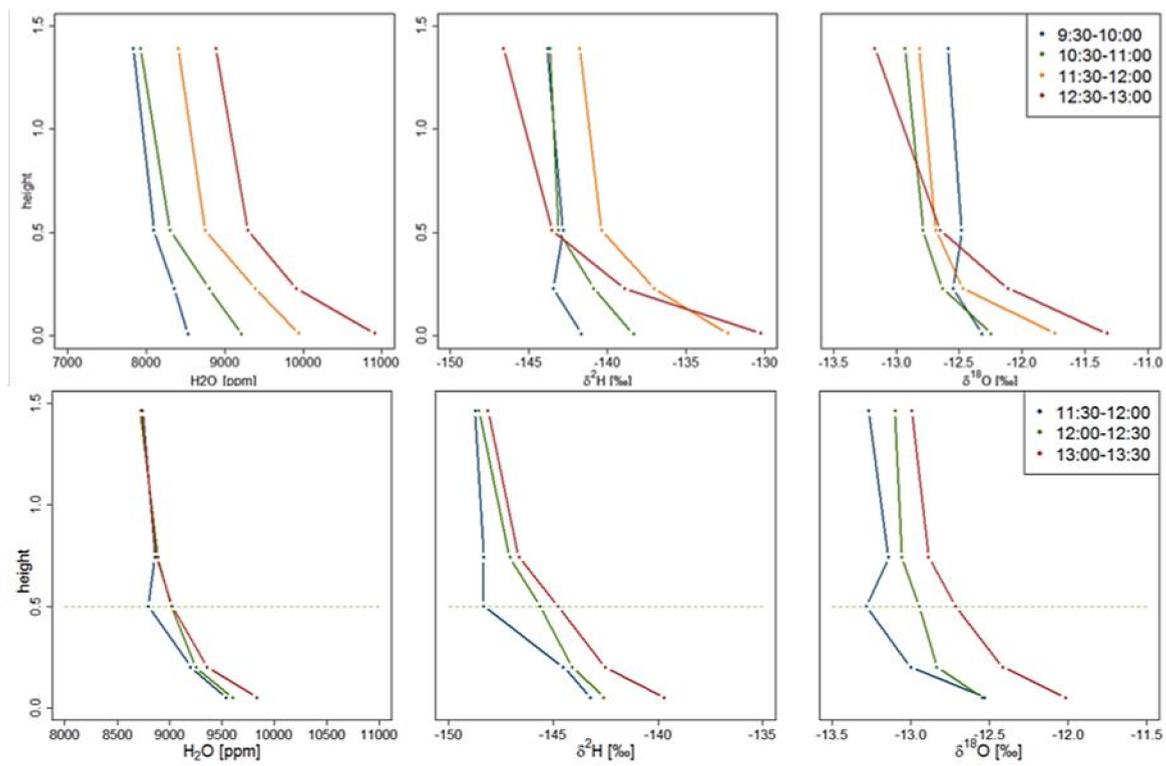


Abbildung 9: Profile der atmosphärischen Wasserdampfkonzentration (links) und ihres relativen Anteils an Deuterium (Mitte) und  $^{18}\text{O}$  (rechts) am 25.11. und 16.12.2016 nach sequentieller Messung an einem statischen Profil aus vier (25.11.) bzw. fünf (16.12.) Messleitungen.

Die aus diesen Messungen und am 16.12. vollständig vorliegenden Referenzmessungen am Boden- und Pflanzenwasser ermittelte Verdunstungskomponente E ist, getrennt für  $^2\text{H}$  und  $^{18}\text{O}$  als Informationsquelle, in Abbildung 8 im vorangegangenen Kapitel eingetragen. Die Transpiration T entspricht der Differenz zwischen EC-basierter Gesamtverdunstung und E, da Isotopenmethoden lediglich das Verhältnis von E bzw. T zu ET und keine absoluten Flüsse ermitteln. Weitere derartige

Messungen simultan mit Mikrolysimetermessungen wurden 2017 durchgeführt und in Quade et al. (2019) veröffentlicht (Abbildung 10).

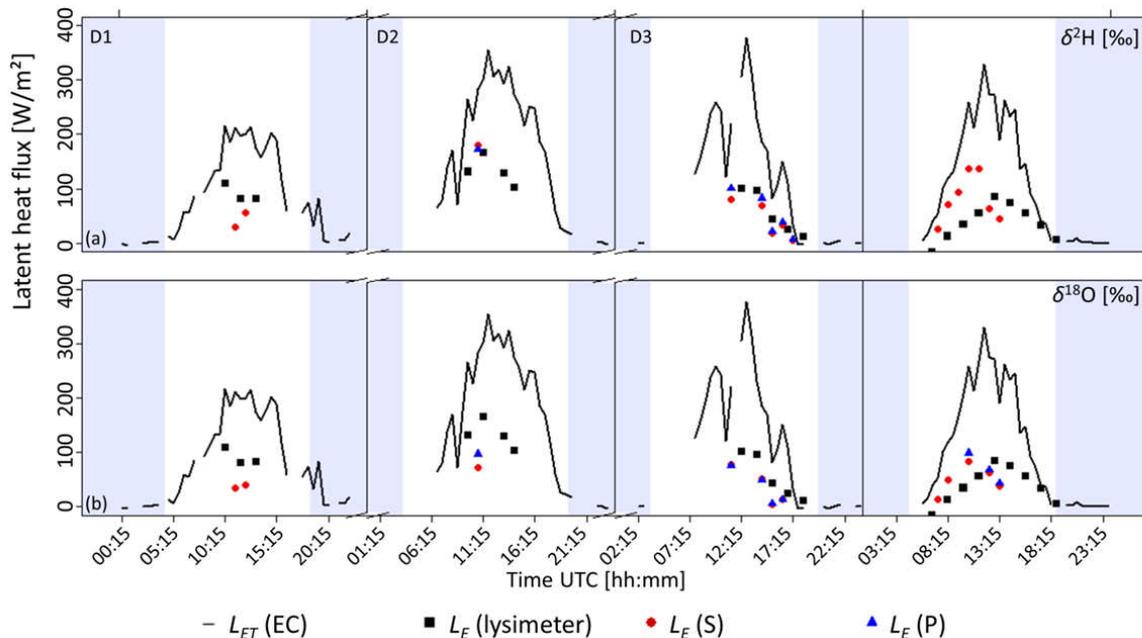


Abbildung 10: EC-basierte Gesamtverdunstung als latenter Wärmefluss ( $L_{ET}$ ) und Evaporationsanteile ( $L_E$ ) daran nach Mikrolysimeter-, Deuterium (a/oben) und  $^{18}\text{O}$ -Messungen (b/unten). Die Indizes S (sample, rot) und P (profile, blau) beziehen sich auf die Gewinnung des Referenzwertes der Isotopenzusammensetzung des verdunsteten Bodenwassers auf Basis von Bodenproben (S) und anschließender Modellierung bzw. des Profils aus semipermeablen Schläuchen im Boden (P). Messtage v.l.n.r. waren der 29.5., 13.7. sowie 21.-22.8.2017.

In Anbetracht der noch allen Methoden eigenen Unsicherheit bei der Bestimmung genauer Evaporationsanteile zeigten Mikrolysimeter- und Isotopenmessungen gute Übereinstimmung. Zeitweise im Vergleich höher ausfallende Mikrolysimetermessungen können auch auf unvermeidbare Inseleffekte der Mikrolysimeter zurückzuführen sein. Eine Ausnahme stellt der Morgen des letzten Messtages dar; in dieser Nacht wurde erhebliche Taubildung auf den Zuckerrübenblättern beobachtet (vgl. Abbildung 6), dessen Wiederverdunstung neben Transpiration und bodenbürtiger Evaporation eine weitere, durch die Mikrolysimeter nicht messbare Evaporationskomponente darstellt.

Im Projektverlauf wurde mehrfach versuchsweise der eingangs erwähnte Aerodyne-Analyzer (nach Rekonfigurationen in Rücksprache mit dem Hersteller bzw. durch den Hersteller nach Einsendung) im oben beschriebenen Aufbau, an der Ansaugstelle der EC-Anlage, und an der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Aufzug-Profilanlage eingesetzt. Während  $\text{H}_2\text{O}$ - und  $\text{CO}_2$ -Konzentrationsmessungen des Geräts nach entsprechenden Korrekturen teilweise gut mit denen der Referenzgeräte (EC-Station, Infrarot-Analyzer der Aufzulanlage) übereinstimmten, kam es u.a. aufgrund der Drifteigenschaften des Gerätes bei den Isotopenmessungen immer wieder zu Problemen.

## II.1.5 Messkampagne auf einem extensiven Gründach in Berlin

Im Sommer 2015 führten wir auf einem extensiv begrünten Parkhausdach des im Bau befindlichen Flughafens BER Messungen in Ergänzung von EC-Messungen der AG Weber (TU Braunschweig) durch. Verwendung fanden Bodenatmungshauben in einer mobilen (manuellen) und stationären (automatischen) Variante, eine transparente Haube zur NEE-Messung (Li-8100, Li-Cor Biosciences, Lincoln, NE, USA), und eine selbst entwickelte (Graf et al., 2013) transparente Haube zur simultanen NEE- und ET-Messung (Abbildung 11).



*Abbildung 11: Messungen auf extensivem Gründach. v.l.n.r.: Manuelle Respirationsmessung des Flächenmittelwerts auf einem Transekt aus 30 Punkten; automatische Messung von Bodenrespiration (unbewachsene Punkte), Gesamtrespiration (bewachsen) und Netto-CO<sub>2</sub>-Fluss NEE (bewachsen, transparente Haube); Tunnelhaube (NEE und Verdunstung); EC-Station der TU Braunschweig.*

Abbildung 12 zeigt die Zeitreihen aller mit geschlossenen Hauben direkt oder indirekt ermittelten CO<sub>2</sub>-Flusskomponenten. Das nächtliche Absinken des residual aus den direkt messbaren Komponenten ermittelten Photosyntheseflusses (GPP) auf Werte um Null weist darauf hin, dass die räumliche Homogenität der Flüsse oder die Wahl der Messpunkte für R<sub>eco</sub> und NEE für derartige Ableitungen nicht direkt messbarer Komponenten ausreichte.

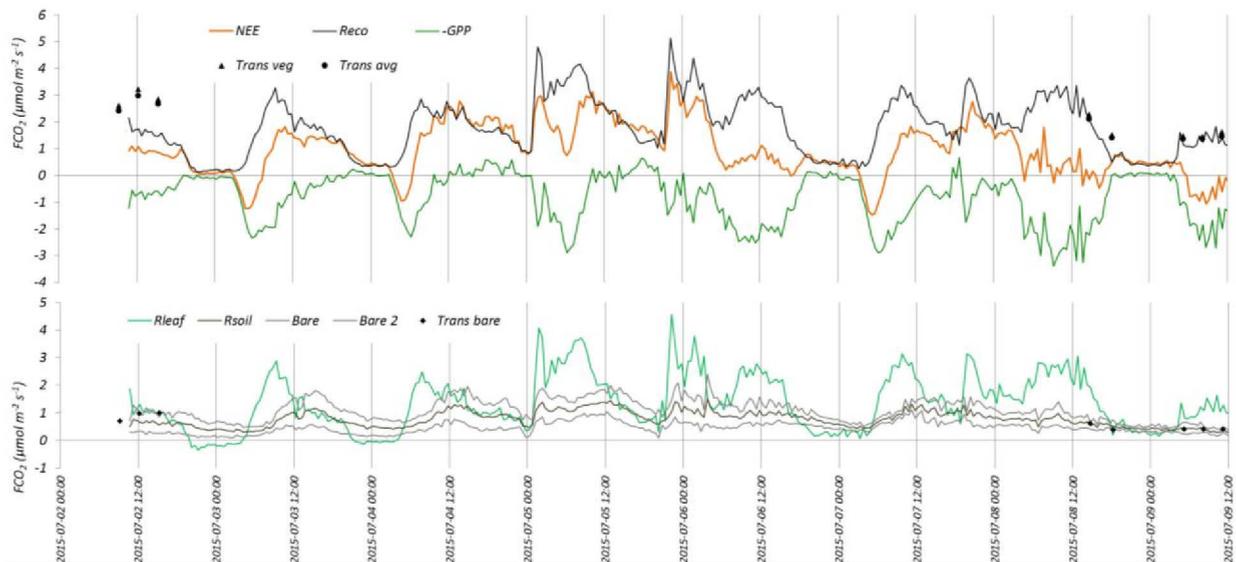


Abbildung 12: Linien: Kontinuierlich (automatisch) gemessene  $\text{CO}_2$ -Flusskomponenten auf extensivem Gründach. NEE: transparente Haube auf bewachsenem Messpunkt;  $R_{\text{eco}}$ : opake Haube auf vergleichbaren Messpunkt;  $R_{\text{soil}}$ : Mittel zweier opaker Hauben auf unbewachsenem Substrat (Bare und Bare 2), GPP:  $-NEE -R_{\text{eco}}$ , Blattatmung  $R_{\text{leaf}}$ ;  $R_{\text{eco}} -R_{\text{soil}}$ . Punkte: Mittelwerte aus den jeweils 1.5 Stunden dauernden Begehungen des Transekts aus 30 Punkten (3 ohne Bewuchs: Trans bare; 27 tlw. bewachsen: Trans veg)

Die weitgehende Übereinstimmung mit den jeweils maßgeblichen Flächenmittelwerten aus den manuellen Messungen (Trans avg für Reco, Trans bare für Rsoil) zeigt die Repräsentativität der automatischen Messpunkte.

Für Mitigations- und Adaptionsfragestellungen lässt sich festhalten, dass ein extensiv begrüntes Dach dieser Art während sommerlicher Trockenperioden zu einer leichten  $\text{CO}_2$ -Quelle werden kann bzw. eine schwächere Senke darstellt als andere urbane Ökosysteme, die auf einen größeren Bodenwasserspeicher zurückgreifen können. Auch ET und damit die Verdunstungskühlung blieb mit Tageswertwerten um  $0.1 \text{ mm h}^{-1}$  ( $80 \text{ W m}^{-2}$ ) deutlich hinter derjenigen der meisten anderen mitteleuropäischen Ökosysteme unter Trockenstress (vgl. Kap. II.1.8) zurück. Damit können extensiv begrünte Dachflächen dieser Art (keine Bewässerung, geringe Substrattiefe, schütterere Bepflanzung aus trockenresistenten Arten) zwar im Jahresmittel einen Beitrag zur Mitigation (v.a. durch  $\text{CO}_2$ -Aufnahme) und Adaptation (durch Verdunstungskühlung) des Klimawandels leisten (Heusinger und Weber, 2017), können unter akuten andauernden Hitze- und Dürreperioden jedoch typische Grünflächen nicht ersetzen. Positiv zu werten ist unter diesen Bedingungen allerdings die Vermeidung einer Aufzehrung von Boden- oder Bewässerungswasser (vgl. Diskussion in Kap. II.1.8) bei gleichzeitigem Überleben der angepassten Vegetation, die somit unter günstigeren Bedingungen ihre Ökosystemdienstleistungen wiederaufnehmen kann.

## II.1.6 Bilanzierung einer landwirtschaftlichen Fruchtfolge und Zwischenfruchtanbau

Auf Basis der im Projektzeitraum erhobenen Daten von 25. Oktober 2014 (Einsaat) bis 26. April 2019 (Einsaat) wurde ein viereinhalbjähriger Fruchtfolgezeitraum mit den regionaltypischen Früchten Winterweizen (zweimal im Zeitraum), Wintergerste und Zuckerrübe, einer längeren Bracheperiode sowie einmaliger Anwendung einer den neuen EU-Förderrichtlinien entsprechenden Zwischenfrucht Mischung bilanziert. Der Teilzeitraum bis 25. Oktober 2017 (zweite Winterweizeneinsaat) ist bereits als Teil der Dissertation Ney (2019) veröffentlicht, eine Veröffentlichung des o.g. Gesamtzeitraums in Vorbereitung. Abbildung 13 zeigt die jeweils für eine Frucht kumulierten  $\text{CO}_2$ -Flüsse einschließlich der partitionierten Flüsse nach zwei bestehenden und einer eigenen Methode (vgl. Kapitel II.1.1).

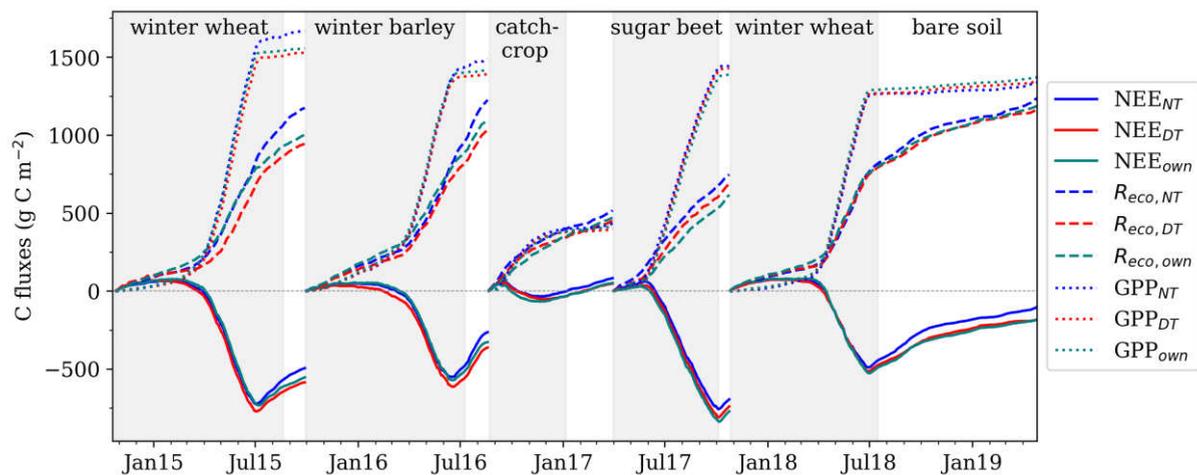


Abbildung 13: Fruchtweise kumulierte Summen von des Netto- $\text{CO}_2$ -Austauschs  $\text{NEE}$ , der partitionierten Gesamtrespiration  $R_{eco}$  und Bruttoprimärproduktion  $GPP$ . Die Indizes beziehen sich auf die zur Partitionierung und zum Füllen von Datenlücken ( $\text{NEE}$ ) verwendeten Methoden (vgl. Kapitel II.1.1).

Alle Nutzkulturen waren zum Erntezeitpunkt eine Senke für atmosphärisches  $\text{CO}_2$ , besonders hohe Aufnahmen erzielten die Zuckerrübe und der erste, unter regionaltypischen Witterungsbedingungen erfolgte Winterweizenanbau. Etwas geringer fielen sorten- und düngergabenbedingt die Aufnahme durch Wintergerste und dürrebedingt (vgl. Kapitel II.1.8) durch die zweite Winterweizenkultur aus. Die Zwischenfruchtkultur (einschließlich Häckseln im Januar und darauffolgender Brache) war zum Zeitpunkt der darauffolgenden Zuckerrübensaat nahezu neutral bzw. eine schwache Quelle. Entscheidend für ihre Bewertung als Mitigationsmaßnahme ist jedoch, dass die Quellstärke deutlich geringer ist, als in den jeweils gleichen Monaten (September bis März) bei anderen (Winter-) Kulturen bzw. Brache. Nicht festgestellt wurden auch etwa zu befürchtende deutlich erhöhte Respirationverluste gegenüber demselben Monat nach dem Umbruch oder in den Folgekulturen (Reco in Abbildung 13), die die zusätzliche  $\text{CO}_2$ -Aufnahme der Zwischenfrucht vollständig zunichte machen oder gar überkompensieren würden. Unterstützt wird die Schlussfolgerung einer positiven Mitigationwirkung des Zwischenfruchtanbaus auch durch den Vergleich mit einem etwa 10 km entfernten EC-Standort, der ähnlich, jedoch ohne Zwischenfrüchte bewirtschaftet wurde (Abbildung 14). Die unvermeidbaren methodischen Unsicherheiten beider Vergleiche sind komplementär: Während in Abbildung 13 Unterschiede durch unterschiedliche Witterungsbedingungen in unterschiedlichen Jahren oder durch die Vorfrucht nicht ausgeschlossen werden können, der Standort jedoch derselbe war, können in Abbildung 14 zwar standortbedingte Unterschiede (v.a. Boden) nicht ausgeschlossen, beide Varianten jedoch über denselben Gesamtzeitraum kumuliert werden.

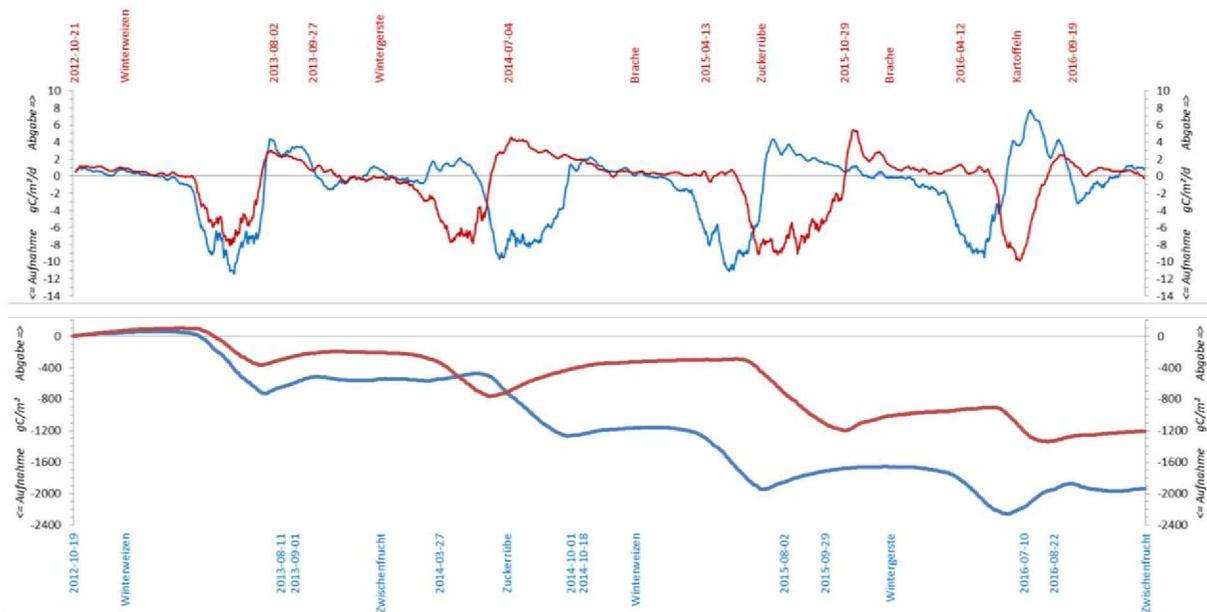


Abbildung 14: elftägig gemittelte (oben) und kumulierte (unten) CO<sub>2</sub>-Bilanzen der Ackerstandorte Merzenhausen (rot) und Selhausen (blau), oben: 11tägiger gleitender Mittelwert, unten: kumulative Summe. Aus Schmidt et al. (2017b).

Die Möglichkeit für einen Kurzzeitvergleich unter optimalen Wetter- und nahezu gleichen Standortbedingungen ergab sich im Dezember 2015. Zusätzlich zu den bestehenden EC-Messungen in Selhausen und Merzenhausen wurde die selbstentwickelte Tunnel-Haube für NEE- und ET-Messungen (vgl. Kapitel II.1.5) abwechselnd auf drei verschiedenen, unmittelbar benachbarten Zwischenfruchtbeständen in Selhausen eingesetzt (Abbildung 15).

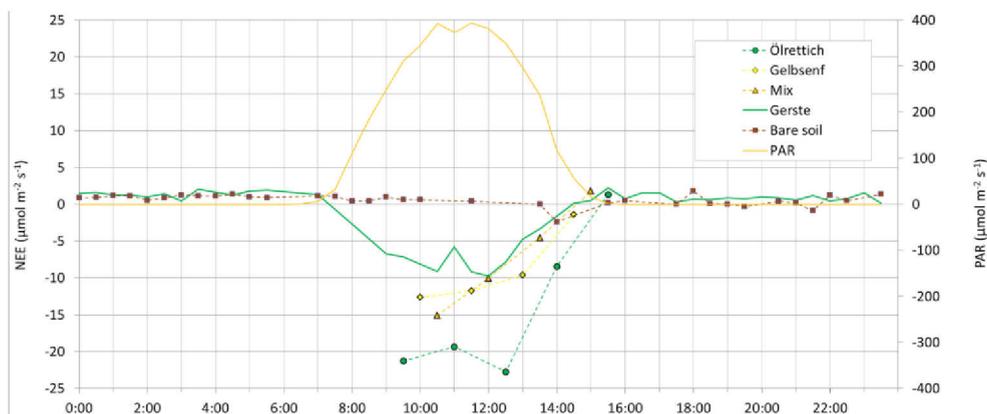


Abbildung 15: Tagesgang des CO<sub>2</sub>-Austauschs vom 3. Dezember 2015 auf Basis von Eddy-Kovarianz- (Wintergerste, unbewachsener Boden) und Haubenmessungen (Ölrettich, Gelbsenf, Mischung) sowie photosynthetisch aktive Einstrahlung PAR. Aus Graf et al., 2016.

Alle drei untersuchten Zwischenfrüchte nahmen deutlich mehr CO<sub>2</sub> auf als die Wintergerste am selben Standort Selhausen und die Brache am Standort Merzenhausen. Die besonderen Bedingungen dieses Messtags (u.a. bis zu 15°C Lufttemperatur), die Photosyntheseraten ähnlich wie im Sommerhalbjahr ermöglichten, sind im Rahmen des Klimawandels zukünftig häufiger auch im Winterhalbjahr zu erwarten. Zugleich werden aufgrund früherer Ernten die Zeiträume, in denen Äcker bei Wintergetreide ohne Zwischenfruchtanbau brach liegen und somit CO<sub>2</sub>-Quellen darstellen würden, länger (Abbildung 16). Frühzeitiger Zwischenfruchtanbau nach der Ernte, zu einem Zeitpunkt noch hoher potentieller

Photosyntheseraten, aber auch hoher potentieller Respirationsverluste, kann zur Minderung der sich hieraus ergebenden Verschlechterung der landwirtschaftlichen Klimabilanz beitragen. Eine andere, noch wenig diskutierte Lösung wäre der Anbau von Nutzfürchten und –sorten, die eine längere Anbauzeit benötigen, möglicherweise mit dem Nebeneffekt höherer Erträge.

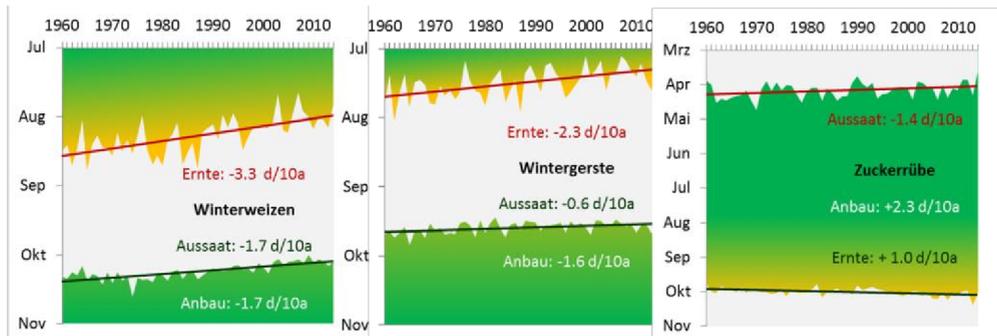


Abbildung 16: Entwicklung der Aussaat- und Erntetermine für drei Fruchtfolgeglieder im Bundesdurchschnitt (Rohdaten: Phänologienetzwerk des Deutschen Wetterdienstes). Aus Graf et al., 2016

Die Senkenfunktion von Agrarflächen auf NEE-Basis kehrt sich bei Berücksichtigung der Kohlenstoff- und Exporte (z.B. durch Ernte) sowie des Energieeinsatzes bei Bewirtschaftung und Düngemittelproduktion häufig in eine Quellenfunktion um (z.B. Kutsch et al., 2010). Dies konnte anhand einer entsprechenden Analyse (Ney, 2019, Ney et al., in Vorbereitung) auch für die eingangs beschriebene Fruchtfolge in Selhausen gezeigt werden (Tabelle 5). Lachgas (N<sub>2</sub>O) trug hingegen nach wöchentlichen Haubenmessungen auf der Lysimeteranlage am Standort Selhausen nur mit einem Treibhausgaspotential (GWP) von 0.3% desjenigen des zugleich emittierten CO<sub>2</sub> zur Treibhausgasbilanz bei (zu Methodik und ähnlichen Beispieldaten vgl. Kap. II.1.7).

Tabelle 5: Kohlenstoffbilanzen in g C m<sup>-2</sup> der Fruchtfolge aus Abbildung 13 einschließlich NECB (Net ecosystem carbon budget) nach Berücksichtigung von Im- und Exporten sowie GHGB (Treibhausgasbilanz) nach Berücksichtigung von Bewirtschaftungsemissionen (EFO)

	WEIZEN	GERSTE	ZWISCHENFR.	ZUCKERRÜBE	WEIZEN	GESAMT
NEE <sub>NT</sub>	-491	-261	77	-696	-98	-1469
GPP <sub>NT</sub>	1665	1497	432	1440	1335	6369
RECO <sub>NT</sub>	1174	1236	509	744	1237	4900
NEE <sub>DT</sub>	-585	-358	44	-740	-180	-1819
GPP <sub>DT</sub>	1529	1406	397	1426	1347	6105
RECO <sub>DT</sub>	944	1048	441	686	1167	4286
NEE <sub>OWN</sub>	-553	-381	109	-769	-183	-1777
GPP <sub>OWN</sub>	1555	1689	154	1389	1370	6157
RECO <sub>OWN</sub>	1002	1308	263	620	1187	4380
IMPORT	-7	-6	0	0	-7	-21
EXPORT	776	552	0	874	666	2868
NECB <sub>NT</sub>	278	284	77	178	561	1378
NECB <sub>DT</sub>	184	187	44	134	479	1028
NECB <sub>OWN</sub>	216	164	109	105	476	1070
EFO	60	46	33	47	59	245
GHGB <sub>NT</sub>	337	330	109	225	620	1623
GHGB <sub>DT</sub>	244	233	76	181	538	1272
GHGB <sub>OWN</sub>	275	210	141	152	535	1313

## II.1.7 Waldumbau in einem Nationalpark

Das zuvor mit einer Fichtenmonokultur bestandene Bacheinzugsgebiet des oberen Wüstebachs am Südrand des Nationalparks Eifel wurde 2013 teilweise entforstet, um den frühzeitigen Beginn einer ungestörten Sukzession hin zu standortgerechtem Laubmischwald zu ermöglichen. Bereits im Vorfeld dieser Maßnahme wurden Dauermessungen eingerichtet, um die Wissenschaft mit allgemeinverfügbaren Messdaten zur Dynamik u.a. von (Öko-) Hydrologie und Kohlenstoffflüssen nach derartigen Maßnahmen auszustatten. Ein wichtiges Teilziel von IDAS-GHG war die Auswertung der Messungen mit Blick auf die Quellpartitionierung der gemessenen Flüsse, damit verbundenen manuellen Zusatzerhebungen, die Treibhausgas- und Klimabilanzierung der fichtenbestandenen und entforsteten Fläche und die Ableitung von mitigationsrelevanten Schlussfolgerungen. Zu diesem Zweck wurden in ungefähr monatlichen Abständen manuelle Haubenmessungen der Bodenrespiration an 25 teils im Fichtenforst, teils auf der entforsteten Fläche gelegenen Messpunkttripeln (75 Messungen) sowie NEE- und ET-Messungen mit der transparenten Tunnel-Verdunstungshaube (vgl. Kapitel II.1.5) durchgeführt (Abbildung 17). Die NEE- und ET-Messungen zweier EC-Stationen auf einem Turm im Fichtenforst sowie auf der entforsteten Fläche wurden mit Ansatz 1 lückenbereinigt und partitioniert. Da ein Teil der entforsteten Fläche zum Schutz vor Verbiss mit einem Wildschutzgatter umzäunt war, wurde außerdem die Vegetationsentwicklung inner- und außerhalb des Gatters mit Schwerpunkt auf dem spontanen Gehölznachwuchs verglichen. Ein Großteil der Ergebnisse wurde als Zeitschriftenaufsatz und Dissertationsteil (Ney et al., 2019) sowie als Masterarbeit (Pick, 2018) veröffentlicht.

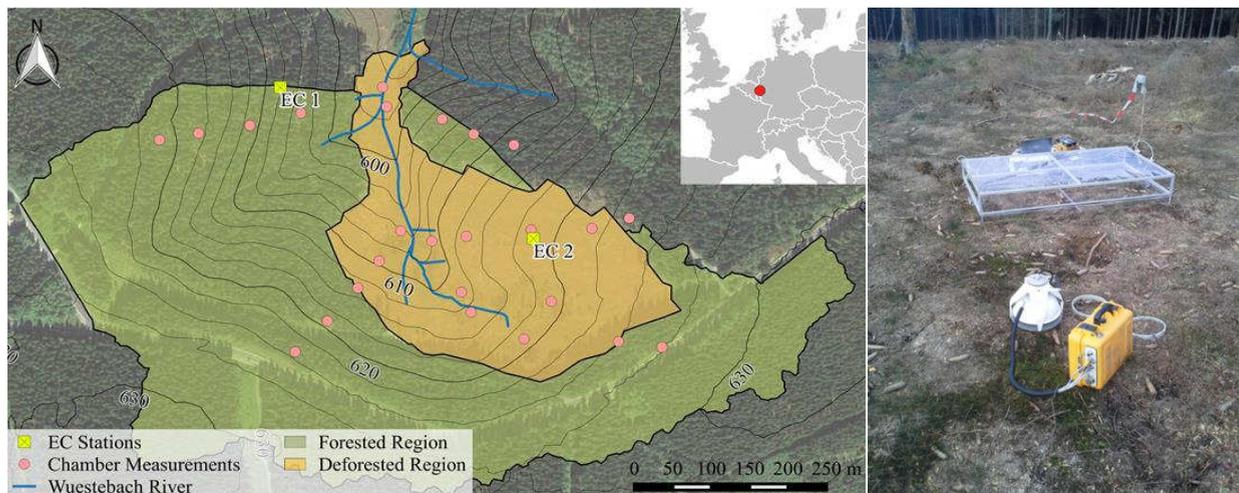


Abbildung 17: Untersuchungsgebiet Wüstebach (links) mit EC-Stationen (hellgrün) und manuellen Bodenatmungsmesspunkten (rosa), rechts Beispielaufnahme einer manuellen Bodenatmungsmessung (vorne) und der auf der Freifläche zusätzlich zur EC-Station eingesetzten NEE-ET-Tunnelhaube (Hintergrund).

Auf der entforsteten Fläche breiteten sich in den fünf Jahren nach der Maßnahme Gräser (z.B. Drahtschmiele *Avenella flexuosa*), Pioniere wie roter Fingerhut (*Digitalis purpurea*) und schmalblättriges Weidenröschen (*Epilobium angustifolium*), Sträucher wie Himbeere (*Rubus idaeus*) und Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*), Baumgehölze, vor allem Eberesche (*Sorbus aucuparia*), und zuletzt Besenginster (*Cytisus scoparius*) aus, wobei das Längenwachstum der Eberesche außerhalb des Gatters deutlich hinter demjenigen innerhalb des Gatters zurückblieb. Wie Abbildung 18 zeigt, wuchs die Bruttoprimärproduktion GPP (Photosynthese) rapide an und erreichte zuletzt im Frühsommer bereits ähnliche Spitzenwerte wie die des Fichtenforstes. Da jedoch auch die Respiration (Gesamtatmung) zunahm, bleibt die CO<sub>2</sub>-Aufnahme nach wie vor deutlich hinter der des Fichtenforstes zurück. Hierzu trägt auch der immergrüne Charakter der Fichte mit höherer GPP im Winterhalbjahr

und den Übergangsjahreszeiten bei. Eine Aufschlüsselung in Boden- und oberirdische Respiration mithilfe der Haubenmessungen zeigt die unterste Teilabbildung.

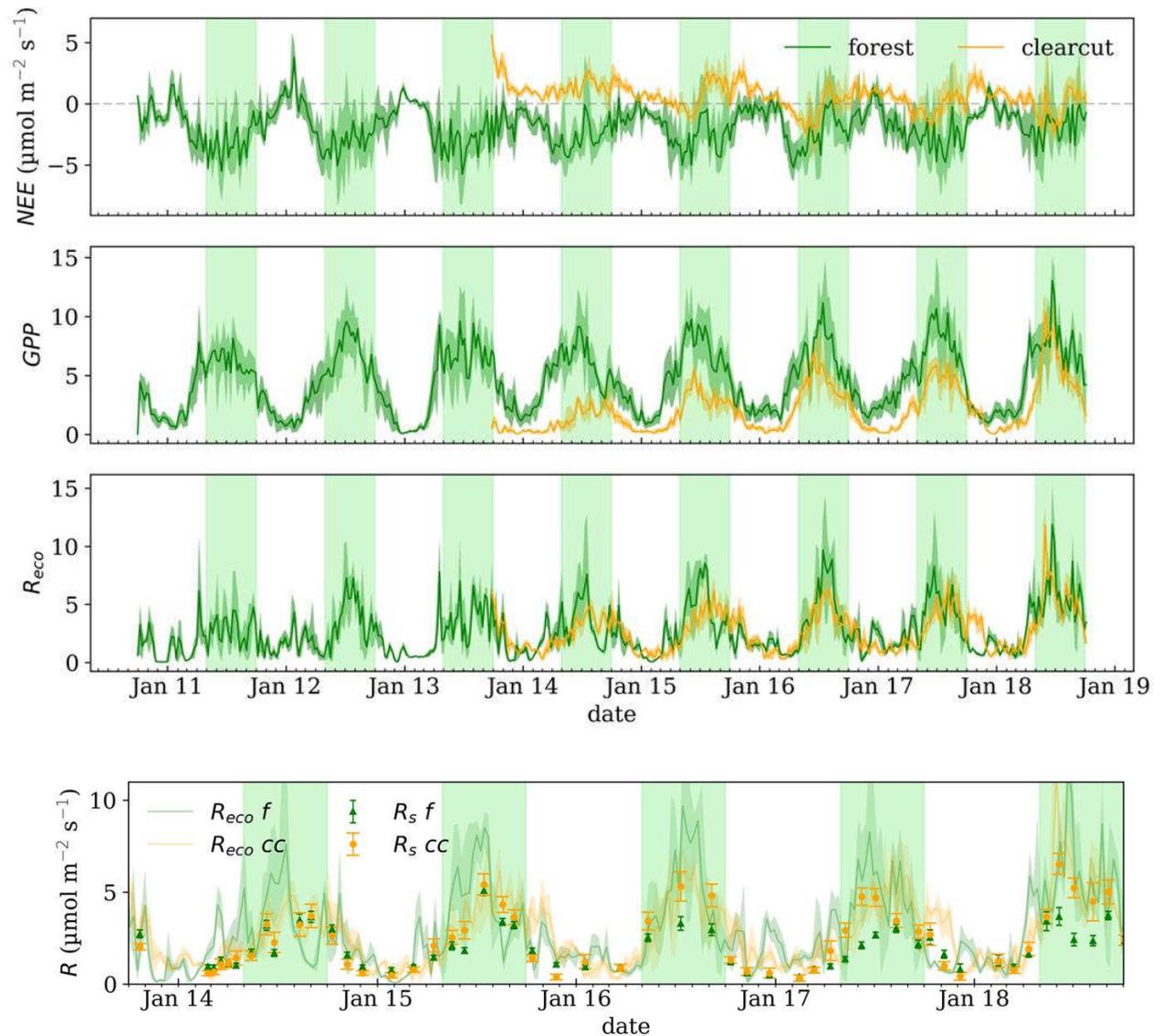


Abbildung 18: EC-basierte  $\text{CO}_2$ -Flüsse am Waldstandort Wüstebach als 7-Tages-Mittel (schattiert: Minima und Maxima) der Fichten- (grün) und entforsteten (gelb) Fläche, GPP und Reco partitioniert mit dem DT-Verfahren. Die unterste Zeitreihe zeigt ausschnittvergrößert Reco ab dem Entforstungszeitpunkt, ergänzt um Flächenmittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der Haubenmessungen (Fichtenforst grün, Freifläche gelb). Fortgeschrieben nach Ney et al. (2019).

Auch die mit Hauben gemessene Bodenrespiration zeigt einen Anstieg im Laufe der Jahre nach Entforstung und macht auf der Freifläche einen höheren Anteil an der Gesamtrespiration aus als unter Fichtenforst. ET- und NEE-Messungen mit der Tunnel-Haube bestätigten im Wesentlichen die EC-Messungen auf der Freifläche, insbesondere in den ersten Jahren mit noch spärlichem und niedrigen Gehölzaufwuchs, der durch die Tunnelmessungen abgebildet werden konnte. Zuletzt (September 2017 bis Ende 2018) erbrachten die Tunnelmessungen unter Ausschluss der Bäume einen Beitrag der Gras-/Krautschicht im Gatter von etwa 74% zur Gesamt- $\text{CO}_2$ -Aufnahme. Ähnliches (73%) galt für Tunnelmessungen außerhalb des Gatters unter Einschluss der dort typischen verbissgeschädigten Baum- und Strauchvegetation, so dass von einer verringerten  $\text{CO}_2$ -Aufnahme außerhalb des Gatter

auszugehen ist. Im Verlauf des Projekts wurden zusätzlich automatisierte, kontinuierliche Haubenmessungen im Gebiet installiert, unter anderem an einem bachnahen Standort mit wechselndem Redoxpotential und daher möglicherweise erwartbaren  $\text{CH}_4$ - und  $\text{N}_2\text{O}$ -Flüssen. Gemeinsam mit manuellen Haubenmessungen auf der nahegelegenen Lysimeteranlage des Wüstebachstandorts (analog zu denen in Selhausen) zeigten diese, dass  $\text{N}_2\text{O}$  (wie auch  $\text{CH}_4$ ) in der Gesamt-Treibhausgasbilanz des Standorts nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt (Abbildung 19). Am Messpunkt mit den während des etwa einjährigen Beobachtungszeitraums höchsten absoluten und relativen  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen trugen diese nur etwa 1.1% zum Treibhausgaspotential (GWP) der Bodenatmung ( $\text{CO}_2$ -Emissionen) bei. Dieser Punkt zeichnete sich durch eine besonders hohe Variabilität des Grundwasserstands aus (Abbildung 19 links) und konnte im Rahmen der Schneeschmelze im Februar 2019 für einen etwa zweiwöchigen Zeitraum bis zu 19.8% des  $\text{CO}_2$ -GWP erreichen (Abbildung 19 rechts). Alle anderen Messpunkte einschließlich der an einem bachfernen Standort befindlichen Lysimeter erreichten Beiträge unter 0.3% GWP.

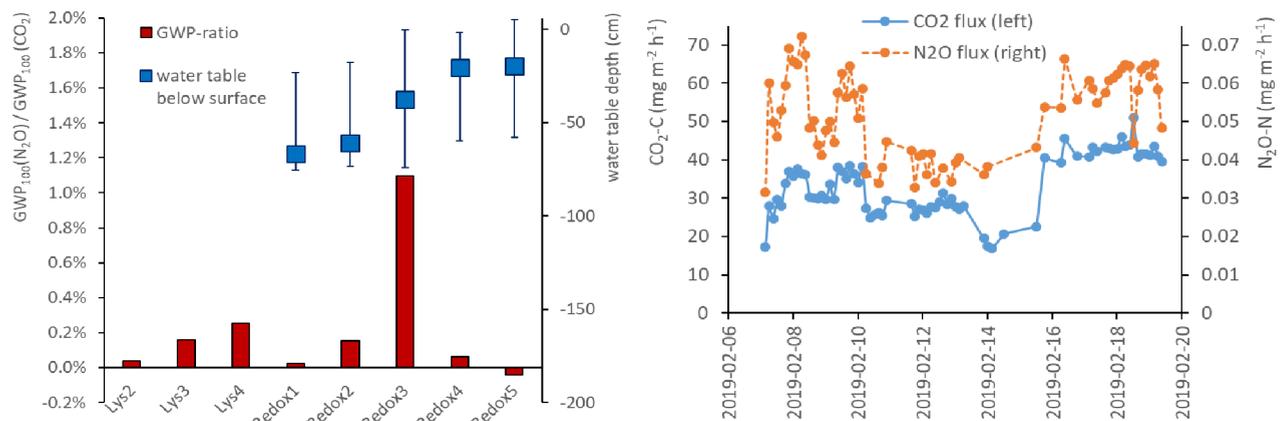


Abbildung 19: Ergebnisse der  $\text{N}_2\text{O}$ -Flussmessungen am Standort Wüstebach. Links: Relatives Treibhausgaspotential GWP (100 Jahre Zeithorizont, mit Kohlenstoffrückkopplung) der gemessenen Emissionen aus dem Boden im Vergleich zu den gleichzeitig gemessenen  $\text{CO}_2$ -Emissionen für alle Lysimeter, auf denen Haubenmessungen stattfanden (Lys) und für ein Transekt automatischer Haubenmessungen in einem emissionshöufigen bachnahen Bereich (Redox). Rechts: Zeitreihe der beiden Flüsse während eines Events besonders hoher relativer  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen am Standort Redox3.

Für eine biophysikalische Gesamt-Klimabilanz sind neben der Treibhausgasbilanz auch andere Einflüsse der Flächennutzung auf die Erderwärmung zu berücksichtigen, im Falle des Vergleichspaares Fichtenforst-Freifläche insbesondere die Albedo (vgl. z.B. Rotenberg und Yakir, 2010). Während die Albedo des Fichtenforsts mit 0.07 sehr niedrig lag, war im Untersuchungszeitraum diejenige der entfichteten Fläche mit 0.16 bis 0.25 in jedem Jahr höher. Die niedrigsten Werte ergaben sich unmittelbar nach Entfichtung durch den nackten Boden, Streureste und schütterten Gras- und Moosbewuchs. Ein Höhepunkt wurde im Jahr 2016 durch den hohen Deckungsgrad mit Gräsern, krautigen Pflanzen und noch junger Laubvegetation erreicht. Seitdem sinkt die Albedo aufgrund des zunehmenden Anteils bis zu 3 m großer Laubbäume und des Ginsters wieder leicht. Durch Berücksichtigung der albedobedingt reflektierten Sonneneinstrahlung kehrt sich die Gesamtklimabilanz der Entfichtungsmaßnahme um, so dass über den gesamten Untersuchungszeitraum im Vergleich zum Fichtenforst eine kühlende Wirkung auf die Erdatmosphäre festzustellen ist. Sollten sich im zukünftigen Endzustand des Laubwalds auf der entfichteten Fläche ähnliche NEE-Jahresbilanzen einstellen wie im Fichtenforst, so wäre dieser aufgrund seiner höheren Albedo unter Mitigation Gesichtspunkten deutlich zu bevorzugen.

## II.1.8 Reaktion unterschiedlicher europäischer Ökosysteme auf das Dürrejahr 2018

2018 waren weite Teile Europas von einer langanhaltenden Dürre und Hitzewelle betroffen. Anders als 2003 decken EC-Messtandorte, die ihre Daten der Forschung zur Verfügung stellen, inzwischen jeden der wichtigen Ökosystemtypen Wald, Grünland, Ackerland und Feuchtgebiete mit zahlreichen Stationen ab. Dies eröffnet die Möglichkeit, die unterschiedlichen Reaktionen dieser Ökosysteme auf Stressbedingungen zu untersuchen, die in Zukunft häufiger auftreten könnten, und ihre Rückwirkungen auf das Klimasystem in Form veränderter  $\text{CO}_2$ -Aufnahme, Verdunstung und Wärmeflüsse zu quantifizieren.

Auf Initiative sowohl von WissenschaftlerInnen als auch Stationsbetreibern wurde eine „drought task force“ ins Leben gerufen, deren Ziel die zeitnahe gemeinsame Erarbeitung eines Datensatzes aus EC-, Fernerkundungs- und Modelldaten war. Hierzu trugen auch die im Bericht vielfach erwähnten Standorte Selhausen, Rollesbroich und Wüstebach bei. Die Daten sind unter der DOI 10.18160/PZDK-EF78 öffentlich zugänglich. Mit Unterstützung der Doktorandinnen Anne Klosterhalfen und Patrizia Ney sowie der Projektmentoren N. Brüggemann und H. Vereecken beteiligte sich der Projektleiter mit einer wissenschaftlichen Studie an 56 Messtandorten (Graf et al., 2019a; Graf et al., 2019b), die als Beitrag zu einem Sonderheft zum Thema angenommen wurde (Graf et al., in Druck).

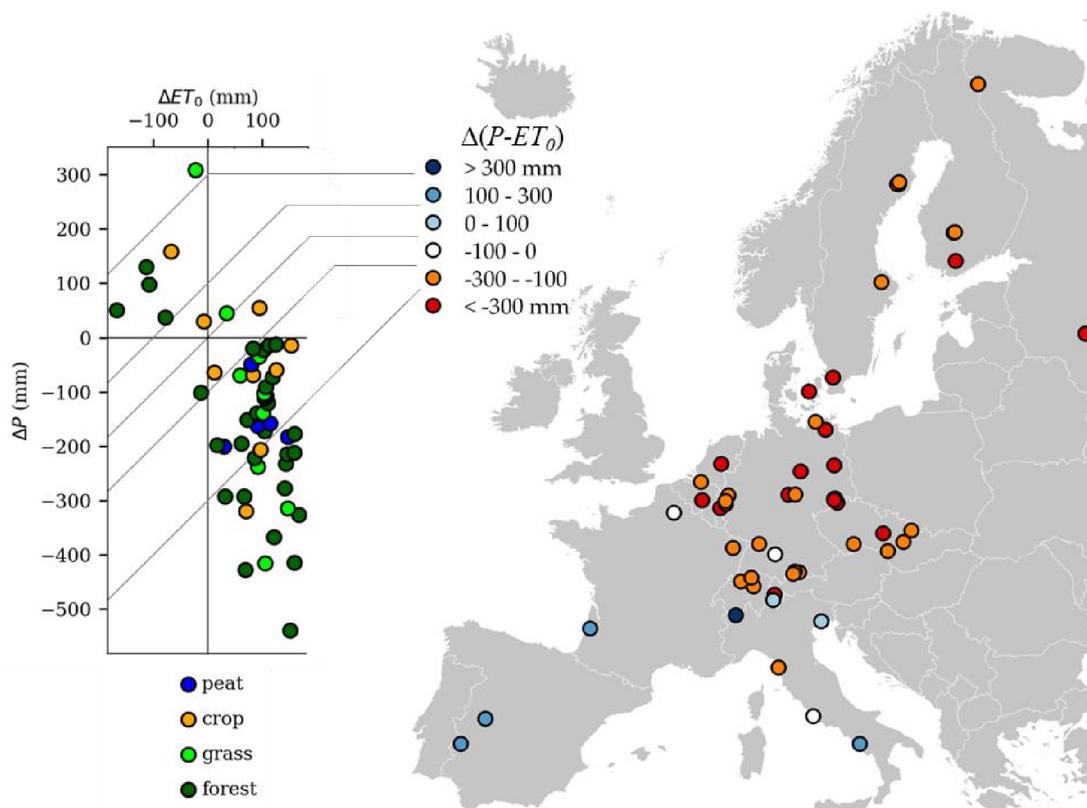


Abbildung 20: Verteilung der EC-Standorte, deren  $\text{CO}_2$ -, Verdunstungs- und Wärmeflüsse 2018 mit denen eines vorangehenden Referenzzeitraums verglichen wurden. Links: Verteilung der Ökosystemtypen auf die Jahresanomalien (Differenzen zwischen Jahressumme 2018 und Referenzzeitraum) der potentiellen Gras-Referenzverdunstung  $ET_0$  und des Jahresniederschlags  $P$ . Rechts: Geographische Verteilung der klimatologischen Wasserbilanz  $P-ET_0$ .

Wie Abbildung 20 zeigt, war die Mehrheit der verfügbaren Standorte sowohl von einer überdurchschnittlichen potentiellen Verdunstung als auch von unterdurchschnittlichen

Niederschlägen betroffen. Diese liegen in einem Mittel-, Nord- und Osteuropa umfassenden Gebiet und decken alle eingangs erwähnten Ökosystemtypen mit jeweils mindestens sechs Stationen ab. Südeuropäische Standorte waren zwar teilweise während kürzerer Zeiträume, mehrheitlich jedoch nicht auf Basis der Jahressummen betroffen. Sie wurden als Kontrollgruppe mit untersucht, in der aufgrund der geringen Zahl auf eine Unterscheidung nach Ökosystemtypen verzichtet wurde. Aufgrund der höheren durch Sonneneinstrahlung empfangenen Energie und der begrenzten zur Verdunstungskühlung bereitstehenden Bodenwasservorräte gaben die betroffenen Standorte im Mittel 33% mehr Energie als im Referenzzeitraum durch den fühlbaren Wärmefluss an die Atmosphäre ab und waren somit für die überdurchschnittlichen Temperaturen (mit)verantwortlich. Lediglich Feuchtgebiete trugen nicht zu dieser Erwärmung bei. Die hierfür mitverantwortliche Verdunstung veränderte sich im Mittel über alle Ökosystemtypen hinweg kaum, da sich die gegensätzlichen Einflüsse der gestiegenen potentiellen Verdunstung und der Wasserknappheit ausglich. Allerdings nahm sie bei den am stärksten von der Dürre betroffenen Standorten (Abweichung der klimatologischen Wasserbilanz vom Referenzzeitraum um mehr als 300 mm) deutlich ab. Der relative Anteil des Niederschlags, der zur Verdunstung aufgewendet wurde, nahm im Mittel aller betroffenen Standorte zu (Abbildung 21), so dass deutlich weniger Wasser für die Neubildung von Boden-, Grund- oder Oberflächenwasser zur Verfügung stand.

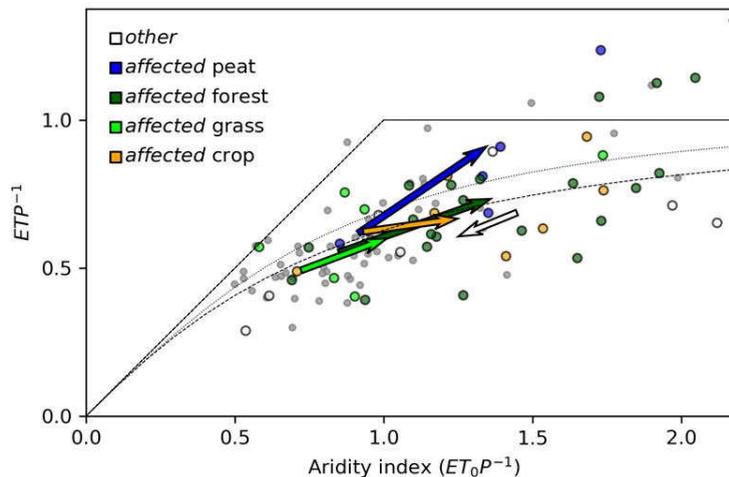


Abbildung 21: Budyko-Plot der Jahressummen von Niederschlag, potentieller und tatsächlicher Verdunstung der untersuchten Standorte. Gemäß Ökosystemtyp eingefärbte Punkte zeigen für jeden Standort den verdunsteten Anteil des Jahresniederschlags (Y-Achse) als Funktion des Ariditätsindex (X-Achse, Verhältnis potentieller Verdunstung zum Niederschlag) in 2018. Kleine graue Punkte geben die Situation im Referenzzeitraum wieder, Linien Erwartungskurven früherer Studien (vgl. Graf et al., in Druck). Pfeile zeigen je Ökosystemtyp gemittelt die Veränderung in 2018 gegenüber dem Referenzzeitraum an (weiß: Kontrollgruppe, blau: Feuchtgebiete, dunkelgrün: Wald, hellgrün: Grünland, orange: Ackerland).

Abbildung 21 zeigt außerdem, dass sich die Verdunstung von Wald- und Grünlandstandorten im Mittel wie nach Budyko (1974) erwartet veränderte. Die Verdunstung von Feuchtgebieten stieg hingegen stärker an und folgte dem Anstieg der potentiellen Verdunstung fast proportional. Damit konnten Feuchtgebiete einerseits die unmittelbaren Auswirkungen der Dürre auf die Temperaturanomalien abmildern, verloren jedoch andererseits in besonderem Maß vom für ihren Fortbestand wichtigen Wasservorrat. Umgekehrt verhielt es sich bei Ackerland. Grund hierfür war u.a. die frühere Reife und Ernte der Feldfrüchte, nach der bis zum Auflaufen etwaiger Zwischen- oder Folgefrüchte die Transpiration entfiel und die Evaporation aufgrund des trockenen Oberbodens stark reduziert war. Ein

aufgrund der nachfolgenden Brache (vgl. Kapitel II.1.6) besonders drastisches Beispiel des Standorts Selhausen zeigt Abbildung 22.

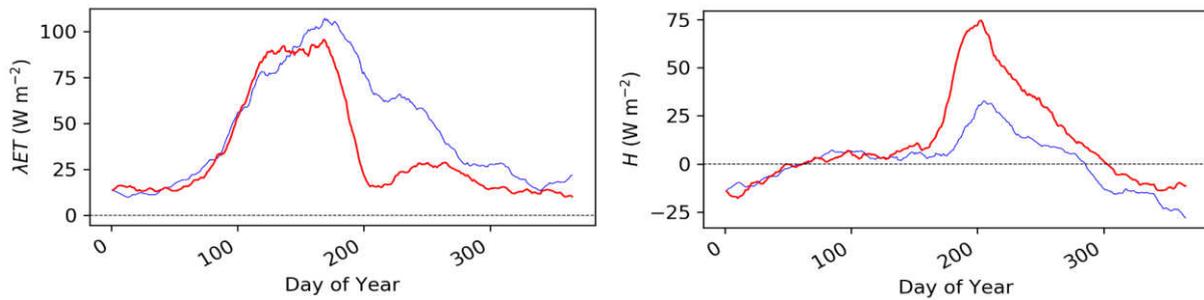


Abbildung 22: ET als latenter Wärmefluss (links) und fühlbarer Wärmefluss am Standort Selhausen als 30-tägiges gleitendes Mittel 2018 (rot) und im Referenzzeitraum mit gleicher Feldfrucht Winterweizen (2013, 2015).

Die Veränderung der Verdunstung in Dürreperioden beeinflusst nicht nur über die Energiebilanz die Erwärmung der Atmosphäre, sondern steht über Blattfläche und stomatäre Leitfähigkeit auch in Zusammenhang mit der CO<sub>2</sub>-Senkenfunktion der Landoberfläche. Wie Abbildung 23 zeigt, nahmen Standorte mit in 2018 verringerter Verdunstung auch weniger CO<sub>2</sub> auf und trugen so auf mehreren Zeitskalen und Wegen zur Erwärmung bei, nämlich durch geringere Verdunstungskühlung, geringere für die Photosynthese abgezogene Einstrahlungsenergie, und geringere Aufnahme des Treibhausgases CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre.

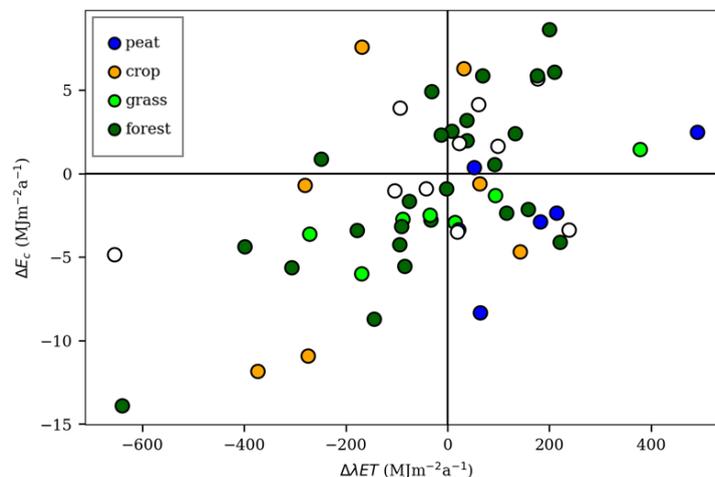


Abbildung 23: Zur CO<sub>2</sub>-Aufnahme verwendete Energie als Funktion der zur Verdunstung aufgewendeten Energie (latenter Wärmefluss), jeweils als Veränderung 2018 gegenüber Referenzzeitraum.

Während hohe CO<sub>2</sub>-Aufnahmeraten eine unter Mitigations- und Adaptationsgesichtspunkten uneingeschränkt wünschenswerte Eigenschaft von Landnutzungssystemen sind, ist eine Aufrechterhaltung der Verdunstung (etwa durch Bewässerung oder tiefwurzelnde Pflanzen) eine Strategie mit Vor- (u.a. lokale Kühlung) und Nachteilen (tiefere Grund- und Flusswasserstände). Von besonderem Interesse für eine mögliche zukünftige Optimierung der Landnutzung ist daher, neben einem an die örtliche Wasserverfügbarkeit angepassten Verdunstungsmanagement, die große Streuung der in Abbildung 23 dargestellten Standorte um die Korrelationsachse. Offenbar sind einige Wald- und Ackerstandorte eher als andere in der Lage, auch bei eingeschränkter oder nur schwach gestiegener Verdunstung eine hohe CO<sub>2</sub>-Aufnahme aufrechtzuerhalten.

## **II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die Zuwendung wurde zu 96.8% für Personalmittel (3 Doktorandenstellen, Gruppenleiterstelle, Hilfskraftstelle, Sachbearbeiterstelle) aufgewendet. Je 1.6% entfielen auf Reisekosten (v.a. Konferenzreisen, in kleinerem Umfang Messeinsätze und Arbeitstreffen) und die Summe aus Material- und Anlagenkosten (Kalibriergase, Teile und Feldlaptop-/Loggertechnik für die Messungen nach Ansatz 3 und 4). Die anteilmäßige Aufteilung auf die Positionen entsprach weitestgehend derjenigen aus Projekt- und Aufstockungsantrag und erforderte keine Umschichtung.

## **II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Der Beitrag des Projekts zu den förderpolitischen Zielen der Ausschreibung wurde im Rahmen des Projektantrags und des Aufstockungsantrags zu Projektzielen spezifiziert, die in Kapitel I.1 und II.1 erneut skizziert sowie in II.1 auf die Ausschreibungsziele zurückgeführt sind.

Aus den Projektzielen wurden wiederum, ebenfalls in den Antragsdokumenten und erneut skizziert in I.3 und II.1, konkrete Arbeitspakete abgeleitet. Die Projektdurchführung folgte diesen Arbeitspaketen, so ergeben sich die in Kapitel II.1 und den darin zitierten Veröffentlichungen beschriebenen Fortschritte aus den Arbeitspaketen (Kapitel II.1.1: AP 1.1 und 2.1, Kapitel II.1.2: AP 1.2 und 2.2, Kapitel II.1.3: AP 1.3, 1.5, 2.3 und 2.5, Kapitel II.1.4: AP 1.4 und 2.4, Kapitel II.1.5 bis II.1.8: AP 3 und 4 nach Themen/Untersuchungsstandorten sortiert).

Alle durchgeführten Arbeiten waren zum Erreichen der Projektziele und zur Erfüllung der daraus abgeleiteten Arbeitspakete notwendig und angemessen.

## **II.4 Voraussichtlicher Nutzen**

Die Projektergebnisse kommen den Ausschreibungszielen und den im Verwertungsplan von Haupt- und Aufstockungsantrag geschilderten Erfolgsaussichten und Anschlussfähigkeiten auf mehreren Ebenen zugute.

Zunächst ermöglichen die in Veröffentlichungen und diesem Bericht beschriebenen vergleichenden Bewertungen bestehender Ansätze zur Quellpartitionierung der wissenschaftlichen Gemeinschaft eine Einschätzung, welche Ansätze zur Beantwortung einer inhaltlichen Fragestellung bei welchen Ansprüchen an Art, Genauigkeit und Aufwand in Frage kommen. Weiterhin tragen die erfolgreich getesteten eigenen Innovationen zum zukünftigen Methodenrepertoire bei, so gingen z.B. bereits Interessenbekundungen anderer Gruppen an Nutzung und Nachbau der Profilmessanlage ein. Umgekehrt kann die Veröffentlichung auch negativer Testergebnisse, wie z.B. bei der SK10-Methode unter ausführlicher modellgestützter Begründung vorher nicht erkannter Schwachstellen im Annahmengerüst, dazu beitragen, dass zukünftige Anwender Ergebnisse dieser Methoden nicht überinterpretieren.

Die gewonnenen Erkenntnisse über die Zuverlässigkeit der einzelnen Methoden sowie die im Rahmen dieser Arbeiten durchgeführten Mess- und Auswertearbeiten konnten wiederum von der Nachwuchsgruppe genutzt werden, um die Treibhausgas- bzw. Klimabilanz von Beispielökosystemen und Landnutzungsänderungen umfassend zu quantifizieren. Hieraus leiten sich sowohl Hinweise für ein mitigations- und adaptationsorientiertes Landmanagement (z.B. zu Dachbegrünung, Zwischenfruchtnutzung und Waldumbau) ab, als auch neue Fragestellungen zu Landnutzungsoptionen, die hinsichtlich des Verhältnisses zwischen Albedo, Wasserbrauch, CO<sub>2</sub>-Aufnahme und Produktivität optimiert sind.

Für die Projektbeteiligten ergibt sich aus der Durchführung des Projekts eine Stärkung der Fachkompetenz, Sichtbarkeit, nationalen und internationalen Vernetzung sowie des

Methodenrepertoires für zukünftige Untersuchungen. Im Sinne des zusätzlichen Ausschreibungsziels Nachwuchsqualifikation konnten alle drei Doktorandinnen erfolgreich ihre Dissertationen abschließen und im Rahmen ihrer weiteren Ziele (eine Doktorandin befindet sich in Erziehungszeit) Anschlussbeschäftigungen inner- und außerhalb des Instituts finden. Eine der studentischen Hilfskräfte des Projekts fertigte ihre Masterarbeit unter Co-Betreuung des Projektleiters zu einem projektnahen Thema an, zwei weitere konnten eine Promotionsstelle bzw. Anstellung außerhalb des Instituts antreten.

## **II.5 Fortschritt bei anderen Stellen während Durchführung des Vorhabens**

Im Bereich von Ansatz 1 wurde am Max-Planck-Institut für Biogeochemie Jena eine Generation innovativer Ansätze entwickelt, um aus Datensätzen, wie sie für die Partitionierung von CO<sub>2</sub>-Flüssen benötigt werden, auch eine Verdunstungspartitionierung in Transpiration und Evaporation abzuschätzen (u.a. Nelson et al., 2017). Eine ansatzübergreifende Übersichtsstudie zum Thema Partitionierung führte im Rahmen eines Gastaufenthaltes an o.g. Institut Paul Stoy, University of Wisconsin-Madison, USA, durch; an dieser arbeitete im Rahmen dieses Projekts die Doktorandin Anne Klosterhalfen mit. Zu Ansatz 2 wurde zwischen Projektantrag und –beginn eine Studie von Zeeman et al. (2013) veröffentlicht, im Folgenden kooperierten wir in zwei unserer Projektstudien mit Matthias Zeemann, inzwischen Karlsruher Institut für Technologie, Campus Alpin Garmisch-Partenkirchen (Graf et al., in Druck; Klosterhalfen et al., 2019a). Naturgemäß zahlreiche Studien wurden zum Thema Wechselwirkungen zwischen Landnutzung, Mitigation und Adaptation veröffentlicht (tlw. zusammengefasst im entsprechenden Kapitel des IPCC-Sonderberichts zur Landoberfläche, Smith et al., 2019) und der jeweils aktuelle Stand in unseren eigenen Untersuchungen berücksichtigt.

## **II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

Projektergebnisse flossen in insgesamt 14 bereits veröffentlichte, ISI-gelistete begutachtete internationale Zeitschriftenbeiträge unter Beteiligung des Projektleiters und/oder der Doktorandinnen als Autoren ein (Dengel et al., 2018; Franz et al., 2018; Groh et al., 2018; Klosterhalfen et al., 2019a; Klosterhalfen et al., 2017a; Klosterhalfen et al., 2019b; Ney und Graf, 2018; Ney et al., 2019; Pavelka et al., 2018; Quade et al., 2018; Quade et al., 2019; Schickling et al., 2016; Stoy et al., 2019; Wiekenkamp et al., 2016).

Zwei weitere entsprechende Veröffentlichung sind zur Veröffentlichung angenommen (Graf et al., in Druck; Vila-Guerau de Arellano et al., in Druck), zwei sind in Vorbereitung mit bereits vorliegenden Manuskriptentwürfen (Ney et al., in Vorbereitung; Quade et al., in Vorbereitung).

Die drei Projektdoktorandinnen veröffentlichten ihre Dissertationen (Klosterhalfen, 2019; Ney, 2019; Quade, 2019), aus denen jeweils drei Zeitschriftenausätze hervorgingen, von denen 7 bereits veröffentlicht und zwei in Vorbereitung sind (s.o.). Eine unserer studentischen Hilfskräfte fertigte zu ihrer Projektarbeit ihre Masterarbeit an (Pick, 2018).

Weitere Ergebnisse, Zwischenstände der oben genannten Studien, und Übersichten zum Projektthema wurden in insgesamt 31 Konferenzbeiträgen und eingeladenen Kolloquiumsvorträgen anderer Institute vorgestellt (Graf, 2017; Graf et al., 2015a; Graf et al., 2019a; Graf et al., 2017a; Graf et al., 2017b; Graf et al., 2015b; Graf et al., 2019b; Graf und Ney, 2017; Graf et al., 2018; Graf et al., 2017c; Graf et al., 2016; Klosterhalfen, 2017; Klosterhalfen et al., 2016; Klosterhalfen et al., 2017b; Klosterhalfen et al., 2018; Ney et al., 2017a; Ney et al., 2016a; Ney et al., 2018a; Ney et al., 2016b; Ney et al., 2017b; Ney et al., 2017c; Ney et al., 2015; Ney et al., 2017d; Ney et al., 2018b; Quade et al., 2017a; Quade et al., 2017b; Schmidt et al., 2016a; Schmidt et al., 2016b; Schmidt et al., 2017a; Schmidt et al., 2017b; Vila-Guerau de Arellano et al., 2018).

Außerhalb der wissenschaftlichen Literatur wurden mehrere Kurzbeiträge, ein Ausstellungsbeitrag und ein Science-Slam aus dem bzw. über das Projekt veröffentlicht (Frick, 2018; Graf, 2018; Hohlfeld, 2018; Lüers, 2019; Mengel-Driefert, 2015; Schiffer, 2015; Schlößer und Kreklau, 2018) und Arbeiten daraus zahlreichen Exkursionsgruppen vorgestellt. In zwei Fällen wurden Kurzbeiträge zur Thematik mit dem Projektleiter im WDR-Lokalfernsehen ausgestrahlt. Ein Beitrag zu einem Sonderband des Nationalparks Eifel ist in Vorbereitung.

## Literaturverzeichnis

- Budyko, M.I., 1974. *Climate and Life*, 18. Academic Press.
- Craig, H. und Gordon, L.I., 1965. Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and marine atmosphere. In: E. Tongiogi (Editor), *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, Spoleto, Italy, pp. 9-130.
- Davidson, E.A., Savage, K., Verchot, L.V. und Navarro, R., 2002. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agric. For. Meteorol.*, 113(1-4): 21-37.
- Dengel, S., Graf, A., Grünwald, T., Hehn, M., Kolari, P., Löfvenius, M.O., Merbold, L., Nicolini, G. und Pavelka, M., 2018. Standardized precipitation measurements within ICOS: rain, snowfall and snow depth: a review. *Int. Agrophys.*, 32(4): 607 - 617.
- Franz, D., Acosta, M., Berveiller, D., Siebicke, L., Šigut, L., Silvennoinen, H., Simioni, G., Skiba, U., Sonnentag, O., Soudani, K. et al., 2018. Towards long-term standardised carbon and greenhouse gas observations for monitoring Europe's terrestrial ecosystems: a review. *Int. Agrophys.*, 32(4): 439 - 455.
- Frick, F., 2018. Böden im Wandel, Jahresbericht 2017 des Forschungszentrums Jülich. Forschungszentrum Jülich, Jülich.
- Graf, A., 2017. Gap-filling meteorological variables with Empirical Orthogonal Functions, EGU 2017 General Assembly, 23 Apr 2017 - 28 Apr 2017, Vienna (Austria).
- Graf, A., 2018. Science Slam: Die Landsenke im CO<sub>2</sub>-Haushalt der Erde, Nachwuchsgruppen Globaler Wandel 4+1 Abschlusskonferenz, Berlin, Germany.
- Graf, A., Brüggemann, N., Vereecken, H., Klosterhalfen, A., Valler, V., Weymann, D., Rothfuss, Y., Hermes, N., Esser, O., Pütz, T. et al., 2015a. IDAS – GHG: Instrumental and Data-driven Approaches to Source-Partitioning of Greenhouse Gas Fluxes: Comparison, Combination, Advancement, Nachwuchsgruppen Globaler Wandel 4+1 Kick-Off Meeting, 20 Jan 2015 - 21 Jan 2015, Bonn (Germany).
- Graf, A., Klosterhalfen, A., Arriga, N., Bernhofer, C., Bogena, H., Bornet, F., Brüggemann, N., Brümmer, C., Chi, J., Cremonese, E. et al., in Druck. Altered energy partitioning across terrestrial ecosystems in the European drought year 2018. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*.
- Graf, A., Klosterhalfen, A., Bernhofer, C., Brümmer, C., Drüe, C., Gottschalk, P., Grünwald, T., Heinemann, G., Heinesch, B., Klatt, J. et al., 2019a. Energy partitioning and water use efficiency anomalies 2018 at Eddy-Covariance sites across ecosystems, EGU General Assembly, 7 Apr 2019 - 12 Apr 2019, Vienna (Austria), pp. EGU2019-5834-4.
- Graf, A., Klosterhalfen, A., Ney, P. und Schmidt, M., 2017a. CO<sub>2</sub>-Austausch und andere klimarelevante Prozesse in Agrar- und Waldökosystemen: Die Suche nach Quellen und Senken, Essener Klimagesprache, 16 May 2017 - 16 May 2017, (Essen).
- Graf, A., Klosterhalfen, A., Schmidt, M., Hermes, N., Pütz, T., Noel, J., Drüe, C., Heinemann, G., Moene, A., Gottschalk, A. et al., 2017b. IDAS – GHG: Instrumental and Data-driven Approaches to Source-Partitioning of Greenhouse Gas Fluxes: Comparison, Combination, Advancement, Nachwuchsgruppen Globaler Wandel 4+1 Status-Konferenz, Köln, Germany.
- Graf, A., Klosterhalfen, A., Valler, V., Ney, P., Weymann, D., Rothfuss, Y., Hermes, N., Esser, O., Brüggemann, N. und Vereecken, H., 2015b. IDAS-GHG: Instrumental and Data-driven

- Approaches to Source-Partitioning of Greenhouse Gas Fluxes: Comparison, Combination, Advancement, Deutsche IPCC-Jahrestagung 2015, 16 Jun 2015 - 17 Jun 2015, Kleinmachnow (Germany).
- Graf, A., Klosterhalfen, A., Vereecken, H. und Team, T.E.A., 2019b. Water and climate feedbacks of common European land use types under warm and dry conditions 2018, SAGES'19 Global Climate Challenges for a Blue Green Economy: Scientific evidence; Its relevance; Societal solutions., 27 Nov 2019 - 28 Nov 2019, Edinburgh (Great Britain).
- Graf, A. und Ney, P., 2017. Determination of fluxes and their source partitioning from high-resolution profile measurements of wind speed and scalars within and above short canopies, American Geophysical Union Fall Meeting, 11 Dec 2017 - 15 Dec 2017, New Orleans (United States of America).
- Graf, A., Ney, P., Klosterhalfen, A., Hermes, N., Schmidt, M. und Vereecken, H., 2018. High-resolution profile measurements of wind speed and scalars within and above short canopies: Applicability to flux measurement, source partitioning and process understanding, International Conference on Terrestrial Systems Research: Monitoring, Prediction and High Performance Computing, Bonn, Germany.
- Graf, A., Ney, P., Klosterhalfen, A. und Schmidt, M., 2017c. Quellen- und Senkencharakterisierung von CO<sub>2</sub>- und Wasserdampfströmen in Agrar- und Forstökosystemen, Kolloquium des Institutes für Landschaftsbiogeochemie, ZALF e.V., 28 Jun 2017 - 28 Jun 2017, (Müncheberg).
- Graf, A., Schmidt, M., Klosterhalfen, A., Montzka, C. und Vereecken, H., 2016. "Off-Season" - CO<sub>2</sub>-Austausch landwirtschaftlicher Flächen, Deutsche IPCC-Jahrestagung 2016, 29 Feb 2016 - 1 Mar 2016, Nauen (Germany).
- Graf, A., Schuttemeyer, D., Geiss, H., Knaps, A., Mollmann-Coers, M., Schween, J.H., Kollet, S., Neininger, B., Herbst, M. und Vereecken, H., 2010. Boundedness of Turbulent Temperature Probability Distributions, and their Relation to the Vertical Profile in the Convective Boundary Layer. *Bound.-Layer Meteor.*, 134(3): 459-486.
- Graf, A., Werner, J., Langensiepen, M., van de Boer, A., Schmidt, M., Kupisch, M. und Vereecken, H., 2013. Validation of a minimum microclimate disturbance chamber for net ecosystem flux measurements. *Agric. For. Meteorol.*, 174: 1-14.
- Groh, J., Slawitsch, V., Herndl, M., Graf, A., Vereecken, H. und Putz, T., 2018. Determining dew and hoar frost formation for a low mountain range and alpine grassland site by weighable lysimeter. *Journal of Hydrology*, 563: 372-381.
- Haverd, V., Leuning, R., Griffith, D., van Gorsel, E. und Cuntz, M., 2009. The Turbulent Lagrangian Time Scale in Forest Canopies Constrained by Fluxes, Concentrations and Source Distributions. *Bound.-Layer Meteor.*, 130(2): 209-228.
- Heusinger, J. und Weber, S., 2017. Extensive green roof CO<sub>2</sub> exchange and its seasonal variation quantified by eddy covariance measurements. *Sci. Total Environ.*, 607: 623-632.
- Hohlfeld, C., 2018. Fürs Klima ackern, effzet - das Magazin aus dem Forschungszentrum Jülich. Forschungszentrum Jülich, Jülich, pp. 1.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: 5th assessment report. WG3 (mitigation of climate change)*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, 1435 pp.
- Klosterhalfen, A., 2017. Searching for Sinks and Sources in Land-Atmosphere Fluxes of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O, TERENO Workshop 2017, 26 Sep 2017 - 27 Sep 2017, Garmisch Partenkirchen (Germany).
- Klosterhalfen, A., 2019. Model-based Source Partitioning of Eddy Covariance Flux Measurements. Ph.D. Thesis, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, 132 pp.
- Klosterhalfen, A., Graf, A., Bruggemann, N., Drue, C., Esser, O., Gonzalez-Dugo, M.P., Heinemann, G., Jacobs, C.M.J., Mauder, M., Moene, A.F. et al., 2019a. Source partitioning of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> fluxes based on high-frequency eddy covariance data: a comparison between study sites. *Biogeosciences*, 16(6): 1111-1132.
- Klosterhalfen, A., Graf, A., Schmidt, M., Ney, P. und Vereecken, H., 2016. Source Partitioning Based on High Frequency Eddy Covariance Data, 32nd Conference on Agricultural and Forest Meteorology, American Meteorology Society, 20 Jun 2016 - 24 Jun 2016, Salt Lake City (USA).

- Klosterhalfen, A., Herbst, M., Weihermüller, L., Graf, A., Schmidt, M., Stadler, A., Schneider, K., Subke, J.-A., Huisman, J.A. und Vereecken, H., 2017a. Multi-site Calibration and Validation of a Net Ecosystem Carbon Exchange Model for Croplands. *Ecological modelling*, 363: 137-156.
- Klosterhalfen, A., Moene, A., Schmidt, M., Ney, P. und Graf, A., 2017b. Comparison of Source Partitioning Methods for CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O Fluxes Based on High Frequency Eddy Covariance Data, European Geosciences Union General Assembly 2017, 23 Apr 2017 - 28 Apr 2017, Vienna (Austria).
- Klosterhalfen, A., Moene, A.F., Schmidt, M., Scanlon, T.M., Vereecken, H. und Graf, A., 2019b. Sensitivity analysis of a source partitioning method for H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> fluxes based on high frequency eddy covariance data: Findings from field data and large eddy simulations. *Agric. For. Meteorol.*, 265: 152 - 170.
- Klosterhalfen, A., Moene, A.F., Schmidt, M., Vereecken, H. und Graf, A., 2018. Sensitivity Analysis of a Source Partitioning Method for H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> Fluxes via Large Eddy Simulations, 23rd Symposium on Boundary Layers and Turbulence of the American Meteorological Society, Oklahoma City, United States.
- Kutsch, W.L., Aubinet, M., Buchmann, N., Smith, P., Osborne, B., Eugster, W., Wattenbach, M., Schrumpf, M., Schulze, E.D., Tomelleri, E. et al., 2010. The net biome production of full crop rotations in Europe. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 139(3): 336-345.
- Lasslop, G., Reichstein, M., Papale, D., Richardson, A.D., Arneth, A., Barr, A., Stoy, P. und Wohlfahrt, G., 2010. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. *Global Change Biology*, 16(1): 187-208.
- Lüers, K., 2019. Ausgetrocknet, effzet - das Magazin aus dem Forschungszentrum Jülich. Forschungszentrum Jülich, Jülich, pp. 3.
- Mengel-Driefert, D., 2015. Wetterkapriolen im November gehen weiter, Lokalteil Jülich der Aachener Zeitung. 18.11.2015, Aachen.
- Moffat, A.M., Papale, D., Reichstein, M., Hollinger, D.Y., Richardson, A.D., Barr, A.G., Beckstein, C., Braswell, B.H., Churkina, G., Desai, A.R. et al., 2007. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. *Agric. For. Meteorol.*, 147(3-4): 209-232.
- Nelson, J.A., Carvalhais, N., Cuntz, M., Delpierre, N., Knauer, J., Migliavacca, M., Ogee, J., Reichstein, M. und Jung, M., 2017. Data Driven Estimation of Transpiration from Net Water Fluxes: the TEA Algorithm, American Geophysical Union Fall Meeting, 11 Dec 2017 - 15 Dec 2017, New Orleans (United States of America).
- Ney, P., 2019. Partitioning of carbon dioxide exchange in rapidly and slowly changing ecosystems. Ph.D. Thesis, Bonn, Jülich, 95 pp.
- Ney, P. und Graf, A., 2018. High-Resolution Vertical Profile Measurements for Carbon Dioxide and Water Vapour Concentrations Within and Above Crop Canopies. *Bound.-Layer Meteorol.*, 166(3): 449-473.
- Ney, P., Graf, A., Bogen, H., Dieckruger, B., Drue, C., Esser, O., Heinemann, G., Klosterhalfen, A., Pick, K., Putz, T. et al., 2019. CO<sub>2</sub> fluxes before and after partial deforestation of a Central European spruce forest. *Agric. For. Meteorol.*, 274: 61-74.
- Ney, P., Graf, A., Drue, C., Esser, O., Klosterhalfen, A., Valler, V., Pick, K. und Vereecken, H., 2017a. Searching Sinks and Sources: CO<sub>2</sub> Fluxes Before and After Partial Deforestation of a Spruce Forest, American Geophysical Union Fall Meeting, 11 Dec 2017 - 15 Dec 2017, New Orleans (United States of America).
- Ney, P., Graf, A., Schmidt, M., Klosterhalfen, A. und Vereecken, H., 2016a. A high-resolution profile technique for CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O at crop sites and implications for their flux source partitioning, 2nd ICOS Science conference, 27 Sep 2016 - 29 Sep 2016, Helsinki (Finland).
- Ney, P., Graf, A., Schmidt, M., Valler, V., Vereecken, H., Bogen, H., Dieckruger, B., Drue, C., Esser, O., Heinemann, G. et al., 2018a. CO<sub>2</sub> fluxes before and after partial deforestation of a spruce forest, DLR Conference on Climate Change, Köln, Germany.

- Ney, P., Graf, A., Schmidt, M. und Vereecken, H., in Vorbereitung. The carbon budget of a 4-year crop rotation: using three different non-linear regression CO<sub>2</sub> flux partitioning approaches.
- Ney, P., Klosterhalfen, A., Quade, M., Rothfuss, Y., Brüggemann, N., Schmidt, M., Esser, O., Reichenau, T.G., Vereecken, H. und Graf, A., 2016b. Vergleich datenbasierter und instrumenteller Ansätze zum Source-Partitioning von Kohlenstoffdioxidflüssen in einem Winterweizenbestand, DACH Meteorologentagung 2016, 14 Mar 2016 - 18 Mar 2016, Berlin (Germany).
- Ney, P., Quade, M., Klosterhalfen, A., Rothfuss, Y. und Graf, A., 2017b. A HIGH-RESOLUTION MEASUREMENT TECHNIQUE FOR VERTICAL CO<sub>2</sub> AND H<sub>2</sub>O PROFILES WITHIN AND ABOVE CROP CANOPIES AND ITS USE FOR FLUX PARTITIONING, Nachwuchsgruppen Globaler Wandel 4+1 Status-Konferenz, Köln, Germany.
- Ney, P., Quade, M., Klosterhalfen, A., Rothfuss, Y. und Graf, A., 2017c. A high-resolution measurement technique for vertical CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O profiles within and above crop canopies and its use for flux partitioning, TERENO Workshop 2017, 26 Sep 2017 - 27 Sep 2017, Garmisch-Partenkirchen (Germany).
- Ney, P., Quade, M., Rothfuss, Y., Brüggemann, K., Vereecken, H. und Graf, A., 2015. Instrumental Approaches to Source Partitioning of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O Fluxes, Potsdam GHG Flux Workshop, 19 Oct 2015 - 23 Oct 2015, Potsdam (Germany).
- Ney, P., Schmidt, M., Klosterhalfen, A. und Graf, A., 2017d. A high-resolution measurement technique for vertical CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O profiles within and above crop canopies and its use for flux partitioning, EGU General Assembly 2017, 23 Apr 2017 - 28 Apr 2017, Wien (Austria).
- Ney, P., Schmidt, M., Valler, V., Vereecken, H., Graf, A., Bogen, H., Diekkrüger, B., Drüe, C., Esser, O., Heinemann, G. et al., 2018b. CO<sub>2</sub> fluxes before and after partial deforestation of a spruce forest, 3rd ICOS science conference, Prague, Czech Republic.
- Pavelka, M., Acosta, M., Kiese, R., Altimir, N., Brummer, C., Crill, P., Darenova, E., Fuss, R., Gielen, B., Graf, A. et al., 2018. Standardisation of chamber technique for CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes measurements from terrestrial ecosystems. *Int. Agrophys.*, 32(4): 569-+.
- Pick, K., 2018. Einfluss von Entfichtung und Wildschutz auf die Bodenrespiration und Vegetation im Nationalpark Eifel (Wüstebachtal). Master Thesis, RWTH Aachen, 75 pp.
- Quade, M., 2019. Partitioning Water Vapor Fluxes by the use of their Water Stable Isotopologues: From the Lab to the Field. Ph.D. Thesis, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, 113 pp.
- Quade, M., Brüggemann, N., Graf, A. und Rothfuss, Y., 2017a. Determination of kinetic isotopic fractionation of water during bare soil evaporation, European Geoscience Union General Assembly 2017, 24 Apr 2017 - 28 Apr 2017, Vienna (Austria).
- Quade, M., Brüggemann, N., Graf, A. und Rothfuss, Y., 2017b. Partitioning evapotranspiration fluxes with water stable isotopic measurements: from the lab to the field, American Geophysical Union Fall Meeting, 11 Dec 2017 - 15 Dec 2017, New Orleans (USA).
- Quade, M., Brüggemann, N., Graf, A., Vanderborght, J., Vereecken, H. und Rothfuss, Y., 2018. Investigation of Kinetic Isotopic Fractionation of Water During Bare Soil Evaporation. *Water resources research*, 54: 6909-6928.
- Quade, M., Dubbert, M., Brüggemann, N., Graf, A., Vereecken, H. und Rothfuss, Y., in Vorbereitung. Progress and Challenges of Isotope Based Source Partitioning of Evapotranspiration.
- Quade, M., Klosterhalfen, A., Graf, A., Brüggemann, N., Hermes, N., Vereecken, H. und Rothfuss, Y., 2019. In-situ monitoring of soil water isotopic composition for partitioning of evapotranspiration during one growing season of sugar beet (*Beta vulgaris*). *Agric. For. Meteorol.*, 266-267: 53-64.
- Raupach, M.R., 1989. A practical lagrangian method for relating scalar concentrations to source distributions in vegetation canopies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 115(487): 609-632.
- Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Gilmanov, T., Granier, A. et al., 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11(9): 1424-1439.

- Rochette, P., 2008. No-till only increases N<sub>2</sub>O emissions in poorly-aerated soils. *Soil & Tillage Research*, 101(1-2): 97-100.
- Rotenberg, E. und Yakir, D., 2010. Contribution of Semi-Arid Forests to the Climate System. *Science*, 327(5964): 451-454.
- Rothfuss, Y., Vereecken, H. und Bruggemann, N., 2013. Monitoring water stable isotopic composition in soils using gas-permeable tubing and infrared laser absorption spectroscopy. *Water Resources Research*, 49(6): 3747-3755.
- Ruppert, J., Mauder, M., Thomas, C. und Luers, J., 2006. Innovative gap-filling strategy for annual SUMS of CO<sub>2</sub> net ecosystem exchange. *Agric. For. Meteorol.*, 138(1-4): 5-18.
- Santos, E.A., Wagner-Riddle, C., Warland, J.S. und Brown, S., 2011. Applying a Lagrangian dispersion analysis to infer carbon dioxide and latent heat fluxes in a corn canopy. *Agric. For. Meteorol.*, 151(5): 620-632.
- Scanlon, T.M. und Kustas, W.P., 2010. Partitioning carbon dioxide and water vapor fluxes using correlation analysis. *Agric. For. Meteorol.*, 150(1): 89-99.
- Scanlon, T.M. und Sahu, P., 2008. On the correlation structure of water vapor and carbon dioxide in the atmospheric surface layer: A basis for flux partitioning. *Water Resources Research*, 44(10).
- Schickling, A., Matveeva, M., Damm, A., Schween, J.H., Wahner, A., Graf, A., Crewell, S. und Rascher, U., 2016. Combining Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence and Photochemical Reflectance Index Improves Diurnal Modeling of Gross Primary Productivity. *Remote Sens.*, 8(7): 18.
- Schiffer, H., 2015. Feldforschung im doppelten Wortsinn., Lokalteil Jülich der Aachener Zeitung. 17.09.2015, Aachen.
- Schlößer, T. und Kreklau, S., 2018. Exponat auf der Ausstellung: Arbeitswelten der Zukunft, MS Wissenschaft, 15. Mai bis 22. Oktober 2018.
- Schmidt, M., Graf, A., Montzka, C., Klosterhalfen, A., Wilken und Vereecken, H., 2016a. Impact of the new European greening rules on regional CO<sub>2</sub> fluxes in the intensively used northern Rur catchment, Germany, 32nd Conference on Agricultural and Forest Meteorology, American Meteorology Society, 20 Jun 2016 - 24 Jun 2016, Salt Lake City (USA).
- Schmidt, M., Graf, A., Montzka, C. und Vereecken, H., 2016b. Effects of the new European greening rules on local and regional CO<sub>2</sub> fluxes. An Analysis based on the intensively used northern Rur catchment in Western Germany, 2nd ICOS Science Conference, 27 Sep 2016 - 29 Sep 2016, Helsinki (Finland).
- Schmidt, M., Graf, A., Montzka, C. und Vereecken, H., 2017a. Using Carbon flux network data to investigate the impact of new European greening rules on carbon budgets - a case study, European Geosciences Union General Assembly, 24 Apr 2017 - 28 Apr 2017, Vienna (Austria).
- Schmidt, M., Graf, A., Ney, P., Klosterhalfen, A., Montzka, C. und Vereecken, H., 2017b. Zum Einfluss von Zwischenfruchtanbau auf die Klimabilanz landwirtschaftlicher Flächen, Deutsche IPCC-Jahrestagung 2017, 20 Feb 2017 - 21 Feb 2017, Nauen (Germany).
- Schmidt, M., Reichenau, T. und Schneider, K., 2012. The carbon budget of a winter wheat field: an eddy covariance analysis of seasonal and inter-annual variability Submitted to *Agricultural and Forest Meteorology*.
- Schween, J.H., 2002. Erweiterung der 'Localized Near Field' Theorie zur Bestimmung von Quellstärken bei beliebiger thermischer Schichtung in einem Waldbestand, Ludwig-Maximilians-Universität München, München, 153 pp.
- Smith, P., Nkem, J., Calvin, K., Campbell, D., Cherubini, F., Grassi, G., Korotkov, V., Hoang, A.L., Lwasa, S., McElwee, P. et al., 2019. Interlinkages between Desertification, Land Degradation, Food Security and Greenhouse Gas Fluxes: Synergies, Trade-offs and Integrated Response Options. In: P.R. Shukla et al. (Editors), *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, pp. 551-672.
- Stimler, K., Montzka, S.A., Berry, J.A., Rudich, Y. und Yakir, D., 2010. Relationships between carbonyl sulfide (COS) and CO(2) during leaf gas exchange. *New Phytol.*, 186(4): 869-878.

- Stoy, P.C., El-Madany, T.S., Fisher, J.B., Gentine, P., Gerken, T., Good, S.P., Klosterhalfen, A., Liu, S.G., Miralles, D.G., Perez-Priego, O. et al., 2019. Reviews and syntheses: Turning the challenges of partitioning ecosystem evaporation and transpiration into opportunities. *Biogeosciences*, 16(19): 3747-3775.
- Stoy, P.C., Katul, G.G., Siqueira, M.B.S., Juang, J.Y., Novick, K.A., Uebelherr, J.M. und Oren, R., 2006. An evaluation of models for partitioning eddy covariance-measured net ecosystem exchange into photosynthesis and respiration. *Agric. For. Meteorol.*, 141(1): 2-18.
- Suleau, M., Moureaux, C., Dufranne, D., Buysse, P., Bodson, B., Destain, J.P., Heinesch, B., Debacq, A. und Aubinet, M., 2011. Respiration of three Belgian crops: Partitioning of total ecosystem respiration in its heterotrophic, above- and below-ground autotrophic components. *Agric. For. Meteorol.*, 151(5): 633-643.
- Thomas, C., Martin, J.G., Goeckede, M., Siqueira, M.B., Foken, T., Law, B.E., Loescher, H.W. und Katul, G., 2008. Estimating daytime subcanopy respiration from conditional sampling methods applied to multi-scalar high frequency turbulence time series. *Agric. For. Meteorol.*, 148(8-9): 1210-1229.
- Vila-Guerau de Arellano, J., Hartogensis, O., Schmidt, M., Klosterhalfen, A., Ney, P., Brüggemann, N., Graf, A., Quade, M., Matveeva, M., Röckmann, T. et al., 2018. CloudRoots – an integrated measurement and modelling approach for soil-plant-atmosphere interactions applied to an ICOS site, 3rd ICOS science conference, Prague, Czech Republic.
- Vila-Guerau de Arellano, J., Ney, P., Hartogensis, O.K., de Boer, H.J., van Diepen, K., Emin, D., de Groot, G., Klosterhalfen, A., Langensiepen, M., Matveeva, M. et al., in Druck. CloudRoots: Integration of advanced instrumental techniques and process modelling of sub-hourly and sub-kilometre land-atmosphere interactions. *Biogeosciences*.
- Warland, J.S. und Thurtell, G.W., 2000. A Lagrangian solution to the relationship between a distributed source and concentration profile. *Bound.-Layer Meteorol.*, 96(3): 453-471.
- Wiekenkamp, I., Huisman, J.A., Bogena, H., Graf, A., Lin, H.S., Drüe, C. und Vereecken, H., 2016. Changes in measured spatiotemporal patterns of hydrological response after partial deforestation in a headwater catchment. *Journal of hydrology*, 542: 648 - 661.
- Wiesmeier, M., Poeplau, C., Sierra, C.A., Maier, H., Fruhauf, C., Hubner, R., Kuhnelt, A., Sporlein, P., Geuss, U., Hangen, E. et al., 2016. Projected loss of soil organic carbon in temperate agricultural soils in the 21st century: effects of climate change and carbon input trends. *Sci Rep*, 6: 17.
- Wutzler, T., Lucas-Moffat, A., Migliavacca, M., Knauer, J., Sickel, K., Sigut, L., Menzer, O. und Reichstein, M., 2018. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REdDyProc. *Biogeosciences*, 15(16): 5015-5030.
- Xu, L.K., Furtaw, M.D., Madsen, R.A., Garcia, R.L., Anderson, D.J. und McDermitt, D.K., 2006. On maintaining pressure equilibrium between a soil CO<sub>2</sub> flux chamber and the ambient air. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111(D8).
- Zeeman, M.J., Eugster, W. und Thomas, C.K., 2013. Concurrency of Coherent Structures and Conditionally Sampled Daytime Sub-canopy Respiration. *Bound.-Layer Meteorol.*, 146(1): 1-15.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Instrumental and Data-driven Approaches to Source-Partitioning of Greenhouse Gas Fluxes: Comparison, Combination, Advancement (IDAS-GHG)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Graf, Alexander; Klosterhalfen, Anne; Ney, Patrizia; Quade, Maria; Rothfuss, Youri; Weymann, Daniel; Esser, Odilia; Hermes, Normen; Gottschalk, Astrid; Valler, Veronika; Pick, Katharina; Noel, Josef; Bütow, Alexander; Brüggemann, Nicolas; Vereecken, Harry	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.07.2019
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ) Institut für Bio- und Geowissenschaften – Agrosphäre (IBG-3) Wilhelm-Johnen-Straße 52428 Jülich	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen
	11. Seitenzahl 43
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 93
	14. Tabellen 5
	15. Abbildungen 23
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das Vorhaben „IDAS-GHG“ im BMBF-Programm „Nachwuchsgruppen globaler Wandel 4+1“ diente der Entwicklung verbesserter Verfahren zur Abschätzung von Treibhausgasflüssen zwischen der Landoberfläche (z.B. Agrar- und Forstökosystemen) und der Atmosphäre. Gegenstand war insbesondere eine bessere Trennung der verschiedenen Quellen (z.B. Photosynthese und Atmung, Transpiration und Evaporation). Diese ist Voraussetzung für eine bessere Parametrisierung und Validierung von Modellen, die Rückkopplungen der Biosphäre auf den Klimawandel abschätzen. Derartige Ansätze zur Flusspartitionierung lassen sich grob in vier Gruppen unterteilen, von denen sich die ersten beiden („GapFilling“-Algorithmen und die Auswertung hochauflösender Turbulenzdaten) auf vorhandene Daten standardmäßig ausgerüsteter Eddy-Kovarianz-Stationen stützen, während die dritte (Hauben- und Profilmessungen) und vierte (Tracermessungen, insbesondere solche auf Basis der natürlichen Abundanz stabiler Isotope) zusätzliche Instrumentierung erfordern. Im Rahmen des Projektes wurden existierende Methoden auf Feldmessungen angewandt und verglichen, Erklärungen für Schwachstellen in einigen dieser Methoden erarbeitet und veröffentlicht. Zu jedem Ansatz wurden Weiterentwicklungen der Methoden erarbeitet und in den Vergleich einbezogen; unter anderem wurde im Rahmen des Projekts eine Anlage zur stufenlosen, hochauflösenden Messung von Vertikalprofilen von Treibhausgasen in und über landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen entwickelt. Weiterhin wurden auf Basis der erarbeiteten Datensätze und Methoden vier Beispielfragestellungen zur Klimarelevanz von Landnutzungsentscheidungen bearbeitet – die Reaktion eines extensiven Gründachs auf anhaltende Hitze und Trockenheit, die Rolle des Zwischenfruchtbaus in der Treibhausgasbilanz landwirtschaftlicher Fruchtfolgen, die klimatischen Auswirkungen eines Waldumbaus von Fichtenforst zu einer Laubwaldsukzession, und die Rückwirkungen verschiedener Landnutzungstypen wie Acker, Grünland und Wald auf die Atmosphäre während der Dürre 2018 in Europa.	
19. Schlagwörter Adaptation, Eddy-Kovarianz, Klima, Kohlendioxid, Lachgas, Landnutzung, Landwirtschaft, Mitigation, Stoffflüsse, Wasserdampf	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Instrumental and Data-driven Approaches to Source-Partitioning of Greenhouse Gas Fluxes: Comparison, Combination, Advancement (IDAS-GHG)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Graf, Alexander; Klosterhalfen, Anne; Ney, Patrizia; Quade, Maria; Rothfuss, Youri; Weymann, Daniel; Esser, Odilia; Hermes, Normen; Gottschalk, Astrid; Valler, Veronika; Pick, Katharina; Noel, Josef; Bütow, Alexander; Brüggemann, Nicolas; Vereecken, Harry	5. end of project July 31, 2019
	6. publication date
	7. form of publication Report
8. performing organization(s) (name, address) Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ) Institut für Bio- und Geowissenschaften – Agrosphäre (IBG-3) Wilhelm-Johnen-Straße 52428 Jülich	9. originator's report no.
	10. reference no. 01LN1313A
	11. no. of pages 43
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 93
	14. no. of tables 5
	15. no. of figures 23
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract The project "IDAS-GHG" was funded within the framework of the BMBF programme "Junior Research Groups Global Change 4+1". It served to develop improved methods for estimating greenhouse gas fluxes between the land surface (e.g. agricultural and forest ecosystems) and the atmosphere. In particular, the aim was to improve methods for their source partitioning (e.g. photosynthesis and respiration, transpiration and evaporation). This is a prerequisite for a better parameterisation and validation of models that assess feedbacks of the biosphere to climate change. Such methods can be roughly divided into four groups, the first two of which ("gap filling" algorithms and the evaluation of high-resolution turbulence data) are based on existing data from standard eddy-covariance stations, while the third (chamber and profile measurements) and fourth (tracer measurements, with a focus on the natural abundance of stable isotopes) require additional instrumentation. We applied existing methods and compared them to field measurements. Weaknesses in some of these methods were identified, explained, and published. For each approach, further improvements of the methods were developed and included in the comparison; including a system for the seamless, high-resolution measurement of vertical profiles of greenhouse gases in and above agricultural crop stands. Furthermore, we investigated four example questions on the climate relevance of land use decisions, based on the datasets and methods developed within the project. In particular, the reaction of an extensive urban green roof to persistent heat and drought, the role of intercropping in the greenhouse gas balance of agricultural crop rotations, the climate effects of forest conversion from spruce forest to deciduous forest succession, and the feedbacks of different land use types such as arable land, grassland and forest on the atmosphere during the 2018 drought in Europe were investigated.	
19. keywords Adaptation, eddy-covariance, climate, carbon dioxide, nitrous oxide, agriculture, mitigation, matter fluxes, water vapour	
20. publisher	21. price